

冷链物流研究中的计算流体力学数值模拟技术*

赵春江^{1,2} 韩佳伟^{1,2} 杨信廷¹ 钱建平¹ 刘寿春¹

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 北京工业大学计算机学院, 北京 100124)

摘要: 随着计算流体力学数值模拟技术的不断成熟,精确性和可靠性的不断提高,近年来在农产品冷链物流中得到广泛的应用,对提高冷藏类食品所需低温环境的温度均匀性、确定货物堆栈方式、合理控制制冷时间、以及对提高整体冷链物流经济效益都具有重要意义。本文具体阐述了计算流体力学数值模拟技术的前处理、求解和后处理3个阶段,并回顾该技术应用在农产品冷链物流存储、运输和销售过程中的研究进展,分析归纳了存在的优势和不足,展望了计算流体力学应用在农产品冷链物流领域的未来发展趋势。

关键词: 农产品 冷链物流 计算流体力学 数值分析

中图分类号: U469.6⁺6;S229⁺.3;S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0214-09

Digital Simulation Technology of Computational Fluid Dynamics in Agricultural Cold-chain Logistics Applications

Zhao Chunjiang^{1,2} Han Jiawei^{1,2} Yang Xinting¹ Qian Jianping¹ Liu Shouchun¹

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
2. College of Computer, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: With the development of computational fluid dynamics, the simulation accuracy and reliability are improved constantly. This technology is widely used in agricultural cold-chain logistics for the past few years which has significances to raise temperature homogeneity of the low-temperature environment, determine the goods stack, reasonably control refrigerating time, and improve the economic benefits of overall cold-chain logistics. This paper mainly described the pre-processing, computation and post-processing of computational fluid dynamics, reviewed the research advance of it in store, transportation and market process of agricultural cold-chain logistics, expounded the research methods and application characteristics of the technology, generalized and analyzed the advantages and deficiencies. Moreover, the paper also looked into the future trends of computational fluid dynamics in agricultural cold-chain logistics applications.

Key words: Agricultural products Cold-chain logistics Computational fluid dynamics Numerical analysis

引言

农产品冷链物流是以制冷技术为手段的低温物流过程,是农业物流的重要组成部分。合理控制食品所需要的低温环境,是保证食品安全运输和存储、减少产品损耗的关键。气流流动类型、货物堆栈方

式以及制冷时间等因素对冷藏车厢、冷藏库和冷藏柜内部环境温度均匀性以及制冷能耗有重要影响。提高其内部环境温度的均匀性,减少不必要能量消耗成为近年来相关学者研究的重点,为提高整体冷链物流食品质量和经济效益,提供可靠的理论支持^[1-4]。Son等^[5]利用三维和等效的二维模型,

收稿日期: 2014-08-28 修回日期: 2014-10-15
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD19B04)
作者简介: 赵春江,研究员,博士生导师,主要从事农业信息化关键技术研究,E-mail: hjwlove8@163.com

模拟不同风速以及制冷单元不同安装位置对冷藏库内风速和温度分布的影响,两种模型的模拟结果具有很好的一致性,并且与实验情况基本吻合,结果表明提高入口风速或制冷单元越靠近货物,冷藏库内温度分布会相对更均匀。Hoang 等^[6]考虑到车厢内部空气与货物、外部空气与车厢壁面之间的对流换热,以及在运输过程中的空气渗透等现象,模拟半挂式冷藏车内部的温度分布情况,为降低车厢内部温差,提高易腐食品运输质量安全以及延长货架期提供了可靠理论基础。Laguerre 等^[7]利用 CFD (Computational fluid dynamics) 模拟立式风幕冷藏展示柜内部气流流动类型,分析不同高度货架位置温度的差异,预测外界温度、周围壁面辐射温度以及内外空气渗透率对冷藏柜内部温度均匀性的影响,模拟值与实测值具有很好的一致性,对评估冷藏柜食品质量和卫生情况具有重要参考意义。CFD 数值模拟不仅可以缩短试验周期,节约大量的人力、物力和财力,而且可以避免现场试验仪器误差和人为视觉误差^[8]。本文对目前国内外 CFD 在农产品冷链物流领域上的应用进行系统阐述,并提出该技术在未来的发展趋势。

1 CFD 数值模拟

CFD 是用数值方法求解非线性质量、能量、组分、动量以及自定义的标量微分方程组,来预测流动、传热、传质、燃烧等过程的细节,是装置优化和放大定量设计的有力工具^[9]。早期 CFD 主要应用在航空工业和核技术领域,随着 20 世纪后期计算机硬件的飞速发展,使得 CFD 在各个领域也得到广泛的应用,有效地克服了现场实验的复杂性和昂贵的成本问题。CFD 数值模拟主要分为前处理、求解和后处理 3 个阶段。

1.1 前处理

前处理是影响模拟结果准确性的关键,在整个 CFD 模拟过程中,有 50% 以上的时间花在确定计算域、几何模型构建和计算网格的生成上^[10]。依据模拟过程要考虑的物理参数以及是否考虑外界空气对内部气流流动类型的影响,确定计算域的范围。为预测立式风幕冷藏展示柜内部空气与周围空气之间的热量与质量交换,必须将部分外界空气包括在计算域内^[11-13]。在冷藏运输的应用中将货物视为多孔介质,为反映货物内部温度梯度变化,则必须将货物区包括在计算域内^[14-17]。依照确定的计算域构建几何模型,分析几何模型结构,尽可能利用四边形或六面体结构化网格对其划分,以便更利于求解计算,减少模拟所需要的计算机内存资源和 CPU 时

