

纳米材料在食品生产和保鲜中的应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.04.012

陶琦^{1,2} 钟飞^{1,2}
王志文^{1,2} 郑豪^{1,2,3}

1. 湖北工业大学
机械工程学院
湖北 武汉 430068
2. 襄阳湖北工业大学产业
研究院
湖北 襄阳 441199
3. 湖北工业大学
现代制造质量工程省重点
实验室
湖北 武汉 430068

摘要: 为了保证日常食品新鲜,针对食品加工、包装和运输过程中的杀菌、防腐、冷藏工序进行优化变得尤为重要。纳米材料因具有良好的热学、磁学、力学性能被广泛应用到食品生产领域,可以缩短食品杀菌时间,保持食品的感官和营养特性。本文围绕纳米材料在食品工业领域的应用进行了概述,分别从纳米流体应用于液态食品杀菌、细菌纳米纤维素薄膜应用于食品包装、纳米相变蓄冷材料应用于冷链物流3个方面展开,介绍了纳米流体、细菌纳米纤维素薄膜和纳米相变蓄冷材料的制备方法,分析了纳米材料应用过程中存在的技术难点,并总结了纳米材料在食品工业领域的应用前景。

关键词: 纳米流体;细菌纳米纤维素;纳米相变蓄冷材料;食品生产;食品保鲜

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2024)04-0089-12

引文格式: 陶琦,钟飞,王志文,等.纳米材料在食品生产和保鲜中的应用[J].包装学报,2024,16(4):89-100.

1 研究背景

随着食品工业的快速发展和居民生活水平的提高,消费者对于食品质量的要求更加严格^[1]。特别是对于牛奶、果蔬、果汁等富含蛋白质或维生素的食品,其在加工、包装、运输过程中,受到不同环境因素的影响容易发生变质。从宏观上,食品变质表现为颜色、气味、触感、质感的变化;从微观上,食品变质表现为营养成分的分解和代谢副产物的形成^[2]。食品变质和腐败将严重影响居民的身体健康甚至生命安全^[3]。因此,加强食品安全监管、提高食品质量对保障我国城乡居民的身体健康具有重要意义。

根据我国制定的食品分类标准,食品分为16大

类^[4],其中乳制品、肉制品、蛋制品、水果蔬菜、海鲜产品等食品必须重点关注加工、包装、运输过程中食品变质和发霉等问题。比如,牛奶、果汁等液态食品在加工过程中需要进行杀菌处理^[5];年糕、冰淇淋、冰糖葫芦等固态食品在包装过程中需要保证食品质量,以及包装材料无毒无害、成本低廉^[6];而乳制品、肉制品、冷冻饮品等类型冷冻或冷藏食品在运输过程中需要维持恒定的低温环境^[7]。针对上述食品保鲜技术难点,迫切需要采用新技术和新方法来消除食品质量安全的不利因素,从而保证食品的新鲜度。

目前,常用的传统食品保鲜技术(见图1)包括食品低温保鲜技术、食品气调保鲜技术、食品生物保鲜技术^[8-14]。而最新的食品保鲜技术(见图2)包

收稿日期:2024-01-23

基金项目:湖北省重点研发基金资助项目(2023BAB088);现代制造质量工程湖北省重点实验室开放基金资助项目(KFJJ-2023011);湖北工业大学博士科研启动基金资助项目(XJ2022001001)

作者简介:陶琦(1990-),男,湖北孝感人,湖北工业大学讲师,博士,主要研究方向为机械设计与优化,

E-mail: taoqi@hbut.edu.cn

括纳米保鲜技术、食品辐照保鲜技术、超高压杀菌保鲜技术、减压保鲜技术、脉冲磁场杀菌保鲜技术、臭氧保鲜技术等^[15-20]。

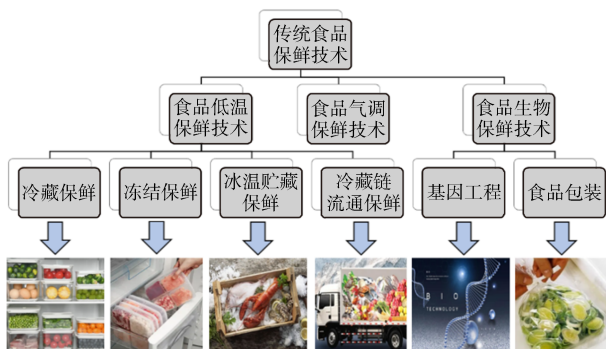


Fig. 1 Traditional food preservation technologies

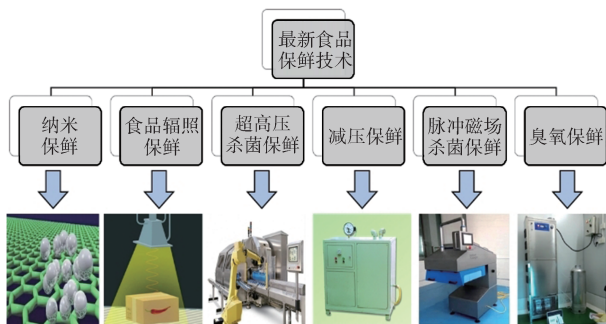


Fig. 2 Latest food preservation technologies

纳米保鲜技术是目前最新的食品保鲜技术之一，它是指利用纳米材料独特微观结构和表面特性，进行分子和原子的重新编程，从而加快营养成分的运输并延长食品保质期^[21]。纳米材料包括纳米微粒、纳米固体和纳米组合体 3 种类型。纳米材料常见的制备方法包括蒸发凝聚法、沉淀法、喷雾法、水热法和气相反应法等^[22]。

近年来，越来越多的学者发现纳米技术及材料在食品生产领域的应用价值，主要的研究方向包括 3 个方面，分别是纳米流体液态应用于食品杀菌、细菌纳米纤维素薄膜应用于食品包装、纳米相变蓄冷材料应用于冷链物流。本文将围绕以上 3 个方面，对纳米材料在食品生产领域的研究进展和应用前景进行详细概述。

2 纳米流体应用于液态食品杀菌

2.1 纳米流体

纳米流体是指将纳米级颗粒与基础液混合形

成一种具有强化传热特性的固-液混合介质。其中，纳米颗粒种类包括金属、金属氧化物、非金属氧化物、非金属碳化物等，如铜（Cu）、氧化铜（CuO）、氧化锌（ZnO）、氧化铝（Al₂O₃）、氧化钛（TiO₂）、碳化硅（SiC）、单壁碳纳米管（single-walled carbon nanotube, SWCNT）、多壁碳纳米管（multi-walled carbon nanotube, MWCNT）等；基础液种类包括水、油、乙二醇、丙二醇等^[23]。

