

敞开式食品冷藏陈列柜研究进展

Research progress of open food refrigerated display cabinets

吴学红 王春煦 李伟平 张 军

WU Xue-hong WANG Chun-xu LI Wei-ping ZHANG Jun

(郑州轻工业学院能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)

摘要:冷藏陈列柜作为食品冷链的末端设备,对保证食品品质和安全起到了重要作用。文章分别从冷藏陈列柜风幕性能、环境温湿度、柜体结构优化、蒸发器的结霜融霜、系统节能和相变蓄冷材料的应用等方面阐述了国内外的研究进展,主要分析了影响食品冷藏陈列柜柜内速度场和温度场分布的相关因素及改进方法,并从节约能源的角度论述了当前食品冷藏陈列柜的研究热点及今后发展方向,指出了冷藏陈列柜研究中存在的一些问题,为今后进一步研究提供参考依据。

关键词:冷藏陈列柜;风幕;温湿度;蒸发器;节能;蓄冷材料
Abstract: Refrigerated display cabinets as the terminal device of the food cold chain logistics play an important role in ensuring the food quality and safety. In this paper a brief overview of recent progress is presented in the open food refrigerated display cabinets from the aspect of air curtain performance, the environment temperature and humidity, the structure optimization of the cabinet body, the problems of evaporator frosting and defrosting, the system energy saving and the application of phase change materials for cool storage, et al. Analyzes the related factors on velocity field and temperature field distribution of food refrigerated display cabinets, and proposes the improvement methods, and from the view of energy conservation, expounds the current research focus and the future development direction of the refrigerated display cabinets. Some existing problems are proposed in the research of refrigerated display cabinets, which can provide reference for further research.

Keywords: refrigerated display cabinets; air curtain; temperature and humidity; evaporator; energy saving; cool storage materials

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51476148);河南省杰出青年基金项目(编号:154100510014);郑州领军人才项目(编号:131PLJRC640)

作者简介:吴学红(1979—),男,郑州轻工业学院副教授,博士。
E-mail: wuxh1212@163.com

收稿日期:2016-02-03

随着社会经济的飞速发展和人们生活水平的不断提高,方便、安全、卫生、营养的冷冻冷藏食品受到越来越多人的青睐,使其生产和销售得到迅速发展。为了保证冷冻冷藏食品以良好的品质供应消费者,必须建立起一条从生产、储藏、运输、销售到消费者等各个环节的完整的食品冷链过程。食品冷藏陈列柜作为食品冷链中的末端设备,对保证食品品质和安全起到了重要作用。食品冷藏陈列柜的种类和型式多种多样,其中敞开式食品冷藏陈列柜不仅可以为食品提供合适的冷藏温度,而且可以展示食品、美化购物环境、刺激消费,经多年的发展,现已成为超市中必不可少的设备。据不完全统计^[1],超市食品冷藏陈列柜的能耗大约占到超市总能耗的50%左右,因此食品冷藏陈列柜的性能好坏,除对食品品质有重要影响之外,对超市的节能也有着重要的影响。

影响食品冷藏陈列柜的食品品质和能耗的因素众多,如外界环境温湿度、光照、风幕结构、制冷系统、背风板结构、搁架性能、柜体的隔热性能等。这些因素对系统的能耗、柜内食品温度的分布均匀性、融霜期间的食品温度的回升等有着重要的影响。近些年,国内外学者对食品冷藏陈列柜的风幕性能、温湿度影响、结霜融霜特性、结构优化、制冷系统、相变蓄冷材料的应用等方面开展了大量的研究工作,对于促进食品冷藏陈列柜的发展,提高食品品质和节能降耗有着非常重要的意义。

1 冷藏陈列柜风幕性能

对于敞开式食品冷藏陈列柜,风幕主要是将柜内外空气隔开,对隔绝外界热量的渗透有着重要的作用,同时风幕性能对柜内温度和速度分布也有较大影响。研究者主要从风幕流动及换热机理和风幕优化两个方面来展开。

1.1 风幕流动及换热机理

风幕流动及换热机理不仅与风幕出口速度、温度、初始紊流强度有关,同时还受空间湍浮力,柜外环境因素的干扰,影响因素比较复杂。风幕从喷嘴流出后,分为初始段和主流段两个区域,前者中心流的速度不变,后者中心流的速度在

减弱^[2]。由于两个区域的初始段长度和涡旋粘度都与初始紊流强度有密切关系,因此对垂直射流的求解,需要考虑这两个不同区域。另有研究者^[3-4]将风幕流动分为出口区、发展区和回风区 3 个不同的区域,其封闭能力依次递减,前 2 个区域主要受风幕出风口速度的影响,而第 3 区域主要受风幕回风口结构的影响。其中出口区的风幕流动速度高,方向性强,发展区的流动起始点和发展方向主要受出口区的影响,而回风区在回风口抽吸作用的影响下其流动方向会出现较大的扭曲。

