

文章编号:0253 – 4339(2018) 06 – 0001 – 09
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2018. 06. 001

食品速冻方法与模拟技术研究进展

唐君言^{1,2} 邵双全¹ 徐洪波¹ 邹慧明¹ 田长青¹

(1 中国科学院理化技术研究所 中国科学院低温工程学重点实验室 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100190)

摘 要 随着食品行业的快速发展,食品速冻因可提供较高的食品品质而备受关注。本文介绍了冻结的原理,通过对比快速冻结和慢速冻结对食品品质影响的差异,阐述了食品速冻的传统方法及压力辅助、电磁辅助等新兴的速冻方式的优点和局限性,从提高食品品质和节能的角度,指出新兴的辅助速冻方式的应用前景,并为优化速冻过程及指导实验研究,总结了食品冻结过程数值模拟方法及其研究进展。

关键词 速冻;食品品质;速冻方法;模拟

中图分类号:TB61⁺1; TQ025.3; TS205 **文献标识码:**A

Progress in Research on the Food Quick-freezing Method and Simulation Technology

Tang Junyan^{1,2} Shao Shuangquan¹ Xu Hongbo¹ Zou Huiming¹ Tian Changqing¹

(1. CAS Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract Currently, given the rapid development in food industries, food quick-freezing provides high food quality and receives extensive attention. In the review, the principle of food freezing was introduced, and food quality differences between the quick-freezing process and slow-freezing process were compared. Additionally, traditional and new methods of food quick-freezing including pressure assisted freezing, electric assisted freezing, and magnetic assisted freezing were classified to examine the status and development tendency. Furthermore, the emerging methods exhibit immense application prospects from the food quality and energy consumption perspectives. The simplified methods were summarized in the simulation process to optimize the freezing process and guide experimental studies.

Keywords quick-freezing; food quality; quick-freezing method; simulation

食品速冻起源于美国,根据时间-温度-耐受性原则^[1],食品的品质依赖于温度,温度越低,食品的储存时间越长。如今,速冻食品的种类也越来越丰富,涵盖了畜产品、蔬菜、水果及各种米面产品等。不同种类的食品组成成分不同,根据食品特性采用不同的温度、冻结时间等条件才能达到最佳的冻结效果。

近年来,速冻食品的需求促进了该领域研究的不断发展。速冻食品的形式从整体包装转变到单体速冻;在冷却介质方面,冷却剂从之前采用空气和盐水等转变到现在部分采用液氮、液态 CO₂ 等,温差和传热系数更大,增大了冻结速率^[2]。但当冻结速率超过一个极限值时,热应力导致低温断裂,影响食品的品质^[3]。因此,在一定的限值范围内,冻结速度越快,食品品质越高。此外,许多学者着眼于各种辅助

的冻结方法,包括高压辅助冻结、超声辅助冻结、磁场辅助冻结等^[4]。食品速冻实验研究需要较多的时间和投资,为了避免这个问题,可采用模拟的方法来指导和控制速冻过程^[5-8]。

本文总结了食品冻结技术的发展现状,介绍了冻结机理,对比了慢速冻结与快速冻结的差异,并阐述了冻结的方法及各种辅助的速冻方式,总结了模拟过程中的简化方法,包括基尔霍夫转换法和表观比热法等。

1 冻结机理

根据传热过程的相关研究^[9],冷却剂的温度、空气的流速及食品的尺寸大小等因素均会影响传热过程。在食品冻结过程中,冻结速度反映了传热速

度^[10]。按照文献[11]提出的理论,冻结方式大致分为慢速冻结和快速冻结。在快速冻结过程中,细胞内外的结合水和自由水能够同时形成大量晶核,大量细小均匀的冰晶平衡了细胞内外的压力,减少了对细胞膜和细胞质的损伤。相反,慢速冻结形成的较大冰晶会造成机械损伤和汁液流失等问题。快速冻结和慢速冻结的对比如表 1 所示^[12]。

表 1 慢速冻结与快速冻结的对比^[12]

Tab.1 Comparison of the slow freezing and the quick freezing

冻结方式	冻结速度/ (cm/h)	冰晶大小/ μm	冰晶形态
慢速冻结	0.1~1	100~1 000	圆柱状、块粒状
快速冻结	5~20	0.5~100	针状、杆状

冻结过程如图 1 所示,包括冷却阶段、相变阶段和冷冻阶段。在相变阶段放出大量潜热,形成大量冰晶。如果在此阶段散热不好,产生的大冰晶对细胞会造成损伤^[13]。因此,速冻方法对提高食品品质尤为重要^[14-16]。

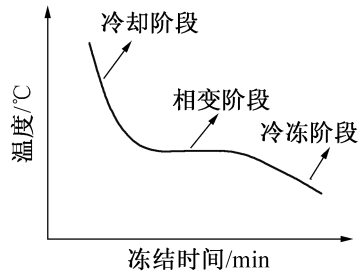


图 1 冻结过程
Fig.1 The process of freezing

2 冻结方法

食品种类丰富多样,冻结方法也不尽相同,可分为直接冻结与间接冻结^[17]。为了提高食品的冻结品质,提出了压力辅助、电磁辅助等方式来提高冻结速率,并取得了较好的成果。

