

植物蛋白螺杆挤压组织化技术的研究进展

李 振¹, 相 海¹, 赵有斌², 宋健宇¹, 张德程³, 梁 昊³, 张艺潇⁴

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 浙江三中粮油科技有限公司, 浙江 湖州 313200;
3. 中机康元粮油装备(北京)有限公司, 北京 100083; 4. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100072)

摘要: 螺杆挤压组织化技术是植物蛋白肉生产加工的主要方式, 具有规模化、产业化、连续化、高效节能等优点。旨在对植物蛋白螺杆挤压组织化技术进行梳理, 从螺杆挤压组织化技术及其设备方面综述了植物蛋白螺杆挤压组织化技术的研究进展, 阐述了螺杆挤压组织化过程的影响因素。螺杆挤出机是植物蛋白挤压组织化加工的主要设备, 螺杆为螺杆挤出机的核心部件, 螺杆元件及螺杆构型对挤压压力、剪切力、扭矩和平均停留时间具有较大影响。温度、剪切力、压力、原料等都是影响植物蛋白螺杆挤压组织化过程的重要因素。

关键词: 植物蛋白; 螺杆挤压组织化技术; 螺杆元件; 螺杆构型; 挤压组织化过程

中图分类号: TS219; TS203 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)09-0067-08

Development of plant protein screw extrusion texturing technology

LI Zhen¹, XIANG Hai¹, ZHAO Youbin², SONG Jianyu¹,
ZHANG Decheng³, LIANG Hao³, ZHANG Yixiao⁴

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China;
2. Zhejiang Sanzhong Grain and Oil Technology Co., Ltd., Huzhou 313200, Zhejiang, China;
3. China Machinery Kangyuan Cereals and Oils Equipment(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. Unit of 32381 People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

Abstract: Screw extrusion texturing technology is the main way of vegetable protein meat production, with the advantages of scale, industrialization, continuity, high efficiency and energy saving. To sort out the plant protein screw extrusion texturing technology, the research progress of screw extrusion texturing technology of plant protein was reviewed from the aspects of screw extrusion texturing technology and equipment and the influencing factors of screw extrusion texturing process were elaborated. Screw extruder was the main equipment of plant protein extrusion texturing process with screw as the core component of screw extruder, screw elements and screw configuration had great influence on extrusion pressure, shear force, torque and average residence time. Temperature, shear force, pressure and raw materials were the important factors affecting the plant protein screw extrusion texturing process.

Key words: vegetable protein; screw extrusion texturing technology; screw element; screw configuration; extrusion texturing process

蛋白质在人类饮食中占有很重要的比例, 动物

蛋白和植物蛋白是主要的蛋白质来源^[1]。联合国粮农组织数据显示, 预计到 2050 年人类对肉类的需求量将增加到 4.6 亿 t 以上, 肉类供应无法满足需求, 而且扩张畜牧养殖业会挤占耕地土地, 造成环境污染, 同时加剧温室效应^[2-6], 另外, 肉类摄入过量也会造成如高血脂、高血压和心脑血管疾病等患病率的增加, 严重危害居民身体健康^[7-9]。因此, 以植物蛋白肉替代动物肉类的产业发展潜力巨大。

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2023-06-29

基金项目: “十四五”国家重点研发计划“大宗油料加工副产物综合利用关键技术及新产品创制”(2021YFD2100405)

作者简介: 李 振(1997), 男, 硕士, 研究方向为油脂加工机械与装备(E-mail)2802117701@qq.com。

通信作者: 相 海, 研究员(E-mail)xh9377@263.net。

Research and Markets 数据显示,未来几年全球植物蛋白肉市场规模将不断扩大,市场前景广阔。目前,世界各国都大力支持发展植物蛋白肉产品^[10-11]。大豆和花生是我国主要的植物蛋白原料,但其高蛋白质含量的油料副产物(大豆饼粕、花生饼粕等)主要用作饲料或者肥料,附加值低,且资源浪费严重。大力发展植物蛋白肉技术对促进植物蛋白产品资源的有效利用和增加产业链附加值有着重要的意义。

目前,螺杆挤压组织化技术是植物蛋白肉工业化加工的主要方式,具有规模化、产业化、连续化、高效节能、原料适用性强、工艺集成性高、无污染物排放等优点,已成为各国发展植物蛋白肉产业的主要技术^[12-13]。螺杆挤出机是植物蛋白质构重组技术的核心设备,其中双螺杆挤出机在 20 世纪 80 年代以后,以其独特的优势逐步取代单螺杆挤出机成为植物蛋白肉挤压组织化的主要设备^[14-15]。本文对植物蛋白螺杆挤压组织化技术,螺杆挤压组织化设备、温度、剪切力、压力以及原料对螺杆挤压组织化过程的影响进行了综述,以期对植物蛋白螺杆挤压组织化技术及设备进行梳理,为后续技术和设备的发展方向提出建议。