计算流体力学(CFD)是用于改进制冷设备结构和优化内部流场的有效技术,可以模拟出流动区域内精细的温度场、流场等^[5]。一些学者^[6-7]通过 CFD 技术模拟了冷库内部气流组织速度和温度分布,为优化风机设置和冷库内货物的摆放提供了理论参考。赵鑫鑫等^[8]通过数值模拟研究了冷藏车厢体导轨对厢内温度分布的影响,为单蒸发器多温区冷藏车性能优化提供了理论指导。杜子峥等^[9]引入 Boussinesq 假设,利用 CFD 技术对低温恒温箱进行了非稳态模拟,分析了恒温箱内温度和气流的分布情况。近些年来,CFD 技术在冷藏陈列柜中已得到广泛应用。余克志等^[10-13]采用双流体模型对立式陈列柜风幕进行了数值模拟,相比 $K-\epsilon$ 紊流模型,该模型的计算结果与试验值更加吻合。Gaspar 等^[14-15]将蒸发器在冷风幕风道中对空气的流动阻力和热质交换的影响加以考虑,研究了环境条件对陈列柜潜热、显热和风幕绝热系数的影响,建立了较为详细完善的数学模型。王铁等^[16]研究了单层风幕和双层风幕对其柜内温度场的影响。Sergio 等^[17]建立了一个与试验环境相似的出风通道模型,分析其对陈列柜内温度场和速度场的影响。Wu 等^[18]对导流板位置对风幕性能的影响进行研究,得出了最佳导流板位置和风幕流型分布。导流板的合理布置可使风幕出风口的速度分布更加均匀,有利于保证风幕流动的稳定性以及柜内温度分布的稳定。

1.2 风幕优化

影响食品冷藏陈列柜性能的主要参数包括蜂窝结构、风幕高度、风幕厚度、出风口速度等。而由于出风口的速度分布、出风口的紊流强度、风幕厚度都与出风口的结构密切相关,所以陈列柜出风口的结构又是影响风幕性能的主要因素。在实际应用中,风幕出风口常采用蜂窝结构来减弱过大的紊流强度,要想使紊流强度有适宜的衰减,其蜂窝结构的长度与孔径之比应大于 10^[19]。柜体顶部送风形成的风幕流态与送风速度、高度及风幕厚度等因素有关,当风幕高度为 300 mm 时,风速至少达到 0.6 m/s,高度为 800 mm 时,风速需达到 2 m/s^[20],这样才能形成宽高比为 1/5 的稳定风幕。增大风幕厚度,可以提高风幕封闭敞口的能力,但风幕厚度过大会造成冷量损失,增加冷藏陈列柜能耗,因此,风幕出风口的厚度通常控制在 50~80 mm^[21]。

也有学者利用粒子图像测速仪^[22]和红外成像技术^[23]对风幕流动特性进行了数值模拟和试验研究,提出了优化风幕的一些有效措施。Cao 等^[24-25]利用改进的双流体模型和冷

损双流体模型对风幕及其周围空气传热和流动进行了数值模拟,对风幕进行了合理优化,提高了陈列柜性能。甄欠等^[26]认为采用正六边形蜂窝风幕代替钣金导流板可以使卧式敞开双岛式陈列柜满足能效标准对柜内温度的要求,但温度波动性有所升高。

现研究者主要集中在对机理的研究和对冷藏陈列柜风幕性能数值的研究,然而对数值模拟对于风幕流动及换热机理和优化过程的认识还具有一定的局限性,文献中所开发的射流模型、层流模型、雷诺应力模型、双流体模型等只适用于各自特定的条件。特别地,数值计算时习惯采用二维稳态模型,不能对更加接近实际环境的复杂情况进行研究,因此在以后的研究中需要进一步改进研究方法 with 试验方案。

2 环境温湿度对冷藏陈列柜的性能影响

室内环境温湿度的变化,既影响柜内的温湿度特性,又影响柜体制冷系统运行的功率消耗。Faramarzi^[27]和 Gaspar 等^[14]分别通过试验得出渗透热负荷占总热负荷的 67%~77%和 78%~81%。在冷藏陈列柜的所有热负荷中,渗透热负荷所占比例最大,它主要是通过风幕出口射流与柜外环境空气间的热湿交换引起,环境空气的温度和相对湿度不仅对冷藏陈列柜热负荷影响较大,而且会影响柜内的食品包温度。对于卧式敞开式冷藏陈列柜,环境温度每升高 2℃,食品包温度平均升高 0.1~0.3℃,湿度每升高 20%,其温度平均升高 0.1~0.7℃^[28]。Yin 等^[29]对立式敞开式冷藏陈列柜进行了研究,指出当室内温度每升高 2℃,食品包温度升高约 0.3℃,室内相对湿度每升高 20%,食品包温度升高约 0.9℃。Wu 等^[30-32]应用多尺度方法建立了从超市、敞开立式冷藏陈列柜到搁架的物理模型,分析了室内温湿度环境对柜内温度和速度分布的影响。