2.1 冻结方法的分类

直接冻结^[18-20]是一种冷却剂直接和食品接触的方式,而间接冻结^[9]食品 and 冷却剂没有直接接触,冻结方法分类如图 2 所示。

鼓风冻结的运用较为普遍,流态化冻结利用自下而上的冷空气实现悬浮态冻结,隧道式冻结能够实现产品的连续生产。但利用风机提供高速流动的冷空气需要消耗大量能量,食品干耗也较大。间接冻结是

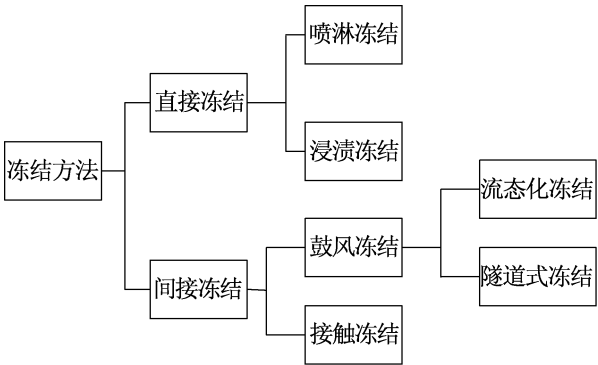


图 2 冻结方法的分类

Fig.2 The classification of the freezing methods

用经低温介质冷却的金属板和食品接触实现食品冻结。该种方式设备体积小,节省能耗,食品干耗小,但平板接触式冻结的速度较慢,对食品的形状有一定限制。

直接冻结包含喷淋冻结和浸渍冻结,其优势是传热速率大大增加,但需要对食品进行一定的包装,且液体冷却剂需要相应的设备储存,初投资增大。不同冻结方法的对比如表 2 所示。

表 2 不同冻结方法的对比

Tab.2 Comparison of the different freezing methods

冻结方式	冷却方法	效果
流态化冻结	运用冷空气换热	冻结速度均匀且快,但需要对象为颗粒状。
隧道式冻结	运用冷空气换热	冻结速度快,但设备结构复杂,能耗较大。
接触冻结	冷却剂从空心板蒸发带走热量	能耗较低,但结构复杂,材料的厚度有一定限制。
喷淋冻结	冷却剂在材料周围循环	食品均匀冻结,冻结食品品质较高。
浸渍冻结	材料直接沉浸在冷却剂中	冻结速度最快,但成本较高。

2.2 新兴的辅助方法

在冻结食品的过程中,较大的冰晶会对细胞组织造成显著的伤害,均匀分布的细小冰晶能够在很大程度上减少对细胞的损伤^[10]。过冷度越高,冰晶的数目越多,尺寸越小^[21]。为了提高食品品质,提出了新兴的技术来辅助冻结过程,并取得了很好的效果,辅助方法分类如图 3 所示。

2.2.1 超声辅助冻结

近年来,关于超声辅助冻结的研究非常广泛。Xu Baoguo 等^[22]研究了超声浸渍式冻结对有包装的红萝卜内部的水分分布及质量的影响,结果表明超声

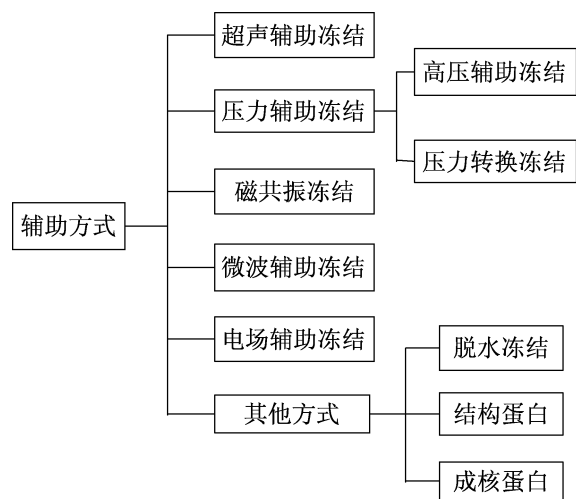


图 3 辅助方法的分类

Fig. 3 Classification of the assisted freezing methods

辅助速冻能够显著减少冻结时间,并提高萝卜的质量。他们还研究了超声对于圆柱形萝卜结晶的影响^[23],研究中呈现了动态的结晶过程和超声的延迟等。Cheng Xinfeng 等^[24]研究了超声辐射对草莓的浸渍式冻结的影响,结果表明合理采用辐射温度和强度能够有效控制易腐食品的成核过程。

超声对速冻过程的影响是确定的,但超声影响结晶过程的机理仍未统一^[25-28]。关于超声诱发成核的机理有以下几种比较认同的说法^[16,29]:1) 超声引起微小气泡的剧烈崩塌,非常高的压力导致较大的过冷度,形成较多且较小的冰晶;2) 超声具有毁坏树枝状冰晶的能量,形成的碎片可以作为冰核;3) 由于宏观上的湍流和微观上高度的粒子碰撞使固液边界变薄。由于这一系列的原因,使在超声的辅助下传热系数相对较高^[30]。但超声辅助冻结一般运用于浸渍冻结,其他情况的运用较少,所以其适用场合有一定限制。不同的超声强度、频率及辐射温度对食品的影响需要进一步研究。

