



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：螺杆菌转速对高湿挤压蛋白品质及结构特性的影响
作者：张雅菲, 李茜, 张宝伟, 宁海凤, 康继, 郭庆彬
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20240038
收稿日期: 2024-03-07
网络首发日期: 2024-07-15
引用格式: 张雅菲, 李茜, 张宝伟, 宁海凤, 康继, 郭庆彬. 螺杆菌转速对高湿挤压蛋白品质及结构特性的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240038>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20240038

螺杆转速对高湿挤压蛋白品质及结构特性的影响

张雅菲¹, 李茜¹, 张宝伟², 宁海凤¹, 康继¹, 郭庆彬¹

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 天津锦城智能科技有限公司, 天津 300202)

摘要: 高湿挤压技术的工艺参数对实际生产有着实质性的影响, 对高湿挤压蛋白产品的品质至关重要。通过设定不同的螺杆转速来探究双螺杆挤压机对高湿挤压蛋白产品的品质特性、结构特性和比机械能的影响, 并揭示了上述特征之间的相关性。结果显示, 随着螺杆转速的增加, 在宏观层面上, 产品水分含量逐渐降低, 在 340 r/min 时自由水峰面积比最高, 此时产品的硬度、咀嚼度达到最大值 23618.43 g 和 18000.86 g, 组织化度提高到 1.14; 在微观层面上, β -折叠比例下降, β 转角上升, 焓变值也在此转速下降到最低, 产品的纤维结构最明显。相关性分析表明, 比机械能与硬度/弹性/咀嚼度/组织化度之间、自由水峰面积比与纤维孔洞结构特征之间、变性温度与二级结构/硬度/弹性/咀嚼度等质构特性之间均呈显著相关性 ($P < 0.05$)。这表明结构特性与品质特性之间相互印证, 有望为高湿挤压技术制备植物肉提供理论参考。

关键词: 高湿挤压技术; 螺杆转速; 比机械能; 质构特性; 结构特性

中图分类号: TS214.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(0000)00-0000-00

Effect of Screw Speed on the Quality and Structural Properties of High-Moisture Extruded Protein

ZHANG Yafei¹, LI Xi¹, ZHANG Baowei², NING Haifeng¹, KANG Ji¹, GUO Qingbin¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Jincheng Intelligent Technology Co., Ltd, Tianjin 300202, China)

Abstract: The technological parameters of high-moisture extrusion technology have a substantial impact on the actual production, which is very important to the quality of high-moisture extruded protein products. In our present study, by setting different screw speeds, we explored the effects of twin-screw extruder on the quality characteristics, structural properties and specific mechanical energy of high-moisture extruded protein products, and further investigated the correlation between these characteristics. The results showed that, at the macro level, with the increase of screw speed, the moisture content of the product gradually decreased, and the peak area ratio of free water was the highest at 340 r/min. At this time, the hardness and chewiness of the product reached the maximum values of 23618.43 g and 18000.86 g, and the texture degree was improved to 1.14. At the microlevel, the β -folding ratio decreased, the β rotation angle increased, and the enthalpy change value also decreased to the lowest at this rotation speed, and the fiber structure of the product was the most obvious. Correlation analysis showed that there were significant correlations between specific mechanical energy and hardness/elasticity/chewiness/texture, between free water peak area ratio and fiber pore structure characteristics, and between denaturation temperature and secondary structure/hardness/elasticity/chewiness and other texture characteristics ($P < 0.05$). The results indicated that structure and quality characteristics were mutually confirmed which is expected to provide theoretical reference for the preparation of plant meat by high-moisture extrusion technology.

Key words: high-moisture extrusion technology; screw speed; specific mechanical energy; textural properties; structural

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-04-14

基金项目: 天津市科技计划项目 (21ZYJJC00110, 22YDTPJC00370)

作者简介: 张雅菲 (1998—), 女 (汉), 甘肃人, 硕士研究生; 通讯作者: 郭庆彬, 教授, guoqingbin008322@tust.edu.cn

properties

动物源蛋白质是全世界人类饮食中重要的蛋白质来源。然而,动物源蛋白质的生产会增加温室气体的排放,造成水分、土地以及能源的消耗^[1]。所以,寻找可持续的肉类替代品是未来食品的发展方向,《“十四五”全国农业绿色发展规划》中也表示要促进新蛋白产业的发展。因此,以植物蛋白为原料的植物肉市场迅速向全球扩张^[1],该领域的创新将推动人们选择更健康、更环保的饮食,但植物肉产品存在表面粗糙、组织化程度低、咀嚼度差等问题,高湿挤压技术的出现使得以上问题得到解决。

该技术是目前应用最为广泛的新兴植物蛋白生产技术^[2]。将蛋白原料经过复配、混合等预处理后,在挤压机内通过高温高压,双螺杆齿轮高速剪切后,迅速通过长直冷却模具形成具有一定纤维结构的高湿挤压蛋白产品。得到的蛋白产品质地均匀、富有韧性、纤维化程度高,可以模仿肉类的独特结构、质地^[3]。

尽管挤压工艺已经广泛应用于植物肉的生产,但研究多依赖经验,挤压机内部物料变化复杂且难以检测^[2]。研究工艺参数的变化对产品结构特性及品质特性的影响,有助于探究蛋白质在挤压过程中的结构变化及变性程度,这将为得到理想状态的产品提供依据,所以工艺参数的变化与最终产品特性之间的联系越来越受到人们的重视。相较于温度和水分含量对产品的影响,螺杆转速的影响最容易被忽略,其通过改变转速的快慢直接影响剪切速率,改变蛋白质混合物在挤压机内的停留时间,适当提高螺杆转速可以促进蛋白质分子之间的交联^[4],有利于形成类似于肉类的纤维结构,提高产品的硬度、咀嚼度等质构特性和组织化度。Sisay 等^[5]人采用颜色追踪方法评估产品在机筒内的停留时间分布,发现螺杆转速的增加会导致平均停留时间减少;Palanisamy 等^[6]人通过测定挤出机响应(模头压力、产品温度、扭矩和比机械能),并与产品颜色、质构特性及扫描电镜结果之间建立相关性;肖志刚等^[7]人测定产品的质构特性、微观结构、热特性和表面疏水性,得出螺杆转速为 280 r/min 时,二级结构中无规则卷曲比例增加,产品纤维结构和质构特性结果最优;以上研究表明螺杆转速变化会对挤压机参数、产品特性、结构特性产生影响。但对于螺杆转速变化下,比机械能、结构特性、品质特性之间没有形成系统的论述。