为了减小柜外环境温湿度对食品冷藏陈列柜性能的影响,研究者通过增加减湿预冷器和节能帘的方法对其进行了研究。张文慧等^[33]研究了减湿预冷器对风幕送回风状态的影响,结果表明风幕回风温度降低 5℃,内层风幕的送、回风相对湿度基本保持不变,外层风幕的送风相对湿度由 69%下降到 60%,外层风幕的回风焓值降低 21.4%,风幕回风温度和焓值的降低可以有效减小陈列柜热负荷。傅涛等^[34]对陈列柜有无节能帘进行对比试验得出,在有节能帘条件下,陈列柜内平均相对湿度与无节能帘相比升高了 5.74%,平均温度减小了 0.43℃,从而节能帘可有效降低柜内相对湿度和温度的波动幅度。因此,在超市非营业时间应拉上节能帘,减小柜外环境对柜内食品温度分布的影响。

食品冷藏陈列柜柜外环境温湿度对柜内温度分布、速度分布和陈列柜热负荷都有很大的影响。当环境温度和相对湿度降低时,陈列柜的耗电量会有所减小,但是会使超市空调系统负荷增大,因此存在一个最佳温度值和相对湿度值使食品冷藏陈列柜和超市空调系统的总耗电量最小,还需要进一步深入研究。

3 冷藏陈列柜柜体结构

冷藏陈列柜内部结构对风幕流动和柜内温度分布都具

有重要的影响。研究者主要从优化背风板和搁架两个方面分析了其对柜内温度分布和风幕流动的影响。

3.1 背风板结构的影响

冷藏陈列柜冷风量一部分送到风幕,一部分通过背风板送风送到柜内,冷却柜内食品,而两者的风量分配不合理,会增加冷藏陈列柜的能耗。背风板的出风不合理会加大内外侧食品包温差,同时减弱风幕抵御外界热渗透的能力^[35]。合理调整背风板的通孔率可改善柜层与层之间温度分布的不均匀性,背风板通孔率通常控制在 1%~2%^[21]。背风板出风量的 70%~80% 进入风幕回风口,在下层搁架处,风幕变厚但风幕强度减弱,需要背风板出风来冷却外侧食品包,同时充分抵御热渗透^[36]。

虽然风幕抵御热渗透的作用明显,但背风板通孔率对柜内温度分布的影响也不容忽视。当风幕和背风板出风量保持在 30%~70% 的比例时,将有利于保证陈列柜风幕的稳定性以及柜体内部速度场和温度场的均匀性^[37]。Wu 等^[38] 分析了背风板通孔率和通孔位置对柜内内外侧食品包温度的影响,得出陈列柜各层搁架间背风板通孔位置合理的调整有利于柜内温度的均匀分布,并提出了改进模型,研究认为当背风板的通孔率在 2%~3% 时,其出风量在 30% 左右,冷藏陈列柜的系统性能更好。

3.2 搁架结构的影响

食品冷藏陈列柜内部食品的摆放形式、搁架的宽度和安装位置等会影响到柜内空气的流动以及风幕流动的稳定性。将超市里一般水平摆放食品的方式改为阶梯型,可使各层搁架前后食品温差有所下降^[39]。柜体内部搁架的尺寸和位置对于柜内温度分布、风幕流形和热负荷具有明显的影响,搁架的存在可拓展保证风幕稳定的 Richardson 数范围以及提高风幕流动的稳定性^[40]。

为了解决普通搁架传热性能差、温度分布不均等问题,研究者提出采用中空搁架和在搁架中添加热管的方法对其进行优化。Clodic 等^[41] 设计了具有换热效果的中空搁架,并与冷风通道进行连接,新设计的中空搁架有效改善了柜内空气流动分布,提高了柜内温度分布均匀性,但由于该搁架结构较为复杂,搁架安装的灵活性和成本等均受到了很大的影响,新设计陈列柜侧视图见图 1。Maidment 等^[42] 在搁架中

加装热管以提高搁架的传热性能,与普通搁架相比,食品温度降低了 2.5~3.5 ℃,保证了食品质量,延长了食品储藏时间。

在食品冷藏陈列柜的使用中会出现风幕冷量外溢的问题,尤其当风幕出风口速度过大时,在风幕回风口处会有大量的冷量溢出柜外而造成能量的浪费,同时会引起购物者身体的不适,形成冷过道效应。一般对冷藏陈列柜柜体结构的研究主要针对背风板、搁架和风幕出风口进行,而对风幕回风口结构的研究较少,因此综合考虑背风板、搁架、风幕出风口和风幕回风口等因素对食品冷藏陈列柜性能的影响具有重要的研究意义。

4 冷藏陈列柜结霜融霜问题

在冷藏陈列柜制冷系统中,蒸发器表面结霜现象很常见,霜的产生一方面增加了热阻,另一方面增加了空气流动阻力,从而影响蒸发器表面换热和柜内温度分布。尤其是在低温高湿环境下,蒸发器的结霜将直接影响蒸发器乃至整个系统的安全与稳定运行。因此,国内外学者对蒸发器结霜和融霜技术进行了大量研究。

4.1 蒸发器结霜

蒸发器结霜会增加其表面换热热阻,降低总传热系数,引起风幕出风口的速度降低、柜内食品温度升高和陈列柜运行能耗增加等问题。因此研究蒸发器结霜机理,探索有效地抑制融霜的方法一直备受国内外学者关注。Mao 等^[43] 通过试验研究发现以钾酸盐为载冷剂的间接制冷系统,其换热器上的结霜较 R404A 制冷剂系统更加均匀、集中,使得融霜时间大大缩短,从而降低了陈列柜的融霜冷负荷。Haglund-Stignor 等^[44] 对 3 种不同几何形状的冷却盘管和载冷剂组合进行了研究,通过试验得出利用载冷剂冷却的冷却盘管来代替传统的蒸发器,可以减小结霜量,节约融霜时的能量消耗。