2.2.2 电、磁场辅助冻结

电场辅助冻结是一种新方法。E. Xanthakis 等^[31]以猪肉作为实验材料,发现采用电场辅助可以减少对肉类的损伤。脉冲电场的运用可以在很大程度上减少冻结时间,并得到较好的产品特性^[32]。J. H. Mok 等^[33]采用脉冲电场和静态磁场相联合进行食品冻结,得到细小且均匀的冰晶,并缩短了相变的时间。F. J. Barba 等^[34]总结了目前脉冲电场在食品行业的应用及其广阔的前景。但关于这项技术的研究并不彻底,对于各种不同类型的电场,如静电场、不同占空比的脉冲电场及两者的联合等,需要进一步实验研究其对食品作用不同时间的影响,还需要进一步

证实微观机理。

食品的主要成分为水,水是一种抗磁性物质,在磁场的影响下,能够改变其特性^[35]。在冷冻室内,运用振荡的磁场延迟冰晶的形成^[4],结果表明,由于这种延迟效应,可形成均匀的冰晶,减少对食品结构的破坏。Y. B. Kim 等^[36]采用磁场进行肉类冻结,结果发现加快了食品冻结的速度,减少了汁液流失,但增加了烹饪过程中的损耗。但根据 C. James 等^[37]的研究,在冻结过程中,磁场并没有加强过冷度。目前关于磁场对食品的影响还存在较多争议。现在的研究主要集中在较低强度的静磁场、交变磁场在工频下对食品冻结过程的影响^[38-40],今后可能需要在更宽频带、更宽的场强范围以及不同类型磁场的叠加方面进行更多的研究,进一步探索磁场对冻结过程的影响。关于磁场作用的机理也还需要进一步研究进行证实,目前主要观点是磁场会影响氢键的强度,削弱分子簇内的氢键,将大尺寸的分子簇碎成小尺寸的分子簇,从而延缓结晶^[41],但也有学者认为是洛伦兹力或食品内部铁磁性材料等的影响。

2.2.3 压力辅助冻结

在食品行业,高压的使用非常广泛。比较常见的是高压辅助冻结和压力转换辅助冻结。两种方式都是通过较高的压力来控制冻结过程,但原理略有差别。高压辅助冻结是在较高的压力下冷冻食品^[42]。压力转换辅助冻结是在高压到低压的变化过程中实现食品的冻结,与高压辅助冻结方式不同的是,高压释放时发生相变,较高的过冷度形成了更小更均匀的冰晶。Xu Zhiqiang 等^[43]研究了在高压 CO₂ 下胡萝卜的速冻过程并得到了高质量的胡萝卜片。针对压力转换辅助冻结方式的研究要比高压辅助冻结方式多,原因是前者形成的冰晶更小更均匀,冻结时间也较短^[44]。但是,要广泛运用还存在一些限制,如能够承受高压的设备投资很高,此外,需要进一步研究在短时间内如何迅速移除产生的大量热量。

2.2.4 微波辅助冻结和射频辅助冻结

微波辅助冻结和射频辅助冻结是两种较新的技术,但目前对这方面的研究较少。两种方法的原理相似,利用微波或射频引诱水分子的偶极子旋转来破坏冰核的形成和发展。微波或射频的运用会引起温度的波动,有实验数据表明这种有限的温度波动能够减少冰晶的尺寸。截至目前,仅有少量的研究证实这种有效性。E. Xanthakis 等^[45]采用微波辅助的方法对猪肉进行了实验,结果表明产品质量得到了提高。M. Anese 等^[46]研究了射频辅助对猪肉冻结过程的影响,发现形成的冰晶更小。

2.2.5 其它冻结方法

脱水冷冻是目前一种新兴的技术。水果蔬菜一般会比其它食品有更多的水分,在冻结过程中由于水的膨胀对细胞组织造成更大的伤害。脱水冷冻的原理是让食品先进行一定程度的脱水后再冻结。水分的减少可以降低冰点,并减少在冻结过程中产生的热量。L. A. Ramallo 等^[47]研究发现经过脱水处理后需要的冻结时间比未经处理的缩短了一半,经过处理后的颜色、结构和营养均有一定程度的提高^[48]。该方法已经在某些装置中使用并取得了较好的效果。

结构蛋白不能阻止冻结,但可以控制冰晶的尺寸和形状。M. Hassas-Roudsari 等^[49]研究了结构蛋白的功能,C. M. Yeh 等^[50]研究表明结构蛋白可减少汁液流失。但现在除了在生产冰淇淋时采用结构蛋