1 植物蛋白肉及其加工技术

植物蛋白肉是将风味剂、黏合剂、脂肪等各种食品添加剂加入到花生、大豆、小麦、豌豆等植物蛋白原料中,然后通过风味物质模拟肉的口感,通过结构纤维化模拟肉的质构,制成与动物肉类口感、质构等相似的肉类替代物^[6,16],其食品加工特性好、营养价值高^[6]。我国植物蛋白原料丰富、易获取,因此发展植物蛋白肉是探索动物肉类替代物的主要方向。

目前主流的植物蛋白肉加工技术有 3 种,分别为静电纺丝技术^[16]、剪切技术^[17]和螺杆挤压组织化技术^[6,18]。其中:静电纺丝技术在加工生产时存在酸、碱等化学试剂的大量使用,污染严重,存在食品安全问题^[18];剪切技术存在设备制作难度大,批量生产难,难以作为植物蛋白肉工业化大规模生产的主要技术^[19-20]。螺杆挤压组织化加工机制^[18-19]是原料通过螺杆输送压缩,在外加热源加热的机筒中受到剪切力和摩擦力双重作用形成熔融流体,维持蛋白质高级结构的氢键、范德华力、离子键和二硫键被破坏,蛋白质高度规则的空间结构瓦解,肽链松散伸展呈相对线性,随着剪切不断进行,不断增多的呈线性蛋白质分子链相互靠近吸引,当物料被挤压经过模头时,在定向流动作用下产生一定程度的取

向排列,形成纤维状组织结构^[3,19]。植物蛋白的螺杆挤压组织化加工技术是原料的输送、物料的混合、物料加热熔融、挤出成型等加工过程集成于一体的加工技术^[13,21],实现了物料在腔体高温、高压、短时强挤压、剪切处理等的功能,具有能够工业化大批量生产、加工效率高、能耗低、加工过程清洁、加工产品种类繁多等优势^[22-23],虽然挤出产品口感略有不足,但仍是以后植物蛋白肉加工的主要方式^[21,23-25]。

2 植物蛋白螺杆挤压组织化技术的发展

植物蛋白螺杆挤压组织化技术的工业化进程可以追溯到 20 世纪 60 年代。Atkinson^[26]于 1970 年研发了植物蛋白挤压组织化产品,其明确提出,挤压组织化工艺过程能用于生物聚合物的增塑,蛋白质分子的重新取向、重新交联制成具有组织化结构的类肉产品。Harper^[27]研究了大豆蛋白的螺杆挤压组织化技术,结果表明,大豆蛋白原料和水、添加剂通过混料装置预混合处理后加入到挤压机中,在挤压机螺杆腔体内的剪切力场、压力场和温度场的综合作用下^[21],大豆蛋白失去其天然结构,形成有序的三级结构和连续的黏性面团,面团在螺槽内发生层流,蛋白质分子在机头处沿流动方向定向展开,蛋白质分子的变性使其重新形成网状交联结构,“熔体”从机头挤出,形成膨胀性的组织化产品,产品具有良好的复水性、咀嚼性,并呈现类似肉的结构特征^[21]。

现今植物蛋白螺杆挤压组织化技术生产肉类类似物根据输入物料含水量的不同,可以分为高水分($> 40\%$)挤压技术和低水分($\leq 40\%$)挤压技术^[23]。低水分挤压技术机械能是物料的主要熟化能,沿挤出方向的温度分布为低-高-高,挤压温度较高^[28-29],挤出的低水分组织化蛋白呈海绵状结构,色泽、大小、形状和风味多样,是市场上的主流产品,复水后主要作为肉制品添加物。高水分挤压技术是国际上新兴的蛋白质重组技术,主要熟化能是水蒸气热能,沿挤出方向的温度分布为低-高-低,与低水分挤压技术相比,区别在于模口的不同,而且加工温度较低^[30],其优势在于产品不需要复水,具有组织化程度高、弹性强的特点,质地更接近畜禽肉,营养成分和生物活性成分损失少,可以作为模拟肉,经过简单处理后直接食用^[14,31]。蛋白质是挤压组织化植物蛋白的最主要成分,也是纤维结构形成的关键组分,植物蛋白挤压组织化的挤出过程一般由输送、熔融、计量均化、挤出模头功能区组成。低水分和高水分肉类类似物的蛋白质变性和质构化机制及挤出实物见图 1^[32-33]。