增加横向盘管的间距可以减少翅片上的结霜量,降低结霜速率,但是增加翅片间距会加大空气侧的传热热阻,导致蒸发器翅片效率和蒸发温度的降低^[45]。研究者^[46] 提出了在蒸发器前增加减湿预冷器的方法,试验结果表明,此方法提高了风幕的封闭能力,延长了融霜时间,对保证食品的品质和安全起到了重要作用。袁培^[47] 采用 4 组并联蒸发器模块代替整体式蒸发器,在融霜期间模块化蒸发器依次融霜,保证了蒸发器在融霜时,仍有蒸发器在制冷,从而有效地减小融霜期间食品温度的波动。

4.2 蒸发器融霜技术

冷藏陈列柜具有多种不同的融霜方式,目前冷藏陈列柜主要使用的融霜方式及特点见表 1。

合理的融霜方式应该是在陈列柜融霜期间柜内温度回升较小、对食品品质及环境的影响较小。由表 1 可知,不同的融霜方式有其各自的优缺点。Faramarzi^[27] 指出在电加热融霜过程中只有 15% 的热量用于蒸发器表面融霜,其余热量散入到陈列柜内部,从而增加了陈列柜的热负荷。

虽然国内外学者对蒸发器结霜融霜问题进行了大量研究,在降低蒸发器结霜量、延长融霜周期和融霜技术上已有

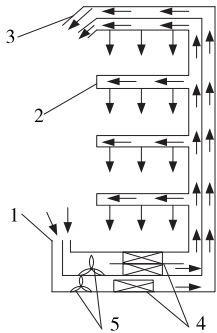


图 1 新设计陈列柜侧视图

Figure 1 Side view of a novel display cabinet

表 1 融霜方式及特点

Table 1 Defrosting method and characteristics			
融霜方式	常用陈列柜类型	优点	缺点
自然融霜 ^[48]	中、高温陈列柜	不需要额外热源,控制简单	提供的热量少,融霜时间长
电加热融霜 ^[49]	中、低温陈列柜	控制简单,融霜可靠	增加了热负荷,温度波动较大
热气融霜 ^[50]	采用并联化蒸发器的陈列柜	不需要额外热源,换热由内到外,融霜时间快	对蒸发器盘管的耐压性要求较高,可能会致使蒸发器泄露
饱和蒸汽融霜 ^[51]	采用并联化蒸发器的陈列柜	不需要额外热源,降低了热气对蒸发盘管的热冲击	在融霜时会造成制冷系统的制冷量下降
制冷剂液体融霜 ^[52]	采用并联化蒸发器的陈列柜	不需要额外热源,系统简单,耗能小,融霜效率高	当室外空气干球温度很低时,不能提供足够的融霜热量

了很大的进步,但是很多还是仅限于单一方面问题的研究,实际上随着蒸发器表面霜量的增加,其表面换热热阻增大使风幕出风口速度降低,从而影响制冷系统的稳定运行,因此将食品冷藏陈列柜蒸发器与风幕、制冷系统、超市环境耦合等作为一个整体进行综合分析的研究有待展开。

5 冷藏陈列柜节能优化

面对能源日益枯竭的时代背景,节能和可持续发展已成为当今时代的主题^[53]。据统计^[1],超市食品冷藏陈列柜的能耗大约占到超市总能耗的 50%左右。因此,寻找降低冷藏陈列柜能耗的有效方法,对其制冷系统耗电的影响因素进行研究显得尤为重要。目前研究者主要从采用多级并联技术、自然冷源等方面对其进行研究。

5.1 多机并联技术

目前,为了降低大型超市制冷系统的能耗、提高其运行效率,学者们^[54]提出将传统的单机制冷系统组合起来,合并成并联压缩机组。张华俊等^[55-56]对机组选配问题,提出了多级并联的观点,认为并联机组最佳组合是根据陈列柜的冷冻能力与冷冻负荷的匹配情况,选择合适数量、不同功率的压缩机,可以减小超市的能耗。朱兴旺等^[57]阐述了多机并联压缩的节能机理,用 4 台并联压缩机组拖 12 台陈列柜与单机拖 3 台陈列柜进行了理论分析和试验比较,结果表明采用并联机组方式使年耗冷量降低 15%~20%,能量调节梯度可小于 25%,达到了预期目的。

5.2 自然冷源

对于食品冷藏陈列柜高能耗的问题,研究者^[58]提出利用寒冷冬季的低温环境空气作为冷源向其供冷,通过试验测试的方法得出,可节约大约 44%的能耗。环境送风陈列柜虽

然可以节约大量的电能,但它的应用受限于环境温度,在此基础上余克志等^[59-60]提出了新的送风模式—联合送风,这种送风方式将来自环境的空气先经过蒸发器进行冷却,冷却到陈列柜所需的风幕出风口温度后再送入陈列柜内。这种新的联合送风方式明显提高了陈列柜的能量效率,同时克服了环境送风方式存在的弊端。

