

研究进展

计算流体力学技术在食品冷藏链中的应用

汪磊^a, 谢晶^b

(上海海洋大学 a.食品学院; b.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: **目的** 综述国内外计算流体力学(CFD)在食品冷藏链中的应用现状。**方法** 分类讨论 CFD 在食品冷藏链中预冷、冷冻、冷藏、冷藏运输 4 个环节中的应用。**结果** 归纳总结了 CFD 在食品冷链设备中的应用研究与进展, 并指出了今后的发展方向。**结论** CFD 数值模拟技术在食品冷藏链中得到了广泛的应用, 通过 CFD 数值模拟技术对冷链设备中的流场进行模拟分析, 对冷链设备的优化与降低设备能耗具有重要意义。

关键词: 计算流体力学; 冷藏链; 预冷; 冷冻; 冷藏运输

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0118-06

Application of Computational Fluid Dynamics Technology in Food Cold Chain

WANG Lei^a, XIE Jing^b

(Shanghai Ocean University a.College of Food Science and Technology;

b.Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing and Preservation, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to review the present situation of CFD's (Computational fluid dynamics) application in the food cold chain at home and abroad. The application of CFD in four stages of food cold chain: pre-freezing, freezing, cold storage and refrigerated transportation was discussed by classification. The researches and development of the application of CFD in food cold chain equipment were summarized, and the future development direction was pointed out. CFD numerical simulation technology is widely applied in the food cold chain and the flow field in the cold chain equipment is simulated and analyzed through CFD numerical simulation technology, which provides important significance for the optimization of cold chain equipment and the reduction of equipment energy consumption.

KEY WORDS: CFD; cold chain; pre-freezing; freezing; refrigerated transportation

食品冷藏链是指易腐败食品在生产、贮藏、运输、销售流通的整个过程中始终处于合适的低温环境下, 以最大限度保证食品原有品质、减少食品损耗为目的的一项系统工程^[1]。现代研究者们通过 CFD 数值模拟技术模拟食品在冷链设备中的冻结时间以及在冻结过程中冷链设备内部流场与温度场的变化, 以此为基础进行设备优化, 使冷链设备中温度场与流场在其内部均匀分布, 这对保障食品质量以及降低冷链设备能耗具有重要意义^[2]。

计算流体力学是流体力学的一个分支, 它利用计算机技术来模拟流体流动及传热传质过程。近年来,

CFD 在食品加工过程的传热传质研究中得到了广泛的应用^[3-5], 如用于模拟食品冷冻、冷却装备中的流场, 以及冷却过程中越来越多的食品传热过程^[6-7]。

1 CFD 数值模拟技术在食品预冷中的应用

预冷是冷藏链比较关键的环节, 它可以快速除去果蔬田间热, 降低采摘后果蔬的新陈代谢速度, 延长贮藏期, 对保持果蔬品质及延缓成熟衰老进程有着重要作用。预冷方式主要有水预冷、冷库预冷、真空预冷、差压预冷。为了比较不同预冷方式的差异, 王达

收稿日期: 2016-08-20

基金项目: 2015 年度国家星火计划 (2015G680007); 2016 年上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2016)第 1-1 号]; 上海市科委平台能力提升项目 (16DZ2280300)

作者简介: 汪磊 (1991—), 男, 上海海洋大学硕士生, 主攻船用金枪鱼超低温加工关键技术。

通讯作者: 谢晶 (1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授、博导, 主要研究方向为食品冷链物流。

