

多物理场下食品组分的交互响应及真实场景加工控制方法

杨化宇^{1,2}, 刘东红³, 廖小军⁴, 范大明^{1,2*}

¹江南大学 食品科学与资源挖掘全国重点实验室 江苏无锡 214122

²江南大学食品学院 江苏无锡 214122

³浙江大学生物系统工程与食品科学学院 杭州 310058

⁴中国农业大学食品科学与营养工程学院 北京 100083

摘要 食品加工环节的低碳转型升级,是实现食品产业“双碳”目标战略的核心动能。本文聚焦真实场景加工过程,重点探究多物理场下食品组分的能量吸收及结构响应,解析复杂食品体系中多组分互作机制。通过构建的多物理场耦合模型,结合人工智能决策方法设计,阐明热、力、声、电磁和压力场等场分布的时/空间累积规律,提出食品加工过程强化建议与单元替代策略,为提高装备可靠性、加工精准性及工艺流程的智能化控制提供理论依据。

关键词 食品加工; 食品装备; 多物理场; 单元替代; 智能化

文章编号 1009-7848(2024)05-0126-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.05.009

随着全球化进程的加深及人口数量的增加,食品的安全性、品质与可持续发展成为全球社会广泛关注的核心议题。中国作为全球最大的食品生产及消费国,其食品产业的可持续发展策略在塑造全球食品安全格局方面扮演了至关重要的角色^[1]。为了深入贯彻“中国制造 2025”及国家“双碳”战略,我国食品加工行业正积极适应国家发展战略需要,通过科技创新,促进产业结构优化,加快绿色发展步伐^[2]。

食品加工过程通常涉及多种物理场,包括温度场、力场、声波场、电磁场、压力场等,这些多物理场相互作用直接影响食品质量和过程能效^[3]。深入分析和挖掘多物理场在食品加工中的影响机制,将极大促进高效、可持续食品加工技术的创新发展。当前,我国食品工业正处于高质量发展阶段,通过加强基础研究 with 真实场景加工控制方法的结合,对保障食品的安全性和营养品质,提升行业整体水平,支撑可持续发展战略具有重要意义。“真实场景”是指食品在生产过程中所面临的实际操作环境和条件,包括了温度、湿度、压力及物料

特性等多种影响加工过程的关键因素,以及这些因素之间的相互作用。掌握真实场景中的关键参数与动态变化,能够实现更精确的加工控制,进而保障食品加工过程中的品质控制和资源有效利用。与此同时,食品加工技术与装备领域的深入发展,也标志着我国食品工业将全面迈向数字化、智能化的新阶段。通过科学技术创新,不断提高产业自身“造血”功能,使我国食品加工技术与装备制造实力向国际领先水准迈进,实现优化资源配置,降低能耗,减少污染的行业发展目标。

基于上述背景,本文重点论述我国现阶段食品加工技术与装备领域的发展现状,亟待解决的关键核心问题以及未来发展趋势。深入剖析多物理场作用下食品组分的交互响应与真实场景下加工控制技术的创新应用。通过系统性梳理现有成果和发展不足,提出建设性的高层次研究方向和实用化的技术对策,旨在为实现食品加工业的智能化转型与绿色高效发展奠定理论基础。

1 我国食品加工技术与装备发展现状

在全球经济版图中,我国食品产业以其庞大的体量占据重要地位。据第 6 次全国食品领域技术竞争力评估问卷所示,我国食品工业在各类技术中处于“跟跑”“并跑”“领跑”状态的比例分别达到 58%,32%和 10%。目前我国食品工业正在经历由“跟跑”为主向多层次技术并存状态的转型过

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(32225040);“十四五”国家重点研发计划项目(2023YFD2100800)

第一作者: 杨化宇,男,博士生

通信作者: 范大明 E-mail: fandm@jiangnan.edu.cn

程^[4]。在这一变革进程中,食品加工技术与装备领域的发展也面临重要挑战,特别是需要摆脱对于进口高端装备的强烈依赖性。

在装备核心性能方面,我国食品加工设备仍存在劣势,主要体现在处理效率、物料适配性、可靠性、可维护性和使用寿命等多个关键指标上。虽然近年来中国食品装备制造取得了一定进展,但是与国际先进水平的差距依然显著。在全球食品加工装备行业中,德国、意大利等国家的企业以技术先进性、自动化程度高和设备可靠性闻名,而我国企业在技术创新和原材料质量控制等方面尚显不足。

以蛋品加工为例,常规的蛋品加工生产线主要包括以下几个部分:蛋液提取模块、巴氏杀菌模块、液态蛋罐装模块、蛋白脱糖模块、喷雾干燥模块、深度加工模块、CIP模块以及自动化控制模块等^[5]。现阶段,上述模块内的核心装备已基本实现国产化替代,然而,关键零部件,如泵、阀、传感器及控制系统等仍然严重依赖进口。国产零部件在制造精度和耐用性方面存在缺陷,导致其在使用过程中发生故障的频率较高。这增加了食品工厂停机和维护的成本,大幅削弱了国产化装备在成本控制方面的竞争力,使众多食品企业对于国产零部件及整机装备持回避态度,从而易于形成不良的产业生态循环。

为了解决当前国产食品加工装备在核心性能方面的不足,如处理效率低,物料适配范围窄,设备可靠性与可持续运维性差异,以及零部件的精度和耐用性等关键问题,我国食品装备制造业亟需强化自主创新意识,加大研发投入,吸收借鉴并融合国际先进技术,孵化独立知识产权的核心技术,推动食品加工技术与装备制造业向着自主化、高效率和高品质方向发展,并积极实现从“制造”向“智造”的战略升级^[6]。

2 我国食品加工技术与装备的发展趋势分析

2.1 低碳、高效

在当前全球气候变化和环境保护的背景下,低碳、高效、可持续的生产理念在食品加工行业变得日益重要。绿色加工技术的发展,特别是物理场

加工技术的应用,为实现这一目标提供了有效的技术支撑。物理场加工技术利用电磁、声波、压力等能量场对食品进行加工,相较于传统加工方法,它们能更精准地控制食品介质中能量流传递过程,从而降低非必要的能源消耗,并减轻过程中伴随的环境负担^[7]。虽然这些技术具有巨大潜力,但是它们的商业化和规模化应用仍然面临诸多挑战,包括高昂的装备研发与制造成本,与传统方法的效果对比验证,消费者接受度以及法规标准制定等多方面问题。

