

密级:

论文编号:

中国农业科学院 学位论文

和面参数对小麦蛋白理化特性影响的研究
**Effect of Parameters of Mixing Flour on Physical and Chemical
Properties of Wheat Protein**

硕 士 研 究 生: 李芳

指 导 教 师: 张波 研究员

申 请 学 位 类 别: 工学硕士

专 业: 农产品加工及贮藏工程

研 究 方 向: 农产品加工理论与技术

培 养 单 位: 农产品加工研究所

研究生院

2019 年 5 月

密级:

论文编号:

中国农业科学院 学位论文

和面参数对小麦蛋白理化特性影响的研究
Effect of Parameters of Mixing Flour on Physical and Chemical
Properties of Wheat Protein

硕 士 研 究 生: 李芳

指 导 教 师: 张波 研究员

申 请 学 位 类 别: 工学硕士

专 业: 农产品加工及贮藏工程

研 究 方 向: 农产品加工理论与技术

培 养 单 位: 农产品加工研究所

研究生院

2019 年 5 月

Secrecy:

No.

Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation

Effect of Parameters of Mixing Flour on Physical and Chemical Properties of Wheat Protein

M.S. Candidate: Fang Li

Supervisor: Prof. Bo Zhang

Major: Agro-food Processing and Storage Engineering

Specialty: Agricultural Process Theory and Technology

May 2019

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：李芳

时间：2019年5月29日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

研究生签名：李芳

时间：2019年5月29日

导师签名：王世

时间：2019年5月29日

中国农业科学院

硕士学位论文评阅人、答辩委员会签名表

论文题目		和面对小麦蛋白理化特性影响的研究				
论文作者		李芳	专 业	农产品加工 及贮藏工程	研究方向	农产品加工 理论与技术
指导教师		张波		培养单位（研究所）		农产品加工研究所
姓名		职称	硕(博) 导师	单 位	专 业	签 名
评 阅 人			硕导□ 博导□			
			硕导□ 博导□			
答 辩 主 席	张民	教授	硕导□ 博导■	天津农学院	食品化学	张民
答 辩 委 员	程永强	教授	硕导□ 博导■	中国农业大学	粮食加工、食 品物性评价	程永强
	郭庆军	研究员	硕导□ 博导■	中科院地理所	环境质量与修 复	郭庆军
	王静	教授	硕导□ 博导■	北京工商大学	食品功能因子 与品质改良	王静
	刘冬成	研究员	硕导□ 博导■	北京科技大学	小麦遗传育种	刘冬成
			硕导□ 博导□			
			硕导□ 博导□			
			硕导□ 博导□			
会议记录（秘书）		李明				
论文答辩时间地点		2019 年 5 月 农产品加工研究所				

摘要

面粉加水 and 和面是面制品制造的关键环节,是小麦面粉在水分的作用下,蛋白质形成面筋网络,其他组分填充至网络结构中,使面团具有黏弹性的过程,是各种面制品制作的基础。面筋形成过程中蛋白质聚集体和水分子相互吸引,促进蛋白质聚集体溶解,使蛋白质从紧密堆积的结构转变为水溶液中的独立分子,这些分子表面的亲水基团,由于水分子的存在和分子间距的增加,自由度增加,尤其在侧链的单链处允许侧链发生旋转,蛋白质分子表面反应基团生成化学键的机会增加,利于分子间的缔合,促进面筋网状结构形成。这些分子内部的疏水基团,由于表面亲水基团的展开,疏水位点暴露的机会增加。此过程中的溶剂化作用改变了蛋白质聚集体的结构,在面团光散射特性、蛋白质组分含量、蛋白质组分光散射特性等方面发生变化。

研究以河北金沙河面业有限责任公司的粗粒粉为试验材料,以粉质仪和面和挤压机和面为研究过程,以粉质仪和面时间(0、4.5、9.0、35.0、55.0min)、挤压物料含水率(25、35、45%)、机筒温度(30、40、50℃)、螺杆转速(100、150、200rpm)、有无模头、挤压次数(1、2、3次)为试验因素和水平,检测分析十二烷基硫酸钠(SDS)可溶性蛋白、SDS不可溶性蛋白(谷蛋白大聚集体,GMP)等含量,面团和挤压面团冻干粉的光散射特性,面团和挤压面团 SDS 溶液、SDS 溶液+超声溶液诱导提取可溶物的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数、粒径分布等光散射特性,进一步理解粉质仪和面机制和挤压机和面机制,以期为挤压和面工艺参数的选择提供参考。

结果显示:不同和面时间面团的单位机械能耗(SME)为1.9~48.8kJ/kg,不同挤压参数面团的 SME 为30.09~178.14kJ/kg;不同和面时间面团的 SDS 可溶性蛋白含量为81.7~99.1 mg/g, GMP 含量为18.3~31.0 mg/g,不同挤压参数面团的 SDS 可溶性蛋白含量为81.7~100.7 mg/g, GMP 含量为18.3~31.1 mg/g。随着和面时间和 SME 的增加,SDS 可溶性蛋白含量增加,GMP 含量降低;不同和面时间面团中光子运动的平均自由程随着面团稠度增加而增加,面团稠度下降后,光子运动的平均自由程降低。不同挤压参数面团随 SME 增加,光子运动的平均自由程有降低的趋势;不同和面时间面团的 SDS 可溶性蛋白的 M_w 先增加至 $14.25 \times 10^5 \text{ mol/g}$,55min 后降低至 $10.28 \times 10^5 \text{ mol/g}$,超声可溶性蛋白的 M_w 约为 $1.500 \times 10^6 \text{ mol/g}$ 。不同挤压参数面团随 SME 增加,SDS 可溶性蛋白的 M_w 先增加后降低,超声可溶性蛋白在 $2.000 \sim 2.500 \times 10^6 \text{ mol/g}$ 的范围内波动, R_{gz} 为增加的趋势。

结论:光子在面团中运动的平均自由程提示了和面过程包括小麦粉水合、面筋网络结构形成和被破坏的三个阶段。面团中 SDS 可溶性蛋白含量与 SME 呈线性正相关,GMP 含量与 SME 呈线性负相关。挤压和面效果介于粉质仪和面和单轴剪切之间。随着粉质仪和面时间的延长,面团中 SDS 可溶性蛋白的含量逐渐增加,结构由致密变得疏松,形貌从球状变为支链状;超声可溶性蛋白主要为松散的结构,形貌为超支链,松散连接的聚合物和空心球体。

关键词: 和面,小麦蛋白质,光散射特性

Abstract

Mixing flour after adding water to flour is a key part of the pasta manufacture. Under the action of water, wheat flour forms the gluten network, and other components are filled into the network structure to make the dough viscoelastic, which lays the foundation for the pasta manufacture. Protein aggregates and water molecules attract each other during the gluten formation, which promotes the dissolution of protein aggregates, and transforms proteins from closely packed structures into independent molecules in aqueous solution. The hydrophilic groups on the surface of these molecules increase the degree of freedom due to the presence of water molecules and the increase of the molecular spacing, especially in the single chain of the side chain, which allows the side chain to rotate. And the opportunity for the surface reactive groups of the protein molecule to generate chemical bonds increases. This facilitates the association between molecules and promotes the formation of gluten network. The hydrophobic groups inside these molecules increase the chance of hydrophobic sites exposure due to the unfolding of hydrophilic groups on the surface. The solvation in this process changes the structure of protein aggregates, including the light scattering characteristics in the dough, the content and the light scattering characteristics of protein components.

The research uses the semolina of Hebei Jinshahe Noodle Group Co., Ltd. as the test material, and the farinograph and extruder to mixing semolina are the research process. The mixing time of farinograph (0, 4.5, 9.0, 35.0, 55.0 min), the barrel moisture (25, 35, 45%), the barrel temperature (30, 40, 50°C), the screw speed (100, 150, 200 rpm), with or without die and the extrusion rounds (1, 2, 3 rounds) is the test factor and level. Detecting and analyzing the content of sodium dodecyl sulfate (SDS) soluble protein, SDS-insoluble protein (GMP), the diffusion behavior of photon and extruded flour, the weight average molar mass (M_w), z-average radius of gyration (R_{gz}), polydispersity index, particle size distribution of SDS-soluble protein and sonication-solution protein and other light scattering characteristics and aggregate morphology. Further understand the mechanism of mixing flour by farinograph and extruder, in order to provide the reference for selection of the extrusion mixing process parameters.

The main results are as follows: The specific mechanical energy (SME) of dough in different mixing time is 1.9~48.8 kJ/kg, and the SME of different extrusion parameters is 30.09~178.14 kJ/kg. The SDS-soluble protein content of the dough at different mixing time is 81.7~99.1 mg/g, and the GMP content is 18.3~31.0 mg/g. The SDS-soluble protein content of the dough with different extrusion parameters was 81.7~100.7 mg/g, and the GMP content was 18.3~31.1 mg/g. As the mixing time and SME increase, SDS-soluble protein content increases and the GMP content decreases. The photon transport mean free path in the dough at different mixing times increases as the consistency of dough increases, and consistency of diffusion decreases after consistency of dough decreases. The photon transport mean free path in the dough with different extrusion parameters decreased with the increase of SME. The M_w of the SDS-soluble protein of the dough at different mixing time was increased to 14.25×10^5 mol/g, and decreased to 10.28×10^5 mol/g after 55 min, and the M_w of sonication-soluble protein was about 1.500×10^6 mol/g. The

dough with different extrusion parameters increased with SME, and the M_w and R_{gz} of SDS-soluble protein increased and then decreased. The M_w of sonication-soluble protein fluctuates at $2.000\sim 2.500\times 10^6\text{mol/g}$, and the R_{gz} has upward trend.

Conclusion: The photon transport mean free path in the dough suggests that the process of mixing flour includes wheat flour hydration, gluten network formation and gluten network structure is broken. The content of SDS soluble protein was linearly positively correlated with SME, and the GMP content was linearly negatively correlated with SME. The effect of extrusion mixing is between the farinograph mixing and the uniaxial shear. The content of SDS soluble protein in the dough gradually increased, the structure became loose from compact and the morphology changed from spherical to branched with the increase of mixing time. Sonication soluble proteins are mainly loose structures with super-branched, loosely connected polymers and hollow spheres.

Key words: Mixing flour, Wheat protein, Light scattering characteristics

目 录

第一章 引 言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 小麦蛋白质及其组分.....	1
1.2.1 麦醇溶蛋白.....	1
1.2.2 麦谷蛋白.....	2
1.3 影响小麦蛋白理化特性的因素.....	2
1.3.1 麦谷蛋白聚集体.....	2
1.3.2 含水率.....	3
1.3.3 剪切力.....	3
1.3.4 压力.....	4
1.3.5 温度.....	4
1.3.6 作用时间.....	5
1.3.7 食盐.....	6
1.4 和面技术和设备.....	6
1.5 研究切入点.....	7
1.6 研究目的和意义.....	7
1.7 技术路线.....	7
第二章 和面参数对面团光散射特性的影响.....	8
2.1 引言.....	8
2.2 材料与方法.....	8
2.2.1 试验材料.....	8
2.2.2 试验设计.....	8
2.2.3 试验仪器.....	9
2.2.4 试验方法.....	10
2.3 结果与分析.....	11
2.3.1 粉质仪和面对面团光散射特性的影响.....	11
2.3.2 挤压机和面对面团光散射特性的影响.....	12

2.4 讨论.....	19
2.5 小结.....	20
第三章 和面参数对小麦蛋白组分含量的影响.....	21
3.1 引言.....	21
3.2 材料与方法.....	21
3.2.1 试验材料.....	21
3.2.2 试验设计.....	22
3.2.3 试验仪器.....	22
3.2.4 试验方法.....	22
3.3 结果与分析.....	23
3.3.1 小麦粉的粉质响应参数.....	23
3.3.2 粉质仪和面对小麦蛋白组分含量的影响.....	24
3.3.3 小麦粉的挤压参数.....	24
3.3.4 挤压机和面的蛋白质回收率.....	25
3.3.5 挤压参数对小麦蛋白组分含量的影响.....	25
3.4 讨论.....	29
3.5 小结.....	31
第四章 和面参数对蛋白组分光散射特性的影响.....	32
4.1 引言.....	32
4.2 材料与方法.....	32
4.2.1 试验材料.....	32
4.2.2 试验设计.....	32
4.2.3 试验仪器.....	33
4.2.4 试验方法.....	33
4.3 结果与分析.....	33
4.3.1 粉质仪和面对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响.....	33
4.3.2 粉质仪和面对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响.....	39
4.3.3 挤压机和面对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响.....	43

4.3.4 挤压机和面对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响.....57

4.4 讨论.....68

4.5 小结.....69

第五章 讨论与结论.....70

5.1 讨论.....70

5.2 问题与展望.....70

5.3 结论.....70

参考文献.....72

致 谢.....78

作者简历.....79

英文缩略表

英文缩写	英文全称	中文名称
A-PAGE	Acid polyacrylamide gel electrophoresis	酸性聚丙烯酰胺凝胶
SDS-PAGE	Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis	十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶
LMW-GS	Low molecular weight glutenin subunits	低分子量麦谷蛋白亚基
HMW-GS	High molecular weight glutenin subunits	高分子量麦谷蛋白亚基
SDS	Sodium dodecyl sulfate	十二烷基硫酸钠
GMP	Glutenin macropolymer	谷蛋白大聚集体
DTT	dithiothreitol	二硫苏糖醇
SME	Specific mechanical energy	单位机械能耗
HPLC	High Performance Liquid Chromatography	高效液相色谱
MALLS	Multi-angle laser light scattering	多角度激光光散射
DWS	Diffusing Wave Spectroscopy	扩散波谱
MSD	Mean Square Displacement	均方位移

第一章 引言

1.1 研究背景

小麦是中国重要的粮食作物，2016 年产量为 1.3 亿吨，70 %用于制粉，以及制造面条、馒头和饺子等面制品，是中国北方居民口粮的主要来源。小麦的醇溶蛋白和谷蛋白，可形成其他谷物所不具备的面筋，使面团具有独特的粘弹性。小麦的这一特性是其加工制造种类繁多面制食品的基础。小麦面粉加水混合后，线性的谷蛋白聚集体互相缠结，球状的醇溶蛋白等填充其中形成面筋，面筋的质量影响着产品质量(D'Ovidio and Masci, 2004)。刘锐等(2011)认为，蛋白质质量指标在一定范围内，如 Zeleny 沉降值小于等于 45.9 mL，稳定时间小于等于 15.8 min，延伸性小于等于 20.3 cm 时，蛋白质质量的提高有助于改善面条评分。质量指标超过上述限值，则对面条评分有负面影响。

和面是小麦粉和水相互作用，形成面絮的过程，其本质是小麦粉中蛋白质水合逐渐形成面筋网络的过程(李韦谨等, 2011)。和面过程受到加水量、温度、压力、和面时间以及和面方式等因素的影响。分析和面过程中影响小麦蛋白理化特性的因素以及和面对小麦蛋白理化特性的影响，为面制品的生产提供理论和技术指导，为进一步理解面团形成的机理提供重要的依据。

粉质仪可以用来评价小麦基面粉内在品质的重要方法手段，并广泛地用于小麦育种、制粉生产、食品加工等领域，指导面制食品加工的开发利用(刘媛媛等, 2004)。粉质仪和面是研究和面过程中常用的和面方式。挤压和面的方式是将物料的输送、混合、剪切、加水等操作过程整合在一起，具有适用物料范围广、能量高效利用、连续化等优点。

1.2 小麦蛋白质及其组分

小麦蛋白质可分为两大类：非面筋蛋白和面筋蛋白。非面筋蛋白，占小麦蛋白总量的 15-20%，由可溶于水的清蛋白和不溶于水但可溶于稀盐溶液的球蛋白组成；面筋蛋白，占小麦蛋白总量的 80-85%，是小麦的贮藏蛋白(Borghet et al., 2005)。按照 T.B.Osborne 的分类方法，面筋蛋白质主要包括麦醇溶蛋白和麦谷蛋白，是小麦蛋白分别经过水溶、稀盐水溶后的沉淀物，其中继续溶于 70 % 乙醇溶液的组分为麦醇溶蛋白，溶于稀碱的组分为麦谷蛋白。在面团形成过程中，单体的麦醇溶蛋白充当“增塑剂”，赋予面团粘性；麦谷蛋白主要以聚集体的形式存在，赋予面团弹性(Wieser, 2007)。

1.2.1 麦醇溶蛋白

麦醇溶蛋白为单体蛋白，通过分子内二硫键、氢键和疏水作用形成球状结构(Falcão-Rodrigues et al., 2005)，可赋予面团延展性。根据在酸性聚丙烯酰胺凝胶（acid polyacrylamide gel electrophoresis, A-PAGE）电泳上的迁移速率，分为 α/β 、 γ 和 ω 醇溶蛋白， α/β 和 γ 醇溶蛋白的分子量范围 30-50 kDa， ω 醇溶蛋白分子质量范围 45-75 kDa(马永强等, 2006)。醇溶蛋白的氮端无半胱氨酸。 α 醇溶蛋白的碳端含有 6 个半胱氨酸残基， γ 醇溶蛋白的碳端含有 8 个半胱氨酸残基，形成分子内二硫键，阻碍他们参与麦谷蛋白四级结构以及巯基与二硫键的交换反应(Delcour

et al., 2012)。ω 醇溶蛋白缺乏半胱氨酸残基(Lagrain et al., 2005; Shewry and Tatham, 1997)，通过谷氨酰胺残基上氢键与其它亚基或蛋白质结合。Müller and Wieser 等(Muller and Wieser, 1995; Wieser, 2007)研究认为，某些品种的 α 醇溶蛋白含有奇数个半胱氨酸残基，例如，克隆品种 A735 有 7 个半胱氨酸残基，它的第 7 个残基被假定能与其它谷蛋白形成分子间二硫键。这样的结合有助于具有延展性的谷蛋白网状结构的形成(Khatkar et al., 2002)。Porceddu 等认为带有奇数个半胱氨酸残基的 γ 醇溶蛋白可能会终止链扩展而阻止更大的多肽链形成。

1.2.2 麦谷蛋白

麦谷蛋白主要以聚合体的形式存在，通过分子间二硫键作用形成线状结构，赋予面团弹性。通过破坏麦谷蛋白聚集体中的疏水作用得到麦谷蛋白亚基，根据十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶(sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)上迁移速率，分为低分子量麦谷蛋白亚基(low molecular weight glutenin subunits, LMW-GS)和高分子量麦谷蛋白亚基(high molecular weight glutenin subunits, HMW-GS)(Ciaffi et al., 1999)。

LMW 的氮端只有 1 个半胱氨酸残基。LMW 分为 B-LMW (分子量 42-51 kDa)、C-LMW (分子量 30-40 kDa)、D-LMW (分子量 55-70 kDa) 三类。根据序列中第一个氨基酸种类可分为 LMW-m (第一个氨基酸为蛋氨酸) 和 LMW-s (第一个氨基酸为丝氨酸)。B-LMW 含有偶数个半胱氨酸残基，可以使分子链扩展。B-LMW 既有 m 型，也有 s 型 LMW。C-LMW 的 N 端序列一般对应 m 型 LMW。

HMW 的分子量范围 60-90 kDa，分子量较大的 x-HMW 的 N-端有 3 个半胱氨酸残基，较小 y-HMW 有 5 个半胱氨酸残基。所有 HMW 的碳端通常只有 1 个半胱氨酸残基，这是麦谷蛋白能形成分子间二硫键的基础(Lindsay and Skerritt, 1999)。

1.3 影响小麦蛋白理化特性的因素

1.3.1 麦谷蛋白聚集体

麦谷蛋白聚集体是影响面筋形成及特性的主要内因。目前有很多关于麦谷蛋白聚集体的模型，但始终没有统一的观点。近期的观点认为，HMW 形成线性链和支链结构；LMW 形成线性链结构；部分 LMW 通过分子间二硫键连接形成支链生长在线性 HMW 分子链上，形成麦谷蛋白亚基；麦谷蛋白亚基间通过氢键、疏水键等次级键连接形成麦谷蛋白聚集体。不溶于质量分数为 1.5 % 的十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)溶液的麦谷蛋白聚集体，相对分子质量较大，被称为谷蛋白大聚集体(glutenin macropolymer, GMP)(刘锐等, 2014)。Lindsay 和 Skerritt 通过考虑 GMP 中 HMW 和 LMW 质量比例(≈1:2)及其摩尔质量提出了分支模型，认为 GMP 的一个基本分子单元由 6 个 HMW，30 个 LMW 通过分子间二硫键连接形成。GMP 的含量和分子结构与小麦加工品质密切相关，决定着面筋强度和面团特性，在面制食品加工中的作用远大于可溶性麦谷蛋白聚集体和单体蛋白(Baiano et al., 2006; Ciaffi et al., 1995; D'Egidio et al., 1990; Malcolmson et al., 1993; Matsuo et al., 1982; Matsuo and Irvine, 1970)。

Don et al.(2003)研究了麦谷蛋白聚合体大小的变化与面团性质的关系, 其研究表明, 面粉、面团中 GMP 的数量和容积不同, 但在最佳混合 (time-to-peak, TTP) 时, 不同品种面粉的 GMP 颗粒的容积和大小非常相似 (0.11 L/g)。随着混合时间的增加, GMP 颗粒容积和大小都呈下降趋势。这些结果表明在面粉混合过程中, 容积不均匀的 GMP 颗粒随着混合能量的增加, 平均容积减小并趋于均匀。虽然混合降低平均容积, 但 GMP 颗粒一直存在于混合样品中, 且最终平均容积趋于均匀, 这能够优化面团的形成。GMP 颗粒容积减小有两方面原因, 二硫键和物理作用。还原剂二硫苏糖醇 (dithiothreitol, DTT) 加入到 GMP 分散体系中, 观察到特性粘度急剧下降 (0.36 L/g 下降至 0.02 L/g), 这证实了二硫键是稳定面团中 GMP 颗粒的主要作用力, 二硫键被打破会使 GMP 颗粒容积减小。Lefebvre 等人的研究表明, 面筋网络是粒子网络, 这就意味着在 0.1~100 μm 尺度, 物理作用会影响面团特性。

1.3.2 含水率

根据能否冻结, 面团中的水分为可冻结水和非冻结水。可冻结水结冰后体积增加 9%, 会挤压、破坏蛋白质三维结构。非冻结水通过与蛋白质分子表面的亲水部位以氢键相结合, 被束缚在大分子周围, 在 0°C 无法结冰, 不会出现膨胀现象, 因而不会对面筋蛋白造成挤压破坏 (Bhattacharya et al., 2003; Lu and Grant, 1999)。Lu and Seetharaman (2013)研究了面团中水分分布和流动性, 核磁共振仪 (NMR) 检测 T2 弛豫时间, 差示扫描量热仪 (DSC) 测量可冻结水含量, 发现面团含水率 25% 时, 弱结合水在 T22 未出峰, 可冻结水含量为 0, 并且这个值与小麦品种、面粉的混合程度、戊聚糖的使用都无关, 十分稳定。此结果与 Davies and Webb (1969) 的一致, 其研究也测得面团可冻结水为零时的面团含水率为 25%, 原因可能是面粉中蛋白质和淀粉能吸收的水分是定量的。

面粉与水混合, 水分首先与处于基质片段表面的蛋白质分子表层的亲水基团结合, 然后通过基质片段的细微孔隙扩散到基质内部。理论上, 含水率 25% 时, 蛋白质和水就能充分作用。水分增加会使蛋白质分子玻璃化转变温度降低, 分子链柔性增加, 构象容易变化, 如分子链的展开。随着面筋网络的完善, 水分向结构化方向发展, 与大分子的结合度增强, 面筋充分形成。加水量过少, 面筋形成不充分, 面筋蛋白不能充分水合, 形成的面团硬度大, 弹性和拉伸性都不好, 蛋白质分子扩展不够, 面团颗粒松散、黏性小。加水量过多, 可冻结水比例高, 面筋蛋白被稀释, 面团发软不成型, 失去良好的加工性能 (Diantom et al., 2016; Zhang et al., 2010)。

1.3.3 剪切力

小麦粉的球形麦谷蛋白颗粒在低剪切速率 (1 s^{-1}) 下剪切 1 min, 颗粒从球形变为椭圆形, 一些颗粒和颗粒间互相粘附。此时停止剪切, 麦谷蛋白颗粒的轮廓仍然清晰, 粒子发生部分聚集, 但不能回复到初始形状。在相对较高剪切速率 (100 s^{-1}) 下剪切 1 min, 粒子变形程度较大, 产生看似连续的谷蛋白大聚体。此时停止剪切, 无法看到麦谷蛋白颗粒, 均已形成连续的网络。这可能与混合剪切有关系, 因为这些现象影响了麦谷蛋白颗粒的体积, 大小和形态。剪切作用使紧邻蛋白质分子的相对位置不断变动, 蛋白质分子表面侧链反应基团之间反应机率增大, 更多次级键生成。次级键中的较强者 (如二硫键), 因键能较高, 生成后不易断裂, 面筋结构不断增强, 直到

二硫键数目达到饱和,此时,面团的力学性能较强。若进一步剪切,则会使部分二硫键断裂,面团力学性能下降(Lefebvre, 2012)。剪切力对游离巯基和二硫键的形成有两方面作用:一方面,机械剪切可以导致蛋白质分子更多的巯基基团暴露,在氧气的参与下,巯基基团发生氧化反应,从而促进二硫键的形成。另一方面,剪切力凭借物理剪切作用,打断蛋白质分子之间二硫键,降低二硫键含量(房岩强等, 2013)。

水分含量约 36 % 的小麦粉在流变仪中混合,剪切速率为 60 s^{-1} 或 70 s^{-1} 时,面团最佳混合时间为 $37\pm 18\text{ s}$ 或 $28\pm 18\text{ s}$ (Tietze et al., 2017)。Xu et al. (2007)研究了醇溶蛋白和麦谷蛋白悬浮液黏度和剪切速率的关系,剪切速率为 $0.001\sim 1000\text{ s}^{-1}$,醇溶蛋白悬浮液表现出剪切稀变现象。而麦谷蛋白在低剪切速率($0.001\sim 0.01\text{ s}^{-1}$)作用下表现出剪切增稠现象,在高剪切速率($0.01\sim 1000\text{ s}^{-1}$)表现出剪切稀变现象。推测较低的剪切速率有利于面筋结构形成。

1.3.4 压力

大于 200 MPa 的压力能改变小麦粉中蛋白质的结构,其机制是改变其体积。高压诱导体积的改变有利于生物大分子的范德华力、疏水相互作用,进一步诱导氢键的形成,使分子密度增加。高压不影响蛋白质的一级和二级结构,因为 α -螺旋或 β -折叠几乎不可压缩,但更多的巯基基团参与巯基-二硫键的交换反应中。Kieffer et al. (2007)发现,压力对具有相对较高巯基含量的麦谷蛋白有影响,压力从 0.1 MPa 至 800 MPa (30°C),麦谷蛋白巯基含量从 $2.64\text{ }\mu\text{g/g}$ 蛋白质下降至 $0.53\text{ }\mu\text{g/g}$ 蛋白质。而压力对较低巯基含量的麦醇溶蛋白影响不大,压力从 0.1 MPa 增加到 500 MPa (30°C),麦醇溶蛋白含量从 67.0 % 变至 59.1 %,巯基含量从 $0.34\text{ }\mu\text{g/g}$ 蛋白质变至 $0.37\text{ }\mu\text{g/g}$ 蛋白质。

Mccann et al. (2013)使用激光共聚焦扫描显微镜(confocal laser scanning microscopy, CLSM)观察小于 400 MPa 处理的 33 % 和 56 % 水分的面粉制备的面团,发现面筋蛋白质和淀粉颗粒结构相对于 0.1 MPa 处理的对照组无显著差异。而在 500 MPa 和 600 MPa 处理的 33 % 水分的面粉制备的面团中观察到纤维束形成的蛋白质网络结构,淀粉颗粒结构未受到影响,同时发现该面团中不溶性蛋白质聚集体(unextractable polymeric protein, UPP)从 28.3 % 增加到 38.8 %, Glu:Gli 比 (0.71) 没有变化,表明 500 MPa 以上的压力诱导小麦粉,主要增加了蛋白质聚集,而未破坏麦谷蛋白和麦醇溶蛋白本身的结构。500 MPa 和 600 MPa 处理的 56 % 水分的面粉制备的面团观察到较短的蛋白质束和不连续的面筋蛋白质网络,淀粉颗粒结构被破坏。因为,被破坏的淀粉颗粒比完整的淀粉颗粒可以吸收更多水分,减少了蛋白质相的水分分配,面筋不能形成连续的网络,面团变得刚性且弹性较差。所以该研究认为,通过施加适当的压力可增加不溶性蛋白质的含量,形成较强的面筋网络,但需要控制面粉的含水率来降低淀粉颗粒结构被破坏。

1.3.5 温度

加水温度影响面团性能,加水温度 30°C 时,水分子运动速度较快,面筋蛋白质分子与水分子充分接触,面筋蛋白质的吸水量达 150 %~200 %,形成的面筋含量最大(Georget and Belton, 2006)。加水温度低于 30°C 时,基质片段表面的蛋白质分子吸水润胀,堵塞部分基质片段上的细微孔隙,阻碍水分子到达基质片段内部的蛋白质分子上,不利于面筋形成。

热会引起麦谷蛋白构象的变化,促进新的分子间二硫键,从而使面筋蛋白质聚集体形成。麦醇溶蛋白似乎在较低的温度下不受影响,但在 70 °C 以上时,巯基基团发生变化。麦谷蛋白受热影响的原因可能是蛋白质变性,但 Eliasson and Hegg (1981)使用 DSC 检测了面筋的热行为,认为 55 °C 至 70 °C 之间发生的热转变主要是淀粉引起。Arntfield and Murray (1981)指出, DSC 对植物蛋白质数据的解释不清楚,缺乏可识别为蛋白质的吸热不表示在蛋白质(面筋)中不发生热转变,相反,可能发生热变性,因为疏水相互作用的破坏足以抵消极性相互作用破坏的吸热,即使发生了热转变, DSC 测量的净效应也将为零。

Anderson and Pkw (2000)研究了挤压小麦粉发现,挤出物的巯基和二硫化物含量均低于小麦粉巯基含量(10.43 nM/mg)和二硫化物含量(46.04 nM/mg),表明蛋白质变性、分子间二硫键产生的聚集或挤出加工过程中的氧化。螺杆转速 240 rpm 时,模头温度从 120 °C 升高至 160 °C,挤出物的巯基含量从 6.95 nM/mg 增加到 10.98 nM/mg,二硫化物含量从 38.36 nM/mg 减少到 35.43 nM/mg,与目前的研究结论一致,随着挤压温度升高,挤出物巯基含量增加,二硫键含量降低,可能表明由于在小麦蛋白质的挤出加工过程中,热和剪切的共同作用使二硫键断裂, Schofield et al. (1983)也发现,温度低于 100 °C,面筋中总半胱氨酸含量基本保持不变,表明巯基和二硫键发生了交换反应。

1.3.6 作用时间

小麦粉加水混合时,通常把面团粘稠度达到峰值的时间(和面时间)作为最佳混合时间的参考点,短于该时间被认为是混合不足,长于该时间被认为是过度混合。混合不足,面粉与水刚接触,接触面形成胶质的面筋膜,面筋膜阻止水向其它面粉浸透和接触,继续混合能破坏面筋的胶质膜,扩大水与新的面粉接触,使面粉充分水合(艾紫薇, 2013)。混合后熟化 15~22 min,面团中水分分布均匀,蛋白质充分吸水,并消除了一部分内部应力,利于线状麦谷蛋白分子的展开,形成较好的面筋网络结构。王灵昭等认为熟化时,蛋白质分子通过氢键作用充分水合,同时由于空气的存在,巯基被氧化成二硫键,蛋白质分子相互粘连,相对分子质量增大,进一步促进面筋网络结构形成(王灵昭等, 2005)。

面粉从初始状态至过度混合的过程中, SDS 不溶性麦谷蛋白颗粒逐渐转变成 SDS 可溶性麦谷蛋白颗粒,最佳混合使几乎所有的麦谷蛋白颗粒变得可溶于 SDS,过度混合会进一步破坏 SDS 可溶性麦谷蛋白,最终 SDS 可溶性麦谷蛋白的特性粘度接近 DTT 还原后的最小特性粘度(0.02 L/g)。说明最佳混合作用时间的重要性,此时麦谷蛋白颗粒几乎都溶于 SDS,并且最佳混合后的面团熟化,其粘弹性最大,形变松弛半时间(flow relaxation half-time)随熟化时间的增加而增加,而混合不足和过度混合的面团熟化后,不同熟化阶段的形变松弛半时间均低于最佳混合。显然,混合在很大程度上影响面团弹性。

Don et al. (2005)研究发现,混合不足面团中聚集体的分散不均匀,聚集体间的相互作用比最佳混合时聚集体间的相互作用弱。最佳混合的谷蛋白颗粒混合后能直接开始重新组装,并在熟化 90 min 后,不同品种小麦粉的面团仍保持相似的 HMW/LMW 比例,并且聚集体的容积较小,而过度混合使麦谷蛋白颗粒分解成更小的碎片,并且 HMW/LMW 比例也发生变化(Estica 小麦品种的 HMW/LMW 比例从 0.62 ± 0.05 下降为 0.34 ± 0.03)。这解释了混合后不同小麦品种的麦谷蛋白

颗粒大小接近,但熟化后麦谷蛋白颗粒大小呈现出较大差异的原因,即发生了 HMW/LMW 比例的变化。所以推测,对于面团的流变性质,过度混合对麦谷蛋白的 HMW/LMW 比例和最终尺寸的影响比谷蛋白大聚体的量更重要,这与 Bloksma (1972)认为不是每一个二硫键都具有流变效应的观点一致。

1.3.7 食盐

面筋蛋白在水合过程中,离子强度等会影响蛋白质的构象及其相互作用。食盐以低浓度(小于 2%)存在时,Na⁺和 Cl⁻被蛋白质分子中电离的基团吸引,屏蔽面筋分子的电荷,减少蛋白质间的静电排斥,蛋白质分子更紧密相连;食盐在较高浓度时,阳离子和蛋白质会竞争水使麦谷蛋白分子间氢键作用增强,表现为面筋网络具有更多的纤维和延伸结构。面团流变学实验也表明,盐的添加增加面团形成时间和延展性(Preston, 1989; Tuhumury et al., 2016; Uthayakumaran et al., 2007)。