间。在壁面区域、强湍流区域以及在比较感兴趣的区域进行网格细化,可更好地模拟出物理量梯度的变化。利用偏斜度^[8] ($skewness = \max((\theta_{max} - \theta_e)/180 - \theta_e, (\theta_e - \theta_{min})/\theta_e)$) 和 Y^+ 值^[18] ($Y^+ = u^* y/\mu, u^* = (\tau_0/\rho)^{1/2}$) 检查网格质量,偏斜度反应单元网格的偏斜程度,对于六面体、三角形和四边形偏斜度应小于 0.8,对于四面体应小于 0.9, Y^+ 为无量纲参数,预测壁面区域边界层网格划分是否合理。 θ_{max} 为网格单元内最大角; θ_{min} 为网格单元内最小角;对于三角形和四面体网格单元 θ_e 为 60° ,对于四边形和六面体网格单元 θ_e 为 90° 。 u^* 为剪切应力速度, m/s ; y 为最贴近壁面网格的高度, m ; μ 为动力黏性系数, $N \cdot s/m^2$; τ_0 为壁面剪切应力, N ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

1.2 求解

在对指定问题进行 CFD 计算之前,首先要将计算域离散化,所谓计算域离散化是指将空间上连续的计算区域划分成多个子区域,确定每个区域的节点,然后将偏微分格式的控制方程在网格上离散转化为各个节点的代数方程组,通过迭代求解获得计算域内每个节点上物理量的变化^[9-10]。常用的离散化方法有有限差分法、有限元法和有限体积法,其中有限体积法是目前 CFD 领域应用最广泛,大多数商用 CFD 软件都采用此方法,其特点是计算效率高。

在有限体积法的基础上,确定合适的湍流模型也是影响模拟结果准确性的重要因素。在两方程湍流模型中, $k-\varepsilon$ 模型称为高 Reynolds 模型,适用于远离壁面充分发展的湍流区域, $k-\omega$ 模型属于低 Reynolds 模型,广泛应用于墙壁束缚流动、自由剪切流动以及各种压力梯度下的边界层问题^[19-20]。剪切应力 $k-\omega$ 输运模型 (shear stress transport, SST) 在近壁处采用 $k-\omega$ 模型,在边界层边缘和自由剪切层采用 $k-\varepsilon$ 模型,其间通过一个混合函数来过渡, SST 模型是 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 紊流模型的结合和改进,在预测流体与壁面的分离和低雷诺数近壁面流动方面有明显的优势^[21]。Delele 等^[22-23]在冷藏库内通过模拟对比分析 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 和 SST $k-\omega$ 湍流模型,结果发现 SST $k-\omega$ 更有利于计算收敛且预测温度、速度分布误差最小。Ambaw 等^[24]以苹果为试验材料,利用 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟冷藏库内 1-MCP (1-甲基环丙烯) 的扩散、对流和吸附情况,模拟结果与实测值具有很好的一致性。稳态或非稳态的选择依赖于动态模拟所要预测的现象,若观察温度、速度等物理量随时间的变化,则选择非稳态模拟,否则选择稳态模拟。在迭代计算过程中,当各个物理变量的残差

值都达到收敛标准或监测的某些代表性流动变量不再随迭代而变化,则计算收敛。依据实际情况下存在的物理现象以及不同初始边界条件对模拟结果的影响,尽可能将所有影响因素作为边界条件对计算

域进行初始化,也可使用 UDF (User-defined function)定制边界条件、定义材料属性以及输运方程中的源项等。表 1 为近年来 CFD 数值模拟在农产品冷链物流上的应用成果^[9,25]。

表 1 近年来 CFD 数值模拟技术在农产品冷链物流上的应用成果

Tab.1 Summary of recent applications of CFD in cold chain logistics of agricultural products