深入研究和优化物理场加工技术,推动相关政策和标准的制定,对于推进中国乃至全球食品加工行业的绿色发展具有重要意义。这需要加强科研机构、食品企业和政府部门之间的合作,共同推动新技术的转化和应用,并逐步解决上述挑战。同时,还需要鼓励企业加大研发投入,探索适应市场需求的物理场加工装备和解决方案,以提高新技术的商业竞争力。通过这些努力,可以实现食品加工行业技术的创新,促进行业的可持续发展,同时也能为相关技术在其它领域的应用提供借鉴和参考。

2.2 高速、高精度

在食品加工领域,高速、高精度的生产已成为促进产业现代化的关键动力。这种生产方式不仅能够显著提升生产效率与经济效益,还能够确保产品质量。高速、高精度加工主要表现为加工过程的快速、精准,基于高通量加工技术的底层逻辑控制,结合食品物化特性的柔性改造,实现匹配食品原料特性变化的新型加工模式。

为实现高速和高精度的食品加工过程,精确的参数捕捉与控制技术必不可少。例如精准的过程温度控制和原辅料配料比例控制等,这是技术实施的前提保障。同样地,自动化控制技术也需要针对加工过程进行优化升级,提升加工效率并降低人为操作误差。在此基础上,应具备与过程匹配的高精度传感检测技术,以实现食品质量的实时监测与反馈调节。此外,在进行食品加工前,需要使用过程模拟技术对当前工艺参数下的装置运行效率及加工效果进行预测与优化,以确保高通量加工条件下产品质量的可靠性与一致性。最后,先进的数据管理和追溯系统能够有效跟踪生产链的

各个环节,确保能够在加工过程中对潜在质量问题进行迅速响应。最重要的是,上述各技术的开发与优化需要在充分理解食品原料物化性质变化的基础上开展,从而提高加工过程的可控程度。高速、高精度加工技术的开发与应用将为食品加工过程带来显著益处,包括降低能耗与成本,提高生产效率,提升产品质量等。

2.3 数字化、智能化

在食品加工技术与装备领域,数字化与智能化是提升其综合水平的战略途径^[8]。随着先进信息技术的广泛应用,信息流与物料流的实时同步可以显著提升食品加工过程中的物料状态追踪与管理能力。食品加工过程的数字化涵盖了从原料检测、加工过程控制到成品检验的各个环节,通过建立数字化管理系统,可实现加工参数精确调控、实时生产数据收集与反馈等功能。在此基础上,可逐步实现由数字化数据管理向数字化决策分析过程

的转型升级,以辅助自适应、高柔性的食品加工流程设计。相较之下,智能化则主要体现在食品加工过程中的自主决策能力优化,以更好地应对复杂的食品原料性质与差异化的目标加工流程。数字化与智能化的实现将有效提高食品加工装备与食品生产线在处理不同种类食品时的自适应能力与资源配置效率。

为充分实现食品加工技术与装备的数字化和智能化,仍需要从多维度上共同努力。首先,食品企业要充分重视此类技术与装备的开发,持续关注技术创新并推动智慧工厂建设。此外,需要增进食品加工、装备制造、算法设计与软件开发等多领域专家、学者的协同创新,开发能够切实反馈并控制食品质量和品质的数字化系统与智能化装备,避免单一化、固定化的装备设计思路,推动数字化、智能化与食品加工过程深度融合(图1)。

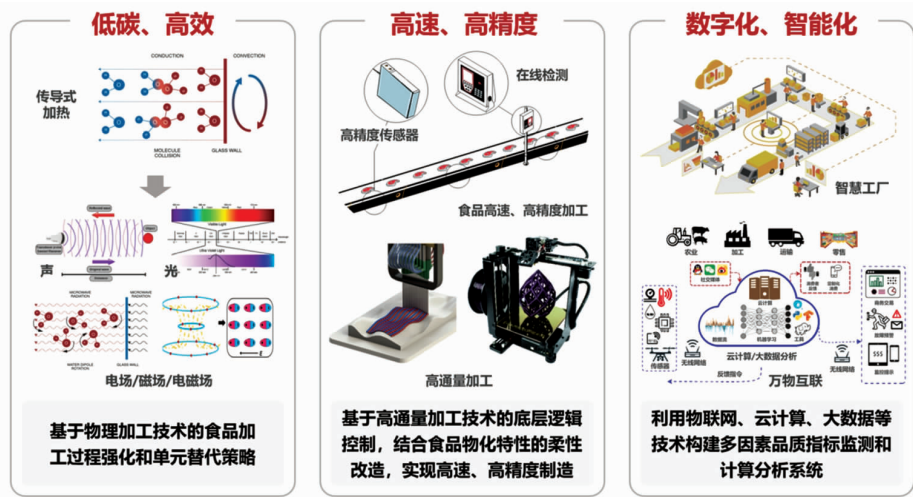


图1 食品加工技术与装备未来发展趋势

Fig.1 Future development trend of food processing technology and equipment

3 食品加工技术与装备领域关键核心问题

食品加工业作为现代工业体系的重要组成部分,正面临着日趋复杂的技术挑战,既要保证食品质量和安全性,又要满足生产效率和可持续发展需求。多物理场技术在食品加工领域的应用,开拓了食品结构设计和品质改良的新思路,同时也带来了一系列关键核心问题的挑战。在食品加工过程中,多物理场与食品原料的复杂相互作用,不仅

影响食品的质构和感官特性,还会因多场作用下的物理化学变化而导致其中关键组分的稳定性和功能特性的改变。然而,目前食品装备制造对此类相互作用的关注度不足,装备设计往往只注重达到加工效果的基本要求,忽视了原料性质变化带来的深层次影响。

