

多尺度方法在食品加工过程中的应用

韩敬增^{1,2}, 吕瑞玲^{1,2}, 陈健乐^{1,2}, 刘东红^{1,2}, 周建伟^{3*}

(¹ 浙江大学生物系统工程与食品科学学院 杭州 310058

² 浙江大学宁波科创中心 浙江宁波 315100

³ 浙大宁波理工学院 浙江宁波 315100)

摘要 食品是一种多组分、多相变、多尺度的复杂微结构复合物。食品加工处理会涉及多个尺度的物理、化学、生物性质等变化。对于这一复杂的过程,仅从传统的宏观尺度分析问题会忽略介观、微观尺度上变化所带来的具体影响,难以精确阐明其机理;而仅研究微观尺度上的食品特性也难以对食品介观、宏观特性变化进行预测。将多尺度结合的方法应用在食品加工过程,有利于更好地还原加工过程的微观特性变化阐明内在机理,揭示食品内部变化的本质原因。近年来随着新技术的兴起和方法的完善,对介观、微观尺度的研究越来越深入。学者们也更多地关注加工过程中的物性变化,利用多尺度结合方法探究食品加工过程的具体变化。有些研究还结合数值模拟的方法对各类食品加工后的特性进行预测和直观的展示。本文从食品不同加工领域的角度综述食品冻融、干燥、乳化等加工过程中,结合不同尺度解决问题的方法或所需技术。

关键词 多尺度; 食品加工; 冻融; 干燥; 数值模拟

文章编号 1009-7848(2025)03-0452-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.03.043

自 21 世纪以来,在市场化、产业化、国际化的要求下,我国食品工业取得了快速发展,相关行业主管部门也在致力于推动食品行业转型升级,促进行业智能化应用水平提高^[1]。随着科学技术的发展,越来越多的科研工作者关注横跨多学科的复合型问题,这些问题具有复杂的系统,涉及多类因素,这些因素相互制约,互相影响,给现代研究带来许多挑战。为了解决这些复合型问题,研究者开始采用多尺度的方法解决问题^[2-3]。

1 多尺度方法特点及食品领域中的应用

多尺度问题不是一个新事物,它是一个存在于客观世界的普遍现象,也是一种解决问题的方式。多尺度问题的特点是各尺度之间相对比较独立,不同的尺度之间侧重解决的问题不同。虽然从单一尺度出发,也能在一定程度上对事物的某些方面进行描述,但是对于复杂、拥有多尺度特征的现象,只从单一尺度出发去解决问题,则可能无法很好地还原事物的特征。多尺度问题表现为已知

模型的宏观描述,这种描述在某些局部区域失效,又或者必须用低尺度微观非线性描述所代替。模型的微观特性既受制于宏观上的作用因素的影响,反过来又是影响宏观性能的根本^[4]。微观结构的研究虽优点众多,但其性能与状态何时,以怎样的途径去影响宏观性能并不清楚,这些问题对材料与系统等的设计至关重要,同时也是这类课题研究的热点。简单来说,介观尺度、微观尺度乃至纳观尺度的研究能更准确地解释事物间变化的机理,然而,若结合宏观尺度具体分析,则可以缩小研究范围,降低研究难度并使结论更充分、具体。

对食品而言,作为一种拥有多组分、多相变、多尺度的复杂微结构复合物,其适合作为多尺度方法的研究对象。食品加工过程中的各种物理性变化,如传质、传热等物理过程在不同尺度上也会有不同的表现。通常在食品领域将尺度分为宏观尺度、微观尺度和介观尺度,特定问题也会涉及纳观尺度。颜色、口感、风味、柔嫩度以及其它力学参数等特性是常见的食品宏观特征,食品研究常围绕如何得到更好的食用性质而展开有关加工方式的优化研究。随着研究的深入以及新技术的不断更迭,食品中问题的解决已不满足于性能的优化。结合介观尺度和微观尺度的研究方法,可以更深入地评价食品的特性,阐明相关特性的变化机理。

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 宁波市公益性科技计划项目(2022S139);宁波市企业创新联合体项目(2022H006)

第一作者: 韩敬增,男,硕士

通信作者: 周建伟 E-mail: hizjw@163.com

如食品中的多孔介质涉及传热传质问题,水乳液体系涉及多相的分离及界面膜的表现特性问题,理化性能的改变涉及蛋白质大分子空间结构的问题。如果利用好多尺度分析手段,不仅可以更全面分析最佳的食物工艺手段,还原食品内部的变化过程,还可以阐明相关机理,解释食品内部变化的根本原因。

需要强调的是,国内外多尺度结合研究方法并非近年兴起,已有学者应用该方法对淀粉、薄膜、大分子复合物等进行多级尺度结构研究,而利用该方法对加工过程中食品内部变化的研究起步较晚,且应用较为单一。目前对食品加工过程中的多尺度问题研究较多。常见的宏观、微观、介观尺度所需要解决的问题及其对应的技术、仪器如表 1 所示。其中,介观尺度方面的研究因受技术、方法限制,起步较晚。随着各类显微技术的发展,现可对各种小尺度的对象进行观测研究。图 1 展示利用不同技术观测各种尺寸的肉类组织结构。

此外,目前较多的研究者采用数值模拟传热传质过程。其模拟结果详细、直观,模拟的加工过程中流体流动和各种热力学参数的分布信息可为试验设计、加工优化提供参考^[5]。数值模拟也有一