出版年份	文献序号	试验物品	时间相关	湍流模型	多孔介质	离散化	应用
2004	26	不特定	稳态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏柜
2004	27	不特定	稳态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏柜
2004	28	不特定	稳态	RSM	无应用	有限体积法	冷藏运输
2005	13	不特定	稳态	无应用	无应用	有限体积法	冷藏柜
2006	29	苹果	稳态	$k-\varepsilon$	有	有限体积法	冷藏存储
2006	12	不特定	稳态和稳态	标准和 RNG $k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏柜
2006	30	不特定	瞬态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏存储
2006	3	苹果	稳态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏存储
2006	31-32	苹果	瞬态	无应用	有	有线体积法	冷藏存储
2007	4, 33	马铃薯	稳态和瞬态	无应用	有	有限体积法	冷藏存储
2007	34	不特定	瞬态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏存储
2007	35	不特定	稳态	RSM 和 $k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏运输
2008	36	无	非稳态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏存储
2008	37	不特定	瞬态	无应用	无应用	有限体积法	冷藏柜
2008	38	填充水的聚氯乙烯球	稳态	SST	无应用	有限体积法	冷藏存储
2009	22-23	菊苣根	稳态和瞬态	SST	有	有限体积法	冷藏存储
2009	39-42	草莓	稳态和瞬态	无应用	无应用	有限体积法	冷藏存储
2009	43-45	球体	稳态	RSM	有	有限体积法	冷藏运输
2009	46	奶酪和肉类	稳态	RNG $k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏柜
2009	47-48	草莓	稳态和瞬态	无应用	有	有限元法	冷藏存储
2010	49	不特定	稳态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏柜
2011	50	固体聚合物球	瞬态	无应用	无应用	有限元法	冷藏存储
2011	51	草莓	稳态和瞬态	无应用	无应用	有限体积法	冷藏存储
2011	52	不特定	稳态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏存储
2012	53	香蕉	瞬态	$k-\varepsilon$	有	有限体积法	冷藏运输
2012	54	充水 PET 塑料	瞬态	$k-\varepsilon$	无应用	有限体积法	冷藏存储
2012	55	苹果	稳态和瞬态	SST	有	有限体积法	冷藏存储
2013	17	马铃薯	瞬态	SST	有	有限体积法	冷藏运输
2013	56	马铃薯	瞬态	SST	有	有限体积法	冷藏运输
2014	57	杨梅	稳态		有		冷藏运输

注: PET 为 polyethylene terephthalate(聚对苯二甲酸乙二醇酯),RSM 为 Reynolds stress model。

1.3 后处理

后处理主要是通过生成所有变量在整个计算域内的分布图、矢量图、等值线图以及动态效果等,给出所有变量在计算域内特定位置的瞬态值,以便更直观地观察、分析和报告模拟流动计算结果,评估模拟结果的真实性、可靠性和准确性。

2 CFD 的应用

2.1 概述

农产品在存储、运输、销售的过程中,适宜、均匀的环境温度是保证食品质量安全,延长货架期的关键^[9]。外界空气渗入以及农产品自身呼吸热是冷

藏环境内部的主要热源,为更好地使冷气系统吸收多余热量,防止内部温度过高、温差较大等不利现象发生,了解内部空气流动类型,货物堆栈方式,农产品自身属性等因素对内部环境温度分布以及均匀性的影响成为必然的发展需求。近年来,相关学者^[12-13, 22-23, 35, 37-38]利用 CFD 模拟预测冷藏库、冷藏车、冷藏柜内部空气流动类型和环境温度分布情况,验证了 CFD 数值模拟的准确性和可行性,以下分别对 CFD 在农产品冷链物流上不同方面的应用进行分析和阐述。

2.2 在冷藏存储上的应用

在冷藏存储和冷藏运输过程中,食品都是在特

定的温度和湿度下存储,两种冷链环节的 CFD 数值模拟所要考虑的因素和参数也基本相同,最终为实现内部更均匀的温度分布提供可靠的理论支持。然而冷藏存储的容量大、存储周期长,影响因素的作用容易被放大,很难维持内部货物的均匀冷却,致使内部温度分布不均匀,出现局部高温或低温,严重损害食品质量安全,且相对于冷藏运输,损失数量较大,不能满足市场需求。

吴天、谢晶等^[29,58]利用 CFD 二维紊流数值计算模型模拟果品冷藏库内部气流流动类型以及温度分布情况,为冷藏库结构优化设计,验证 CFD 数值模拟的可行性、准确性提供了可靠的理论参考。杨磊等^[36]以空的冷藏库为研究对象,排除货物、货架对内部气流流动的干扰,利用 CFD 模拟冷藏库预冷过程中内部的温度变化,模拟温度与实测温度变化趋势基本一致,最大误差为 3%,研究结果为库体、风机等结构优化设计,以及合理控制预冷降温过程提供了可靠的理论支持。

Hoang 等^[59]利用 CFD 两方程标准 $k-\varepsilon$ 模型和 RNG (Renormalisation group) $k-\varepsilon$ 湍流模型,在稳态下分别模拟预测果蔬冷藏库内气流流动类型,结果显示两种模型的风速模拟值和实际测量值绝对误差分别为 26%、28.5%,利用 RNG $k-\varepsilon$ 模型并不能提高预测结果的准确性,文中最后提出网格加密、改进更新湍流模型,以及在模型中考虑室内热传递、自然对流、水分蒸发和凝聚等现象将有利于提高模拟的准确性和可靠性。

Nahor 等^[2]利用瞬态三维模型分别模拟空库和装载有货物的冷藏库内空气流动和传热传质过程,计算得出内部速度、温度和水分分布情况。结果显示在空冷藏库内,接近顶部和地板的风速比较大,中部风速较弱;在装载货物的冷藏库内,货物顶部、侧墙和地板上风速较大,有微弱的冷气穿过货物之间的空隙;通过对比,两种情况下速度模拟值与实测值的平均相对误差分别为 22%、20.4%。模拟 38 d 后货物的质量损失为 1.9%~2.2%,与实测值相差 0.2%,揭示了模拟过程的准确性与可行性。然而文中将货物作为一个实体,并未考虑到冷气、水分与货物之间的渗透性,以致预测室内速度和温度分布的结果误差相对较大。