白,在其他食品中还未得到广泛应用,还需更多的研究来发现适用于该方法的产品。

成核蛋白的作用和结构蛋白的作用相反,主要是提高成核温度及减少过冷度。通过该方法,能够减少冻结时间,形成较为均匀的冰晶。Sun Dawen^[10]表明成核蛋白能够提升食品品质。但是目前成核蛋白的使用受到一定限制,因为这些成核蛋白一般从细菌中得到^[51],运用到食品中需要考虑安全性,如何将不可食用的细菌完全移除尤为重要。

除了如表 3 所示的辅助速冻方法以外,还有其他方式也在研究中。例如,可以采用保护剂如海藻糖^[52]防止对食品的损伤。由于现在很多研究仍停留在实验阶段,所以将这些技术应用到生产中仍需要大量工作^[53]。

表 3 不同辅助冻结方法的运用
Tab.3 Applications of different assisted freezing methods

时间	作者	对象	方法	结论
2014	Cheng Xinfeng 等 ^[24]	草莓	不同超声辐射温度和强度对草莓冻结成核的影响。	超声辅助能够在较低过冷度下诱发成核,冻结时间缩短。
2006	L. Otero 等 ^[54]	凝胶	采用了 120、280、400 MPa 的压力以及 - 8.5、- 12.5、- 20.5 ℃ 的温度进行冻结。	采用压力辅助的方式得到的相变时间比常压下短,压力越大,时间越短。
2014	娄耀邦 ^[39]	鲤鱼	用 0 ~ 11 Gs 等强度的静磁场处理冻品。	磁场对不同阶段的影响不同,对预冷阶段影响较小,对相变阶段明显促进,对冻结阶段延缓。
2015	王鹏飞 ^[38]	胡萝卜、黄瓜等	用 4、6、9、18 Gs 等强度的交变和直流磁场处理冻品。	磁场可以降低果蔬的过冷度,相变时间缩短,冰晶更小。
2015	Y. S. Choi 等 ^[55]	牛肉	电磁谐振和鼓风式分别处理样品。	电磁谐振的冰晶尺寸比鼓风式更小,食品品质更好。
2017	L. Otero 等 ^[56]	蟹棒	采用 CAS 对样品冻结,频率为 6 ~ 59 Hz,强度小于 2 mT,温度为 - 20 ℃。	在冻结以后对采用 CAS 和鼓风式的样品分析,无明显差异。
2015	Xin Ying 等 ^[57]	—	介绍了高压辅助冻结,脱水冻结,超声辅助等方式。	表明高压冻结能促进均匀成核,脱水冻结能减少组织破坏,超声对初始成核等有效果。
2016	J. Evans ^[58]	—	介绍了超声辅助、脱水冻结、成核蛋白等方法。	表明脱水冻结、成核蛋白等方式能够在一定程度上缩短冻结时间。

3 冻结过程的模拟方法

采用实验方法研究冻结过程耗费大量的时间和资源,且不具有普适性,所以通过精确的模拟计算预测整个冻结过程受到了广泛关注。食品冻结过程较复杂,由于该过程发生在一个温度区间,有大量潜热释放,导热系数等热物理性质均有可能发生变化,很难找到一种统一的方式来描述整个冻结过程。目前对于一些比较复杂的问题,数值方法的

应用较为广泛^[59]。

3.1 数值方法

在数值模拟中,离散方式的选择很重要。最常见的离散方式为有限差分法、有限元法和有限体积法。当物料的形状较规则时,有限差分法由于速度更快,是一种较好的选择。Wang Guiqiang 等^[60]为了简化分析,将食品作为无限大平板进行处理,采用有限差分法模拟了食品的传热过程。当食品的形状较复杂时,有限差分法不再适用,而有限元法非常适用于热

物理参数变化的物理过程,能够较精确的预测性质随时间的变化,对于非线性问题,如具有复杂形状或不均匀的食品也适用。M. V. Santos 等^[61]采用有限元法模拟了烘焙类产品的冻结过程,又采用有限元法建立模型预测了蘑菇的冻结时间^[62],此外,B. M. Nicolai 等^[63]对具有不确定参数的传热问题进行了模糊有限元分析。但有限元法也有一定的缺陷,它对计算机硬件要求很高,且计算速度较慢。有限体积法也是解决复杂对象的一种方式,当对象的形状不能用正交网格代表时,可以使用有限体积法,它在简化和稳定性方面具有较大优势。N. O. Moraga 等^[64]研究对比了有限差分法和有限体积法,结果表明有限体积法能够更好的模拟整个冻结过程,对冻结时间的预测更加精确。3 种不同的离散方式的对比如表 4 所示。

表 4 不同离散方法的对比

Tab. 4 Comparison of different discretization methods		
离散方法	优点	缺点
有限差分法	有效且方便,运用于规则的形状。	不适用于复杂形状,存在收敛问题。
有限元法	适用于复杂形状和不均匀食品以及变参数的情况。	计算速度较慢且对计算机要求较高。
有限体积法	适用于复杂形状,简化并且稳定。	对计算机要求较高。