5.3 其它节能措施

耦合节能是综合考虑多种因素相互影响的结果,如陈列柜自身结构类型、人员流动干扰、灯光强度等因素对超市陈列柜能耗性能的影响。吕彦力等^[61]仅从超市陈列柜及空调系统能耗受环境温湿度的影响进行了试验研究得出,当冷藏陈列柜在环境温度 23℃,相对湿度 55%的条件下工作时,冷藏陈列柜及空调制冷系统整体能耗较小。曹志坤等^[62]运用 CFD 模拟对风幕出口风速和导流板的位置进行优化后与原有结构对比,可分别使陈列柜节能 4.62%和 6.29%,总的单位展示面积的每日耗电量减小 7.1%。抑制霜层的增长和减小蒸发器回风口空气性相对湿度可延长结霜周期,延长结霜周期减小融霜次数,可实现节能^[63]。申江等^[64]对中国超市冷冻冷藏陈列柜的节能问题进行了探讨,在国内外学者研究的技术上给出了合理的节能建议,在制冷系统方面,提出提高蒸发温度、对送风进行湿处理、采用蒸发式冷凝器等可以减小陈列柜的能耗;在设计方面,夜帘的使用、融霜系统的改进及变频技术的应用都会产生较好的节能效果。

在食品冷藏陈列柜的节能优化中,采用通过电脑控制的并联机组能够精确控制多台压缩机的开停,检测制冷系统运行中出现的故障,同时实现节能的目的,但一般并联机组在满负荷情况下运行时效率较低,初投资较大。为了减小超市制冷系统的耗电量,利用寒冷冬季的低温环境空气作为自然冷源是今后食品冷藏陈列柜的发展方向,目前国内外学者对其进行的研究较少。

6 相变蓄冷材料在冷藏陈列柜中的应用

目前冷藏陈列柜普遍存在着柜内温度场分布不均匀、食品温度达不到卫生标准、能耗偏大等缺点^[65-66]。针对其存在的问题,近来学者对相变蓄冷材料的研制和相变蓄冷材料在冷藏陈列柜中的应用进行了研究,以解决冷藏陈列柜内前后食品温差大、柜内温度分布不均匀等问题。

6.1 相变蓄冷材料的研制

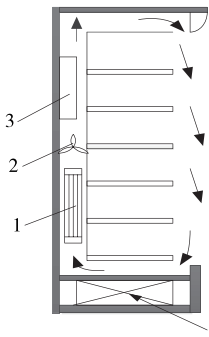
相变蓄冷材料的选取对冷藏陈列柜的性能有很大的影响,只有选择适合于冷藏陈列柜的相变蓄冷材料,才能使其有更好的冷藏保鲜效果。He 等^[67]制备了一种新型纳米相变流体,在饱和的 BaCl₂ 溶液中添加少量的纳米 TiO₂。研究发现体积分数为 1.13%的纳米流体每升高 5℃,其过冷度降低 84.92%,导热系数提高 12.76%。Oró 等^[68]对应用于低温蓄冷系统上的固液相变材料进行了研究,分析了大约 40 种相变材料的热稳定性、耐腐蚀性、过冷度和相分离性,为适用于冷藏陈列柜中相变材料的选择提供了参考。石蜡是固态高级烷烃的混合物,因其具有化学稳定性好、相变潜热高及价格低的优点,而作为常用的相变材料,但其最大的缺点是

导热性能差。为了提高石蜡的导热性,采用向其中添加碳纳米管的方法,结果表明质量分数为 5% 的石蜡基碳纳米管复合材料相变熔下降了约 18%,导热系数提高了 40%,可作为蓄冷材料广泛应用于蓄冷系统^[69]。

6.2 相变蓄冷材料的应用

目前,将相变蓄冷材料应用于冷藏陈列柜中,主要通过将其填充到散冷器和复合搁架中,来研究其对冷藏陈列柜内食品温度分布的影响。Lu 等^[70]将复合相变材料水和硼砂填充到搁架中,研究了在冷藏陈列柜融霜期间其对柜内食品包温度变化的影响,试验得出复合搁架有效减小了融霜时食品包的温升,降低 1.5℃ 左右。Alzuwaid 等^[71]将相变蓄冷材料充入散冷器中,并将其安装在陈列柜背风通道内,在环境温度 25℃,相对湿度 60% 的气候条件下,研究了散冷器对陈列柜制冷系统性能的影响。结果表明使用填充相变蓄冷材料的散冷器使制冷系统节能 5%,同时减小了融霜期间柜内温度的波动,陈列柜侧视图见图 2。

吴学红等^[72-73]将搁架设计成有热管和相变蓄冷材料构成的复合搁架,通过试验研究填充 RT3 相变材料搁架的传



1. 蒸发器 2. 风机 3. 散冷器 4. 制冷系统

图 2 陈列柜侧视图

Figure 2 Side view of the display cabinet

热和蓄冷特性以及对食品包温度的影响,也对复合搁架中填充 RT3、RT4、RT5 的相变材料进行了对比分析,结果显示:填充 RT3、RT4、RT5 的相变材料使得复合搁架上食品包温升分别减小 53.3%~70.0%,83.3%~87.5%,66.7%~5.0%,通过对比分析得出,填充 RT4 相变材料蓄冷效果最好,其中 3 种相变材料的热物性^[72]见表 2。