以近年来快速发展的食品3D打印技术为例,食品材料的配比、流动和剪切特性等成为技术突

破的关键因素,为实现高品质打印,需要对食品物性进行精细控制以提升其可打印性与固化成型性⁹⁾。这种对食品加工微观层面的控制能力要求,推动了从食品科学到物理学、材料科学及机械工程等多学科交叉合作,共同探讨和解决这一领域所面临的科学难题。为了应对多变的加工环境,装备开发必须基于食品加工学理论基础,结合实际生产场景的复杂性,充分考虑食品加工过程中的多物理场变化、原料特性演变等“X”因素。此类深入研究不仅有助于挖掘食品品质改良的潜在机理,而且也是揭示并解决我国食品加工技术与装备领域发展瓶颈的关键途径。

目前,确立食品加工技术与装备领域未来发展目标,关键在于认清并攻克一系列基础和应用科学问题,这些问题涵盖食品材料性质、食品装备和加工过程控制等多个方面。其核心要求是,装备的设计和制造需要基于食品原料的物理化学性质,从微观到宏观层面精确控制加工过程,并最终实现食品所需的品质特性。要实现这些目标,食品加工技术与装备的发展需要重点思考并攻克以下几个关键核心问题:

- 1) 设备关键核心零部件的设计制造;
- 2) 食品重要装备的关键材料开发;
- 3) 食品复杂加工特征参数和物理模型的精准表征与预测;
- 4) 食品加工过程中食品物性的演变规律及物理场作用机制;
- 5) 多场耦合作用规律及其对食品品质的协同增效机制;
- 6) 食品复杂加工过程的智能化感知技术及自适应控制理论。

以上关键核心问题不仅涉及机械制造与材料科学领域,更重要的是,需要强调以食品科学为基础,多学科交叉下的“食品科学+X”发展模式。面对全球化市场对食品多样性、品质安全和绿色生产的挑战,相关科研机构和企业需要加强合作,集中资源攻关,并着力培养跨学科的研究人才。通过不断加强基础研究和装备创新,促进食品加工技术与装备领域的创新发展。

4 需重点关注的科学问题及研究策略

为适应食品工业发展需求,了解多物理场作用下食品组分的性质变化与交互响应,对加工工艺的优化改变和匹配装备的设计创新具有重要指导意义。精确控制物理场作用条件,优化过程参数,可以在保障食品质量的同时提升加工效率。基于食品组分特性与物理场作用规律,开发具有自适应调节能力的食品加工装备,将有助于实现过程响应与食品物性之间的动态优化匹配。

在小型到大型装备的开发过程中,充分考虑装备处理量、物料腔体尺寸等因素对加工效果产生的潜在影响至关重要。这要求在设计能量输入方式时,不能简单套用统一方案,而应以科学理论为基础,实施差异化设计策略,确保能量传递与食品材料之间的高效协同。通过物理场与食品组分的柔性结合,不仅能够提升食品加工的品质与效率,而且能实现过程控制方法的革新,确保在真实场景下实现高品质的食品加工过程。为实现这一发展目标,可以将反应性研究、过程仿真模拟与人工智能自适应3个研究方向作为切入点,开展深入研究工作(图2)。接下来,从以下4个方面深入讨论重点科学问题。

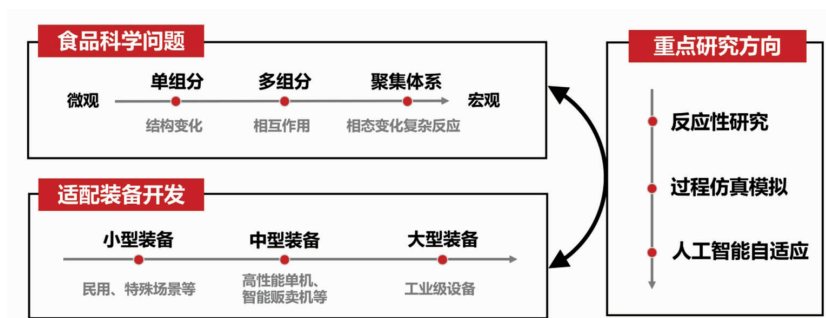


图2 食品加工技术与装备领域重点研究方向

Fig.2 The key research directions in the field of food processing technology and equipment

4.1 多场作用下食品组分的交互规律及机制

在食品的初级加工与深加工过程中,蛋白质、碳水化合物、脂肪以及维生素等核心营养成分通常会发生不同程度的变化。这些变化不仅可能削弱这些营养素的生物可及性,而且可能会对食品的感官品质和贮藏特性产生负面影响。以热处理为例,过度的热加工可能诱发蛋白质的空间结构发生不可逆改变,从而造成营养成分的损失。利用微波等快速加热技术,虽然能在一定程度上缩短加热时间以降低关键成分损失,但是微波效应的存在可能引起分子构象与食品特性的改变^[10]。食品体系内,蛋白质、多糖及多酚等分子之间的相互作用直接影响食品的功能特性和感官品质。因此,在推动物理场加工技术应用过程中,必须仔细考量多场作用下食品中关键组分之间的交互规律及机制,这对于工艺参数的设计以及食品安全的保障至关重要。

由于不同物理场加工技术的施用原理存在本质差异,因此食品组分在多场作用下的交互作用也呈现出不同的规律与机制。本文以声波场、电磁场和压力场为例,探讨其在干预食品关键组分结构及食品品质特性方面的潜力。

声波场交互的典型代表技术为超声加工技术,低于 100 kHz 的超声波通常用于食品加工,功率强度范围从 1~1 000 W/cm²^[11]。超声波可通过物料内部的气泡振荡及破裂过程引发“空化效应”,产生搅动、瞬时高温和高压,并伴有冲击和微射流等效应,从而有助于促进材料的物理和化学改性,进而影响食品成分的功能特性^[12]。超声加工过程中,通常存在“声-流”和“声-热”等物理场耦合作用^[13]。研究表明,超声波处理过程中会伴随蛋白质功能特性与分子结构的变化^[14]。例如,大豆蛋白分离物在经超声波预处理后,明显提高了其凝胶强度和持水力等基本功能性质^[15],而部分动物蛋白,如卵清蛋白经超声波处理后显示出起泡性和乳化性增强^[16]。此外,超声波处理还具有增强蛋白质水解程度及抗菌活性等潜力^[17]。相较于蛋白质,超声波对于多糖和多酚类物质结构的影响较小^[18]。凭借其在低能耗、少溶剂下展现出的较高提取效率,其在生物活性物质提取等应用中备受关注^[19]。

