

冷藏集装箱温度场均匀性改善研究进展

Research progress on improving temperature distribution uniformity of refrigerated containers

贾发铜^{1,2,3,4}杨大章^{1,2,3,4}谢晶^{1,2,3,4}王金锋^{1,2,3,4}JIA Fa-tong^{1,2,3,4}YANG Da-zhang^{1,2,3,4}XIE Jing^{1,2,3,4}WANG Jin-feng^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家, 上海 201306; 4. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University 201306, China)

摘要:综述了货物堆码、送风速度、送回风形式、风机位置等因素对冷藏集装箱温度分布的影响,阐述了箱体内温度场的空间分布特性,进而对影响箱体内温度分布的相关因素进行了对比分析,并对其未来发展方向进行了展望。

关键词:冷藏集装箱;温度分布;气流组织;货物堆码;外部环境

Abstract: The influence of cargo stack, air supply velocity, air supply form, the fan position and other factors on the temperature distribution of refrigerated containers is reviewed, and the spatial distribution characteristics of the temperature field in the container are also expounded. The relevant factors affecting the temperature distribution in the container are compared and analyzed, and its future development direction is prospected.

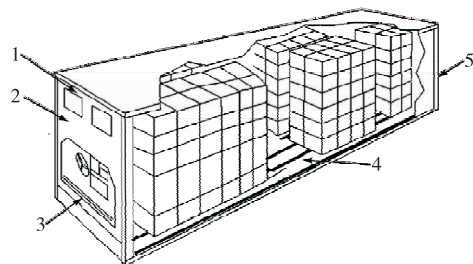
Keywords: refrigerated containers; temperature distribution; air distribution; cargo stack; external environment

冷藏运输作为冷链中的一个关键环节,与食品药品品质密切相关,也是冷链过程中最难控制的部分^[1]。当前中国的整体冷链物流服务品质和安全保障能力较低,冷链设施不完善,因此建立完备可靠、规范管理的食品药

品冷链物流,提高冷链物流货物品质和冷链运输技术,已成为冷链物流所亟待解决的重要问题^[1-3]。

食品冷藏链中需对货物区温度进行精确控制,使温度均匀分布并保持在合理的变化范围内,尤其在冷藏运输过程中需要稳定、均匀的温度场,以减少不必要的货损^[4-6]。冷藏集装箱(图1)是一种具有较高的装载容积利用率、完整的制冷装置、特殊的隔热结构、可靠的制冷保温功能、完善的自动控制系统、良好的经济性以及适用于各种易腐货物运输等优点的特殊运输设备,其在冷链运输中发挥着重要作用^[8-10]。

目前,中国冷链运输的货损率较高,且运输过程中产生的货损在冷链货损中占比较大^[11-12]。冷藏集装箱在温度控制方面仍存在不足,需对其进行进一步优化^[11, 13]。因此,文章拟对货物堆码、气流组织等影响冷藏集装箱温度分布的因素进行综述,阐述箱体内温度场的空间分布特性,进而对影响箱体内温度分布的相关因素进行对比分



1. 回风口 2. 机组端 3. 送风口 4. 门端 5. T型轨道

图1 冷藏集装箱物理模型图^[7]

Figure 1 Physical model diagram of refrigerated container

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(编号:2019YFD0901604);上海市科委科技创新行动计划项目(编号:19DZ1207503);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:17DZ2293400)

作者简介:贾发铜,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2020-03-09

析,并展望其未来发展方向,旨在为冷藏集装箱的后续研究提供依据。

1 货物堆码方式对温度分布的影响

箱体内温度分布与其所装载货物状态密切相关,其中货物堆码方式为重要影响因素,决定了箱体内气流路径,进而对温度场产生影响,因此,对其进行深入研究得出温度分布与货物堆放方式的关系,总结出合理的货物堆码方式,对于合理利用集装箱空间、降低货损、节能环保、提高冷链经济效益有着重要意义^[14]。常用冷藏集装箱堆码方式如图2所示。