表 2 相变材料的热物性

Table 2 Thermal properties of phase change materials

材料	融化范围/℃	凝固范围/℃	储热容量/(kJ·kg ⁻¹)	比热容/(kJ·kg ⁻¹)	固体密度/(kg·m ⁻³)	液体密度/(kg·L ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	燃点/℃
RT3	2~5	3~1	198	2	880	0.77	0.2	112
RT4	2~4	4~2	182	2	880	0.77	0.2	116
RT5	1~6	6~1	198	2	880	0.77	0.2	122

近年来,随着食品冷链的快速发展,相变蓄冷技术在食品冷链中的应用得到了广泛发展,相变蓄冷技术中的关键是选取合适的相变蓄冷材料。对于食品冷藏陈列柜而言,只有选择适合的相变蓄冷材料才能使其具有更好的冷藏保鲜效果,然而影响相变蓄冷材料性能的主要因素是相变温度、相变潜热和导热系数,有关三者之间关系的研究有待进一步展开。

7 结论

从上面的分析可以看出,目前冷藏陈列柜的研究集中在风幕性能研究、环境温湿度影响、柜体的优化设计、蒸发器的结霜融霜问题、陈列柜节能优化和相变蓄冷材料的应用六方面。这六方面研究内容是相互关联,彼此密切相关的。如环境的温湿度对冷藏陈列柜的热负荷、蒸发器的结霜融霜和制冷系统都有一定的影响。总体分析可知,当前的冷藏陈列柜研究中存在如下一些问题:

- (1) 关于风幕性能的研究,如何界定风幕射流速度的最佳值,它与环境温湿度、送风口结构和柜体内部结构等的关系仍有待解决。
- (2) 蒸发器的结霜量与环境相对湿度和融霜周期有密切的关系,如何将其结合起来进行系统分析的研究尚不明确。

(3) 从节约能源的角度考虑,目前对冷藏陈列柜节能技术的研究仅仅限于单一方面的研究,然而只有全面考虑有关因素对其性能的影响,才能最大限度减小能量消耗,真正实现节能的目的。

(4) 应用于冷藏陈列柜中的相变蓄冷材料存在导热率低、相变潜热小等问题,应寻找相变温度各方面性能指标都能够满足应用要求的相变蓄冷材料。

参考文献

[1] WANG F, MAIDMENT G, Missenden J, et al. A novel super-conductive food display cabinet[J]. IOR Proceedings, 2004, 101: 5-11.

[2] HOWELL R. Effects of store relative humidity on refrigerated display case performance[C]//The 1993 Winter Meeting of ASHRAE Transactions. Chicago: ASHRAE, 1993: 667-678.

[3] 陈江平, 冯欣, 穆景阳. 吹吸式非等温双层空气幕紊流特性数值分析[J]. 制冷学报, 2001(4): 16-20.

[4] 冯欣, 陈江平, 穆景阳. 立式陈列柜双层风幕的 CFD 优化[J]. 制冷学报, 2001(2): 32-36.

[5] 张珍, 谢晶, 李杰. 计算流体力学在制冷设备研发中的应用[J]. 食品与机械, 2008, 24(2): 146-150.

[6] 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.

[7] 汤毅, 谢晶, 王金锋, 等. Cfd 预测风机摆设形式对冷库的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 124-128.

[8] 赵鑫鑫, 王家敏, 李丽娟, 等. 多温区冷藏车回风导轨对厢内温度场的影响分析[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 149-154.

[9] 杜子峥, 谢晶, 朱进林. 低温恒温箱的非稳态数值模拟及验证[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 126-132.

[10] YU Ke-zhi, DING Guo-liang, CHEN Tian-ji. A correlation model of thermal entrainment factor for air curtain in a vertical open display cabinet[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14): 2 904-2 913.

[11] 余克志, 丁国良, 陈天及. 卧式陈列柜风幕热卷吸系数的关联式模型[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1 384-1 388.

[12] 余克志, 陈天及, 谢堃, 等. 采用系统仿真方法数值模拟双层风幕立式陈列柜[J]. 制冷技术, 2012, 32(1): 72-75.

[13] 余克志, 丁国良, 陈天及. 陈列柜及风幕数值模拟的研究进展[J]. 制冷学报, 2011, 32(2): 39-44.

[14] GASPARD P D, GONCALVES L C C, PITARMA R A. Experimental analysis of the thermal entrainment factor of air curtains in vertical open display cabinets for different ambient air conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 961-969.

[15] GASPARD P D, GONCALVES L C C, PITARMA R A. CFD-parametric studies for global performance improvement of open refrigerated display cabinets[J]. Modelling & Simulation in Engineering, 2012, 2 012: 1-15.

[16] 王铁, 邓咏梅. 不同风幕对陈列柜温度场影响的研究[J]. 家电科技, 2014(2): 76-79.