3.2 模拟中的特殊处理

在冻结过程中,潜热和热物性的变化等增加了整个模拟过程的难度,相应的解决方式如图 4 所示。

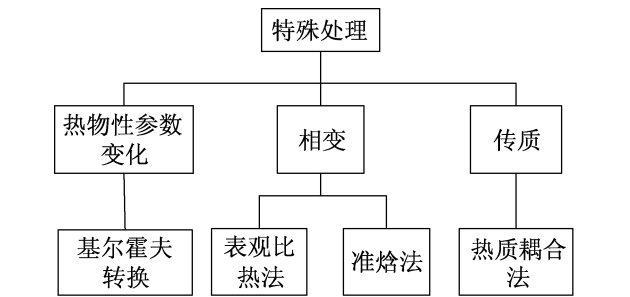


图 4 模拟中的特殊处理方式

Fig. 4 Special treatment methods in simulation

在基尔霍夫转换中,所有的非线性参数都归结于一个因素,解决了不同温度节点的取值问题。M. V. Santos 等^[62]运用基尔霍夫转换和热焓法相结合将传热微分方程改为偏微分方程,在解决相变问题时具有很大的优越性。但它在模拟不同材料的边界时会产生一定问题^[65]。

表观比热法将潜热像显热一样加到比热这一项中建立模型。但这样处理后比热不再连续变化,在冰点附近,比热出现峰值,导致潜热总是低于实际值而温度总是高于实际值,因此如何得到合适的比热是一个很大的挑战,但它在解决相变问题时十分有效,所以被广泛应用于商业模拟软件中。

处理相变问题时的另一种方法是将传热方程中的扩散项转变为焓的形式。热焓法的收敛速度很慢,另外焓和温度不是线性关系,通过插值法得到的焓不精确。为了简化这种方法,Q. T. Pham^[66]提出准焓法,该方法避免了复杂的迭代过程,并可应用于广泛的对象中。该方法中最重要的步骤是温度修正和比热的估计。Zhang Yizhou 等^[67]分别采用了热焓法和准焓法研究了相变材料的传热问题,结果发现采用准焓法比热焓法能够更加有效处理传热问题,且精确度更好。

在冻结过程中,质量的传递对食品质量有很大影响。在多孔食品中的质量传递比无孔食品快,其主要机理是蒸气扩散。N. Hamdami 等^[68]建立了数值模型来模拟表面水分蒸发的热质耦合,预测结果与实验结果吻合良好。与多孔食品不同的是,无孔食品在冻结过程中,水分的变化仅发生在与表层相邻的很薄的边界层中,当表面冻结以后,内部的扩散就停止了。为了能够精确描述这一过程,提出了双网格法。F. J. Trujillo 等^[69]为了研究牛肉的冻结过程,单独建立了研究表面水分变化的一维网格,很好地解决了水分扩散的问题。

近年来,学者们提出了不同的数值模拟技术来模拟冻结过程,主要研究内容如表 5 所示,数值模拟技术在预测冻结时间^[5]与机械应力^[78]、计算热物理参数^[79]及预测水分含量的变化上均得到应用。随着进一步的深入研究,这一技术将获得更大的发展。

4 结论与展望

在冻结的 3 个阶段中,冰晶形成阶段对食品品质的影响较大,为了得到更高品质的食品,未来对以下几个方面需要进一步研究:

- 1) 对于不同食品,由于结构组成、冻结特性和冻结要求各不相同,需要更多研究来对比不同冻结方法对同一食品品质的影响,从而建立常见食品与最佳冻结方法的联系库。
- 2) 就现有研究而言,各种辅助方法均具有一定的局限性,适用条件和产品类型有限,很多研究还存在一定的争议,还需要更为精确的实验及模拟来探索宏观和微观机理。

表 5 模拟方法的应用
Tab.5 Applications of the simulation methods

时间	作者	对象	方法	目的	结论
2005	S. E. Zorrilla 等 ^[70]	食品	多孔介质模型	研究浸渍式冻结的传热。	建立了预测浸渍式食品冻结传热传质规律。
2005	M. E. Agnelli 等 ^[71]	苹果	有限体积与准焓法	模拟冻结过程中的热量传递。	模型与实际情况吻合很好。
2007	R. C. Martins 等 ^[72]	草莓	果肉、维管、空隙三层有限元模型	研究草莓的过冷过程。	模型与实际情况吻合很好。
2008	K. T. Chang 等 ^[73]	盐溶液	分子动力学模拟	研究磁场对不同浓度盐溶液的影响。	高浓度溶液中氢键减少,低浓度溶液中氢键被加强。
2009	T. Norton 等 ^[74]	凝胶、土豆	有限差分、准焓法	研究在高压下的冻结传热过程。	高压辅助冻结时间更短,与实验相吻合。
2009	Q. T. Pham 等 ^[75]	牛肉	二维有限元以及单独的一维模型	研究热量传递和表面的质传递。	可用于预测食品热负荷,质量损失,温度以及表面水分活性等。
2011	M. V. Santos 等 ^[62]	蘑菇	有限元、基尔霍夫与焓法的联合	预测冻结时间,解决非线性问题。	温度预测曲线能够与实际吻合,可用来预测不同外部流体温度下的冻结时间。
2013	周子鹏 ^[40]	猪肉	有限差分法	考虑对流换热和热物性参数的变化。	磁场对宏观的对流换热系数以及相变潜热等有影响。
2014	杨小梅 ^[76]	对虾	二维有限元模型	研究对虾的温度变化。	模型的预测结果与实验测得的温度变化一致。
2015	D. Stevens 等 ^[77]	土豆	有限差分、基尔霍夫转换、无网格法	解决变物性引起的非线性问题。	模型很好的预测食品中由液态向固态转变的过程。