1.1 堆垛数量

堆垛通过形成不同的气流通道,造成不同情况的温度分布^[16]。合理的气流组织可实现更加均匀的温度场,从而降低货损。高超^[11]利用计算流体力学(CFD)技术对冷藏集装箱的温度分布进行对比分析发现,一体式堆码虽是一种最常见的货物堆码方式,但易形成较大的气流旋涡而造成温度均匀性较差;而二体式堆码只在纵向分割堆码时才会有较好的温度分布;相较于一体式和二体式两种堆码方式,四体式堆码下的温度场均匀性表现最佳。曾晰^[17]研究发现不同的堆码方式对货物区温度场影响较大,会对回风道产生影响,与4垛相比,8垛的货物堆放方式由于间隙较多可实现冷空气与货物更加充分的换热,使货物区温度分布更均匀,但会降低载货量。

研究^[18-20]表明,货物堆码对流场有较大影响,改变堆垛间距离就可以改变温度场分布。随着货物堆垛的数量增加、间隙增大,货物间的气流循环得到优化,换热效果提高,货物区温度均匀性也逐渐改善,可有效地降低货物区整体温度;但当间隙增大到一定程度时,箱内可能会在局部形成低温旋涡区,不利于气流流通^[21-22]。因此,冷链运输中应先权衡货物质量和载货量后,再确定合适的堆垛间距,选择合理的货物堆码方式^[23]。鉴于堆码数量的增多,可能会造成货物在运送过程中更容易偏移位置,这对货架的设计提出了更高要求;此外,确定合适的堆垛数量时还可以结合货物的散热能力进行深入研究。

1.2 货物与壁面间隙

货物运输过程中,货物与箱体壁面间隙对温度场影响显著,其原理与货物区堆垛数量对气流组织影响类似,

不合理的货物与侧壁间隙可能会产生湍流现象,且货物区与侧壁距离直接影响运输载货量,从而影响冷藏集装箱运输经济性^[24-25]。

Mourech等^[26]研究发现,当货物间气流空间较窄时,会产生较高的阻力造成箱体内气流分布不均匀,且箱体后部存在通风不良的停滞区域,导致局部温度过高,需在货物托盘和壁面留有合适的距离,以此改善通风和减小温差。楼海军等^[27]发现,当扩大堆码与壁面间距时,货物间对流换热得到强化,箱内温度分布均匀性显著改善。赵春江等^[27]通过对温度场的模拟分析发现,中间及两侧留空的货物堆垛方式在运输中效果最好,既可以使得离风口较远的货物得到很好的冷却,又可以避免货物产生冷害。张娅妮等^[28]研究表明货物与壁面间隙对箱体内温度场有较大影响,随着间隙的增大,气流可以更有效地带走外部环境通过壁面传入的热量,降低靠近壁面的气流温度,一定程度上减少内部温度场的不均匀性。

一定范围内,随着间隙的增大,箱内温度均匀性越好,但间隙会造成流体扰动的可能性,对换热有一定的削弱^[7, 19]。此外,间隙的增大必然会造成载货量的减少,还需考虑实际的经济效益作出调整。因此,在保证货物品质的情况下,合理地控制货物与箱体壁面间隙,可以避免因产生湍流现象及局部高温造成的货损,减少运输成本^[24-25]。而关于局部强制送风确定合适的间隙是否有更好的经济效益还需进一步研究。

2 气流组织对温度分布的影响

在箱体的货物区中,降温需要通过强制对流下冷气流和货物的热交换实现,货物温度分布和热交换效果直接取决于气流模式,不均匀的气流可能会导致货物品质下降。而影响箱体内货物间气流组织形式的因素较多,其中改变送回风条件是一种常用的调节方式^[29-31]。

2.1 送风速度

风机风速影响箱内温度分布^[32],其通过改变箱内整体的气流循环来调节冷气流与货物间的热传递效率。实际冷藏运输中,冷藏集装箱面对不可控的环境工况,配合温控系统及时地改变送风速度来减小温度差异是一种高效的调节方法。