本研究与山东艾琪食品有限责任公司合作,根

据实际生产时调节的挤压机参数设计实验,通过改变挤压机的螺杆转速,系统阐述了转速下扭矩及比机械能的变化,挤压产品的水分含量及分布情况,硬度、弹性、咀嚼度,流变性能,颜色及组织化度的品质性质,以及微观的二级结构、热特性及电镜下纤维结构的变化,并深入探究其相关性。此项研究意在通过探究螺杆转速变化,研究工艺、系统和产品参数之间的相关性,为高湿挤压蛋白的生产过程提供一定的理论依据,并为能够生产出理想的高湿挤压蛋白品质特性而提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆粉、大豆分离蛋白(临沂山松生物制品有限公司),谷朊粉(滨州中裕食品有限公司);试验用水为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤压机,山东艾琪食品有限责任公司;核磁共振成像分析仪(Micro MR-25),苏州纽迈电子科技有限公司;色差仪(CR-10);TA-XT Plus 型物性测试仪,英国 Stable Micro System 公司;DSC3500 Sirius 差示扫描量热仪(Differential Scanning Calorimetry, DSC),德国耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;赛默飞 IS50 傅里叶红外光谱仪(Fourier Transform Infrared, FTIR),赛默飞世尔科技公司;旋转流变仪,赛默飞世尔科技公司;SU1510 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM),日立(中国)有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 不同蛋白原料基本性质及功能性质测定

粗蛋白的测定:参照 GB5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》中的自动凯氏定氮法进行测定。

溶解氮(NSI)的测定:参照《中华人民共和国农业行业标准—NY/T1205-2006 大豆水溶性蛋白含量的测定》,根据公式计算溶解氮(NSI)^[8]:

$$\text{溶解度}/\% = \frac{\text{上清液中蛋白质的含量}/\text{g}}{\text{样品中蛋白质的含量}/\text{g}} \times 100\%$$

公式 1

持水性和持油性测定:参考薛晓程等^[9]的方法,产品持水力(公式 2)和持油性(公式 3)计算公式如下:

$$\text{产品持水力}/\% = \frac{S_3 - S_2 - S_1}{S_2} \times 100\%$$

公式 2

$$\text{产品持油性}/\% = \frac{Y_3 - Y_2 - Y_1}{Y_2} \times 100\%$$

公式 3

公式 2 中 S_1 为 100 mL 离心管的质量, g; S_2 为粉样的质量, 10.00 g; S_3 为离心后剩余粉样与离心管的质量, g。公式 3 中 Y_1 为 100 mL 离心管的质量, g; Y_2 为粉样的质量, 3.00 g; Y_3 为离心后剩余粉样和离心管的质量, g。

1.3.2 螺杆转速变化下高湿挤压蛋白的挤压工艺

工艺流程: 蛋白粉样称重→按照不同比例混合均匀→加入到喂料机中→设定进水量和机筒温度→改变螺杆转速→机筒内高温高压高剪切处理→进入长直冷却模具→切刀切割→自然冷却→取样^[10]。

操作流程: 本研究采用大豆分离蛋白: 大豆粉: 谷朊粉=1: 6: 3 的比例进行挤压。在进行高湿挤压试验时, 自动喂料机的加料量为 60 kg/h, 水分含量设定为 62% (蛋白原料本身水分计算在内), 挤压机共分为 VIII 段, I、II 段为升温阶段, III-VIII 段温度设定依次为 80°C、155°C、160°C、80°C、50°C、40°C。根据生产车间以往试验, 螺杆转速低于 300 r/min, 机筒内部转速太慢可能会阻碍物料的前向推动, 导致机器内部容易发生堵料, 而螺杆转速过大, 会使得电能消耗过大, 所以选择螺杆转速的梯度为 300 r/min, 320 r/min, 340 r/min, 360 r/min。

1.3.3 比机械能(Specific Mechanical Energy, SME)的测定

在挤压过程中记录电机扭矩、螺杆转速和挤压机稳定时的质量流量, 并在每个实验条件下扭矩趋于平稳时收集样品^[11]。比机械能计算公式如下:

$$SME = \frac{2\pi \times n \times T}{MFR}$$

公式 4

式中 SME 为比机械能, kJ/kg; n 为螺杆转速, r/min; T 为电机扭矩, N·m; MFR 为质量流量, kg/h。

1.3.4 螺杆转速变化下高湿挤压蛋白产品品质特性的测定

1.3.4.1 水分的测定

参照 GB5009.3-2016《食品中水分的测定》直接干燥法。

1.3.4.2 水分分布情况的测定

样品切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的尺寸放入

到核磁管中, 以大豆油为参比, 使用核磁共振成像分析仪 (Micro MR-25) 的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 序列测定自旋-自旋弛豫时间 (T_2)^[12], NS 设置为 14, TW 设置为 1000 ms, 重复 3 次, 记录三个弛豫时间 (T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23})^[13]。

1.3.4.3 色泽的测定

采用 CR-10 色差仪, 以白色 A4 纸为空白标准板, 用于校正色差仪, 输出 ΔE 、 L^* 、 a^* 、 b^* , ΔE 为总色差, L^* 为明暗度, $+a^*/-a^*$ 为红色/绿色, $+b^*/-b^*$ 为黄色/蓝色, 随机测定 10 个不同位点。