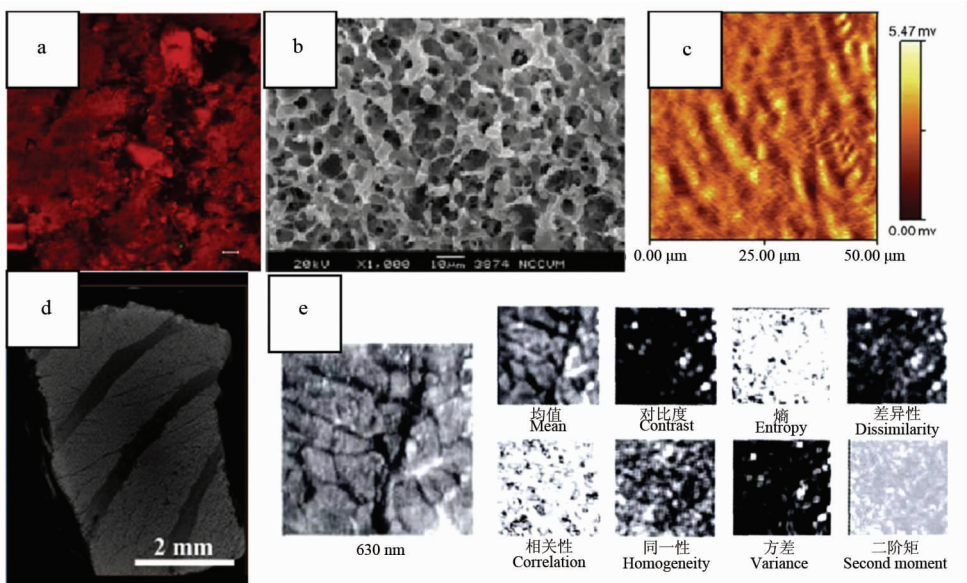
定的弊端,目前能实现在线监测的数据仅限于温度、压力、速度等简单易测的参数,对那些与食品品质直接相关的参数,则需经由人工操作。越来越多的学者结合不同方案方法建立并简化模型,以解决模型的整合问题。表 2 展示目前一些常用的模型理论。

本文旨在探讨传统研究领域利用其它尺度的研究综合解决某类问题的例子,以展示多尺度研究在该领域的优势,以及需要结合的新兴技术。

2 不同食品加工过程中的多尺度方法

2.1 冻融过程中的多尺度应用

食品的冻结、冷藏和解冻过程由于温度的不断变化,不断的冻融循环会改变食品的材料结构、造成水分迁移等影响,进而会对食品造成一定的损害、如汁液损失、体积变化、色泽转变、风味丧失、剪切应力变化等问题。食品工业涉及冻融方面的问题相对较多,常见的各类食品如蔬菜、水果、水产品、肉制品、豆腐等都会涉及到冻结、冷藏、解冻等问题。目前,食品冻融问题常见的研究方法还是基于对各类目标特性进行试验测定,以用来比较更好的加工方式,得到期望的食品特性;又或者



注:(a)利用 CLSM 技术观测的鸡肉瘦肉凝胶;(b)利用 SEM 技术观测鸡肉瘦肉凝胶^[6];(c)利用 AFM 技术观测的鲑鱼鱼皮凝胶^[7];(d)利用 CT 技术观测的鲑鱼肌肉组织^[8];(e)利用高光谱成像技术处理得到 630 nm 处牛肉组织图像及其纹理特征图像^[9]。

图 1 不同技术在介观尺度上观测肉类组织

Fig.1 Observation of meat tissue at mesoscopic scale by different techniques

表 1 食品领域中解决各尺度问题的常用及新兴技术

Table 1 Common and emerging technologies for solving problems at various scales in the food sector		
应用尺度	研究对象	涉及技术
宏观尺度	pH 值	pH 计
	温度	差示扫描量热法(DSC)
	水分活度	水分活度仪
	热物性参数	热特性分析仪
	介电特性	矢量网络分析仪
	色泽	色差仪
	质构特性	质构仪
	化合物成分	傅里叶变化红外光谱(FT-IR)
		酶标仪
		X 射线衍射
介观尺度		高效液相色谱(HPLC)
		拉曼光谱
		气相色谱-质谱联用(GC-MS)
	流体特性	流变仪
	液体分布	低场核磁共振技术(LF-NMR)
		多重光散射技术
	介质结构及孔隙	显微断层摄影技术(CT)
		高分辨率摄像技术
		激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)
		扫描电镜(SEM)
微观特性		高光谱成像技术
	热量分布	示踪剂染色-灰度分析
		红外热像仪
		温度传感探头
	冰晶、液滴粒度	粒度分析仪
	界面膜特性	铂金板法
		应力控制流变仪
		微量吸液管技术
	形态观测	原子力显微镜(AFM)
		布鲁斯特角显微镜(BAM)

依照各类先进技术对选定指标进行研究，以此来解释工艺的优化原理。如袁海洲等^[10]对超声处理辅助冻藏浸渍鱼肉的效果进行了研究：通过使用热电偶对鱼肉的几何中心进行测定，绘制了冻结曲线；通过测定 TBARS 值，来反映浸渍鱼肉的氧化程度；通过对汁液损失率和蒸煮损失率进行测定，对浸渍鱼肉的持水性进行了评价，最终确定超声辅助冻藏浸渍鱼肉可以增加鱼肉的冻结速度、减少汁液损失、并有效抑制氧化。侯佰慧^[11]分别用不同的解冻方式处理鸡汤，并根据依照国标及其他文献方法，对解冻后鸡汤的游离脂肪、还原糖、核苷酸等物质含量进行了测定；利用 pH 计、流变