Tuhumury 等人(Balla et al., 1998; Tuhumury et al., 2014)提出了一种解释 NaCl 影响面筋网络形成机制的模型。小麦面粉中麦谷蛋白和麦醇溶蛋白亚基作为蛋白质体存在,并且麦谷蛋白分子以天然形式折叠,水合时麦谷蛋白分子展开,分子间的氢键断裂,与水形成氢键,形成面筋网络内的环区,面筋网络中更多环区的形成使由大聚体组成的面筋网络微观结构形成,当 NaCl 的存在时,面筋蛋白上的电荷被屏蔽,蛋白质间的静电排斥减少,麦谷蛋白链上的环区展开,更紧密有序排列的面筋形成,面筋呈现出更多的纤维状结构。国外研究认为,研究中性盐的添加将成为研究麦谷蛋白疏水性以及它与面团流变学性质和加工特性的有效手段(Preston, 1981)。

1.4 和面技术和设备

面条工业化生产中,和面设备的类型主要有立式、卧式、单轴、双轴、高速连续及真空和面机等多种形式。双轴卧式和面机是我国面条生产企业中最常用的和面机,根据搅拌杆构型,可分为棒状搅拌杆、角度桨叶状搅拌杆、曲线状搅拌叶等,均可提供较好的和面效果。高速连续和面机让面粉与水按比例进入和面机,在高速旋转下使两者以雾状接触,在短时间内混合均匀,从和面机底端卸料,实现了连续化生产;真空和面是一种新型和面方式,其搅拌过程在真空状态下进行,可以提高加水量(刘锐, 2015)。

食品挤压机类型很多,目前用于食品工业中的挤压机主要是螺杆挤压机。螺杆挤压机主要由套筒和在套筒中旋转的带螺旋的螺杆所构成。螺杆挤压机按螺杆的根数分类可分为单螺杆、双螺杆和多螺杆挤压机。其中,多螺杆挤压机由于制造加工困难,对传动系统要求高,因而在食品加工行业中极少使用。挤压加工技术是连续化生产的新型加工方法,挤压加工能够实现喂料、混合、加水、成型等工序的连续化,易于实现自动化生产(杨薇, 2001)。通过调节挤压机温度、螺杆转速、喂料速度等参数可以得到不同形成程度的面团。

小麦粉在粉质仪中加水揉混,随着面团的形成及衰减,其稠度不断变化,能够得到小麦粉的吸水率、形成时间、稳定时间、弱化度及评价值等特征值,这些是评价小麦和小麦粉内在品质的重要指标,亦已成为育种、制粉、烘焙行业中的重要参考。

1.5 研究切入点

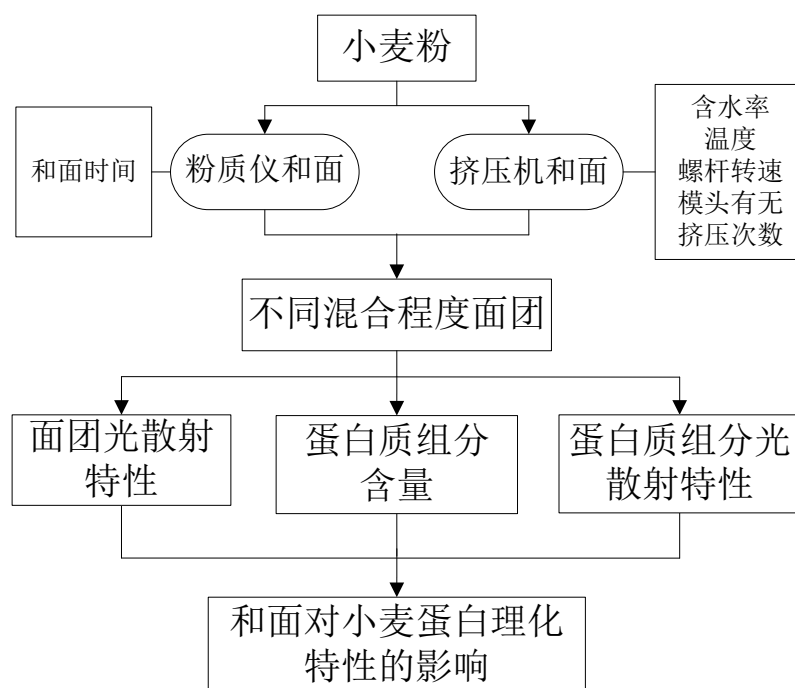
和面是一个动态的物理化学变化过程，在此过程中温度、水分、作用时间、和面方式等因素影响小麦蛋白的理化特性，进而影响面团质量。已有大量的研究进行了和面过程中的影响因素以及蛋白质理化特性的探讨，掌握了和面过程中的影响因素及蛋白质的变化规律；同时，研究者也对不同基因型的小麦进行了探讨，得到了较为一致的小麦蛋白变化规律，基本明确了和面过程中不同混合程度面团中小麦蛋白变化规律。

然而，和面时间对面团光散射特性和蛋白质组分光散射特性的影响尚不明确。粉质仪和面是研究和面过程中常用的和面方式，和面时间对面团形成机制的影响尚不明确。挤压和面是一种连续化较强的技术，不同挤压因素对面团光散射特性、蛋白质组分含量和蛋白质组分光散射特性的影响尚不明确，生产企业在工艺参数选择方面缺乏数据和理论支撑。

1.6 研究目的和意义

本研究通过粉质仪和面和挤压机和面的研究有助于完善和面方式对小麦蛋白理化特性的影响研究，采用不同和面时间和挤压参数和面，分析面团光散射特性、蛋白质组分含量和蛋白质组分光散射的变化。明确粉质仪和面机制和挤压机和面机制，以期挤压和面工艺参数的选择提供参考。

1.7 技术路线



第二章 和面参数对面团光散射特性的影响

2.1 引言

面筋形成过程主要包括水和蛋白质的作用、蛋白质和蛋白质的作用。面粉加水，麦谷蛋白吸水胀润，醇溶蛋白、清蛋白发生水合作用。麦谷蛋白在聚集过程中将其他蛋白和成分包埋在网络中，最终形成面团(Morel et al., 2002)。面团经过水洗后，水溶性蛋白和淀粉均从网络中被洗涤出去，仅剩麦谷蛋白网络结构和部分结合紧密的麦醇溶蛋白。

Hamer et al. (2000)提出的超聚集模型中，通过从单个谷蛋白到宏观网络的聚合来描述麦谷蛋白网络，分为三个层次。第一个层次为仅存在共价键的分子水平，HMW 和 LMW 之间通过二硫键相互作用，形成麦谷蛋白亚基。第二个层次为麦谷蛋白亚基间通过次级键（如疏水键）相连，形成麦谷蛋白聚集体。第三个层次为物理聚集，具体相互作用方式尚不明确。麦谷蛋白聚集体之间的相互作用形成 SDS 不溶性 GMP 颗粒。麦谷蛋白颗粒形成网络结构，并影响面团的性质。因此认为，面筋网络由软的粒子或粒子聚集体的相互作用组成，这些软颗粒通过彼此相互作用形成网络，并且不管是否聚集或颗粒大小具有相同的粘弹性特性。Levebvre 和 Van Vliet 也认为软的和可变形的胶体面筋颗粒网络决定面团的流变性质。

扩散波谱(Diffusing Wave Spectroscopy, DWS)技术可用于检测聚合物溶液和凝胶的微观非均质性和微流变性质。它可以在一次测量中在特定温度下探测扩展频率范围内的粘弹性模量。使用 DWS, 探测微珠的均方位移(Mean Square Displacement, MSD)可以用纳秒分辨率进行监测。从 MSD 和 MSD 计算的扩散系数中，我们可以了解聚合物溶液的微观非均质性。使用广义斯托克斯-爱因斯坦方程，可以从测量的 MSD 中提取粘弹性模量。通过这种方式，人们可以了解在短时间内产生应力松弛的局部大分子运动类型，以及聚合物网络中应力松弛早期动力学机制的新见解(Xu et al., 2016)。

2.2 材料与方法

2.2.1 试验材料

小麦粉样品由河北金沙河面业集团有限责任公司提供，蛋白质含量(干基)约为 11.3%，水分含量为 15.6%。为了在挤出机的进料器中保持稳定的进料速率，所选的面粉尺寸为 0.50~0.71mm。

磷酸氢二钠二水合物和磷酸氢二钠十二水合物购自天津光复精细化工研究所。十二烷基硫酸钠(SDS)购自阿拉丁生化科技股份有限公司(上海，中国)。所有化学试剂均为色谱级。

2.2.2 试验设计

(1) 粉质仪和面试验设计

在粉质仪和面的第 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min, 55.0min 时进行取样(图 3-1)，分别代表原料、未充分混合、充分混合、第 1 次过度混合、第 2 次过度混合 5 个混合程度的面团样品。

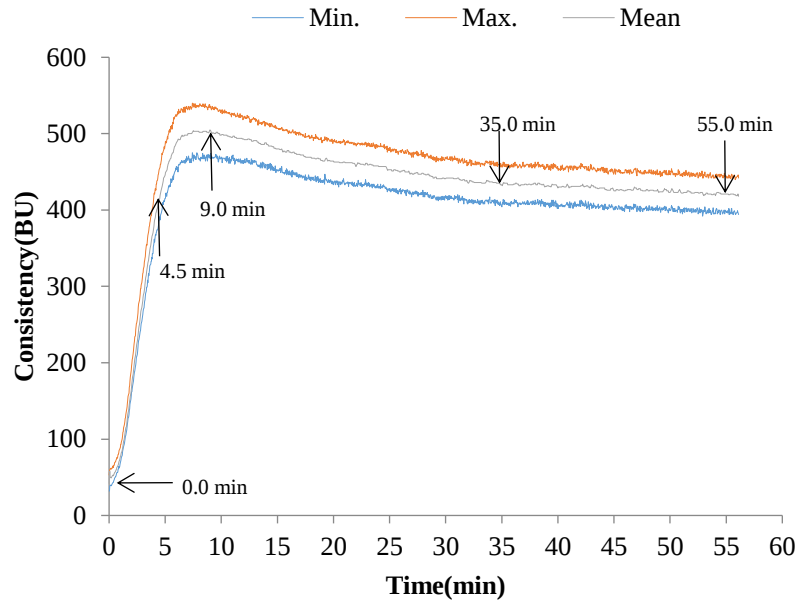


图 2-1 粉质曲线及其取样点
Fig. 2-1 Farinograph Curve showing the dough sampling points

(2) 挤压机和面试验设计

表 2-1 挤压过程参数
Table 2-1 Extrusion process variables

样品编号	机筒温度 (°C)	物料含水率 (%)	螺杆转速 (rpm)	有无模头	挤压次数
1	30-30-30-30	45	150	无	1
2	30-30-30-30	35	150	无	1
3	30-30-30-30	35	200	无	1
4	30-30-30-30	35	100	无	1
5	30-30-30-30	35	150	有	1
6	30-30-30-30	25	150	无	1
7	40-40-40-40	35	150	无	1
8	50-50-50-50	35	150	无	1
9	30-30-30-30	35	150	无	2
10	30-30-30-30	35	150	无	3
11	原料				

2. 2. 3 试验仪器

D-4705 粉质仪 (Brabender, 德国), 主要技术参数为: V2A 混合器 (Sigma, 美国); 63 min⁻¹ 的混合速度; Z 臂混合杆。加热/冷却循环水将混合器的温度控制在 30℃。

所有挤压机和面实验均使用中试规模, 使用 DSE-25 同向啮合双螺杆挤压机 (Brabender 德国) 进行。主要技术参数为: 螺杆外径 (D) 25mm, 长径比 (L/D) 20: 1。使用单螺杆进料器 (Brabender, 德国)。将机筒分成进料区和四个温控区, 用电筒加热系统加热并用流水冷却。从进料到模头的螺杆构型为 CE/37.5/37.5/8 和 CE/ 25/45/8, 它们代表 8 个具有 37.5mm 长度和 37.5° 螺旋角以及另外 8 个带有 25mm 长度和 45°螺旋角的输送元件。模头直径为 4mm。从控制面板监

测温度和螺杆转速。挤压机响应参数,包括扭矩和四区压力,每 20 秒在线自动记录一次(Zhang et al., 2016)。

ALPHA 1-2LD plus 真空冷冻干燥机(CHRIST, 德国); MM 400 粉碎仪(Retsch, 德国); 3-30K 冷冻离心机(SIGMA, 德国); VELP NDA 701 杜马斯定氮分析仪(VELP, 意大利)。

2.2.4 试验方法

(1) 样品制备

粉质仪和面样品:

在和面过程中的 5 个点进行取样,为混合 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min 和 55.0min, 分别代表原料、未充分混合、充分混合、第 1 次过度混合、第 2 次过度混合的面团样品。取出的面团样品切成略小于比色皿体积的方块,放入 10mm 的比色皿中,在 4°C 下平衡 24h 后待测。

挤压机和面样品:

把冻干粉碎后的样品按照固液比(w/v) 3:7 的比例进行样品制备,称取样品 3g,并量取水分 7ml 于 50ml 离心管,震荡均匀呈浆糊状,过夜平衡后吸取 2ml 于比色皿中进行测量。

(2) 扩散波谱(DWS)测量

扩散波谱(DWS)技术是一种现代光散射技术,用于表征混浊介质。在通过厚度为 L 的样本之后检测散射光。在前散射模式中,在通过厚度为 L 的样品之后检测散射光。使用硬件相关器将检测到的强度 $I(t)$ 的时间波动相关以确定强度相关函数(ICF) $(g_2(\tau)-1)$ 。在背散射模式中,收集的光被散射回入射光束并测量其波动。根据样品特性分别在不同的模式下进行检测。在粉质仪和面的样品中,测量模式是背散射 VH。挤压机和面的冻干粉碎样品中,测量模式是前散射。比色皿厚度 L 为 10mm。均方位移(MSD),定义为 $\langle \Delta r^2(\tau) \rangle = \langle |r(0)-r(\tau)|^2 \rangle$,表示示踪粒子在滞后时间 τ 期间移动的平方距离的平均值。多 τ 持续时间和回波持续时间分别 30s。样品和机器温度为室温(30°C)。使用 Micro Rheology Analysis v9.2.11 软件分析数据(Reufer et al., 2014)。

2.3 结果与分析

2.3.1 粉质仪和面对面团光散射特性的影响

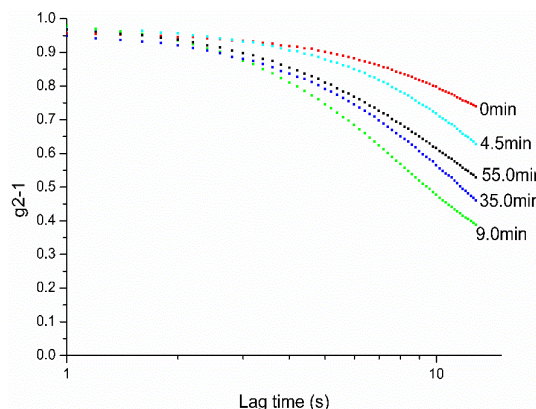


图 2-2 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min和55.0min面团的多重散射光强度的自相关函数

Fig. 2-2 Autocorrelation function of the light intensity multiply scattered of the 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min and 55.0min dough at room temperature

小麦面团的扩散波谱结果可以由自相关函数的衰减速度和均方位移 (MSD) 来表示。自相关函数和 MSD 的时域测量可以提供小麦面团松弛动力学特性。通过光的多重散射测量自相关函数 $g_2(\tau)-1$, 计算出 MSD。五种不同和面时间的面团, 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min, 55.0min, 自相关函数 $g_2(\tau)-1$ 如图 2-2 所示。和面时间增加到 9.0min, 相关函数强度的松弛逐渐变快, 之后至和面 55.0min, 面团的相关函数强度松弛逐渐变慢, 但 55.0min 面团相关函数强度低于和面 4.5min 的面团。

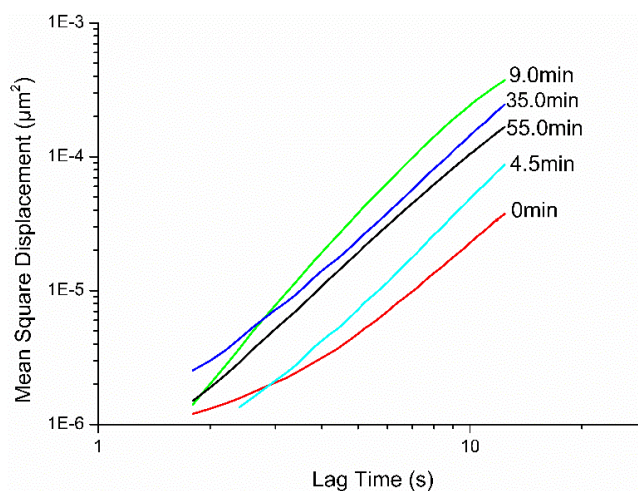


图 2-3 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min和55.0min面团的均方位移 (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$

Fig. 2-3 Mean square displacement (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$, of 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min and 55.0min dough at room temperature

根据自相关函数计算得到均方位移 (MSD), 五种不同和面时间面团的 MSD 如图 2-3 所示。随着和面时间从 0min 增加到 9.0min, 面团的 MSD 线逐渐左移, 和面时间延长至 35.0min 和 55.0min 时, MSD 逐渐右移。表明, 面团扩散位移先逐渐增加, 后逐渐下降。

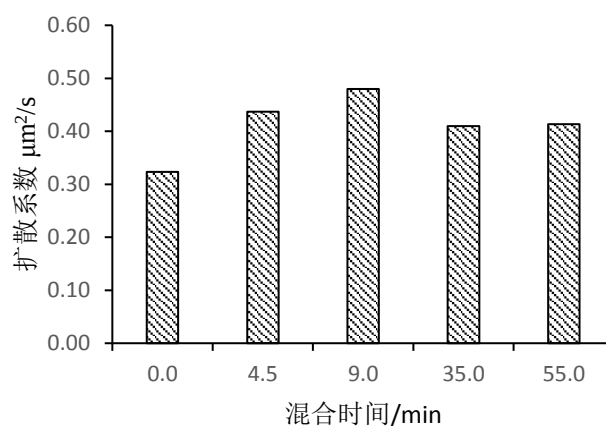


图 2-4 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min和55.0min面团的扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$
Fig. 2-4 Diffusion coefficient, $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, of 0min, 4.5min, 9.0min, 35.0min and 55.0 dough at room temperature

根据均方位移计算得到扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, 五种不同和面时间面团的扩散系数如图 2-4 所示。小麦粉原料的扩散系数为 $0.32\mu\text{m}^2/\text{s}$, 粉质仪混合面团的扩散系数为 $0.41\sim 0.48\mu\text{m}^2/\text{s}$, 比原料增加了 28%~50%。粉质仪混合面团中, 和面时间 4.5min 增加至 9.0min, 扩散系数从 0.44 增加至 $0.48\mu\text{m}^2/\text{s}$, 和面时间再延长至 35.0min 和 55.0, 扩散系数都为 $0.41\mu\text{m}^2/\text{s}$ 。

2.3.2 挤压机和面对面团粉光散射特性的影响

面粉经过挤压机和面, 液氮快速冷却, 冻干, 球磨仪粉碎, 得到挤压面团粉, 简称面团粉。

2.3.2.1 物料含水率对面团粉光散射特性的影响

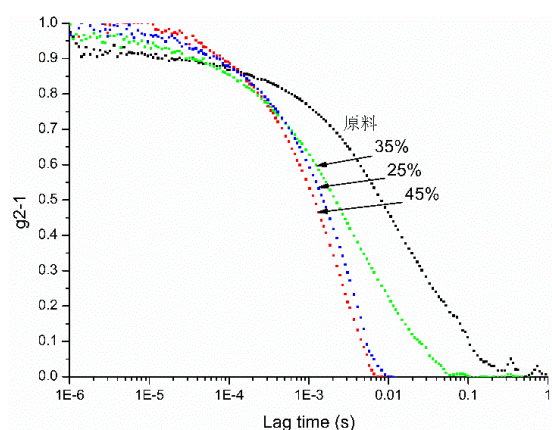


图 2-5 小麦粉原料, 25%, 35%和 45%物料含水率面团粉的多重散射光强度的自相关函数
Fig. 2-5 Autocorrelation function of the light intensity multiply scattered of raw wheat flour and different barrel moisture wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, 25%, 35%, 45% wheat flour

小麦粉原料和不同物料含水率挤压和面面团的自相关函数 $g^2(\tau)-1$ 如图 2-5 所示。与小麦粉原料相比, 不同物料含水率挤压和面的面团粉, 其相关函数强度的松弛都快于原料。物料含水率从 35%增加至 45%, 相关函数强度的松弛逐渐变快, 物料含水率 25%的面团粉, 其相关函数强度的松弛介于物料含水率 35%和 45%的面团粉之间。

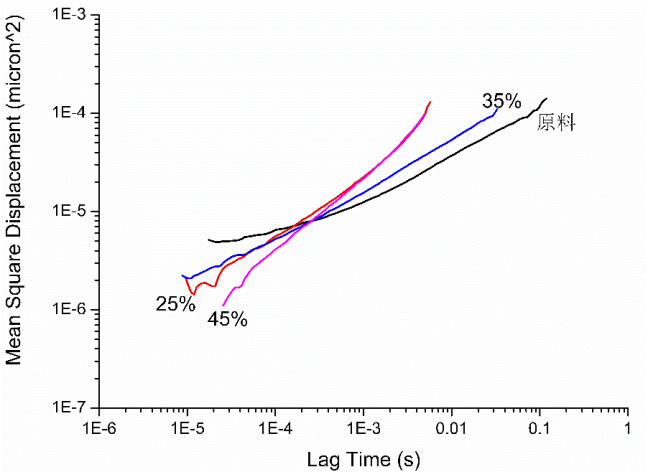


图 2-6 小麦粉原料，25%，35%和 45%面团粉的均方位移（MSD）， $\langle \Delta r^2(t) \rangle$
Fig. 2-6 Mean square displacement (MSD) , $\langle \Delta r^2(t) \rangle$, of raw wheat flour and different barrel moisture wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, 25%, 35%, 45% wheat flour

小麦粉原料和不同物料含水率挤压和面面团粉的MSD如图2-6所示。在滞后时间较短(3E-5s)时，所有物料含水率面团粉的扩散位移都小于原料。均方位移从大到小的顺序为原料、35%、25%、45%。在滞后时间较长(3E-2s)时，物料含水率挤压和面面团粉的扩散位移均大于原料。均方位移从大到小的顺序为25%和45%（两者无差异）、35%、原料。

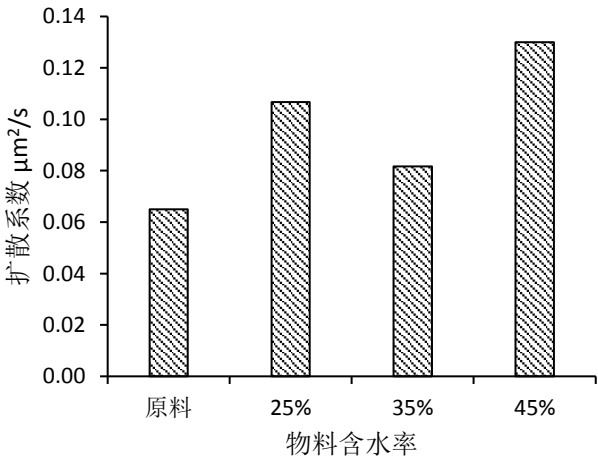


图 2-7 小麦粉原料，25%，35%和45%面团粉的扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$
Fig. 2-7 Diffusion coefficient, $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, of raw wheat flour, 25%, 35%, and 45% wheat flour at room temperature

小麦粉原料和不同物料含水率面团粉的扩散系数 $D(t)$ 如图 2-7 所示。小麦粉原料的扩散系数为 $0.07\mu\text{m}^2/\text{s}$ ，不同物料含水率面团粉的扩散系数为 $0.08\sim 0.13\mu\text{m}^2/\text{s}$ ，比原料增加了 14%~86%。不同物料含水率面团粉中，水分 25%和 35%面团粉的扩散系数都从 $0.11\mu\text{m}^2/\text{s}$ 降低至 $0.08\mu\text{m}^2/\text{s}$ ，水分再增加至 45%，扩散系数增加至 $0.13\mu\text{m}^2/\text{s}$ 。

2. 3. 2. 2 挤压机筒温度对面团粉光散射特性的影响

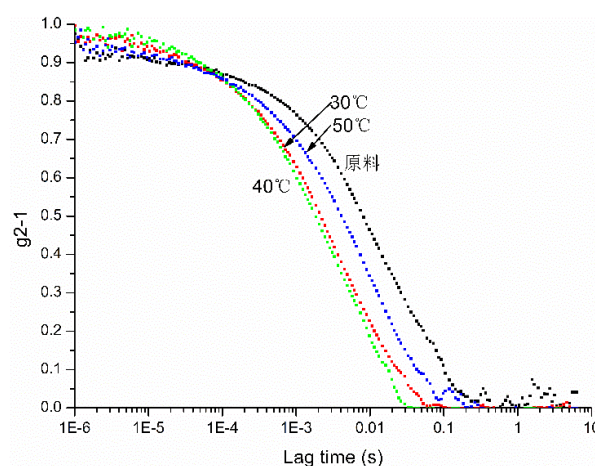


图 2-8 小麦粉原料, 30°C, 40°C 和 50°C 面团粉的多重散射光强度的自相关函数

Fig. 2-8 Autocorrelation function of the light intensity multiply scattered of raw wheat flour and different barrel temperature wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, 30°C, 40°C, 50°C wheat flour

小麦粉原料和不同机筒温度面团粉的自相关函数 $g_2(\tau)-1$ 如图 2-8 所示。与小麦粉原料相比, 所有机筒温度下的面团粉, 其相关函数强度的松弛都快于原料。机筒温度从 30°C 增加到 40°C, 相关函数强度的松弛略微变快, 机筒温度 50°C 面团粉相关函数强度的松弛慢于机筒温度 30°C 和 40°C。

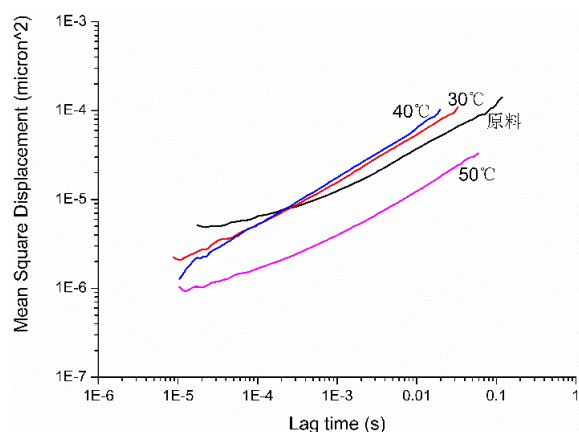


图 2-9 小麦粉原料, 30°C, 40°C 和 50°C 面团粉的均方位移 (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$

Fig. 2-9 Mean square displacement (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$, of raw wheat flour and different barrel temperature wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, 30°C, 40°C, 50°C wheat flour

小麦粉原料和不同机筒温度面团粉的MSD如图2-9所示。在滞后时间较短 (3E-5s) 时, 所有机筒温度面团粉的扩散位移都小于原料。均方位移从大到小的顺序为原料、30°C、40°C、50°C。在滞后时间较长 (3E-2s) 时, 均方位移从大到小的顺序为40°C、30°C、原料、50°C。

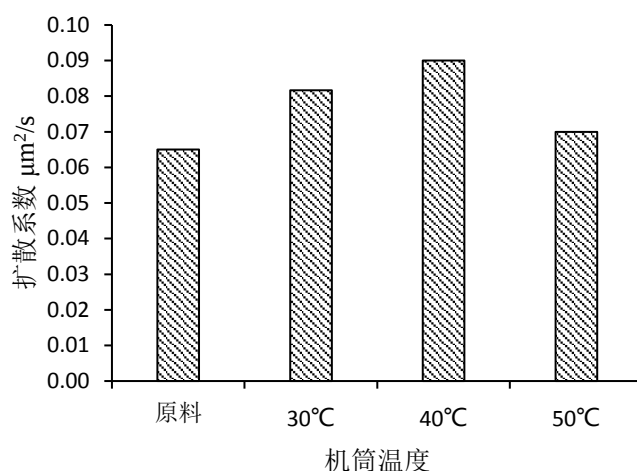


图 2-10 小麦粉原料, 30°C, 40°C和50°C面团粉的扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$

Fig. 2-10 Diffusion coefficient, $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, of raw wheat flour, 30°C, 40°C, and 50°C wheat flour at room temperature

小麦粉原料和不同机筒温度面团粉的扩散系数 $D(t)$ 如图 2-10 所示。小麦粉原料的扩散系数为 $0.07\mu\text{m}^2/\text{s}$, 不同机筒温度面团粉的扩散系数为 $0.07\sim 0.09\mu\text{m}^2/\text{s}$, 比原料增加了 $0\%\sim 29\%$ 。不同机筒温度面团粉中, 从 30°C 增加到 40°C , 面团粉的扩散系数都为从 $0.08\mu\text{m}^2/\text{s}$ 增加到 $0.09\mu\text{m}^2/\text{s}$, 温度再增加至 50°C , 扩散系数降低至 $0.07\mu\text{m}^2/\text{s}$ 。

2.3.2.3 挤压机螺杆转速对面团粉光散射特性的影响

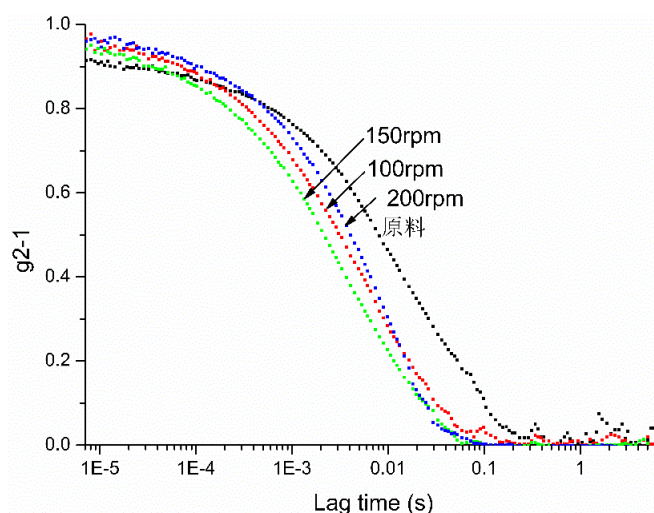


图 2-11 小麦粉原料, 100rpm, 150rpm 和 200rpm 面团粉的多重散射光强度的自相关函数

Fig. 2-11 Autocorrelation function of the light intensity multiply scattered of raw wheat flour and different screw speed wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, 100rpm, 150rpm, 200rpm wheat flour

小麦粉原料和不同螺杆转速面团粉的自相关函数 $g_2(\tau)-1$ 如图 2-11 所示。与小麦粉原料相比, 不同螺杆转速下的面团粉, 其相关函数强度的松弛都快于原料。螺杆转速从 100rpm 增加到 150rpm, 相关函数强度的松弛略微变快, 螺杆转速 200rpm 面团粉相关函数强度的松弛慢于 100rpm 的面团粉。

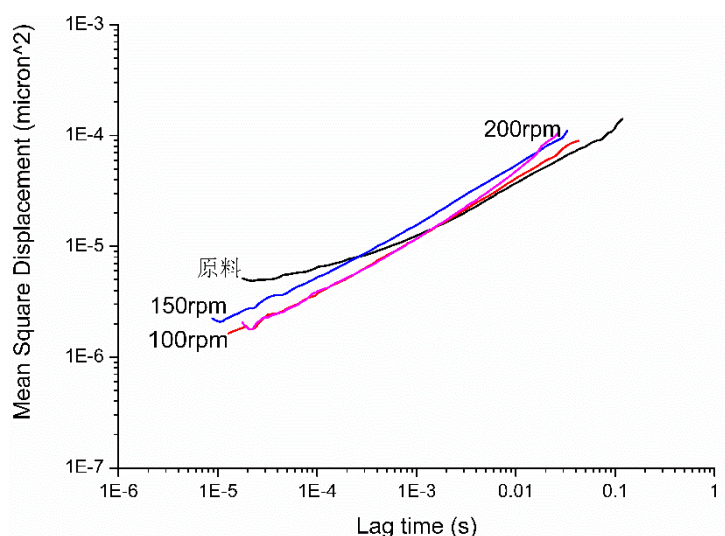


图 2-12 小麦粉原料, 100rpm, 150rpm 和 200rpm 面团粉的均方位移 (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$

Fig. 2-12 Mean square displacement (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$, of raw wheat flour and different screw speed wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, 100rpm, 150rpm, 200rpm wheat flour

小麦粉原料和不同螺杆转速面团粉的MSD如图2-12所示。在滞后时间较短 ($3E-5s$) 时, 所有螺杆转速面团粉的扩散位移都小于原料。均方位移从大到小的顺序为原料、150rpm、100rpm和200rpm (两者无差异)。在滞后时间较长 ($3E-2s$) 时, 不同螺杆转速面团粉的扩散位移均大于原料。均方位移从大到小的顺序为150rpm、200rpm、100rpm、原料。

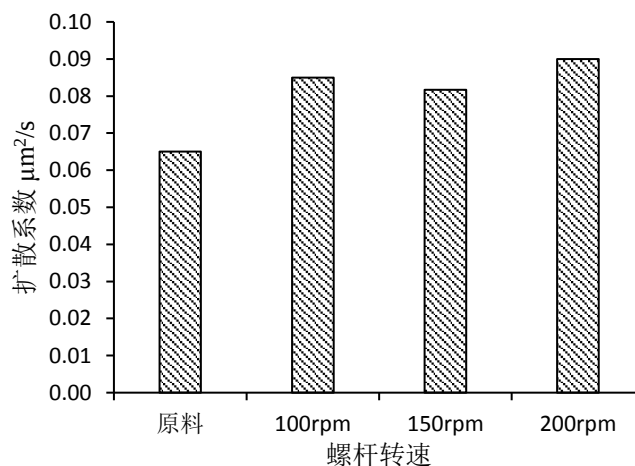


图 2-13 小麦粉原料, 100rpm, 150rpm和200rpm面团粉的扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$

Fig. 2-13 Diffusion coefficient, $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, of raw wheat flour, 100rpm, 150rpm, and 200rpm wheat flour at room temperature

小麦粉原料和不同螺杆转速面团粉的扩散系数 $D(t)$ 如图 2-13 所示。小麦粉原料的扩散系数为 $0.07\mu m^2/s$, 不同螺杆转速面团粉的扩散系数为 $0.08\sim 0.09\mu m^2/s$, 比原料增加了 $14\%\sim 29\%$ 。不同螺杆转速面团粉中, 从 100rpm 增加到 150rpm, 面团粉的扩散系数都为从 $0.09\mu m^2/s$ 降低到 $0.08\mu m^2/s$, 再增加至 200rpm, 扩散系数增加至 $0.09\mu m^2/s$ 。

2.3.2.4 挤压机模头对面团粉光散射特性的影响

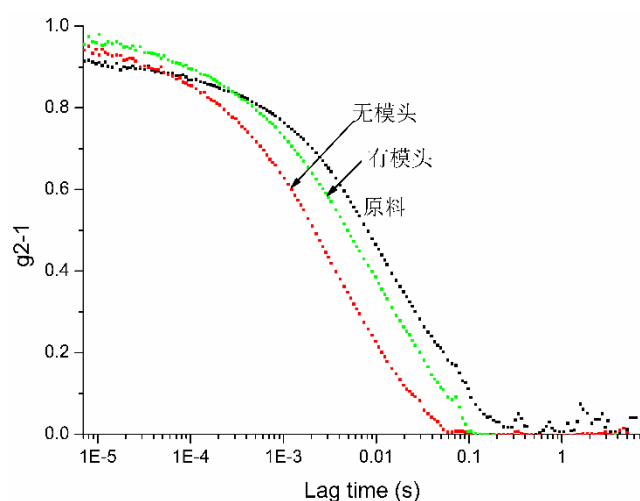


图 2-14 小麦粉原料，无模头，有模头面团粉的多重散射光强度的自相关函数

Fig. 2-14 Autocorrelation function of the light intensity multiply scattered of raw wheat flour, without die and with die wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, without die and with die wheat flour

小麦粉原料和有无模头面团粉的自相关函数 $g_2(\tau)-1$ 如图 2-14 所示。与小麦粉原料相比，加模头和未加模头的面团粉，其相关函数强度的松弛都快于原料。加上模头面团粉的相关函数强度的松弛慢于未加模头的面团粉。

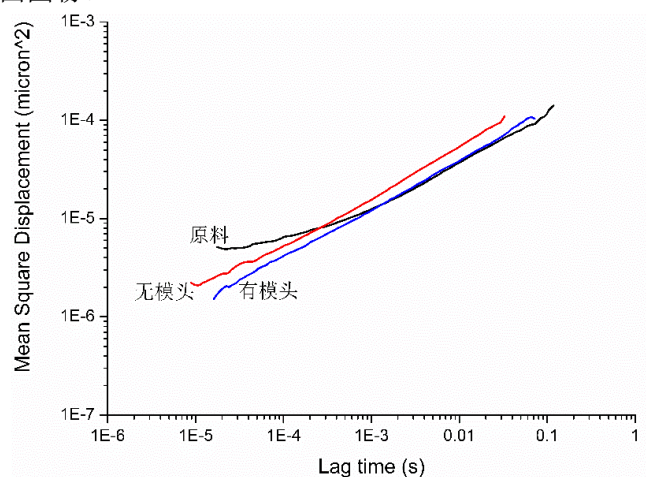


图 2-15 小麦粉原料，100rpm，150rpm 和 200rpm 面团粉的均方位移 (MSD)， $\langle \Delta r^2(t) \rangle$

Fig. 2-15 Mean square displacement (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$, of raw wheat flour, without die and with die wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, without die, with die wheat flour.