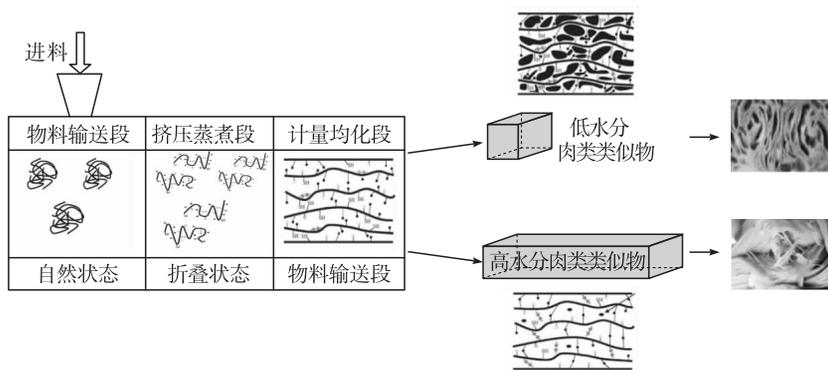


图1 低水分和高水分肉类类似物的蛋白质变性和质构化机制及挤出实物

如图1所示,挤压过程中,蛋白质分子维持高级结构的化学键(氢键、二硫键)在机械能、热能和螺杆剪切的作用下被破坏,埋藏在内部的疏水基团和巯基暴露,分子去折叠化, α -螺旋、 β -折叠比例下降, β -转角、无规则卷曲比例增加,分子逐渐展开呈链状结构,取向沿着物料流动方向^[34-36]。在取向过程中,蛋白质分子与蛋白质分子及其他分子之间再随机发生缔合、聚集、交联、分解、氧化、还原等反应^[37]。蛋白质分子重新排列(氨基酸链修饰)、聚合,化学交联主要发生在分子侧链之间,形成新的共价异肽交联,其结果是形成网状结构,并呈现出各向异性,即在平行于运动方向的强度较大,而垂直于运动方向的强度较弱,呈现纤维结构^[31,38-39]。由于体系中蛋白质分子较多,因此蛋白质分子间作用形成的聚合体为骨架,其他分子如气泡、淀粉和脂质等则填充在骨架之间^[40]。高水分挤出存在长冷却模具,在冷却时,蛋白质分子沿着流出方向重新排列或者聚集,形成新的有序结构, α -螺旋重新增加,氢键、疏水相互作用在高水分肉类类似物中形成的交联比低水分肉类类似物中更多,因此高水分肉类类似物比低水分肉类类似物具有更致密的纤维结构、更低的溶解度、更少更小的气泡以及更高的纹理稳定性。

3 螺杆挤出机

3.1 螺杆挤出机简介

植物蛋白挤压加工肉类类似物是植物蛋白原料蛋白质组分在螺杆挤出机机筒内,通过能量输入、螺杆构型和挤压参数的变化发生耦合作用的过程。螺杆挤出机是植物蛋白挤压组织化的核心装备,可以同时完成原料输送、压缩、添加剂的混合、物料蒸煮、蛋白质变性、挤出成型等多种操作,具有持续的高温高压加工、低损失短时处理、高效率的生化反应器的特性^[41]。植物蛋白原料在螺杆与腔体中的状态和蛋白质组分的变性程度直接影响挤出产品的质

量,因此螺杆是螺杆挤压组织化过程的核心部件,螺杆元件和螺杆构型与物料受到的热机械强度和物料停留时间分布直接相关并直接影响挤出产品品质^[38-39,41]。

目前螺杆挤出机主要有两种,用于生产低水分肉类类似物的单螺杆挤出机以及生产高水分肉类类似物的双螺杆挤出机。双螺杆挤出机比单螺杆挤出机物料的输送性能好、混合性能优良、能量利用效率高、加工原料范围广、物料熟化程度高、螺杆自洁性能好、操作控制稳定,更适合生产植物蛋白肉^[42-44]。国内外生产用于植物蛋白肉生产的螺杆挤出机厂商数量巨大,其中国际知名生产商以德国布拉本德、法国克莱斯特罗、美国赛默飞世尔、德国科倍隆等为代表^[14,28],国内以济南赛百诺、湖南富马科、北京金地三福等为代表。

3.2 螺杆长径比

螺杆长径比是衡量螺杆挤出机品质的一个重要参数,螺杆长径比对螺杆建立高压的能力、物料在腔体的停留时间、物料的充分混合及反应过程均有影响,并最终影响挤出产品品质。表1为不同型号螺杆挤出机的螺杆长径比及应用方向。

表1 不同型号螺杆挤出机的螺杆长径比及应用方向

型号	螺杆长径比	应用方向	参考文献
EV25	24:1	高水分大豆蛋白肉类类似物	[45]
BC45	24:1	高水分复合植物蛋白肉类类似物	[46]
DSE-25	20:1	高水分大豆蛋白肉类类似物	[47]
ZSK26MC	29:1	高水分小麦蛋白肉类类似物	[48]
MPF50/25	15:1	植物蛋白肉类类似物	[49]
HAAKe16	25:1	豌豆蛋白肉类类似物	[50]
单螺杆	20:1	低水分鹰嘴豆蛋白肉类类似物	[51]
CAMPACTwin™ 62	20:1	低水分小麦蛋白肉类类似物	[52]
SYSLG30-IV	20:1	高水分小麦蛋白肉类类似物	[53]
SLG-32-II		高水分大豆蛋白肉类类似物	[54]