纳米流体可以应用于汽车、太阳能、核能、石油开采、食品生产等领域。对于液态食品生产过程，纳米流体因具备传热效率高、杀菌时间短等优点，可以对液态食品（牛奶、西瓜汁、番茄汁等）进行有效杀菌处理，减少营养成分的损失（见图 3）。

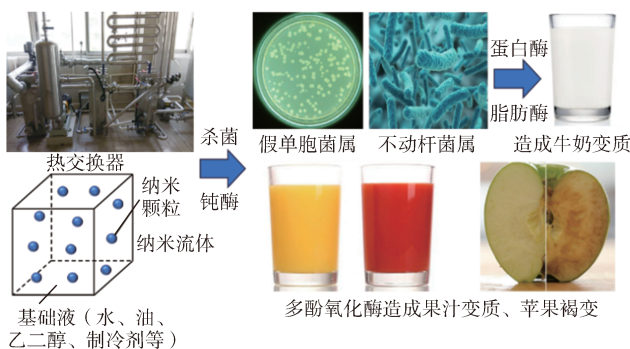


Fig. 3 Nanofluid liquid food sterilization

2.2 纳米流体的制备方法及杀菌过程

纳米流体的制备方法包括“一步法”和“两步法”。“一步法”是指纳米颗粒制备和纳米流体制备同时进行；“两步法”是指先制备纳米颗粒，再制备纳米流体。制备纳米流体的主要设备包括电子天平、磁力搅拌器和超声波振动仪。纳米流体的制备方法及杀菌过程，如图 4^[24-25] 所示。

牛奶、果汁等液态食品中的微生物或多酚氧化酶容易造成牛奶变质及果汁褐变，亟需采用杀菌钝酶的方法进行处理。采用纳米流体替代水作为介质的方法已经成为当前研究的热点。以 TiO₂ 纳米流体为例，图 4 的牛奶杀菌装置包括了热流体和冷流体两个流动回路。在冷流体回路中，牛奶从储存库中被泵送到平板换热器，在冷热流之间建立逆流热交换，牛奶被加热后再返回到牛奶储存库中^[24]。

S. S. Jabbari 等^[26] 选取了 3 种不同浓度的 Al₂O₃ 纳米流体，对比了不同温度 and 不同时间条件下，利用换热器对番茄汁进行热处理的效果。结果表明，质量分数为 4% 的 Al₂O₃ 纳米流体在 30 ℃ 下对番茄进

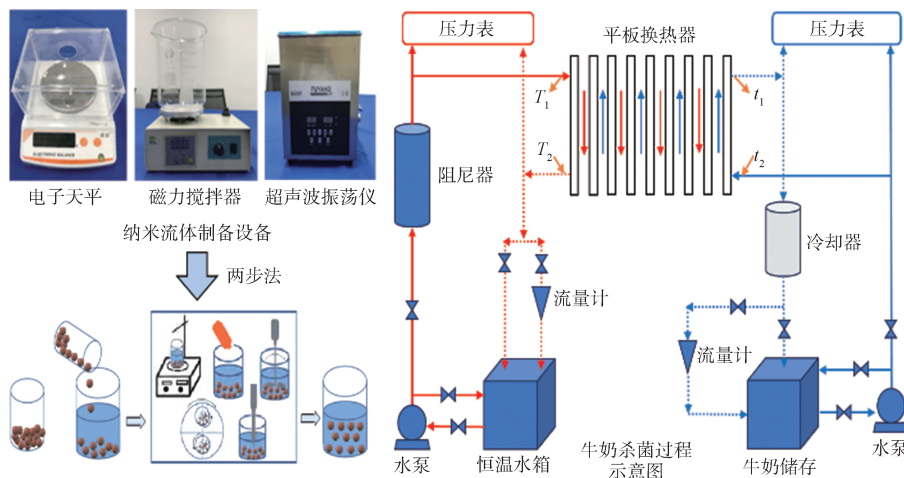


图4 纳米流体制备及杀菌过程

Fig. 4 Nanofluid preparation and sterilization process

行 30 s 处理的番茄红素保留率最高。Z. T. Tabari 等^[27]采用 MWCNT 对牛奶进行杀菌处理。结果表明, 随着 MWCNT 浓度的增加, 进行巴氏杀菌和灭菌所需的能耗更低。Z. T. Tabari 等^[24]还分析了 TiO_2 纳米流体在板式换热器中对乳制品杀菌的效果。结果表明, TiO_2 纳米流体可以有效提高换热器的传热效率。

2.3 纳米流体的应用难点

解决纳米流体失稳沉降的问题是其应用在食品生产领域的基本要求。根据静电稳定 (derjaguin landau vewey overbeek, DLVO) 理论, 由于受到不同环境因素的影响, 纳米流体中的纳米颗粒在范德华力和万有引力的作用下逐渐沉降、形成团簇。沉降不仅会堵塞管路, 也会降低纳米流体的初始最佳传热性能。此外, 影响纳米流体稳定性的主要因素包括温度、浓度、pH 值、颗粒大小等^[28]。很多学者采用物理分散和化学分散方法提升纳米流体的稳定性。物理分散方法包括超声波振动、球磨分散和磁力搅拌; 化学分散方法包括添加表面活性剂、调节 pH 值。常用的表面活性剂包括十二烷基硫酸钠 (sodium dodecyl sulfate, SDS)、十二烷基苯磺酸钠 (sodium dodecyl benzene Sulfonate, SDBS)、聚乙烯吡咯烷酮 (polyvinyl pyrrolidone, PVP)、十六烷基三乙基溴化铵 (cetyl trimethyl ammonium bromide, CTAB)、油酸 (oleic acid, OA)、腐植酸 (humic acid, HA)。相关研究如表 1 所示。

虽然目前已经找到影响纳米流体稳定性的具体因素, 但有待进一步利用实验探究纳米流体稳定性的最长持续时间和最佳提升方法。

表 1 纳米流体稳定性研究

Table 1 Nanofluid stability research

作者及参考文献	纳米颗粒	基础液	表面活性剂	稳定性 /d
Yu J. R. 等 ^[29]	MWCNT	水	SDS	90
M. F. Islam 等 ^[30]	SWCNT	水	SDBS	90
Tang Q. Y. 等 ^[31]	MWCNT	水	PVP	60
Li X. F. 等 ^[32]	Cu	水	CATB	7
Hwang Y. 等 ^[33]	Ag	硅油	OA	60
Wu G. S. 等 ^[34]	SWCNT	水	HA	10
R. Choudhury 等 ^[35]	Al_2O_3	水	SDS	16
Mo S. P. 等 ^[36]	TiO_2	水	SDS	12