仪、电导率仪、测色仪等仪器，对理化特性进行具体分析，进而对各解冻方式的优缺点进行充分的比较。

与冻融相关的加工过程本质上来讲是热力耦合作用下，以多孔介质为结构的食品内部环境发生的转变。仅从宏观尺度对加工过程进行分析，固然可以完成加工工艺条件的优化，一定程度上也可以依照现有的理论研究对其成因进行推测。但这些方法通常缺乏对于食品内部的具体变化过程的深入探究。近年来，食品领域逐渐开始从微观尺度对食品的内在变化进行把握。早在 20 世纪末，CT 技术就已广泛应用于岩石、骨骼和金属的测

表 2 目前食品领域中常见的数值模拟原理及应用场景

Table 2 Common numerical simulation principles and application scenarios in the food field

	控制方程	适用情形
传热	能量守恒: $\Delta U = Q - W$ U: 系统内部增能, J Q: 此过程中系统从环境所吸收的热量, J W: 在此过程中系统对环境所做的功, J 食品加热条件下的 Laplace 方程: $-\nabla[(\sigma + j2\pi\varepsilon_0\varepsilon')\nabla V] = 0$ σ: 物料的电导率, S/m j: $\sqrt{-1}$ ε_0: 真空介电常数, F/m V: 两极板间电压, V Fourier 定律: $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q_{\text{abs}}$ ρ: 物料密度, g/m³ C_p: 物料比热容, J/(K·g) k: 物料热导率, W/m·K $\frac{\partial T}{\partial t}$: 物料加热速率, W Q_{abs}: 单位体积物料转移的热能, J	涉及传热问题的基础是能量的转移, 通常将 可视作封闭体系中的能量看作守恒的, 故有 能量守恒定律 一般是解决电场与热场的耦合问题, 如射频 加热、微波加热、脉冲加热等问题, 将电磁能 转化为热能, 进而解决加热类问题 用于解决传热问题的基本理论, 其应用在食 品领域中非常常见, 如干燥、加热、杀菌、冷冻 等
传质	Darcy 定律: $Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L}$ Q: 多孔介质的水流流量, m³/s A: 多孔介质的总面积比例数 h: 测压水头, m L: 多孔介质长度, m 连续介质内的质量守恒: $\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho dV$ Ω: 体积, m³ m: 质量, g ρ: 密度, g/m³ Freundlich 吸附公式: $F = K_d C$ F: 等温线性吸附浓度, mol/m³ K_d: 分配系数 C: 溶液内溶解的溶质浓度, mol/m³ Fick 定律: $q_c = -D \frac{\Delta C}{\Delta x}$ Q_c: 扩散通量, mol/(m²·s) D: 扩散系数, m²/s Δx: 两点间距离差, m ΔC: 两点间浓度差, mol/m³	对于流体在多孔介质中的流动需考虑利用达 西定律解决问题, 其中涉及不同流体的类型 有不同情况, 食品中目前常用于液态及气态 水的迁移研究 对连续介质中在任意时刻恒存在体系内质量 不变, 通常流体转移问题也符合雷诺运输定 律, 可扩展为连续方程。该式同样是研究流体 迁移中不可或缺的方程, 常用于食品干燥、水 分渗透等场景 在固液交界面上, 溶质的质量随着时间的推 移而不断增大。在等温线性吸附时, 多孔介质 的吸附量与溶质浓度呈正相关。该公式常见 于研究药物的吸收释放、腌制过程中的溶质 转移 Fick 定律描绘了流体自由在基质中自由扩散 的过程, 也是目前常用于简化复杂渗透问题 的实用原理。将复杂的食品基质看作影响物 料扩散的阻力, 就可以把复杂的腌制、浸渍问 题转化为对扩散系数求解的简单问题

量,而随着 CT 技术在各领域的应用,一些简单的食品,如牛肉、水果、大分子物质的微观结构也可以得到观测。其它各类波谱技术,如 FT-IR、LF-NMR 等,在食品生产和快速检测行业中得到了广泛的应用,特别是在化学计量方法去除化学物质外来碎屑对样品光谱信息的影响后,各类光谱技术的发展和运用又来到了一个新的阶段。如今,许多研究者也开始将食品的冻融问题——无论是肉制品、水产品、农产品或其它加工产品,整合为多孔介质问题,利用各种新式技术手段加以分析。具体来讲,冻融食品在温度变化的过程中会发生传热现象并伴随传质现象,引起介观尺度上的变化,如冰晶生长、水分迁移、孔隙率及孔隙大小的改变^[12]。而为了改善深入研究这类问题,对食品系统的热量和流体传输具体分析,需要研究冷冻食品中冰晶的生长和分布。Ying 等^[13]利用 X 射线显微 CT 技术显示了马铃薯在冻融循环期间内部冰晶形成的孔隙。显微 CT 图像分析清楚地表明了冰晶的大小受温度波动幅度和持续时间的影响。温度波动和冻结时间导致的晶体尺寸增加是由冻结过程中的冰重结晶引起的,而固体壁和细胞结构破裂,影响水分或溶质扩散,这些因素的综合作用降低了冷冻食品的质量。闫宇^[14]联用三级红外光谱技术、曲线拟合技术、低场核磁共振技术,对冷冻鱼糜贮藏过程中的蛋白质变性过程进行分析,发现过程中 4 种蛋白质一级结构之间进行了互相转化,而自由水和结合水之间发生的水分迁移导致其与蛋白质分子以及蛋白质分子之间的结合方式发生改变,进而使蛋白质的二级结构发生了转化,深入揭示了冻融过程中蛋白质变性的部分机理,进而解释了鱼糜特性优化的缘由。

食品加热及解冻的数值模拟方面也受到了广泛的关注,可以利用建模方法去研究食品加工过程品质及特性的动态分析及深度探究。如 Shafiekhani 等^[15]利用有限体积法构建了苹果酱罐头的模型,讨论了热处理过程中苹果酱网格结构对温度场的影响。Ye 等^[16-17]学者建立了马铃薯模型,将电场及热场耦合,探究了加工过程中食品热场分布及电场分布情况。周建伟等^[18-23]则利用 comsol 软件对不同食品罐头的杀菌过程进行了模拟,揭示了其过程中的物性变化并进行了工艺优