续表 1

型号	螺杆长径比	应用方向	参考文献
SLG-32-II	20:1	低水分复合植物蛋白肉类似物	[55]
FMHE-36	24:1	低水分小麦蛋白肉类似物	[56]
FMHE36-32	24:1	高水分花生蛋白肉类似物	[57]
TXLL110		低水分花生蛋白肉类似物	[58]

3.3 螺杆元件及螺杆构型

螺杆基本组成单元是具有特定几何形状或参数的螺杆元件。螺旋元件、捏合元件、齿形元件是最基本的 3 类螺杆元件(见图 2)。每一类螺杆元件有其特定的几何参数,如元件长度,螺旋元件的螺旋角、螺距、螺槽宽度,捏合元件的错位角等。不同的螺杆元件按照一定的数量和位置形成了螺杆构型。正向螺旋元件主要作用是混料和物料的输送以及轴向建压,反向螺旋元件的作用是在腔体形成密封,建立高压,增加物料停留时间;捏合元件具有很强的阻流作用,随着捏合角的减小,阻流作用增强,同时能对物

料进一步地混合和剪切;齿形元件对物料具有深度混合、均化作用,使各种添加剂及物料组分混合均匀^[15,59]。郎珊珊等^[21,60]总结得出物料在输送区完成初步混料,此区螺杆上配置正向捏合块和大导程的单头螺旋元件,以提升加料能力,提高物料正向输送和轴向建压能力,其长度一般占全长的 30%~50%;物料熔融区是挤出机的核心区域,植物蛋白各种物理化学变化均发生在此区域,各制造商对此区域的配置不尽相同,一般配置捏合元件、中导程的正向螺旋元件、正向捏合块与反向捏合块组合元件、正向捏合块与螺旋元件组合元件,提供了高效的混合与剪切,反向捏合块对物料的阻流,除了提供高剪切作用外,还极大地提高了熔融区的分布混合能力,熔融区的螺杆长度一般占全长的 35%~65%;计量均化区一般配置正向双头螺旋元件以建立一定压力,能够使熔融的物料平稳输送到模具中,此区螺杆长度一般占全长的 15%~25%。



图 2 常见的 3 类螺杆元件

武建堂^[61]、Tolstoguzov^[62]等研究得出合理配置熔融区的螺杆元件是螺杆构型的关键。目前,大多数双螺杆挤出机厂商都采用灵活的螺杆元件组合,使挤出机能适应加工各种不同的原料,并且根据加工挤出物的品质,调整螺杆元件配置,提高挤出产品质量。

螺杆元件对剪切力、压力、扭矩和平均停留时间均有较大影响。增加配置捏合元件、增加捏合元件的错位角、增加螺杆转速能有效地增加剪切强度。张金闯^[14]、Zhang^[29]等发现,挤压过程中螺杆转速和螺杆构型对挤压剪切力的影响很大,表现为剪切力随着螺杆转速的增高和捏合块错位角的增大而增加。合理配置反向螺旋元件和齿形元件能有效建压。不同螺杆元件对压力增加的影响也存在差异,其中反向元件、齿形元件、正向螺旋元件、捏合元件对压力增加的影响程度依次递减。张波等^[63]研究表明,在大豆蛋白挤压组织化螺杆上配置反向螺旋元件和齿形元件能够有效增加物料停留时间,使物料充分混合,极大地增加了挤出产品的吸水率,提高了挤出产品口感。张波等^[64]研究发现,螺杆和物料在腔体内的相互作用力主要有黏滞力和摩擦力,通

过扭矩将其表现出来,扭矩的大小与螺杆的填充程度相关。在螺杆元件中,螺旋元件的螺旋角及捏合元件的错位角对螺杆填充度有较大的影响,此影响表现为观测扭矩随螺杆填充度的增加而增加,同时齿形元件破坏了物料沿流向取向,增加了自由取向,明显增加观测扭矩。Gautam 等^[65]研究表明,螺杆元件的类型选择、元件长径比、放置位置、元件之间间距对物料在腔体的平均停留时间存在较大影响,表现为平均停留时间随着混合元件到挤出模头距离的增加而增加,同时反向元件用于更强的限流作用,增加轴向混合程度,增加元件长度和间距也将增加轴向混合程度。

目前,国内螺杆挤出机厂商主要参照国外尤其是美国和欧洲的相关螺杆挤压设备进行设计制作,产品品质较低,主要追求“形”,对口感、色泽和香味关注相对较少,而且对挤出过程的相关机制研究较少。美国和欧洲的设备制造商如赛默飞世尔和布拉本德对挤出过程机制的研究较深,其试验用挤出设备在设计上可以随时停机打开机筒观察和测试各时间段内各个区段的物料质构变化,对生产加工有很