3 细菌纳米纤维素薄膜应用于食品包装

3.1 纳米纤维素

随着不可再生资源的减少和环保要求的提高, 生物可降解的食品包装材料受到越来越多的关注。纳米纤维素是尺度为纳米级的天然纤维素的总称, 包括纳米纤丝纤维素 (nanofilament cellulose, NFC)、纳米晶体纤维素 (nanocrystal cellulose, NCC) 和细菌纳米纤维素 (bacterial nanocellulose, BNC) 3 种^[37], 其微观表征及应用如图 5^[38-40]所示。其中, NFC 是通过无机强酸水解或酶水解获得; NCC 是通过物理机械法获得; BNC 是通过生物合成法获得。纳米纤维素不仅具有可再生和可降解的特性, 而且具有比表面积大、密度高、生物相容性良好等优点, 常以复合膜的形式应用于食品包装、生物医疗等领域^[41]。此外, 纳米纤维素可以促进人体消化, 改善肠道菌群生态平

衡, 且具有良好的流变性和亲水性, 可以用作非营养配料、增稠剂、稳定剂等食品添加剂^[42]。

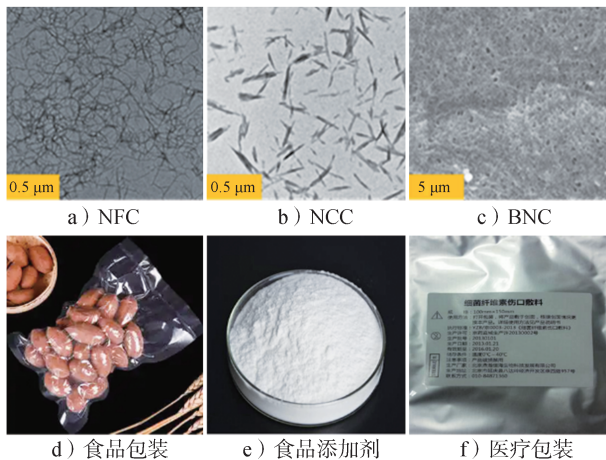


图 5 3 种纳米纤维素微观表征及应用

Fig. 5 Microscopic characterization and applications of nanocellulose

纳米纤维素增加了生物聚合物的强度和阻隔性, 从而提高了其在食品包装的适用性。纳米纤维素通常从动植物和微生物中提取, 来源广泛。如从植物细胞壁中提取纳米纤维素, 再通过化学或机械方法得到 NFC 和 NCC^[43]。而 BNC 是由微生物发酵合成的生物基纳米晶体材料^[44]。BNC 是生物可降解的可再生资源, 具有比表面积大、密度低、机械强度高、生物相容性良好、易改性等优点, 相比其他纤维素, BNC 能增加食品的保质期, 更适用于食品包装^[45]。同时, BNC 内部的网状结构和纳米尺度有利于吸附活性物质, 改善其作为食品包装材料的抗氧化性和抗菌性^[46]。BNC 的聚合物结构及应用如图 6^[47]所示。

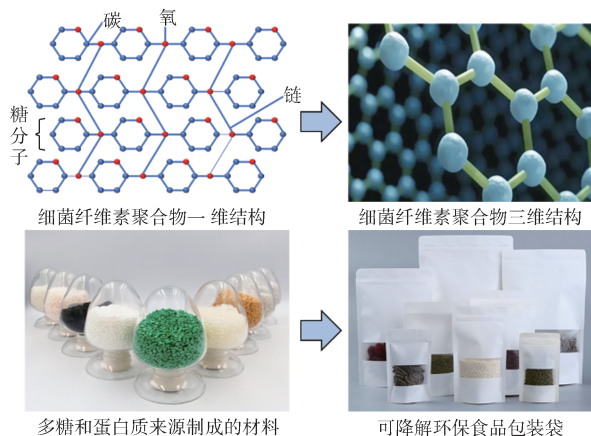


图 6 细菌纤维素聚合物结构及应用

Fig. 6 Bacterial cellulose polymer structure and applications

3.2 BNC 薄膜的制备方法

制备生物膜的材料包括蛋白质、多糖、脂类等, 但它们存在力学性能、稳定性、防潮能力差的问题。研究人员通常将细菌纳米纤维素作为强化剂加入天然基质中制成复合膜, 以解决上述问题。

壳聚糖 (chitosan, CS) 是从虾壳、蟹壳中提取的天然碱性多糖, 因具有生物相容性、可降解性、无毒性、成膜性及生物活性, 被认为是一种具有发展前景的食品包装基础材料^[48]。汪雪娇^[49]将 BNC 加入到荞麦酒糟蛋白质和壳聚糖, 用于改善荞麦酒糟蛋白膜的稳定性、力学性能和防潮能力。王蕊^[50]将含有 BNC 的壳聚糖与四硼酸钠、三聚磷酸钠和两种交联剂混合交联, 并通过溶剂法流延浇铸获得包装复合薄膜。研究发现交联对复合薄膜的性能有显著影响。殷楠^[51]从柿子醋中获得细菌纤维素, 并与壳聚糖、壳寡糖复合制备新的抗菌型食品包装材料。许艺馨^[52]以壳聚糖为基材, 以 BNC 为强化剂, 研究了壳聚糖和 BNC 不同的复合方式对复合膜成膜效果、力学性能和阻隔性能的影响, 发现活性复合膜在延缓油脂氧化方面具有较理想的效果, 其中包括物理合成的壳聚糖细菌纤维素 (chitosan bacterial cellulose, CS-BC) 薄膜和接枝的壳聚糖氧化细菌纤维素 (chitosan oxidation bacterial cellulose, CS-OBC) 薄膜 (见图 7^[52])。

通过上述研究发现, BNC 薄膜的制备分为两步, 第一步是提取 BNC, 第二步是合成 BNC 薄膜。BNC 主要通过静态法或动态法从不同类型菌属微生物提取获得。其中静态法是将发酵的菌种在培养皿中静置培养获得; 动态法是在机械搅拌罐或气升式生化反应器中通风培养获得。而 BNC 薄膜是通过物理合成或接枝的方式制备而成^[53]。

3.3 BNC 薄膜的应用前景

BNC 是一种新型环保的食品包装材料, 但产量低、成本高限制了其大规模生产和应用。学者们开始对高产细菌纤维素的菌株展开研究, 探究低成本的培养基成分, 优化制备工艺, 以获得高产的 BNC^[54-56]。吕橄等^[54]围绕 BNC 的生物合成、菌株选育及应用进行了分析, 发现虽然 BNC 具有较大的应用前景, 但产量低、生产成本高是阻碍其大规模使用的关键问题。陈一源等^[55]研究了黄酒糟发酵制备 BNC 的方法, 发现该方法可以大幅度降低细菌纤维素的的生产成本。此外, BNC 具有作为食品添加剂和膳食纤维的潜力, 可以添加到鸡肉饼、酸乳等食品中, 优化食品的持水性和稳定性, 并达到改善食欲的效果^[57-58]。

