doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.010

技术进展

敞开式食品冷藏陈列柜柜体节能研究进展

袁　培[1],陈帅良[1],郭晓林[2],唐　飞[1],刘奥龙[1],吕彦力[1]
（1.郑州轻工业大学 新能源学院,郑州 450001;2.生态环境部 对外合作与交流中心,北京 100035）

摘　要:食品品质是评价冷藏陈列柜性能的重要指标,食品区的温度直接影响着食品的新鲜度、安全性和保质期,冷藏陈列柜对于食品区空气温湿度的科学调控是保障食品品质的关键。目前,敞开式冷藏陈列柜存在柜体能耗高、食品品质不达标的问题,本文从气流组织优化、制冷系统改进、柜体改进 3 个方面对敞开式食品冷藏陈列柜的研究进展进行综述和分析。首先,详细介绍了气流组织优化方面的研究,包括优化送回风口结构、加装翼型导流结构,用于提高风幕性能及柜内温度均匀性;其次,综述了制冷系统改进研究进展,主要包括蒸发器结融霜优化、换热器结构改进及制冷剂替代;最后,探讨了自然冷源、相变材料、热管技术及负荷预测在敞开式冷藏陈列柜中的应用,引入自然冷源可显著降低柜体能耗,应用热管改善陈列柜蒸发器进出口的空气状态,提高柜体的运行效率。

关键词:冷藏陈列柜;冷藏性能;制冷系统;节能技术
中图分类号:TB65;TB66　　**文献标志码:**A

Research progress of energy saving in cabinet of open food refrigerated display cabinet

YUAN Pei[1],CHEN Shuailiang[1],GUO Xiaolin[2],TANG Fei[1],LIU Aolong[1],LYU Yanli[1]
（1.New Energy College,Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450001,China;
2.Foreign Environmental Cooperation Center,Ministry of Ecology and Environment,Beijing 100035,China）

Abstract: Food quality is an important indicator to evaluate the performance of refrigerated display cabinets,and the temperature of food area directly affects the freshness,safety and shelf life of food. At present,the open refrigerated display cabinet has the problems of high energy consumption and substandard food quality. This paper summarizes and analyzes the research progress of open refrigerated food display cabinets from three aspects:air flow optimization,refrigeration system improvement and cabinet improvement. Firstly,the research of air flow optimization is introduced in detail,including optimizing the structure of the air supply and return port,and installing the wing-type deflector structure to improve the performance of the air curtain and the temperature uniformity in the cabinet. Secondly,the research progress of refrigeration system improvement is reviewed,including evaporator defrosting optimization,heat exchanger structure improvement and refrigerant replacement. Finally,the application of natural cold source,phase change material,heat pipe technology and load prediction in open refrigerated display cabinets is discussed. The introduction of natural cold source can significantly reduce the energy consumption of the cabinet. The application of heat pipe to improve the air state of the evaporator inlet and outlet of the display cabinet,and improve the operating efficiency of the cabinet.

Key words:refrigerated display cabinet;refrigeration performance;refrigerating system;energy saving technologies

0　引言

冷藏陈列柜作为冷链的末端设备,具有低温保存、展示食品的功能,对保障食品品质和安全有重要意义[1]。冷藏陈列柜主要为温度敏感、易腐食品提供贮藏空间,维持食品的新鲜度,根据风幕与外部空气的作用方式分为敞开式和闭式。敞开式冷藏陈列柜因其具有良好的展示效果、方便取放、空间利用率高、便于清洁和维护、适应性强等优点,受到商家和消费者的青睐。国内外学者对敞开式冷藏陈列柜的研究涉及了制冷技术与性能[2-3]、食品质量与安全[4-5]、节能与环保[6-7]、

收稿日期: 2024－07－10　**修回日期:** 2025－01－12
基金项目: 国家自然科学基金项目(51476148);河南省制冷与低温设备节能技术创新科技团队项目(CXTD2011042)