强的指导意义。相较之下,国产螺杆挤出机存在一定缺陷,仍具有较大发展潜力。

4 螺杆挤压组织化过程的影响因素

4.1 温度

张金闯等^[14]分析认为,温度是促使植物蛋白组分结构发生稳定变化的主要能量来源。通常将熔融区的温度定义为挤压温度,其决定物料开始熔融和结束熔融状态的时间,物料中蛋白质的变化与此温度密切相关。Liu等^[66]发现,能够维持高水分组织化大豆蛋白结构的关键作用力是二硫键,二硫键主要在高温高压的熔融区形成,后续不再变化。李淑静等^[67]认为,当挤压温度超过150℃时,二硫键被破坏,自由巯基的含量增加,纤维化结构变差。魏益民等^[43]认为,在温度较低时大豆蛋白的组织化难成形且极易断裂,随着温度升高,产品的组织化程度逐渐上升,当温度超过150℃时,产品表面不再平滑光洁,组织化程度随着温度的继续升高不断降低。Lin等^[68]认为,在149℃和160℃时,高水分组织化大豆蛋白的纤维结构较好且产品吸水性良好,但是产品的硬度、咀嚼性和弹性降低。

高温使蛋白质解折叠、重新取向、纤维化,但是过高的温度将破坏新形成的二硫键,破坏已经形成的纤维结构,使得挤出产品疏松,其硬度、咀嚼度和弹性变差,最优的温度范围在140~160℃。

4.2 剪切力

剪切力能有效展开分子链,使分子链断裂并且断裂的分子链发生相互作用,机械剪切可以使蛋白质分子中更多的自由巯基暴露出来,能够形成二硫键的巯基数目增加,蛋白质聚集成团的分子质量增大^[14]。Vaz等^[69]发现,机械剪切能有效促进蛋白质分子链的展开,暴露出更多巯基,使之交联在一起形

成更多的二硫键,进而促进形成分子质量较大的蛋白质聚集体,使纤维结构更稳定。Koch等^[70]研究显示,低剪切强度有利于蛋白质聚集,而高强度剪切将破坏蛋白质分子,使蛋白质分子的粒径减小,蛋白质分子质量也同时减小。Marsman等^[71]认为,在低剪切强度时,大豆蛋白分子间的相互作用力主要为二硫键和非共价键相互作用,而在高剪切强度时,还可能产生共价交联作用。李淑静等^[63]认为,剪切力一方面可以促进二硫键的形成,另一方面降低了分子质量,需要合理的剪切力以平衡两者的影响。

对物料充分剪切有利于纤维结构的生成,但当剪切力过高时,形成的纤维结构被破坏,蛋白质分子质量减小,产品气泡增加,导致品质变差。

4.3 压力

张波^[72]认为,压力是低水分挤压多孔结构和高水分挤压纤维结构形成的关键。Puppo等^[73]研究发现,大豆分离蛋白粒径随压力的升高先升高后降低。Speroni等^[74]研究发现,蛋白质的溶解度随着压力的升高先下降后上升。Tang等^[75]研究表明,低压力时不溶性大豆分离蛋白聚合物增加,随着压力增加,大分子质量可溶性聚集体含量增加,随着压力进一步增加,大分子质量的蛋白质分子聚集体重新分解。

挤压组织化过程中高压有利于蛋白质大分子质量可溶性聚集体的含量增加和纤维结构的形成,但是过高的压力会分解大分子质量的蛋白质聚集体,破坏纤维结构,使产品品质显著降低,最优的压力范围在200~400 MPa之间。

4.4 原料

挤压组织化制备植物蛋白肉的植物蛋白原料主要有3种,其各自的特点及对组织化过程的影响如表2所示。

表2 植物蛋白原料特点及对组织化过程的影响

分类	原料	特点	对组织化过程的影响
油料蛋白	大豆、花生、亚麻籽、油菜籽等	球蛋白为主(富含赖氨酸、色氨酸和甲硫氨酸)	蛋白质分子易发生聚集和交联,有序的纤维结构更易形成
谷物蛋白	小麦、大麦、大米等	谷蛋白、醇溶蛋白为主(富含脯氨酸与谷氨酸)	蛋白质分子稳定性强,呈分布状态,有利于增加植物蛋白肉的硬度和弹性
杂粮蛋白	玉米、小米、豌豆、羽扇豆、鹰嘴豆等	球蛋白为主(富含赖氨酸、色氨酸和甲硫氨酸)	蛋白质分子易发生聚集和交联,有序的纤维结构更易形成