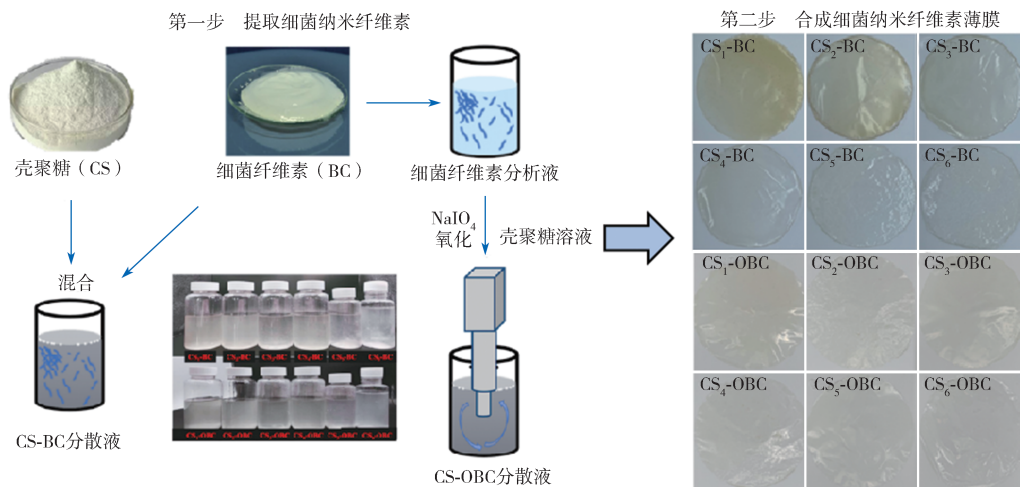


图7 物理合成的CS-BC薄膜和接枝的CS-OBC薄膜

Fig. 7 Physically synthesized CS-BC films and grafted CS-OBC films

4 纳米相变蓄冷材料应用于冷链

引了众多学者的关注, 结果如表2所示。

物流

4.1 纳米相变蓄冷材料

冷藏保鲜对于生鲜食品的运输过程十分重要, 它能够保证食品的新鲜度和营养价值。机械式冷藏是最普遍的冷藏方式, 但存在成本高、效率低的问题。而蓄冷式冷藏方式具有冷藏效果好、节能环保、效率高的优点。相变材料可以在低温时把冷量存储起来, 在相变时释放冷量, 从而保证蓄冷设备恒定控制温度^[59]。相变蓄冷材料的分类^[60-62], 如图8所示。

由图8可以看出, 相变蓄冷材料按照相变方式可以分为固-固相变材料、固-液相变材料、固-气相变材料和液-气相变材料, 其中固-液相变材料具有可重复使用、成本低、种类多的优点^[63-68]。固-液相变材料可以进一步分为无机、有机和复合相变蓄冷材料3种, 复合相变蓄冷材料又包括低共融混合物材料、高分子相变蓄冷材料、纳米相变蓄冷材料、气体水合物蓄冷材料。其中无机相变蓄冷材料存在易发生过冷、相分离、无机盐溶液强腐蚀性问题^[69]; 有机相变蓄冷材料存在导热系数和储能密度低的问题^[70]; 而复合相变蓄冷材料通过混合不同类型相变蓄冷材料, 克服了无机和有机相变蓄冷材料的缺陷, 获得结构稳定、能量密度高、成本低的高性能相变蓄冷材料^[71]。

纳米相变蓄冷材料属于复合相变蓄冷材料, 具有蓄冷密度高、蓄冷时间短、效率高的优点, 在食品冷链物流中具有良好的应用前景。纳米相变蓄冷材料吸

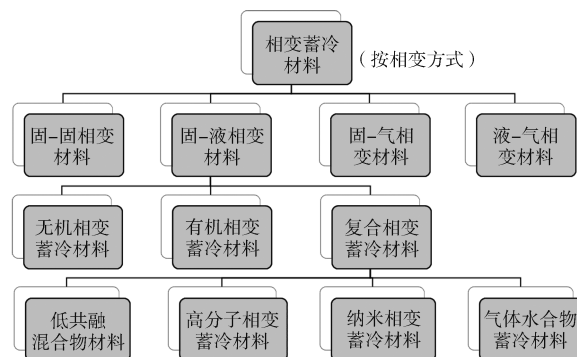


图8 相变蓄冷材料的分类

Fig. 8 Classification of phase change cold storage materials

表2 纳米相变蓄冷材料研究

Table 2 Research on nano phase change cold storage materials

学 者	纳米颗粒 / 微片	效 果
陈杨华等 ^[72]	Al	稳定性更好, 导热系数更高
詹莉等 ^[73]	TiO ₂	具有更好的蓄冷能力
金云飞等 ^[74]	TiO ₂	改善材料的过冷度和导热性能
武卫东等 ^[75]	MWNTs/Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	导热系数明显增加
李洋等 ^[76]	TiO ₂	热性能更稳定, 温度场更均匀
李新芳等 ^[77]	Cu	质量分数和温度对黏度有影响
高茂条等 ^[78]	石墨烯片	良好循环稳定性

4.2 纳米相变蓄冷材料的制备方法

纳米相变蓄冷材料的制备过程与纳米流体的相似, 也是采用“一步法”或“两步法”制备。为了大

规模制备纳米相变蓄冷材料，通常采用“两步法”。即先制备纳米颗粒，再将纳米颗粒与传统蓄冷材料混合，采用物理或化学分散技术进行分散，制备稳定的纳米相变蓄冷材料^[79-80]，制备过程如图 9 所示。

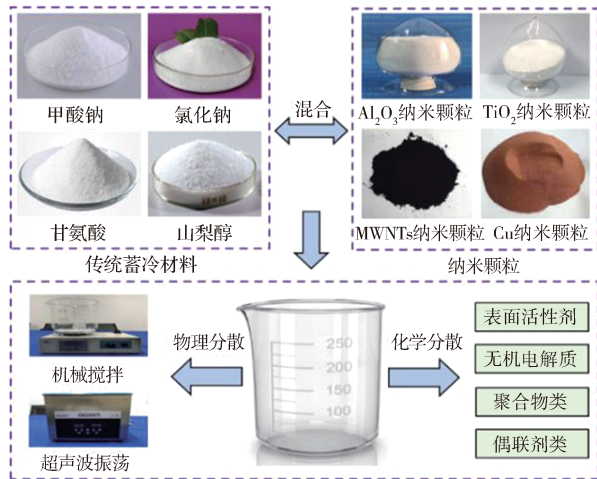


图 9 纳米相变蓄冷材料的制备

Fig. 9 Preparation of nano phase change cold storage materials

4.3 纳米相变蓄冷材料的应用前景

将纳米材料添加到相变蓄冷基础材料中可以有效提高材料的导热性能和稳定性，优化蓄冷能力。此外，相变材料可以实现电价峰谷转移，降低冷链运输成本。目前，研究消除相变材料和外界环境因素对食品品质影响的方法、探究相变材料和添加剂之间的协同关系、开发相变材料微胶囊封装技术和智能控温蓄冷系统是当下主要的研究方向^[81]。最新的研究进展如表 3 所示。