3)数值模拟技术的应用为食品速冻的发展提供了新方法,模型的建立节约了大量的时间和资源成本,但对于复杂对象而言,模拟和实验的结果还存在一定的偏差,模型的简化及采用的方法需要进一步完善。因此,通过模拟优化速冻过程参数,并指导实验探究,得到更高品质的食品,满足广大消费者的需要,促进食品行业的发展。

本文受北京市科技计划课题(Z171100001317016)项目资助。(The project was supported by the Beijing Science and Technology Plan Project (No. Z171100001317016).)

参考文献

[1] ZEUTHEN P. Thermal processing and quality of foods[J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 1984, 32(971):178.

[2] 叶琼娟,余铭,张全凯,等. 速冻技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 农产品加工·学刊, 2012(12): 97 – 100. (YE Qiongjuan, YU Ming, ZHANG Quankai, et al. The application of quick-frozen technology in food engineering[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012(12): 97 – 100.)

[3] SMITH P G. An introduction to food process engineering [M]. Springer, Boston, MA, 2011.

[4] OWADA N, KURITA S. Super-quick freezing method and apparatus therefor: 6250087[P]. 2001 – 06 – 26.

[5] WANG Zhengfu, WU Han, ZHAO Guanghua, et al. One-dimensional finite-difference modeling on temperature history and freezing time of individual food[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(2): 502 – 510.

[6] HO S Y. A turbulent conjugate heat-transfer model for freezing of food products [J]. Journal of Food Science, 2004, 69(5): 224 – 231.

[7] TRUJILLO F J, PHAM Q T. A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 998 – 1009.

[8] TRUJILLO F J, PHAM Q T. CFD modeling of simultaneous heat and mass transfer in beef chilling[M]//Computational Fluid Dynamics in Food Processing. Boca Raton: CRC Press, 2007: 216 – 242.

[9] MORAGA N O, MEDINA E E. Conjugate forced convection and heat conduction with freezing of water content in a plate shaped food [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(1): 53 – 67.

[10] SUN Dawen. Handbook of frozen food processing and packaging[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

[11] JEREMIAH L E. Freezing effects on food quality[M]. Bo-

- ca Raton; CRC Press, 1996.
- [12] 曾善明. 变温平面网带速冻机的能量分析及实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2012. (ZENG Shanming. Energy analysis and experimental study of multi temperatures plane net belt quick freezers[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2012.)
- [13] AHMAD S, YAGHMAEE P, DURANCE T. Optimization of dehydration of lactobacillus salivarius using radiant energy vacuum[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(3): 1019–1027.
- [14] ANUJ G. Short review on controlled nucleation[J]. International Journal of Drug Development and Research, 2015, 4(3): 35–40.
- [15] KIANI H, SUN D W. Water crystallization and its importance to freezing of foods: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(8): 407–426.
- [16] SACLIER M, PECZALSKI R, ANDRIEU J. A theoretical model for ice primary nucleation induced by acoustic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17(1): 98–105.
- [17] 洪乔获. 馒头变温速冻过程的数值模拟与实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014. (HONG Qiaodi. Numerical simulation and experiment on multi-temperature quick-frozen process of steamed bread[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.)
- [18] 黄忠民, 齐国强, 艾志录, 等. 液氮冷媒介质对速冻饺子冻裂率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 278–283. (HUANG Zhongmin, QI Guoqiang, AI Zhilu, et al. Effect of liquid nitrogen frozen on dumpling frost crack rate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 278–283.)
- [19] 余世锋. 液氮速冻技术在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业, 2013(1): 150–153. (YU Shifeng. Research progress of the application of liquid nitrogen quick freezing technology in foods[J]. The Food Industry, 2013(1): 150–153.)
- [20] KIM Y H, LIESSE C, KEMP R, et al. Evaluation of combined effects of ageing period and freezing rate on quality attributes of beef loins[J]. Meat Science, 2015, 110: 40–45.
- [21] LE-BAIL A, CHAPLEAU N, LAMBALLERIE M A D, et al. Evaluation of the mean ice ratio as a function of temperature in a heterogeneous food: application to the determination of the target temperature at the end of freezing[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(5): 816–821.
- [22] XU Baoguo, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Effect of ultrasound immersion freezing on the quality attributes and water distributions of wrapped red radish[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(6): 1366–1376.
- [23] XU Baoguo, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Influence of power ultrasound on ice nucleation of radish cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46: 1–8.
- [24] CHENG Xinfeng, ZHANG Min, ADHIKARI B, et al. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 49–55.
- [25] CHOW R, BLINDT R, CHIVERS R, et al. A study on the primary and secondary nucleation of ice by power ultrasound[J]. Ultrasonics, 2005, 43(4): 227–230.
- [26] DODDS J, ESPITALIER F, LOUISNARD O, et al. The effect of ultrasound on crystallization-precipitation processes: some examples and a new segregation model[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2007, 24(1): 18–28.
- [27] SACLIER M, PECZALSKI R, ANDRIEU J. Effect of ultrasonically induced nucleation on ice crystals' size and shape during freezing in vials[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(10): 3064–3071.
- [28] ZHANG X, INADA T, TEZUKA A. Ultrasonic-induced nucleation of ice in water containing air bubbles[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(2): 71–76.
- [29] HU Songqing, LIU Guang, LI Lin, et al. An improvement in the immersion freezing process for frozen dough via ultrasound irradiation[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(1): 22–28.
- [30] DELGADO A E, ZHENG Liyun, SUN Dawen. Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 2(3): 263–270.
- [31] XANTHAKIS E, HAVET M, CHEVALLIER S, et al. Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 115–120.
- [32] AMMAR J B, LANOISELLÉ J L, LEOVKA N I, et al. Effect of a pulsed electric field and osmotic treatment on freezing of potato tissue[J]. Food Biophysics, 2010, 5(3): 247–254.
- [33] MOK J H, CHOI W, PARK S H, et al. Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 50: 137–145.
- [34] BARBA F J, PARNIAKOV O, PEREIRA S A, et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry[J]. Food Research International, 2015, 77: 773–798.
- [35] WOO M W, MUJUMDAR A S. Effects of electric and