[17] MARINETTI S, CAVAZZINI G, LAURI I, et al. Numerical and Experimental Analysis of the Air Flow Distribution in the Cooling Duct of a Display Cabinet[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 42: 8-13.

[18] WU Xue-hong, CHANG Zhi-juan, MA Qiu-yang, et al. Optimization and investigation of the effect of velocity distribution of air curtains on the performance of food refrigerated display cabinets[J]. Heat & Mass Transfer, 2015, 68(1): 1-15.

[19] STRIBLING D, TASSOU S A, MARRIOTT D. A two-dimensional cfd model of a refrigerated display case[R]. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1997: 1 136-1 138.

[20] AXELL M, FAHLEN P. Design criteria for energy efficient vertical air curtains in display cabinets[C]//21st IIR International Congress of Refrigeration. International Institute of Refrigeration, Washington: IIR, 1993: 667-678.

[21] 陈天及, 余克志, 严志刚, 等. 立式敞开式制冷陈列柜主要结构参数的合理选择[J]. 流体机械, 2005, 32(11): 59-61.

[22] MARINETTI S, CAVAZZINI G, FEDELE L, et al. Air velocity distribution analysis in the air duct of a display cabinet by piv technique[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(8): 2 321-2 331.

[23] MARINETTI S, ROSSETTI A. Air curtain temperature measurement in an open refrigerated display cabinet by ir thermography[J]. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2015, 12(1): 1-11.

[24] CAO Zhi-kun, GU Bo, MILLS G, et al. A novel strategy for predicting the performance of open vertical refrigerated display cabinets based on the mtf model and asvm algorithm[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(7): 1 413-1 424.

[25] CAO Zhi-kun, HAN Hua, GU Bo. A novel optimization strategy for the design of air curtains for open vertical refrigerated display cases[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16): 3 098-3 105.

[26] 甄欠, 宋宝玉, 杨萍, 等. 卧式敞开式冷藏陈列柜送风口的结构优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 93-97.

[27] FARAMARZI R. Efficient display case refrigeration[J]. ASHRAE Journal, 1999, 41(11): 46-52.

[28] 吕彦力, 曹秀琴, 吴学红, 等. 敞开式卧式陈列柜食品包温度分布的数值模拟[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2013, 28(2): 1-6.

[29] YIN Xue-mei, MA Qiu-yang, WU Xue-hong, et al. Numerical simulation on the food package temperature in refrigerated display cabinet influenced by indoor environment[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 16(2 013): 267-275.

[30] WU Xue-hong, CHANG Zhi-juan, ZHAO Xin-li, et al. A multi-scale approach for refrigerated display cabinet coupled with supermarket hvac system-Part II: The performance of vordc and energy consumption analysis[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 87: 685-692.

[31] WU Xue-hong, CHANG Zhi-juan, ZHAO Xin-li, et al. A multi-scale approach for refrigerated display cabinet coupled with supermarket hvac system-Part I: Methodology and verification[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 87: 673-684.

[32] 吴学红, 赵鑫利, 李伟平, 等. 柜外环境对敞开式冷藏陈列柜性能影响的多尺度计算研究[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2015, 30(2): 67-71.

[33] 张文慧, 龚毅, 吕彦力. 减湿预冷器对冷藏陈列柜风幕送回风状态的影响分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 111-114.

[34] 傅涛, 李君, 王海林, 等. 果蔬用敞开式制冷陈列柜温湿度场分布特性实验[J]. 制冷学报, 2014, 35(4): 34-41.

[35] AXELL M. Vertical display cabinets in supermarkets-energy efficiency and the influence of air flows[M]. Swedn: Chalmers University press, 2002: 239-240.

[36] 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.

[37] GRAY I, LUSCOMBE P, MCLEAN L, et al. Improvement of air distribution in refrigerated vertical open front remote supermarket display cases[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(5): 902-910.

[38] WU Xue-hong, CHANG Zhi-juan, YUAN Pei, et al. The optimization and effect of back panel structure on the performance of refrigerated display cabinet[J]. Food Control, 2014, 40: 278-285.

[39] 吕彦力, 薛牡丹, 袁培, 等. 陈列方式对立式冷藏陈列柜食品温度的影响[J]. 食品与机械, 2008, 23(6): 72-75.

[40] 陈蕴光, 袁秀玲. 立式冷藏陈列柜内部结构对冷风幕流动的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 62-66.

[41] CLODIC D, PAN Xue-qin. Heat exchanger shelves for better temperature control of food in open-type display cases[C]//International refrigeration and air conditioning conference. Chicago: IIR, 2002: 607-614.

[42] MAIDMENT G G, MISSENDEN J F, KARAYIANNIS T G, et al. An investigation of a novel cooling system for chilled food display cabinets [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering, 2005, 219(2): 157-165

[43] YU Mao, TERRELL W, HRNJAK P. Heat exchanger frosting patterns with evaporating R404a and single phase secondary refrigerant[C]//International refrigeration and air conditioning conference. New York: ASME, 1998: 277-281.

[44] HAGLUND-STIGNOR C, FAHLEN P, SUNDEN B, et al. Optimal operation of cooling-coils for display cabinets in secondary-loop refrigeration systems[C]//International Congress of Refrigeration. New York: ASME, 2003: 156-162.