等^[8]以雪青梨为对象建立了仿真模型,采用 TGrid 非结构化网格对模型区域进行网格划分,对差压预冷采用 $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法,冷库预冷采用 $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法,低湍流强度,冰水预冷采用导热模型,利用 Fluent 软件模拟了在差压预冷、冷库预冷、水预冷 3 种预冷方式下雪青梨从 26 °C 降温至 3 °C 时冷却时间、质量损失率、冷却均匀性的差异,并进行了实验验证,显示理论结果与实验结果相一致,验证了理论模型的可靠性,提出了对大批雪青梨预冷时采用差压预冷的建议。王强等^[9]以黄金梨为研究对象,通过建立仿真模型,采用 $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法,利用 CFD 对包装箱内直排和叉排 2 种摆放形式的黄金梨预冷过程进行模拟,分析了不同送风速度、包装箱开孔形式及其开孔大小等参数对黄金梨预冷过程的影响,并进行了实验验证,结果表明该模型较好地反映了差压通风预冷过程中各参数对预冷效果的影响。陈秀琴等^[10]利用 Fluent 软件,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法模拟了以包装箱侧面上开孔率为 11.2% 的圆形、键槽形 2 种开孔工况,间隔、平方间隔和错位间隔 3 种排列方式下果品的瞬态温度场。韩佳伟等^[11]以 2 层瓦楞纸包装箱包装的富士苹果为研究对象,模拟了苹果预冷过程中在不同的送风温度下箱体内部温度分布情况,模拟结果与实验结果较吻合。以上研究并没有探讨食品所处的空间位置对预冷过程中食品温度变化的影响,因此孟志峰等^[12]以龙眼为对象,采用有限元数值分析方法研究冷风温度和速度对小型包装箱内龙眼预冷过程的影响,探讨不同时间、不同空间位置的龙眼温度变化,并进行验证,结果表明数值模拟可以较好地反映实验结果。

上述研究成果表明 CFD 可以较为准确地模拟出食品冷却时的传热过程,为研究食品冷却过程提供了新途径。然而,国内外采用 CFD 在食品预冷方面的研究对象以蔬果类食品居多,而对于研究肉类预冷的相关文献不多,另外还有空气预冷、水预冷、冰预冷等预冷技术,当采用这些预冷技术对食品进行预冷时,其冷却过程中温度场与流场的变化有待进一步研究。

2 CFD 数值模拟技术在食品冻结中的应用

食品冻结是最主要的食品保鲜加工技术之一,通过冷冻降低食品的温度,抑制食品中微生物的繁殖并降低其中酶的活性,从而延缓食品的变质,达到延长食品贮藏期的目的。然而食品的冻结速率及温度会影响食品的品质,也是设计和评价一个冻结设备性能优劣的重要依据,而且传热边界条件、食品形状多样性及其不均匀性等因素也会影响食品的冻结过程^[13]。预测食品冻结时间需要根据食品冻结过程中传热传质特性,建立适当的预测模型,还需要获得必要的食品热物理性质参数。目前主要有简单公式法、数值模拟

和人工神经网络法等预测方法。其中简单公式法精度较低,人工神经网络法需要获得大量的原始数据。近年来,以有限体积法与有限元法发展起来的 CFD 数值模拟技术在制冷领域得到了广泛应用,数值模拟方法成本低、速度快,能模拟较复杂的工况,且模拟结果更贴近于实际,因此被广泛采用^[14]。Moraga 等^[15]将 3 种不同碎肉圆柱体在不同对流边界条件下进行冷冻,使用有限差分法和有限体积法分别预测了碎肉温度场的分布情况并进行实验验证,实验结果表明,与有限差分法相比,有限体积法能更好地模拟冻结过程,对食品冷冻时间的预测结果也更准确。Jafari 等^[16]利用 Fluent 6.0 软件采用标准 $k-\omega$ 模型,模拟食品在射流冷却过程中温度场的变化,并分析了射流孔间距、空气流速以及喷嘴到平板状食品的距离等因素对食品冻结时间的影响。在国内,李杰等^[17]利用 CFD 和 SIMPLE 算法,采用全隐式时间积分方案,对虾仁在鼓风冻结装置中的冻结过程及冻结时间进行了二维非稳态模拟,将模拟结果与实验结果进行对比发现最大温度误差为 1.5 °C,冻结时间的误差百分比为 3.8%,同时他们还还对影响食品冻结时间的吹风方式、吹风速度以及送风温度进行了模拟。李杰等^[18]以冰箱冷冻室内的土豆为研究对象,建立三维非稳态数值计算模型,选用冻结模式,引入食品热物性多项式对其进行传热分析与计算,并进行了实验验证,结果表明模拟值与实验值吻合较好。研究揭示了食品在冰箱中冻结各阶段的温度分布状态、冻结状况等,并较准确地预测了食品的冻结时间。通过数值模拟技术准确预测冷冻时间可以更好地提高冷冻食品的品质,改善冷冻装置内的温度场与流场的分布,降低冷冻装置能耗^[19],也为优化冷冻装置提供依据。