农产品在冷藏存储的过程中,新陈代谢产生的呼吸热,个体的直径、孔隙度大小,冷藏库内部温度和湿度都会影响货物之间的热量传递和水分损失。Chourasia 等^[4,60]将冷库内的货物(马铃薯)视为多孔介质,模拟不同操作条件下冷库内货物之间的热量传递和水分损失变化情况,结果表明冷却时间和

水分损失随孔隙度和土豆直径的增大而降低,室内温度提高会导致马铃薯呼吸速率加快,增大冷却时间和水分损失,相对于温度,室内湿度的变化对马铃薯的水分损失有更大的影响。通过与实测值进行对比,速度和温度平均误差分别为 19.5%、0.5℃,模拟货物存储 6 个月的水分损失比实测值高 0.61%。结合以上研究,Chourasia 等^[61]利用相同的二维模型模拟商业冷藏库内货物堆栈的宽高比、体积、宽、高,以及在一定的堆栈方式和堆栈尺寸下,货物之间的水平和垂直空隙对整体平均温度和冷却时间的影响,模拟结果与实测值的平均温差为 $(1.4 \pm 0.98)^\circ\text{C}$ 。研究结果表明货物平均温度和冷却时间随堆栈宽高比的增大而降低,然而体积和高度具有相反的影响,宽度没有明显的影响,当货物之间的水平空隙超过 0.05m 以后,货物的平均温度和所需冷却时间都没有明显变化,反而降低了冷藏库内部容量。

文献[60]提出果蔬在长期的冷藏存储中,室内湿度对果蔬的水分损失和质量安全具有很大的影响,用蒸汽或雾化水滴加湿冷气是常用的内部湿度保持方法,然而湿度过高会加快有害微生物的繁殖,降低果蔬质量安全^[62]。Delele 等^[22]以带有高压雾化加湿系统的冷藏室为研究对象,随时控制加湿系统打开或关闭,将货物区视为多孔介质,模拟室内速度、温度、湿度分布情况,以及水滴的沉积情况,以期保持冷藏库内部湿度在一定范围提供有效的操作参数,使内部水分分布更均匀,减少水滴沉积。结果表明在 -1°C 、相对湿度 93.8% 存储环境下,加湿系统开启 1 min、关闭 15 min 连续交替执行,可使室内相对湿度提高 2.5%,质量损失减少到 40.2%,室内压力、喷头的位置与方向对喷洒水在货物和壁面上的沉积量具有很大影响。

2.3 在冷藏运输上的应用

冷藏运输是冷链物流的重要环节,温度控制是整个食品冷链运输系统的关键,也是保证食品质量、安全和减少损耗的关键^[63]。为合理安排货物堆栈方式、选择最佳风机风速以及减少不必要的能量消耗,近几年有关学者^[6,45,64-65]利用 CFD 对运输车厢温度场分布规律进行了不同条件的数值模拟,克服了传统理论分析法在对象简化和计算求解方面的不足,突破了试验过程人力物力消耗以及试验周期长等诸多限制^[2]。

冷藏运输的农产品对温度变化十分敏感,温度过高会加快农产品呼吸作用,增大食品损耗,过低会对农产品产生冷害,都不利于运输。在运输过程中外界空气渗透,内部冷气与壁面、货物之间的热交

换,以及货物的堆栈方式,制冷风机出口温度、风速,货物与壁面之间的空隙大小等都会对冷藏车内部环境产生影响,导致内部温度分布不均匀,增加了制冷风机的负荷,降低整体运输质量。冷藏车厢内部热源主要来自外界空气渗透和货物呼吸作用,热量转移主要通过流传热,因此内部气流流动类型是影响温度分布均匀性的主要原因^[45]。为更好地了解冷藏车气流流动类型和温度分布规律,减少内部温差,Moureh 等^[66]建立缩放比例的三维实体车厢模型,利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和雷诺应力模型(Reynolds stress model, RSM)分别模拟预测车厢内部空气温度分布情况,以期提高和优化车厢内空气分布系统,降低内部温差,结果表明 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型过高地估计壁面射流康达效应,不能有效预测车厢内主流和尾部次流的分离,然而 RSM 能更好地预测流体与壁面的分离,以及托盘与托盘、托盘与壁面之间狭小空隙内低雷诺数流动,模拟结果与实验测试值具有很好的一致性。文中提到托盘与托盘之间空隙若直接网格化则会提高整体网格数量,增大计算所需内存和 CPU 时间,然而利用相同空气阻力的多孔介质代替网格化,不仅可以有效地预测、观察空隙内温度梯度的变化,也大大降低了模拟时间。制冷机组普遍安装在车厢前部,由于空气和托盘货物阻力,冷气不能直接抵达车厢尾部,导致前部风速大、温度低,尾部通风弱、温度较高,致使前后货物温差较大,若直接加大制冷风机速度提高通风量,可能会使前部货物出现局部低温和水分流失等现象,不利于货物长时间运输。Moureh 等^[28]为提高冷藏车厢尾部通风量,沿车厢方向在 $L/3$ 和 $3L/4$ 处增加了不同长度的气流管道,冷空气流量比例分别为 50%、15%,结果表明气流管道显著提高了尾部冷气通风量,尾部风速从 0.1m/s 提高到 1m/s,减少了前部和尾部的温差,更有利于货物安全运输,延长易腐食品货架期。