Ho等^[33]研究发现,采用较高的送风速度或将冷却装置放置在离货物更近的位置,可以获得更好的冷却效果和均匀性更好的制冷空间。Defraeye等^[34]发现在较低的气流速度下,冷藏箱内部冷却速度明显降低,冷却均匀性较差。张哲等^[16]在研究发现,送风速度越大,箱内整体平均温度越接近送风温度,且温度均匀性越好,但同时也增加了货物的干耗损失。王安冉^[24]利用CFD模拟出不同送风速度下货物区温度场和流场,发现在提高送风速度过程中,货物区空气流速提高,温度分布均匀性更高;

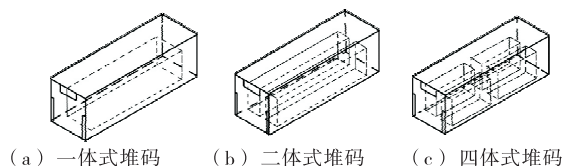


图2 3种常用堆码方式示意图^[15]

Figure 2 Schematic diagram of three common kinds of stack method

但风速为 3.0、3.5 m/s 时的货物区温度场大体相似,当风速提高至 3.0 m/s 时,整体货物区温度场均匀性已处于较好的状态,继续通过提高风速来改善箱内温度分布效果并不明显。

由表 1 可知,提高送风速度可加快温度场更新速率,一定程度上提高货物区温度场均匀性^[36-37]。但过大的风速可能会造成食物类货物水分蒸发,增加其干耗^[16, 19, 38],过小的风速可能会产生滞留区。因此在冷藏集装箱中,合理的风速可以使箱内货物区内形成良好的气流组织,使之维持均匀性良好的温度场。后续可研究提高风速过程中造成的货物干耗问题以及额外能耗。

2.2 送回风形式

2.2.1 贴附式送风 为进一步优化气流组织形式,尹海国等^[39]对壁面贴附式送风模式进行了相应研究。由图 3 可知,该送风模式的气流组织由横向贴附区、射击冲击偏转区以及竖直空气湖区 3 部分组成。

白通通^[36]研究发现,相同条件下,相对于冷风机直吹送风模式,贴附送风模式的货物区温度不均匀系数下降了 31%,流速不均匀系数降低了 47%。张娅妮等^[40]研究表明贴壁送风使得气流可以喷射至较远的后端,缩小了

箱体前后温差,形成了均匀性良好的温度场。

贴附式送风模式下,工作区可以形成类似于置换通风的气流组织分布,使气流沿着壁面流动,延长了气流喷射长度,可有效提高通风制冷能力,改善内部流场分布均匀性^[21, 41-42]。其优势在于能减小对货物直吹带来的干耗并以较大的出口风速使气流到达较远的位置,从而保证箱体内部较好的气流循环,提高温度场均匀性。因此,根据实际运输需要,可以考虑将蒸发器紧贴箱顶安装,形成贴附式射流。后续可对其出口位置、送风角度、送风速度等进行研究。

2.2.2 风口分布 肖诗洋^[43]研究发现,相比于双侧进风方式,单侧进风的送风口流量波动偏大,对箱体内货物区流场扰动较大,因此双侧进风方式可以实现更好的温度均匀性。张婷婷等^[44]发现下送风两端回风模式下,箱内温差变化 $\leq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。申江等^[38]发现气流在两侧回风方式下可以形成较大的回流,配合合适的送风速度,可以形成比较均匀的温度场。郭嘉明等^[45]研究发现,“上进上出”和“上进下出”式箱体的内部均存在最大风速偏大现象,造成明显的风速差,可能会引发箱内的局部过热或过冷;而“差压式”箱体的内部空气流动较为均匀,整体温度均

表 1 不同出风速度下冷藏集装箱的温度场模拟结果

Table 1 Simulation results of temperature field of reefer container under different air velocity