近年来 CFD 对空气流动和温度的数值模拟得到了较好的发展,研究者通过建立模型和利用 CFD 可以很好地模拟出食品冻结过程中的流场与温度场的分布,准确地控制冷冻时间,为优化冷冻装置提供了参考依据,但 CFD 数值模拟技术在汽化、升华等相变过程还未有应用。食品在冷链设备中进行冻结时,其相变过程(如凝固过程)的数值模拟还有待于进一步的研究。

3 CFD 数值模拟技术在食品冷藏中的应用

在冷藏链流通过程中,食品在冷藏室中停留时间最长,冷藏的环境温度和流场的控制与食品保藏的品质和冷库设施的能耗密切相关。研究者很难通过实验测定的方法来获得整个冷库的流场,若使用 CFD 数值模拟技术则可以很直观地观察食品在冻结过程中冷库内流场的变化^[20]。Akdemir 等^[21]使用 Ansys 14.0 软件,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型分别对直接式和冷风机 2 种

制冷方式的冷库进行数值模拟,对比分析了冷库温度场的分布情况。谢晶等^[22]以一个 $4.5\text{ m}\times 3.3\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 的实验冷库为研究对象,建立了二维紊流数值计算模型,并采用了SIMPLE算法与交错网格技术进行求解,揭示了整个冷库的流场存在一个中心大回旋流区,实验结果表明模型与实际吻合较好,在此基础上研究了冷风机出口风速、拐角挡板、货物等因素对冷库内温度场与流场的影响。为了进一步讨论风机的回风方式以及风机的安装位置等因素对冷库流场的影响,汤毅等^[23]利用CFD模拟技术预测了风机不同出回风方式、风机不同安装位置对冷库气流的影响,以及大型冷库内货物摆设间距及风机风速对货物贮存的影响。杜子峥等^[24]以 $24.3\text{ m}\times 21.6\text{ m}\times 7.2\text{ m}$ 的中型冷库为蓝本,采用多孔介质模型并运用ergun方程对货物侧进行建模,使用Fluent对模型进行非稳态模拟,研究了风机下吹型与对吹型2种风机摆放方式对该库及堆垛货物内部流场分布的影响,对比分析了主流截面、货架底部截面及货物侧面的流场。上述研究结果为冷库内冷风机的布置优化提供了参考依据,但并没有对冷库内不同的出风方式对其温度场的影响进行模拟分析。此后,胡佐新等^[25]以 $4\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 的冷藏库为研究对象,采用 $k-\varepsilon$ 方程模型,利用Fluent软件模拟了目标冷藏库在风机直吹与排气孔出风2种出风方式下不同的出风速度对冷藏库内温度场的影响,通过对模拟结果的对比发现采用新提出的排气孔出气时冷藏库内温度场的均匀性较好,整个流场的换热很少存在涡流。Hoang等^[26]通过PM与SB2种方法进行建模,利用CFD软件并采用SIMPLE算法对放满苹果货盘的冷库内气流及传热进行了初步研究。孙海婷等^[27]利用Fluent软件,采用标准湍流模型对苹果冷藏库空气的流动进行了三维数值模拟,冷库外形尺寸为 $14.845\text{ m}\times 11.929\text{ m}\times 7.453\text{ m}$,苹果堆码区作为多孔介质,通过气流场模拟能够直观显示出冷库内部的流场特征与流场状态,且模拟结果与实验值之间最大的误差在10%以内,相关系数在0.9以上,说明了CFD数值模拟的可靠性,该研究成果为商用苹果冷藏库的优化与库内环境的调节提供了理论依据。在此基础上,周轲等^[28]以尺寸为 $19.4\text{ m}\times 7.6\text{ m}\times 7.1\text{ m}$ 和 $9.4\text{ m}\times 12.1\text{ m}\times 7.1\text{ m}$ 的2个存满苹果的冷藏库为研究对象,利用CFD软件使用结构化与非结构化网格和SIMPLE算法,分析比较了这2种冷藏库的温度场并进行了试验验证,模拟结果发现不同高度间苹果的温差较大,且风机设置在长度方向上更有利于提高库内温度场分布的均匀性。Chourasia等^[29]以土豆为研究对象,时间采用一阶隐式定义,利用Fluent软件模拟了在自然对流的情况下冷库中土豆的水分与质量的流失情况,数值模拟结果与实验值吻合度较高,误差较小,并指出在最初的3 h内,冷库中包装袋内土