1.3.4.4 质构特性的测定

参考孙志欣等^[14]的方法略作修改, 采用 TA-XT Plus 型物性测试仪, 从全质构分析 (Texture Profile Analysis, TPA) 测定挤压产品的硬度、弹性、咀嚼度等质构指标。样品尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm 放置在平台样品架上, 使用 P100 圆柱形探头, 操作参数: 测试前、中、后速度为 2 mm/s、1 mm/s、2 mm/s, 下压程度 50%, 间隔时间 3 s^[15], 往复两次, 每次试验重复 5 次。

1.3.4.5 流变性质测定

参考肖志刚等^[7]的方法略作修改, 将样品削至 1 mm 厚度放在流变仪的平台上, 采用 P35 的探头, 以 0.5% 的恒定应变幅度, 25°C 下在 0.1-20 Hz 的范围内进行频率扫描。

1.3.4.6 组织化度的测定

组织化度为采用 TA-XT Plus 型物性测试仪分别沿垂直方向 (横向剪切力) 和平行于挤压方向 (纵向剪切力) 对高湿挤压蛋白产品进行切割^[16]。样品尺寸为 25 mm×35 mm×10 mm, 操作参数: HDP/BS 探头, 测试前、中、后速度为 1.0 mm/s、1.0 mm/s、2.0 mm/s, 剪切程度 75%^[14], 每次试验重复 5 次。公式如下:

$$\text{组织化度}/\% = \frac{\text{横向剪切力}}{\text{纵向剪切力}} \times 100\%$$

公式 5

1.3.5 螺杆转速变化下高湿挤压蛋白微观结构的测定

1.3.5.1 二级结构的测定

参考 Xia 等^[13]的方法, 称取 1 mg 样品和 150 mg 溴化钾制成透明片, 采用傅里叶变换红外光谱, 采集室温下 500-4000 cm^{-1} 范围内的红外光谱, 仪器参数包括分辨率 4 cm^{-1} , 扫描 64 次。采用 OMNIC 9.2 软件用于基线校正、平滑、傅里叶自反卷积和二阶导数拟合对数据进行处理^[17]。

1.3.5.2 热特性的测定

样品于冷冻干燥机冻干，磨粉过筛，参照刘长姣等^[18]的方法略作修改，称取 2 mg 样品于坩埚中，再加入其 3 倍水（除去样品本身的含水量），采用差示扫描量热仪进行测定，升温程序设定为：温度 20-210°C，升温速率 10°C/min，每次试验重复 3 次。

1.3.5.3 微观结构的测定

将样品切成 10 mm×10 mm×2 mm 的尺寸，然后将样品进行冻干，参考 Wu 等^[19]的方法，将冻干样品用双倍胶带固定在铝柱上，喷金 15 分钟，在 5.0 kV 的^[13]加速电压下通过扫描电子显微镜观察，以 200 倍进行拍摄。

1.4 数据分析

将所得的数据结果取得平均值和标准差表示，采用 Origin 9.0 软件、IBM SPSS Statistics 26 等对数据进行处理，计算 Pearson 相关性指数。

2 结果与分析

2.1 不同蛋白原料的基本性质和功能性质测定结果

本研究对大豆分离蛋白、大豆粉和谷朊粉进行挤压，这三种原料是目前常用的生产高湿挤压植物肉的原料。如表 1 所示，大豆分离蛋白的蛋白质含量相对较高，其拥有最优越的持水性和胶粘性；大豆粉有很高的溶解氮指数，其与凝胶性、乳化性功能特性密切相关；谷朊粉独有的麦醇蛋白和麦谷蛋白，有助于高湿挤压蛋白形成高弹性的网络结构^[20]。

表 1 不同蛋白原料基本性质及功能性质测定结果

Tab. 1 Measurement results of basic and functional properties of different protein raw materials

蛋白原料	蛋白质含量 /%	溶解氮 /%	持水性 /%	持油性 /%
大豆分离蛋白	74.66±1.10 ^a	81.83±2.66 ^{ab}	630.47±36.90 ^a	218.83±10.13 ^a
大豆粉	44.72±1.12 ^c	84.21±0.25 ^a	101.80±1.58 ^c	111.56±1.84 ^b
谷朊粉	67.94±0.36 ^b	5.82±0.10 ^c	126.07±0.06 ^b	75.00±1.71 ^c

注：同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.2 螺杆转速变化对比机械能 (SME) 的影响

SME 是每单位质量熔体吸收的机械能的指标^[15]。由表 2 中分析，随着螺杆转速的增加，扭矩和 SME 显著增大^[21] ($P<0.05$)，这与 Maung^[22]和 Liningwei^[23]的结论相一致，转速的增加会增大螺杆与物料之间

的摩擦，提高挤压机机筒内的压力和扭矩^[20]，扭矩从 46 N·m 到 55 N·m，所以需要输入更大的 SME，达到 4979.54 kJ/kg。

表 2 螺杆转速变化对 SME 的影响

Tab. 2 Effect of screw speed change on SME

螺杆转速 /r/min	扭矩 /N·m	质量流量 /kg/h	比机械能 /kJ/kg
300	46±0.60 ^c	24±0.45 ^c	3614.88±114.90 ^c
320	47±0.80 ^c	26±0.33 ^a	3635.84±108.01 ^c
340	51±0.40 ^b	25±0.22 ^b	4358.53±72.53 ^b
360	55±0.50 ^a	25±0.55 ^b	4979.54±54.78 ^a