表 3 纳米相变蓄冷材料研究方向和进展

Table 3 Research direction and of nano phase change cold storage materials

学 者	研究方向	研究进展
Ma K. L. 等 ^[82]	相变材料与添加剂	CuO 和 MWCNT 联合制备纳米复合相变材料
Zhai X. Y. 等 ^[83]	微胶囊封装技术	原位聚合制备增强微胶囊
Xing X. H. 等 ^[84]	相变材料与添加剂	黄原胶和 TiO ₂ 联合制备三元纳米复合相变材料
Xu X. F. 等 ^[85]	相变材料与添加剂	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O 相变材料
Qi T. T. 等 ^[86]	果蔬冷链物流	构建更完善高效的冷链运输系统
Tong S. H. 等 ^[87]	降低冷链运输成本	通过相变材料降低冷链运输的能耗、成本和排放

5 结语

本文围绕食品加工、包装、运输过程中的食品保

鲜优化方法，采用纳米技术及纳米材料，从纳米流体应用于液态食品杀菌、细菌纳米纤维素薄膜应用于食品包装、纳米相变蓄冷材料应用于冷链物流 3 个方面进行概述，分析了纳米材料在食品工业中的研究现状和应用前景。

1) 纳米流体可以应用于许多高散热需求领域。在食品工业中，纳米流体可以用于液态食品杀菌，并且能够保证食品的新鲜度，但纳米流体的稳定性问题是阻碍其大规模应用的关键问题，有待进一步探究纳米流体稳定性的提升方法。

2) 细菌纳米纤维素相比其他植物纤维素具有纯度高、结晶度高、机械强度高、持水性好等优点，在食品包装或食品添加剂中有广泛的应用，但产量低、成本高限制了它的大规模生产和应用，有待进一步探究高产的细菌纤维素菌株。

3) 纳米相变蓄冷材料可以有效克服无机和有机相变蓄冷材料的缺陷，具有结构稳定、能量密度高、成本低的优点，在食品冷链物流中具有良好的应用前景。如何消除相变材料和外界环境因素的影响、探究相变材料和添加剂之间的协同关系、开发相变材料微胶囊技术和智能控温蓄冷系统仍是未来主要的研究方向。

参考文献:

- [1] 张 日. 食品行业要“保鲜”[J]. 食品工业, 2023, 44(8): 282-286.
ZHANG Ri. Food Industry to Keep Fresh[J]. Food Industry, 2023, 44(8): 282-286.
- [2] 安朝霞, 苗雨阳, 杜玉婉, 等. 食品腐败变质生物因素相关机制研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 86-93.
AN Zhaoxia, MIAO Yuyang, DU Yuwan, et al. Research Progress on the Related Mechanisms of Biological Factors in Food Spoilage and Deterioration[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(1): 86-93.
- [3] 林海滢, 梁永恒, 任艳琦, 等. 食品安全现状及食品质量管理的探讨 [J]. 食品工业, 2023, 44(6): 341-343.
LIN Haiying, LIANG Yongheng, REN Yanqi, et al. The Present Situation of Food Safety and the Discussion of Food Quality Control[J]. The Food Industry, 2023, 44(6): 341-343.

- [4] 白越华, 李睿琪, 张思丽. 浅谈食品分类方法[J]. 质量安全与检验检测, 2021, 31(4): 84-86.
BAI Yuehua, LI Ruiqi, ZHANG Sili. A Brief Discussion on Food Classification Methods[J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2021, 31(4): 84-86.
- [5] 卢嘉敏. 绿色可降解食品保鲜材料的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(增刊2): 77-81.
LU Jiamin. Research Progress of Green Degradable Food Preservation Materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(S2): 77-81.
- [6] 鄢冬茂. 相变储能材料在食品冷链物流中的应用研究进展[J]. 制冷与空调, 2017, 17(11): 1-5.
YAN Dongmao. The Application of Phase Change in Food Cold Chain Logistics[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2017, 17(11): 1-5.
- [7] 朱世新, 谢晶, 郭耀君, 等. 渔船用冷冻冷藏系统的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 251-255.
ZHU Shixin, XIE Jing, GUO Yaojun, et al. Progress on Refrigeration Systems and Cold Storage Methods of Fishing Boats[J]. Food & Machinery, 2015, 31(3): 251-255.
- [8] 韩艳丽. 食品贮藏保鲜技术[M]. 2版. 北京: 中国轻工业出版社, 2022: 55-109.
HAN Yanli. Food Storage and Preservation Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Light Industry Press, 2022: 55-109.
- [9] 闫磊, 王波, 温广, 等. 光照对果蔬保鲜冷藏影响的研究进展[J]. 冷藏技术, 2022, 45(3): 44-53.
YAN Lei, WANG Bo, WEN Guang, et al. Research Progress on the Effect of Light on Preservation and Refrigeration of Fruits and Vegetables[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2022, 45(3): 44-53.
- [10] 刁玉段. 直接浸渍冻结对冻藏草鱼保鲜效果的影响和机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
DIAO Yuduan. Preservation Effect and Mechanism of Direct Immersion Freezing for the Frozen Storage of Grass Carp(*Ctenopharyngodon Idella*)[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [11] 高庆超, 常应九, 王树林. 冰温贮藏技术在食品保藏中的应用[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(6): 59-63.
GAO Qingchao, CHANG Yingjiu, WANG Shulin. Application of Controlled Freezing-Point Technology in Food Preservation[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(6): 59-63.
- [12] 常海月, 张浩楠, 赵佳, 等. 农产品流通过程中的保鲜与贮存管理路径优化研究[J]. 商场现代化, 2023(7): 29-31.
CHANG Haiyue, ZHANG Haonan, ZHAO Jia, et al. Study on Optimization of Fresh-Keeping and Storage Management Path in the Process of Agricultural Products Circulation[J]. Market Modernization, 2023(7): 29-31.
- [13] 杨刚, 黄明珠, 刘斌, 等. 微生物代谢工程生产L-酪氨酸研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 2024: 1-8[2024-01-06]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038150.
YANG Gang, HUANG Mingzhu, LIU Bin, et al. Advances in Production of L-tyrosine Through Microbial Metabolic Engineering[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2024: 1-8[2024-01-06]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038150.
- [14] 赵玉韩, 王涵, 张宇, 等. 生物基可降解抑菌食品包装膜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 362-371.
ZHAO Yuhan, WANG Han, ZHANG Yu, et al. Research Progress of Bio-Based Biodegradable Antibacterial Food Packaging Films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 362-371.
- [15] 杜珂涵, 张亲心, 黄天姿, 等. 壳聚糖/纳米ZnO复合涂膜对蓝莓保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 31-40.
DU Kehan, ZHANG Qinxin, HUANG Tianzi, et al. Effects of Chitosan/Nano-ZnO Composite Coating on Preservation of Blueberry[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 31-40.
- [16] 郭一丹, 李奎, 蔚江涛, 等. 电子束辐照对果蔬采后保鲜效果的研究进展[J]. 中国果菜, 2020, 40(7): 10-15.
GUO Yidan, LI Kui, YU Jiangtao, et al. Research Progress of Electron Beam Irradiation on Postharvest Preservation of Fruits and Vegetables[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(7): 10-15.
- [17] 孙梦, 冉佩灵, 黄业传, 等. 超高压杀菌对低盐切片腊肉风味及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 101-109.
SUN Meng, RAN Peiling, HUANG Yechuan, et al. Effect of Ultra-High-Pressure Sterilization on Flavor and Physicochemical Properties of Low-Salt Sliced Bacon[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 101-109.
- [18] 鲁加惠. 壳聚糖/茶多酚复配涂膜结合微减压处理对双孢菇保鲜机制的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.