豆的温降为 $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷库中的冷空气会从包装袋侧面进入,最终从包装袋的顶部逸出。Chourasia等^[30]还对马铃薯的堆码方式对冷藏库内流场的影响进行了三维数值模拟,该研究成果为库内马铃薯的合理堆码方式提供了理论依据。

近年来利用CFD数值模拟技术在食品冷藏方面开展的研究较多,但是大多数都在研究温度与流速以及冷风机的布置方式与回风方式等因素对冷库流场的影响,且研究的对象大多为小型的冷藏设备与冷藏库。随着CFD数值模拟技术在冷库研究中的应用不断深入,进一步的研究可以从以下方面展开:研究最优化的货物堆码方式,提高冷库内储存的食品质量,为货架的堆放高度与冷库的合理高度提出建设性的建议;对冷库的流场进行优化,在一定程度上避免为达到冷藏库中最高温度区温度低于货物贮藏温度的要求而需设计蒸发温度降低的问题,从而实现冷藏库节能运行。

4 CFD数值模拟技术在冷藏运输中的应用

冷藏运输从食品品质和安全的角度而言是冷链中最薄弱的环节。冷藏是食品运输的主要工具之一,随着人们对新鲜食品越来越迫切的需要,对冷藏车的要求也越来越高,冷藏车内的温度波动^[31]以及温度场分布的不均匀^[32]都会导致食品品质的下降。要保证冷藏车内的温度均匀分布,对冷藏车内部环境的研究至关重要^[33]。Tapsoba等^[34]通过建立1:3.3的缩小比例模型,利用CFD模拟研究了冷藏车空载状态下的流场分布,模拟发现在高速气流区使用RSM模型比 $k-\varepsilon$ 模型计算得到的结果更加准确。和晓楠等^[35]利用Ansys软件,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型并结合合理的边界条件,对冷藏车库内的流场进行了CFD数值模拟,研究了不同送风速度对冷藏运输车内流场分布的影响以及不同时间内库内流场的变化情况。郭永刚、张哲等^[36-37]分别以外型尺寸为 $6.0\text{ m}\times 1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 的中型冷板冷藏车与车箱外型尺寸为 $4.2\text{ m}\times 1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 、冷板尺寸为 $0.8\text{ m}\times 0.04\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 、车箱外壁为80 mm的泡沫聚氨酯隔热壁的冷藏运输模拟试验台为研究对象,模拟紧密堆码与中间存在间隔的2种堆码方式对流场及温度场的影响,应用Gambit软件建立物理模型进行网格划分,并采用 $k-\varepsilon$ 模型。结果显示,中间存在间隔的堆码方式,货物表面的温度场比较均匀,这为食品在冷藏车内的堆码方式起到了一定的参考作用。韩佳伟等^[38]以 $4.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}\times 1.7\text{ m}$ 的短距离冷藏车为研究对象,土豆为实验材料,建立了车厢内部温度场分布计算模型,采用 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2种风机制冷温度,运用CFD SST $k-\omega$ 模型对不同冷风机温度与冷却时间的组合方式进行数值模拟,该研究为制冷