注：同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.3 螺杆转速变化对挤压产品品质特性的影响

2.3.1 螺杆转速变化下挤压产品的水分含量、自由度及颜色的相关性

由图 1 所示，随着螺杆转速的增加，成品水分含量呈下降趋势，但在 340 r/min 时放缓，表明转速的增加会使物料的温度升高，导致产品水分蒸发。图 2 是螺杆转速变化下挤压产品水分弛豫时间 T_2 反演图，低场核磁共振技术可测定植物蛋白肉体系中水分迁移状况^[24]。图 2 中的峰从左到右依次为深层结合水，弱结合水，自由水，随着螺杆转速的增加，峰逐渐向着结合水的方向偏移，这与成品水分含量降低的趋势一致，表明转速越高，其水分自由活跃度越低，促进产品内部蛋白质分子之间的交联。

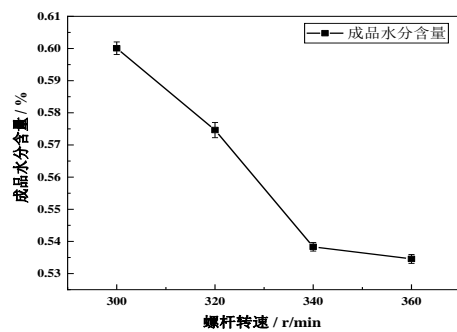


图 1 螺杆转速变化下挤压产品水分含量的变化趋势
Fig. 1 Trend of moisture content in extruded products under changes in screw speed

借助色差精密分析仪，对挤压产品的色泽进行分析，以空白 A4 纸作为对照，其中 L^* 代表产品的明暗度，若为正值，说明产品亮于背景板，反之则暗。 a^* 代表红绿度，若为正值，说明产品较标准偏红色，反之偏绿色。 b^* 代表黄蓝度，若为正值，说明产品较标准偏黄色，反之偏蓝色； ΔE 代表总体色差的大小，可以通过 L^* 、 a^* 、 b^* 进行计算。

如表 3 所示, 螺杆转速对挤压产品的 a^* , b^* 都有显著影响 ($P < 0.05$), 对 L^* 的影响不显著, 总色差 ΔE 呈现显著性变化 ($P < 0.05$)。随着螺杆转速的增大, a^* , b^* 逐渐减小, a^* 从 4.97 到 3.70, b^* 从 8.93 到 6.37, 这可能是转速增大会缩短物料在机筒内停留时间, 进而减弱美拉德反应的程度^[25], 降低产品偏红偏黄的程度, 使得产品颜色逐渐偏浅。相关性分析显示, 成品水分含量与 ΔE , a^* , b^* 都呈现正相关 ($P < 0.05$), 说明转速增大会使机筒内部温度升高, 成品水分含量下降, 也会影响最终产品的颜色。

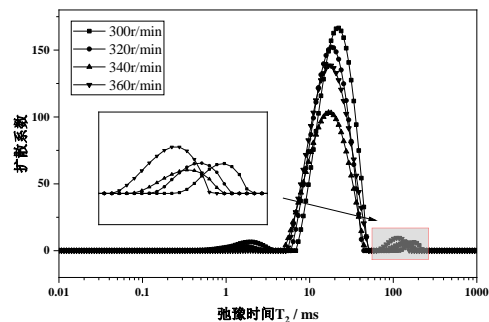


图 2 螺杆转速变化下挤压产品水分弛豫时间 T_2 反演图

Fig. 2 Inversion diagram of water relaxation time T_2 of extruded products under screw speed changes

表 3 螺杆转速变化下挤压产品的颜色数据及与成品水分含量的相关性

Tab. 3 Colordata of extruded products under changes in screw speed and their correlation with moisture content of finished products

螺杆转速 /r/min	总色差 ΔE	明暗度 L^*	红绿度 a^*	黄蓝度 b^*
300	16.83±0.12 ^a	-13.40±0.20 ^{ab}	4.97±0.15 ^a	8.93±0.12 ^a
320	16.93±0.12 ^a	-13.67±0.25 ^b	4.53±0.06 ^b	8.90±0.26 ^a
340	16.20±0.28 ^b	-13.60±0.23 ^b	4.45±0.07 ^b	7.60±0.14 ^b
360	14.93±0.21 ^c	-13.00±0.26 ^a	3.70±0.01 ^c	6.37±0.12 ^c
相关系数				
成品水分含量	0.785 ^{**}	-0.286	0.848 ^{**}	0.878 ^{**}

注: 1、同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$); 2、**在 $P < 0.01$ 级别 (双尾), 相关性显著。

2.3.2 螺杆转速变化下对高湿挤压蛋白水分分布、质构、流变及组织化度的影响

2.3.2.1 螺杆转速变化下挤压产品水分分布情况分析

表 4 为低场核磁共振技术的 CPMG 序列计算出的挤压后的水分状态的峰面积比, 其中 A_{2b} 为强结合水的峰面积比、 A_{21} 为弱结合水的峰面积比、 A_{22} 为自由水的峰面积比^[12]。

表 4 螺杆转速变化下挤压产品的水分分布峰面积比

Tab. 4 Peak area ratio of moisture distribution in extruded products under different screw speeds

螺杆转速 /r/min	强结合水 $A_{2b}/\%$	弱结合水 $A_{21}/\%$	自由水 $A_{22}/\%$
300	2.84±0.96 ^a	96.02±0.89 ^b	1.15±0.09 ^c
320	2.59±0.67 ^a	96.10±0.65 ^b	1.31±0.14 ^{bc}
340	0.23±0.32 ^b	97.45±0.36 ^a	2.31±0.57 ^a
360	0.59±0.46 ^b	97.73±0.45 ^a	1.67±0.08 ^b

注: 同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

由表 4 分析可得, 在高湿挤压蛋白内部, 水分主要以结合水的形式存在。其中, 自由水的峰面积

比随着转速的增大而呈现显著增加 ($P < 0.05$), 在 340 r/min 的转速下达到最大值 2.31%。在产品内部自由水峰面积越大越容易形成纤维的孔洞结构, 表明 340 r/min 下产品更具备形成孔洞结构的条件。在 360 r/min 时有所下降, 说明当其达到空间网络结构达到一定程度之后, 再增加转速, 可能会对挤压产品造成过度剪切, 不利于纤维孔洞结构的形成。