- LU Jiahui. Study on the Mechanism of Chitosan/Tea-Polyphenols Edible Coating Combined Micro-Hypobaric Treatment for Preservation of Button Mushrooms(*Agaricus Bisporus*)[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [19] 汪 滢, 史慧新, 伍志刚, 等. 磁场与食品保鲜研究进展[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1): 62-74.
WANG Ying, SHI Huixin, WU Zhigang, et al. Research Progress of Magnetic Field and Food Preservation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 62-74.
- [20] 金梧凤, 刘 旺, 王志强, 等. 臭氧保鲜冷藏水果过程中产生甲醛的安全性研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(12): 73-77.
JIN Wufeng, LIU Wang, WANG Zhiqiang, et al. Study on the Safety of Formaldehyde Produced in the Process of Ozone Preservation and Refrigeration of Fruits[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(12): 73-77.
- [21] 丁泽灏. 纳米材料及其技术的应用与发展研究[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(6): 52-54.
DING Zehao. Application and Development of Nanomaterials and Technologies[J]. Papermaking Equipment and Materials, 2022, 51(6): 52-54.
- [22] 张天涵, 杨维霖, 于仁豪, 等. 纳米材料制备研究现状及其发展方向[J]. 大众标准化, 2022(9): 124-126.
ZHANG Tianhan, YANG Weilin, YU Renhao, et al. Research Status and Development Direction of Nano-Materials Preparation[J]. Popular Standardization, 2022(9): 124-126.
- [23] 马丹丹, 任诗扬, 马天雨, 等. 纳米流体强化传热进展综述[J]. 当代化工研究, 2023(14): 7-9.
MA Dandan, REN Shiyang, MA Tianyu, et al. Review on Study of Nanofluids Heat Transfer Enhanced[J]. Modern Chemical Research, 2023(14): 7-9.
- [24] TAGHIZADEH-TABARI Z, ZEINALI HERIS S, MORADI M, et al. The Study on Application of TiO_2 /Water Nanofluid in Plate Heat Exchanger of Milk Pasteurization Industries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1318-1326.
- [25] 赵梦娜, 杨欣悦, 冯 佳, 等. 纳米流体在液态食品杀菌中的应用及其作用机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 481-487.
ZHAO Mengna, YANG Xinyue, FENG Jia, et al. Application and Mechanism of Nanofluid in Liquid Food Sterilization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 481-487.
- [26] JABBARI S S, JAFARI S M, DEHNAD D, et al. Changes in Lycopene Content and Quality of Tomato Juice During Thermal Processing by a Nanofluid Heating Medium[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 230: 1-7.
- [27] TABARI Z T, HERIS S Z. Heat Transfer Performance of Milk Pasteurization Plate Heat Exchangers Using MWCNT/Water Nanofluid[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2015, 36(2): 196-204.
- [28] CHAKRABORTY S, PANIGRAHI P K. Stability of Nanofluid: A Review[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 115259.
- [29] YU J R, GROSSIORD N, KONING C E, et al. Controlling the Dispersion of Multi-Wall Carbon Nanotubes in Aqueous Surfactant Solution[J]. Carbon, 2007, 45(3): 618-623.
- [30] ISLAM M F, ROJAS E, BERGEY D M, et al. High Weight Fraction Surfactant Solubilization of Single-Wall Carbon Nanotubes in Water[J]. Nano Letters, 2003, 3(2): 269-273.
- [31] TANG Q Y, SHAFIQ I, CHANL Y C, et al. Study of the Dispersion and Electrical Properties of Carbon Nanotubes Treated by Surfactants in Dimethylacetamide[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2010, 10(8): 4967-4974.
- [32] LI X F, ZHU D S, WANG X J. Evaluation on Dispersion Behavior of the Aqueous Copper Nano-Suspensions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 310(2): 456-463.
- [33] HWANG Y, LEE J K, LEE J K, et al. Production and Dispersion Stability of Nanoparticles in Nanofluids[J]. Powder Technology, 2008, 186(2): 145-153.
- [34] WU G S, YANG J K, GE S L, et al. Thermal Conductivity Measurement for Carbon-Nanotube Suspensions with 3ω Method[J]. Advanced Materials Research, 2009, 60/61: 394-398.
- [35] CHOUDHARY R, KHURANA D, KUMAR A, et al. Stability Analysis of Al_2O_3 /Water Nanofluids[J]. Journal of Experimental Nanoscience, 2017, 12(1): 140-151.
- [36] MO S P, CHEN Y, JIA L S, et al. Investigation on Crystallization of TiO_2 -Water Nanofluids and Deionized Water[J]. Applied Energy, 2012, 93: 65-70.
- [37] 刘文迎, 张 静, 郭亮亮, 等. 纳米纤维素的制备及在生物医药领域应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2019, 47(6): 13-17.