柜体设计与优化[8-9]、敞开式与闭式陈列柜的争论[10-11]等多个方面。然而，目前敞开式冷藏陈列柜仍存在柜体能耗高和食品品质不达标的问题，如图 1 所示。

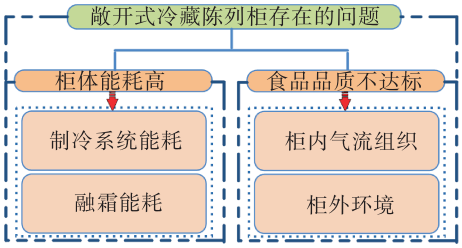


图 1　敞开式冷藏陈列柜存在的问题

Fig.1　Problems with open refrigerated display cabinet

随着超市零售业的快速发展，超市节能已成为商家逐利、提高竞争力的有效手段。超市内陈列柜的不正常开启，温度不达标等危害食品品质的事件时有发生，食品品质是评价冷藏陈列柜性能的重要指标，食品区的温度直接影响着食品的新鲜度、安全性和保质期，冷藏陈列柜对于食品区空气温湿度的科学调控是保障食品品质的关键。

一些学者从不同的角度综述了敞开式冷藏陈列柜的研究进展，如吴学红等[12]从风幕性能、环境温湿度和相变蓄冷材料的应用方面进行综述；邱雪君等[13]分析了内部结构、制冷工质等对敞开式冷藏陈列柜性能的影响，并探讨了相应的优化改进方法；盖若男等[14]从结构设计和系统改进等方面，分析柜内结构变化和制冷系统改进对敞开式冷藏陈列柜能耗的影响。

本文针对敞开式冷藏陈列柜存在的问题，从气流组织优化、制冷系统改进、柜体改进 3 个方面，综述敞开式冷藏陈列柜的研究进展，探究设备节能与科学调控食品区空气温度的方法，如图 2 所示。

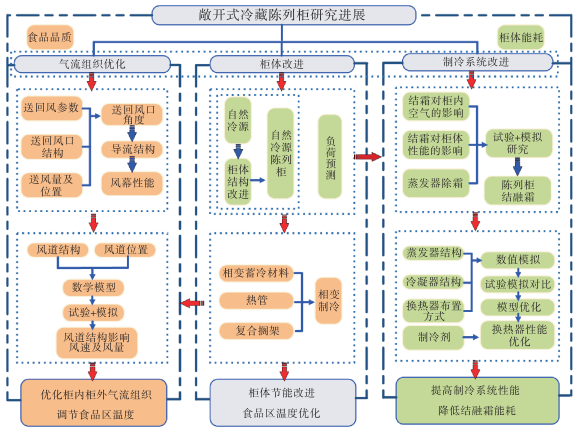


图 2　敞开式冷藏陈列柜研究进展

Fig.2　Research progress of open refrigerated display cabinet

1　气流组织优化

敞开式食品冷藏陈列柜的气流组织系统为半开放回路，柜外热空气通过风幕与柜内气流组织进行热质交换，如图 3 所示。经过蒸发器的冷空气，一部分经过风道由格栅或蜂巢型送风口送出，在回风机的抽吸作用下形成风幕的一部分；另外一部分冷空气通过背风板进入冷藏柜食品贮藏区，冷空气与食品进行换热后形成风幕的另一部分。此外，外界环境中的热空气在风幕的卷吸作用下也渗透进入柜内的气流组织。

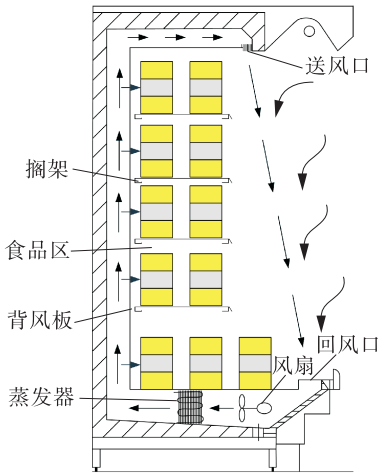


图 3　敞开式冷藏陈列柜气流组织示意

Fig.3　Schematic diagram of airflow organization of open refrigerated display cabinet