化。除了上述所提到的内容,还有很多学者结合 DSC 技术、低场核磁共振技术、扫描电镜技术、原子力显微镜技术等方法进行探究,或利用结合具体的模型对食品内部传热及传质过程进行模拟^[24-27],从介观及微观尺度对食品内部的热量分布、水分分布、介电特性、物质含量、蛋白质变性情况进行了综合性的分析。

2.2 干燥过程中的多尺度应用

相比于未经加工的农产品的干燥问题,食品的干燥是一个更为复杂、精细的过程。而相比于宏观特征上的改变,干燥问题中介观尺度上的变化更有深入的研究意义。在对流干燥过程中,食品材料的物理、化学和营养特性会发生重大变化,这些变化发生在多个尺度上,并且由食品复杂的结构所影响^[28]。由于食品通常含有较多的水分,探究水分在干燥过程中的迁移和分布问题则是重点。除了低场核磁共振等用于水分分布测定及介电状态测定的试验方法,成本更低的建模方法则是多尺度食品干燥研究的一个发展趋势,已经应用在很多食品干燥的传热传质问题上。而在微观层面上,干燥方式不同所产生的不同的热效应与分子动力学的研究也更有利于阐释食品干燥过程中发生物性变化的机理。追溯食品多尺度干燥的发展历程,Stephen 等^[29]于 1977 年提出的理论构成了许多干燥模型的基础,但由于食品组成结构的复杂性,这些模型并不能很好地引入食品领域。为了克服这些问题,许多学者逐渐在模型中嵌入了各种经验关系以近似材料,来表征每个样品的物理和机械特性。数值模拟的发展给食品干燥带来了新的思路,并在随后开始应用于食品材料的脱水方面,迎来了蓬勃的发展。灵活的运用各个尺度之间的联合分析,能够帮助我们对食品干燥的最终特性进行预测^[30-31]。

2.2.1 热风干燥中的多尺度研究

热风干燥是通过对空气或其他介质的加热,将热量传递到物料中,除去物料中水的过程,具有简单、成本低、干燥品质好、使用范围广等特点^[32]。该过程涉及复杂的传热耦合和传质现象,故常采用试验研究和数值模拟来综合分析。试验部分常用于检测的参数有含水率、蒸发损失率、比热容、质量变化等,而数值模拟方面常用的模型有干燥动力学模型、多孔介

质连续模型、孔道网络模型等。干燥建模方法包括多物理场建模、多尺度建模、多相建模等。李艳等^[31]对将多尺度理论的基本思想引入稻谷颗粒物料干燥研究领域,综合运用热质传递原理、孔道网络方法等交叉学科的知识,建立出干燥过程的多尺度多层结构热质传递模型,其平均干基含水率的模拟值与试验值的最大相对误差为 7.6%,颗粒尺度下单颗粒稻谷干基含水率的模拟值与试验值的最大相对误差约为 6.8%,基本可以反映实际情况。而在进一步的分析中,作者还得出随着胚扩散系数的减小,干燥速度明显变慢的结果,进一步深化干燥过程中水分变化的机理。Zachary 等^[32]利用均匀化方法,对植物基食品进行了建模,得到了具有细胞扩散特性的单个微尺度区域的扩散率。对模型进行验证后,作者模拟 45,60,75 °C 的干燥情况,发现 75 °C 条件下,植物基食品的内部的内部材料结构会发生扩张。孙桐生等^[33]则以实验为主模拟为辅,从温度变化、色泽参数、含水率、能耗、复水率等指标上对变温、间歇及恒温干燥后的样品进行综合评估与对比。最终,作者比照各类参数,认为在提高香菇干后品质方面,变温干燥最佳,恒温干燥最差,间歇干燥介于两者之间。杨兴胜等^[34]则构建苹果片热风干燥宏观模型和微观模型,发现当湿度恒定时,温度和风速越大,苹果片干燥速率越快,并且风速的影响大于温度;在靠近苹果试样迎风端处,温度最高,且远远大于其余部位。该案例还对宏观模型和介观模型进行了比较,宏观模型在描述苹果片热风干燥整体失水情况方面具有优势,而微观模型反映的苹果组织内水分分布情况更加符合真实情况。

2.2.2 冷冻干燥中的多尺度研究 冻干或冷冻干燥的基本原理是把溶液在低温下冻结,真空条件下干燥形成固体,其中干燥过程又可分成 2 步:移走结晶水的初步干燥和移去结合水的二次干燥。作为一种温和的干燥技术,冷冻干燥一般用于预处理高价值产品,如药品或咖啡、水果和草药等高品质食品。其优点在于可以保留材料的大部分特性,如色泽、营养物质等。但另一方面,由于冷冻干燥实质上是物质和能量的传递过程,包括冷冻和干燥两个剧烈变化过程,可能导致冰晶和冷冻浓缩物界面上的部分蛋白质变性。为了探究冷冻干