2.3.2.2 螺杆转速变化下挤压产品的质构特性分析

如表 5 所示, 螺杆转速对硬度、粘性、咀嚼度有显著影响 ($P < 0.05$), 对凝聚力的影响不显著^[25] ($P > 0.05$)。随着螺杆转速的增大, 在转速为 340 r/min 的时候硬度和咀嚼度达到最大值 23618.43 g 和 18000.86 g, 粘性为 18796.87。上述质构特性达到一个最大点而后下降, 原因如下, 一方面转速的增加会增大与螺杆对物料的剪切力度, 过快的转速可能造成过度剪切, 破坏了蛋白质的分子结构; 另一方面转速快慢与物料在机筒内停留时间有关, 转速越快物料在机筒内的停留时间越短, 360 r/min 时物料在机筒内时间太短^[14], 不足以使产品形成良好的质构。

表 5 螺杆转速变化下挤压产品的质构特性指数的变化情况

Tab. 5 Change of textural property index of extruded products under the changes in screw speed

螺杆转速 /r/min	硬度 /g	粘性	咀嚼度 /g	凝聚力
300	11240.75±595.79 ^d	8910.42±805.46 ^d	8139.59±195.00 ^d	0.79±0.06 ^a
320	18078.81±809.69 ^c	13790.74±870.20 ^c	12244.15±731.97 ^c	0.76±0.02 ^a
340	23618.43±837.33 ^a	18796.86±606.59 ^a	18000.86±723.46 ^a	0.80±0.01 ^a
360	21066.83±185.78 ^b	17166.91±183.53 ^b	16413.53±723.29 ^b	0.82±0.05 ^a

注：同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3.2.3 螺杆转速变化下挤压产品的流变特性、弹性和组织化度的分析

流变中的储能模量 G' 代表样品的弹性，损耗模量 G'' 表示样品的粘性^[26]。从图 3A 可知， G' 和 G'' 随角频率均成规律性的增加趋势，且所有挤压条件下的 G' 均高于 G'' ，表明高湿挤压蛋白的成形性能较好，表现出良好的弹性性质。随着螺杆转速的增大， G' 在 340 r/min 最高，表明螺杆转速的增加有助于蛋白质和水分形成紧密的交联结构，形成一定韧性。图 3B 中质构特性的弹性测定同 3A 中的流变趋势一致，也与硬度、粘性、咀嚼度趋势一致。图 3C 中组织化

度横向剪切力基本呈现上升的趋势，纵向剪切力先升高后下降，最终的组织化度呈先上升后下降的趋势，在 340 r/min 的时候达到最高值 1.14，表明螺杆转速增大有助于组分之间形成相互交联的组织化结构。当达到一定程度后，剪切力与的组织化度呈现反比，表明过高的螺杆转速可能会破坏组织化度，与 Ferawati 等^[1]研究结果相一致，较高的螺杆速度可以提高硬度和切削强度（横向和纵向）值，使得组织化度增加，但当螺杆转速过度增大时，强剪切力导致纤维状变弱。

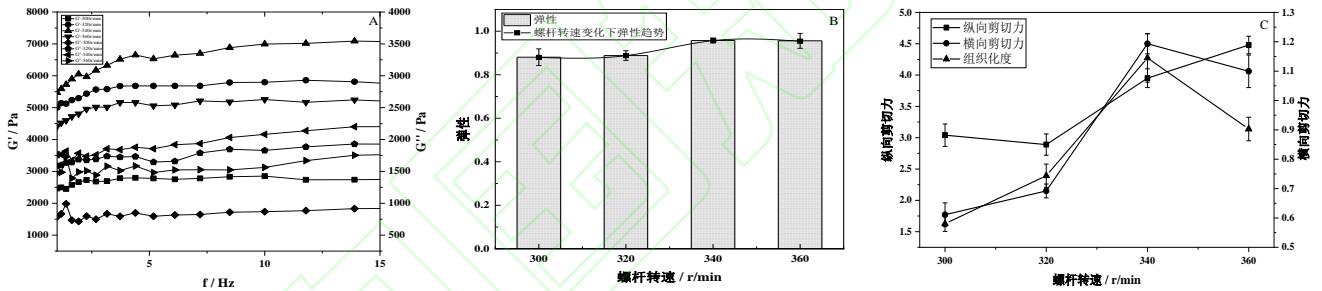


图 3 螺杆转速变化下挤压产品的流变 (A)、弹性 (B) 及组织化度 (C) 变化趋势

Fig. 3 Variation trend of rheological(A), elastic(B) and textural degree(C) of extruded products under the changes in screw speed

2.4 螺杆转速变化下对高湿挤压蛋白产品微观结构特性的影响

2.4.1 螺杆转速变化下对挤压产品二级结构的影响

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 技术是目前研究氢键强有力的手段^[17]，可用于分析蛋白质构象的变化，从红外谱图上酰胺键特征吸收峰的变化^[27]，可推测蛋白质分子的改性程度和交联情况^[28]，酰胺 I 谱带的振动频率 ($1600-1700 \text{ cm}^{-1}$) 对蛋白质二级结构较敏感，可推测蛋白质二级结构的含量变化^[29]。

从表 6 可见，蛋白原料挤压前后蛋白质二级结构变化显著 ($P < 0.05$)，蛋白质结构中 α -螺旋和 β -折叠属于有序结构， β 转角和无规卷曲属于无序结构。在挤压后， β -折叠和 α -螺旋比例显著增加 ($P < 0.05$)，无规卷曲的比例显著下降 ($P < 0.05$)，表明挤压后