风机温度和冷却时间最佳组合方式的合理选择, 以及实现节能减排为降低运输成本提供了依据。冷藏车车厢内温度和湿度的分布也是影响箱体内容品质的重要因素。王以忠等^[39]以规格为 $4.0\text{ m} \times 1.75\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的冷藏车为研究对象, 车内的果蔬看作多孔介质, 应用 CFD 软件和 $k-\xi$ 紊流模型以及非稳态求解方法, 对加入货物冷藏车的温度场和湿度场进行了三维非稳态数值模拟计算, 得到了冷藏车蒸发器区、中心区、货物区以及边壁等处的温湿度分布。冷藏车作为公路冷藏运输的主要运输工具, 它的性能差异将直接影响食品的质量。在理论上 CFD 数值模拟技术为冷藏车设计与优化提供了有力的支持。工程人员通过模拟流体区域中的温度场与流场, 对改良冷链设备结构与优化内部的流场起到了一定的作用, 并为后续的改进与革新提供了理论依据^[40]。

近年来, 国内外学者利用 CFD 技术对冷藏运输装备内部流场的优化、冷藏运输装备内货物的堆放方式以及冷藏运输装备结构优化等方面进行了研究, 主要集中在箱体内冷风机的位置、送风的温度与速率、货物的堆码方式对箱体内温度场与流场的影响等。现阶段冷藏运输设备的数值模拟还停留在模型的建立与试验验证阶段, 今后的研究可以多考虑回风道、壁面拐角等因素的影响, 并可对壁面材料进行优化(如嵌入真空隔热板), 以及在节能减排上进行冷风机优化等。

5 结语

冷链冻结设备对要保鲜的食品进行冷冻、冷却时, 在对其内部流场变化的研究中, CFD 数值模拟技术已得到较广泛的应用, 但利用 CFD 进行模拟计算时, 边界条件的设置、对实际条件的理想化处理以及复杂模型的构建与网格划分都会影响到计算结果的准确性。为了使数值模拟结果更贴近于实际, 今后的研究可以从复杂模型的构建与网格划分, 湍流模型选取、改进, 多孔介质模型改进以及算法等方面进行研究与探讨, 使 CFD 数值模拟技术在食品冷链中得到更好的应用。

参考文献:

- [1] 谢晶, 邱伟强. 我国食品冷藏链的现状与展望[J]. 中国食品学报, 2013(3): 1—7.
XIE Jing, QIU Wei-qiang. Recent Situation and Development of Food Cold Chain in China[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013(3): 1—7.
- [2] LAGUERRE O, HOANG H M, FLICK D. Experimental Investigation and Modelling in the Food Cold Chain: Thermal and Quality Evolution[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 29(2): 87—97.
- [3] CORTELLA G. CFD-aided Retail Cabinets Design[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1): 43—66.
- [4] MIRADE P S, KONDOYAN A, DAUDIN J D. Three-dimensional CFD Calculations for Designing Large Food Chillers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1): 67—88.
- [5] ZHAO C J, HAN J W, YANG X T, et al. A Review of Computational Fluid Dynamics for Forced-air Cooling Process[J]. Applied Energy, 2016(8): 314—331.
- [6] AMBAW A, DELELE M A, DEFRAEYE T, et al. The Use of CFD to Characterize and Design Post-harvest Storage Facilities: Past, Present and Future[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013(3): 184—194.
- [7] 瞿晓华, 谢晶, 徐世琼. 计算流体力学在制冷工程中的应用[J]. 制冷, 2003, 22(1): 17—22.
QU Xiao-hua, XIE Jing, XU Shi-qiong. Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in Refrigeration[J]. Refrigeration, 2003, 22(1): 17—22.
- [8] 王达, 刘升, 王强, 等. 雪青梨在不同预冷方式下数值模拟与试验研究[J]. 制冷与空调, 2015, 35(12): 77—81.
WANG Da, LIU Sheng, WANG Qiang, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Xueqing Pear under Different Pre-cooling Methods[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2015, 35(12): 77—81.
- [9] 王强, 陈焕新, 董德发, 等. 黄金梨差压通风预冷数值分析与实验验证[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 262—266.
WANG Qiang, CHEN Huan-xin, DONG De-fa, et al. Numerical Analysis and Experimental Verification of Pressure-pre-Cooling of Golden Pears[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 262—266.
- [10] 陈秀勤, 卢立新, 王军. 包装箱内层装果品差压预冷温度场的数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 249—257.
CHEN Xiu-qin, LU Li-xin, WANG Jun. Numerical Simulation and Experimental Verification of Forced-air Precooling Temperature Field inside Fruit Packaging Box with Multiple-layer Grids[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 249—257.
- [11] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 280—289.
HAN Jia-wei, ZHAO Chun-jiang, YANG Xin-ting, et al. Effect of Air-inflow Velocity on Cooling Efficiency during Forced-air Precooling of Apple[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 280—289.