郭嘉明等^[53]以基于差压原理的运输车厢为研究对象,利用 CFD 模拟不同果蔬堆栈方式下厢体内纵截面、横截面以及货物表面的温度分布情况,试验模拟结果与试验结果吻合较好,模拟值与实测值平均温度偏差均不超过 1.5℃,研究结果对保鲜运输车合理布置货物堆栈方式以及厢体结构优化设计等研究具有一定的参考价值。韩佳伟等^[17]为实现节能减排,减少不必要的能量消耗,降低运输成本,提高食品冷链运输的整体经济效益,利用 CFD 模拟不同的冷却温度,不同冷却时间车厢内温度场的分布情况,结合制冷风机功率和货物最佳冷藏温度,得出运输过程中最佳制冷风机温度和冷却时间节能组

合,模拟结果与试验结果均方根误差和平均绝对误差分别为 0.540、0.493℃,体现了试验设计的合理性和 CFD 数值模拟的准确性。

2.4 在冷藏柜上的应用

冷藏销售是食品冷藏链最后一个环节,直接关系到销售者和消费者的利益。近年来随着人们生活水平的提高,为满足消费者对冷藏类食品日益增长的需求,提高冷藏柜保鲜效果、增大冷藏容积、实现节能减排一直是销售商所追求的目标,也是冷藏柜未来不断改进发展的方向。

冷藏柜有封闭式和不封闭式(风幕式)两种,风幕式冷藏柜被广泛应用在超市、商店等场所,风幕是分离内外环境的唯一屏障,也是维持内部低温环境的冷气来源。因其受外界气流影响较大,影响内部气流温度分布的因素较多且相互依赖,风幕出口风速和温度大小,外界环境温度和湿度,食品的数量、摆放方式、初始温度等都会对冷藏柜内部温度产生影响,使精确模拟冷藏柜内部环境变得非常复杂,一直是冷藏链研究的薄弱环节,为更好地了解风幕冷藏柜内部气流流动类型,实现结构优化、降低能量损失成为近年来有关学者研究的热点^[1, 17, 26, 67-69]。Giovanni^[68]利用 CFD 二维模型模拟风幕冷藏柜内部空气流类型,以及速度和温度分布情况,模拟值与实测值吻合很好,为冷藏柜结构优化提供了理论参考价值。Pedro 等^[69]利用 CFD 三维模型模拟冷藏柜内的空气流动类型和温度分布情况,结果表明水平方向的空气流振幅和长度,以及通过回流风幕的空气温度、速度不均匀,都对冷藏柜内部温差和设备的冷却性能有很大影响。TEF(Thermal entrainment factor)是反映冷藏柜冷却保鲜性能的重要参数,Yu 等^[70]结合 CFD 数值模拟给出一种快速、精确计算 TEF 的方法,文中提到当 TEF 越高时表示周围空气过多的影响回流空气温度,反之周围空气对风幕提供的冷气温度影响较大,研究结果表明正确的 TEF 模型能够计算风幕回流温度,与实测值对比得出最大误差为 0.9℃,平均误差为 0.1℃。当冷藏柜内部空气温度场达到平衡以后,除维持这种状态所消耗的能量外,其余的能量消耗成为冷气损失,冷气损失不仅增加了冷藏柜的负荷,影响冷却性能,也是形成“冷过道效应”^[26]的主要原因,对顾客和员工的热舒适产生负面影响。Cao 等^[67]利用双流体冷却损失模型和一个支持向量机算法,确定影响风幕冷却损失因素之间的相互关系,结果表明在一定的冷却能力和操作条件下,风幕提供的温度越低能量损失越大;风幕提供的风速越大冷却损失越严重;适当改变挡风板的位置有利提高冷却性能;外界空气温度和

湿度越高,冷却损失就越严重,冷却性能将会降低,依照文中优化策略可使冷却损失和能量消耗分别减少 19.6%、17.1%,为风幕结构优化设计提供了依据和参考。

3 发展趋势分析

在 CFD 数值模拟过程中,数据测量、计算、边界条件设置,以及复杂模型的网格划分都会影响模拟结果的精确性和可靠性。为更好地提高模拟结果的可接受性、实用性等,以下几个方面值得进一步研究和探讨,主要有:

(1)模型构建与网格划分:真实的模型构建与合理的网格划分是影响模拟准确性和计算模拟时间的重要影响因素,也是 CFD 数值模拟应用的前提和基础,是不断改进和提高模拟结果准确性的未来发展方向。

(2)参数确定:过度简化试验模型,往往会忽略对模拟结果有重要影响的参数,然而过多考虑某些影响参数,会加大整个模拟的复杂性,不利于预测特定物理现象的变化,而且延长模拟时间^[71]。因此,针对试验所要观察的重要物理现象,合理控制影响参数的选取,以期实现 CFD 数值模拟针对性、高效性的改进。

(3)湍流模型选取、改进:依据计算域和湍流强度大小,选择合理的湍流模型,将显著提高模拟预测的准确性、真实性。随计算机处理能力的不断增强,以及更好满足模拟复杂物理现象的必然需求,实现湍流模型的改进和创新,也将成为相关学者进一步研究的方向。