电磁场交互的典型代表技术为微波加工技

术,在食品加工领域被广泛使用的微波频率主要为 915 MHz 和 2 450 MHz,它们的差异主要体现在因波长变化而导致的穿透深度不同,从而适配于不同的真实加工场景^[20]。微波加工过程中通常伴随着“电磁-热”“电磁-热-流”等多物理场相互作用^[21],其对于食品原料的影响可划分为热效应与微波效应两种^[22]。微波场下的非热效应目前仍是一个前沿议题,在无法充分剥离热效应的试验条件下,难以充分确认非热效应的存在^[23]。近年来,随着微波场下实时检测技术的发展,基于荧光响应的微波场下热点捕捉技术被提出^[24],该技术在食品体系中的适用性目前仍有待进一步研究。微波的热效应对食品组分的影响通常可认为与传统加热方法无异,而微波效应则需针对特定的分子结构进行分析^[25]。基于微波加热原理,极性分子通常具有更强的介电响应,并在微波场下呈现活跃状态^[26]。微波效应通常发生在食品组分中的极性区域。然而,值得注意的是,由于常用微波加工强度的限制,微波的能级难以破坏分子结构,只能在一定程度上改变分子构象或改变不同分子区域间的碰撞概率,进而影响产物得率与食品品质^[27-28]。

压力场交互的典型代表技术为超高压加工技术。超高压加工主要遵循帕斯卡原理、勒夏特列原理和分子有序原理。其中,勒夏特列原理是指压力使系统平衡向体积减小的方向转变^[29]。任何伴随着体积减小的变化(相变、分子构型改变、化学反应)都会被压力所增强。超高压引起体系体积减小会改变物质原子间的距离,进而影响与距离相关的非共价键,包括疏水作用、静电作用、范德华力、氢键等^[30]。共价键原子间的距离极小,不能被进一步压缩,从而不受超高压作用的影响^[31]。分子有序原理是在恒定温度下增加压力,会抑制分子的旋转、振动和平动运动,从而提升物质分子的有序度。因此,超高压会抑制与分子构象变化相关的反应。超高压加工过程以压力场为主,伴随可能存在的温度场和流场变化^[32]。在食品加工过程中,通常将食品密封至柔性包装中,以水或其它液体作为传压介质,在常温或略高于常温(20~60℃)下进行 100~1 000 MPa 的加压与保持处理,从而达到杀菌、钝酶以及改性等目的^[33]。超高压加工技术与超

声波加工技术同属于非热加工技术,主要通过破坏微生物形态结构、细胞膜及重要蛋白质实现杀菌。现有研究表明,超高压可作用于非共价键,能够有效杀灭细菌营养体、霉菌酵母及孢子、病毒,而不能杀灭细菌芽孢,因此超高压技术通常与冷链运输结合^[34]。

由于多场作用原理差异,因此在不同物理场下,食品分子之间的相互作用及其与物理场间的交互规律均存在明显差异。此外,该过程还受到分子结构和周围介质环境变化的影响,需在真实加工场景下对食品分子响应规律进行深入研究。在规模化应用多物理场加工技术前,充分解析多场作用下食品组分的交互规律和机制的重要性不言而喻,这一过程对于多物理场工艺参数的优化,匹配加工装备的设计以及食品安全的保障均具有重要意义。

4.2 食品加工过程多场耦合模型构建与跨尺度的时空变化表征

现阶段,针对食品加工过程的综合探究已成为领域内的前沿研究主题之一。构建多场耦合模型及精准表征其跨尺度的时空变化,是探究食品加工精度控制和优化的核心问题。传统以经验为主的食品加工方式已经较难满足高效率、高品质及个性化的食品加工需求,由此推动了基于物理与数学原理的食品加工模型研究(图 3),为食品工业现代化指明了方向^[35]。

多场耦合模型的开发可为揭示“物理场-物质”及“物质-物质”间互作关系提供理论基础。通过温度、压力及物质传递的变化结果,辅助预测不同加工条件下的食品品质变化。跨尺度的时空变化表征,涵盖了从微观的分子动态到介观的流动混合,再到宏观的温度、水分含量等在时间及空间变量下的变化,在多个尺度上揭示食品组成结构与性能的演变^[36]。

常见的多场耦合包括“热-流-固”耦合、“电磁-热”耦合、“电磁-热-流”耦合等。通过商业化的数值仿真软件,如 COMSOL、ANSYS 等,可以实现多物理场之间的耦合计算^[37]。多场耦合模型的预测效能显著,其最大的优势在于以远低于传统试验方法的成本提供相应的过程洞察。模型化研究基于精确的物理定义,能够详尽描述食品材料内

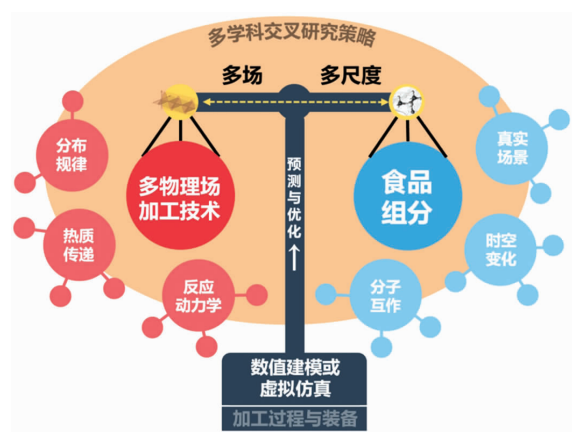


图 3 食品加工模型化研究发展方向

Fig.3 Development directions of food processing modeling research

部瞬态的能量与动量分布,从而突破目前试验手段限制,对速率、温度和其它关键变量的动态特性进行准确的时空尺度理解^[38]。此外,多场耦合模型还能实时预测与真实加工场景相匹配的情况,显著减少在工艺升级与装备设计阶段所需付出的试错成本^[39]。基于食品材料特性与加工需求,多场耦合技术不仅可应用于新型食品装备的设计与制造^[7],关键工艺参数的预测与优化过程^[40],还可以辅助理解物质在物理场下的形态变化和特殊效应,如微波场下水滴形态的动态演变过程研究和液滴界面张力的变化预测等^[41-42]。