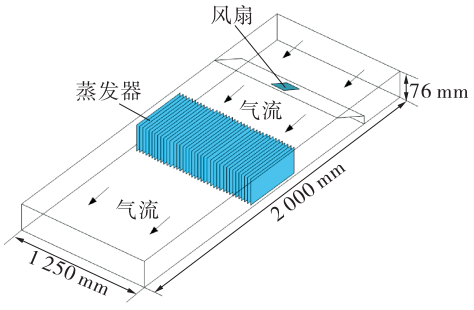
敞开式冷藏陈列柜内的气流组织对柜体能耗具有重要影响。研究表明，通过风幕渗透进入柜内的热负荷约占柜体总热增量的 67%~77%[15]，因此，增强风幕性能，可以有效阻止外界环境中热湿空气的进入，从而降低柜体负荷，确保柜内食品维持在所需的冷藏温度范围内。针对敞开式冷藏陈列柜的气流组织优化，主要从送回风口、送风风道结构、送回风参数及背风板开孔率等方面开展研究。

1.1　送回风口结构优化

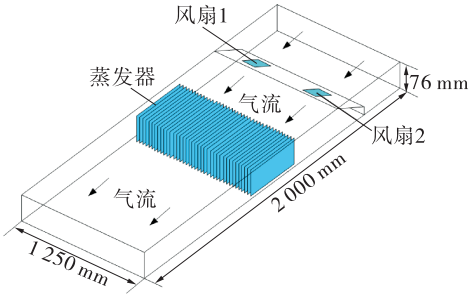
送回风口的结构直接影响风幕特性，进而影响食品区空气质量。张耀吉等[16]研究了送风口角度对敞开式冷藏陈列柜内温度场和流场的影响，发现适当减小送风口角度，可以改善柜内温度场与流场，当送风口角度为25°时，风幕效率最高。甄大等[17]对送风口结构进行了试验研究，采用正六边形蜂窝状送风口代替导流板结构，发现使用蜂窝状结构可从不同程度上降低柜内送风口

及回风口区域的温度，温度降低 1.34% ~45.62%。贾晓东[18]采用 CFD 方法研究蜂窝送风口结构对敞开式冷藏陈列柜风幕性能的影响，结果表明，当蜂窝送风口孔径为 5 mm，厚度为 30 mm，送风角度为 40°，速度为 0.9 m/s 时，风幕性能最佳。

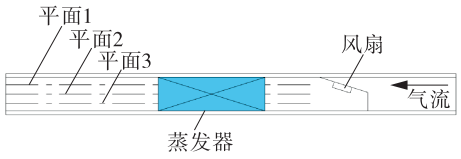
陈天及等[19]研究了敞开式冷藏陈列柜循环风机数量及安装位置对送风系统的影响，研究表明，使用双风机替代单风机后，送风口平均风速达到 0.57 m/s，风幕性能最佳，柜内温度分布均匀性提高 22.29%，蒸发器结霜量减少 9.26%，总能耗减少 2.53%。MARINETTI 等[20]通过粒子图像测速技术（Particle Image Velocimetry，PIV）对内部风道的空气对流进行了试验研究，分析流场的发展及其对蒸发器传热效率的影响。如图 4 所示，对回风口单风扇配置和双风扇配置进行对比，研究 3 个不同高度的平面分析蒸发器入口和出口的气流分布，结果表明，单风扇配置质量流率分布不均匀，总传热系数约降低 16%；双风扇流场相互作用引起二次流干扰风扇出口和蒸发器入口之间的区域，导致总传热系数约降低 7%。因此，与单风扇配置相比，双风扇配置更好地改善了风道结构，有效地减少了热能损失。在风幕送回口风速研究方面[21]，研究发现，当风幕送风口平均速度在 0.5~1.1 m/s 范围内，风速每增加 0.15 m/s 时，食品包温度降低 0.2~1.1 ℃。因此，可以通过调节送风口的平均速度来有效控制柜内温度。



（a）单风扇配置



（b）双风扇配置



（c）风扇支架及测量激光平面侧视图

图 4 测试风道示意

Fig.4 Schematic diagram of test air duct

1.2 风道结构优化

优化风道结构可有效改善柜内气流组织，提高柜内温度均匀性，如在食品搁架前加装导流板等。SUN 等[22]通过在搁架前段加装导风板来改善风幕的性能，发现与不带导风板的冷柜相比，导风板能够对风幕进行有效的整流，提高了柜体的冷藏性能，带有导风板的敞开式冷藏陈列柜中食品平均温度降低了 4.9 ℃，且冷藏食品所需的制冷量下降了 34%。袁培等[23-24]通过在敞开式冷藏陈列柜的搁架前段加装翼型导流装置（如图 5 所示），研究翼型结构对陈列柜性能的影响，结果表明，加装翼型结构可以有效对抗室内热空气对风幕的扰动，增强风幕性能，加装翼型结构后，制冷系统的蒸发温度升高 1.8 ℃，柜内最大平均温差降低 31%，柜内温度分布更加均匀，且系统总能耗降低 21.6%。