燥过程中具体的物性变化,诸多学者进行了试验研究和数值模拟。Gruber 等^[36]利用计算机原位分析方法结合高分辨率射线照相术和断层摄影术,使用麦芽糊精($c=0.05w/w$ 、 $c=0.2w/w$ 和 $c=0.3w/w$)和蔗糖($c=0.2w/w$)溶液作为模型物质展开了研究,不但对不同干燥阶段的孔径进行了估算,还清晰的展现出了不同相、冷冻水、麦芽糊精和裂隙结构的面貌。孙希云等^[37]将冷冻干燥和其它干燥方式的联用应用在了银杏脆粒产品上,宏观上利用质构分析仪对质构特性、力学特性进行测定,比重法对颗粒密度进行测定,根据其他人方法对膨化率进行测定;微观尺度上,则利用 PAS 染色法和扫描电镜技术,对介观结构进行了观测和分析。最终,作者不但阐明了干燥过程中银杏微观结构、孔隙结构及力学特性的变化规律,明晰了银杏脆粒质地形成的内在原因,也评价了不同冷冻干燥联用方式加工银杏脆粒的优劣,得到了全面而综合的结论。

2.3 乳化过程中的多尺度应用

乳化是食品均质过程常分析的一个问题,涉及相与相之间的分离状态、水乳液粒度的表观特征变化、界面膜之间的特征变化和传质问题。界面膜在化工、制药、石油等领域得到了广泛的研究。通过研究面膜对乳液稳定性的响应来探讨乳液稳定性的机理是近几年的一个热点研究课题。近年来,随着新技术的发展和引进,乳液稳定性在不同尺度上的研究均取得了很大进展。这其中不但包含油水的混合分离、乳状液稳定性等方面,液液的交互也会涉及胶体与其他液体的问题。宏观尺度上可以就乳状液的分离特性,稳定性等问题进行分析检测,对于无色、透光率好的乳状液可以用传统的试瓶法进行分析,近年来新兴的红外脉冲法、LF-NMR 等方法可以对有颜色干扰或黏度大的流体进行检测。而分子尺度上,可以使用 CLSM 法、粒度分析仪、测定水分等方法解决液滴粒度、水分分散程度问题。微观尺度则体现在界面膜方面,对粒径、zeta 电位,表观特性等进行检测分析。随着科学技术的进步,对微观尺度界面膜的形态可进行测定,如 AFM 技术可以直接对界面膜外貌进行观测,对界面膜张力等可采用铂金板法、微量吸液管技术等方法进行测定^[38]。而除了乳状液以

外,食品凝胶和淀粉也具有相似的多尺度特性,且同样是近年来研究关注的重点,随着行业技术水平的发展,凝胶和淀粉多尺度结构的研究也愈发成熟。

2.3.1 乳状液稳定性的多尺度研究 食品的乳化问题仅从宏观层面入手的研究显然很难对水乳液这一复杂的体系进行探究,结合介观尺度对粒径的测定有助于解释乳液的吸附、凝聚、沉降性能。而界面膜的表现特征、流变性能、传质变化、形态结构等问题,则是稳定性内在影响的深入分析。只有对不同尺度尤其是微观尺度进行探究,才能更好的阐明加工条件与乳液性能的变化关系。Claire等^[39]认为结合不同的技术和规模对于揭示食品乳液中的界面微观结构至关重要,尤其是当使用高成分复杂性的成分。而走向多尺度分析和设计实现对乳液结构的高水平控制是可能的,如对复杂的显微结构可以通过例如显微镜技术或使用二维模型界面进行原位研究,使用微流体方法来研究乳液液滴的形成和短期聚结稳定性,韦越^[40]研究了阿拉伯木聚糖玉米纤维胶对乳状液稳定性的影响,宏观尺度上采用动态光散射测定 zeta 电位,激光共聚焦扫描显微镜(CLSM)观察乳状滴液;介观尺度上,用 FT-IR 法来表征纤维胶的结构;微观尺度上,利用张力计、流变仪对界面膜的表面张力和流变性能进行了评价。作者综合多尺度方法研究乳状液的乳化性质,最终发现乳液本体稳定性与液滴尺寸有很好的对应关系,从而可以通过液滴的大小间接地推测本体稳定性。刘忠博等^[41-42]为了系统比较其它分子与 MCT 分子形成的包合物的难易利用,引入分子对接方法,利用 Hyperchem8.0 软件构造了 MCT 分子,发现 α -CD 与 MCT 形成复合物的能力最强,较好解释了乳化试验中观察到的现象。

2.3.2 凝胶过程中的多尺度特性研究 凝胶具有独特的流变性能、凝胶强度、质构特性、微观结构;对于蛋白质凝胶,还会涉及复杂的蛋白质多级结构;淀粉则是由分子链结构、短程有序化结构、结晶结构、层状结构、颗粒结构等结构构成的高分子聚合物,这些复杂结构共同决定了淀粉的理化及功能特性。多尺度方法用于研究这样复杂的复合物具有优势,采用不同的现代分析手段,可以对凝

胶和淀粉的结构变化进行表征。Noguerol 等^[41]测定了含木虱的面食的 pH 值、含水量、水活性、吸湿性、容重和孔隙度、矿物质含量、总酚化合物和抗氧化能力含量等内容,发现该面条不但从结果中发现含有木虱的面食不但营养损失少且口感优异。而后作者又对面食内的凝胶的粒径分布、孔隙率、持水性、保水性和膨胀性、脂肪吸收能力和溶解性等内容展开研究,发现该面条材料的胶凝特性,黏附性较低,有利于形成更具黏性的结构,因而才减少了烹饪损失,并有助于避免对食品感官和结构特性可能产生的负面影响。Wang 等^[43]专注于研究凝胶食品的孔隙特性,并进一步拓展了其于食品抗菌性能的联系,并给出了改善抗菌包装设计的建议。许可^[44]采用 X 射线衍射、拉曼光谱分析、核磁共振技术、傅里叶变换红外光谱仪等技术对冻融淀粉的颗粒形貌、粒径分布、层状结构、结晶结构、分子螺旋结构、直链淀粉含量进行了测定,进而发现:表面变得粗糙是由于淀粉颗粒结构受到破坏形成的;加工破坏了双螺旋结构之间的分子内和分子间氢键;层状结构结晶区有序化程度降低等。