在微尺度层面,分子动力学模拟技术能够有效预测食品关键成分在物理场作用下的微观结构演变,这一方法也成为在苛刻的环境条件影响下,分析原子及分子结构时间演化规律的有效工具^[43]。此技术已广泛应用于探究物理场作用下含极性分子溶液^[44]、离子液体^[45]以及食源性蛋白质^[46]、小分子糖类^[27]等的特殊效应。此外,通常使用非平衡的恒温-恒压系综来排除过程中热效应的潜在影响,以便更加准确分析物理场下存在的非热效应。然而,以微波场的相关研究为例,与模型对应试验条件的缺乏,阻碍了相关研究结论的可靠性验证。

目前,食品加工多场耦合模型及时空变化表征的精确建模仍面临诸多挑战。食品材料特性的复杂性及不同物理场间的耦合效应尚未完全解析,多尺度模型的集成亟需集成试验与预测数据。

随着相关技术的进步,多场耦合模型在食品加工技术与装备制造领域的应用前景广阔,有望推动这一领域向模块化与系统化的方向发展。

4.3 食品加工单元替代及过程强化策略

新兴物理场加工技术的出现,为传统食品加工方法的升级提供了新的契机,在弥补传统加工方法能耗高、精度不足与可持续性差等方面具有重要潜力。多物理场加工方法在缩短加工时间,提升食品营养和风味以及减少化学物质残留等方面具有突出表现,并且正逐渐渗透至食品加工的各个环节。

在食品原料贮藏保鲜阶段,可通过交变磁场改善食品贮藏质量,其应用潜力在多种水果及肉类食品中被验证^[47]。在食品的冻结与解冻过程中,物理场技术极具应用价值。一般而言,食品品质与冻结过程的3个主要因素有关,即晶核形成量、冰晶生长速率以及传热速率^[48]。物理场辅助冻结技术主要用于针对性改善以上3个环节,具体技术包括磁场辅助冻结^[49]、超声波辅助冻结^[50]以及高压辅助冻结^[51]等。虽然这些技术基于不同的物理原理,但是均呈现出良好的使用效果。在食品解冻过程中,主要涉及热量的快速、均匀供给,相较于传统的解冻方法,射频解冻技术凭借快速、均匀的特点受到众多食品企业的关注^[52]。在射频解冻单元设计过程中,需要充分考虑食品尺寸、介电特性变化等因素,以提高解冻均匀性,减少可能出现的边角过热效应^[53]。

对于食品热加工环节,物理场加工技术更是凭借其无需传热介质的优势而备受青睐。在此过程中,单元替代可主要分为物理场作用下的热加工技术升级和非热加工技术替代两个主要方式。物理场作用下的热加工技术升级主要针对传统热加工方法耗时长,能耗高,产品品质差等问题,使用物理场技术手段可以加快过程的转型升级,使加工环节向低碳、高效方向发展。例如可控太阳能干燥技术^[54]、连续流微波杀菌技术^[7]等。此类加工环节的升级替代不仅能够增加食品热加工过程中的能源利用效率,减少加工时间,还可以缓解或消除因传导加热而带来的一系列衍生问题。例如杀菌管路内的污垢沉积问题^[55]以及热介质传输过程中的能量耗散问题等^[56]。这对于减少食品中的营

养物流失以及提高能源利用的精准性具有重要作用。此外,针对具有特定品质需求的食品加工过程,以物理场加工技术为基础的组合作处理技术能够进一步提升过程效益。例如鱼糜产品加工过程中,为平衡加工效率与表面水分流失之间的平衡,可使用微波-蒸汽联用装备实现能量靶向供给的同时改善产品质地^[57]。

非热加工技术替代策略主要针对热敏感性强的食品原料,在进行熟化杀菌过程中为满足贮藏期下的微生物控制要求,不可避免地需要经历长时间的高温处理,从而导致食品营养成分损失。然而,以高压脉冲电场、超高压技术等为代表的新型非热加工方法,可以通过物理场干预手段使细菌细胞膜电位与通透性发生改变,从而降低热处理条件需求^[58]。装备层面,此类加工装备目前正经历向大容量、连续化方向发展阶段,需要重点改善装备处理量、腔体有效利用率等问题^[21]。

在过程强化方面,物理场技术不仅具备节能增效等宏观效应优势^[59],还能通过参与或促进食品组分间交互动应提升加工效果,特别是在食品提取技术方面表现突出。物理场加工技术在促进绿色溶剂或无溶剂提取技术发展的同时,还能够进一步提高提取效率与产物纯度。常见的技术包括超声波辅助^[60]、微波辅助^[61]以及高压脉冲电场辅助^[62]等。在此基础上,还可利用多个物理场技术,例如微波与超声波组合技术,进一步促进提取过程的效果与效率^[63]。此外,物理场技术在提升产品品质方面的潜力也极大促进了其推广应用的必要性。例如,使用微波技术替代传统蒸烤手段,能使发糕比容显著提升^[64];使用微波凝胶方法加工鱼糜等水产食品,可以显著提升凝胶强度与持水力等关键产品特性^[65]。

在食品加工单元替代和过程强化方面,新兴物理场加工技术展现出巨大的潜力。随着相关技术的日趋成熟,物理加工技术在提升食品加工效率与产品品质方面发挥越来越重要的作用,成为食品工业技术革新的重要推手。