- [12] 孟志锋, 沈五雄, 向红, 等. 小型包装箱内龙眼果实预冷过程数值模拟研究[J]. 食品科学, 2010(12): 288—292.
MENG Zhi-feng, SHEN Wu-xiong, XIANG Hong, et al. Numerical Simulation of Pre-cooling Process of Longan in Small Packing Box[J]. Food Science, 2010 (12): 288—292.
- [13] 成芳, 杨小梅, 由昭红, 等. 食品冷冻过程的数值模拟技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 162—170.
CHENG Fang, YANG Xiao-mei, YOU Zhao-hong, et al. Application of Numerical Simulation in the Research of Food Freezing Process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (7): 162—170.
- [14] 李杰, 谢晶, 张珍. 食品冻结时间预测方法的研究分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(23): 78—81.
LI Jie, XIE Jing ZHANG Zhen. Analysis of Forecasting Methodology of Freezing Time in Food[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(23): 78—81.
- [15] 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): 56—58.
- [16] JAFARI M, ALAVI P. Effect of Some Parameters on Freezing Time of Slab Shaped Foods under Two Impinging Slot Jets[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(12): 2234—2241.
- [17] 李杰, 谢晶. 鼓风冻结虾仁时间的数值模拟及实验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 248—252.
LI Jie, XIE Jing. Numerical Simulation of Freezing Time of Shelled Shrimps in an Air Blast Freezer and Experimental Verification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 248—252.
- [18] 李杰, 谢晶, 陆方娟. 食品冻结过程温度场及冻结时间的数值模拟与实验研究[J]. 食品工业科技, 2009(2): 123—125.
LI Jie, XIE Jing, LU Fang-Juan. Numerical Simulation and Study on Temperature Field and Freezing Time in Food-Frozen Processing[J]. Science & Technology of Food Industry, 2009(2): 123—125.
- [19] WANG L, ZHANG L, LIAN G. A CFD Simulation of 3D Air Flow and Temperature Variation in Refrigeration Cabinet[J]. Procedia Engineering, 2015(2): 1599—1611.
- [20] NAHOR H B, HOANG M L, VERBOVEN P, et al. CFD Model of the Airflow, Heat and Mass Transfer in Cool Stores[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 368—380.
- [21] AKDEMIR S, OZTURK S, EDIS F O, et al. CFD Modelling of Two Different Cold Stores Ambient Factors[J]. IERI Procedia, 2013(5): 28—40.
- [22] 谢晶, 瞿晓华, 徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 11—16.
XIE Jing, QU Xiao-hua, XU Shi-qiong. Numerical Simulation and Verification of Airflow in Cold-store[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 11—16.
- [23] 汤毅. 计算流体力学(CFD)技术用于冷库气流优化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
TANG Yi. Application of Computational Fluid Dynamics to Air Flow Optimization for the Cold Store[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013.
- [24] 杜子峥, 谢晶, 朱进林. 数值模拟技术预测风机两种摆放方式对冷库堆垛货物的影响[J]. 食品与机械, 2015(3): 145—149.
DU Zi-zheng, XIE Jing, ZHU Jin-lin. Effects of Two Different Fans Arrangement on Stacking Cargo in Cold Store Based on Numerical Simulation[J]. Food and Machinery, 2015(3): 145—149.
- [25] 胡佐新, 黄爽, 高欣, 等. 不同出风方式对冷库温度分布的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016(1): 10.
HU Zuo-xin, HUANG Shuang, GAO Xin, et al. Influence of Different Air Outlet on the Cold Storage Temperature Distribution[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2016(1): 10.
- [26] HOANG H M, DURET S, FLICK D, et al. Preliminary Study of Airflow and Heat Transfer in a Cold Room Filled with Apple Pallets: Comparison between Two Modelling Approaches and Experimental Results[J]. Applied Thermal Engineering, 2015(6): 367—381.
- [27] 孙海婷, 周轲, 杨艳青, 等. 利用 CFD 模型研究苹果冷藏库内的空气流动[J]. 保鲜与加工, 2014, 14(4): 27—33.
SUN Hai-ting, ZHOU Ke, YANG Yan-qing, et al. Air-flow Simulation in Apple Cold Storage Using CFD Model[J]. Storage and Process, 2014, 14(4): 27—33.
- [28] 周轲, 王瑞华, 孙海婷, 等. CFD 模拟两种风机位置的苹果冷藏库的温度场[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 75—79.
ZHOU Ke, WANG Rui-hua, SUN Hai-ting, et al. Simulation on the Temperature Field of the Two Fan Solution in Cool Store Based on CFD[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 75—79.
- [29] CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Three Dimensional Modeling on Airflow, Heat and Mass Transfer in Partially Impermeable Enclosure Containing Agricultural Produce during Natural Convective Cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2136—2149.
- [30] CHOURASIA M K, SARA R, DE A, et al. Evaluation of Storage Losses in a Commercial Potato Cold Storage[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2004, 41(5): 507—510.
- [31] MARGEIRSSON B, LAUZON H L, PÁLSSON H, et al. Temperature Fluctuations and Quality Deterioration