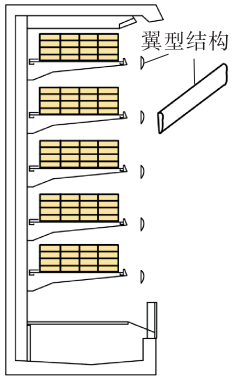


图 5 翼型结构示意

Fig.5 Schematic diagram of airfoil structure

当背风板出风口结构设计不合理时，会导致冷空气难以有效渗透进入食品区，且风幕性能降低。孟祥兆等[25]建立了敞开式冷藏陈列柜的数学模型，并运用商业软件对气流组织进行了研究，结果表明，影响柜内空气流动及风幕的主要因素是环境温度、风幕送回风口宽度、风幕送风速度和背风板出风速度，并指出提高背风板出风口的风速可使风幕送回风口温差显著降低。AMIN 等[26]通过试验证明，背风板渗透风量的 70%~80% 会

返回至风幕回风口，并对风幕的回风温度具有明显的影响。WU 等[27]分析了背风板通孔率和通孔位置对搁架内外侧食品包温度的影响，提出当背风板的通孔率在 2%~3% 时，其出风量占总风量 30% 左右，风幕性能最佳。

综上所述，敞开式冷藏陈列柜内的气流组织优化主要包括两方面的内容：对于送回风口结构的改进，包括改进送回风口角度、采用蜂窝状送风口结构、调整风幕送风口速度；对于风道结构的优化，包括在搁架前加装导风板或翼型导流装置、改进背风板通孔率。敞开式冷藏陈列柜柜内气流组织是送回风参数、送回风口结构、风幕特性及风道结构等共同影响的结果。因此，应开展多因素综合作用对于风幕性能的影响研究。

2 制冷系统改进

敞开式冷藏陈列柜的制冷系统能耗占柜体总能耗的一大部分。柜体开放式的结构使得制冷系统易受外部空气的影响，从而导致制冷系统能耗增加。因此，对制冷系统进行优化是柜体节能降耗的有效方法。图 6 示出立式敞开式冷藏陈列柜制冷系统示意。

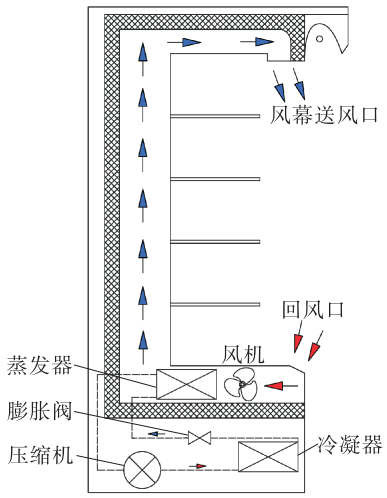
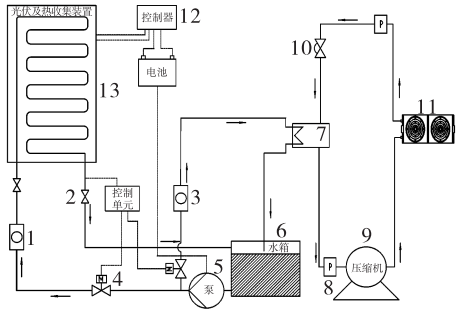


图 6 立式敞开式冷藏陈列柜制冷系统示意

Fig.6 Schematic diagram of refrigeration system of vertical open refrigerated display cabinet