- magnetic field on freezing and possible relevance in freeze drying[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(4): 433–443.
- [36] KIM Y B, WOO S M, JEONG J Y, et al. Temperature changes during freezing and effect of physicochemical properties after thawing on meat by air blast and magnetic resonance quick freezing[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2013, 33(6): 763–771.
- [37] JAMES C, REITZ B, JAMES S J. The freezing characteristics of garlic bulbs (*Allium sativum* L.) frozen conventionally or with the assistance of an oscillating weak magnetic field[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(3): 702–708.
- [38] 王鹏飞. 电磁场对细胞冻结特性的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2015. (WANG Pengfei. The effect of electromagnetic field on cell freezing properties[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015.)
- [39] 娄耀邦. 静磁场对食品冷冻过程影响的实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2014. (LOU Yaojia. Experimental study of static magnetic field effect on food freezing process[D]. Jinan: Shandong University, 2014.)
- [40] 周子鹏. 弱磁场对食品冻结过程影响的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013. (ZHOU Zipeng. Study on the effect of weak magnetic field on the freezing process of food[D]. Jinan: Shandong University, 2013.)
- [41] 周子鹏, 赵红华, 赵红霞, 等. 交变磁场对水及生理盐水过冷过程的影响[J]. *高校化学工程学报*, 2013, 27(2): 205–209. (ZHOU Zipeng, ZHAO Honghua, ZHAO Hongxia, et al. The effects of alternating magnetic fields on supercooling phenomena of water and physiological saline[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2013, 27(2): 205–209.)
- [42] LEBAIL A, CHEVALIER D, MUSSA D M, et al. High pressure freezing and thawing of foods: a review[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(5): 504–513.
- [43] XU Zhiqiang, GUO Yunhan, DING Shenghua, et al. Freezing by immersion in liquid CO₂ at variable pressure: response surface analysis of the application to carrot slices freezing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 22: 167–174.
- [44] FERNÁNDEZ P P, OTERO L, GUIGNON B, et al. High-pressure shift freezing versus high-pressure assisted freezing: effects on the microstructure of a food model[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(4): 510–522.
- [45] XANTHAKIS E, LE-BAIL A, RAMASWAMY H. Development of an innovative microwave assisted food freezing process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 26: 176–181.
- [46] ANESE M, MANZOCCO L, PANOZZO A, et al. Effect of radiofrequency assisted freezing on meat microstructure and quality[J]. *Food Research International*, 2012, 46(1): 50–54.
- [47] RAMALLO L A, MASCHERONI R H. Dehydrofreezing of pineapple[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(3): 269–275.
- [48] JAMES C, PURNELL G, JAMES S J. A critical review of dehydrofreezing of fruits and vegetables[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(5): 1219–1234.
- [49] HASSAS-ROUDSARI M, GOFF H D. Ice structuring proteins from plants: mechanism of action and food application[J]. *Food Research International*, 2012, 46(1): 425–436.
- [50] YEH C M, KAO B Y, PENG H J. Production of a recombinant type 1 antifreeze protein analogue by *L. lactis* and its applications on frozen meat and frozen dough[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(14): 6216–6223.
- [51] SOUKOULIS C, FISK I. Innovative ingredients and emerging technologies for controlling ice recrystallization, texture, and structure stability in frozen dairy desserts: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(15): 2543–2559.
- [52] PAN Jinfeng, SHEN Huixing, LUO Yongkang. Cryoprotective effects of trehalose on grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi during frozen storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2010, 34(4): 715–727.
- [53] JAMES C, PURNELL G, JAMES S J. A review of novel and innovative food freezing technologies[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(8): 1616–1634.
- [54] OTERO L, SANZ P D. High-pressure-shift freezing: main factors implied in the phase transition time[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 72(4): 354–363.
- [55] CHOI Y S, KU S K, JEONG J Y, et al. Changes in ultrastructure and sensory characteristics on electro-magnetic and air blast freezing of beef during frozen storage[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2015, 35(1): 27–34.
- [56] OTERO L, PÉREZ-MATEOS M, RODRÍGUEZ A C, et al. Electromagnetic freezing: effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 200: 87–94.
- [57] XIN Ying, ZHANG Min, XU Baoguo, et al. Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: a review[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 57: 11–25.
- [58] EVANS J. Emerging refrigeration and freezing technologies for food preservation[J]. *Innovation and Future Trends in*