注:表中内容根据文献^[37]整理

根据植物蛋白原料对挤压产品的影响以及我国作物种植结构、植物蛋白原料食用及产业链发展情况,我国植物蛋白肉的加工原料以油料蛋白为主,通过添加适量谷物蛋白、杂粮蛋白改善产品口感及质构。

5 总结与展望

为补足动物肉类供应缺口,应对环境污染及温室效应的加剧,世界各国积极研究和推广以螺杆挤压组织化技术为载体的植物蛋白肉类类似物。相较于使用单螺杆挤出机开发的低水分植物蛋白肉,使

用双螺杆挤出机开发的高水分植物蛋白肉组织化程度高,质地与动物肉相近,植物蛋白中所包含的活性成分及营养元素几乎没有减少,能够作为动物肉类替代物。在螺杆挤出机筒体内温度场、剪切场、压力场等综合作用下挤出产品质量也有很大的不同。温度在 140 ~ 160 °C、压力 200 ~ 400 MPa 和较高的扭矩作用下,能得到质量较好的植物蛋白肉产品,产品纤维结构、咀嚼性、弹性等都较优。在设备制作方面,我国双螺杆挤出机主要参照美国及欧洲的设备进行仿制,对挤压加工产品主要追求“形”,对机制和作用过程的研究较少,设备研发创新能力薄弱。

研究螺杆元件与螺杆配置对挤压加工植物蛋白肉类似物具有指导意义,探索不同物料加工的最优螺杆构型对指导生产、降低生产成本、开发优质产品、推动工业生产国产化进程具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] VALÉRIE G, FRANCINE F, VANESSA J. High moisture extrusion of vegetable proteins for making fibrous meat analogs: a review [J/OL]. *Food Rev Int*, 2022 [2022 - 06 - 27]. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2023816>.
- [2] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(7): 1 - 9.
- [3] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 338 - 345, 350.
- [4] REVELL B. Meat and milk consumption 2050: the potential for demand - side solutions to greenhouse gas emissions reduction[J]. *Eur Choices*, 2015, 14(3): 4 - 11.
- [5] HAVLIK P, VALIN H, HERRERO M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(10): 3709 - 3714.
- [6] 唐伟挺, 余晓盈, 邹苑, 等. 人造肉的研究现状、挑战及展望[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(6): 190 - 199.
- [7] WOLK A. Potential health hazards of eating redmeat[J]. *J Intern Med*, 2017, 281(2): 106 - 122.
- [8] CORDELLE S, REDL A, SCHLICH P. Sensory acceptability of new plant protein meat substitutes[J/OL]. *Food Qual Prefer*, 2022, 98: 104508 [2022 - 06 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104508>.
- [9] KUREK M A, ONOPIUK A, POGORZELSKANOWICKA E, et al. Novel protein sources for applications in meat - alternative products: insight and challenges [J/OL]. *Foods*, 2022, 11(7): 957 [2022 - 06 - 27]. <https://doi.org/10.3390/foods11070957>.
- [10] ZHANG X, ZHAO Y, ZHANG T Y, et al. High moisture extrusion of soy protein and wheat gluten blend: an underlying mechanism for the formation of fibrous structures[J/OL]. *LWT - Food Sci Tech*, 2022, 163: 113561 [2022 - 06 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113561>.
- [11] 赵婧, 宋弋, 刘攀航, 等. 植物基替代蛋白的利用进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 1 - 8.
- [12] HONG W A, FRANS W J, VAN DEN BERG A, et al. Differences in physicochemical properties of high - moisture extrudates prepared from soy and pea protein isolates[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 128: 107540 [2022 - 06 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107540>.
- [13] FRAME N D. *The technology of extrusion cooking*[M]. Boston, MA: Springer, 1994.
- [14] 张金闯, 刘丽, 刘红芝, 等. 食品挤压技术装备及工艺机理研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 275 - 283.
- [15] RIAZ M N. *Extruders in food applications*[M]. Florida: CRC Press, 2000.
- [16] MENDES A C, STEPHANSEN K, CHRONAKIS I S. Electrospinning of food proteins and polysaccharides[J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 68: 53 - 68.
- [17] 张斌, 屠康. 传统肉类替代品: 人造肉的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 327 - 333.
- [18] REHRAH D, AHMEDNA M, GOKTEPE I, et al. Extrusion parameters and consumer acceptability of a peanut - based meat analogue[J]. *Int J Food Sci Tech*, 2009, 44(10): 2075 - 2084.
- [19] 刘梦然, 毛衍伟, 罗欣, 等. 植物蛋白素肉原料与工艺的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 293 - 298.
- [20] KRINTIRAS G A, DIAZ J G, JAN V, et al. On the use of the couette cell technology for large scale production of textured soy - based meat replacers[J]. *J Food Eng*, 2016, 169: 205 - 213.
- [21] 郎珊珊. 双螺杆构型及挤压参数的建模与试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [22] 董萍, 冯叙桥, 李宝华, 等. 大豆组织蛋白品质的配方改进[J]. *大豆科学*, 2013, 32(3): 406 - 409.
- [23] 杨勇, 王中江, 陈惠惠, 等. 大豆蛋白 - 淀粉基素肉制品高湿挤压工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 133 - 144.
- [24] 贾胜德, 陈立, 朱朝辉. 挤压膨化工艺与设备的研究进展[J]. *农机化研究*, 2006(8): 68 - 70.
- [25] 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(3): 78 - 83.
- [26] ATKINSON W T. *Meat - like protein food product: US3488770*[P]. 1970 - 01 - 06.
- [27] HARPER J M. *Extrusion of foods*[M]. Florida: CRC Press, 1981.
- [28] ALAM M S, KAUR J, KHAIRA H, et al. Extrusion and

- extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2015, 56(3):445-473.
- [29] ZHANG B, ZHANG Y, DREISOERNER J, et al. The effects of screw configuration on the screw fill degree and special mechanical energy in twin-screw extruder for high-moisture texturized defatted soybean meal [J]. *J Food Eng*, 2015, 157:77-83.
- [30] DOGAN H, GUEVEN A, HICSASMAZ Z. Extrusion cooking of lentil flour (*Lens Culinaris* - Red) - corn starch - corn oil mixtures [J]. *Int J Food Prop*, 2013, 16(2):341-358.
- [31] AKDOGAN H. High moisture food extrusion [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2010, 34(3):195-207.
- [32] SAMARD S, GU B, RYU G. Effects of extrusion types, screw speed and addition of wheat gluten on physicochemical characteristics and cooking stability of meat analogues [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(11):4922-4931.
- [33] ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2019, 59(20):3267-3280.
- [34] CAMIRE M E. Protein functionality modification by extrusion cooking [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1991, 68(3):200-205.
- [35] LEDWARD D A, TESTER R F. Molecular transformations of proteinaceous foods during extrusion processing [J]. *Trends Food Sci Tech*, 1994, 5(4):117-120.
- [36] 王洪武, 周建国, 林炳鉴. 新型双螺杆食品挤压机加工复合组织蛋白的研究 [J]. *农业机械学报*, 2001, 32(2):66-69.
- [37] 陈琼玲, 张金闯, 刘丽, 等. 高水分挤压过程中大分子相互作用研究进展 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(8):350-359.
- [38] TOLSTOGUZOV V B. Thermoplastic extrusion: the mechanism of the formation of extrudate structure and properties [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1993, 70(4):417-424.
- [39] MANSKI J M, GOOT A, BOOM R M. Advances in structure formation of anisotropic protein-rich foods through novel processing concepts [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2007, 18(11):546-557.
- [40] SHEARD P R, LEDWARD D A, MITCHELL J R. Role of carbohydrates in soya extrusion [J]. *J Food Sci Tech*, 1984, 19(4):475-483.
- [41] OBATA S, YAMATO Y, TANIGUCHI H. Method of manufacturing edible soy protein-containing, dried meat product: US4032666 [P]. 1977-06-28.
- [42] 康立宁, 魏益民. 大豆蛋白及其组织化技术 [J]. *食品科学*, 2004, 25(S1):112-116.
- [43] 魏益民, 康立宁, 张余. 食品挤压理论与技术: 中卷 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
- [44] 魏益民, 康立宁, 张波, 等. 高水分大豆蛋白组织化生产工艺和机理分析 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10):193-197.
- [45] 洪斌, 解铁民, 高扬, 等. 原料体系对高水分组织蛋白纤维化结构的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(2):23-27.
- [46] THIÉBAUD M, DUMAY E, CHEFTEL J C. Influence of process variables on the characteristics of a high moisture fish soy protein mix texturized by extrusion cooking [J]. *Lebensm - Wiss Tech*, 1996, 29(5/6):526-535.
- [47] FENG L C, YI M W, ZHANG B, et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range [J]. *J Food Eng*, 2009, 96(2):208-213.
- [48] PIETSCH V L, EMIN M A, SCHUCHMANN H P. Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products [J]. *J Food Eng*, 2016, 198:28-35.
- [49] YAO G, LIU K S, HSIEH F. A new method for characterizing fiber formation in meat analogs during high-moisture extrusion [J]. *J Food Sci*, 2004, 69(7):303-307.
- [50] 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]. *J Food Eng*, 2014, 127:67-74.
- [51] MOREIRA - ARAUJO R S R, ARAUJO M A M, AREAS J A G. Fortified food made by the extrusion of a mixture of chickpea, corn and bovine lung controls iron-deficiency anaemia in preschool children [J]. *Food Chem*, 2008, 107(1):158-164.
- [52] 马宁. 小麦组织化蛋白品质改良及应用研究 [D]. 江苏无锡: 江南大学, 2013.
- [53] 杨耸. 原料特性对高湿挤压纤维化大豆蛋白影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
- [54] 郑雅丹. 植物蛋白的纤维组织化技术研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [55] 陈曦娟. 大豆蛋白挤压组织化及特性研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
- [56] 李诚, 郑志, 罗水忠, 等. 挤压操作参数对组织化小麦蛋白复水性影响研究 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(6):35-40.
- [57] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [58] 郎珊珊, 阎树田, 石戴卫. 高温脱脂花生粕双螺杆挤压组织化的工艺研究 [J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(5):83-86.