2.1 蒸发器结霜与融霜研究

在冷藏陈列柜的制冷系统中，当蒸发器外表面温度降至 0 ℃以下时，会形成霜层。随着霜层的增厚，蒸发器外侧的换热热阻增大，空气流动阻力随之增加，从而影响蒸发器的换热效率。BAHMAN 等[28]通过试验研究发现，超市用于除霜的能耗约占制冷系统总能耗的 15%，因此，改善敞开式冷藏陈列柜结融霜问题有利于设备节能。ZHANG 等[29]提出了一种无霜敞开式冷藏陈列柜，通过使用干燥剂去除进入蒸发器的空气中的水分来拟制结霜，并系统研究了利用制冷系统冷凝热使干燥剂再生的方法，结果表明，在蒸发器回风温度为 12 ℃，相对湿度为 60% 的条件下，压缩机的 *COP* 达到了 3.2，压缩机的日电能消耗为 10.5 kW·h，这种方法实现了干燥剂的有效循环利用，从而提高了制冷系统的能效。CAO 等[30]提出采用合理的立式敞开式冷藏陈列柜运行策略来减少蒸发器结霜量，将双流体模型（Modified Two-Fluid，MTF）和自适应向量机（Adaptive Support Vector Machine，ASVM）算法改良后用于处理控制参数之间的非线性关系，结果表明，预测模型的结霜量和能耗分别降低了 39.2% 和 19.3%。TALBOT 等[31]对敞开式冷藏陈列柜内食品贮藏区的温度与融霜次数之间的关系进行研究，结果表明，融霜次数的增加会导致陈列柜搁架前端温度较高，且在除霜过程中关闭风扇可以减少陈列柜内温度波动。针对制冷系统蒸发器易结霜的问题，ONUR 等[32]提出采用 PV/T 模块的新型制冷系统，系统原理如图 7 所示。该系统在相同的制冷量和设计温度条件下，比常规系统除霜时间更短，在除霜期间，系统的 *COP* 平均提高了 9%，具有更好的节能潜力。



1- 流量计；2- 阀门；3- 流量计；4- 电磁阀；5- 泵；6- 水箱；7- 蒸发器与除霜管路；8- 压力表；9- 压缩机；10- 膨胀阀；11- 冷凝器；12- 控制器；13- 光热收集器。

图 7 PV/T 制冷系统原理

Fig.7 Schematic diagram of PV/T refrigeration system

张文慧等[33]在蒸发器前段加装减湿预冷器，对风幕的回风进行预冷和除湿，试验结果表明，安装减湿预冷器可有效减少蒸发器的结霜并降低回风的焓值，减少了敞开式冷藏陈列柜的负荷。

2.2 换热器性能优化

换热器是影响陈列柜容积、制冷效果和能耗的关键因素，换热器体积减小则利于柜体容积改善；换热器换热量和换热效率提高则利于陈列柜工作性能提升；换热器内流体流阻降低则利于降噪和节能。WANG 等[34]通过试验研究了敞开式冷藏陈列柜有无冷凝水回收系统对传热的影响，研究结果表明，增加冷凝水回收系统可以增强传热效率，提高系统性能指数。HEIDINGER 等[35]通过试验研究了敞开式冷藏陈列柜蒸发器排管布置方式对柜体性能的影响，表 1 列出 3 种翅片布置参数，结果表明，入口小翅片间距、出口大翅片间距的非均匀翅片排布更有利于柜内空气温度的均匀性和换热效率的提高。针对翅片管换热器的性能优化，小管径传热管的设计是目前的研究热点。针对小管径翅片管换热器的理论和试验研究表明，通过设计管的结构及管排布置，能够在不增加单位成本的前提下增强换热器的换热性能[36-37]。

表 1 3 种翅片布置参数

Tab.1 Three fin arrangements

布管数	管排数	前半段翅间距 /mm	后半段翅间距 /mm	换热面积 /m^2
24	8	10	10	23.66
24	8	7.5	15	23.66
24	8	15	7.5	23.66