小麦粉原料和有无模头面团粉的MSD如图2-15所示。在滞后时间较短 ($3E-5s$) 时，有无模头面团粉的扩散位移都小于原料。均方位移从大到小的顺序为原料、无模头、有模头。在滞后时间较长 ($3E-2s$) 时，有无模头面团粉的扩散位移均大于原料。均方位移从大到小的顺序为无模头、原料和有模头（两者无差异）。

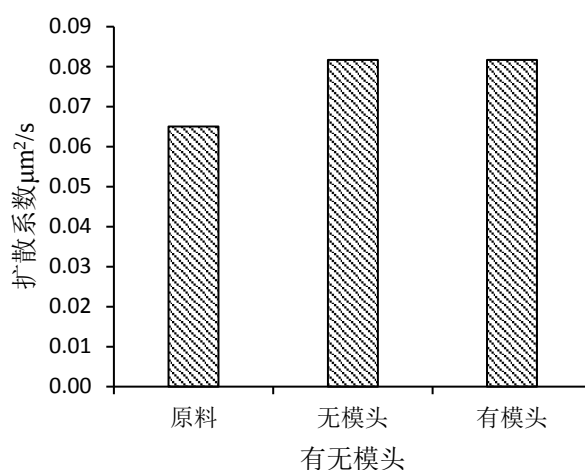


图 2-16 小麦粉原料，无模头和有模头面团粉的扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$

Fig. 2-16 Diffusion coefficient, $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, of raw wheat flour, without wheat flour and with wheat flour at room temperature

小麦粉原料和有无模头面团粉的扩散系数 $D(t)$ 如图2-16所示。小麦粉原料的扩散系数为 $0.07 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ，加模头和未加模头面团粉的扩散系数都增加到 $0.08 \mu\text{m}^2/\text{s}$ 。

2.3.2.5 挤压机挤压次数对面团粉光散射特性的影响

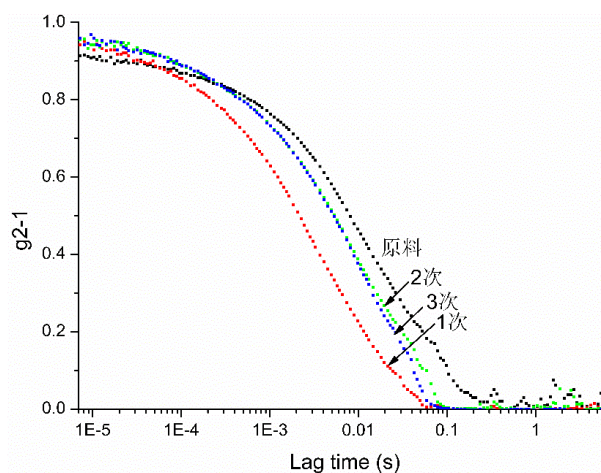


图 2-17 小麦粉原料，挤压 1 次，挤压 2 次和挤压 3 次面团粉的多重散射光强度的自相关函数

Fig. 2-17 Autocorrelation function of the light intensity multiply scattered of raw wheat flour and different extrusion rounds wheat flour at room temperature. Raw wheat flour, one round, two rounds, three rounds wheat flour

小麦粉原料和不同挤压次数面团粉的自相关函数 $g_2(\tau)-1$ 如图2-17所示。与小麦粉原料相比，不同挤压次数的面团粉，其相关函数强度的松弛都快于原料。挤压2次和挤压3次面团粉相关函数强度的松弛几乎一致，挤压1次面团粉相关函数强度的松弛最快。

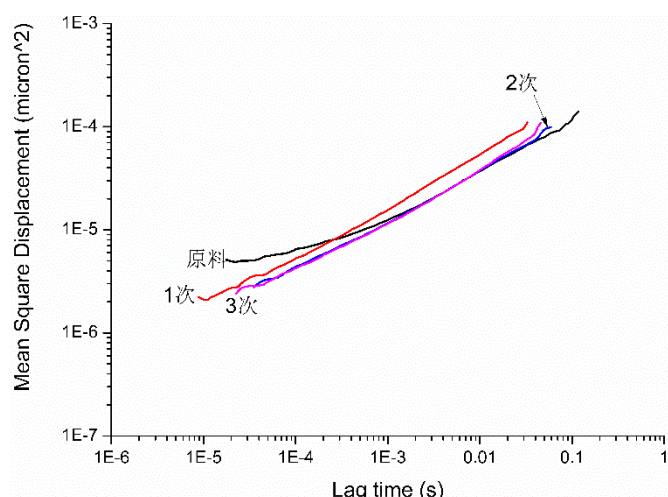


图 2-18 小麦粉原料，挤压 1 次，挤压 2 次和挤压 3 次面团粉的均方位移 (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$

Fig. 2-18 Mean square displacement (MSD), $\langle \Delta r^2(t) \rangle$, of raw wheat flour and different extrusion rounds dough at room temperature. Raw wheat flour, one round, two rounds, three rounds wheat flour

小麦粉原料和不同挤压次数面团粉的MSD如图2-18所示。在滞后时间较短 ($3E-5s$) 时，所有挤压次数面团粉的扩散位移都小于原料。均方位移从大到小的顺序为原料、挤压1次、挤压2次和挤压3次（两者无差异）。在滞后时间较长 ($3E-2s$) 时，均方位移从大到小的顺序为挤压1次，原料和挤压2次和挤压3次（三者无差异）。

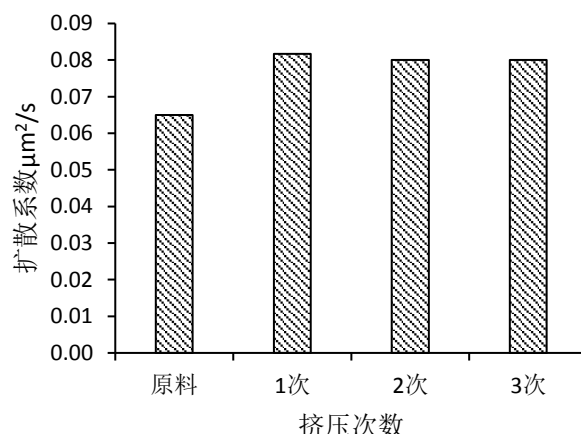


图 2-19 小麦粉原料，挤压1次，挤压2次和挤压3次面团粉的扩散系数 $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$

Fig. 2-19 Diffusion coefficient, $D(t) = \langle \Delta r^2(t) \rangle / 6t$, of raw wheat flour, one round, two rounds, and three rounds wheat flour at room temperature

小麦粉原料和不同挤压次数面团粉的扩散系数 $D(t)$ 如图 2-19 所示。小麦粉原料的扩散系数为 $0.07\mu m^2/s$ ，不同挤压次数面团粉的扩散系数都为 $0.08\mu m^2/s$ 。

2.4 讨论

粉质仪和面过程中，从和面 0min 到 9min 面团的相关函数强度的松弛变快，MSD 和扩散系数增加，9min 后面团的相关函数强度的松弛变慢，MSD 和扩散系数降低。0min 时，面粉未经过混合，此时淀粉颗粒大，且蛋白质不是连续相，我们可以理解为蛋白颗粒分布在淀粉相中，此时淀粉是主体，占主要作用，测量时，光子碰到淀粉相即停止运动，所以运动的平均自由程短；9min 时，麦谷蛋白形成连续相，淀粉分布在蛋白网络结构中，蛋白成主体，发挥主要作用，光子运动

的平均自由程长；35min 和 55min 时，蛋白的连续相被打断，淀粉的主导作用逐渐增加，所以光子运动的平均自由程变短，但 35min 和 55min 的平均自由程长于 0min 时，因为此时断开的片段还是小的网格，不是完全的淀粉颗粒，所以比 0min 时淀粉为主要作用时的平均自由程长。

挤压和面过程中，35%物料含水率面团粉的扩散系数降低，35%水分的面团蛋白分子充分交联，面筋网络形成，运动空间变小。50°C 的扩散速度减慢，淀粉分子膨胀增加了体系的粘度。Xu et al. (2016)研究了不同浓度的 β -葡聚糖，由于粘度增加，扩散系数随着 β -葡聚糖浓度的增加而降低。不同螺杆转速面团粉的扩散系数几乎一致，面团中蛋白质形成连续相的程度相似。加上模头后，蛋白质的水合作用和蛋白质之间的相互作用增强，增加了面筋网络结构破坏的可能性，使体系相关函数强度的松弛变慢，光子运动的平均自由程较短。挤压 2 次和挤压 3 次面团粉的相关函数强度的松弛变慢，淀粉颗粒暴露的可能性增加，光子运动的平均自由程较短，推测它们的作用时间都处于蛋白质分子的某个聚集程度范围内，所以扩散系数未发生变化。

2.5 小结

粉质仪和面的试验中，和面的 9min 前，自相关函数的衰减速度变快，均方位移变大，在和面 9min 后，自相关函数的衰减速度减慢，均方位移变小。这些结果提示了面团形成的三个阶段，9min 前小麦粉的水合阶段，9min 时面筋网络形成，9min 后面筋网络被破坏三个主要的阶段。

挤压机和面的试验中，温度、水分、螺杆转速、压力和挤压次数均影响面团粉中光子的扩散行为，螺杆转速和模头的影响较弱，水分和温度的影响较强，挤压次数在一段作用时间内，小麦面团粉中光子的扩散行为也在一定的区间内不发生变化。

第三章 和面参数对小麦蛋白组分含量的影响

3.1 引言

小麦在谷物中是独特的，因为它能够产生粘弹性面团，这是各种产品所必需的。小麦蛋白质根据其溶解度分为清蛋白，球蛋白，麦醇溶蛋白和麦谷蛋白(Delcour et al., 2012)。面筋由单体麦醇溶蛋白和聚合麦谷蛋白组成(Wieser, 2007)。Sapirstein and Suchy (1999)揭示了不溶性谷蛋白和面包体积之间的相关性。

谷蛋白大聚集体(GMP)是指不溶性谷蛋白的小麦蛋白质级分，其在 1.5%十二烷基硫酸钠(SDS)溶液中是不可提取的(Weegels et al., 1996b)。一些研究已经证实了 GMP 在评估小麦品质和预测面团特性方面的重要性(Liu et al., 2015; Moonen et al., 1982; Sapirstein and Suchy, 1999)。许多研究人员发现，面粉中的 GMP 与小麦品质参数(如面包体积)和面团物理特性(如面团形成时间)之间存在显著相关性。此外，观察到 GMP 含量与面团强度(R_{max})之间的相关性(Dachkevitch and Autran, 1989; Gupta et al., 1992; Gupta et al., 1993; Singh et al., 1990; Wang et al., 2007; Weegels et al., 1996a)。

众所周知，理解面团中小麦面筋网络特性动态的关键是不溶性谷蛋白部分，例如 GMP-凝胶部分。例如，已经显示 GMP-凝胶的量在面粉混合到发育的面团期间减少(Don et al., 2005)。几位作者已经详细描述了混合过程，真空混合，温度和剪切对小麦蛋白在 SDS 溶液中溶解特性的影响。(Don et al., 2005)显示混合过程如何影响 GMP 和 SDS 可溶性蛋白质，直至最佳混合和过度混合的面团样品。当面团混合进展至峰值稠度时，GMP 转化为 SDS 可溶性蛋白质，峰值稠度是所有 GMP 在 SDS 中可溶的点。Liu et al. (2017)表明，在 0.08MPa 下混合的面团的大聚合蛋白质含量高于在 0.1MPa 下混合后获得的面团。相反，温度(30°C 至 56°C)对可溶性小麦蛋白质含量的影响不显著(Wang et al., 2017)。Peighambardoust et al. (2005)证明，Z 臂混合导致所有小麦品种的 GMP 湿重降低。相反，简单(单轴)剪切不会导致 Spring 或 Soissons 小麦品种的 GMP 湿重降低。

粉质仪和面是研究和面过程中常用的和面方式，其过程中小麦蛋白质含量的变化相对比较明确。而挤压机是一个连续生物反应器，其和面过程涉及混合，剪切，加热，加压和成型较复杂的因素。为了更深入地了解面条挤出过程中发生的情况，并确定是否可以在 GMP 含量，面条挤出加工因子和面条面团质量之间显示新的联系，我们开始遵循挤出加工面条面团的 GMP 含量。以小麦粉为原料，研究了物料在粉质仪中和面形成不同混合程度的面团其小麦蛋白含量的变化情况(特别是 GMP)；在挤压机中和面时，不同温度、水分、螺杆转速、有无模头和挤压次数对小麦蛋白含量的影响规律，为后续研究小麦面团扩散行为和聚集体形貌提供理论基础。

3.2 材料与方法

3.2.1 试验材料

同 2.2.1

3.2.2 试验设计

同 2.2.2

3.2.3 试验仪器

同 2.2.3

3.2.4 试验方法

(1) 粉质仪和面试验

在粉质仪的混合器内放入 300g 小麦粉进行混合, 根据记录的扭矩和时间图确定面团形成时间为 9min, 对 5 个不同混合程度的面团进行取样。加热/冷却循环水将混合器的温度控制在 30°C。

(2) 挤压机和面试验

将小麦粉以 34g/min (干基) 的速度加入挤出机中。通过恒流泵 (Agilent Technologies, LC 1204M441, USA) 通过出口将水注入挤出机中。预先校准和调整进料器。挤压过程变量是物料含水率; 机筒温度; 螺杆转速; 挤压次数以及有无模头 (表 2-1)。

(3) 样品收集和储存

当粉质仪达到相应的时间点时收集 5 个面团样品: 0 min, 4.5 min, 9 min, 35 min, 55 min (图 2-1)。

当挤压机达到稳定状态时, 如挤压机扭矩和模头压力达到恒定值, 收集样品, 并将 2min 内挤出面团的质量称重以计算质量流速。

上述两组样品取样后立即在液氮中冷冻。使用真空冷冻干燥机将样品在 0.037 mbar 下冷冻干燥 72 小时。使用 Retsch 粉碎机将冷冻干燥的样品研磨成粉末并储存在干燥器中备用(Zhang et al., 2017)。

(4) 单位机械能耗 (SME)

基于下面的公式 (1), 螺杆转速 n , 扭矩 T (Nm, 计算机自动记录) 和质量产量 (MFR) (g/min, 1min 输出的挤出物) 计算单位机械能耗(Zhang et al., 2015)。

$$SME (kJ/kg) = \frac{2\pi \times n \times T}{MFR} \quad (1)$$

(5) 蛋白质的提取

第一次蛋白质提取用 0.5% (w/v) SDS-50mmol 磷酸盐缓冲液 pH 6.9 (0.25g 面粉 23mL 溶液) 进行提取。将样品在旋转器中以 1000rpm (30°C) 旋转 5min, 然后在 11,600×g (50-mL 离心管) 下离心 30min (30°C), 倒出上清液并在 115°C 下烘干 24hr, 收集烘干的上清液并称重。使用氮燃烧法检测蛋白质含量 (C), 这是 SDS 可溶性蛋白质。剩下的不溶性蛋白即为 GMP。第二次提取是将剩下的不溶性蛋白重新悬浮在相同的缓冲液中, 10.5W 的功率下超声处理 5min, 然后离心分离得到上清液, 通过上述方法进行蛋白质含量检测, 这部分是 SDS + 超声可溶性蛋白质。将剩余的

沉淀物在 115°C 下干燥 24hr, 并使用氮燃烧法测量蛋白质含量, 这部分是 SDS + 超声处理不溶性蛋白质。用式 (2) 计算蛋白质含量 (P)。

$$P\text{ (mg/g 小麦粉)}=\frac{C\times M}{0.25}\times1000\quad (2)$$

这里， $P\text{ (mg/g 小麦粉)}$ 是单位质量小麦粉的蛋白质含量， $C\text{ (}\%\text{)}$ 是相应的提取的蛋白质含量，0.25 是小麦粉的质量。

样品在 0.5% (w/v) SDS-50mmol 磷酸盐缓冲液中分散后，接着进行超声分散，最后离心分离，得到超声可溶性蛋白。

（6）蛋白质含量测定

按照制造商的说明，使用杜马斯定氮分析仪测定蛋白质含量，以乙二醇四乙酸（EDTA）作为标准品。蛋白质含量计算为 $\%N\times5.7\times100$ (Zhang et al., 2017)。

（7）统计分析

IBM SPSS Statistics（版本 22）用于数据的统计分析，分别使用方差分析（ANOVA）函数和相关程序分析来分析数据的统计显著性和统计相关性。使用 Duncan 的 5%水平多重比较确定了所有处理之间的显著差异。条形图和散点图在 Microsoft Office Excel 2007 中绘制。

3.3 结果与分析

3.3.1 小麦粉的粉质响应参数

表 3-1 小麦粉的粉质响应参数		
Table 3-1 Farinograph response parameters of wheat flour		
和面时间/min	稠度/BU	SME kJ/kg
0	0	0
4.5	415	1.9
9.0	505	6.4
35.0	433	31.2
55.0	421	48.8

粉质仪和面过程中小麦粉的响应参数如表 3-1 所示。和面时间从 0min 增加至 9.0min，稠度从 0 BU 增加至最大稠度 505 BU，和面时间再增加至 55.0min，稠度降低至 421 BU。SME 随混合时间从 0min 增加 55.0min，SME 从 0 增加至 48.8 kJ/kg。

3.3.2 粉质仪和面对小麦蛋白组分含量的影响

表 3-2^a 蛋白质组分含量及蛋白质回收率
Table 3-2^a Protein component content and protein recovery

和面时间/min	蛋白质含量 (mg/g 小麦粉)	SDS-可溶性蛋白 (mg/g 小麦粉)	SDS+超声可溶性蛋白 (mg/g 小麦粉)	SDS+超声不溶性蛋白 (mg/g 小麦粉)	GMP (mg/g 小麦粉)	蛋白质回收率(%)
0.0	113.4±4.4a	81.7±0.5c	26.9±0.6a	4.2±0.1ab	31.0±0.5a	99.4±0.9
4.5	111.8±2.2a	89.2±1.7b	23.8±0.4b	3.9±0.2ab	27.7±0.6b	104.5±1.0
9	111.7±0.0a	92.6±0.0b	18.9±0.0c	5.6±1.0a	24.4±1.0c	104.8±0.9
35	112.6±0.4a	97.8±1.2a	16.1±0.9d	5.7±0.1a	21.8±1.0c	106.2±0.2
55	114.4±0.2a	99.1±2.5a	15.6±0.7d	2.8±1.2b	18.3±1.9d	102.6±0.6

^a 该表中的数据表示为平均值±标准偏差，不同的字母表示显著差异（P<0.05）

表 3-2 显示了 SDS 提取前和提取后样品的蛋白质含量和蛋白质回收率。在 SDS 提取之前所有挤出的面粉中的蛋白质含量为 111.7mg/g 至 114.4mg/g。在将小麦粉挤出，冷冻干燥并粉碎后与原料无显著差异。SDS 提取的总蛋白质为 112.8mg/g 至 119.6mg/g。蛋白质回收率为 99.4%至 106.2%。表明样品制备和提取过程没有蛋白质引入或损失。

随着和面时间从 4.5min，9.0 min，35.0 min 增加到 55.0 min，SDS-可溶性蛋白质含量从 89.2 mg/g，92.6 mg/g 增加到 97.8 mg/g 和 99.1 mg/g，35.0 min 和 55.0min 的含量显著高于 4.5min 和 9.0min（P<0.05），并且原料小麦粉的含量显著低于其他。与原料小麦粉相比，SDS+超声可溶性蛋白质含量从 26.8mg/g，23.8 mg/g 显著降低至 18.9 mg/g 和 16.1 mg/g（P<0.05），但 35min 和 55.0 min 的含量差异不显著。与原料小麦粉相比，GMP 含量显著降低，从 31.0 mg/g，27.7 mg/g，24.4 mg/g 降至 21.8 mg/g 和 18.3 mg/g（P<0.05），但和面 9.0 min 和 35.0 min 的差异不显著。

3.3.3 小麦粉的挤压响应参数

表 3-3^a 小麦粉的挤压响应参数
Table 3-3^a Extrusion response parameters of wheat flour

机筒温度 (°C)	物料含水率 (%)	螺杆 转速 (rpm)	有无 模头	挤压 次数	4 区压力 (Bar)	质量流速 (g/min, db)	扭矩(Nm)	SME (kJ/kg, db)
30-30-30-30	45	150	Without	1	-0.20 ± 0.00c	34.45 ± 0.05b	1.10 ± 0.00e	30.09 ± 0.04f
30-30-30-30	35	150	Without	1	0.33 ± 0.05bc	34.03 ± 0.50b	2.49 ± 0.08bc	68.99 ± 1.27c
30-30-30-30	35	200	Without	1	0.30 ± 0.00bc	33.98 ± 0.21b	2.61 ± 0.04b	96.45 ± 0.72b
30-30-30-30	35	100	Without	1	0.20 ± 0.00bc	34.53 ± 0.03b	2.61 ± 0.08b	47.46 ± 1.47e
30-30-30-30	35	150	With	1	12.26 ± 0.72a	33.86 ± 0.12b	6.40 ± 0.33a	178.14 ± 8.54a
30-30-30-30	25	150	Without	1	-0.09 ± 0.01c	35.81 ± 0.49a	1.20 ± 0.00e	31.58 ± 0.43f
40-40-40-40	35	150	Without	1	0.40 ± 0.00bc	33.76 ± 0.41b	2.00 ± 0.07d	55.85 ± 2.65d
50-50-50-50	35	150	Without	1	0.80 ± 0.00b	35.42 ± 0.40a	2.26 ± 0.04cd	60.09 ± 0.26d
30-30-30-30	35	150	Without	2 ^b	0.16 ± 0.07	41.03 ± 3.05	1.31 ± 0.34	30.57 ± 10.16
30-30-30-30	35	150	Without	3 ^b	0.83 ± 0.13	38.04 ± 5.98	5.96 ± 1.37	146.79 ± 10.86

^a 该表中的数据表示为平均值±标准偏差，不同的字母表示显著差异（P<0.05）

^b 挤出的压力，质量流速，扭矩和 SME 仅指第二次或第三次挤出过程

挤出过程中小麦粉的挤出响应参数：四区压力，扭矩，质量流速和 SME 如表 3-3 所示。质量流速范围为 33.76 至 35.81g/min（干基），在设定的流速 34.00g/min 波动。除物料含水率为 25%，

机筒温度为 50℃ 的挤出处理外，其他处理的质量流速无显著差异。未加模头的四区压力范围为-0.20 至 0.83 Bar，相当于大气压。加模头的四区压力为 12.26 Bar，显著高于未加模头的所有试验。SME 由质量流速，扭矩和螺杆转速计算，并且所有试验的 SME 在 30.09 至 178.14kJ/kg（干基）之间变化。

3.3.4 挤压机和面的蛋白质回收率

表 3-4^a 小麦粉挤出物的蛋白质含量和小麦粉提取的蛋白质回收率
Table 3-4^a Protein content of extruded wheat flour and the protein recovery of wheat flour extraction

样品 编号	蛋白质含 量(mg/g 小 麦粉)	SDS 可溶 性蛋白 (mg/g 小麦 粉)	SDS + 超声可 溶性蛋白(mg/g 小麦粉)	SDS +超声不可 溶性蛋白 (mg/g 小麦粉)	总蛋白 (mg/g 小麦粉) ^c	蛋白质回收 率 (%)
1	112.9 ±0.9a	87.0 ±1.0bc	21.6 ±0.1bc	5.9 ±2.4ab	114.6 ±1.5	101.5 ± 1.4
2	111.4 ±0.4a	85.2 ±0.1cd	22.9 ±0.9b	5.8 ±0.6ab	113.9 ±0.4	102.2 ± 0.4
3	114.0 ±1.3a	88.9 ±0.2b	19.0 ±2.5cd	5.4 ±0.9ab	113.2 ±1.4	99.4 ± 1.2
4	112.4 ±0.7a	85.4 ±0.2cd	21.3 ±2.2bc	6.1 ±0.5a	112.7 ±2.5	100.3 ± 2.3
5	112.4 ±4.7a	88.0 ±1.3bc	18.0 ±0.1d	6.2 ±1.4a	112.3 ±0.2	99.9 ± 0.2
6	113.7 ±1.6a	83.0 ±1.0de	25.9 ±0.9a	4.9 ±0.2ab	113.7 ±0.4	100.0 ± 0.3
7	111.4 ±0.1a	86.8 ±0.5bc	22.7 ±1.6b	5.9 ±1.3ab	115.4 ±2.3	103.6 ± 2.1
8	111.4 ±1.4a	86.5 ±0.6bc	20.3 ±0.8bcd	6.6 ±1.9a	113.4 ±1.7	101.7 ± 1.5
9	112.1 ±6.8a	87.6 ±3.2bc	22.6 ±0.8b	3.1 ±0.2b	113.3 ±4.2	101.0 ± 3.7
10	112.8 ±8.2a	100.7 ±0.9a	15.2 ±0.0e	3.1 ±0.1b	119.0 ±0.7	105.5 ± 0.6
11	113.4 ±4.4a	81.7 ±0.5e	26.9 ±0.6a	4.2 ±0.1ab	112.8 ±1.0	99.4 ± 0.9

^a 该表中的数据显示为平均值±标准偏差，不同的字母表示“显著差异”（P <0.05）
^c 总蛋白包括 SDS 可溶性蛋白，SDS +超声可溶性蛋白和 SDS +超声不溶性蛋白

表 3-4 显示了 SDS 提取前和提取后样品的蛋白质含量和蛋白质回收率。在 SDS 提取之前所有挤出小麦粉以及原料的蛋白质含量（范围为 111.4~114.0mg/g），在小麦粉挤出，冷冻干燥和粉碎后没有显著变化。SDS 提取级分中的总蛋白质为 112.3~115.4mg/g，蛋白质回收率为 99.4%至 105.5%。这表明样品制备和提取过程不会导致蛋白质引入或损失。

3.3.5 挤压参数对小麦蛋白组分含量的影响

3.3.5.1 物料含水率对小麦蛋白组分含量的影响

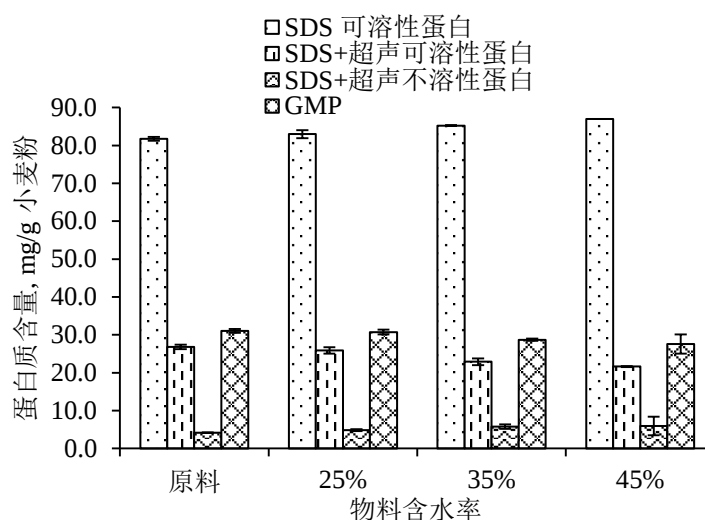


图 3-1 物料含水率对小麦粉在十二烷基硫酸钠 (SDS) 溶液中蛋白质溶解度的影响

Fig. 3-1 Effect of dough moisture on the protein solubility of wheat flour in sodium dodecyl sulfate (SDS) solution with and without sonication treatment

图 3-1 显示了在有和没有超声处理的情况下, 物料含水率对小麦粉在 SDS 溶液中的蛋白质溶解度的影响。SDS 可溶性蛋白质的平均含量从 81.7%显著增加到 85.1 mg/g ($P < 0.05$), 而小麦粉原料在不同物料含水率下挤出后, SDS +超声可溶性蛋白的平均含量从 26.9 mg/g 显著降低至 23.5 mg/g ($P < 0.05$)。

随着物料含水率从 25%增加到 35%到 45%, SDS 可溶性蛋白质含量从 83.0 逐渐增加到 85.2 到 87.0mg/g。样品中含有 45%水分的 SDS 可溶蛋白含量显著高于含 25%水分的样品 ($P < 0.05$)。SDS +超声可溶性蛋白质(谷蛋白大聚集体(GMP)的一部分)的含量从 25.9 降至 22.9 至 21.6mg/g。物料含水率为 25%的样品的 SDS +超声可溶性蛋白质含量显著高于水分含量为 35%和 45%的样品 ($P < 0.05$)。这表明挤出后 GMP 转化为 SDS 可溶性蛋白质。

3.3.5.2 挤压机筒温度对小麦蛋白组分含量的影响

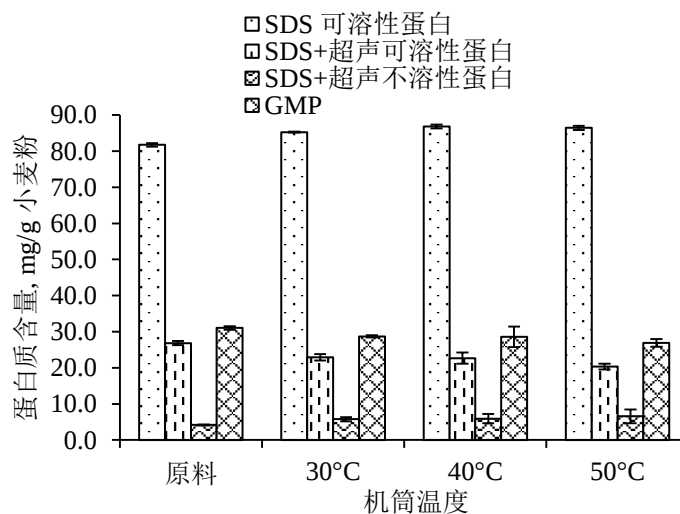


图 3-2 挤压机筒温度对小麦粉在十二烷基硫酸钠 (SDS) 溶液中蛋白质溶解度的影响

Fig. 3-2 Effect of extrusion barrel temperature on the protein solubility of wheat flour in sodium dodecyl sulfate (SDS) solution with and without sonication treatment

图 3-2 显示了在有和没有超声处理的情况下,机筒温度对小麦粉在 SDS 溶液中的蛋白质溶解度的影响。SDS 可溶性蛋白质和 SDS+超声不溶性蛋白质的平均含量分别从 81.7 增加到 86.2 mg/g 和从 4.2 增加到 6.1 mg/g ($P < 0.05$)。原料小麦粉在不同的机筒温度挤出后, SDS+超声可溶性蛋白和 GMP 的平均含量分别从 26.9 mg/g 降低至 22.0 mg/g ($P < 0.05$) 和 31.0 mg/g 降低至 28.1 mg/g ($P < 0.05$)。

SDS 提取的小麦蛋白质含量无显著差异,只是 40℃ 时 SDS 可溶性蛋白含量显著高于 30℃,从 85.2 mg/g 增加到 86.8 mg/g ($P < 0.05$)。