4.4 食品复杂加工过程的人工智能决策方法设计

在数字经济和信息化浪潮的席卷下,人工智能(Artificial intelligence, AI)已渗透食品供应链的各个环节,并逐渐成为提升食品行业技术水平

与生产效率的核心驱动力。随着 AI 技术的全面推进,构建食品加工数据库并充分运用智能算法成为赋予食品加工智能化的必经之路。在此背景下,“食品计算”应运而生,即用计算的方法对食品数据进行分析 and 建模,以开展食品识别、检测及复杂加工过程决策等任务,最终解决食品科学与工程领域关键问题^[66]。面对原料多样化及加工条件复杂化的多重挑战,传统人工控制方式已难以胜任高效、高精度的实时方案决策。具备自适应与高柔性特征的智能化装备平台构建,将成为精确应对食品加工过程中特性变化的有效工具、食品计算的发展也将进一步促进食品的多尺度表征与跨尺度关联。

为应对复杂的食品加工过程,精准的原料状态识别必不可少,食品图像识别技术的发展将为这一领域的研究奠定基础。将食材作为食品基本单元,挖掘食材区域和建模食材的关联,是实现高性能食品图像识别技术的基本思想。通过构建多尺度特征融合框架,可以提高识别方法的有效性与准确性^[67]。此外,通过食品图像检索方案设计,基于面向泛性化的深度度量学习框架,实现相似食品图像语义的匹配,为不同加工状态食品的准确识别奠定基础^[68]。与此同时,卷积神经网络等机器学习算法的优化升级,也为食品中的个性化特征识别提供了有效帮助^[69]。

在对食品原料进行精准定位的基础上,需要借助 AI 技术进一步实现智能决策方法设计。相较于传统加工方法,多物理场加工技术存在多维度物理效应,在扩展食品加工范围的同时,也增加了过程设计与过程控制的复杂程度,需要针对物理场下特殊效应进行针对性精准测量技术开发^[24]。AI 技术的强大数据分析与智能决策能力可用于此类过程的深度开发,实现多物理场加工技术的精细化管理。对于食品加工过程来说,温度、功率和压力等因变量均会直接或间接导致食品状态的变化,通过对此类过程进行多重适应匹配算法研究,构建基于实时数据反馈的柔性加工策略模型,为工艺决策提供精准支持^[70]。

现阶段,针对食品复杂加工过程的人工智能决策方法仍处于发展萌芽阶段,因为这需要以获取大量真实加工场景下的食品状态数据为基础,

进行高性能模型的构建与训练。在此过程中,考虑到获取试验数据的数量与成本限制,可借助多物理场耦合仿真计算结果完善过程数据,实现基于数值解的算法模型开发^[71]。

AI 技术与多物理场复杂加工过程的充分融合,标志着集成化、智能化和高效化将成为食品加工未来的重要发展趋势。此外,食品科学、计算机科学以及机械制造等跨学科协作的日益增强,将为 AI 决策模型的加速设计与多物理场加工技术的协同创新创造有利条件。食品加工的未来也注定将走向数据驱动的智能化新时代,为全球食品工业的发展注入新的动力与活力。

5 展望

当前,我国食品加工技术与装备领域正处于迅猛发展阶段,面对这一蓬勃发展趋势,应坚持将“高效能、高精度、柔性化”作为发展的核心目标。在这一进程中,应广泛吸纳多个学科领域的研究成果与方法,聚焦于真实加工场景下的食品响应和交互特性,促进新型食品加工装备的创新发展。今后应系统推进以下重点研究:1) 在真实食品加工腔体环境下,深入研究食品单一组分的变化规律及多组分间的相互作用规律;2) 探究在多物理场及多尺度条件下的耦合协同增效规律与机理;3) 针对食品复杂加工过程,设计并研发人工智能控制方法。这一系列研究将为食品加工装备的可靠性提升与加工精确性强化提供坚实的理论基础,为装备效率提高与资源利用率优化提供科学支撑,同时也为装备精准度提高与智能化平台部署提供技术保障。基于此,我国食品加工技术与装备实力将在迈向国际先进水平的道路上稳步向前,进而促进我国食品工业的持续健康发展。

参 考 文 献

- [1] REN M, HUANG C, WU Y Z, et al. Enhanced food system efficiency is the key to China's 2060 carbon neutrality target[J]. *Nature Food*, 2023,4(7): 552-564.
- [2] 孙宝国, 王静. 中国食品产业现状与发展战略[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(8): 1-7.
SUN B G, WANG J. The status of food industry in