冷藏集装箱尺寸/ m^3	速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	结论	文献来源
7.0×2.0×4.0	0.4,0.6,0.8,1.0	送风速度越高,最高平均温度越低,温度分布的标准差越小	[33]
6.8×2.1×2.2	1.0,3.0,5.0,7.0	随着风速的增大,温度场更新速度加快,可较快达到设定温度	[15]
5.5×2.3×2.2	2.0,4.0,6.0,8.0	风速较高时,边界温度不稳定;风速较低时,降温时间延长	[11]
6.8×2.1×2.2	1.0,3.0,5.0,7.0	风速较低时,整体温差较大;风速增大时,气流射程延长,局部温度相对较低,箱内整体平均温度越接近送风温度,且温度均匀性越好	[16]
5.4×2.3×2.2	4.0,6.0,8.0	随着送风速度的增大,冷量的输送量增加,货物降温速率加快	[35]
6.8×2.1×2.2	1.0,3.0,5.0,7.0	随着送风速度的增大,箱体内温度场更新速率加快,到达稳定时间缩短,温度均匀性表现较好	[19]

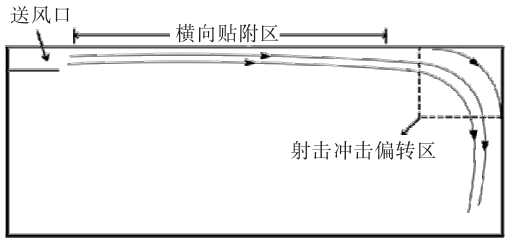


图 3 横向壁面贴附式送风模式图

Figure 3 The air distribution model of horizontal attached air curtain ventilation

匀性较好。

综上,通过改变送回风口在箱体内的分布,调节箱体内部的气流循环,是一种改善温度分布的有效手段。但目前对于改变回风状态的研究较少,还需进一步研究其规律,以提高冷藏集装箱的适用性。

2.2.3 风道系统 Moureh 等^[26]研究发现采用风道系统可以改善箱体内部通风的均匀性,减少箱体尾部出现滞留区和低速区的现象,有助于降低托盘货物温差。刘晓菲等^[46]通过数值模拟计算发现,装有均匀送风管道的货

物区温度不均匀系数下降了 20%。张东霞等^[47]研究表明,随着回风速度的提高,保鲜箱的纵截面温度差异逐渐变小,当回风道速度为 8 m/s 时,箱内温度均匀性最佳;随着回风道长度的增加,保鲜箱的纵截面温度均匀性越好,当回风道长度为 1.5 m 时,箱内温度均匀性最好,说明回风道风速、长度的增加有利于提高保鲜箱的温度均匀性。Jiang 等^[48]发现冷藏集装箱内部装设 3 个挡板改变风道后,其内部冷气流分布更均匀,温度变化为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却时间缩短了 22.9%。此外,冷俊材等^[49]对集装箱出风管道进行优化设计并增设差压预冷装置,提高了箱内温度分布均匀性,降低了温度波动。

综上,风道系统对提高温度场均匀性效果显著,通过增加风道长度及风速均可降低箱内温差;但目前针对冷藏集装箱的风道系统研究较少,改变风道位置是否可以提高温度场均匀性还需进一步研究。

2.3 风机位置

风机设置的位置是影响气流组织的重要因素之一^[50]。李福良^[51]结果发现,当冷风机设置在冷库长度方向时,可以形成良好的气流组织,使整个库内温度分布较为均匀;当冷风机设置在冷库宽度方向的一侧时,库内温度和流场均匀性主要受送风速度的影响,较小的送风速度使得气流不能喷射至较远的一端,造成温度场和流场分布不均匀。周轲等^[52-53]发现风机设置在长度方向的冷库可以实现更好的降温,且冷藏库温度场均匀性更好;当风机设置在冷库宽度方向时,推荐在两侧各设置一台冷风机,以增强货物区的气流循环,提高温度场均匀性。