的高湿挤压蛋白结构更有序更稳定。

随着螺杆转速的增加， β -折叠的比例显著下降 ($P < 0.05$)，无规则卷曲变化不显著， β 转角比例增加，在 340 r/min 的时候比例达到最大值 23.85%。 β 转角能很好的调整蛋白质内部的空间结构，这与组织化度的结果相一致。Zhang 等^[30]也发现这一有趣的现象，随着转速的增加，挤出物中的 β -折叠比例显著下降 ($P < 0.05$)， β 转角比例增加显著 ($P < 0.05$)。这可能是由于提高转速增加了螺杆对物料的剪切作用及物料之间的压力^[25]，使蛋白质中 β -折叠形成了聚集体，或重新排列形成松散的 β 转角结构，也表明氢键可能被削弱甚至断裂，未折叠的蛋白质分子链在通过长直冷却模具后会重新排列为 β 转角的簇状纤维结构。

表 6 螺杆转速变化下蛋白原料及挤压后产品的二级结构比例情况

Tab. 6 Secondary structure proportion of protein raw materials and extruded products under the changes in screw speed

转速 /r/min	$\beta 1$ /%	$\beta 2$ /%	β -折叠 /%	无规则卷曲 /%	α -螺旋 /%	β 转角 /%
蛋白原料	17.44±1.03 ^d	13.32±1.11 ^d	30.76±0.98 ^d	14.22±0.67 ^a	7.56±0.56 ^b	19.34±0.45 ^b
300	35.20±1.06 ^a	19.40±1.02 ^a	54.60±1.00 ^a	9.76±1.00 ^b	21.77±1.00 ^a	13.87±1.04 ^c
320	27.23±1.20 ^b	18.73±1.03 ^a	45.96±1.00 ^b	9.77±1.00 ^b	20.53±1.01 ^a	23.73±1.03 ^a
340	26.23±0.74 ^b	20.13±0.85 ^a	45.47±0.82 ^{bc}	10.49±0.96 ^b	21.92±0.96 ^a	23.85±0.98 ^a
360	23.61±0.77 ^c	19.24±0.75 ^a	43.74±0.71 ^c	9.81±0.01 ^b	20.96±0.72 ^a	23.76±0.74 ^a

注: 1、同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$); 2、 β -折叠 = $\beta 1 + \beta 2$ 。

2.4.2 螺杆转速变化下对挤压产品热特性的影响

差式扫描量热法 (DSC) 可以用来表示挤压后蛋白质的构象变化, 得到变性温度 (T_p) 和焓变 (ΔH), T_p 反映蛋白质结构的热稳定性, ΔH 反映有序结构的含量^[25]。表 7 中显示, 随着螺杆转速增大, T_p 没有显著差异 ($P > 0.05$), 在 340 r/min 时 T_p ^[31] 最高为 172°C,

ΔH 有着显著的差别 ($P < 0.05$)。在 340 r/min 的时候, 焓变为最小值 1262.50 J/g, 表明此转速下氢键可能发生断裂, 与二级结构中 β -折叠的比例下降相对应。而后又升高为 1285.00 J/g, 可能是转速过快, 氢键断裂时吸热反应太剧烈^[29], 分子聚集程度变大, 这与肖志刚^[7]的结果相一致。

表 7 螺杆转速变化下挤压产品变性温度和焓变的变化情况

Tab. 7 Changes of denaturation temperature and enthalpy of extruded products under the changes in screw speed

螺杆转速 /r/min	起始温度 T_0 /°C	峰值 (变性) 温度 T_p /°C	结束温度 T_e /°C	变性焓变 ΔH /J/g
300	162.40±1.56 ^a	169.10±0.99 ^a	182.70±1.56 ^{ab}	1421.00±5.66 ^a
320	159.95±2.76 ^a	170.90±3.11 ^a	180.45±0.35 ^a	1377.00±7.07 ^{ab}
340	163.90±0.28 ^a	172.00±0.71 ^a	181.50±1.27 ^{ab}	1262.50±64.35 ^c
360	162.60±4.81 ^a	171.45±1.48 ^a	179.80±1.27 ^b	1285.00±5.66 ^{bc}

注: 同一列的不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.4.3 螺杆转速变化下挤压产品纤维结构的影响

高湿挤压蛋白的纤维结构形成是由于在双螺杆挤压机后面接有冷却模具, 在熔融状态下的蛋白质和水的混合物, 通过长冷却模具突然进行冷却, 从而形成一定的纤维结构^[32]。

图 4 为不同螺杆转速下的扫描电镜图, 300 r/min 时产品表面散落着孔洞^[26], 但未形成致密有序的层次; 当转速增加到 320 r/min 时, 产品有清晰的层状结构, 排列较为整齐; 在 340 r/min 时, 产品截面排

列整齐的层次之间有明显的交联, 结构呈现纤维感; 但当转速增加到 360 r/min 时, 横截面交联程度有所降低, 且有断裂现象。以上表明, 螺杆转速的增加可以帮助挤压产品形成更加致密的纤维细丝结构, 组织蛋白层状结构清晰且整齐, 具有精细的定向结构^[29], 但过高的螺杆转速, 可能会破坏其致密的结构, 这与王秋野等^[25]的结论相一致, 当螺杆转速增大到一定程度后, 样品粗糙的程度会增加, 内部气孔数量增多。