- China and development strategy[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(8): 1-7.
- [3] LI S Y, ZHANG R, LEI D, et al. Impact of ultrasound, microwaves and high-pressure processing on food components and their interactions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 1-15.
- [4] 王建华, 程力, 纪剑, 等. 食品工业高质量发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(5): 139-147. WANG J H, CHENG L, JI J, et al. High-quality development of China's food industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(5): 139-147.
- [5] VAIRAVEL K S, PRABHU V, POORNA DIVYA R. Experimental study on counting of eggs in egg breaking system and level maintenance in collecting tanks[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1084: 012111.
- [6] 刘东红, 周建伟, 吕瑞玲, 等. 食品智能制造技术研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(7): 1-6. LIU D H, ZHOU J W, LÜ R L, et al. Development and prospect of food intelligent manufacturing technology[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2020, 39(7): 1-6.
- [7] YANG H Y, ZHANG Y H, GAO W H, et al. Steam replacement strategy using microwave resonance: A future system for continuous-flow heating applications[J]. *Applied Energy*, 2021, 283: 116300.
- [8] MAHESHWARI P, KAMBLE S, BELHADI A, et al. Digital twin implementation for performance improvement in process industries - A case study of food processing company[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61: 8343-8365.
- [9] 闫博文, 赵子龙, 杨化宇, 等. 挤出型食品 3D 打印技术研究进展[J]. *未来食品科学*, 2021, 1(1): 1-8. YAN B W, ZHAO Z L, YANG H Y, et al. Research progress of extrusion-type 3D food printing[J]. *Future Food Science*, 2021, 1(1): 1-8.
- [10] TAO Y, YAN B W, FAN D M, et al. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 593-607.
- [11] FU X Z, BELWAL T, CRAVOTTO G, et al. Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 60: 104726.
- [12] KHADHRAOUI B, TURK M, FABIANO-TIXIER A S, et al. Histo-cytochemistry and scanning electron microscopy for studying spatial and temporal extraction of metabolites induced by ultrasound. Towards chain detexturation mechanism[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 482-492.
- [13] YU M, JIANG G S, JIANG Y, et al. Effect of acoustic waves on the flow and heat transfer around two tandem arranged cylinders[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 40: 102573.
- [14] ZHU Z B, ZHU W D, YI J H, et al. Effects of sonication on the physicochemical and functional properties of walnut protein isolate[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 853-861.
- [15] ZHENG T, LI X H, TAHA A, et al. Effect of high intensity ultrasound on the structure and physicochemical properties of soy protein isolates produced by different denaturation methods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 97: 105216.
- [16] XIONG W F, WANG Y T, ZHANG C L, et al. High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 302-309.
- [17] VIDAL A R, CANSIAN R L, MELLO R D O, et al. Effect of ultrasound on the functional and structural properties of hydrolysates of different bovine collagens[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 40: 346-353.
- [18] DOU Z M, CHEN C, FU X. The effect of ultrasound irradiation on the physicochemical properties and α -glucosidase inhibitory effect of blackberry fruit polysaccharide[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 568-576.
- [19] CHEMAT F, ABERT VIAN M, FABIANO-TIXIER A S, et al. A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products[J]. *Green Chemistry*, 2020, 22: 2325-2353.
- [20] TANG J. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(8): E1776-E1793.
- [21] YANG H Y, YAN B W, CHEN W, et al. Prediction and innovation of sustainable continuous flow microwave processing based on numerical simulations: A systematic review[J]. *Renewable and Sus-*

- tainable Energy Reviews, 2023, 175: 113183.
- [22] XIAO Q, HUANG K M, SHI H X. Microwave Hyperpolarization effect – An orthogonal incoherent microwave field heating study[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2024, 128(8): 1963–1974.
- [23] KAPPE C O, PIEBER B, DALLINGER D. Microwave effects in organic synthesis: Myth or reality?[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2013, 52(4): 1088–1094.
- [24] ZHAO Z, SHEN X, LI H, et al. Watching microwave-induced microscopic hot spots via the thermosensitive fluorescence of europium/terbium mixed-metal organic complexes[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2022, 61(6): e202114340.
- [25] JIAO X D, CHEN W, FAN D M. Behind the veil: A multidisciplinary discussion on protein – microwave interactions[J]. Current Opinion in Food Science, 2022, 48: 100936.
- [26] JIANG H, LIU Z G, WANG S J. Microwave processing: Effects and impacts on food components[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(14): 2476–2489.
- [27] TAO Y, YAN B W, ZHANG N N, et al. Do non-thermal effects exist in microwave heating of glucose aqueous solutions? Evidence from molecular dynamics simulations[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131677.
- [28] SHI H X, HUANG K M, LIU Y, et al. Multidirectional polarization impacts on microwave heating efficiency: A molecular dynamics research of microwave heating of common solvents[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2023, 127(4): 970–979.
- [29] FARKAS D F, HOOVER D G. High pressure processing[J]. Journal of Food Science, 2000, 65: 47–64.
- [30] MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, SALDAÑA M D A, TORRES J A, et al. Effect of pressure-assisted thermal sterilization on conjugated linoleic acid (CLA) content in CLA-enriched milk[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 291–297.
- [31] GHAFOOR K, GAVAHIAN M, MARSZALEK K, et al. Chapter 1 – An overview of the potential applications based on HPP mechanism[M]// BARBA F J, TONELLO-SAMSON C, PUÉRTOLAS E, et al, ed. Present and future of high pressure processing. Amsterdam; Elsevier, 2020: 3–11.
- [32] KNOERZER K. Chapter seven – Modeling high pressure thermal processing [M]// KNOERZER K, SEVENICH R, ed. High pressure thermal processing. Amsterdam: Academic Press, 2023: 183–204.
- [33] 李仁杰, 王永涛, 廖小军. 超高压对食品中微生物的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2523–2531.
- LI R J, WANG Y T, LIAO X J. Effects of high hydrostatic pressure on microorganisms in foods[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2014, 5(8): 2523–2531.
- [34] 姜志东, 张君怡, 马嘉欣, 等. 超高压杀菌效果及机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 145–154.
- JIANG Z D, ZHANG J Y, MA J X, et al. Research progress on the microbial inactivation effect and mechanism of high hydrostatic pressure[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(5): 145–154.
- [35] DATTA A, NICOLAÏ B, VITRAC O, et al. Computer-aided food engineering[J]. Nature Food, 2022, 3(11): 894–904.
- [36] LI J H, DENG Y, XU W D, et al. Multiscale modeling of food thermal processing for insight, comprehension, and utilization of heat and mass transfer: A state-of-the-art review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 131: 31–45.
- [37] TURGUT S S, ÖZÇELİK A, KÜÇÜKÖNER E, et al. Chapter twelve – Design and simulation of extraction systems in the food industry [M]// JAFARI S M, AKHAVAN-MAHDAVI S, ed. Extraction processes in the food industry. Cambridge: Woodhead Publishing, 2024: 347–396.
- [38] STURM G S J, VERWEIJ M D, GERVEN T V, et al. On the parametric sensitivity of heat generation by resonant microwave fields in process fluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(1): 375–388.
- [39] YANG H Y, YAN B W, MENG L L, et al. Mathematical modeling of continuous microwave heating of surimi paste [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 315: 110797.
- [40] KARATAS O, TOPCAM H, ALTIN O, et al. Computational study for microwave pasteurization of beer and hypothetical continuous flow system design [J].

- Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102878.
- [41] JYOTI A, HAESE R R. Validation of a multicomponent reactive-transport model at pore scale based on the coupling of COMSOL and PhreeqC [J]. Computers & Geosciences, 2021, 156: 104870.
- [42] CUI W, YESILOZ G, REN C L. Numerical analysis on droplet mixing induced by microwave heating: Decoupling of influencing physical properties [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 224: 115791.
- [43] HU Y, JIA G Z. Non-thermal effect of microwave in supercritical water: A molecular dynamics simulation study[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 564: 125275.
- [44] TASEI Y, MIJIDDORJ B, FUJITO T, et al. Thermal and nonthermal microwave effects of ethanol and hexane-mixed solution as revealed by *in situ* microwave irradiation nuclear magnetic resonance spectroscopy and molecular dynamics simulation[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2020, 124(43): 9615-9624.
- [45] LIU J C, JIA G Z. Non-thermal effects of microwave in sodium chloride aqueous solution: Insights from molecular dynamics simulations[J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 227: 31-36.
- [46] SAXENA R, VANGA S K, RAGHAVAN V. Effect of thermal and microwave processing on secondary structure of bovine β -lactoglobulin: A molecular modeling study [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(7): e12898.
- [47] LV L P, JIN Y M, YANG N, et al. Effect of alternating magnetic field on the quality of fresh-cut apples in cold storage [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(8): 5429-5438.
- [48] JIA G L, CHEN Y M, SUN A D, et al. Control of ice crystal nucleation and growth during the food freezing process[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(3): 2433-2454.
- [49] KAUR M, KUMAR M. An innovation in magnetic field assisted freezing of perishable fruits and vegetables: A review [J]. Food Reviews International, 2020, 36(8): 761-780.
- [50] YU H, MEI J, XIE J. New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106185.
- [51] CHENG L N, ZHU Z W, SUN D W. Impacts of high pressure assisted freezing on the denaturation of polyphenol oxidase[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127485.
- [52] LLAVE Y, ERDOGDU F. Radio frequency processing and recent advances on thawing and tempering of frozen food products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(3): 598-618.
- [53] YANG H Y, CHEN Q, CAO H W, et al. Radiofrequency thawing of frozen minced fish based on the dielectric response mechanism[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 52: 80-88.
- [54] EL-MESERY H S, EL-SEESY A I, HU Z C, et al. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112070.
- [55] GRAF B, KAPFER T, OSTERTAG F, et al. New experimental set-up for testing microwave technology to continuously heat fouling-sensitive food products like milk concentrates[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102453.
- [56] FREY B C, CHANDARANA D I, STEWART L E, et al. Unit process energy requirements for steam infusion UHT milk processing[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(6): 1956-1959.
- [57] CAO H W, FAN D M, JIAO X D, et al. Heating surimi products using microwave combined with steam methods: Study on energy saving and quality [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 231-240.
- [58] LI X, FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182: 33-45.
- [59] PEREIRA R N, VICENTE A A. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing[J]. Food Research International, 2010, 43(7): 1936-1943.
- [60] SHEN L P, PANG S X, ZHONG M M, et al. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106646.
- [61] BAGADE S B, PATIL M. Recent advances in mi-

- crowave assisted extraction of bioactive compounds from complex herbal samples: A review[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2021, 51(2): 138–149.
- [62] MARTÍNEZ J M, DELSO C, ÁLVAREZ I, et al. Pulsed electric field–assisted extraction of valuable compounds from microorganisms [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 530–552.
- [63] GONZÁLEZ–RIVERA J, SPEPI A, FERRARI C, et al. Novel configurations for a citrus waste based biorefinery: From solventless to simultaneous ultrasound and microwave assisted extraction[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(24): 6482–6492.
- [64] ZHOU J, YAN B W, WU Y J, et al. Effects of sourdough addition on the textural and physiochemical attributes of microwaved steamed–cake[J]. *LWT*, 2021, 146: 111396.
- [65] 范大明, 焦熙栋. 电磁场和电场改善鱼糜制品凝胶特性的机制及应用[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(1): 1–11.
FAN D M, JIAO X D. The mechanism of electromagnetic and electric fields to improve the gel properties of surimi products and their application[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(1): 1–11.
- [66] MIN W Q, JIANG S Q, LIU L H, et al. A survey on food computing [J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2019, 52(5): 1–36.
- [67] MIN W Q, WANG Z L, YANG J H, et al. Vision–based fruit recognition via multi–scale attention CNN[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 210: 107911.
- [68] SONG J J, LI Z, MIN W Q, et al. Towards food image retrieval via generalization–oriented sampling and loss function design[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*, 2023, 20(1): 1–19.
- [69] YU J H, ZHU J L, YAN B W, et al. Evaluation of fiber degree for fish muscle based on the edge feature attention net[J]. *Food Bioscience*, 2022, 47: 101658.
- [70] MENICHETTI G, RAVANDI B, MOZAFFARIAN D, et al. Machine learning prediction of the degree of food processing[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2312.
- [71] SEDEJ O, MBONIMPA E, SLEIGHT T, et al. Application of machine learning to predict the performance of an EMIPG reactor using data from numerical simulations[J]. *Energies*, 2022, 15(7): 2559.

Interactive Responses of Food Components under Multiphysics Fields and Control Strategies for Processing in Real Scenarios

Yang Huayu^{1,2}, Liu Donghong³, Liao Xiaojun⁴, Fan Daming^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

²School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

³School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058

⁴School of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083

Abstract The low–carbon transition and upgrade of food processing stages are pivotal to achieving the strategic ‘dual–carbon’ targets in the food industry. Focusing on real scenarios within the processing chain, it is critical to investigate the energy absorption and structural response of food components under the influence of multiple physical fields. This study involved in exploring the mechanisms of interaction between various components in complex food systems. By constructing multiphysics coupling models and integrating artificial intelligence–driven decision–making techniques, the spatiotemporal accumulation patterns of thermal, mechanical, acoustic, electromagnetic, and pressure fields could be elucidated. These approaches laid the foundation for suggestions to intensify processing methods and strategies for unit substitution, thereby providing a theoretical framework to enhance the reliability of equipment, precision in processing, and the intelligent control of technological workflows.

Keywords food processing; food equipment; multiphysics; unit substitution; intelligent