(4)多孔介质模型改进:为减少整体计算域网格数量,通常将货物区视为多孔介质区域,通过确定内部粘性阻力系数和惯性阻力系数反映货物区内部气流流动情况,往往过低估计内部湍流现象,在模拟

预测内部水分、质量损失,热量传递,以及微生物扩散等现象时精确性偏低,真实可靠性偏差。因此,为提高模拟预测货物区物理现象变化的精准性,多孔介质模型的改进也将成为一种必然的发展趋势。

(5)食品质量安全:在整个农产品冷链物流中,保证食品质量和安全、减少损耗是提高整体冷链物流经济效益,满足不断增长市场需求的关键,也是未来 CFD 应用在农产品冷链物流上不断研究、创新、发展的方向。

(6)节能化发展:在农产品低温存储、运输、销售的过程中,为保持低温环境需要消耗大量的能源,在精确掌握温度、湿度控制,以及结构优化的同时,减少不必要的能量消耗,将大大降低成本,更有利于实现农产品冷链物流节能、环保、降耗高效发展。

(7)智能化发展:理论创新的具体实施是影响我国农产品冷链物流智能化发展的重要环节,实现快捷、方便、准确的温度智能化控制一直是 CFD 应用在冷链物流上不断创新的最终目标之一。为更好地实现农产品冷链物流智能化发展,在理论基础、行业规模、科学管理以及电子技术等方面还应有质的提高。

4 结论

前处理、求解和后处理是 CFD 数值模拟的 3 个阶段,熟练掌握每个阶段是提高模拟结果真实性、准确性的前提和基础。

为提高冷链物流中农产品所需低温环境的温度均匀性,延长货架期,CFD 数值模拟应用在农产品冷链物流成为一种发展趋势,也是必然需求,为冷藏库、冷藏车、冷藏柜的结构优化设计,合理安排货物堆栈方式,合理控制制冷风速和时间等提供了可靠的理论支持,以期最终实现农产品冷链物流节能、环保、智能、降耗高效发展。

参 考 文 献

1 Cortella G. CFD-aided retail cabinets design[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1-3): 43-66.

2 Nahor H B, Hoang M L, Verboven P, et al. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool store[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 368-380.

3 Xie Jing, Qu Xiaohua, Shi Junye, et al. Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 355-363.

4 Chourasia M K, Goswami T K. Steady state CFD modeling of airflow, heat transfer and moisture loss in a commercial potato cold store[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(4): 672-689.

5 Son H Ho, Luis Rosario, Muhammad M Rahman. Numerical simulation of temperature and velocity in a refrigerated warehouse [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 1015-1025.

6 Hoang M H, Laguerre O, Moureh J, et al. Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: Application to a refrigerated vehicle[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 389-398.

7 Laguerre O, Hoang M L, Flick D. Heat transfer modeling in a refrigerated display cabinet: The influence of operating conditions [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 353-364.

- 8 Il-hwan Seo, In-bok Lee, Oun-kyeong Moon, et al. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1): 91–106.
- 9 Smale N J, Moureh J, Cortella G. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(6): 911–930.
- 10 王福军, 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 11 Wu Yezheng, Xie Guozhen, Chen Zhongqi, et al. An investigation on flowing patterns of the airflow and its characteristics of heat and mass transfer in an island open display cabinet with goods[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(13): 1945–1957.
- 12 D'Agaro P, Cortella G, Croce G. Two- and three-dimensional CFD applied to vertical display cabinets simulation[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(2): 178–190.
- 13 Navaz H K, Henderson B S, Faramarzi R, et al. Jet entrainment rate in air curtain of open refrigerated display cases[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28(2): 267–275.
- 14 de Lemos Marcelo J S. Turbulent kinetic energy distribution across the interface between a porous medium and a clear region[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32(1–2): 107–115.
- 15 Pieter Verboven, Flick D, Nicolai B M, et al. Modelling transport phenomena in refrigerated food bulks, packages and stacks: basics and advances[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(6): 985–997.
- 16 Alemayehu Ambaw, Pieter Verboven, Thijs Defraeye, et al. Porous medium modeling and parameter sensitivity analysis of 1-MCP distribution in boxes with apple fruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 13–21.
- 17 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 Jiawei, Zhao Chunjiang, Yang Xinting, et al. Comparison of combination mode of energy conservation for refrigerated car based on CFD numerical simulation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 55–62. (in Chinese)
- 18 Davide Piscia, Montero J I, Esteban Baeza, et al. A CFD greenhouse night-time condensation model[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(2): 141–154.
- 19 周宇,钱炜祺,邓有奇,等. $k-\omega$ SST 两方程湍流模型中参数影响的初步分析[J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(2): 213–217.
- Zhou Yu, Qian Weiqi, Deng Youqi, et al. Introductory analysis of the influence of Menter's $k-\omega$ SST turbulence model's parameters[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(2): 213–217. (in Chinese)
- 20 李进良,李承曦,胡仁喜. 精通 FLUENT 流程分析[M]. 北京:北京工业出版社, 2009.
- 21 ANSYS Inc. ANSYS CFX manual[M]. Pittsburgh:ANSYS Inc., 2009.
- 22 Delele M A, Schenk A, Tijssens E, et al. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 228–239.
- 23 Delele M A, Schenk A, Ramon H, et al. Evaluation of a chicory root cold store humidification system using computational fluid dynamics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 94(1): 110–121.
- 24 Alemayehu Ambaw, Pieter Verboven, Thijs Defraeye, et al. Effect of box materials on the distribution of 1-MCP gas during cold storage: A CFD study[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 150–158.
- 25 Ambaw A, Delele M A, Defraeye T, et al. The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: Post, present and future[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 93: 184–194.
- 26 蔡芬,胡平放. 超市内冷藏柜的冷过道效应的数值模拟[J]. *建筑热能通风空调*, 2004, 23(5): 93–96.
- Cai Fen, Hu Pingfang. CFD model of cold aisle effect of display case in supermarkets[J]. *Building Energy & Environment*, 2004, 23(5): 93–96. (in Chinese)
- 27 Cui Jingtian, Wang Shengwei. Application of CFD in evaluation and energy-efficient design of air curtains for horizontal refrigerated display cases[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, 43(10): 993–1002.
- 28 Moureh J, Flick D. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27(5): 464–474.
- 29 吴天,谢晶. 果品冷藏库气流流场模拟及实验研究[J]. *流体机械*, 2006, 34(6): 9–12.
- Wu Tian, Xie Jing. Experimental research & simulation on fluid field of the cold store[J]. *Fluid Machinery*, 2006, 34(6): 9–12. (in Chinese)
- 30 Foster A M, Swain M J, Barrett R, et al. Effectiveness and optimum jet velocity for a plane jet air curtain used to restrict cold room infiltration[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(5): 692–699.
- 31 Zou Qian, Opara L U, Mckibbin R. A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(4): 1037–1047.
- 32 Zou Qian, Opara L U, Mckibbin R. A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: II. Computational solution, software development, and model testing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(4): 1048–1058.
- 33 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.
- 34 Foster A M, Swain M J, Barrett R, et al. Three-dimensional effects of an air curtain used to restrict cold room infiltration[J].

- Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(6): 1109 – 1123.
- 35 Tapsoba M, Moureh Jean, Flick D. Airflow patterns inside slotted obstacles in a ventilated enclosure[J]. Computers & Fluids, 2007, 36(5): 935 – 948.
- 36 杨磊,汪小昆. 冷藏库预冷降温过程中温度场的数值模拟与试验研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(9): 119 – 223.
- Yang Lei, Wang Xiaochan. Numerical simulation on temperature field of a mini type cold store[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(9): 119 – 223. (in Chinese)
- 37 Amara S B, Laguerre O, Charrier-Mojtabi M -C, et al. PIV measurement of the flow field in a domestic refrigerator model: Comparison with 3D simulations[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(8): 1328 – 1340.
- 38 Delele M A, Tijssens E, Atalay T A, et al. Combined discrete element and CFD modeling of airflow through random stacking of horticultural products in vented boxes[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(1): 33 – 41.
- 39 Ferrua M J, Singh R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part I: Numerical model [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 335 – 348.
- 40 Ferrua M J, Singh R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part II: Experimental validation of the flow model[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 349 – 358.
- 41 Ferrua M J, Singh R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part III: Experimental validation of the energy model[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 359 – 368.
- 42 Ferrua M J, Singh R P. Design guidelines for the forced-air cooling process of strawberries [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(8): 1932 – 1943.
- 43 Moureh Jean, Tapsoba Mitoubkieta, Flick Denis. Airflow in a slot-ventilated enclosure partially filled with porous boxes: Part I- Measurements and simulations in the clear region[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(2): 194 – 205.
- 44 Moureh Jean, Tapsoba Mitoubkieta, Flick Denis. Airflow in a slot-ventilated enclosure partially filled with porous boxes: Part II- Measurements and simulations within porous boxes[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(2): 206 – 220.
- 45 Moureh J, Tapsoba S, Derens E, et al. Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 220 – 234.
- 46 Moureh J, Tapsoba S, Derens E, et al. Numerical and experimental investigations on the use of mist flow process in refrigerated display cabinets[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 203 – 219.
- 47 Rennie T J, Tavoularis S. Perforation-mediated modified atmosphere packaging. Part II. Implementation and numerical solution of a mathematical model[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1): 10 – 20.
- 48 Rennie T J, Tavoularis S. Perforation-mediated modified atmosphere packaging: Part I. Development of a mathematical model [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1): 1 – 9.
- 49 Ge Y T, Tassou S A, Hadawey A. Simulation of multi-deck medium temperature display cabinets with the integration of CFD and cooling coil models[J]. Applied Energy, 2010, 87(10): 3178 – 3188.
- 50 Dehghannya J, Ngadi M, Vigneault C. Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas[J]. Food Control, 2011, 22(8): 1393 – 1399.
- 51 Ferrua M J, Singh R P. Improved airflow method and packaging system for forced-air cooling of strawberries[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(4): 1162 – 1173.
- 52 Hao X H, Ju Y L. Simulation and analysis on the flow field of the low temperature mini-type cold store[J]. Heat and Mass Transfer, 2011, 47(7): 771 – 775.
- 53 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等. 保鲜运输车果蔬堆码方式对温度场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 231 – 236.
- Guo Jiaming, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Numerical simulation on temperature field effect of stack method of garden stuff for fresh-keeping transportation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 231 – 236. (in Chinese)
- 54 Tanaka F, Konishi Y, Kuroki Y, et al. The use of CFD to improve the performance of a partially loaded cold store[J]. Journal of Food Process Engineering, 2012, 35(6): 874 – 880.
- 55 Delele M A, Vorstermans B, Creemers P, et al. CFD model development and validation of a thermonebulisation fungicide fogging system for postharvest storage of fruit[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 59 – 68.
- 56 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 168 – 173.
- Zhao Chunjiang, Han Jiawei, Yang Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 168 – 173. (in Chinese)
- 57 翁卫兵,房殿军,李强,等. 冷藏运输厢内流场和温度场协同控制[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 260 – 265,290.
- Weng Weibin, Fang Dianjun, Li Qiang, et al. Cooperative control of flow field and temperature field in refrigerated transport carriage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 260 – 265,290. (in Chinese)
- 58 谢晶,瞿晓华,徐世琼. 冷藏库内气流流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 11 – 16.
- Xie Jing, Qu Xiaohua, Xu Shiqiong. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store[J]. Transactions of the CSAE,