- LIU Wenying, ZHANG Jing, GUO Liangliang, et al. Research on Preparation of Nanocellulose and Its Application in Biomedicine[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(6): 13-17.
- [38] 刘雄利, 王安, 王春平, 等. 纤维素纳米纤丝的制备和改性研究进展[J]. 中国造纸, 2020, 39(4): 74-83.
- LIU Xiongli, WANG An, WANG Chunping, et al. Research Progress in Preparation and Modification of Cellulose Nanofibril[J]. China Pulp & Paper, 2020, 39(4): 74-83.
- [39] 吴海燕, 袁秋梅. 纳晶纤维素在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 276-279.
- WU Haiyan, YUAN Qiumei. Research Progress of the Application of Nanocrystalline Cellulose in Food Industry[J]. The Food Industry, 2020, 41(5): 276-279.
- [40] 马晓璇. 应用于食品包装的BC/棉纤维自组装材料的制备及表征[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- MA Xiaoxuan. Preparation and Characterization of BC/Cotton Fiber Self-Assembly Materials Used in Food Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [41] 栾夏雨, 郝站华, 卢家慧, 等. 纳米纤维素复合材料在食品包装中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 341-347.
- LAN Xiayu, HAO Zhanhua, LU Jiahui, et al. Research Progress of Nanocellulose Composites in Food Packaging[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(22): 341-347.
- [42] 田英华, 张羽飞, 金海燕, 等. 纳米纤维素及其在食品行业中的应用[J]. 纤维素科学与技术, 2020, 28(4): 74-79.
- TIAN Yinghua, ZHANG Yufei, JIN Haiyan, et al. Nanocellulose and Its Application in Food Industry[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2020, 28(4): 74-79.
- [43] 公昊. 基于植物纤维的纳米银绿色制备及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- GONG Hao. Green Preparation and Application of Nanosilver Based on Plant Fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [44] FERNANDES I A A, PEDRO A C, RIBEIRO V R, et al. Bacterial Cellulose: From Production Optimization to New Applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2598-2611.
- [45] 张杨. 基于涡旋流体技术的细菌纤维素纳米晶体的制备及其食品降油和包装的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- ZHANG Yang. Preparation of Bacterial Cellulose Nanocrystals Based on Vortex Fluid Technology and Application of Food Oil Reduction and Packaging[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [46] 赵冬梅, 初小宇, 张勇, 等. 基于纤维素的食品包装材料的进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 432-439.
- ZHAO Dongmei, CHU Xiaoyu, ZHANG Yong, et al. Research Progress of Food Packaging Materials Based on Cellulose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 432-439.
- [47] 郭艳. 细菌纤维素对鸡肉饼和冰淇淋品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- GUO Yan. Study on the Effect of Bacterial Cellulose on Product Qualities of Chicken Patties and Ice Cream[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [48] 李知函. 壳聚糖基生物物质抑菌材料的制备及其应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- LI Zhihan. Study on the Preparation and Application of Antibacterial Biomass Material Based on Chitosan[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [49] 汪雪娇. 基于纳米细菌纤维素复合膜的制备及其性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- WANG Xuejiao. Development and Characterization of Composite Films Based on Nano-Bacterial Cellulose[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [50] 王蕊. 壳聚糖/细菌纤维素复合包装材料的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- WANG Rui. Research on Chitosan/Bacterial Cellulose Composite Packaging Materials[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.
- [51] 殷楠. 木醋杆菌纤维素和壳聚糖或壳寡糖抗菌复合材料的表征[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- YIN Nan. Characterization of Bacterial Cellulose-Based Antibacterial Composites Modified with Chitosan or Chitooligosaccharide[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [52] 许艺馨. 壳聚糖接枝细菌纤维素活性复合膜的制备及应用[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- XU Yixin. Preparation and Application of Chitosan Grafted Bacterial Cellulose Active Composite Film[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [53] 孙振炳, 李晓宝, 姚曜, 等. 细菌纤维素抗菌复合材料的制备和应用[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 21-

28.
SUN Zhenbing, LI Xiaobao, YAO Yao, et al. Preparation and Application of Bacterial Cellulose Antibacterial Composite Material[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 21-28.
- [54] 吕 橄, 赵文韬, 龚建萍, 等. 细菌纤维素在食品工业中的应用研究进展 [J]. 现代食品, 2021(16): 23-28.
LÜ Gan, ZHAO Wentao, GONG Jianping, et al. Research Progress on the Application of Bacterial Cellulose in Food Industry[J]. Modern Food, 2021(16): 23-28.
- [55] 陈一源, 陆筑凤, 鲁瑞刚, 等. 黄酒糟发酵制备细菌纤维素的技术研究 [J]. 纤维素科学与技术, 2021, 29(1): 25-31.
CHEN Yiyuan, LU Zhufeng, LU Ruigang, et al. Preparation of Bacterial Cellulose by Enzymatic Hydrolysed Yellow Distiller's Grains[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2021, 29(1): 25-31.
- [56] 刘子菲, 路 苹, 高子乔, 等. 水解制备细菌纤维素纳米纤维及纳米纤维稳定的 Pickering 乳液特性 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 76-82.
LIU Zifei, LU Ping, GAO Ziqiao, et al. Hydrolysis Preparation of Bacterial Cellulose Nanofibers and Its Characteristics of the Pickering Emulsions[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(22): 76-82.
- [57] 杨依维, 刘玉飞, 何 敏. 细菌纤维素的制备及在食品中的应用进展 [J]. 纤维素科学与技术, 2022, 30(3): 45-51.
YANG Yiwei, LIU Yufei, HE Min. Progress on the Preparation of Bacterial Cellulose and Its Application in Food[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2022, 30(3): 45-51.
- [58] 刘小静. 细菌纤维素在包装领域的研究进展 [J]. 包装工程, 2021, 42(19): 1-11.
LIU Xiaojing. Research Progress on Bacterial Cellulose Applications in Packaging Field[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 1-11.
- [59] 宁初明, 李燕军, 沈灿铎, 等. 相变蓄冷技术在食品冷藏保鲜运输中的应用 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2115-2120.
NING Chuming, LI Yanjun, SHEN Canduo, et al. Application of Phase Change Cool Storage Technology in Food Cold Storage Transport[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2115-2120.
- [60] VEERAKUMAR C, SREEKUMAR A. Phase Change Material Based Cold Thermal Energy Storage: Materials, Techniques and Applications: A Review[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 271-289.
- [61] MEHRIZI A A, KARIMI-MALEH H, NADDAFI M, et al. Application of Bio-Based Phase Change Materials for Effective Heat Management[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106859.
- [62] TARIQ S L, ALI H M, AKRAM M A, et al. Nanoparticles Enhanced Phase Change Materials (NePCMs): A Recent Review[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115305.
- [63] EANEST J B, VALAN A A. A Comprehensive Review on Latent Heat and Thermal Conductivity Nanoparticle Dispersed Phase Change Material for Low-Temperature Applications[J]. Energy Storage Materials, 2020, 24: 52-74.
- [64] CHAI L X, WANG X D, WU D Z. Development of Bifunctional Microencapsulated Phase Change Materials with Crystalline Titanium Dioxide Shell for Latent-Heat Storage and Photocatalytic Effectiveness[J]. Applied Energy, 2015, 138: 661-674.
- [65] SHA Y S, HUA W S, CAO H F, et al. Properties and Encapsulation Forms of Phase Change Material and Various Types of Cold Storage Box for Cold Chain Logistics: A Review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105426.
- [66] ZHANG Y A, XU Y G, et al. Form-Stable Cold Storage Phase Change Materials with Durable Cold Insulation for Cold Chain Logistics Food[J]. Postharvest Biology Technology, 2023. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2023.112409.
- [67] HE Z Y, GUO W M, SONG L, et al. Techno-Economic Analysis of a Refrigerated Warehouse Equipped with on-Shelf Phase Change Material for Cold Storage Under Different Operating Strategies[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 283: 116922.
- [68] LU W, TASSOU S A. Characterization and Experimental Investigation of Phase Change Materials for Chilled Food Refrigerated Cabinet Applications[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1376-1382.
- [69] 杨天润, 孙 镏, RONALD W, 等. 相变蓄冷材料的研究进展 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(3): 567-573.
YANG Tianrun, SUN Qie, RONALD W, et al. Review of Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics,