- Food Manufacturing and Supply Chain Technologies, 2016, 12: 175–201.
- [59] LEMUS-MONDACA R A, VEGA-GÁLVEZ A, MORAGA N O. Computational simulation and developments applied to food thermal processing[J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3(3/4): 121–135.
- [60] WANG Guiqiang, ZOU Pinghua. Mathematical modeling of food freezing in air-blast freezer[J]. International Journal of Materials, Machine and Manufacturing, 2014, 2(4): 142.
- [61] SANTOS M V, VAMPA V, CALIFANO A, et al. Numerical simulations of chilling and freezing processes applied to bakery products in irregularly 3D geometries[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 32–42.
- [62] SANTOS M V, LESPINARD A R. Numerical simulation of mushrooms during freezing using the FEM and an enthalpy: kirchhoff formulation[J]. Heat and Mass Transfer, 2011, 47(12): 1671.
- [63] NICOLAI B M, EGEE J A, SCHEERLINCK N, et al. Fuzzy finite element analysis of heat conduction problems with uncertain parameters[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(1): 38–46.
- [64] MORAGA N O, VEGA-GÁLVEZ A, LEMUS-MONDACA R. Numerical simulation of experimental freezing process of ground meat cylinders[J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 7(6): 639–646.
- [65] PHAM Q T. Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 876–888.
- [66] PHAM Q T. A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, 28(11): 2079–2084.
- [67] ZHANG Yizhou, DU Kai, HE Jiapeng, et al. Impact factors analysis of the enthalpy method and the effective heat capacity method on the transient nonlinear heat transfer in phase change materials (PCMs) [J]. Numerical Heat Transfer, 2014, 65(1): 66–83.
- [68] HAMDAMI N, MONTEAU J Y, BAIL A L. Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(6): 595–603.
- [69] TRUJILLO F J, PHAM Q T. Modelling the chilling of the leg, loin and shoulder of beef carcasses using an evolutionary method [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(2): 224–231.
- [70] ZORRILLA S E, RUBIOLO A C. Mathematical modeling for immersion chilling and freezing of foods: part I: model development[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 339–351.
- [71] AGNELLI M E, MARANI C M, MASCHERONI R H. Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(4): 415–424.
- [72] MARTINS R C, LOPES V V. Modelling supercooling in frozen strawberries: experimental analysis, cellular automation and inverse problem methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 126–141.
- [73] CHANG Kaitai, WENG Cheng. An investigation into the structure of aqueous NaCl electrolyte solutions under magnetic fields[J]. Computational Materials Science, 2008, 43(4): 1048–1055.
- [74] NORTON T, DELGADO A, HOGAN E, et al. Simulation of high pressure freezing processes by enthalpy method[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 260–268.
- [75] PHAM Q T, TRUJILLO F J, MCPHAIL N. Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1): 102–113.
- [76] 杨小梅. 对虾冷冻过程的温度分析及其数值模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2014. (YANG Xiaomei. Temperature analysis and numerical simulation of shrimp freezing process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [77] STEVENS D, Rocca A L, POWER H, et al. Estimating the temperature evolution of foodstuffs during freezing with a 3D meshless numerical method[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 53: 46–55.
- [78] CHOI W, JUN S. Measurement of structural shrinkages of freeze dried chipping potatoes for crack modeling[J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(4): 967–972.
- [79] SIMPSON R, CORTÉS C. An inverse method to estimate thermophysical properties of foods at freezing temperatures: apparent volumetric specific heat[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(1): 89–96.

通信作者简介

邵双全,男,博士,副研究员,中国科学院理化技术研究所,(010)82543433,E-mail:shaoshq@mail.ipc.ac.cn。研究方向:高效热湿环境控制、复杂制冷系统仿真与优化、数据中心与电子产品冷却、冷链技术与装备和气动噪音控制。

About the corresponding author

Shao Shuangquan, male, Ph. D., associate professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, +86 10-82543433, E-mail: shaoshq@mail.ipc.ac.cn. Research fields: efficient thermal and humidity control, simulation of complex refrigeration and air conditioning system, cooling of electronics and data center, cold chains and noise control.