- [59] YEH A I, HWANG S J. Effect of screw profile on extrusion – cooking of wheat flour by a twin – screw extruder [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2007, 27 (5): 557 – 563.
- [60] 郎珊珊, 阎树田. 螺杆构型对植物蛋白挤压组织化感官评定的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 135 – 137.
- [61] 武建堂, 董海洲. 花生蛋白挤压组织化及应用现状[J]. *粮食与油脂*, 2008(1): 13 – 15.
- [62] TOLSTOGUZOV V. Some thermodynamic considerations in food formulation [J]. *Food Hydrocolloid*, 2003, 17 (1): 1 – 23.
- [63] 张波, 魏益民, 康立宁. 等. 挤压参数对组织化大豆蛋白持水性的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 260 – 263.
- [64] 张波, 魏益民, SIETZE W, 等. 双螺杆挤压机螺杆元件类型对扭矩和压力的影响[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(9): 71 – 74, 58.
- [65] GAUTAM A, CHOUDHURY G S. Screw configuration effects on starch breakdown during twin – screw extrusion of rice flour [J]. *J Food Process Pres*, 1999, 23 (5): 355 – 375.
- [66] LIU K S, HSIEH F H. Protein – protein interactions during high – moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different solvent systems [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(8): 2681 – 2687.
- [67] 李淑静, 张波, 魏益民, 等. 挤压能量作用对蛋白质分子质量的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(21): 399 – 402.
- [68] LIN S, HUFF H E, HSIEH F. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog [J]. *J Food Sci*, 2010, 67(3): 1066 – 1072.
- [69] VAZ L, AREAS J. Recovery and upgrading bovine rumen protein by extrusion: effect of lipid content on protein disulphide cross – linking, solubility and molecular weight [J]. *Meat Sci*, 2010, 84(1): 39 – 45.
- [70] KOCH L, EMIN M A, SCHUCHMANN H P. Influence of processing conditions on the formation of whey protein – citrus pectin conjugates in extrusion [J]. *J Food Eng*, 2017, 193: 1 – 9.
- [71] MARSMAN G, GRUPPEN H, GROOT J D, et al. Effect of toasting and extrusion at different shear levels on soy protein interactions [J]. *J Agric Food Chem*, 1998, 46 (7): 2770 – 2777.
- [72] 张波. 双螺杆挤压机螺杆作用表征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [73] PUPPO C, CHAPLEAU N, SPERONI F, et al. Physicochemical modifications of high – pressure – treated soybean protein isolates [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(6): 1564 – 1571.
- [74] SPERONI F, BEAUMAL V, LAMBALLERIE M D, et al. Gelation of soybean proteins induced by sequential high – pressure and thermal treatments [J]. *Food Hydrocolloid*, 2009, 23(5): 1433 – 1442.
- [75] TANG C H, MA C Y. Effect of high pressure treatment on aggregation and structural properties of soy protein isolate [J]. *LWT – Food Sci Tech*, 2009, 42(2): 606 – 611.

(上接第 42 页)

- [48] ZHOU X, CHONG Y, DING Y, et al. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE – GC – MS, e – nose and sensory evaluation [J]. *Food Chem*, 2016, 207(15): 205 – 213.
- [49] LU Y, ZHU Y, YE T, et al. Physicochemical properties and microstructure of composite surimi gels: the effects of ultrasonic treatment and olive oil concentration [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 88: 106065 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106065>.
- [50] XU P, LIU L, LIU K, et al. Flavor formation analysis based on sensory profiles and lipidomics of unrinsed mixed sturgeon surimi gels [J/OL]. *Food Chem: X*, 2023, 17: 100534 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100534>.
- [51] 张丽涵. 亚麻籽油风味分析及其在肉制品中的应用 [D]. 辽宁 锦州: 渤海大学, 2021.
- [52] LI W, WEN L, XIONG S, et al. Investigation of the effect of chemical composition of surimi and gelling temperature on the odor characteristics of surimi products based on gas chromatography – mass spectrometry/olfactometry [J/OL]. *Food Chem*, 2023, 420: 135977 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135977>.
- [53] AN Y, WEN L, LI W, et al. Insight into the evolution of aroma compounds during thermal processing of surimi gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J/OL]. *Food Chem*, 2022, 374: 131762 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131762>.