3 外部环境

冷藏集装箱一般具有较高的流动性,因此内部温度场易受环境温度、太阳辐射的影响^[54],设计使用冷藏集装箱时需对这些环境因素加以考虑。目前,主要通过提高箱壁的隔热系数并减少热流密度的方法来达到降低环境因素对内部温度场的波动。娄宗瑞等^[13]通过模拟壁面换热系数对冷量散失的影响,发现采用真空绝热板的冷藏集装箱整体散热量为普通冷藏集装箱的 56.1%,明显减少了冷量损失。通过使用良好的隔热材料可以有效降低内部温度波动。朱奎^[8]研究发现,使用真空绝热板可以缩小箱壁厚度,增强保温效果,降低冷量散失;当真空隔热材料使用面积 $> 60\%$ 时,冷藏集装箱具有良好的隔热效果。高超^[11]发现积载在最外侧的冷藏集装箱温度高于积载在内部的,热量损失和导热率增加。李锦^[55]研究发现随着箱体外侧风速的增大、对太阳辐射吸收率的增大以及隔热材料厚度的减小,均会造成内部降温时间延长和一定的温度波动。王文文^[56]发现随着保温板厚度的增大,冷藏效果越好;增强冷藏集装箱维护结构隔热性能,可有效降低热量损失,提高内部温度场稳定性。目前隔热材料主要用于降低导热系数,未来还需对其降低表面

对流换热系数进行深入研究。

4 结论

改善冷藏集装箱温度分布均匀性对提高中国冷链运输效率、保障运输货物品质具有重要意义。影响冷藏集装箱温度分布因素众多,需综合考虑各种因素总结出适用性更高的送风条件,同时对于冷藏集装箱温度分布的研究还可在风机结构、导流板设置以及货物包装等方面进一步深入展开。

参考文献

- [1] 洪桂香. 冷链运输潜力巨大 冷藏车将成行业支柱[J]. 发展改革理论与实践, 2017, 11(1): 37-41.
- [2] 交通运输部提速冷链物流发展[J]. 中国物流与采购, 2017(18): 53.
- [3] ZHAO Hong-xia, LIU Sheng, TIAN Chang-qing, et al. An overview of current status of cold chain in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 483-495.
- [4] JARA P B T, RIVERA J J A, MERINO C E B, et al. Thermal behavior of a refrigerated vehicle: Process simulation[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 124-130.
- [5] HAN Jia-wei, ZHU Wen-ying, JI Zhen-tao. Comparison of veracity and application of different CFD turbulence models for refrigerated transport[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2019, 62(3): 11-17.
- [6] 霍耽. 海运冷藏集装箱货损案例分析[J]. 中国远洋海运, 2017(11): 60-62.
- [7] 楼海军, 阚安康. 货物堆码方式对海运冷藏集装箱内温度场分布的影响[J]. 上海海事大学学报, 2014, 35(4): 55-88, 74.
- [8] 朱奎. 我国食品冷藏集装箱运输节能技术[J]. 集装箱化, 2012, 23(5): 27-29.
- [9] BUDIYANTO M, SHINODA T. The effect of solar radiation on the energy consumption of refrigerated container[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 96(12): 687-695.
- [10] 余昊原. 陆路冷藏集装箱结构特点及设计[J]. 科技风, 2019, 13(34): 118.
- [11] 高超. 海运冷藏集装箱内部温度场研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018: 32-50.
- [12] 我国冷链物流行业快速发展期需突破四方面瓶颈[J]. 环球聚氨酯, 2018(7): 28.
- [13] 娄宗瑞, 曹丹, 阚安康, 等. 冷藏集装箱内部温度场的特性研究[J]. 制冷, 2013, 32(1): 23-25.
- [14] 傅泽田, 王大鹏, 张国祥, 等. 冷藏车水产品堆栈方式对温度场的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 347-356.
- [15] 田津津, 王飒飒, 张哲, 等. 冷藏集装箱内部流场的动态数值模拟与验证[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 136-142.
- [16] 张哲, 郝俊杰, 李曼, 等. 冷藏集装箱内部温度场的理论与实验研究[J]. 低温与超导, 2016, 44(6): 76-80.
- [17] 曾晰. 火龙果堆码方式对冷藏库内气体流场分布的影响[J]. 农技服务, 2019, 36(1): 37-40.
- [18] 赵东夏, 杨万枫, 应豪. 考虑货物热源时冷藏集装箱室内空