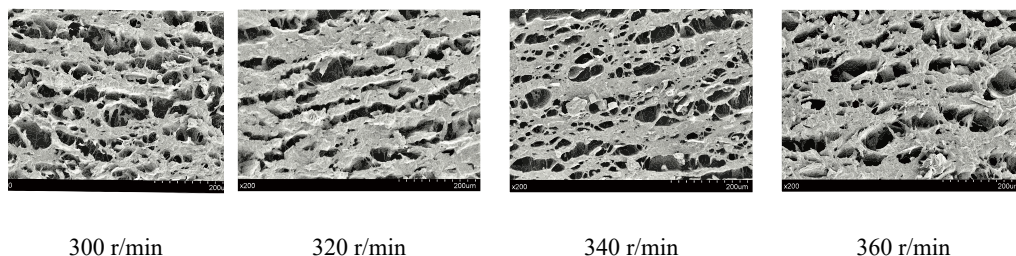


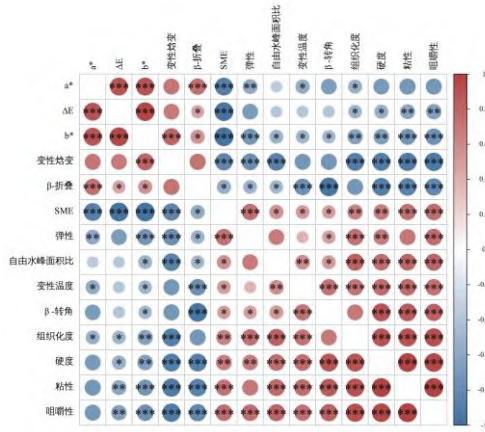
图 4 螺杆转速变化对挤压产品的扫描电镜图片

Fig. 4 SEM images of the effect of screw speed change on extruded products

2.5 螺杆转速变化下 SME、挤压产品品质特性、微观结构及他们之间的相关性分析

由图 5 可知, SME 与 ΔE , b^* , a^* 显著负相关 ($P < 0.05$), 表明螺杆转速增大使得机筒内部的剪切

力变大,在高扭矩的作用下,会使得产品的颜色变浅,有利于改善产品颜色。SME 与质构特性、组织化度呈现显著正相关 ($P<0.05$),这与 Pietsch^[33]和 Palanisamy^[6]的结论相一致,表明增加内部的压力和扭矩有助于蛋白质交联和组织化的增加,硬度、咀嚼度等质构特性随着 SME 的增加而增加。



注: 显著性水平, ***, $P<0.001$; **, $P<0.05$; *, $P<0.05$ 。

图5 螺杆转速变化下 SME、挤压产品的品质特性、微观结构及他们之间的相关性热图

Fig. 5 Heat map of SME, quality characteristics, microstructure, and correlation between extruded products under changes in screw speed

螺杆转速变化下自由水峰面积与质构特性、组织化度之间都呈现显著正相关 ($P<0.05$),自由水的峰面积变化与组织化度呈现极显著正相关 ($P<0.01$),表明产品内自由水的分布与纤维化的孔洞结构具有相关性。产品的硬度、弹性、咀嚼性等和组织化度两两之间也存在着极显著的正相关性 ($P<0.01$),随着螺杆转速的变化,质构特性之间互相关联,产品硬度的增加会使得产品拥有更大的弹性和咀嚼度,增加产品的口感和韧性,有助于形成拉丝状态,也会生成更像肉类的纤维化的孔洞结构。

螺杆转速变化下,挤压产品的微观结构中 T_p 、二级结构中的 β -折叠、 β 转角含量呈显著相关性 ($P<0.05$),但 ΔH 与它们的相关性不显著。 β -折叠与 β 转角呈现极显著负相关 ($P<0.01$),表明螺杆转速的变化,使得 β -折叠比例下降, β 转角比例上升。 T_p 与 β 转角呈现显著正相关,说明 β 转角结构生成后产品帮助提高产品的稳定性。

T_p 、 β 转角与质构特性、组织化度之间呈现显著正相关关系 ($P<0.05$), T_p 越大,表明挤压产品的微观结构越稳定, β 转角的形成有助于产品重新排列形成纤维状结构,有助于产品形成良好的质构特性,提高产品的组织化度,进一步说明挤压产品的微观

结构特性和品质特性之间存在相互印证的关系,表明在挤压机高温高压高剪切的作用下,蛋白质发生变性,内部体系进行重新组合排列,改善产品的质构特性和组织化度。

3 结论

本文以大豆分离蛋白、大豆粉、谷朊粉为原料进行混合,探究了双螺杆挤压机的螺杆转速对高湿挤压蛋白产品的品质特性,微观结构特性以及比机械能的影响,并分析了上述特征之间的相关性。结果显示,随着螺杆转速 (300-360 r/min) 的增加,螺杆对蛋白质物料的切削力增大,增加螺杆与物料之间的摩擦和扭矩,促进蛋白质在机筒内的熔融状态,加强蛋白质分子之间的交联作用。产品质构特性和组织化度与 SME 呈现正相关 ($P<0.05$),与 L^* 和 ΔE 呈现负相关,硬度、弹性、咀嚼度等和组织化度都在 340 r/min 的时候取得最大值,说明过快的转速减少了机筒内的停留时间或者造成物料被过度切割,不利于形成良好的质构特性和纤维结构,降低产品的颜色深度。微观结构特性表明, β -折叠和 α -螺旋显著增大 ($P<0.05$) 使得挤压后得到结构更稳定的高湿挤压蛋白,随着转速的增大, β -折叠、 β 转角、变性温度呈现显著相关性 ($P<0.05$),说明 β 转角比例的增加也会帮助形成更加稳定的结构。产品的品质特性、微观结构特性之间呈现显著相关性 ($P<0.05$),表明螺杆转速的变化会改变蛋白质分子之间的交联作用,改变蛋白质变性程度和稳定性,从而影响产品的品质特性。

本文根据实际生产设定螺杆转速的梯度 (300 r/min、320 r/min、340 r/min、360 r/min),从比机械能、品质特性、微观结构三个维度分析螺杆转速变化对产品的影响,形成较为系统的研究体系,对于将来生产高湿挤压蛋白时螺杆转速的调节提供理论支持和依据。但是本文只对高湿挤压蛋白成品的性质进行系统研究,没有探究蛋白物料在机筒内混合区、熔融区以及冷却区的不同阶段的产品性质,对于在机筒内部的结构变化研究有一定的限制性,所以,将来在探究工艺参数变化时可以进行停机实验,探究各个阶段蛋白质的品质和结构特性,为高湿挤压蛋白的研究提供更有价值的理论支撑。