2.4 其它食品加工问题上的多尺度应用

2.4.1 包埋 在包埋问题上,通常需要介观尺度与微观尺度联用,甚至需要在纳观尺度上对分子、原子进行分析:纳米金银等材料对物质进行包埋,目前应用相对较多的是各类活性分子的包埋,如黄原胶、维生素、植物多酚等,分别采用紫外分光光度法、AFM 法、MIT 等方法对不同尺度问题如抗氧化性能、抗菌性能、稳定性、粒径、色价、复合物表现特性等问题进行分析。

2.4.2 烘烤 对于面包、肉制品、蛋糕等产品,烘烤是其必经的加工过程。比如面包是一种多孔的轻质物质,面团的成分和烘焙过程对面包的质量有很大的影响,烘焙过程中物理和化学成份的变化。最重要的变化包括预糊化淀粉、蛋白质降解、水分蒸发/冷凝、二氧化碳释放、面包屑和结皮的形成,以及伴随着孔隙形成的体积膨胀。AI Nasser M 等^[45]对面包烘焙过程的不同尺度结构进行了建模,很好地还原了面包的烘焙过程。

2.4.3 腌制 腌制是中国保藏肉类的传统方法,也是现代食品加工企业常用的加工技术。盐分通

过产物组织的表面膜和肌肉组织的细胞间毛细血管系统渗透到组织中,进行盐水比例的再分配。赵旭彤^[46]对腌制牛肉的微观结构进行了观察,并利用 Voronoi 模型设计了牛肉模型,对其中氯化钠的传质情况进行模拟,为模拟牛肉结构及研究 NaCl 的传质情况提供了思路。

3 展望

文章主要综述了多尺度方法的特征及优势,并根据从食品领域整体到具体加工过程具体阐述了多尺度方法应用于食品加工研究中的常用思路及优势。相较于单一尺度的研究,多尺度方法可以更准确的描述食品在加工过程中的变化,识别食品加工过程中不同影响因素之间的复杂相互关系,以及明确阐释相关变化的机理。目前,食品领域中对常规技术的应用处于起步阶段,各尺度间的研究还是多基于传统的研究技术和手段,对于各类新兴的仿真、模型构建方法的应用相对较少。未来,对于多尺度方法的应用可以更多借鉴其它领域的相似问题,并结合各类仿真方法构建相关问题的具体模型,如 Delaunay 三角网格剖分方法、格子 Boltzmann 法以构建复杂食品基质模型,深入探究食品加工的过程问题。另一方面,食品领域中目前对如何利用多尺度方法解决问题缺乏系统性的规范,研究者们多基于个人对研究问题的理解而展开各尺度间的研究。未来,可以对于本质相似的多尺度问题逐步进行归纳和规范,以构建更为完整的多尺度研究体系。

多尺度的分析方法对于食品这样复杂的问题具有独特的优势,不同尺度的联用可以帮助更好的分析食品的特征。而多尺度模型就其本质而言,有可能更准确地描述食品在加工过程中的变化。因此,研究和发展多尺度模型有助于识别食品加工过程中不同影响因素之间的复杂相互关系,以及明确阐释相关的物理过程以及生物化学和生物学变化。

其它领域也在发展多尺度的研究方法,具有相当的借鉴意义。如在岩土工程领域,利用 NMR 法测量含盐土壤的盐分、热脉冲法测量热物性参数、格子 Boltzmann 法建立物质模型,也许可以用于解决食品的传热传质问题;石油工程领域基于

Delaunay 三角网格剖分方法建立油水两相流动控制模型,这或许对食品领域的液态多相混合问题有所帮助;化工领域利用千分尺测量仪测量膜的厚度,可以给食品中微观尺度上的膜类问题提供思路^[47-49]。将类似的多尺度研究方法或技术加以运用在食品的相似问题上,能够为更好解决食品问题提供更多的研究思路和方法。

参 考 文 献

- [1] 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): 9.
WANG J H, CHENG L, JI J, et al. Research on high quality development strategy of food industry [J]. Engineering Science, 2021, 23(5): 9.
- [2] WALDROP M M, STEIN D. Complexity: The emerging science at the edge of order and Chaos[J]. Physics Today, 2008, 45(12): 83.
- [3] 柴立和. 多尺度科学的研究进展[J]. 化学进展, 2005, 17(2): 6.
CHAI L H. Research progress in multi-scale science [J]. Progress in Chemistry, 2005, 17(2): 6.
- [4] ORTIZ -RODRIGUEZ E, VAZQUEZ -ARENAS J, RICARDEZ -SANDOVAL A L. An undergraduate course in modeling and simulation of multiphysics systems[J]. Chemical Engineering Education, 2010, 44(4): 299-305.
- [5] 谢晶,施骏业,瞿晓华,等. 计算流体力学在食品传热传质过程中的应用[J]. 食品与机械, 2004, 20(5): 49-52.
XIE J, SHI J Y, QU X H, et al. Application of computational fluid dynamics in heat and mass transfer of food[J]. Food and Machinery, 2004, 20(5): 49-52.
- [6] LIU W, LANIER C T. Combined use of variable pressure scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy best reveal microstructure of comminuted meat gels[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1027-1033.
- [7] LIU S, WANG Y. A Review of the application of atomic force microscopy (AFM) in food science and technology[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2011, 62: 201-240.
- [8] YIYUAN Z, ENBO X, JUN Y, et al. Visualization,