- 气流场分析[J]. 集装箱化, 2016, 27(3): 24-26.
- [19] 李曼. 冷藏集装箱内部流场及送风形式的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015: 67.
- [20] 李艺哲, 谢晶. 大型冷库内温度场的数值模拟与优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 139-142, 179.
- [21] 刘亚姣, 杨小凤, 庄春龙, 等. 果蔬堆码方式对机械式冷藏集装箱内温度场的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(6): 67-72.
- [22] 黄磊. 果蔬冷藏库热湿环境数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014: 48.
- [23] 郭志鹏, 阚安康, 孟闯, 等. 冷藏集装箱内温度场的数值模拟与实验[J]. 上海海事大学学报, 2017, 38(2): 82-87.
- [24] 王安冉. 基于 CFD 的冷藏车内流场及温度场的数值研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 49.
- [25] 陈邦器, 阚安康, 华宇捷, 等. 货物堆码方式对冷藏集装箱内温度分布的影响[J]. 低温与超导, 2017, 45(11): 63-67, 96.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 张娅妮, 陈洁, 陈蕴光, 等. 机械式冷藏车中货物装载间隙对厢内温度场的影响[J]. 制冷与空调, 2007, 7(4): 101-104.
- [29] 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, 76: 367-381.
- [30] 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, 93: 184-194.
- [31] XU Xiao-feng, ZHANG Xue-lai, MUNYALO J M. Simulation study on temperature field and cold plate melting of cold storage refrigerator car[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 3 394-3 400.
- [32] 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): 214-216.
- [33] HO S H, ROSARIO L, RAHMAN M M. Numerical simulation of temperature and velocity in a refrigerated warehouse[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 1 015-1 025.
- [34] DEFRAEYE T, CRONJ P, VERBOVEN P, et al. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 108: 91-101.
- [35] 闫哲, 李艳. 冷藏集装箱的非稳态数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(7): 50-54.
- [36] 白通通. 果蔬冷藏库竖壁贴附送风模式流场特性的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018: 56.
- [37] XIE Jing, QU Xiao-hua, SHI Jun-ye, 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.
- [38] 申江, 李超, 苗惠, 等. 冷藏运输车内部气体流场的数值模拟及分析[J]. 低温与超导, 2010, 38(11): 46-52, 57.
- [39] 尹海国, 陈厅, 孙翼翔, 等. 竖直壁面贴附式送风模式气流组织特性及其影响因素分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(8): 33-39.
- [40] 张娅妮, 陈洁, 陈蕴光, 等. 机械式冷藏汽车厢体内部气流组织模拟研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2007, 28(2): 10-13.
- [41] 尹海国, 李安桂. 竖直壁面贴附式送风模式气流组织特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 879-884.
- [42] 王国栋. 一种新型通风方式: 非等温条件下条缝型送风口形式的竖壁贴附射流通风模式的 2D PIV 实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009: 62.
- [43] 肖诗洋. 机械冷藏车车内流场数值计算[D]. 大连: 大连交通大学, 2016: 57.
- [44] 张婷婷, 阚安康, 曹丹, 等. 船舶冷藏集装箱内部温度分布的模拟与优化[J]. 制冷, 2013, 32(4): 20-25.
- [45] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 冷藏运输箱体结构对流场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 74-80.
- [46] 刘晓菲, 南晓红. 装设均匀送风管道对冷藏库气流流场特性的改善[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 91-96.
- [47] 张东霞, 吕恩利, 陆华忠, 等. 保鲜运输车温度场分布特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 254-260.
- [48] JIANG Tao, XU Nan-qing, LUO Bao-jun, et al. Analysis of an internal structure for refrigerated container: Improving distribution of cooling capacity[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 330(2): 895-902.
- [49] 冷俊材, 贾晓昱, 熊忠飞, 等. 果蔬气调集装箱优化设计研究[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 37-41.
- [50] 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, 31(3): 145-149, 157.
- [51] 李福良. 冷库气流组织建模及优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2014: 47.
- [52] 周轲, 王瑞华, 孙海亭, 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, 105.
- [53] 周轲. 苹果冷藏库运行期间温湿度分布的模拟分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 11-17.
- [54] 谢培志. 冷藏集装箱工况模拟及实验研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006: 43.
- [55] 李锦. 易腐食品冷藏运输温度调控及优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 42-48.
- [56] 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: 43.