3.3.5.3 挤压机螺杆转速对小麦蛋白组分含量的影响

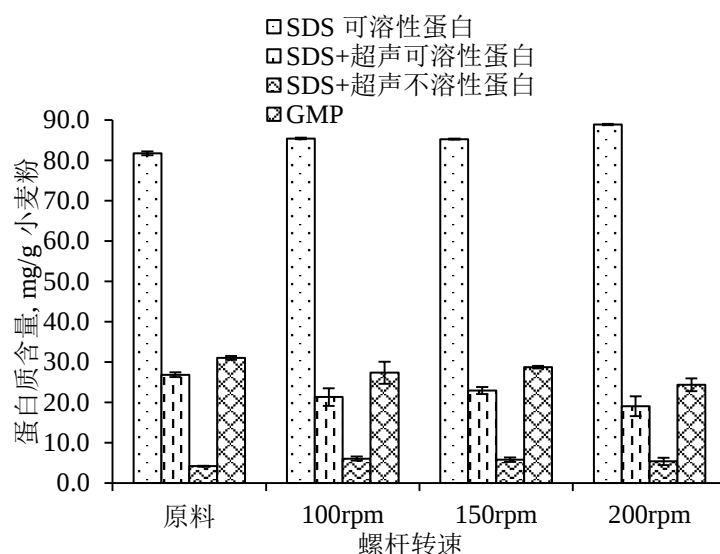


图 3-3 挤压机螺杆转速对小麦粉在十二烷基硫酸钠 (SDS) 溶液中蛋白质溶解度的影响

Fig. 3-3 Effect of screw speed on the protein solubility of wheat flour in sodium dodecyl sulfate (SDS) solution with and without sonication treatment

图 3-3 显示了在有和没有超声处理的情况下,螺杆转速对小麦粉在 SDS 溶液中的蛋白质溶解度的影响。原料小麦粉在不同螺杆转速下挤出后, SDS 可溶性蛋白的平均含量从 81.7%显著增加到 86.5 mg/g ($P < 0.05$), SDS+超声可溶性蛋白质和 GMP 的平均含量分别从 26.9 mg/g 显著降低至 21.1 mg/g, 31.0 降低至 26.8 mg/g ($P < 0.05$)。

SDS 提取的小麦蛋白质含量无显著差异,只是 200 rpm 时 SDS 溶性蛋白含量显著高于 100 和 150 rpm, 分别从 88.9 降至 85.2 和 85.4 mg/g ($P < 0.05$)。

3.3.5.4 挤压机模头对小麦蛋白组分含量的影响

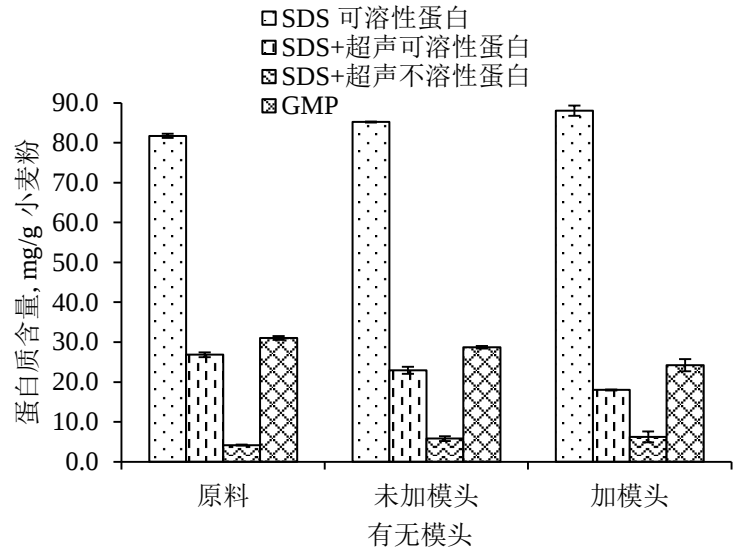


图 3-4 挤压机模头对小麦粉在十二烷基硫酸钠 (SDS) 溶液中蛋白质溶解度的影响

Fig. 3-4 Effect of extrusion die on the protein solubility of wheat flour in sodium dodecyl sulfate (SDS) solution with and without sonication treatment

图 3-4 显示了在有和没有超声处理的情况下，模头对小麦粉在 SDS 溶液中的蛋白质溶解度的影响。对于原料小麦粉，没有模头的挤出物和带有模头的挤出物，SDS 可溶性蛋白质含量分别从 81.7 增加到 85.2 和 88.0 mg/g ($P < 0.05$)。SDS + 超声可溶性蛋白质含量和 GMP 含量分别从 26.9 降至 22.9 和 18.0 mg/g，从 31.0 降至 28.7 和 24.2 mg/g ($P < 0.05$)。这说明在挤出后 GMP 在有和没有模头的情况下转化为 SDS 可溶性蛋白质。

3.3.5.5 单位机械能耗 (SME) 的影响

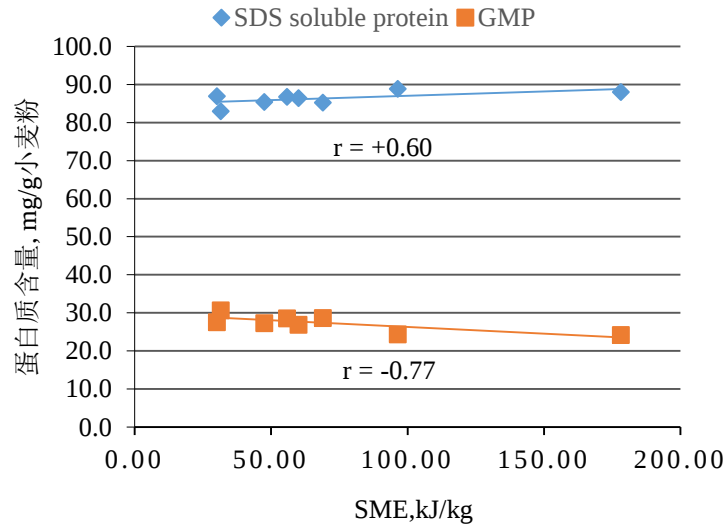


图 3-5 十二烷基硫酸钠 (SDS) 可溶性蛋白质，谷蛋白大聚集体与单位机械能耗之间的关系

Fig. 3-5 Relationship between sodium dodecyl sulfate (SDS)-soluble protein, glutenin macropolymer, and specific mechanical energy

SDS 可溶性蛋白质, GMP 和 SME 的散点图显示在图 3-5 中。SDS 可溶性蛋白质与 GMP 和 SME 之间的关系分别是 $r = +0.60$ 和 $r = -0.77$ 。SDS 可溶性蛋白质和 SME 的趋势表明存在正相关关系, 而 GMP 和 SME 的趋势表明存在负相关关系。

3.3.5.6 挤压次数对小麦蛋白组分含量的影响

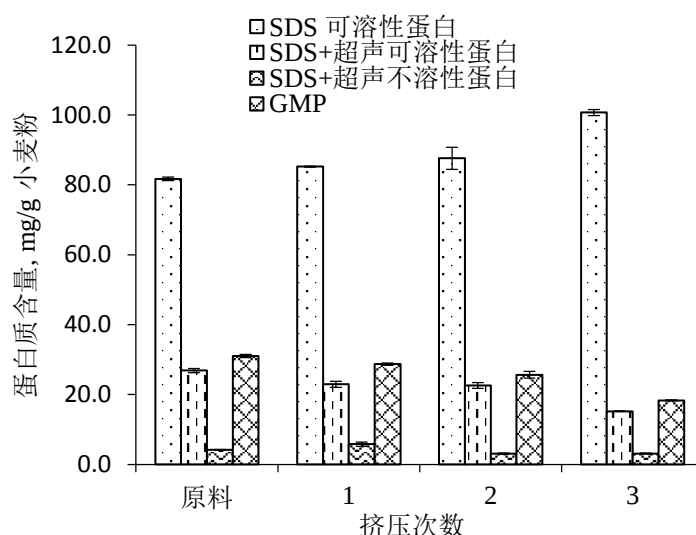


图 3-6 挤压机挤压次数对小麦粉在十二烷基硫酸钠 (SDS) 溶液中蛋白质溶解度的影响

Fig. 3-6 Effect of number of extrusion processes on the protein solubility of wheat flour in sodium dodecyl sulfate (SDS) solution with and without sonication treatment

图 3-6 显示了在有和没有超声处理的情况下, 挤压次数对小麦粉在 SDS 溶液中的蛋白质溶解度的影响。原料小麦粉经过多次挤压后, SDS 可溶性蛋白质的平均含量从 81.7 显著增加到 91.2mg/g ($P < 0.05$), 而 SDS +超声可溶性蛋白质, SDS +超声不溶性蛋白质和 GMP 的平均含量显著降低, 分别从 26.9 至 20.2 mg/g, 4.2 至 4.0 mg/g, 31.0 至 24.2 mg/g ($P < 0.05$)。

3 次挤出后 SDS 可溶性蛋白质含量显著高于 1 次或 2 次挤压后的含量, 分别从 85.2 和 87.6 增加到 100.7 mg/g ($P < 0.05$)。3 次挤压后 SDS +超声可溶性蛋白质含量显著低于 1 次和 2 次挤压, 分别从 22.9 和 22.6 降至 15.2 mg/g ($P < 0.05$)。1 次挤出后 SDS +超声不溶性蛋白质含量显著高于 2 次和 3 次挤出, 分别从 5.8 降至 3.1 和 3.1mg/g ($P < 0.05$)。随着挤压次数从 1 次增加到 2 次和 3 次, GMP 含量分别从 28.7 和 25.6 显著降低到 18.3 mg/g ($P < 0.05$)。3 次挤出后 SDS 可溶性蛋白质含量和 GMP 含量的变化比其他处理更显著 (表 3-4)。

3.4 讨论

影响 SDS 中小麦麦谷蛋白溶解的主要因素是麦谷蛋白被机械加工破坏的程度。面粉中的麦谷蛋白具有高聚集度, 并且它也被称为麦谷蛋白颗粒(Don et al., 2003)。麦谷蛋白发生动态变化, 在和面期间, SDS-不溶性麦谷蛋白质被破坏, 当停止和面时通过共价和非共价相互作用再聚集。在粉质仪和面试验中, 形成的面团随着混合程度的提高, SDS 可溶性蛋白含量显著增加, GMP 含量显著降低; 在挤压机和面的试验中, 挤出参数的影响与粉质仪和面过程中的影响明显相似。

较高的面团水分含量(45%)促进了面团在挤出机中的流动,使巯基-二硫化物的交换反应更容易发生。Mccann et al. (2013)报道,当水分含量从 33.00%增加到 56.00%时, GMP 含量从 28.30%降低到 25.60%。面团中水分含量仅为 25%时,小麦粉麦谷蛋白颗粒不能有效地水合而不会被破坏,导致几乎不粘合的面团,与在挤出机上记录的一致。在挤压机和面的试验中, SME 也很低。

通常,温度升高会导致半固体材料的粘度降低。相反,小麦粉面团在加热时显示粘度增加。面粉中蜡质和普通小麦淀粉的 B 型颗粒将在约 52°C-55°C 下膨胀(Chen et al., 2015)。这种膨胀增加了桶中面团状材料的粘度,从而在 50°C 时增加了 SME。通过将温度从 30°C 升高到 50°C,面团 GMP 含量仅降低 1.8mg/g (0.18%)。Wang et al. (2017)也证实,当加工温度升高到 56°C 时,面团中不溶性谷蛋白的百分比不会降低或增加很多。我们的结果和 Wang et al. (2017)的结果表明在这些挤出条件下麦谷蛋白破坏和再聚集的复杂动态。

显示出这种物理化学动力学的另一个发现是在 200rpm 的挤出加工后 SDS 可溶性蛋白质含量显著高于在 150rpm 或 100rpm 下混合后的 SDS 溶性蛋白质含量。然而,当仅比较 150rpm 和 100rpm 时,无显著差异。较高的螺杆转速强烈地增加了施加在面团上的剪切力和混合力。在低速下,可以认为层流的单轴流动是主要的,但是更高的螺杆转速(200rpm)可能增加剪切速率并引起双轴混合效应。这种作用对于将麦谷蛋白的共价二硫键破坏是重要的。Anderson and Pkw (2000)的研究表明,螺杆转速 240rpm 和 320rpm 时,挤出小麦粉的巯基含量分别从 5.90nM / mg (非挤压小麦粉)降低至 5.00nM / mg 和 4.85nM / mg。与直觉相反,在 400rpm 下,巯基含量再次回升至 5.20nM / mg。Morel et al. (2000)表明,当巯基含量从 0.5 μ mol/ g 增加到 6.8 μ mol/ g 时, SDS 可溶性蛋白质含量从 27%增加到 43%,表明在某些时候,由于进一步的破坏, GMP 含量减少。很明显,在挤出加工过程中,麦谷蛋白破坏,再聚集和-SH> SS 交换的动力学相当复杂。尽管如此,当螺杆速度达到足够高的水平时,看起来麦谷蛋白聚集体以与粉质仪的 Z 臂混合更相当的方式被破坏。

当施加压力时,蛋白质的水合作用和蛋白质之间的相互作用增强,但由于反压,面团流动减慢。SH-SS 交换反应动力学减慢,但压力确实加速了麦谷蛋白的物理破坏。Mccann et al. (2013)发现,与在 0.1MPa 下混合的面粉(11%蛋白质)相比,在 200MPa 下混合时, GMP 含量从 48.70%降低至 47.80%。当加上模头后将压力从 0.33 Bar 增加到 12.26 Bar 时, GMP 含量降低 4.5mg/g。加上模头显著提高了压力,将扭矩,剪切和 SME 提高到比未加模头的试验中高得多的水平。

在挤压机和面试验中, SME 同时受到粘度,温度,反压,机筒填充度和水分的影响。这些条件强烈影响 GMP 破坏/再聚集的动力学,以及热能和粘性耗散。通过绘制 SDS 可溶性蛋白和 GMP 对 SME 的图,反映了麦谷蛋白破坏的动力学(图 3-5)。这表明 GMP 相对于 SME 显著下降 $r = -0.77$, 并且相应地, SDS 可溶性部分的增加具有相当显著的 $r = + 0.60$ 。

挤出的面团返回到进料口并在第 2 次和第 3 次挤压机和面的期间,通过用圆形木棍推向机筒内。这导致每次运行的产量和 SME 不同,但施加的剪切速率,剪切应力和物料含水率保持不变。与 SME 的效果相比,挤出时间/重复的影响更显著。挤出相同样品两次后的 GMP 含量减少了额外的 3.1mg/g,当面团挤出 3 次时,与单次挤出相比,测得显著额外降低 10.4mg GMP / g。3 次挤出运行后 GMP 含量的大幅下降是因为较长的剪切力暴露增加了 GMP 颗粒被破坏的可能性。粉质仪第二次过度混合的面团 GMP 含量与挤压 3 次的一样(18.3 mg/g) (Don et al., 2003)等人的发

现也说明了当混合时间处于面团峰值或更高时，不再能分离出 GMP 部分。

3.5 小结

粉质仪的 Z 臂和面是应用双轴剪切的过程，导致 GMP 的快速破坏。相反，在挤压机和面的剪切单元中同向剪切面团期间，GMP 含量保持不变。通过在面条挤出加工过程中遵循 GMP 含量的变化趋势，我们了解到挤出加工在剪切单元中的 Z 臂和面和单轴剪切之间产生影响。当螺杆转速和压力增加时，似乎挤出加工开始类似于 Z 臂和面过程，但是当螺杆转速和压力低时，该过程更类似于单轴剪切。我们可以进一步得出结论，面团挤压加工后，面团中 GMP 含量是更好地了解影响面条面团和面条质量因素的一种有效方法。

第四章 和面参数对蛋白质组分光散射特性的影响

4.1 引言

Lefebvre et al. (2003)指出, 面筋网络可被视为不溶性胶体颗粒的聚集网络, 这与面筋形成是蛋白质胶体(干胶)有限溶胀(胀润)的观点一致。Lefebvre et al. (2000)认为面团中的蛋白质网络可被认为是 $0.1\sim 100\ \mu\text{m}$ 尺度的颗粒网络。分子化学的观点也认为, 蛋白质分子接近球形, 表面是亲水基团, 内部是疏水基团, 水分子与蛋白质分子表面亲水基团通过氢键结合, 形成水化层, 使蛋白质从紧密堆积的基质结构中转变为水溶液中的独立分子。这些分子表面的亲水侧链, 由于水溶液的存在和分子间距的增加, 自由度增加, 尤其在侧链的单链处允许侧链发生旋转, 蛋白质分子表面反应基团生成化学键的机会增加, 利于分子间的缔合, 促进面筋网状结构形成。这些变化包括蛋白质空间结构发生变化, 肽链展开, 与毗邻的肽链重新键合, 其中麦谷蛋白亚基间与麦谷蛋白亚基内发生巯基(位于半胱氨酸残基上)和二硫键(位于胱氨酸残基上)的交换反应, 最后通过分子间二硫键交联形成纤维状大分子聚合体(Don et al., 2002; Southan and Macritchie, 1999; Tatham et al., 1990; Weegels et al., 1996b)。醇溶蛋白在分子内二硫键、氢键和疏水键的作用下形成球状结构, 通过非共价键与麦谷蛋白结合, 充填在纤维状大分子聚合体中, 形成面筋的主干(Wang et al., 2016)。

高效液相色谱(HPLC)和多角度激光光散射(MALLS)的组合是一种快速, 可靠的技术, 用于确定大分子的摩尔质量和回转半径(Folta-Stogniew and Williams, 1999)。RP-HPLC 和尺寸排阻色谱均成功地与 MALLS 一起用于表征多种蛋白质(Beane and Lookhart, 2001; Dijk and Smit, 2000), 并且 MALLS 技术已经应用于 HMW-GS 的检测, 因此将光散射应用于谷蛋白聚合物具有很大的潜力。从理论上讲, MALLS 能够测量小麦蛋白的分子量分布(MWD), 因为已经确定不同小麦样品中麦谷蛋白强度的差异与 MWD 的差异有关(Carceller and Aussenac, 2001)。

当一束单色、相干的激光沿入射方向照射到聚合物稀溶液时, 光束中聚合物的电子云在光的电磁波作用下极化, 形成诱导偶极子, 其随着电磁波的振动向各个方向辐射出电磁波成为二次波源, 这就是散射光的来源。光散射技术有静态光散射和动态光散射, 如果分子是静止的, 则散射光和入射光的频率相同, 即称为静态光散射。但任何均相或多相液态体系的散射粒子都存在着分子热运动或布朗运动, 散射体积中诸散射质点的位相关系随时间不断地变化, 所以在某处观察到的散射光强也随时间不断地涨落, 使散射光的频率发生变化。把散射光的频率随时间而发生变化的散射称为动态光散射(董朝霞等, 2001)。

4.2 材料与方法

4.2.1 试验材料

同 2.2.1

4.2.2 试验设计

同 2.2.2

4.2.3 试验仪器

同 2.2.3

La Chrom 型高效液相系统 (Hitachi High Technologies Co., Tokyo, Japan);

DAWN Heleos- II 型多角度激光检测器 (Wyatt Technologies, Santa Barbara, CA);

Optilab 型示差检测器 (Wyatt Technologies, Santa Barbara, CA)。

4.2.4 试验方法

(1) 蛋白质的提取

同 3.2.4 (5), SDS 可溶性蛋白质用于十八角度激光光散射检测和静态光散射检测。

超声可溶性蛋白质提取: 250mg 面团样品中加 23ml 0.5%SDS 溶液, 震荡混匀 1h 后用超声波破碎机以 20kHz 的频率, 7% 的功率, 工作 2s 间隔 2s 的速度处理 5min, 然后 11600g 下离心 30min, 取上清液用于十八角度激光光散射检测和静态光散射检测。

(2) 十八角度激光光散射法

采用凝胶过滤-多角度激光散射仪连用 (SEC-MALLS) 对不同蛋白质样品进行测定, 采用系统自带的 ASTRA 软件 (Wyatt Technologies, Santa Barbara, CA) 对样品的摩尔质量 (M_w), 数均分子量 (M_n) 和 z -均回转半径等指标进行分析。

La Chrom 型高效液相系统: Hitachi L-2130 泵和 Hitachi L-2400 紫外检测器。检测器工作波长为 280 nm。

色谱柱: TSK G4000SWXL, 规格 7.8×300mm (TOSOH, Japan), 柱子温度 25°C。

流动相: 0.1%SDS-50 mmol/L 磷酸缓冲液, 流速 0.5 mL/min; 使用前用 0.2 μ m 滤膜过滤, 并超声 0.5 h。

DAWN Heleos- II 激光检测器: 检测波长 658nm, 工作温度 25°C。

Optilab 型示差检测器: 特定示差折光增量 (dn/dc) 0.185 ml/g。

进样量 200 μ l (房岩强, 2013)。

(3) 静态光散射测定

将提取的蛋白上清液装入经过丙酮淋洗过的光散射专用小管中, 温度设为 25 °C, 测量角度从 30°旋转至 150°, 进行静态光散射测试。每次测试 60 s, 上清液过 0.45 μ m 滤膜后直接进行测试 (黄雯琪等, 2015)。

(4) 统计分析

同 3.2.4 (7)

4.3 结果与分析

4.3.1 粉质仪和面对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

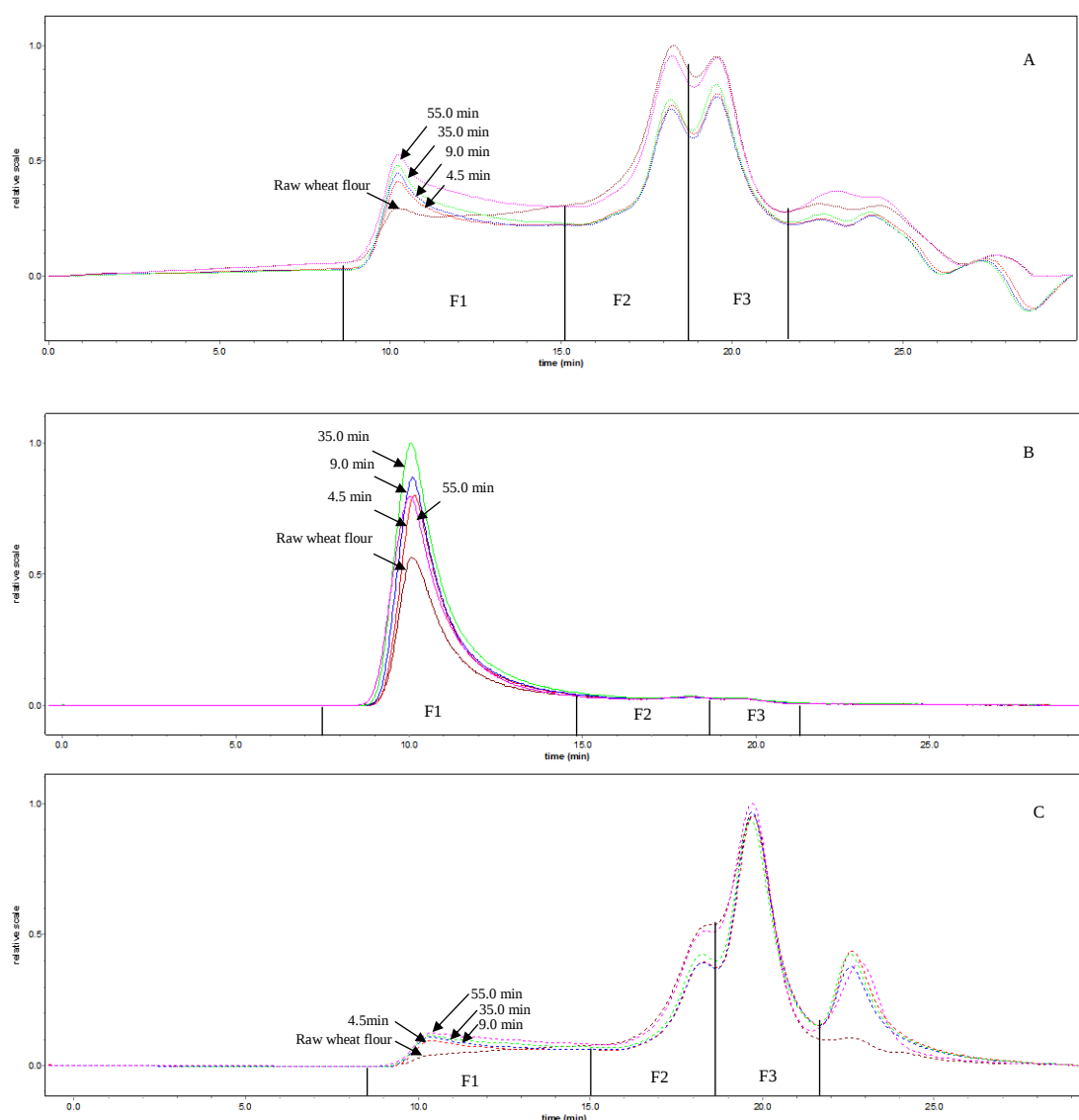


图 4-1 小麦粉原料和不同和面时间面团的 SDS-可溶性蛋白的紫外 (A)、激光 (B) 和示差 (C) 的洗脱图。F1, 级分 1; F2, 级分 2; F3, 级分 3

Fig. 4-1 SEC UV (A), LS (B) and DRI (C) elution profiles of SDS-soluble protein of raw wheat flour and mixed wheat flour. F1, fraction 1; F2, fraction 2; F3, fraction 3

小麦粉原料和粉质仪不同和面时间混合面团的 SDS 可溶性蛋白的紫外 (A)、激光 (B) 和示差 (C) 的响应曲线如图 4-1 所示。紫外响应信号显示, 原料和面团的 SDS 可溶性蛋白经过十八角度激光光散射仪前端尺寸排阻高效液相的分离, 主要呈现出三个峰, 分别标为 F1, F2, F3。基于激光和示差的信号, 通过选择每个样品蛋白质级分的洗脱范围, 使用 ASTRA 软件计算得到样品的重均摩尔质量 (M_w) 和数均摩尔质量 (M_n); 基于激光的信号, 计算得到样品的 z -均回转半径 (R_{gz})。 M_w/M_n 称为多分散性指数, 用来表征高聚物混合物的摩尔质量分布。

与小麦粉原料相比, 粉质仪混合面团 SDS 可溶性蛋白 F1 的激光响应信号显著增加, 而 F2 和 F3 的激光响应信号几乎没有变化。粉质仪混合面团中, 当混合时间从 4.5min 增加到 35.0min, F1 的激光信号显著升高, F2 和 F3 的激光信号则无显著变化。所有样品 F1 的激光信号均极显著高于 F2 和 F3, 表明 SDS 可溶性蛋白中 F1 的摩尔质量较大, 且是 SDS 可溶性蛋白平均摩尔质量的决定性组分。与小麦粉原料相比, 粉质仪混合面团 F1 的示差信号逐渐增加, F2 的示差信号逐

渐减小。在粉质仪混合面团中,当混合时间从 4.5min 增加到 55.0min 时,F1 的示差信号逐渐升高, F2 的示差信号逐渐下降。所有样品 F2 和 F3 的示差信号均极显著高于 F1。表明浓度从高到低的组分依次为 F3、F2 和 F1。因此, SDS 可溶性蛋白中存在低浓度、大摩尔质量的组分,同时也存在高浓度、小摩尔质量的组分。SDS 可溶性蛋白的平均摩尔质量取决于低浓度、大摩尔质量组分 F1。

(1) 小麦粉原料和粉质仪混合面团的 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和分散性指数

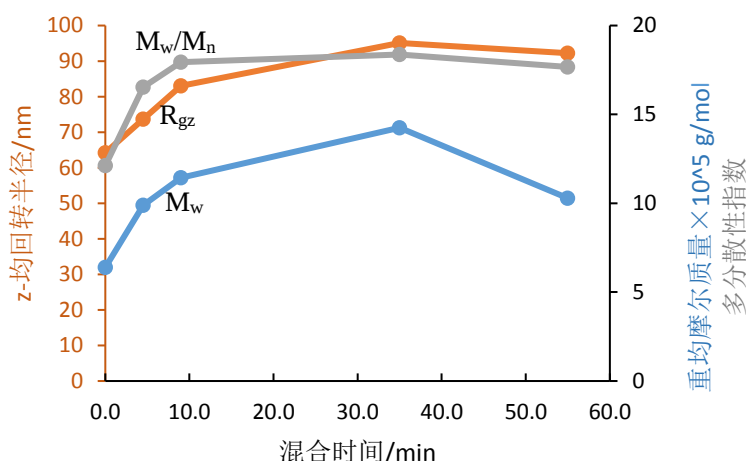


图 4-2 和面时间对 SDS-可溶性蛋白的 z-均回转半径, 重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-2 Effects of mixing time on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of SDS-soluble protein

小麦粉原料和粉质仪混合面团 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数(M_w/M_n)如图 4-2 所示。小麦粉原料的 M_w 为 6.39×10^5 g/mol, 粉质仪混合面团的 M_w 为 $9.88 \sim 14.25 \times 10^5$ g/mol, 比原料增加了 55~123%。粉质仪混合面团中,随着混合时间的延长至 35.0 min, 面团 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量从 9.88×10^5 g/mol 增至 14.25×10^5 g/mol, 增加了 44%。混合时间再延长至 55min, 面团 M_w 下降至 10.28×10^5 g/mol。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 64.2 nm, 粉质仪混合面团的 R_{gz} 为 73.7~95.1 nm, 比原料增加了 15~48%。粉质仪混合面团中,随着混合时间的延长至 35.0 min, 面团 SDS 可溶性蛋白的 R_{gz} 从 73.7 nm 增至 95.1 nm, 增加了 29%。混合时间再延长至 55 min, 面团 R_{gz} 下降至 92.2 nm。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 12.11, 粉质仪混合面团的 M_w/M_n 为 16.53~18.37, 比原料增加了 36~52%。粉质仪混合面团中,随着混合时间的延长至 35.0 min, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 16.53 增至 18.37, 增加了 11%。混合时间再延长至 55min, 面团 M_w/M_n 下降至 17.67 nm。

(2) 小麦粉原料和粉质仪混合面团 SDS 可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

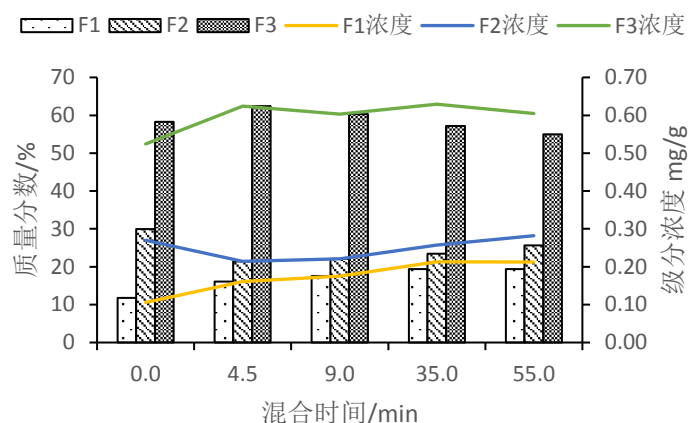


图 4-3 和面时间对 SDS 可溶性蛋白 F1、F2、F3 级分质量分数 (%) 和浓度的影响

Fig. 4-3 Effects of mixing time on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of SDS-solution protein

小麦粉原料和粉质仪混合面团 SDS 可溶性蛋白的进样浓度分别为 0.9,1.0,1.0,1.1,1.1 mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-3 所示。

小麦粉原料 F1 的级分浓度为 0.11 mg/g，粉质仪混合面团 F1 的级分浓度为 0.16~0.21 mg/g，比原料增加了 45~91%。粉质仪混合面团中，随着混合时间的延长至 35.0 min，面团 F1 的级分浓度从 0.16 mg/g 增至 0.21 mg/g，增加了 31%。混合时间再延长至 55min，面团 F1 的级分浓度未发生变化，为 0.21 mg/g。

小麦粉原料 F2 的级分浓度为 0.27 mg/g，粉质仪混合面团 F2 的级分浓度为 0.21~0.28 mg/g，变化范围为-22~4%。粉质仪混合面团中，随着混合时间的延长至 55.0 min，面团 F2 的级分浓度从 0.21 mg/g 增至 0.28 mg/g，增加了 33%。

小麦粉原料 F3 的级分浓度为 0.52 mg/g，粉质仪混合面团 F3 的级分浓度为 0.60~0.63 mg/g，比原料增加了 15~21%。粉质仪混合面团中，混合 4.5, 9.0, 35.0, 55.0，面团 F3 的级分浓度依次变化为 0.62, 0.60, 0.63, 0.61 mg/g。

小麦粉原料 F1 级分的比例为 11.76%，粉质仪混合面团 F1 级分的比例为 16.12~19.38%，比原料增加了 37~65%。粉质仪混合面团中，随着混合时间的延长至 35.0 min，面团 F1 级分的比例为从 16.12% 增至 19.38%，增加了 20%。混合时间再延长至 55min，面团 F1 级分的比例为未发生明显变化，为 19.36%。

小麦粉原料 F2 级分的比例为 30.00%，粉质仪混合面团 F2 级分的比例为 21.43~25.64%，比原料减少了 15~29%。粉质仪混合面团中，随着混合时间的延长至 55.0 min，面团 F2 级分的比例为从 21.43% 增至 25.64%，增加了 20%。

粉质仪混合处理后，在所有混合时间水平下，F3 的比例呈下降趋势。对于小麦粉原料，F3 级分的比例为 58.25%，粉质仪混合面团的为 55.00~62.45%，相对于小麦粉原料的变化范围为-6~7%。粉质仪混合后 F3 级分的比例变化与混合时间无关，这是由于 F1 和 F2 的变化导致的。

表 4-1 和面时间对 SDS-可溶性蛋白 F1, F2 和 F3 级分的重均摩尔质量 (M_w), 回转半径 (R_{gz}) 和多分散性指数 (M_w/M_n) 的影响Table 4-1 Effects of mixing time on weight-average molar mass (M_w), radius of gyration (R_{gz}) and polydispersity (M_w/M_n) of fraction F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

和面时间/min	$M_w \times 10^6$ g/mol			R_{gz} nm			M_w/M_n		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
0.0	4.98	0.145	0.039	66.2	44.9	39.8	3.62	1.39	1.08
4.5	5.70	0.194	0.045	75.4	49.0	41.4	2.60	1.43	1.10
9.0	6.14	0.205	0.047	84.7	56.2	48.7	2.60	1.46	1.10
35.0	6.98	0.231	0.055	95.2	64.2	56.6	2.70	1.49	1.09
55.0	5.11	0.157	0.040	94.3	54.6	47.9	3.22	1.39	1.08