- modeling and analysis of salmon muscle structure: Based on micro-CT[J]. Food Structure, 2023, 37: 100325.
- [9] 赵娟, 彭彦昆. 基于高光谱图像纹理特征的牛肉嫩度分布评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 279-286.
- ZHAO J, PENG Y K. Evaluation of beef tenderness distribution based on texture features of hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 279-286.
- [10] 袁海洲, 柯志刚, 徐霞, 等. 空间效应对超声辅助浸渍冻结鱼肉冻藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 24-33.
- YUAN H Z, KE Z G, XU X, et al. Effect of spatial effect on the quality of frozen fish jelly by ultrasonic-assisted impregnation[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(16): 24-33.
- [11] 侯佰慧. 解冻方式对冻结鸡汤品质特性和风味的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- HOU B H. Effect of thawing method on quality characteristics and flavor of frozen chicken soup[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [12] 岳占凯, 万金庆, 历建国. 数值模拟在食品冻融过程中的应用进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(12): 9.
- YUE Z K, WAN J Q, LI J G. Application of Numerical Simulation in food freeze-thaw process[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(12): 9.
- [13] ZHAO Y, TAKHAR S P. Micro X-ray computed tomography and image analysis of frozen potatoes subjected to freeze-thaw cycles[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 79: 278-286.
- [14] 闫宇. 基于多尺度波谱技术的冷冻鱼糜蛋白变性机理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- YAN Y. Mechanism of protein degeneration of frozen surimi based on multi-scale spectroscopy[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [15] SHAFIEKHANI S, ZAMINDAR N, HOJATOLESLAMI M, et al. Numerical simulation of transient temperature profiles for canned apple puree in semi-rigid aluminum based packaging during pasteurization[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2770-2778.
- [16] YE J, XIA Y, YI Q, et al. Multiphysics modeling of microwave heating of solid samples in rotary lifting motion in a rectangular multi-mode cavity[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 73: 102767.
- [17] PU G, SONG G, SONG C F, et al. Analysis of thermal effect using Coupled Hot-air and Microwave heating at different position of potato[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 41: 244-250.
- [18] 王亮, 周建伟, 邵澜媛, 等. 高径比与倾斜角对液态圆柱罐头食品热杀菌过程的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(1): 35-39.
- WANG L, ZHOU J W, SHAO L Y, et al. Effect of height-diameter ratio and tilt Angle on Hot sterilization process of liquid cylindrical canned Food[J]. Food and Fermentation Industry, 2014, 40(1): 35-39.
- [19] 王亮, 于艳艳, 马晓彬, 等. 罐装啤酒与瓶装啤酒的巴氏杀菌过程数值模拟[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(4): 42-46.
- WANG L, YU Y Y, MA X B, et al. Numerical simulation of pasteurization process of canned and bottled beer[J]. Food and Fermentation Industry, 2014, 40(4): 42-46.
- [20] 周建伟, 王亮, 卢山, 等. 罐头食品热杀菌工艺仿真平台设计与开发[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(7): 39-41.
- ZHOU J W, WANG L, LU S, et al. Design and development of simulation platform for hot sterilization process of canned food[J]. Chinese Food and Nutrition, 2014, 20(7): 39-41.
- [21] 周建伟, 袁剑, 王亮, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 模型的瓶装液态食品巴氏灭菌过程的数值模拟研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(9): 158-164.
- ZHOU J W, YUAN J, WANG L, et al. Numerical simulation of pasteurization process of bottled liquid food based on COMSOL multiphysics model[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(9): 158-164.
- [22] 王亮, 周建伟, 邵澜媛, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 的金枪鱼罐头热杀菌过程数值模拟[J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 82-88.
- WANG L, ZHOU J W, SHAO L Y, et al. Numerical simulation of hot sterilization process of canned tuna based on COMSOL multiphysics[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(3): 82-88.
- [23] 王亮, 周建伟, 何明枫, 等. 轴向旋转对液态罐头

- 食品热杀菌过程的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(8): 155-162.
- WANG L, ZHOU J W, HE M F, et al. Effect of axial rotation on hot sterilization of liquid canned food[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(8): 155-162.
- [24] 潘晓炆. 抗冻剂对南极磷虾虾肉糜微波解冻特性的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- PAN X Y. Effect of antifreeze on microwave thawing characteristics of Antarctic Krill mince[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [25] ZHENG Y, ZHANG C, TIAN Y, et al. Effects of freeze-thaw pretreatment on the structural properties and digestibility of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes [J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129231.
- [26] 胡荣泽, 王芊芊, 董晓菲, 等. 冷冻工艺对冻豆腐孔隙率影响的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 7.
- HU R Z, WANG Q Q, DONG X F, et al. Study on the effect of freezing technology on the porosity of frozen tofu[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Science Edition), 2021, 37(3): 7.
- [27] SHAN C, SUSAN C. Analysing errors in single-molecule localisation microscopy[J]. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology, 2021, 134: 105931.
- [28] 宿佃斌, 吕为乔, 刘媛媛, 等. 农产品微波协同多尺度干燥技术研究进展[J]. 制冷与空调, 2019, 19(7): 5.
- SU D B, LÜ W Q, LIU Y Y, et al. Research progress of microwave coordinated multi-scale drying technology for agricultural products[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2019, 19(7): 5.
- [29] WHITAKER S. Coupled transport in multiphase systems: A theory of drying [J]. Advances in Heat Transfer, 1998, 31(8): 1-104.
- [30] 刘格含, 王鹏, 吴小华, 等. 农产品热风干燥传热传质数值模拟研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 10.
- LIU G H, WANG P, WU X H, et al. Research progress on numerical simulation of heat and mass transfer in hot air drying of agricultural products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 10.
- [31] 李艳, 徐英英, 袁月定, 等. 仓内稻谷干燥的多尺度多层结构热质传递模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 8.
- LI Y, XU Y Y, YUAN Y D, et al. Simulation and experiment of heat and mass transfer in multi-scale multi-layer structure of rice drying in warehouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 8.
- [32] WELSH Z G, KHAN M, KARIM M A. Multiscale modeling for food drying: A homogenized diffusion approach[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 292(11): 110252.
- [33] 孙铜生, 王金志, 吴慧栋, 等. 香菇热风干燥品质特性分析与工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 117-124.
- SUN T S, WANG J Z, WU H D, et al. Characteristics analysis and process optimization of hot air drying of mushroom[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(6): 117-124.
- [34] 杨兴胜. 苹果片干燥微观模型研究与干燥特性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- YANG X S. Research on micro-drying model and drying characteristics of apple slices[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [35] 李向红, 刘展, 李伟, 等. 干燥方法对大豆分离蛋白热诱导聚集体的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 258-261.
- LI X H, LIU Z, LI W, et al. Effects of drying methods on heat-induced aggregates of soybean protein isolates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 258-261.
- [36] GRUBER S, VORHAUER-HUGET N, FOERST P. In situ micro-computed tomography to study microstructure and sublimation front during freeze-drying[J]. Food Structure, 2021, 29: 100213.
- [37] 孙希云, 刘春菊, 任晗慈, 等. 冷冻干燥联合膨化干燥工艺优化提高银杏脆粒酥脆质地[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1565-1574.
- SUN X Y, LIU C J, REN H C, et al. Optimization of freeze-drying combined with bulking drying process to improve crisp texture of Ginkgo biloba [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(6): 1565-1574.
- [38] 黄翔峰, 王旭慧, 陆丽君, 等. 多尺度研究油水乳状液稳定性的技术进展[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 26-33.