- 2018, 39(3): 567–573.
- [70] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 52–59.
TAO Wenbo, XIE Ruhe. Research and Development of Organic Phase Change Materials for Cool Thermal Energy Storage[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 52–59.
- [71] 傅一波, 王家俊, 王冬梅. 复合相变蓄冷剂性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(10): 235–237.
FU Yibo, WANG Jiajun, WANG Dongmei. Study on the Performance of Composite Phase Change Coolant[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(10): 235–237.
- [72] 陈杨华, 王麟康, 杨皓月, 等. RT6/ 纳米铝相变蓄冷材料的热物性研究[J]. 热科学与技术, 2015, 14(5): 358–361.
CHEN Yanghua, WANG Linkang, YANG Haoyue, et al. Experimental Study on Thermophysical Properties of Cool Storage Materials of RT6/Nano-Al[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 14(5): 358–361.
- [73] 詹莉, 林杨, 刘黎明, 等. 多元纳米相变蓄冷剂的制备及食用菌保鲜应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 215–223.
ZHAN Li, LIN Yang, LIU Liming, et al. Development of Multi-Nano Phase Change Cold Storage Material and Its Application in Edible Fungi Preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 215–223.
- [74] 金云飞, 武卫东, 伏舜宇, 等. 低温冷链物流用相变材料的优化及应用[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 106–113.
JIN Yunfei, WU Weidong, FU Shunyu, et al. Optimization and Application of Phase Change Materials for Low-Temperature Cold Chain Logistics[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(6): 106–113.
- [75] 武卫东, 唐恒博, 苗朋柯, 等. 空调用纳米有机复合相变蓄冷材料制备与热物性[J]. 化工学报, 2015, 66(3): 1208–1214.
WU Weidong, TANG Hengbo, MIAO Pengke, et al. Preparation and Thermal Properties of Nano-Organic Composite Phase Change Materials for Cool Storage in Air-Conditioning[J]. CIESC Journal, 2015, 66(3): 1208–1214.
- [76] 李洋, 张欣硕, 李馨男, 等. 纳米复合相变蓄冷材料的制备及蓄冷特性分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 284–292.
LI Yang, ZHANG Xinshuo, LI Xinnan, et al. Preparation of Nanocomposite Phase Change Cold Storage Materials and Analysis of Cold Storage Characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 284–292.
- [77] 李新芳, 朱冬生, 付文亭, 等. 纳米复合相变蓄冷材料黏度特性的影响因素分析[J]. 化学世界, 2017, 58(2): 119–123.
LI Xinfang, ZHU Dongsheng, FU Wenting, et al. Influencing Factors on the Viscosity of Nanocomposite Phase Change Cool Storage Material[J]. Chemical World, 2017, 58(2): 119–123.
- [78] 高茂条, 王春煦, 吴学红, 等. 纳米石墨烯片-石蜡复合相变蓄冷材料制备方法及其热物性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 128–132.
GAO Maotiao, WANG Chunxu, WU Xuehong, et al. Preparation and Thermal Properties of Nano-GNPS as Stuffing into the Cool Storage Phase Change Materials[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 128–132.
- [79] 刘玉东. 纳米复合低温相变蓄冷材料的制备及热物性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
LIU Yudong. Study on Preparation and Thermal Properties of Phase Change Nanocomposites for Cool Storage[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [80] 崔莹. 常规空调工况用相变蓄冷介质的制备及热物性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2012.
CUI Ying. Study of the Preparation and Thermal Properties of the PCM of Cool Storage at Air Conditioning Conditions[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2012.
- [81] 游辉, 谢晶. 低温相变蓄冷材料及其应用于冷链的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 287–293.
YOU Hui, XIE Jing. Research Progress of Low Temperature Phase Change Storage Materials and Their Applications in Cold Chain[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 287–293.
- [82] MA K L, ZHANG X L, JI J, et al. Development, Characterization and Modification of Mannitol-Water Based Nanocomposite Phase Change Materials for Cold Storage[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 650: 129571.
- [83] ZHAI X Y, WANG J H, ZHANG X W, et al. Polyurethane Foam Based Composite Phase Change Microcapsules with Reinforced Thermal Conductivity for Cold Energy Storage[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022,

- 652: 129875.
- [84] XING X H, LU W, ZHANG G H, et al. Ternary Composite Phase Change Materials (PCMS) Towards Low Phase Separation and Supercooling: Eutectic Behaviors and Application[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 2646–2655.
- [85] XU X F, ZHANG X L, ZHOU S X, et al. Experimental and Application Study of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ with Additives for Cold Storage[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 136(2): 505–512.
- [86] QI T T, JI J, ZHANG X L, et al. Research Progress of Cold Chain Transport Technology for Storage Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 105958.
- [87] TONG S H, NIE B J, LI Z X, et al. A Phase Change Material (PCM) Based Passively Cooled Container for Integrated Road-Rail Cold Chain Transportation: An Experimental Study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117204.
- (责任编辑: 李玉华)

Nanomaterials in Food Production and Preservation Applications

TAO Qi^{1,2}, ZHONG Fei^{1,2}, WANG Zhiwen^{1,2}, ZHENG Hao^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Xiangyang-Hubei University of Technology Industrial Research Institute, Xiangyang Hubei 441199, China;

3. Key Lab of Modern Manufacture Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to ensure the freshness of daily food, it is particularly important to optimize the sterilization, preservation and refrigeration processes during food processing, packaging and transportation. Nanomaterials are widely used in food production due to their good thermal, magnetic, and mechanical properties, which can shorten the sterilization time and maintain the organoleptic and nutritional properties of food. An overview of the application of nanomaterials in the field of food industry is presented, respectively from three aspects: the application of nanofluid in the liquid food sterilization, bacterial nanofibrillar film food packaging, and nano phase change cold storage materials in cold chain logistics, introducing the preparation methods of nanofluid, bacterial nanofibrillar film, and nano-phase-change cold storage materials, while analyzing the technological difficulties in process of the application of nanomaterials, with the analysis of the technical difficulties in the application of nanomaterials and the summary of the application prospects of nanomaterials in the food industry.

Keywords: nanofluid; bacterial nanocellulose; nano phase change cold storage material; food production; food preservation