小麦粉原料和粉质仪混合面团 SDS 可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量 (M_w), R_{gz} 均回转半径 (R_{gz}) 和多分散性指数 (M_w/M_n) 如表 4-1 所示。小麦粉原料 F1 级分的 M_w 为 4.98×10^6 g/mol, 粉质仪混合面团 F1 级分的 M_w 为 $5.11 \sim 6.98 \times 10^6$ g/mol, 比原料增加了 3~40%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F1 级分的 M_w 从 5.70×10^6 g/mol 逐渐增加至 6.98×10^6 g/mol; 混合时间再延长至 55min, F1 级分的 M_w 下降至 5.11×10^6 g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 M_w 为 0.145×10^6 g/mol, 粉质仪混合面团 F2 级分的 M_w 为 $0.157 \sim 0.231 \times 10^6$ g/mol, 比原料增加了 8~59%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F2 级分的 M_w 从 0.194×10^6 g/mol 逐渐增加至 0.231×10^6 g/mol; 混合时间再延长至 55min, F1 级分的 M_w 下降至 0.157×10^6 g/mol。小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 0.039×10^6 g/mol, 粉质仪混合面团 F3 级分的 M_w 为 $0.040 \sim 0.055 \times 10^6$ g/mol, 比原料增加了 3~41%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F3 级分的 M_w 从 0.045×10^6 g/mol 逐渐增加至 0.055×10^6 g/mol; 混合时间再延长至 55min, F1 级分的 M_w 下降至 0.040×10^6 g/mol。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 66.2 nm, 粉质仪混合面团 F1 级分的 R_{gz} 为 75.4~95.2 nm, 比原料增加了 14~44%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F1 级分的 R_{gz} 从 75.4 nm 逐渐增加至 95.2 nm; 混合时间再延长至 55min, F1 级分的 R_{gz} 略微下降至 94.3 nm。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 44.9 nm, 粉质仪混合面团 F2 级分的 R_{gz} 为 49.0~64.2 nm, 比原料增加了 9~43%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F2 级分的 R_{gz} 从 49.0 nm 逐渐增加至 64.2 nm; 混合时间再延长至 55min, F2 级分的 R_{gz} 略微下降至 54.6 nm。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 39.8 nm, 粉质仪混合面团 F3 级分的 R_{gz} 为 41.4~56.6 nm, 比原料增加了 3~42%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F3 级分的 R_{gz} 从 41.4 nm 逐渐增加至 56.6 nm; 混合时间再延长至 55min, F3 级分的 R_{gz} 略微下降至 47.9 nm。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 3.62, 粉质仪混合面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.60~3.22, 比原料减少了 12~28%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 55min 时, F1 级分的 M_w/M_n 从 2.60 逐渐增加至 3.22。这表明粉质仪混合处理增加了 F1 蛋白质组分的同质群体的程度, 并且 4.5~35.0 min 的混合时间对 F1 蛋白质组分的同质群体的程度没有显著影响。小麦粉原料 F2 级分的 M_w/M_n 为 1.39, 粉质仪混合面团 F2 级分的 M_w/M_n 为 1.39~1.49, 比原料增加了 0~7%。粉质仪混合面团中, 混合时间延长至 35min 时, F2 级分的 M_w/M_n 从 1.43 逐渐增加至 1.49, 延长至 55min 时, F2 级分的 M_w/M_n 减小至 1.39。小麦粉原料 F3 级分的 M_w/M_n 为 1.08, 粉质仪混合面团 F3 级分的

Mw/Mn 为 1.08~1.10，比原料增加了 0~2%,这表明 F3 蛋白质组分的同质群体的程度较高。

(3) 小麦粉原料和粉质仪混合面团的 SDS-可溶性蛋白的粒径分布

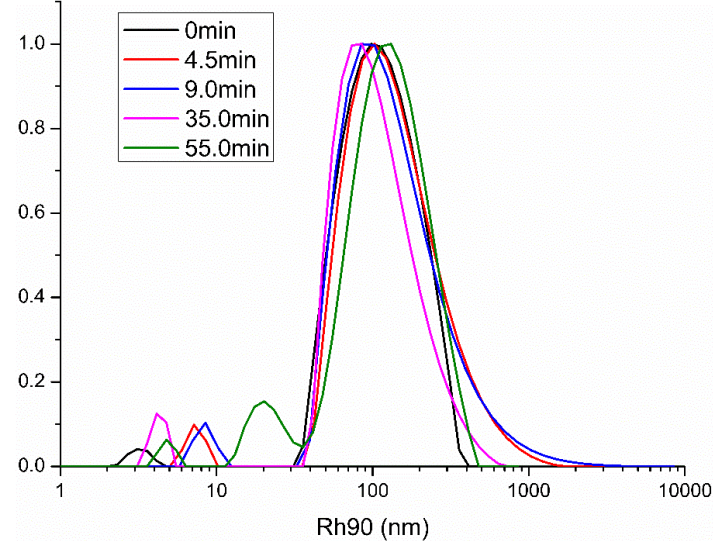


图 4-4 SDS-可溶性蛋白的粒径分布
Fig. 4-4 Size distribution of SDS-soluble protein

小麦粉原料和粉质仪混合面团的 SDS-可溶性蛋白采用静态光散射检测的粒径分布如图 4-4 所示。在和面过程的各个阶段，都有一个小于 10nm 的小峰和一个峰值在 100nm 的大峰。和面 0min 时，小麦蛋白的粒径分布有两个比较窄分布的峰，一个是几个纳米的小峰，一个是 100nm 的大峰，可能代表不同种类不同大小的蛋白，也可能是代表蛋白单体(几纳米小峰)和聚集体(100nm 大峰)。随着和面时间的增加，100nm 的大峰在逐渐变宽向大粒径方向移动，并在和面 4.5min 和 9.0min 时出现很长的大粒径拖尾，说明在此时小麦蛋白存在一个较大的结构。大峰的宽度从最初的 30nm 到 400nm 涵盖到了 30nm 到 2000nm 的范围。十几个纳米的可能来自蛋白交联或者聚集成的大结构的片段或者网格的扩散运动。随着和面时间延长至 35.0min 和 55.0min，小麦蛋白的粒径分布又进一步变窄。

(4) 小麦粉原料和粉质仪混合面团的 SDS-可溶性蛋白的均方旋转半径 (Rg) 和流体力学半径 (Rh)

表 4-2 和面时间对 SDS-可溶性蛋白的均方旋转半径 (Rg) 和流体力学半径 (Rh) 的影响
Table 4-2 Effects of mixing time on mean-square radius of gyration (Rg) and hydrodynamic radius (Rh) of SDS-soluble protein

混合时间/min	Rg/ nm	Rh/ nm	Rg/Rh
0	121.9	243.9	0.5
4.5	566.7	217.4	2.6
9.0	412.5	222.2	1.9
35.0	351.8	333.3	1.1
55.0	588.4	434.8	1.4

小麦粉原料和粉质仪混合面团的 SDS-可溶性蛋白的均方旋转半径(Rg)和流体力学半径(Rh)

如表 4-2 所示。形状因子 R_g/R_h 可以描述树枝状高分子在溶剂里的形态。 $R_g/R_h > 2$, 为刚性棒状; $R_g/R_h \sim 1.5$, 无规软链; $R_g/R_h \sim 1.0$, 枝状; $R_g/R_h \sim 0.8$, 球形(Burchard et al., 1980; Douglas et al., 1990; Vagbery et al., 1991)。

混合 0 min 时, SDS 可溶性蛋白的 $R_g/R_h=0.5$, 聚集体形貌为实心球体。混合 4.5min 后, $R_g/R_h=2.6$, 聚集体形貌为延伸的刚性链(棒状)。混合 9.0min 后, $R_g/R_h=1.9$, 为线性聚合物。混合 35min 后, $R_g/R_h=1.1$, 为松散连接的聚合物。混合 55min 后, $R_g/R_h=1.4$, 聚集体形貌为超支链。

4.3.2 粉质仪和面对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

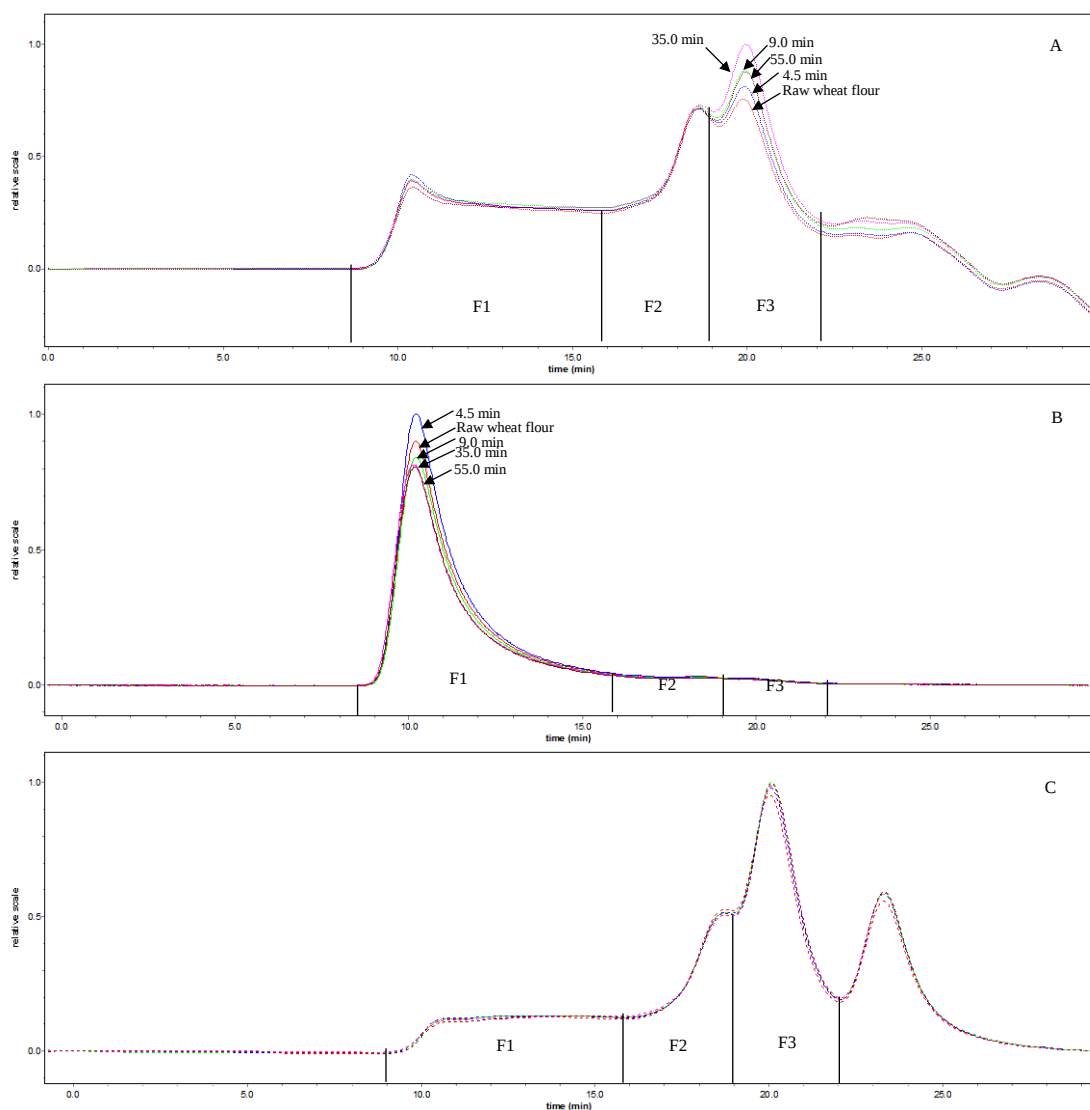


图 4-5 小麦粉原料和不同和面时间面团的超声-可溶性蛋白的紫外 (A)、激光 (B) 和示差 (C) 的洗脱图。F1, 级分 1; F2, 级分 2; F3, 级分 3

Fig. 4-5 SEC UV (A), LS (B) and DRI (C) elution profiles of sonication-soluble protein of raw wheat flour and mixed wheat flour. F1, fraction 1; F2, fraction 2; F3, fraction 3

小麦粉原料和粉质仪不同和面时间混合面团的超声可溶性蛋白的紫外 (A)、激光 (B) 和示差 (C) 的响应曲线如图 4-5 所示。紫外响应信号显示, 原料和面团的超声可溶性蛋白经过十八角

度激光光散射仪前端尺寸排阻高效液相的分离，主要呈现出三个峰，分别标为 F1, F2, F3。

与小麦粉原料相比，粉质仪混合 4.5 min 的面团超声可溶性蛋白 F1 的激光响应信号显著增加，当混合时间从 9.0 min 增加到 55.0min，F1 的激光信号显著降低，而 F2 和 F3 的激光响应信号几乎没有变化。粉质仪混合面团中，当混合时间从 4.5min 增加到 55.0min，F1 的激光信号显著降低，F2 和 F3 的激光信号则无显著变化。所有样品 F1 的激光信号均极显著高于 F2 和 F3，表明超声可溶性蛋白中 F1 的摩尔质量较大，且是超声可溶性蛋白平均摩尔质量的决定性组分。粉质仪混合面团 F1、F2 和 F3 的示差信号无显著变化。所有样品 F2 和 F3 的示差信号均极显著高于 F1。表明浓度从高到低的组分依次为 F3、F2 和 F1。因此，超声可溶性蛋白中存在低浓度、大摩尔质量的组分，同时也存在高浓度、小摩尔质量的组分。超声可溶性蛋白的平均摩尔质量取决于低浓度、大摩尔质量组分 F1。

(1) 小麦粉原料和粉质仪混合面团的超声可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

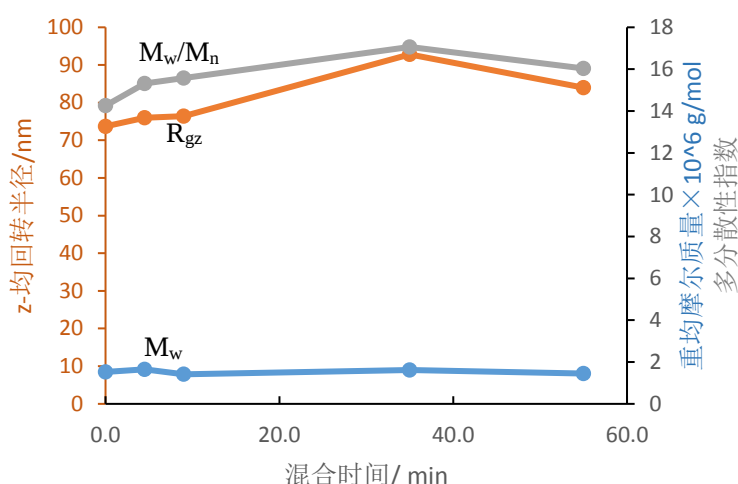


图 4-6 和面时间对超声-可溶性蛋白的 z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-6 Effects of mixing time on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of sonication-solution protein

小麦粉原料和粉质仪混合面团超声可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数(M_w/M_n)如图 4-6 所示。小麦粉原料的 M_w 为 1.53×10^6 g/mol，粉质仪混合面团的 M_w 为 $1.41 \sim 1.65 \times 10^6$ g/mol，比原料增加了 -8~8%。粉质仪混合面团中，随着混合时间从 4.5min 增加至 9.0 min，面团超声可溶性蛋白的 M_w 从 1.65×10^6 g/mol 降至 1.41×10^6 g/mol，降低了 15%。混合时间从 35min 至 55min，面团 M_w 从 1.62×10^6 g/mol 降至 1.46×10^6 g/mol，降低了 10%。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 73.7 nm，粉质仪混合面团的 R_{gz} 为 76.0~92.8 nm，比原料增加了 3~26%。粉质仪混合面团中，随着混合时间的延长至 35.0 min，面团超声可溶性蛋白的 R_{gz} 从 76.0 nm 增至 92.8 nm，增加了 22%。混合时间再延长至 55 min，面团 R_{gz} 下降至 84 nm。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 14.25，粉质仪混合面团的 M_w/M_n 为 15.32~17.06，比原料增加了 7~20%。粉质仪混合面团中，随着混合时间的延长至 35.0 min，面团超声可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 15.32 增至 17.06，增加了 11%。混合时间再延长至 55min，面团 M_w/M_n 下降至 16.04 nm。

（2）小麦粉原料和粉质仪混合面团超声可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、*z*-均回转半径和多分散性指数

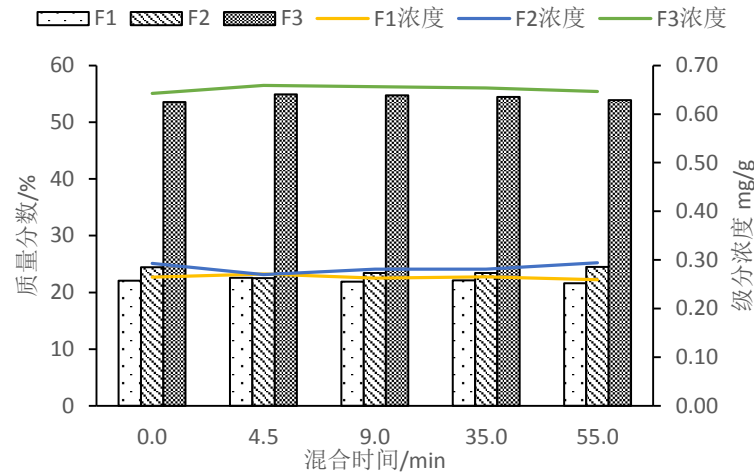


图 4-7 和面时间对超声可溶性蛋白 F1、F2、F3 级分质量分数（%）和浓度的影响
Fig. 4-7 Effects of mixing time on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of sonication solution protein

小麦粉原料和粉质仪混合面团超声可溶性蛋白的进样浓度都为 1.2mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-7 所示。

所有样品 F1 的浓度都约为 0.26mg/g，F2 的浓度都约为 0.28mg/g，F3 的浓度都约为 0.66mg/g。小麦粉原料和粉质仪混合面团 F1 级分的比例约为 22.00%，F2 级分的比例约 23%，F3 级分的比例约为 55%。同样的，粉质仪混合后 F3 级分的比例变化与混合时间无关，这是由于 F1 和 F2 的变化导致的。

表 4-3 和面时间对超声可溶性蛋白 F1，F2 和 F3 级分的重均摩尔质量（Mw），回转半径（Rgz）和多分散性指数（Mw/Mn）的影响									
Table 4-3 Effects of mixing time on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of sonication soluble protein									
和面时间/min	Mw×10 ⁶ g/mol			Rgz nm			Mw/Mn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
0.0	6.49	0.273	0.072	74.7	60.0	56.7	2.94	1.41	1.08
4.5	6.89	0.284	0.074	77.0	61.7	59.7	3.06	1.41	1.09
9.0	6.09	0.250	0.061	77.6	57.6	53.2	3.10	1.41	1.08
35.0	6.99	0.259	0.064	94.3	65.6	61.1	3.41	1.38	1.08
55.0	6.35	0.232	0.061	85.3	63.0	59.0	3.43	1.38	1.08

小麦粉原料和粉质仪混合面团的超声可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量(Mw)，*z* 均回转半径（Rgz）和多分散性指数（Mw/Mn）如表 4-3 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 6.49×10⁶g/mol，粉质仪混合面团 F1 级分的 Mw 为 6.09~6.99×10⁶g/mol，比原料增加了-6~8%。粉质仪混合面团中，混合时间延长至 9min 时，F1 级分的 Mw 从 6.89×10⁶g/mol 下降至 6.09×10⁶g/mol；混合时间从 35min 在延长至 55min，F1 级分的 Mw 从 6.99×10⁶g/mol 下降至 6.35×10⁶g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 Mw 为 0.273×10⁶g/mol，粉质仪混合面团 F2 级分的 Mw 为 0.232~0.284×10⁶g/mol，

比原料增加了-2~4%。粉质仪混合面团中,混合时间延长至 9min 时, F2 级分的 M_w 从 $0.284 \times 10^6 \text{g/mol}$ 下降至 $0.250 \times 10^6 \text{g/mol}$; 混合时间从 35min 在延长至 55min, F2 级分的 M_w 从 $0.259 \times 10^6 \text{g/mol}$ 下降至 $0.232 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 $0.072 \times 10^6 \text{g/mol}$, 粉质仪混合面团 F3 级分的 M_w 为 $0.061 \sim 0.074 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了-15~3%。粉质仪混合面团中,混合时间延长至 9min 时, F3 级分的 M_w 从 $0.074 \times 10^6 \text{g/mol}$ 下降至 $0.061 \times 10^6 \text{g/mol}$; 混合时间从 35min 在延长至 55min, F3 级分的 M_w 从 $0.064 \times 10^6 \text{g/mol}$ 下降至 $0.061 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 74.7 nm, 粉质仪混合面团 F1 级分的 R_{gz} 为 77.0~94.3 nm, 比原料增加了 3~26%。粉质仪混合面团中,混合时间延长至 35min 时, F1 级分的 R_{gz} 从 77.0 nm 逐渐增加至 94.3 nm; 混合时间再延长至 55min, F1 级分的 R_{gz} 略微下降至 85.3 nm。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 60.0 nm, 粉质仪混合面团 F2 级分的 R_{gz} 为 57.6~65.6 nm, 比原料增加了-4~9%。粉质仪混合面团中,混合时间延长至 9min 时, F2 级分的 R_{gz} 从 61.7 nm 下降至 57.6 nm; 混合时间从 35min 在延长至 55min, F2 级分的 R_{gz} 从 65.6 nm 下降至 63.0 nm。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 56.7 nm, 粉质仪混合面团 F3 级分的 R_{gz} 为 53.2~61.1 nm, 比原料增加了-6~8%。粉质仪混合面团中,混合时间延长至 9min 时, F3 级分的 R_{gz} 从 59.7 nm 下降至 53.2 nm; 混合时间从 35min 在延长至 55min, F3 级分的 R_{gz} 从 61.1 nm 下降至 59.0 nm。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.94, 粉质仪混合面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 3.06~3.43, 比原料增加了 4~17%。粉质仪混合面团中,混合时间延长至 55min 时, F1 级分的 M_w/M_n 从 3.06 逐渐增加至 3.43。这表明粉质仪混合处理增加了蛋白质组分的同质群体的程度。所有样品 F2 级分的 M_w/M_n 都接近 1.40, F3 级分的 M_w/M_n 都接近 1.08, 这表明 F2 和 F3 组分的同质群体的程度较高。

(3) 小麦粉原料和粉质仪混合面团的超声-可溶性蛋白的粒径分布

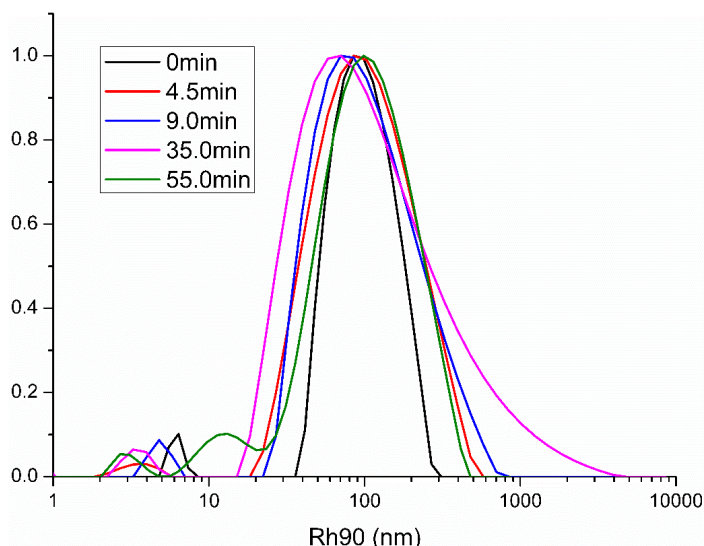


图 4-8 超声-可溶性蛋白的粒径分布
Fig. 4-8 Size distribution of sonication-soluble protein

粉质仪混合面团的超声提取物采用静态光散射检测的粒径分布如图 4-8 所示。在和面过程的各个阶段,都有一个几纳米的小峰,和一个峰值在 100nm 的大峰。和面 0min 时,小麦蛋白的粒

径分布有两个比较窄分布的峰，一个是几个纳米的小峰，一个是 100nm 的大峰，可能代表不同种类不同大小的蛋白，也可能是代表蛋白单体（几纳米小峰）和聚集体（100nm 大峰）。随着和面时间的增加，100nm 的大峰在逐渐变宽，同时向小粒径和大粒径方向移动，并在和面 35.0min 时出现一个很长的大粒径拖尾，说明在此时小麦蛋白存在一个较大的结构。大峰的宽度从最初的 35nm 到 300nm 涵盖到了 15nm 到 4000nm 的范围。十几个纳米的可能来自蛋白交联或者聚集成的大结构的片段或者网格的扩散运动。随着和面时间延长至 55.0min，小麦蛋白的粒径分布又进一步变窄。

（4）小麦粉原料和粉质仪混合面团的超声可溶性蛋白的均方旋转半径（Rg）和流体力学半径（Rh）

表 4-4 和面时间对超声可溶性蛋白的均方旋转半径（Rg）和流体力学半径（Rh）的影响
Table 4-4 Effects of mixing time on mean-square radius of gyration (Rg) and hydrodynamic radius (Rh) of sonication-soluble protein

混合时间/min	Rg/ nm	Rh/ nm	Rg/Rh
0	208.0	178.6	1.2
4.5	159.9	156.3	1.0
9.0	166.6	175.4	1.0
35.0	173.9	212.8	0.8
55.0	214.2	263.2	0.8

小麦粉原料和粉质仪混合面团的超声可溶性蛋白的均方旋转半径（Rg）和流体力学半径（Rh）如表 4-4 所示。混合 0 min 时，SDS 可溶性蛋白的 Rg/Rh=1.2，聚集体形貌为超支链。混合 4.5min 和 9.0min 后，Rg/Rh=1.0，聚集体形貌为松散连接的聚合物。混合 35.0min 和 55.0min 后，Rg/Rh=0.8，聚集体形貌为空心球体。

4.3.3 挤压机和面对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

4.3.3.1 挤压物料含水率对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

挤压机的物料含水率、温度、螺杆转速、模头和挤压次数对蛋白质组分光散射特性的影响，根据激光、紫外和示差信号进行蛋白峰的选择。粉质仪和面部分已对图谱进行了详细说明，下面仅列出所得数据，不再对图谱进行赘述。

（1）小麦粉原料和不同物料含水率面团的 SDS 可溶性蛋白的的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

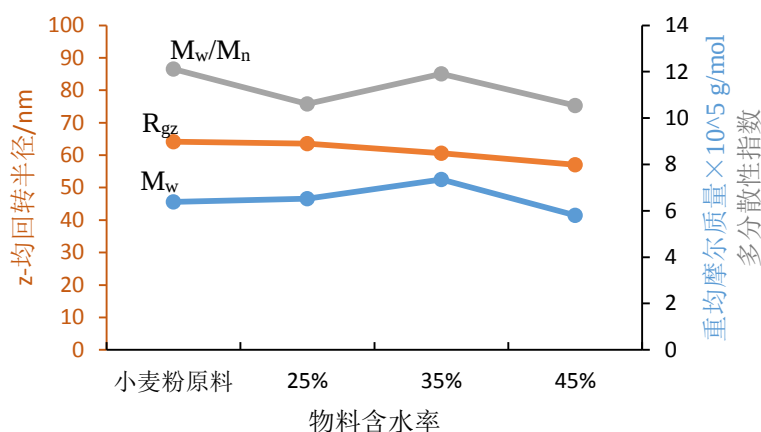


图 4-9 物料含水率对SDS-可溶性蛋白的z-均回转半径, 重均摩尔质量和多分散性指数的影响
Fig. 4-9 Effects of barrel moisture on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of SDS-solution protein

小麦粉原料和不同物料含水率下 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数 (M_w/M_n) 如图 4-9 所示。小麦粉原料的 M_w 为 6.39×10^5 g/mol, 不同物料含水率面团的 M_w 为 $5.81 \sim 7.35 \times 10^5$ g/mol, 比原料增加了 -9~15%。物料含水率从 25% 增加到 35%, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w 从 6.52×10^5 g/mol 增至 7.35×10^5 g/mol, 物料含水率升高至 45%, 面团 M_w 下降至 5.81×10^5 g/mol。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 64.2 nm, 不同物料含水率面团的 R_{gz} 为 57.1~63.6 nm, 比原料减少了 1~11%。不同水分面团中, 随着物料含水率的从 25% 增加至 45%, 面团 SDS 可溶性蛋白的 R_{gz} 从 63.6 nm 逐渐减小至 57.1 nm, 减少了 10%。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 12.11, 不同物料含水率面团的 M_w/M_n 为 10.54~11.92, 比原料减少了 2~13%。不同物料含水率面团中, 物料含水率从 25% 增加到 35%, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 10.61 增至 11.92, 增加了 12%, 物料含水率升高至 45%, 面团 M_w/M_n 下降至 10.54。

(2) 小麦粉原料和不同物料含水率面团 SDS 可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

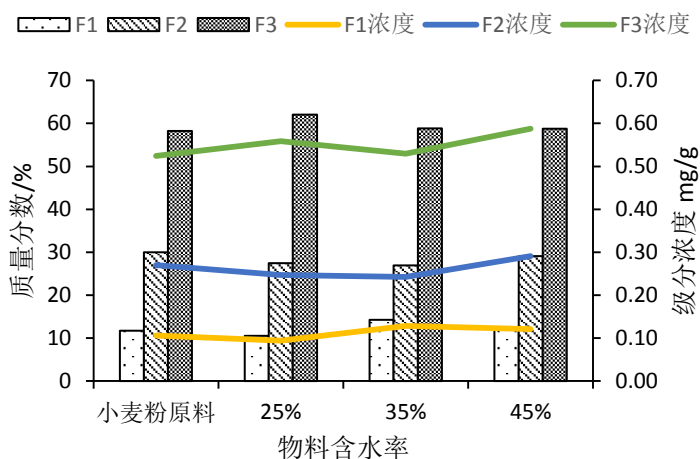


图 4-10 物料含水率对SDS-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数(%)和浓度的影响
Fig. 4-10 Effects of barrel moisture on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of SDS-solution protein

小麦粉原料和不同物料含水率面团 SDS 可溶性蛋白的进样浓度分别为 0.9,0.9,0.9,1.0 mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度,根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例,结果如图 4-10 所示。

小麦粉原料 F1 的级分浓度为 0.11 mg/g,不同水分面团 F1 的级分浓度为 0.09~0.13 mg/g,比原料增加了-18~18%。不同水分面团中,物料含水率从 25%增加到 35%,面团 F1 的级分浓度从 0.09 mg/g 增至 0.13 mg/g,增加了 44%。物料含水率升高至 45%,面团 F1 的级分浓度降低至 0.12 mg/g。小麦粉原料 F2 的级分浓度为 0.27 mg/g,不同水分面团 F2 的级分浓度为 0.24~0.29 mg/g,比原料增加了-13~7%。不同水分面团中,物料含水率从 25%增加到 35%,面团 F2 的级分浓度从 0.25 mg/g 降至 0.24 mg/g,物料含水率升高至 45%,面团 F2 的级分浓度增加至 0.29 mg/g。小麦粉原料 F3 的级分浓度为 0.52 mg/g,不同水分面团 F3 的级分浓度为 0.53~0.59 mg/g,比原料增加了 2~13%。不同水分面团中,物料含水率从 25%增加到 35%,面团 F3 的级分浓度从 0.56 mg/g 降至 0.53 mg/g,物料含水率升高至 45%,面团 F3 的级分浓度增加至 0.59 mg/g。

小麦粉原料 F1 级分的比例为 11.76%,不同水分面团 F1 级分的比例为 10.50~14.26%,比原料增加了-11~21%。不同水分面团中,物料含水率从 25%增加到 35%,面团 F1 级分的比例从 10.50% 增至 14.26%,增加了 36%,物料含水率升高至 45%,面团 F1 级分的比例为 12.11%。小麦粉原料 F2 级分的比例为 30.00%,不同水分面团 F2 级分的比例为 26.92~29.11%,比原料减少了 3~10%。不同水分面团中,物料含水率从 25%增加到 35%,面团 F2 级分的比例为从 27.43%减至 26.91%,物料含水率升高至 45%,面团 F2 级分的比例增加至 29.11%。随着水分含量增加,F3 的比例呈下降趋势。对于小麦粉原料,F3 级分的比例为 58.25%,不同水分面团的 F3 级分的比例为 58.78~62.06%,相对于原料增加了 1~7%。不同水分面团 F3 级分的比例变化与物料含水率无关,这是由于 F1 和 F2 的变化导致的。

表 4-5 物料含水率对 SDS-可溶性蛋白 F1, F2 和 F3 级分的重均摩尔质量 (M_w), 回转半径 (R_{gz}) 和分散性指数 (M_w/M_n) 的影响

Table 4-5 Effects of barrel moisture on weight-average molar mass (M_w), radius of gyration (R_{gz}) and polydispersity (M_w/M_n) of fraction F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

物料含水率	$M_w \times 10^6$ g/mol			R_{gz} nm			M_w/M_n		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	4.98	0.145	0.039	66.2	44.9	39.8	3.62	1.39	1.08
25%	5.48	0.186	0.048	65.3	52	46.3	3.37	1.46	1.09
35%	4.74	0.174	0.044	62.1	47.5	39.5	3.13	1.40	1.06
45%	4.30	0.155	0.041	58.5	46.7	42.1	3.05	1.41	1.08