参考文献:

[1] BOHRER B M. An investigation of the formulation and

- nutritional composition of modern meat analogue products[J]. *Food Science and Human Health*, 2019, 8(4): 320-329.
- [2] OSEN R, TOELSTED S, WILD F, et al. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 127: 67-74.
- [3] WITTEK P, KARBSTEIN H P, EMIN M A. Blending Proteins in High Moisture Extrusion to Design Meat Analogues : Rheological Properties , Morphology Development and Product Properties[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 101509.
- [4] ZHANG J, LIU L, LIU H, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(20): 3267-3280.
- [5] SISAY M T, EMIRE S A, RAMASWAMY H S, et al. Residence time distribution and flow pattern of reduced-gluten wheat-based formulations in a twin-screw extruder[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 79: 213-222.
- [6] PALANISAMY M, FRANKE K, BERGER R et al. High moisture extrusion of lupin protein: Influence of extrusion parameters on extruder responses and product properties[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2019, 99(5): 2175-2185.
- [7] 肖志刚, 霍金杰, 江睿生, 等. 螺杆转速对素肉饼质构特性和结构特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37 (06): 148-153.
- [8] NY/T 1205-2006, 大豆水溶性蛋白含量的测定[S]. 北京, 中国农业出版社, 2006.
- [9] 薛晓程, 李兴魁, 安红周, 等. 谷朊粉原料特性与挤压组织化蛋白品质关系的研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 38 (04): 29-34.
- [10] 刘明, 蒋华彬, 刘艳香, 等. 复配蛋白对小麦蛋白挤压组织化产品特性的影响[J]. *粮油食品科技*, 2018, 26 (06): 1-6.
- [11] FERAWATI F, ZAHARI I, BARMAN M, et al. High-Moisture Meat Analogues Produced from Yellow Pea and Faba Bean Protein Isolates/Concentrate: Effect of Raw Material Composition and Extrusion Parameters on Texture Properties[J]. *Foods*, 2021(4): 10843.
- [12] 张乐道, 任广跃, 曾又华, 等. 加水温度对莜麦面团水分分布状态和质构特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36 (02): 23-26.
- [13] XIA S, XUE Y, XUE C, et al. Structural and rheological properties of meat analogues from *Haematococcuspluvialis* residue-pea protein by high moisture extrusion[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 154: 112756.
- [14] 孙志欣. 高湿挤压技术生产组织化大豆蛋白工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
- [15] ZHANG J, LI L, SONG Z, et al. Texturisationbehaviour of peanut-soy bean/wheat protein mixtures during high moisture extrusion cooking[J]. *International Journal of Foodenceand Technology*, 2018, 53(11): 2535-2541.
- [16] MURILLO J L S, OSEN R, HIERMAIER S, et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high-moisture extrusion of meat substitutes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 242: 8-20.
- [17] XIAO Z, JIANG R, HUO J, et al. Rice bran meat analogs: Relationship between extrusion parameters , apparent properties and secondary structures[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 163: 113535.
- [18] 刘长姣, 熊湘炜, 田海娟, 等. 差示扫描量热法测量大豆分离蛋白热变性温度的不确定度评定[J]. *中国食品添加剂*, 2017, (08): 188-190.
- [19] WU M, HUANG X, GAO F, et al. Dynamic mechanical properties and fractal analysis of texturized soybean protein/wheat gluten composite produced by high moisture extrusion[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 54(2): 499-508.
- [20] PIETSCH V L, WERNER R, KARBSTEIN H P, et al. High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization and final product characteristics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 259: 3-11.
- [21] ZHANG J, Zhen M, CHENG Q, et al. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(8): 2435-2444.
- [22] MAUNG T T, GU B Y, RYU G H. Influence of extrusion process parameters on specific mechanical energy and physical properties of high-moisture meat analog[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2021, 17(2): 149-157.
- [23] LININGWEI K. Effects of Processing Parameters on Specific Mechanical Energy in Soy Protein Texturization by

- High Moisture Extrusion[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007, 22(3): 38-42.
- [24] 钱鑫, 李良怡, 周文化, 等. 银杏粉对小麦面团流变学特性和水分分布及迁移规律的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 74-80.
- [25] 王秋野. 豌豆蛋白基植物肉的研制及特性分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [26] 肖志刚, 张雪萍, 王哲, 等. 挤压温度对高水分植物蛋白肉流变学和结构特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(02): 133-137.
- [27] 丁静, 钱俊青. 蛋白质二级与三级结构的表征方法[J]. 浙江化工, 2020, 51(11): 49-54.
- [28] 苏靖, 石晶红, 王金帅. 基于红外光谱分析河套春小麦储藏期蛋白质二级结构变化[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 24-27.
- [29] 岳程程, 王哲, 佟丽凤, 等. 水分添加量对高水分挤压大豆粕植物蛋白肉品质及结构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 52-60.
- [30] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. Converting peanut protein biomass waste into “double green” meat substitutes using a high-moisture extrusion process: A multiscale method to explore a process for forming a meat-like fibrous structure[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(38): 10713-10725.
- [31] 黄晓毅, 韩剑众, 王彦波等. 差示扫描量热技术(DSC)在肉类研究中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2009, 30(09): 353-357.
- [32] 程潜. 植物肉的制备及其功能性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [33] PIETSCH V L, BUEHLER J M, KARBSTEIN H P, et al. High moisture extrusion of soy protein concentrate: Influence of thermo mechanical treatment on protein-protein interactions and rheological properties[J]. Journal of food engineering, 2019, 251: 11-18.