- of Chilled Cod (*Gadus Morhua*) Fillets Packaged in Different Boxes Stored on Pallets Under Dynamic Temperature Conditions[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(1): 187—201.
- [32] MAI N T T, MARGEIRSSON B, MARGEIRSSON S, et al. Temperature Mapping of Fresh Fish Supply Chains-air and Sea Transport[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2012, 35(4): 622—656.
- [33] 王文文. 冷藏车保温材料对内部环境影响的模拟研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
WANG Wen-wen. The Numerical Simulation about the Impact of the Internal Environment with the Refrigerated Truck's Insulation Material[D]. Beijing: Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [34] TAPSOBA M, MOUREH J, FLICK D. Airflow Patterns in an Enclosure Loaded with Slotted Pallets[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(6): 899—910.
- [35] 和晓楠. 冷藏运输车流场分析及运输过程对蔬菜品质影响研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2010.
HE Xiao-nan. Flow Field Analysis of Refrigerated Transport Vehicle and Study on the Influence of Transportation Condition on Vegetable Quality[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2010.
- [36] 郭永刚. 冷板冷藏车内温度场及其对蔬菜品质影响的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014.
GUO Yong-gang. Research on Temperature Field Distribution of Cold Plate Refrigerated Truck and Effects on Preservation of Vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.
- [37] 张哲, 郭永刚, 田津津, 等. 冷板冷藏汽车箱体内部温度场的数值模拟及试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(25): 18—24.
ZHANG Zhe, GUO Yong-gang, TIAN Jin-jin, et al. Numerical Simulation and Experiment of Temperature Field Distribution in Box of Cold Plate Refrigerated Truck[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(25): 18—24.
- [38] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于CFD数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 55—62.
HAN Jia-wei, ZHAO Chun-jiang, YANG Xin-ting, et al. Comparison of Combination Mode of Energy Conservation for Refrigerated Car Based on CFD Numerical Simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 55—62.
- [39] 王以忠, 胡春园, 陈绍慧, 等. 冷藏车内温度场和湿度场的数值模拟研究[J]. *保鲜与加工*, 2010(3): 26—29.
WANG Yi-zhong, HU Chun-yuan, CHEN Shao-hui, et al. Study on Numerical Simulation of Temperature and Humidity Fields in a Refrigerated Vehicle[J]. *Storage & Process*, 2010(3): 26—29.
- [40] 栗栋, 李君, 王海林, 等. 计算流体力学在贮运保鲜装备研发中的应用进展[J]. *食品工业*, 2015, 36(1): 214—218.
LI Dong, LI Jun, WANG Hai-lin, et al. Progress in the Application of Computational Fluid Dynamics for Refrigerated Storage and Transportation Equipment[J]. *Food Industry*, 2015, 36(1): 214—218.