2005, 21(2): 11 – 16. (in Chinese)

59 Hoang M L, Verboven P, De Baerdemaeker J, et al. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(2): 127 – 140.

60 Chourasia M K, Goswami T K. CFD simulation of effects of operating parameters and product on heat transfer and moisture loss in the stack of bagged potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 947 – 960.

61 Chourasia M K, Goswami T K. Simulation of effect of stack dimensions and stacking arrangement on cool-down characteristics of potato in cold store by computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 503 – 515.

62 Tassou S A, Xiang W. Modelling the environment within a wet air-cooled vegetable store[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 38(2): 169 – 187.

63 赵长青,傅泽田,刘雪,等. 食品冷链运输中温度监控与预警系统[J]. 微计算机信息, 2010, 26(6): 27 – 28.
Zhao Changqing, Fu Zetian, Liu Xue, et al. Temperature monitoring and warning system in cool food chain transportation[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(6): 27 – 28. (in Chinese)

64 Tassou S A, De-Lille G, Ge Y T. Food transport refrigeration-Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8 – 9): 1467 – 1477.

65 Silvia Estrada-Flores, Andrew Eddy. Thermal performance indicators for refrigerated road vehicles[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 889 – 898.

66 Moureh J, Menia N, Flick D. Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1 – 3): 25 – 42.

67 Cao Zhikun, Gu Bo, Han Hua, et al. Application of an effective strategy for optimizing the design of air curtains for open vertical refrigerated display cases[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(6): 976 – 983.

68 Giovanni Cortella, Marco Manzan, Gianni Comini. CFD simulation of refrigerated display cabinets[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(3): 250 – 260.

69 Pedro Dinis Gaspar, Carrilho Goncalves L C, Pitarma R A. Three-dimensional CFD modelling and analysis of the thermal entrainment in open refrigerated display cabinets[C]. Proceedings of 2008 ASME Summer Heat Transfer Conference, 2008, 2: 63 – 73.

70 Yu Kezhi, Ding Guoliang, Chen Tianji. A correlation model of thermal entrainment factor for air curtain in a vertical open display cabinet[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14 – 15): 2904 – 2913.

71 Simon van Mourik, Dirk Vries, Johan P M, et al. Physical parameter estimation in spatial heat transport models with an application to food storage[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 14 – 21.



(上接第 227 页)

15 韩谔,吕恩利,陆华忠,等. 液氮充注气调保鲜环境数学模型[J]. 广东农业科学, 2012, 39(17): 178 – 180.
Han Xu, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Mathematical model of fresh-keeping experimental with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(17): 178 – 180. (in Chinese)

16 栾明川,王世清,孙振华. 气调库内氮、氧气体含量的预测[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 123 – 124.

17 韩谔,吕恩利,陆华忠,等. 液氮充注气调保鲜运输厢内环境因素间耦合关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 275 – 280.
Han Xu, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Coupling effect of environmental factors in fresh-keeping transportation container with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 275 – 280. (in Chinese)

18 王广海,吕恩利,陆华忠,等. 保鲜运输用液氮充注气调控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 255 – 259.
Wang Guanghai, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Design and experiment of controlled atmosphere system based on liquid nitrogen injection for fresh-keeping transportation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 255 – 259. (in Chinese)

19 吕恩利,杨洲,陆华忠,等. 保鲜运输用液氮充注气调的温度调节性能优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 237 – 243.
Lü Enli, Yang Zhou, Lu Huazhong, et al. Optimization of temperature regulating performance in fresh-keeping transportation by liquid nitrogen injection[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 237 – 243. (in Chinese)

20 周晓龙,吕恩利,陆华忠,等. 基于 Linux 的车载气调保鲜运输控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 155 – 160.
Zhou Xiaolong, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Control system for fresh-keeping transportation truck with controlled atmosphere based on Linux[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 155 – 160. (in Chinese)