小麦粉原料和不同物料含水率面团 SDS 可溶性蛋白各级分的重均摩尔质量 (M_w), z 均回转半径 (R_{gz}) 和分散性指数 (M_w/M_n) 如表 4-5 所示。小麦粉原料 F1 级分的 M_w 为 4.98×10^6 g/mol,不同水分面团 F1 级分的 M_w 为 $4.30 \sim 5.48 \times 10^6$ g/mol,比原料增加了-14~10%,不同水分面团中,随着水分含量增加,F1 级分的 M_w 从 5.48×10^6 g/mol 逐渐降低至 4.30×10^6 g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 M_w 为 0.145×10^6 g/mol,不同水分面团中,随着水分含量增加,F2 级分的 M_w 从 0.186×10^6 g/mol 逐渐降低至 0.155×10^6 g/mol。小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 0.039×10^6 g/mol,不同水分面团 F3 级分的 M_w 为 $0.041 \sim 0.048 \times 10^6$ g/mol,比原料增加了 5~23%,不同水分面团中,随着水分含量从 25%增加至 45%,F3 级分的 M_w 从 0.048×10^6 g/mol 逐渐降低至 0.041×10^6 g/mol。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 66.2 nm, 不同水分面团 F1 级分的 R_{gz} 为 58.5~65.3 nm, 比原料降低了 1~12%。不同水分面团中, 随着水分含量从 25%增加至 45%, F1 级分的 R_{gz} 从 65.3 nm 逐渐降低至 58.5 nm。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 44.9 nm, 不同水分面团 F2 级分的 R_{gz} 为 46.7~52.0 nm, 比原料增加了 4~16%。不同水分面团中, 随着水分含量从 25%增加至 45%, F2 级分的 R_{gz} 从 52.0 nm 逐渐降低至 46.7 nm。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 39.8 nm, 不同水分面团 F3 级分的 R_{gz} 为 39.5~46.3 nm, 比原料增加了 1~16%。不同水分面团中, 物料含水率从 25%增加到 35%, F3 级分的 R_{gz} 从 46.3 nm 逐渐降低至 39.5 nm, 物料含水率升高至 45%, F3 级分的 R_{gz} 增加至 42.1 nm。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 3.62, 不同水分面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 3.05~3.37, 比原料减少了 7~16%。不同水分面团中, 随着水分含量从 25%增加至 45%, F1 级分的 M_w/M_n 从 3.37 逐渐减少至 3.05。这表明物料含水率升高, 增加了 F1 蛋白质组分的同质群体的程度。小麦粉原料 F2 级分的 M_w/M_n 为 1.39, 不同水分面团 F2 级分的 M_w/M_n 为 1.40~1.46, 比原料增加了 1~5%。不同水分面团中, 水分含量从 25%增加至 35%, F2 级分的 M_w/M_n 从 1.46 逐渐降低至 1.40, 水分含量增加至 45%, F2 级分的 M_w/M_n 增加至 1.41。小麦粉原料 F3 级分的 M_w/M_n 为 1.08, 不同水分面团 F3 级分的 M_w/M_n 为 1.06~1.09, 这表明 F3 蛋白质组分同质群体的程度较高。

4.3.3.2 挤压机筒温度对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同机筒温度面团的 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量、 z -均回转半径和多分散性指数

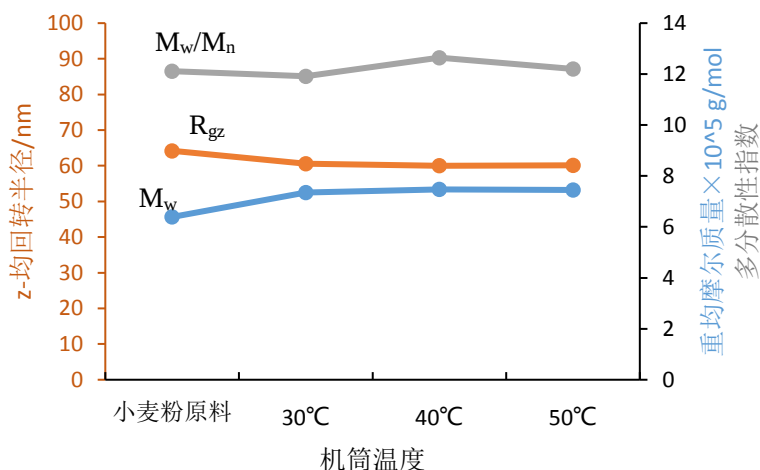


图 4-11 机筒温度对 SDS-可溶性蛋白的 z -均回转半径, 重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-11 Effects of barrel temperature on the z -average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of SDS-solution protein

小麦粉原料和不同机筒温度下 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、 z -均回转半径(R_{gz})、多分散性指数 (M_w/M_n) 如图 4-11 所示。小麦粉原料的 M_w 为 6.39×10^5 g/mol, 不同物料含水率面团的 M_w 为 $7.35 \sim 7.47 \times 10^5$ g/mol, 比原料增加了 15~17%。机筒温度从 30°C 增加到 40°C 和 50°C, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w 从 7.35×10^5 g/mol 增至 7.47×10^5 g/mol 和 7.45×10^5 g/mol, 机筒

温度对 SDS 可溶性蛋白的 M_w 无显著影响。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 64.2 nm, 不同机筒温度面团的 R_{gz} 都接近 60.0 nm, 比原料减少了 7%。机筒温度对 SDS 可溶性蛋白的 R_{gz} 无显著影响。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 12.11, 不同机筒温度面团的 M_w/M_n 为 11.92~12.65, 比原料增加了 -2~4%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加到 40°C, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 11.92 增至 12.65, 增加了 6%, 机筒温度升高至 50°C, 面团 M_w/M_n 下降至 12.20。

(2) 小麦粉原料和不同机筒温度面团 SDS 可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、 z -均回转半径和多分散性指数

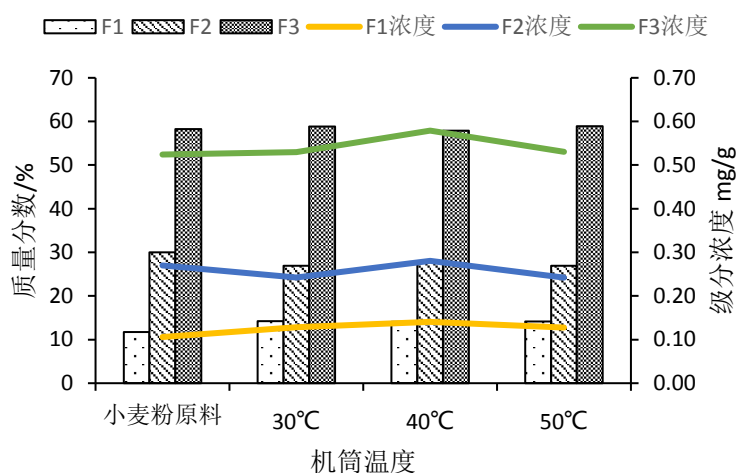


图 4-12 机筒温度对 SDS-可溶性蛋白 F1、F2、F3 级分质量分数 (%) 和浓度的影响

Fig. 4-12 Effects of barrel temperature on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of SDS-solution protein

小麦粉原料和不同物料含水率面团 SDS 可溶性蛋白的进样浓度分别为 0.9, 0.9, 1.0, 0.9 mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度, 根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例, 结果如图 4-12 所示。

小麦粉原料 F1 的级分浓度为 0.11 mg/g, 不同温度面团 F1 的级分浓度为 0.13~0.14 mg/g, 比原料增加了 18~27%。不同温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加到 40°C, 面团 F1 的级分浓度从 0.13 mg/g 增至 0.14 mg/g, 机筒温度升高至 50°C, 面团 F1 的级分浓度降低至 0.13 mg/g。小麦粉原料 F2 的级分浓度为 0.27 mg/g, 不同温度面团 F2 的级分浓度为 0.24~0.28 mg/g, 比原料增加了 -13~4%。不同温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加到 40°C, 面团 F2 的级分浓度从 0.24 mg/g 增至 0.28 mg/g, 机筒温度升高至 50°C, 面团 F2 的级分浓度降至 0.24 mg/g。小麦粉原料 F3 的级分浓度为 0.52 mg/g, 不同温度面团 F3 的级分浓度为 0.53~0.58 mg/g, 比原料增加了 2~12%。不同温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加到 40°C, 面团 F3 的级分浓度从 0.53 mg/g 增加至 0.58 mg/g, 机筒温度升高至 50°C, 面团 F3 的级分浓度降低至 0.53 mg/g。

小麦粉原料 F1 级分的比例为 12.00%, 不同温度面团 F1 级分的比例都接近 14.00%, 比原料增加了 20%。小麦粉原料 F2 级分的比例为 30.00%, 不同温度面团 F2 级分的比例都接近 27.00%, 比原料减少了 10%。小麦粉原料 F3 级分的比例为 58.00%, 不同温度面团 F3 级分的比例为 59.00%。不同水分面团 F3 级分的比例变化与机筒温度无关, 这是由于 F1 和 F2 的变化导致的。

表 4-6 机筒温度对SDS-可溶性蛋白F1, F2和F3级分的重均摩尔质量 (Mw), 回转半径 (Rgz) 和多分散性指数 (Mw/Mn) 的影响
Table 4-6 Effects of barrel temperature on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

机筒温度	Mw×10 ⁶ g/mol			Rgz nm			Mw/Mn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	4.98	0.145	0.039	66.2	44.9	39.8	3.62	1.39	1.08
30℃	4.74	0.174	0.044	62.1	47.5	39.5	3.13	1.40	1.06
40℃	4.89	0.161	0.043	61.4	45.9	40.8	3.25	1.39	1.08
50℃	4.83	0.170	0.044	61.6	46.2	39.0	3.23	1.41	1.07

小麦粉原料和不同机筒温度面团 SDS 可溶性蛋白各级分的重均摩尔质量 (Mw), z 均回转半径 (Rgz) 和多分散性指数 (Mw/Mn) 如表 4-6 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 4.98×10⁶g/mol, 不同温度面团 F1 级分的 Mw 都接近 4.80×10⁶g/mol, 比原料减少了 4%。小麦粉原料 F2 级分的 Mw 为 0.145×10⁶g/mol, 不同温度面团 F2 级分的 Mw 都接近 0.170×10⁶g/mol, 比原料增加了 17%。小麦粉原料 F3 级分的 Mw 为 0.039×10⁶g/mol, 不同温度面团 F3 级分的 Mw 都接近 0.044×10⁶g/mol, 比原料增加了 13%。

小麦粉原料 F1 级分的 Rgz 为 66.2 nm, 不同温度面团 F1 级分的 Rgz 都接近 62.0 nm, 比原料降低了 6%。小麦粉原料 F2 级分的 Rgz 为 44.9 nm, 不同温度面团 F2 级分的 Rgz 为 45.9~47.5 nm, 比原料增加了 2~6%。不同温度面团中, 随着温度从 30℃ 增加至 40℃ 和 50℃, F2 级分的 Rgz 从 47.5 nm 逐渐降低至 45.9 nm 和 46.2nm。小麦粉原料 F3 级分的 Rgz 为 39.8 nm, 不同水分面团 F3 级分的 Rgz 为都接近 40.0 nm, 与原料无显著差异。

小麦粉原料 F1 级分的 Mw/Mn 为 3.62, 不同温度面团 F1 级分的 Mw/Mn 为 3.13~3.25, 比原料减少了 10~14%。不同温度面团 F1 级分的 Mw/Mn 接近 3.20。小麦粉原料 F2 级分的 Mw/Mn 为 1.39, 不同机筒温度面团 F2 级分的 Mw/Mn 都接近 1.40。小麦粉原料 F3 级分的 Mw/Mn 为 1.08, 不同水分面团 F3 级分的 Mw/Mn 都接近 1.07。因此, 机筒温度升高, 对 F1、F2 和 F3 蛋白质组分的同质群体程度无显著影响。

4.3.3.3 挤压机螺杆转速对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同螺杆转速面团的 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

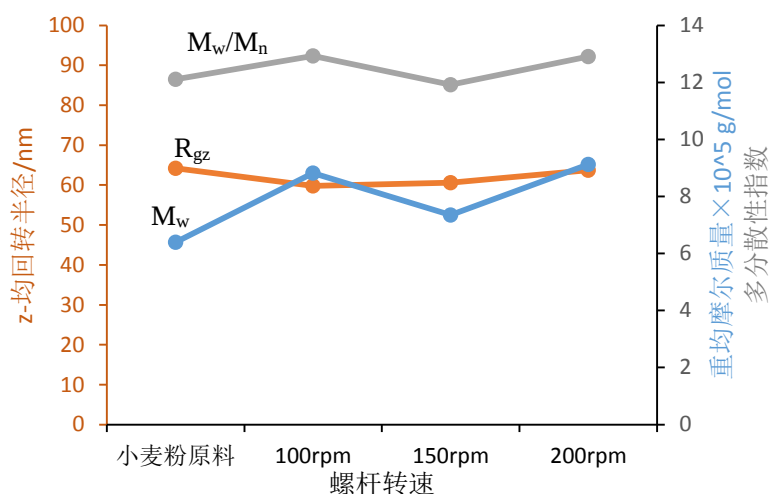


图 4-13 螺杆转速对SDS-可溶性蛋白的z-均回转半径, 重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-13 Effects of screw speed on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of SDS-solution protein

小麦粉原料和不同螺杆转速下 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数 (M_w/M_n) 如图 4-13 所示。小麦粉原料的 M_w 为 6.39×10^5 g/mol, 不同螺杆转速面团的 M_w 为 $7.35 \sim 9.13 \times 10^5$ g/mol, 比原料增加了 15~43%。螺杆转速从 100rpm 增加到 150rpm, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w 从 8.82×10^5 g/mol 增至 7.35×10^5 g/mol, 螺杆转速升高至 200rpm, 面团 M_w 增加至 9.13×10^5 g/mol。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 64.2 nm, 不同螺杆转速面团的 R_{gz} 为 59.8~63.7 nm, 比原料减少了 1~7%。不同螺杆转速面团中, 随着螺杆转速从 100rpm 增加至 200rpm, 面团 SDS 可溶性蛋白的 R_{gz} 从 59.8 nm 逐渐增加至 63.7 nm, 增加了 7%。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 12.11, 不同螺杆转速面团的 M_w/M_n 为 11.92~12.93, 比原料增加了 -2~7%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, 面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 12.93 降至 11.92, 螺杆转速升高至 200rpm, 面团 M_w/M_n 增加至 12.90。

(2) 小麦粉原料和不同螺杆转速面团 SDS 可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

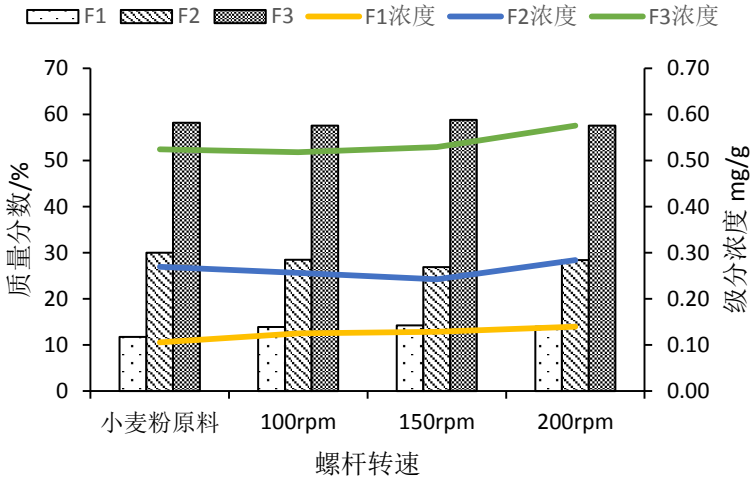


图 4-14 螺杆转速对SDS-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数(%)和浓度的影响

Fig. 4-14 Effects of screw speed on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of SDS-solution protein

小麦粉原料和不同螺杆转速面团 SDS 可溶性蛋白的进样浓度分别为 0.9,0.9,0.9,1.0mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-14 所示。

小麦粉原料 F1 的级分浓度为 0.11 mg/g，不同螺杆转速面团 F1 的级分浓度为 0.13~0.14 mg/g，比原料增加了 18~27%。小麦粉原料 F2 的级分浓度为 0.27 mg/g，不同螺杆转速面团 F2 的级分浓度为 0.24~0.28 mg/g，比原料增加了 -13~4%。不同螺杆转速面团中，螺杆转速从 100rpm 增加到 150rpm，面团 F2 的级分浓度从 0.26 mg/g 降至 0.24 mg/g，螺杆转速升高至 200rpm，面团 F2 的级分浓度增加至 0.28 mg/g。小麦粉原料 F3 的级分浓度为 0.52 mg/g，不同螺杆转速面团 F3 的级分浓度为 0.52~0.58 mg/g，比原料增加了 0~12%。不同螺杆转速面团中，螺杆转速的增加，面团 F3 的级分浓度从 0.52 mg/g 逐渐增加至 0.58 mg/g。

小麦粉原料 F1 级分的比例为 12.00%，不同螺杆转速面团 F1 级分的比例都接近 14.00%，比原料增加了 20%。小麦粉原料 F2 级分的比例为 30.00%，不同螺杆转速面团 F2 级分的比例都接近 28.00%，比原料减少了 7%。小麦粉原料 F3 级分的比例为 58.00%，不同螺杆转速面团 F3 级分的比例接近 58.00%。

表 4-7 螺杆转速对SDS-可溶性蛋白F1、F2和F3级分的重均摩尔质量(Mw)，回转半径(Rgz)和多分散性指数(Mw/Mn)的影响

Table 4-7 Effects of screw speed on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

螺杆转速	Mw×10 ⁶ g/mol			Rgz nm			Mw/Mn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	4.98	0.145	0.039	66.2	44.9	39.8	3.62	1.39	1.08
100rpm	5.79	0.186	0.050	60.8	49.7	46.3	2.98	1.45	1.08
150rpm	4.74	0.174	0.044	62.1	47.5	39.5	3.13	1.40	1.06
200rpm	5.95	0.200	0.051	64.9	52.8	46.4	2.94	1.47	1.08

小麦粉原料和不同螺杆转速面团 SDS 可溶性蛋白各级分的重均摩尔质量(Mw)，z 均回转半径(Rgz)和多分散性指数(Mw/Mn)如表 4-7 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 4.98×10⁶g/mol，

不同螺杆转速面团 F1 级分的 M_w 为 $4.74\sim 5.95\times 10^6\text{g/mol}$, 比原料增加了 $-5\sim 19\%$, 不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm , F1 级分的 M_w 从 $5.79\times 10^6\text{g/mol}$ 降低至 $4.74\times 10^6\text{g/mol}$, 螺杆转速再增加至 200rpm , M_w 增加至 $5.95\times 10^6\text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F2 级分的 M_w 为 $0.145\times 10^6\text{g/mol}$, 不同螺杆转速面团 F2 级分的 M_w 为 $0.174\sim 0.200\times 10^6\text{g/mol}$, 比原料增加了 $20\sim 28\%$, 不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm , F2 级分的 M_w 从 $0.186\times 10^6\text{g/mol}$ 降低至 $0.174\times 10^6\text{g/mol}$, 螺杆转速再增加至 200rpm , M_w 增加至 $0.200\times 10^6\text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 $0.039\times 10^6\text{g/mol}$, 不同螺杆转速面团 F3 级分的 M_w 为 $0.044\sim 0.051\times 10^6\text{g/mol}$, 比原料增加了 $13\sim 31\%$, 不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm , F3 级分的 M_w 从 $0.050\times 10^6\text{g/mol}$ 降低至 $0.044\times 10^6\text{g/mol}$, 螺杆转速再增加至 200rpm , M_w 增加至 $0.051\times 10^6\text{g/mol}$ 。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 66.2 nm , 不同螺杆转速面团 F1 级分的 R_{gz} 为 $60.8\sim 64.9\text{ nm}$, 比原料降低了 $2\sim 8\%$ 。不同螺杆转速面团中, 随着螺杆转速增加, F1 级分的 R_{gz} 从 60.8 nm 逐渐增加至 64.9 nm 。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 44.9 nm , 不同螺杆转速面团 F2 级分的 R_{gz} 为 $47.5\sim 52.8\text{ nm}$, 比原料增加了 $6\sim 18\%$ 。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm , F2 级分的 R_{gz} 从 49.7 nm 降低至 47.5 nm , 螺杆转速再增加至 200rpm , R_{gz} 增加至 52.8 nm 。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 39.8 nm , 不同螺杆转速面团 F3 级分的 R_{gz} 为 $39.5\sim 46.4\text{ nm}$, 比原料增加了 $1\sim 16\%$ 。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm , F3 级分的 R_{gz} 从 46.3 nm 降低至 39.5 nm , 螺杆转速再增加至 200rpm , F3 级分的 R_{gz} 增加至 46.4 nm 。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 3.62 , 不同螺杆转速面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 $2.94\sim 3.13$, 比原料减少了 $14\sim 19\%$ 。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm , F1 级分的 M_w/M_n 从 2.98 增加至 3.13 , 螺杆转速再增加至 200rpm , M_w/M_n 降低至 2.94 。小麦粉原料 F2 级分的 M_w/M_n 为 1.39 , 不同螺杆转速面团 F2 级分的 M_w/M_n 都接近 1.40 。小麦粉原料 F3 级分的 M_w/M_n 为 1.08 , 不同螺杆转速面团 F3 级分的 M_w/M_n 为 1.08 。因此, 螺杆转速对 F2 和 F3 蛋白质组分同质群体的程度的影响不显著。

4.3.3.4 挤压机模头对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和有无模头面团的 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

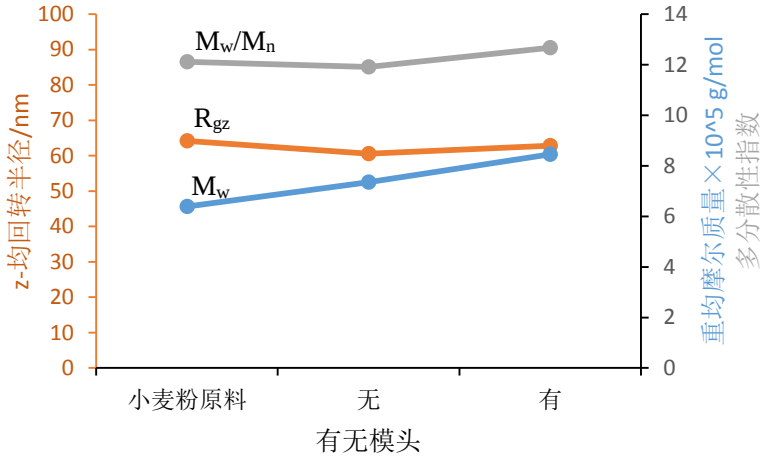


图 4-15 模头对SDS-可溶性蛋白的z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-15 Effects of die on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of SDS-solution protein

小麦粉原料和有无模头 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量 (M_w)、z-均回转半径 (R_{gz})、多分散性指数 (M_w/M_n) 如图 4-15 所示。小麦粉原料的 M_w 为 6.39×10^5 g/mol，加上模头后，面团的 M_w 从 7.35×10^5 g/mol 增加至 8.45×10^5 g/mol。小麦粉原料的 R_{gz} 为 64.2 nm，加上模头后，面团 SDS 可溶性蛋白的 R_{gz} 从 60.6 nm 增加至 62.8 nm。小麦粉原料的 M_w/M_n 为 12.11，加上模头后，面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 11.92 增加至 12.68。

(2) 小麦粉原料和有无模头面团 SDS 可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

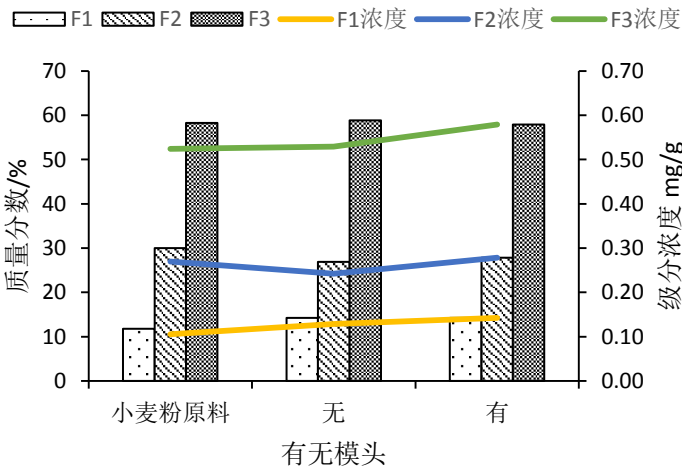


图 4-16 模头对SDS-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数(%)和浓度的影响

Fig. 4-16 Effects of die on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of SDS-solution protein

小麦粉原料和有无模头面团 SDS 可溶性蛋白的进样浓度分别为 0.9,0.9,1.0mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-16 所示。

小麦粉原料 F1 的级分浓度为 0.11 mg/g，加上模头后，F1 的级分浓度为从 0.13 mg/g 增加至 0.14 mg/g。小麦粉原料 F2 的级分浓度为 0.27 mg/g，加上模头后，F2 的级分浓度从 0.24 mg/g 增加至 0.28 mg/g，比原料增加了 -13~4%。小麦粉原料 F3 的级分浓度为 0.52 mg/g，加上模头后，F3 的级分浓度从 0.52 mg/g 增加至 0.58 mg/g，比原料增加了 0~12%。

小麦粉原料 F1 级分的比例为 12.00 %，不同螺杆转速面团 F1 级分的比例都接近 14.00%，比原料增加了 20%。小麦粉原料 F2 级分的比例为 30.00 %，不同螺杆转速面团 F2 级分的比例都接近 27.00%，比原料减少了 6%。小麦粉原料 F3 级分的比例为 58.00%，不同螺杆转速面团 F3 级分的比例接近 59.00%。

表 4-8 模头对SDS-可溶性蛋白F1，F2和F3级分的重均摩尔质量（Mw），回转半径（Rgz）和分散性指数（Mw/Mn）的影响

Table 4-8 Effects of die on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

有无模头	Mw×10 ⁶ g/mol			Rgz nm			Mw/Mn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	4.98	0.145	0.039	66.2	44.9	39.8	3.62	1.39	1.08
无	4.74	0.174	0.044	62.1	47.5	39.5	3.13	1.40	1.06
有	5.42	0.185	0.049	64.2	49.8	44.6	3.32	1.43	1.09

小麦粉原料和有无模头面团 SDS 可溶性蛋白各级分的重均摩尔质量（Mw），z 均回转半径（Rgz）和分散性指数（Mw/Mn）如表 4-8 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 4.98×10⁶g/mol，加上模头后，F1 级分的 Mw 为从 4.74~5.95×10⁶g/mol 增加至 5.42×10⁶g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 Mw 为 0.145×10⁶g/mol，加上模头后，F2 级分的 Mw 从 0.174~0.200×10⁶g/mol 增加至 0.185×10⁶g/mol。小麦粉原料 F3 级分的 Mw 为 0.039×10⁶g/mol，加上模头后，F3 级分的 Mw 从 0.044 增加至 0.049×10⁶g/mol。

小麦粉原料 F1 级分的 Rgz 为 66.2 nm，加上模头后，F1 级分的 Rgz 从 62.1nm 增加至 64.2nm。小麦粉原料 F2 级分的 Rgz 为 44.9 nm，加上模头后，F2 级分的 Rgz 从 47.5nm 增加至 49.8 nm。小麦粉原料 F3 级分的 Rgz 为 39.8 nm，加上模头后，F3 级分的 Rgz 从 39.5nm 增加至 44.6 nm。

小麦粉原料 F1 级分的 Mw/Mn 为 3.62，加上模头后，F1 级分的 Mw/Mn 从 3.13 增加至 3.32。小麦粉原料 F2 级分的 Mw/Mn 为 1.39，加上模头后，F2 级分的 Mw/Mn 都接近 1.40。小麦粉原料 F3 级分的 Mw/Mn 为 1.08，加上模头后，F3 级分的 Mw/Mn 都接近 1.08。因此，模头对 F2 和 F3 蛋白质组分同质群体程度的影响不显著。

4.3.3.5 挤压机挤压次数对 SDS 可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同挤压次数面团的 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

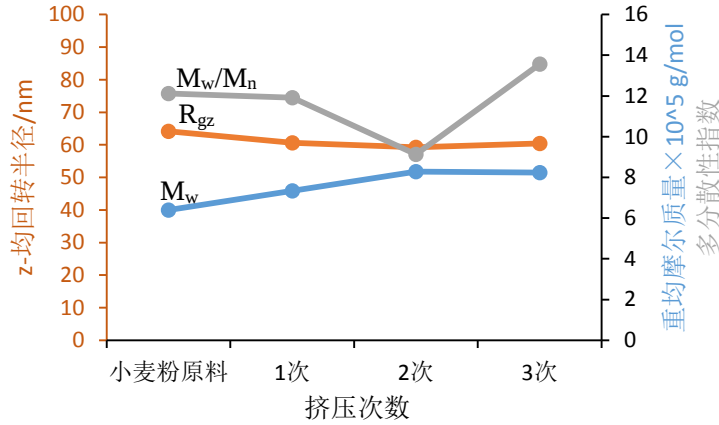


图 4-17 挤压次数对 SDS-可溶性蛋白的 z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响
Fig. 4-17 Effects of extrusion rounds on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of SDS-soluble protein

小麦粉原料和不同挤压次数下 SDS 可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数 (M_w/M_n) 如图 4-17 所示。小麦粉原料的 M_w 为 6.39×10^5 g/mol，不同挤压次数面团的 M_w 为 $7.35 \sim 8.29 \times 10^5$ g/mol，比原料增加了 15~30%。从挤压 1 次到挤压 2 次，面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w 从 7.35×10^5 g/mol 增至 8.29×10^5 g/mol，再增加到挤压 3 次，面团 M_w 基本保持不变，为 8.24×10^5 g/mol。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 64.2 nm，从挤压 1 次到挤压 3 次，面团 SDS 可溶性蛋白的 R_{gz} 都接近 60.0 nm，比原料减少了 7%。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 12.11，不同挤压次数面团的 M_w/M_n 为 9.14~13.56，比原料增加了 -25~12%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次增加至挤压 2 次，面团 SDS 可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 11.92 降至 9.14，再增加至挤压 3 次，面团 M_w/M_n 增加至 13.56。

(2) 小麦粉原料和不同挤压次数面团 SDS 可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、 z -均回转半径和多分散性指数

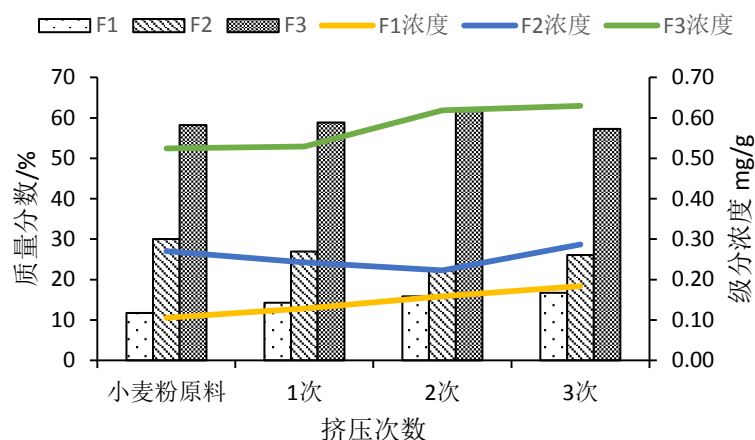


图 4-18 挤压次数对 SDS-可溶性蛋白 F1、F2、F3 级分质量分数 (%) 和浓度的影响

Fig. 4-18 Effects of extrusion rounds on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

小麦粉原料和不同挤压次数面团 SDS 可溶性蛋白的进样浓度分别为 0.9, 0.9, 1.0, 1.1 mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-18 所示。

小麦粉原料 F1 的级分浓度为 0.11 mg/g，不同挤压次数面团 F1 的级分浓度为 0.13~0.18 mg/g，比原料增加了 18~64%。小麦粉原料 F2 的级分浓度为 0.27 mg/g，不同挤压次数面团 F2 的级分浓度为 0.22~0.29 mg/g，比原料增加了 -19~7%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次数到挤压 2 次，面团 F2 的级分浓度从 0.24 mg/g 降至 0.22 mg/g，再增加至挤压 3 次，面团 F2 的级分浓度增加至 0.29 mg/g。小麦粉原料 F3 的级分浓度为 0.52 mg/g，不同挤压次数面团 F3 的级分浓度为 0.53~0.63 mg/g，比原料增加了 2~21%。不同挤压次数面团中，挤压次数增加，面团 F3 的级分浓度从 0.52 mg/g 逐渐增加至 0.63 mg/g。

小麦粉原料 F1 级分的比例为 11.76%，不同挤压次数面团 F1 级分的比例为 14.26~16.70%，比原料增加了 21~42%。不同挤压次数面团中，随着从挤压 1 次到挤压 2 次，面团 F1 级分的比例从 14.26% 逐渐增至 16.70%，增加了 17%。小麦粉原料 F2 级分的比例为 30.00%，不同挤压次数面团 F2 级分的比例为 22.23~26.92%，比原料减少了 10~26%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次到挤压 2 次，面团 F2 级分的比例为从 26.92% 减至 22.23%，再增加至挤压 3 次，面团 F2 级分的比例增加至 26.05%。小麦粉原料 F3 级分的比例为 58.25%，不同挤压次数面团的比例为 57.25~61.88%，相对于原料增加了 -2~6%。

表 4-9 挤压次数对SDS-可溶性蛋白F1, F2和F3级分的重均摩尔质量 (Mw), 回转半径 (Rgz) 和多分散性指数 (Mw/Mn) 的影响

Table 4-9 Effects of extrusion rounds on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of SDS-soluble protein

挤压次数	Mw×10 ⁶ g/mol			Rgz nm			Mw/Mn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	4.98	0.145	0.039	66.2	44.9	39.8	3.62	1.39	1.08
1 次	4.74	0.174	0.044	62.1	47.5	39.5	3.13	1.40	1.06
2 次	4.60	0.290	0.066	61.1	47.8	38.7	2.32	1.42	1.06
3 次	4.61	0.161	0.043	61.6	45.3	40.9	3.39	1.36	1.08

小麦粉原料和不同挤压次数面团 SDS 可溶性蛋白各级分的重均摩尔质量 (Mw), z 均回转半径 (Rgz) 和多分散性指数 (Mw/Mn) 如表 4-9 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 $4.98 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同挤压次数面团 F1 级分的 Mw 为 $4.60 \sim 4.74 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料减少了 5~8%, 不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次至挤压 2 次, F1 级分的 Mw 从 $4.74 \times 10^6 \text{g/mol}$ 降低至 $4.60 \times 10^6 \text{g/mol}$, 再增加至挤压 3 次, Mw 基本不变, 为 $4.61 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F2 级分的 Mw 为 $0.145 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同挤压次数面团 F2 级分的 Mw 为 $0.161 \sim 0.290 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 11~100%, 不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次至挤压 2 次, F2 级分的 Mw 从 $0.174 \times 10^6 \text{g/mol}$ 增加至 $0.290 \times 10^6 \text{g/mol}$, 再增加至挤压 3 次, Mw 降低至 $0.161 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F3 级分的 Mw 为 $0.039 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同挤压次数面团 F3 级分的 Mw 为 $0.043 \sim 0.066 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 10~69%, 不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次至挤压 2 次, F3 级分的 Mw 从 $0.044 \times 10^6 \text{g/mol}$ 增加至 $0.066 \times 10^6 \text{g/mol}$, 再增加至挤压 3 次, Mw 降低至 $0.043 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料 F1 级分的 Rgz 为 66.2 nm, 不同挤压次数面团 F1 级分的 Rgz 为 61.1~62.1 nm, 比原料降低了 6~8%。不同挤压次数面团中, F1 级分的 Rgz 都接近 62.0 nm。小麦粉原料 F2 级分的 Rgz 为 44.9 nm, 不同挤压次数面团 F2 级分的 Rgz 为 45.3~47.8 nm, 比原料增加了 1~6%。不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次至挤压 2 次, F2 级分的 Rgz 都接近 47.5 nm, 再增加至挤压 3 次, Rgz 降低至 45.3nm。小麦粉原料 F3 级分的 Rgz 为 39.8 nm, 不同挤压次数面团 F3 级分的 Rgz 为 38.7~40.9 nm, 比原料增加了 -3~3%。不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次至挤压 2 次, F3 级分的 Rgz 从 39.5 nm 降低至 38.7 nm, 再增加至挤压 3 次, F3 级分的 Rgz 增加至 40.9 nm。