- HUANG X F, WANG X H, LU L J, et al. Technical progress of multi-scale study on the stability of oil-water emulsions[J]. Chemical Industry Progress, 2016, 35(1): 26-33.
- [39] BERTON-CARABIN C, SCHRON K. Towards new food emulsions: Designing the interface and beyond [J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 27: 74-81.
- [40] 韦越. 阿拉伯木聚糖玉米纤维胶的改性及乳液稳定性和界面流变学研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- WEI Y. Study on modification, emulsion stability and interfacial rheology of Arabic xylan corn fiber gum[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [41] NOGUEROL A T, IGUAL M M, PAGAN M J. Developing psyllium fibre gel-based foods: Physico-chemical, nutritional, optical and mechanical properties[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107108.
- [42] 刘忠博. 基于环糊精的食品级 Pickering 乳液构建[D]. 新乡: 河南科技学院, 2021.
- LIU Z B. Construction of food-grade Pickering emulsion based on cyclodextrin[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2021.
- [43] WANG L, FOGLIANO V, HEISING J, et al. The effect of pore size on the diffusion of volatile antimicrobials is a key factor to preserve gelled foods [J]. Food Chemistry, 2021, 351(20): 129316.
- [44] 许可. 面团冻藏过程中淀粉组分特性变化机制及其对馒头品质的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2021.
- XU K. Mechanism of starch component characteristic change and its effect on the quality of steamed bread during dough freezing storage[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021.
- [45] AN A, IF B, FM A. Numerical simulation of bread baking in a convection oven [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 184: 116252.
- [46] 赵旭彤. 牛肉腌制中氯化钠扩散过程及其模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- ZHAO X T. Study on diffusion process of sodium chloride in beef curing and its simulation [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [47] 宋文宇. 冻土冻融过程水热迁移特性的数值模拟及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- SONG W Y. Numerical simulation and experimental study on hydrothermal transport characteristics of frozen soil during freeze-thaw process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [48] KIZILTAŞ S, ERDOĞDU F, PALAZOĞLU K T. Simulation of heat transfer for solid-liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 97(4): 449-456.
- [49] 刘黎萍, 邢成炜, 王明. 基于原子力显微技术的混合物中沥青微尺度性能测试方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 7.
- LIU L P, XING C W, WANG M. Test method of asphalt microscale properties in mixtures based on atomic force microscopy[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 7.

The Application of Multiscale Methods in Food Processing

HAN Jingzeng^{1,2}, LÜ Ruiling^{1,2}, CHEN Jianle^{1,2}, LIU Donghong^{1,2}, ZHOU Jianwei^{3*}

⁽¹⁾College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058

²Ningbo Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang

³NingboTech University, Ningbo 315100, Zhejiang)

Abstract Food is a multi-component, multi-phase change, multi-scale complex of microstructures, so the processing of food will also involve multiple scales of physical, chemical, biological properties and other changes. For this complex process, only the traditional macro-scale analysis problem will ignore the specific impact of mesoscale and micro-scale changes, and it is difficult to accurately explain the mechanism. However, it is difficult to predict the changes of mesoscopic and macroscopical characteristics of food only by studying the microscopical characteristics of food. The application of the multi-scale method in food processing is conducive to better restoring the changes in the microscopic characteris-

tics of the processing process, clarifying the internal mechanism, and revealing the essential causes of the internal changes in food. In recent years, with the rise of new technologies and the improvement of methods, the research on mesoscopic and microscopic scales has become more and more in-depth. Scholars have also begun to pay more attention to the changes in physical properties during processing, and explore the specific changes in food processing with the combination of multi-scale ideas. Some studies also combine numerical simulation methods, which can predict and intuitively display the characteristics of various kinds of food after processing. From the perspective of different food processing fields, this paper introduces the methods and technologies to solve the problems in different scales in food processing, such as freeze-thaw, drying and emulsification.

Keywords multi-scale; food processing; freezing and thawing; dry; numerical simulation