[45] CHANDRASEKHARAN R, BULLARD C. Designtool for display case evaporators[J]. ASHRAE Transactions, 2005, 111(1): 1 071-1 082.

[46] LU Yan-li, ZHANG Wen-hui, GONG Yi. An experimental investigation into the effect of pre-cooler on open-type display cabinets[C]//International Congress of Refrigeration. Bei Jing: IIR, 2007: 137-143.

[47] 袁培. 食品冷藏柜制冷系统改进及节能技术研究[D]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2008: 23-47.

[48] 张文慧, 龚毅. 冷冻冷藏陈列柜蒸发器结霜研究及融霜技术现状[J]. 制冷, 2006, 25(3): 23-27.

[49] 张建一, 黄毅铭, 詹塋. 大型超市冷冻冷藏陈列柜应用现状和节能分析[C]//第五届中国冷冻冷藏新技术新设备研讨会. 成都: 中国制冷空调工业协会, 2011: 194-198.

[50] BACKMAN T J, ROOMSBURG J F. Liquid secondary cooling system: USA, 6467279 [P]. 2002-10-22.

[51] HARNISH J R. Control system and method for defrosting the outdoor coil of a heat pump: USA, 4563877 [P]. 1986-01-14.

[52] MARINETTI S, CAVAZZINI G, LAURI I, et al. Numerical and experimental analysis of the air flow distribution in the cooling duct of a display cabinet[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 42(3): 8-13.

[53] 朱进林, 谢品. 中国低温冷藏车节能减排的研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 236-239.

[54] 马聪, 梁雪, 王洪宝. 低温敞开式陈列柜的节能设计探讨[J]. 科技风, 2015(24): 14.

[55] 张华俊, 刘瑞和. 并联机组在陈列柜中的应用[J]. 冷藏技术, 2001(2): 37-39.

[56] 张华俊, 刘瑞和. 商用陈列柜选用机组探讨[J]. 制冷空调与电力机械, 2002, 23(1): 46-50.

[57] 朱兴旺, 时阳, 白宝安, 等. 冷藏陈列柜多机并联压缩机组节能的实验研究[J]. 轻工机械, 2005, 23(4): 146-149.

[58] 孙莹, 余克志, 陈天及. 环境送风式冷藏陈列柜的开发研究[C]//全国冷冻、冷藏行业制冷安全技术、节能、环保新技术发展研讨会论文集. 大连: 中国制冷学会, 2009: 50-55.

[59] 吴喜平. 国外冰蓄冷技术发展特点简介[J]. 电力需求侧管理, 2001, 3(2): 58-59.

[60] 余克志, 陈天及, 丁国良, 等. 集中送风式陈列柜的节能策略[J]. 节能技术, 2010, 28(2): 130-133.

[61] 吕彦力, 王新利, 张文慧, 等. 敞开式食品冷藏陈列柜耦合节能的实验研究[J]. 制冷, 2010(1): 27-30.

[62] 曹志坤, 顾众, 张朝昌, 等. 基于冷损双流体模型的冷藏陈列柜风幕的 cfd 计算及优化[C]//第六届全国食品冷藏链大会论文集. 上海: 中国制冷学会, 2008: 405-409.

[63] 杜子峥, 谢品. 冷库节能减排研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 253-258.

[64] 申江, 路坤仑, 刘兴华, 等. 国内超市冷冻冷藏陈列柜节能探讨[C]//第六届中国冷冻冷藏新技术、新设备研讨会论文集. 北京: 中国制冷空调工业协会, 2013: 206-210.

[65] LAGUERRE O, HOANG M, FLICK D. Heat transfer modelling in a refrigerated display cabinet: the influence of operating conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 353-364.

[66] 郑梦建, 楼军, 熊匀均, 等. 超市冷冻冷藏陈列柜改造方案探讨[J]. 制冷与空调, 2015, 15(6): 55-58.

[67] HE Qin-bo, WANG Shuang-feng, TONG Ming-wei, et al. Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (pcm) in low temperature cool storage [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64: 199-205.

[68] ORO E, DE Gracia A, CASTELL A, et al. Review on phase change materials (pcms) for cold thermal energy storage applications[J]. Applied Energy, 2012, 99: 513-533.

[69] 陈杨华, 李钰, 郭文帅, 等. 石蜡基碳纳米管复合相变蓄冷材料的热性能研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 110-113.

[70] LU Yan-li, ZHANG Wen-hui, YUAN Pei, et al. Experimental study of heat transfer intensification by using a novel combined shelf in food refrigerated display cabinets (experimental study of a novel cabinets)[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(2): 85-91.

[71] ALZUWAID F, GE Y, TASSOU S, et al. The novel use of phase change materials in a refrigerated display cabinet: an experimental investigation [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 770-778.

[72] 吴学红, 李伟平, 王立勋, 等. 填充相变材料的复合搁架的传热与蓄冷特性[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 23-28.

[73] 吴学红, 李伟平, 赵鑫利, 等. 蓄冷型热管搁架传热特性的实验研究[J]. 低温与超导, 2015, 43(1): 90-94.