小麦粉原料 F1 级分的 Mw/Mn 为 3.62, 不同挤压次数面团 F1 级分的 Mw/Mn 为 2.32~3.39, 比原料减少了 6~36%。不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次至挤压 2 次, F1 级分的 Mw/Mn 从 3.13 增降低至 2.32, 再增加至挤压 3 次, Mw/Mn 增加至 3.39。小麦粉原料 F2 级分的 Mw/Mn 为 1.39, 不同挤压次数面团 F2 级分的 Mw/Mn 都接近 1.40。小麦粉原料 F3 级分的 Mw/Mn 为 1.08, 不同挤压次数面团 F3 级分的 Mw/Mn 都接近 1.08。因此, 挤压次数对 F2 和 F3 蛋白质组分同质群体的程度的影响不显著。

4.3.4 挤压机和面对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

4.3.4.1 物料含水率对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同物料含水率面团的超声可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

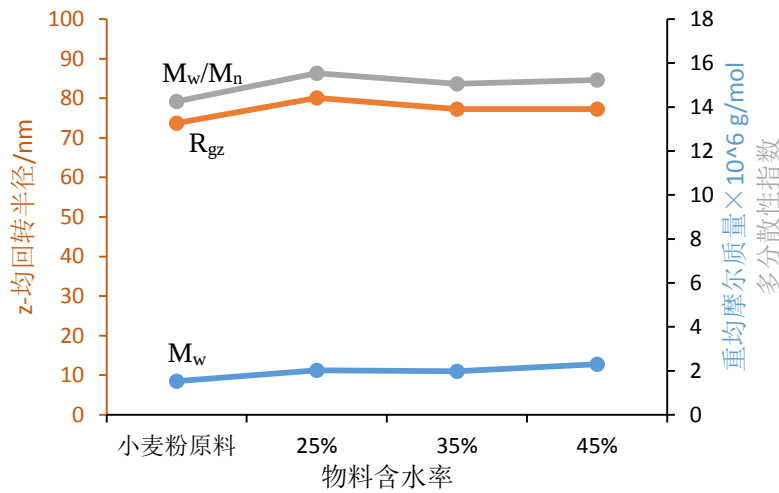


图 4-19 物料含水率对超声-可溶性蛋白的z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响
Fig. 4-19 Effects of barrel moisture on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同物料含水率面团超声可溶性蛋白的重均摩尔质量 (M_w)、z-均回转半径 (R_{gz})、多分散性指数 (M_w/M_n) 如图 4-19 所示。小麦粉原料的 M_w 为 1.53×10^6 g/mol，不同物料含水率面团的 M_w 为 $1.99 \sim 2.30 \times 10^6$ g/mol，比原料增加了 30~50%。不同物料含水率面团中，物料含水率为 25% 和 35%，面团超声可溶性蛋白的 M_w 都接近 2.00×10^6 g/mol，水分含量增加至 45%，面团 M_w 增加至 2.30×10^5 g/mol。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 73.7 nm，不同物料含水率面团的 R_{gz} 为 77.3~80.1 nm，比原料增加了 5~9%。不同物料含水率面团中，物料含水率从 25% 增加至 35%，面团超声可溶性蛋白的 R_{gz} 从 80.1 nm 降低至 77.3 nm，降低了 4%。物料含水率再增加至 45%，面团 R_{gz} 未发生变化，为 77.3 nm。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 14.25，不同物料含水率面团的 M_w/M_n 都接近为 15.24。

(2) 小麦粉原料和不同物料含水率面团超声可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

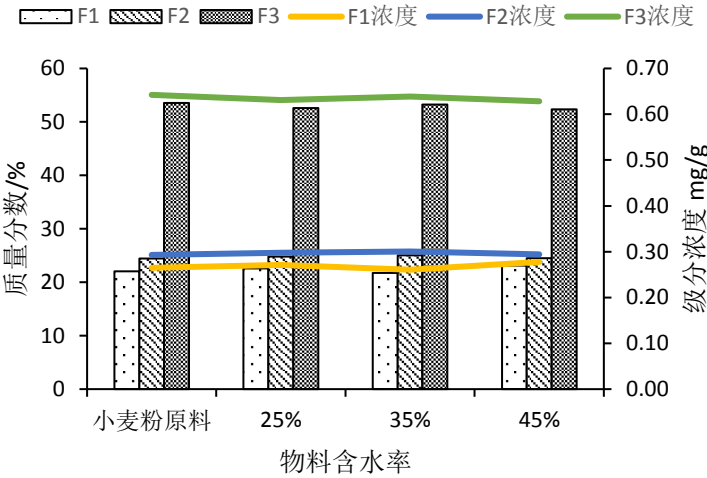


图 4-20 物料含水率对超声-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数(%)和浓度的影响
Fig. 4-20 Effects of barrel moisture on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同物料含水率面团超声可溶性蛋白的进样浓度都为 1.2mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-20 所示。

所有样品 F1 的浓度都约为 0.26mg/g, F2 的浓度都约为 0.27mg/g, F3 的浓度都约为 0.63mg/g。

小麦粉原料和不同物料含水率面团 F1 级分的比例约为 22.00 %, F2 级分的比例约 25%, F3 级分的比例约为 55%。

表 4-10 物料含水率对超声-可溶性蛋白F1, F2和F3级分的重均摩尔质量 (Mw), 回转半径 (Rgz) 和多分散性指数 (Mw/Mn) 的影响

Table 4-10 Effects of barrel moisture on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of sonication-soluble protein

物料含水率	Mw×10 ⁶ g/mol			Rgz nm			Mw/Mn		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	6.49	0.273	0.072	74.7	60	56.7	2.94	1.41	1.08
25%	8.49	0.326	0.087	80.9	68	65.5	2.85	1.43	1.08
35%	8.54	0.341	0.090	77.9	69.2	66.1	3.15	1.45	1.09
45%	9.39	0.382	0.101	77.8	69.8	68.3	2.75	1.47	1.09

小麦粉原料和不同物料含水率面团超声可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量 (Mw), z 均回转半径 (Rgz) 和多分散性指数 (Mw/Mn) 如表 4-10 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 6.49×10⁶g/mol, 不同物料含水率面团 F1 级分的 Mw 为 8.49~9.39×10⁶g/mol, 比原料增加了 31~45%。不同物料含水率面团中, 物料含水率从 25%增加至 45%, F1 级分的 Mw 逐渐从 8.49×10⁶g/mol 增加至 9.39×10⁶g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 Mw 为 0.273×10⁶g/mol, 不同物料含水率面团 F2 级分的 Mw 为 0.326~0.382×10⁶g/mol, 比原料增加了 19~40%。不同物料含水率面团中, 物料含水率从 25%增加至 45%, F2 级分的 Mw 从 0.326×10⁶g/mol 逐渐增加至 0.382×10⁶g/mol。

小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 $0.072 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，不同物料含水率面团 F3 级分的 M_w 为 $0.087 \sim 0.101 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，比原料增加了 -21~40%。不同物料含水率面团中，物料含水率从 25% 增加至 45%，F3 级分的 M_w 逐渐从 $0.087 \times 10^6 \text{g/mol}$ 增加至 $0.101 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 74.7 nm，不同物料含水率面团 F1 级分的 R_{gz} 为 77.8~80.9 nm，比原料增加了 4~8%。不同物料含水率面团中，物料含水率从 25% 增加至 35%，F1 级分的 R_{gz} 从 80.9 nm 降低至 77.9 nm，物料含水率再增加至 45%，F1 级分的 R_{gz} 几乎不变，为 77.8 nm。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 60.0 nm，不同物料含水率面团 F2 级分的 R_{gz} 为 68.0~69.8 nm，比原料增加了 13~16%。不同物料含水率面团中，物料含水率从 25% 增加至 45%，F2 级分的 R_{gz} 从 68.0 nm 逐渐增加至 69.8 nm。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 56.7 nm，不同物料含水率 F3 级分的 R_{gz} 为 65.5~68.3 nm，比原料增加了 -9~14%。不同物料含水率面团中，物料含水率从 25% 增加至 45%，F3 级分的 R_{gz} 从 65.5 nm 逐渐增加至 68.3 nm。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.94，不同物料含水率面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.75~3.15，比原料增加了 -6~7%。不同物料含水率面团中，物料含水率从 25% 增加至 35%，F1 级分的 M_w/M_n 从 2.85 逐渐增加至 3.15，物料含水率再增加至 45%， M_w/M_n 减少至 2.75。所有样品 F2 级分的 M_w/M_n 都接近 1.45，F3 级分的 M_w/M_n 都接近 1.08，这表明 F2 和 F3 组分的同质群体的程度较高。

4.3.4.2 挤压机筒温度对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同机筒温度面团的超声可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

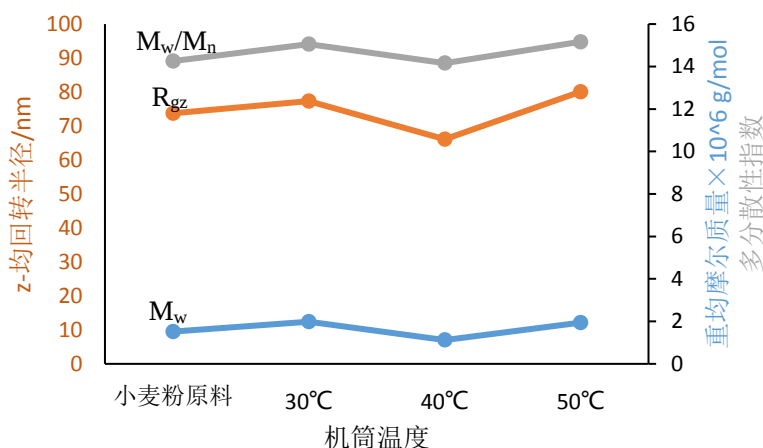


图 4-21 机筒温度对超声-可溶性蛋白的z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-21 Effects of barrel temperature on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同机筒温度面团超声可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数(M_w/M_n)如图 4-21 所示。小麦粉原料的 M_w 为 $1.53 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，不同机筒温度面团的 M_w 为 $1.12 \sim 1.99 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，比原料增加了 -27~30%。不同机筒温度面团中，机筒温度从 30°C 增加至 40°C，面团超声可溶性蛋白的 M_w 从 $1.99 \times 10^6 \text{g/mol}$ 降低至 $1.12 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，机筒温度再增加至 50°C，面团 M_w 增加至 $1.94 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 73.7 nm，不同机筒温度面团的 R_{gz} 为 66.1~80.1 nm，比原料增加了-10~9%。不同机筒温度面团中，机筒温度从 30℃ 增加至 40℃，面团超声可溶性蛋白的 R_{gz} 从 77.3 nm 降低至 66.1 nm，降低了 14%。机筒温度再增加至 50℃，面团 R_{gz} 增加至 80.1nm。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 14.25，不同机筒温度面团的 M_w/M_n 为 14.16~15.17，比原料增加了-1~6%。不同机筒温度面团中，机筒温度从 30℃ 增加至 40℃，面团超声可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 15.06 降至 14.16，机筒温度再增加至 50℃，面团 M_w/M_n 增加至 15.17。

（2）小麦粉原料和不同机筒温度面团超声可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、 z -均回转半径和多分散性指数

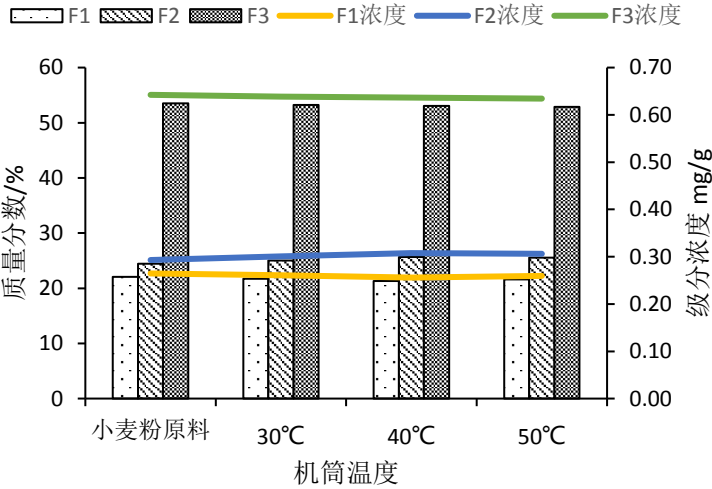


图 4-22 机筒温度对超声-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数（%）和浓度的影响
Fig. 4-22 Effects of barrel temperature on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同机筒温度面团超声可溶性蛋白的进样浓度都为 1.2mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-22 所示。

所有样品 F1 的浓度都约为 0.26mg/g，F2 的浓度都约为 0.30mg/g，F3 的浓度都约为 0.64mg/g。所有样品 F1 级分的比例约为 22.00%，F2 级分的比例约 26%，F3 级分的比例约为 54%。

表 4-11 机筒温度对超声-可溶性蛋白F1，F2和F3级分的重均摩尔质量（ M_w ），回转半径（ R_{gz} ）和多分散性指数（ M_w/M_n ）的影响

Table 4-11 Effects of barrel temperature on weight-average molar mass (M_w), radius of gyration (R_{gz}) and polydispersity (M_w/M_n) of fraction F1, F2 and F3 of sonication-soluble protein									
机筒温度	$M_w \times 10^6$ g/mol			R_{gz} nm			M_w/M_n		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	6.49	0.273	0.072	74.7	60.0	56.7	2.94	1.41	1.08
30℃	8.54	0.341	0.090	77.9	69.2	66.1	3.15	1.45	1.09
40℃	4.90	0.193	0.052	67.4	47.2	43.0	3.18	1.35	1.06
50℃	8.39	0.325	0.087	80.9	69.1	66.2	3.05	1.45	1.09

小麦粉原料和不同机筒温度面团超声可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量（ M_w ），

z 均回转半径 (R_{gz}) 和多分散性指数 (M_w/M_n) 如表 4-11 所示。小麦粉原料 F1 级分的 M_w 为 $6.49 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同温度面团 F1 级分的 M_w 为 $4.90 \sim 8.54 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 -24~32%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加至 40°C , F1 级分的 M_w 从 $8.54 \times 10^6 \text{g/mol}$ 降低至 $4.90 \times 10^6 \text{g/mol}$, 再增加至 50°C , M_w 增加至 $8.39 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F2 级分的 M_w 为 $0.273 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同机筒温度面团 F2 级分的 M_w 为 $0.193 \sim 0.341 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 -29~25%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加至 40°C , F2 级分的 M_w 从 $0.341 \times 10^6 \text{g/mol}$ 降低至 $0.193 \times 10^6 \text{g/mol}$, 再增加至 50°C , M_w 增加至 $0.325 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 $0.072 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同机筒温度面团 F3 级分的 M_w 为 $0.052 \sim 0.090 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 -28~25%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加至 40°C , F3 级分的 M_w 从 $0.090 \times 10^6 \text{g/mol}$ 降低至 $0.052 \times 10^6 \text{g/mol}$, 再增加至 50°C , M_w 增加至 $0.087 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 74.7 nm , 不同机筒温度面团 F1 级分的 R_{gz} 为 $67.4 \sim 80.9 \text{ nm}$, 比原料增加了 -10~8%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加至 40°C , F1 级分的 R_{gz} 从 77.9 nm 降低至 67.4 nm , 再增加至 50°C , F1 级分的 R_{gz} 增加至 80.9 nm 。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 60.0 nm , 不同机筒温度面团 F2 级分的 R_{gz} 为 $47.2 \sim 69.2 \text{ nm}$, 比原料增加了 -21~15%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加至 40°C , F2 级分的 R_{gz} 从 69.2 nm 降低至 47.2 nm , 再增加至 50°C , R_{gz} 增加至 69.1 nm 。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 56.7 nm , 不同机筒温度面团 F3 级分的 R_{gz} 为 $43.0 \sim 66.2 \text{ nm}$, 比原料增加了 -24~17%。不同机筒温度面团中, 机筒温度从 30°C 增加至 40°C , F3 级分的 R_{gz} 从 66.1 nm 增加至 43.0 nm , 再增加至 50°C , R_{gz} 增加至 66.2 nm 。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.94 , 不同机筒温度面团 F1 级分的 M_w/M_n 都接近 3.10 。所有样品 F2 级分的 M_w/M_n 都接近 1.40 , F3 级分的 M_w/M_n 都接近 1.09 , 这表明 F2 和 F3 组分的同质群体的程度较高。

4.3.4.3 挤压机螺杆转速对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同螺杆转速面团的超声可溶性蛋白的重均摩尔质量、 z -均回转半径和多分散性指数

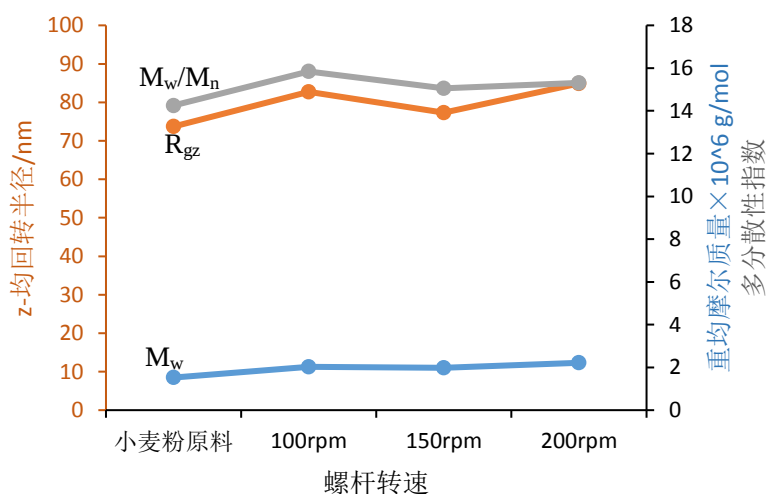


图 4-23 螺杆转速对超声-可溶性蛋白的 z -均回转半径, 重均摩尔质量和多分散性指数的影响

Fig. 4-23 Effects of screw speed on the z -average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同螺杆转速面团超声可溶性蛋白的重均摩尔质量(M_w)、z-均回转半径(R_{gz})、多分散性指数(M_w/M_n)如图 4-23 所示。小麦粉原料的 M_w 为 $1.53 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同螺杆转速面团的 M_w 为 $1.99 \sim 2.22 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 30~45%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, 面团超声可溶性蛋白的 M_w 从 $2.03 \times 10^6 \text{g/mol}$ 降低至 $1.99 \times 10^6 \text{g/mol}$, 螺杆转速再增加至 200rpm, 面团 M_w 增加至 $2.22 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料的 R_{gz} 为 73.7 nm, 不同螺杆转速面团的 R_{gz} 为 77.3~84.9 nm, 比原料增加了 5~15%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, 面团超声可溶性蛋白的 R_{gz} 从 82.7 nm 降低至 77.3 nm, 降低了 7%, 螺杆转速再增加至 200rpm, 面团 R_{gz} 增加至 84.9nm。

小麦粉原料的 M_w/M_n 为 14.25, 不同螺杆转速面团的 M_w/M_n 为 15.06~15.84, 比原料增加了 6~11%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, 面团超声可溶性蛋白的 M_w/M_n 从 15.84 降至 15.06, 螺杆转速再增加至 200rpm, 面团 M_w/M_n 增加至 15.31。

(2) 小麦粉原料和不同螺杆转速面团超声可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

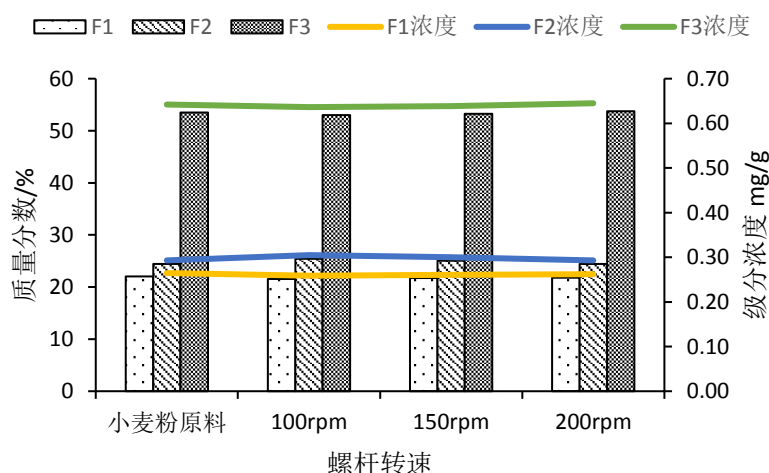


图 4-24 螺杆转速对超声-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数(%)和浓度的影响

Fig. 4-24 Effects of screw speed on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同螺杆转速面团超声可溶性蛋白的进样浓度都为 1.2mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度, 根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例, 结果如图 4-24 所示。

所有样品 F1 的浓度都为 0.26mg/g, F2 的浓度都约为 0.30mg/g, F3 的浓度都为 0.64mg/g。所有样品 F1 级分的比例约为 21.00 %, F2 级分的比例约 25%, F3 级分的比例约为 54%。

表 4-12 螺杆转速对超声-可溶性蛋白 F1, F2和F3级分的重均摩尔质量 (M_w), 回转半径 (R_{gz}) 和多分散性指数 (M_w/M_n) 的影响Table 4-12 Effects of screw speed on weight-average molar mass (M_w), radius of gyration (R_{gz}) and polydispersity (M_w/M_n) of fraction F1, F2 and F3 of sonication-soluble protein

螺杆转速	$M_w \times 10^6$ g/mol			R_{gz} nm			M_w/M_n		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	6.49	0.273	0.072	74.7	60.0	56.7	2.94	1.41	1.08
100rpm	8.87	0.337	0.087	83.6	70.2	67.8	3.11	1.48	1.09
150rpm	8.54	0.341	0.090	77.9	69.2	66.1	3.15	1.45	1.09
200rpm	9.53	0.392	0.099	85.7	74.4	70.3	2.90	1.49	1.09

小麦粉原料和不同螺杆转速面团超声可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量 (M_w), R_{gz} 均回转半径 (R_{gz}) 和多分散性指数 (M_w/M_n) 如表 4-12 所示。小麦粉原料 F1 级分的 M_w 为 6.49×10^6 g/mol, 不同螺杆转速面团 F1 级分的 M_w 为 $8.54 \sim 9.53 \times 10^6$ g/mol, 比原料增加了 32~47%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, F1 级分的 M_w 从 8.87×10^6 g/mol 降低至 8.54×10^6 g/mol, 再增加 200rpm, M_w 增加至 9.53×10^6 g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 M_w 为 0.273×10^6 g/mol, 不同螺杆转速面团 F2 级分的 M_w 为 $0.337 \sim 0.392 \times 10^6$ g/mol, 比原料增加了 23~44%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 200rpm, F2 级分的 M_w 从 0.337×10^6 g/mol 逐渐增加至 0.392×10^6 g/mol。小麦粉原料 F3 级分的 M_w 为 0.072×10^6 g/mol, 不同螺杆转速面团 F3 级分的 M_w 为 $0.087 \sim 0.099 \times 10^6$ g/mol, 比原料增加了 21~38%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 200rpm, F3 级分的 M_w 从 0.087×10^6 g/mol 逐渐增加至 0.099×10^6 g/mol。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 74.7 nm, 不同螺杆转速面团 F1 级分的 R_{gz} 为 77.9~85.7nm, 比原料增加了 4~15%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, F1 级分的 R_{gz} 从 83.6 nm 降低至 77.9 nm, 再增加至 200rpm, F1 级分的 R_{gz} 增加至 85.7nm。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 60.0 nm, 不同螺杆转速面团 F2 级分的 R_{gz} 为 69.2~74.4 nm, 比原料增加了 15~24%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, F2 级分的 R_{gz} 从 70.2 nm 降低至 69.2 nm, 再增加至 200rpm, R_{gz} 增加至 74.4nm。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 56.7 nm, 不同螺杆转速面团 F3 级分的 R_{gz} 为 66.1~70.3 nm, 比原料增加了 17~24%。不同螺杆转速面团中, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, F3 级分的 R_{gz} 从 67.8 nm 降低至 66.1 nm, 再增加至 200rpm, R_{gz} 增加至 70.3nm。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.94, 不同螺杆转速面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.90~3.15, 比原料增加了 -1~7%, 螺杆转速从 100rpm 增加至 150rpm, F1 级分的 M_w/M_n 都接近 3.11, 再增加至 200rpm, M_w/M_n 降低至 2.90。所有样品 F2 级分的 M_w/M_n 都接近 1.45, F3 级分的 M_w/M_n 都接近 1.09, 这表明 F2 和 F3 组分的同质群体的程度较高。

4.3.4.4 挤压机模头对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和有无模头面团的超声可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和分散性指数

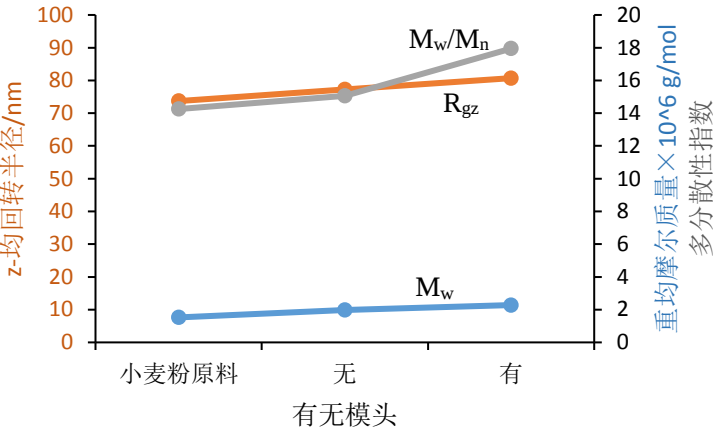


图 4-25 模头对超声-可溶性蛋白的z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响
Fig. 4-25 Effects of die on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of sonication-solution protein

小麦粉原料和有无模头面团超声可溶性蛋白的重均摩尔质量（Mw）、z-均回转半径（Rgz）、多分散性指数（Mw/Mn）如图 4-25 所示。小麦粉原料的 Mw 为 1.53×10⁶g/mol，加上模头后，面团的 Mw 从 1.99×10⁶g/mol 增加至 2.28×10⁶g/mol。

小麦粉原料的 Rgz 为 73.7 nm，加上模头后，面团的 Rgz 为 77.3 nm 增加到 80.7nm。

小麦粉原料的 Mw/Mn 为 14.25，加上模头后，面团的 Mw/Mn 为 15.06 增加到 17.95。

(2) 小麦粉原料和有无模头面团超声可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

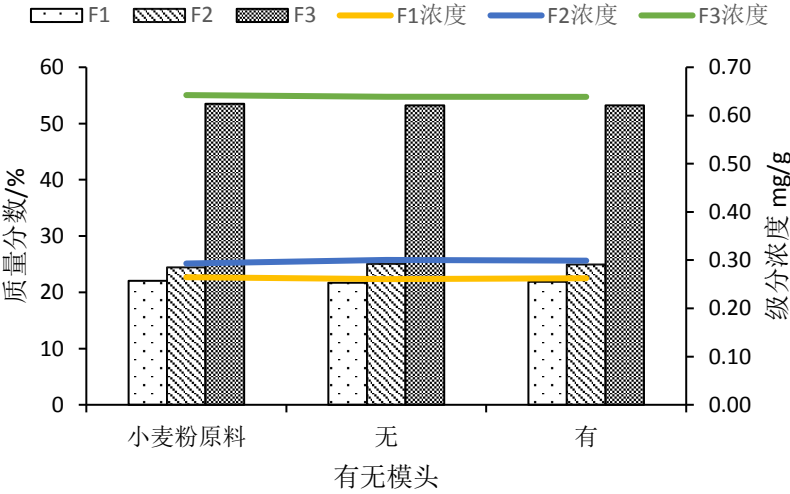


图 4-26 模头对超声-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数（%）和浓度的影响
Fig. 4-26 Effects of die on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of sonication-solution protein

小麦粉原料和有无模头面团超声可溶性蛋白的进样浓度都为 1.2mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-26 所示。

所有样品 F1 的浓度都为 0.26mg/g，F2 的浓度都约为 0.30mg/g，F3 的浓度都为 0.64mg/g。所有样品 F1 级分的比例约为 21.00 %，F2 级分的比例约 25%，F3 级分的比例约为 54%。

表 4-13 模头对超声-可溶性蛋白F1，F2和F3级分的重均摩尔质量（Mw），回转半径（Rgz）和多分散性指数（Mw/Mn）的影响

Table 4-13 Effects of die on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of sonication-soluble protein

有无模头	M _w ×10 ⁶ g/mol			R _{gz} nm			M _w /M _n		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	6.49	0.273	0.072	74.7	60.0	56.7	2.94	1.41	1.08
无	8.54	0.341	0.090	77.9	69.2	66.1	3.15	1.45	1.09
有	9.87	0.342	0.086	81.4	68.1	64.9	3.37	1.48	1.09

小麦粉原料和有无模头面团超声可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量（Mw），z 均回转半径（Rgz）和多分散性指数（Mw/Mn）如表 4-13 所示。小麦粉原料 F1 级分的 Mw 为 6.49×10⁶g/mol，加上模头后，F1 级分的 Mw 为从 8.54×10⁶g/mol 增加至 9.87×10⁶g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 Mw 为 0.273×10⁶g/mol，加上模头后，F2 级分的 Mw 为都接近 0.341×10⁶g/mol。小麦粉原料 F3 级分的 Mw 为 0.072×10⁶g/mol，加上模头后，F3 级分的 Mw 为从 0.090×10⁶g/mol 降低至 0.086×10⁶g/mol。

小麦粉原料 F1 级分的 Rgz 为 74.7 nm，加上模头后，F1 级分的 Rgz 从 77.9nm 增加至 81.4nm。小麦粉原料 F2 级分的 Rgz 为 60.0 nm，加上模头后，F2 级分的 Rgz 从 69.2nm 降低至 68.1nm。小麦粉原料 F3 级分的 Rgz 为 56.7 nm，加上模头后，F3 级分的 Rgz 从 66.1nm 降低至 64.9nm。。

小麦粉原料 F1 级分的 Mw/Mn 为 2.94，加上模头后，F1 级分的 Mw/Mn 从 3.15 增加至 3.37。所有样品 F2 级分的 Mw/Mn 都接近 1.45，F3 级分的 Mw/Mn 都接近 1.09，这表明 F2 和 F3 组分的同质群体的程度较高。

4.3.4.5 挤压机挤压次数对超声可溶性蛋白质光散射特性的影响

(1) 小麦粉原料和不同挤压次数面团的超声可溶性蛋白的重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

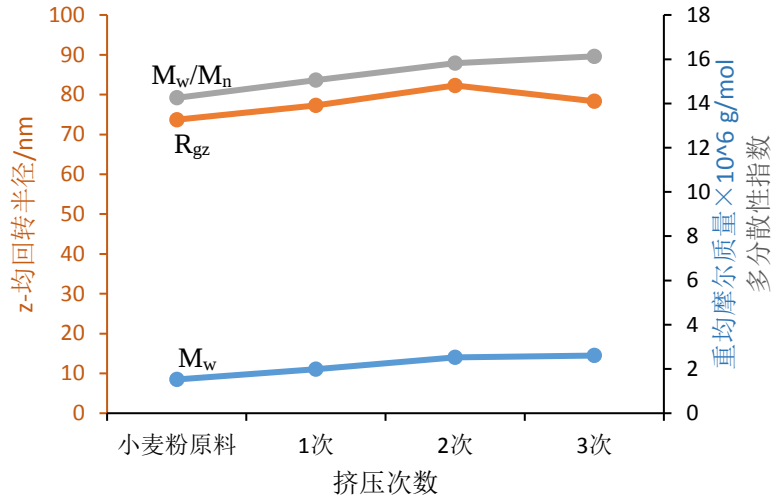


图 4-27 挤压次数对超声-可溶性蛋白的z-均回转半径，重均摩尔质量和多分散性指数的影响
Fig. 4-27 Effects of extrusion rounds on the z-average radius of gyration, weight-average molar mass and polydispersity index of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同挤压次数面团超声可溶性蛋白的重均摩尔质量(Mw)、z-均回转半径(Rgz)、多分散性指数(Mw/Mn)如图 4-27 所示。小麦粉原料的 Mw 为 $1.53 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，不同挤压次数面团的 Mw 为 $1.99 \sim 2.61 \times 10^6 \text{g/mol}$ ，比原料增加了 30~71%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次至挤压 3 次，面团超声可溶性蛋白的 Mw 从 $1.99 \times 10^6 \text{g/mol}$ 逐渐增加至 $2.61 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料的 Rgz 为 73.7 nm，不同挤压次数面团的 Rgz 为 77.3~82.3 nm，比原料增加了 5~12%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次增加至挤压 2 次，面团超声可溶性蛋白的 Rgz 从 77.3 nm 降低至 82.3 nm，增加了 6%，再增加至挤压 3 次，面团 Rgz 降低至 78.3nm。

小麦粉原料的 Mw/Mn 为 14.25，不同挤压次数面团的 Mw/Mn 为 15.06~16.13，比原料增加了 6~13%。不同挤压次数面团中，从从挤压 1 次至挤压 3 次，面团超声可溶性蛋白的 Mw/Mn 从 15.06 逐渐增加至 16.13。

(2) 小麦粉原料和不同挤压次数面团超声可溶性蛋白各级分的质量分数、浓度、重均摩尔质量、z-均回转半径和多分散性指数

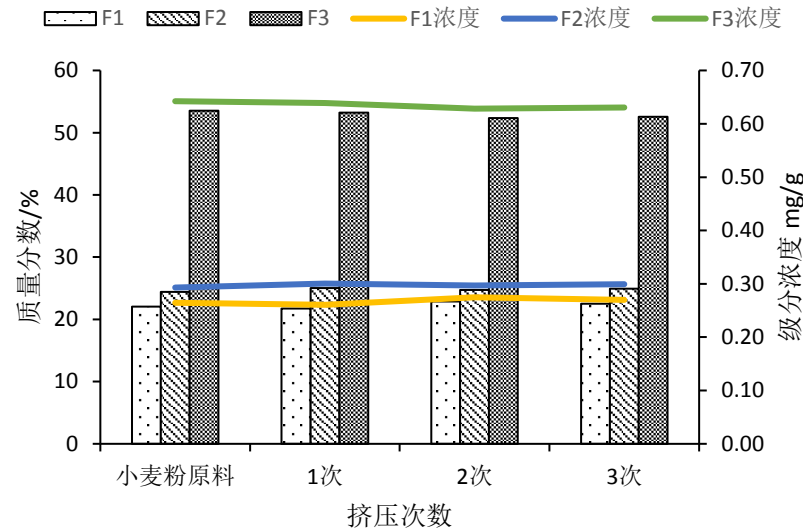


图 4-28 挤压次数对超声-可溶性蛋白F1、F2、F3级分质量分数(%)和浓度的影响
Fig. 4-28 Effects of extrusion rounds on percent (%) of molecular weights and concentration of F1, F2 and F3 of sonication-solution protein

小麦粉原料和不同挤压次数面团超声可溶性蛋白的进样浓度都为 1.2mg/g。以 F1、F2 和 F3 级分面积总和代表进样浓度，根据每个级分峰面积占总面积的比例计算级分的浓度和级分所占比例，结果如图 4-28 所示。

所有样品 F1 的浓度都为 0.26mg/g, F2 的浓度都接近为 0.30mg/g, F3 的浓度都接近 0.64mg/g。所有样品 F1 级分的比例约为 22.00 %，F2 级分的比例约 24%，F3 级分的比例约为 54%。

表 4-14 挤压次数对超声-可溶性蛋白F1，F2和F3级分的重均摩尔质量（Mw），回转半径（Rgz）和多分散性指数（Mw/Mn）的影响

Table 4-14 Effects of extrusion rounds on weight-average molar mass (Mw), radius of gyration (Rgz) and polydispersity (Mw/Mn) of fraction F1, F2 and F3 of sonication-soluble protein

挤压次数	M _w ×10 ⁶ g/mol			R _{gz} nm			M _w /M _n		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
原料	6.49	0.273	0.072	74.7	60.0	56.7	2.94	1.41	1.08
1 次	8.54	0.341	0.090	77.9	69.2	66.1	3.15	1.45	1.09
2 次	10.46	0.415	0.108	83.0	73.4	71.5	2.79	1.49	1.10
3 次	10.90	0.429	0.109	78.6	72.9	71.2	2.93	1.50	1.10

小麦粉原料和不同挤压次数面团超声可溶性蛋白高摩尔质量 F1 级分的重均摩尔质量(M_w), z 均回转半径(R_{gz})和多分散性指数(M_w/M_n)如表 4-14 所示。小麦粉原料 F1 级分的 M_w 为 6.49×10⁶g/mol,不同挤压次数面团 F1 级分的 M_w 为 8.54~10.90×10⁶g/mol,比原料增加了 32~68%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次增加至挤压 3 次，F1 级分的 M_w 从 8.54×10⁶g/mol 逐渐增加至 10.90×10⁶g/mol。小麦粉原料 F2 级分的 M_w 为 0.273×10⁶g/mol,不同挤压次数面团 F2 级分的 M_w 为 0.341~0.429×10⁶g/mol,比原料增加了 25~57%。不同挤压次数面团中，从挤压 1 次增加至挤压 3 次，F2 级分的 M_w 从 0.341×10⁶g/mol 逐渐增加至 0.429×10⁶g/mol。小麦粉原料 F3 级分的 M_w

为 $0.072 \times 10^6 \text{g/mol}$, 不同挤压次数面团 F3 级分的 M_w 为 $0.090 \sim 0.109 \times 10^6 \text{g/mol}$, 比原料增加了 25~51%。不同螺杆转速面团中, 从挤压 1 次增加至挤压 3 次, F3 级分的 M_w 从 $0.090 \times 10^6 \text{g/mol}$ 逐渐增加至 $0.109 \times 10^6 \text{g/mol}$ 。

小麦粉原料 F1 级分的 R_{gz} 为 74.7 nm, 不同挤压次数面团 F1 级分的 R_{gz} 为 77.9~83.0nm, 比原料增加了 4~11%。不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次增加至挤压 2 次, F1 级分的 R_{gz} 从 77.9 nm 增加至 83.0 nm, 再增加至挤压 3 次, F1 级分的 R_{gz} 降低至 78.6nm。小麦粉原料 F2 级分的 R_{gz} 为 60.0 nm, 不同挤压次数面团 F2 级分的 R_{gz} 为 69.2~73.4 nm, 比原料增加了 15~22%。不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次增加至挤压 2 次, F2 级分的 R_{gz} 从 69.2 nm 增加至 73.4 nm, 再增加至挤压 3 次, R_{gz} 降低至 72.9nm。小麦粉原料 F3 级分的 R_{gz} 为 56.7 nm, 不同挤压次数面团 F3 级分的 R_{gz} 为 66.1~71.5 nm, 比原料增加了 17~26%。不同挤压次数面团中, 从挤压 1 次增加至挤压 2 次, F3 级分的 R_{gz} 从 66.1 nm 降低至 71.5 nm, 再增加至挤压 3 次, R_{gz} 几乎未变, 为 71.2nm。

小麦粉原料 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.94, 不同螺杆转速面团 F1 级分的 M_w/M_n 为 2.79~3.15, 比原料增加了 -5~7%, 从积压 1 次增加至挤压 2 次, F1 级分的 M_w/M_n 都接近从 3.15 降低至 2.79, 再增加至挤压 3 次, M_w/M_n 增加至 2.93。所有样品 F2 级分的 M_w/M_n 都接近 1.45, F3 级分的 M_w/M_n 都接近 1.10, 这表明 F2 和 F3 组分的同质群体的程度较高。

4.4 讨论

粉质仪和面从 0min 至 35min 时, SDS 可溶性蛋白的 M_w 和 R_{gz} 增大, Don et al. (2003)的研究也显示, 随着混合能量的增加, SDS 可溶性蛋白的特性粘度增加。55min 时, SDS 可溶性蛋白的 M_w 和 R_{gz} 下降。蛋白质聚集体结构由致密变疏松, 聚集体形貌由球状变为支链状。SDS 可溶性蛋白 ($>100\text{nm}$) 的粒径分布在 35.0min 时变小。这个现象的初步解释, 随着混合时间从 0min 至 35min, 一部分大粒径 ($>100\text{nm}$) 的蛋白质聚集变成蛋白质聚集体, 另一部分解聚变成 SDS 可溶性蛋白。解聚后的 SDS 可溶性蛋白变小后稳定性减弱, 蛋白质分子间互相交联形成了更大的聚集体以保持稳定, 所以蛋白摩尔质量和 z -均回转半径增大。并且, 粒径分布图显示, 在几十纳米处分出一个峰, 这证实了蛋白质分子被破坏的假设。和面 55min 时, 由于机械能的持续输入, 蛋白质聚集体进一步解聚, 所以摩尔质量和半径降低。这也解释了和面过程中, 随着和面时间或机械能的增加, SDS 可溶性蛋白含量增加, SDS 不溶性蛋白含量降低。超声可溶性蛋白的 M_w 随着和面时间的增加在 $1.5 \times 10^6 \text{g/mol}$ 左右浮动, 而 R_{gz} 逐渐增加, 聚集体结构逐渐变得疏松, 聚集体形貌主要为松散的结构。超声可溶性蛋白 M_w 无大幅度变化, 推测是超声强烈的破坏作用所导致。

挤压机和面过程中, 不同物料含水率下, 25%的含水率有利于 SDS 可溶性蛋白质的聚集, 可能因为 25%是面团的临界含水率(Lu and Seetharaman, 2013), 此时的和面过程不充分。45%的含水率对 SDS 可溶性蛋白几乎无影响, 因为过量的水分增加了面团的流动性, 相应的增加了蛋白分子链柔性。不同温度下面团的大摩尔质量蛋白质被破坏且破坏程度相似, 而小摩尔质量蛋白的 M_w 和 R_{gz} 几乎未受到温度的影响。一般而言, 较高的螺杆转速有较强剪切效应, 150rpm 时大摩尔质量蛋白的 M_w 降低, R_{gz} 几乎未变, 蛋白分子解聚所导致。不同挤压次数促进大摩尔质量蛋白

的解聚，促进小摩尔质量蛋白的聚集。

挤压机和面过程中，45%，40℃，200rpm，加模头以及多次挤压面团超声可溶性蛋白的 M_w 较高，过量的水分有利于面筋网络结构的形成且减弱了蛋白质的解聚效果。螺杆转速增加，双轴剪切的效果更明显，有利于面筋网络形成。加上模头后，压力的施加促进了蛋白分子的聚集 (McCann et al., 2013)。多次挤压增加和面时间，促进面筋网络聚集。超声可溶性蛋白的重均摩尔质量高于 SDS 可溶性蛋白，Pitkänen et al., (2014) 的研究也显示了相同的结果。

不同挤压参数面团中，SDS 可溶性蛋白的 M_w 随 SME 的增加先增加后降低，超声可溶性蛋白的 M_w 在 $2.0 \times 10^6 \text{g/mol} \sim 2.5 \times 10^6 \text{g/mol}$ 的范围浮动，高强度的超声可能导致聚集体被完全破坏，呈现相似的 M_w 。

4.5 小结

粉质仪和面和挤压机和面对小麦蛋白分子有聚集或破坏作用，导致小麦蛋白分子的重均摩尔质量和 Z 均回转半径发生变化。通过检测混合程度不同面团样品蛋白质组分的光散射特性，基本对蛋白质在混合过程中各阶段的蛋白质组分光散射特性有了具体的认识。

和面过程中，超声可溶性蛋白聚集体解聚，解聚后的一部分蛋白质变小，变成 SDS 可溶性蛋白。剩下的一部分蛋白质还处于超声可溶性蛋白的范围。解聚后的超声可溶性蛋白相对变小后其稳定性减弱，因此会互相交联形成了更大的聚集体以保持稳定性。机械能的持续输入，会使未解聚的超声可溶性蛋白质解聚。这对不同混合程度面团中蛋白质组分的光散射特性进行了初步解释。

第五章 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 粉质仪和面的稠度和自相关函数的变化趋势一致, 同时与和面过程中的水合阶段和面筋网络形成阶段相对应。水合阶段的稠度表现出剪切变稠的特性, 主要是水分的加入增加了小麦粉各组分间的氢键和疏水相互作用, 而自相关函数的衰减速度变快主要是水分的润滑作用和增加了分子活动空间。稠度达到最大值且衰减速度达到最快后开始下降, 主要是蛋白分子间的排列在面筋网络形成阶段有序排列, 表现出剪切变稀的特性。

(2) 小麦蛋白质中的储存蛋白是麦醇溶蛋白和麦谷蛋白, 它们各部分蛋白含量的变化会影响面制品质量。不同混合程度的面团, 作用时间越长, SDS 可溶性蛋白含量增加, GMP 含量减少; 含水率、温度、螺杆转速、模头和挤压次数影响挤压面团中小麦蛋白含量, 呈现出与上述结果一致的规律。这与 Don et al. (2005)研究的三个品种的小麦, SDS 可溶性蛋白随混合能量增加而增多, 相应的 GMP 含量减少的结果一致。与粉质仪和面相比, 挤压机和面对小麦蛋白的破坏/聚集作用较弱, 这是由于粉质仪是双轴剪切的过程, 同向啮合的挤压和面类似于单轴剪切过程而导致的。同样, 挤压机和面时, 模头和挤压次数对小麦蛋白的影响比水分、温度的影响大, 这可能是压力的施加和作用时间的延长接近双轴剪切过程。

(3) 小麦粉在和面过程中能明显观察到物理形态的变化, 麦谷蛋白在面团形成过程中起着骨架作用, 麦醇溶蛋白等填充其中。粉质仪和面随着和面时间延长, 小麦蛋白重均摩尔质量和 Z 均回转半径有增加的趋势, 聚集体形貌从球状向松散的支链状形成, 推测小麦蛋白分子被破坏/聚集是一个动态过程, 变小的蛋白分子通过疏水相互作用形成大聚集体, 因此 SDS 溶液中的聚集体形貌向支链状形成。通过了解面团形成过程中小麦蛋白聚集体形貌的变化, 有助于进一步理解面团特性, 为进一步研究小麦蛋白质组分的光散射特性提供数据支撑。挤压机和面时, SDS 可溶性蛋白 Mw 和 Rgz 随 SME 增加先增加后下降, 推测是小麦蛋白分子先聚集, 能量的持续输入破坏聚集体结构。

5.2 问题与展望

本试验系统研究了和面过程中小麦面团的光散射特性、蛋白质组分的含量变化和蛋白质组分光散射特性, 并且比较了传统和面方式和新型和面方式的异同。本文尚未讨论不同形成程度面团的质构特性及其制品的品质, 以及它们三者之间联系。今后可以把不同混合程度的面团制成面条, 使挤压机一体化的优势也得以发挥, 同时分析面条品质, 与实际生产相结合。

5.3 结论

(1) 在和面 9min 后, 自相关函数的衰减速度减慢, 光子运动的平均自由程变短, 扩散系数变小。这些结果提示了面团形成的三个阶段, 包括小麦粉的水合阶段、面筋网络结构形成和面筋网络结构被破坏。

(2) 面团中 SDS 可溶性蛋白含量与挤压单位机械能耗呈线性正相关, 谷蛋白大聚体含量与

挤压单位机械能耗呈线性负相关。挤压和面效果介于粉质仪和面和单轴剪切之间。

(3) 随着粉质仪和面时间的延长，面团中 SDS 可溶性蛋白的含量逐渐增加，结构由致密变得疏松，形貌从球状变为支链状；谷蛋白大聚体含量逐渐减少。超声可溶性蛋白主要为松散的结构，形貌为超支链，松散连接的聚合物和空心球体。

(4) 和面过程中，超声可溶性蛋白聚集体解聚，解聚后的一部分蛋白分子变小，变成 SDS 可溶性蛋白。剩下的一部分蛋白质还处于超声可溶性蛋白的范围。被破坏后的超声可溶性蛋白相对变小后其稳定性减弱，因此会互相交联形成了更大的聚集体以保持稳定性。机械能的持续输入，蛋白质聚集体进一步解聚。

参考文献

1. 艾紫薇. 和面工艺对面团品质影响的研究[D]. 河南: 河南工业大学, 2013.
2. 董朝霞, 林梅钦, 李明远, 等. 光散射技术在研究高分子溶液和凝胶方面的应用[J]. 高分子通报, 2001, 5: 25-33.
3. 房岩强. 挤压机械能对大豆分离蛋白理化特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
4. 房岩强, 魏益民, 张波. 蛋白质结构在挤压过程中的变化[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(5): 100-104.
5. 黄雯琪, 潘伟春, 韩剑众. 激光散射技术在PSE猪肉鉴定中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 176-183.
6. 李韦谨, 张波, 魏益民, 等. 机制面条制作工艺研究综述[J]. 中国粮油学报, 2011, 26: 86-90.
7. 刘锐. 和面方式对面团理化结构和面条质量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
8. 刘锐, 魏益民, 张影全, 等. 谷蛋白大聚体在小麦加工中的作用[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(1): 119-122.
9. 刘锐, 魏益民, 张波. 小麦蛋白质与面条品质关系的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2011, 31: 1183-1187.
10. 刘媛媛, 王瑞芳. 布拉班德粉质仪在小麦品质分析中的应用[J]. 河南省青年学术年会, 2004, 1146-1150.
11. 马永强, 韩春然, 石忠志. 小麦醇溶蛋白的研究进展[J]. 食品科学, 2006, 27: 813-817.
12. 王灵昭, 陆启玉. 面筋蛋白组分在制面过程中的变化及与面条质地差异的关系[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 26: 11-14.
13. 杨薇. 螺杆挤压机及其在食品工业中的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2001, 26: 78-83.
14. Anderson AK, Pkw N. Changes in disulfide and sulfhydryl contents and electrophoretic patterns of extruded wheat flour proteins[J]. Cereal Chemistry, 2000, 77: 354-359.
15. Arntfield SD, Murray ED. The Influence of Processing Parameters on Food Protein Functionality I. Differential Scanning Calorimetry as an Indicator of Protein Denaturation[J]. Canadian Institute of Food Science & Technology Journal, 1981, 14: 289-294.
16. Baiano A, Conte A, Nobile MAD. Influence of drying temperature on the spaghetti cooking quality[J]. Journal of Food Engineering. 2006, 76: 341-347.
17. Balla A, Razafindralambo H, Blecker C, et al. Interfacial properties of gluten monolayers spread on various chloride salt solutions. Effects of electrolytes, salt concentrations, and temperature[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1998, 46: 3535-3539.
18. Bean SR, Lookhart GL. Factor influencing the characterization of gluten proteins by size-exclusion chromatography and multiangle laser light scattering (SEC-MALLS) [J]. Cereal Chemistry, 2001, 78: 608-618.
19. Bert L, Bart G, Kristof B, et al. Molecular basis of processing wheat gluten toward biobased materials[J]. Biomacromolecules, 2010, 11: 533-541.
20. Bhattacharya M, Langstaff TM, Berzonsky WA. Effect of frozen storage and freeze-thaw cycles on the rheological and baking properties of frozen doughs[J]. Food Research International, 2003, 36: 365-372.
21. Bloksma AH. Relation between the thiol and disulfide contents of dough and its rheological properties[J]. Cereal Chemistry. 1972, 49: 104-118.

22. Borghet AVD, Goesaert H, Veraverbeke WS, et al. Fractionation of wheat and wheat flour into starch and gluten: overview of the main processes and the factors involved[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 41: 221-237.
23. Burchard, W. Schmidt, M. Stockmayer, W. H. Influence of hydrodynamic preaveraging on quasi-elastic scattering from flexible linear and star-branched[J]. *Macromolecules*, 1980, 13: 580-587.
24. Carceller JL, Aussenac T. Size characterisation of glutenin polymers by HPSEC-MALLS[J]. *Journal of Cereal Science*, 2001, 33: 131-142.
25. Chen P, Liu X, Zhang X, Sangwan P, Yu L. Phase transition of waxy and normal wheat starch granules during gelatinization[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 1-7.
26. Ciaffi M, Lafiandra D, Turchetta T, et al. Breadbaking potential of durum wheat lines expressing both X- and Y-type subunits at the Glu-A1 locus[J]. *Cereal Chemistry*, 1995, 72: 465-469.
27. Ciaffi M, Lee YK, Tamas L, et al. The low-molecular-weight glutenin subunit proteins of primitive wheats. III. The genes from D-genome species[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1999, 98: 135-148.
28. D'Egidio MG, Mariani BM, Nardi S, et al. Chemical and technological variables and their relationships: a predictive equation for pasta cooking quality[J]. *Cereal Chemistry*, 1990, 67: 275-281.
29. D'Ovidio R, Masci S. The low-molecular-weight glutenin subunits of wheat gluten[J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39: 321-339.
30. Dachkevitch T, Autran JC. Prediction of baking quality of bread wheats in breeding programs by size-exclusion high-performance liquid chromatography[J]. *Cereal Chemistry*, 1989, 66: 448-456.
31. Davies RJ, Webb T. Calorimetric determination of freezable water in dough[J]. *Chemistry & Industry* 1969, 1138-1139.
32. Delcour JA, Joye IJ, Pareyt B, et al. Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2012, 3: 469-492.
33. Diantom A, Carini E, Curti E, et al. Effect of water and gluten on physico-chemical properties and stability of ready to eat shelf-stable pasta[J]. *Food Chemistry*, 2016, 195: 91-96.
34. Dijk JAPPV, Smit JAM. Size-exclusion chromatography—multiangle laser light scattering analysis of β -lactoglobulin and bovine serum albumin in aqueous solution with added salt[J]. *Journal of Chromatography*, 2000, 867: 105-112.
35. Don C, Lichtendonk W, Plijter JJ, et al. Glutenin Macropolymer: A Gel Formed by Glutenin Particles[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 37: 1-7.
36. Don C, Lichtendonk WJ, Plijter JJ, et al. Understanding the link between GMP and dough: from glutenin particles in flour towards developed dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38: 157-165.
37. Don C, Lichtendonk WJ, Plijter JJ, et al. The effect of mixing on glutenin particle properties: aggregation factors that affect gluten function in dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 41: 69-83.

38. Douglas, J. P. Roovers, J. Freed, K. F. Characterization of branching architecture through "universal" ratios of polymer solution properties[J]. *Macromolecules*, 1990, 23(18): 4168–4180.
39. Eliasson AC, Hegg PO. Thermal stability of wheat gluten[J]. *Cereal Chemistry*, 1981, 57(6):436-437.
40. Falcão-Rodrigues MM, Moldão-Martins M, Beirão-da-Costa ML. Thermal properties of gluten proteins of two soft wheat varieties[J]. *Food Chemistry*, 2005, 93: 459-465.
41. Folta-Stogniew E, Williams KR. Determination of molecular masses of proteins in solution: Implementation of an HPLC size exclusion chromatography and laser light scattering service in a core laboratory[J]. *Journal of Biomolecular Techniques Jbt*, 1999, 10(2): 51-63.
42. Georget DM, Belton PS. Effects of temperature and water content on the secondary structure of wheat gluten studied by FTIR spectroscopy[J]. *Biomacromolecules*, 2006, 7: 469-475.
43. Gupta RB, Batey IL, Macritchie F. Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours[J]. *Cereal Chemistry*, 1992, 69: 125-131.
44. Gupta RB, Khan K, Macritchie F. Biochemical basis of flour properties in bread wheats. I. Effects of variation in the quantity and size distribution of polymeric protein[J]. *Journal of Cereal Science*, 1993, 18: 23-41.
45. Hamer RJ, Vliet TV, Shewry PR, et al. Understanding the structure and properties of gluten: an overview[J]. *Special Publication- Royal Society of Chemistry*, 2000, 25: 157-185.
46. Khatkar BS, Fido RJ, Tatham AS, Schofield JD. Functional properties of wheat gliadins. I. Effects on mixing characteristics and bread making quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35: 299-306.
47. Kieffer R, Schurer F, Kohler P, et al. Effect of hydrostatic pressure and temperature on the chemical and functional properties of wheat gluten: Studies on gluten, gliadin and glutenin[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45: 285-292.
48. Lagrain B, Brijs K, Veraverbeke WS, et al. The impact of heating and cooling on the physico-chemical properties of wheat gluten-water suspensions[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42: 327-333.
49. Lefebvre J. An outline of the non-linear viscoelastic behaviour of wheat flour dough in shear[J]. *Rheologica Acta*, 2012, 45: 525-538.
50. Lefebvre J, Popineau Y, Deshayes G, et al. Temperature-induced changes in the dynamic rheological behavior and size distribution of polymeric proteins for glutens from wheat near-isogenic lines differing in HMW glutenin subunit composition[J]. *Cereal Chemistry*, 2000, 77: 193-201.
51. Lefebvre J, Vliet TV, Aalbersberg WY. Physico-chemical aspects of gluten proteins[J]. *Progress in Biotechnology*, 2003, 129: 94-102.
52. Lindsay MP, Skerrett JH. The glutenin macropolymer of wheat flour doughs: structure-function perspectives[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1999, 10: 247-253.
53. Liu R, Xing Y, Zhang Y, et al. Effect of mixing time on the structural characteristics of noodle dough under vacuum[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 328-336.
54. Liu R, Zhang Y, Wu L, et al. Impact of vacuum mixing on protein composition and secondary

- structure of noodle dough[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2017, 85: 197-203.
55. Lu W, Grant LA. Effects of prolonged storage at freezing temperatures on starch and baking quality of frozen doughs[J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76: 656-662.
56. Lu Z, Seetharaman K. ¹H Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) Studies of Water Mobility in Dough Systems Containing Barley Flour[J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2013, 90: 120-126.
57. Malcolmson LJ, Matsuo RR, Balshaw R. Textural optimization of spaghetti using response surface methodology: Effects of drying temperature and durum protein level[J]. *Cereal Chemistry*, 1993, 70: 417-423.
58. Matsuo RR, Dexter JE, Kosmolak FG, et al. Statistical evaluation of tests for assessing spaghetti-making quality of durum wheat[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 1982, 199: 193-206.
59. Matsuo RR, Irvine GN. Effect of gluten on the cooking quality of spaghetti[J]. *Cereal Chemistry*, 1970, 47: 173-180.
60. Mccann TH, Leder A, Buckow R, et al. Modification of structure and mixing properties of wheat flour through high-pressure processing[J]. *Food Research International*, 2013, 53: 352-361.
61. Moonen JHE, Scheepstra A, Graveland A. Use of the SDS-sedimentation test and SDS-polyacrylamidegel electrophoresis for screening breeder's samples of wheat for bread-making quality[J]. *Euphytica*, 1982, 31: 677-690.
62. Morel MH, Bonicel J, V. Micard A, et al. Protein insolubilization and thiol oxidation in sulfite-treated wheat gluten films during aging at various temperatures and relative humidities[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48: 186-192.
63. Morel MH, Redl A, Guilbert S. Mechanism of heat and shear mediated aggregation of wheat gluten protein upon mixing[J]. *Biomacromolecules*, 2002, 3: 488-497.
64. Muller S, Wieser H. The location of disulphide bonds in alpha-type gliadins[J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 22: 21-27.
65. Peighambardoust SH, van der Goot AJ, Hamer RJ, et al. Effect of simple shear on the physical properties of glutenin macro polymer (GMP) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42: 59-68.
66. Peressini D, Peighambardoust SH, Hamer RJ, et al. Effect of shear rate on microstructure and rheological properties of sheared wheat doughs[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 426-438.
67. Pitkänen L, Sontag-Strohm T, Kanerva P. Enhanced separation and characterization of gluten polymers by asymmetrical flow field-flow fractionation coupled with multiple detectors[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59: 126-131.
68. Preston KR. Effects of neutral salts upon wheat gluten protein properties. I. Relationship between the hydrophobic properties of gluten proteins and their extractability and turbidity in neutral salts[J]. *Cereal Chemistry*, 1981, 171: 263-265.
69. Preston KR. Effects of neutral salts of the lyotropic series on the physical dough properties of a

- Canadian red spring wheat flour[J]. *Cereal Chemistry*, 1989, 66: 144-148.
70. Reufer M, Machado AHE, Niederquell A, et al. Introducing diffusing wave spectroscopy as a process analytical tool for pharmaceutical emulsion manufacturing[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2014, 103: 3902-3913.
71. Sapirstein HD, Suchy J. SDS-protein gel test for prediction of bread loaf volume[J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76: 144-150.
72. Schofield JD, Bottomley RC, Timms MF, et al. The effect of heat on wheat gluten and the involvement of sulphhydryl-disulphide interchange reactions[J]. *Journal of Cereal Science*, 1983, 1: 241-253.
73. Shewry PR, Tatham AS. Disulphide bonds in wheat gluten proteins[J]. *Journal of Cereal Science*, 1997, 25: 207-227.
74. Singh NK, Donovan R, Macritchie F. Use of sonication and size-exclusion high-performance liquid chromatography in the study of wheat flour proteins. II. Relative quantity of glutenin as a measure of breadmaking quality[J]. *Cereal Chemistry*, 1990, 67: 161-170.
75. Southan M, Macritchie F. Molecular weight distribution of wheat proteins[J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76: 827-836.
76. Tatham AS, Shewry PR, Belton PS. Structural studies of cereal prolamins, including wheat gluten[J]. *International association for cereal science and technology*. 1990, 10: 1-78.
77. Tietze S, Jekle M, Becker T. Development of wheat dough by means of shearing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 201: 1-8.
78. Tuhumury HC, Small DM, Day L. Effects of Hofmeister salt series on gluten network formation: Part I. Cation series[J]. *Food Chemistry*, 2016, 212: 789-797.
79. Tuhumury HCD, Small DM, Day L. The effect of sodium chloride on gluten network formation and rheology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60: 229-237.
80. Uthayakumaran S, Gras PW, Stoddard FL, et al. Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough[J]. *Cereal Chemistry*, 2007, 76: 389-394.
81. Vagberg, L. J. M. Cogan, K. A. Gast, A. P. Light-scattering study of starlike polymeric micelles[J]. *Macromolecules*, 1991, 24: 1670-1677.
82. Wang J-s, Zhao M-m, Zhao Q-z. Correlation of glutenin macropolymer with viscoelastic properties during dough mixing[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45: 128-133.
83. Wang K, Luo S, Cai J, et al. Effects of partial hydrolysis and subsequent cross-linking on wheat gluten physicochemical properties and structure[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 168-174.
84. Wang X, Appels R, Zhang X, et al. Protein-transitions in and out of the dough matrix in wheat flour mixing[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 542-551.
85. Weegels PL, Amvande P, Graveland A, et al. Depolymerisation and re-polymerisation of wheat glutenin during dough processing. I. Relationships between glutenin macropolymer content and quality parameters[J]. *Journal of Cereal Science*, 1996a, 23: 103-111.

86. Weegels PL, Hamer RJ, Schofield JD. Functional properties of wheat glutenin[J]. *Journal of Cereal Science*, 1996b, 23: 1-17.
87. Wieser H. Chemistry of gluten proteins[J]. *Food Microbiology*, 2007, 24: 115-119.
88. Xu J, Bietz JA, Carriere CJ. Viscoelastic properties of wheat gliadin and glutenin suspensions[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101: 1025-1030.
89. Xu J, Inglett GE, Liu SX, et al. Micro-heterogeneity and micro-rheological properties of high-viscosity barley β -glucan solutions studied by Diffusing Wave Spectroscopy (DWS) [J]. *Food Biophysics*, 2016, 11: 339-344.
90. Zhang B, Liu G, Ying D, et al. Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and in vitro protein digestibility of canola meal[J]. *Food Research International*, 2017, 100: 658-664.
91. Zhang B, Zhang Y, Dreisoerner J, et al. The effects of screw configuration on the screw fill degree and specific mechanical energy in twin-screw extruder for high-moisture texturised defatted soybean meal[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 157: 77-83.
92. Zhang HH, Qin L, Irakoze C, et al. Effect of cysteine on structural, rheological properties and solubility of wheat gluten by enzymatic hydrolysis[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, 45: 2155-2161.
93. Zhang W, Li S, Zhang B, et al. Relationships between the gelatinization of starches and the textural properties of extruded texturized soybean protein-starch systems[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 174: 29-36.

致 谢

本论文是在我的导师张波研究员的悉心指导下完成。从论文选题、试验设计到论文撰写及修改,导师都给予了全面的指导,并在人生道路上给了我很多指点,提供给我很多锻炼成长的机会,使我终身受益。张老师深刻的科学见解、灵活的思辨能力、执着的探索精神、高尚的人格都值得我用一生去学习。值此论文成稿之际,向我的导师张波研究员致以诚挚的谢意和崇高的敬意!感谢您对我的用心栽培!

感谢课题组魏益民教授和郭波莉研究员对我课题的宝贵建议;感谢李明老师、张影全老师、孙倩倩老师在论文完成过程中给予的指导和建议。感谢中国农业科学院农产品加工研究所严军辉老师、李春红老师、李娟老师、杨钊、赵博师兄、唐娜师姐、代美瑶和巩艳菲师妹、浙江工商大学潘伟春老师、中国科学技术大学李连伟老师、北京赛普瑞生科技开发有限责任公司牛爱珍博士在试验过程中给予极大的帮助与支持;感谢来自荷兰的 Clyde Don 教授在英文文章撰写方面给予的帮助;感谢课题组 Syed Abdul Wadood、刘宏艳、王瑞斌、于晓磊、孔雁、苏笑芳、张森桑、惠滢等师兄师姐在试验及生活上给予的关心和帮助;感谢包小平、张晓文、姚梦迪、汤奥星、巩翰颖同学在研究生学习中的陪伴与安慰;感谢贺媛媛、田雨、杨静洁、陈丽、闫颖、户重雪师妹、王远、陈乐寒师弟在学习中的鼓励和生活中的欢声笑语。感谢任驰和李肖静两位室友在生活上的关心与陪伴;感谢硕士 11 班每一位同学在学习和生活上给予我的关心和帮助;感谢研究生院各位老师的谆谆教导和研究所的悉心培养。

特别感谢我的父母、哥哥、大嫂、侄女在生活和求学之路上给予我无私的关爱、支持和鼓励,不断激励我奋发向前。致此,谨向他们致以衷心的感谢。

感谢现代农业产业技术体系专项(CARS-03)等项目的资助。

值此硕士毕业论文完成之际,谨向所有关心、支持和帮助我的老师、同学、朋友和亲人们表示衷心的感谢和真切的祝福。

李芳

2019 年 5 月

作者简历

李芳，女，彝族，1992年5月12日出生，云南省红河州人。2016年毕业于西南民族大学生命科学与技术学院食品科学与工程专业，获得工学学士学位。2016年9月至今，于中国农业科学院农产品加工研究所农产品加工及贮藏工程专业攻读硕士学位。研究方向为农产品加工理论与技术，师从农产品加工研究所张波研究员。

硕士研究生期间发表的学术论文：

1. **Li Fang**, Zhang Yingquan, Li Ming, Clyde Don, Zhang Bo, Guo Boli, and Wei Yimin. The link between noodle dough extrusion parameters and the glutenin macropolymer content. (under review)
2. **李芳**，张影全，李明，苏笑芳，张波，魏益民. 小麦面筋形成程度及其理化特性影响因素研究进展. 中国食品学报. (录用)
3. **李芳**，张影全，李明，苏笑芳，张波. 影响小麦面筋形成的因素分析. 第一届 ICC 亚太区粮食科技大会论文摘要集，2017-05。
4. **李芳**，张影全，李明，苏笑芳，张波. 小麦面筋蛋白组分和结构. 中国食品科学技术学会第十四届年会暨第九届中美食品业高层论坛论文摘要集，2017-11。
5. **李芳**，代美瑶，巩艳菲，张波，郭波莉. 挤压工艺对小麦面粉蛋白质十二烷基硫酸钠溶解特性的影响. 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集，2018-11。

硕士研究生期间参加学术会议及研讨会：

1. 2016年9月第十六届中国方便食品大会（北京）
2. 2017年5月第一届 ICC 亚太区粮食科技大会（厦门）
3. 2017年7月粮食一二三产融合发展模式现场考察会（邢台）
4. 2017年9月第十七届中国方便食品大会（北京）
5. 2017年11月中国食品科学技术学会第十四届年会暨第九届中美食品业高层论坛（无锡）
6. 2018年4月植物蛋白与淀粉加工国际研讨会（北京）
7. 2018年11月中国食品科学技术学会第十五届年会（青岛）

硕士研究生期间获得奖励：

1. 2018年被评为中国农业科学院研究生院“优秀学生干部”
2. 2018年被评为中国农业科学院研究生院“中期考核优秀”