2.3 制冷剂替代

寻找理想的制冷剂是制冷系统研究的热点[38]。在双碳目标的背景下，制冷剂替代对于制冷设备的发展尤为重要。

目前，国内制冷设备主要使用 R404A，R134a 等受限的制冷剂。针对敞开式冷藏陈列柜所需的冷藏温度和换热器条件，可选用的制冷剂包括 R404A，R507A 等[39]。GE 等[40]在不同的室内环境条件下，对采用 R404A 和 R22 的敞开式冷藏陈列柜的性能进行模拟和对比研究，结果表明，在特定的工况下，使用 R404A 的冷藏陈列柜所需的冷负荷和制冷剂流量高于使用 R22 的冷藏陈列柜。SUN 等[41]使用 R717，R152a 和 R161 替代 R404A，发现采用新型制冷剂的制冷系统具有更高的 *COP*。唐俊杰等[42-43]对采用 R717 的制冷系统进行研究，结果表明，在规范的操作和安全标准的前提下，R717 在制冷系统中的使用是安全、高效、可靠的。许晨怡等[44]针对氢氟烯烃制冷剂在制冷系统中的应用进行分析，发现在短期内，R448A，R449A 和 R452A 可作为 R507A 和 R404A 的替代品。长期来看，寻找合适的 R507A 和 R404A 的替代品仍是制冷行业面临的重要问题。滑雪等[45]综述了我国大型商超制冷剂的使用情况，结果表明，R22 占比高达 50.88%，R404A 占比为 31.58%，R407F/A 占比为 14.04%，而 R507A 仅占 3.50%，其他制冷剂如 R744 很少使用。

欧洲、日本等国大力发展二氧化碳制冷技术并用于商超制冷[46-47]。我国研究人员也对二氧化碳制冷技术做了许多研究。CUI 等[48]对我国超市商用 CO_2 制冷系统进行了分析，结果表明，一些典型的 CO_2 制冷系统在南方地区的经济性明显较差。CAO 等[49]全面分析了跨临界 CO_2 增压制冷系统的使用情况，研究表明，跨临界 CO_2 制冷技术在我国具有很大的市场潜力。耿旭东等[50]通过分析 CO_2 制冷系统在超市中的应用，得出“多合一” CO_2 制冷系统具有良好的应用前景。PARDIÑAS 等[51]通过试验对超市使用的 R744 制冷系统进行了研究，为 R1270/R744 的研究提供了参考。HUANG 等[52]对 R744 双温增压系统进行了综合分析，结果表明，该系统在我国南方地区的适用性更好，能效更高。林励冠等[53]对 R744 双级制冷系统进行了数值模拟，结果表明，该系统比 R404A 系统具有更好的节能效果。司春强等[54]研究了超市 CO_2 制冷系统的性能测试和评价方法，并提出了相应的评价方法及指标。刘圣春等[55]通过构建采用热交换器、并行压缩与机械过冷的 CO_2 制冷系统模型，研究炎热地区该系统的性能变化情况，结果表明，改进后的系统全年性能系数提高且能耗降低。WANG 等[56]通过试验研究了分别使用 R290，R744，R600 和 R290/R600 混合制冷剂的冷藏陈列柜的工作性能，结果表明，在环境温度低于 20 ℃时，使用 R290/R600 的柜体与使用 R744 的柜体性能相似，均比使用 R290 的柜体更节能，而在环境温度高于 25 ℃时，使用 R290 的柜体性能优于R744，但差于使用R290/R600的柜体。总体而言，采用 R290/R600 混合制冷剂的冷藏陈列柜在较大的环境温度范围内，均表现出良好的工作性能。

综上所述，敞开式冷藏陈列柜制冷系统的改进包括 3 个方面的内容，针对蒸发器结融霜问题，通过加装干燥剂或减湿预冷器、采用合理的运行策略减少融霜时间；针对换热器性能的优化，主要

体现在换热器排管布置方式的改进；针对制冷剂替代问题，采用更节能环保的新型制冷剂或 CO_2 制冷系统。其中，敞开式冷藏陈列柜蒸发器结融霜的研究还存在不足，缺少从机理上对柜体性能与蒸发器结融霜相互作用关系的研究。

3 柜体改进

敞开式冷藏陈列柜柜体改进主要体现在引入自然冷源、相变材料及热管技术、柜体负荷预测。自然冷源的应用能够减少制冷系统的运行时间，降低敞开式冷藏陈列柜的能耗。相变材料及热管技术的应用，能够减少外界热空气对柜内空气的影响，保障食品品质。冷藏陈列柜负荷预测模型能够对柜体能耗进行精确预测，从而优化柜体的运行策略，减少柜体能耗。

3.1 自然冷源

为了降低超市制冷系统的运行能耗，利用寒冷冬季的低温环境空气作为自然冷源对敞开式冷藏陈列柜进行供冷，是目前食品冷藏技术研究的一个热点。

孙莹等[57]改进了敞开式冷藏陈列柜的风道结构，将寒冷冬季的低温空气直接引入柜内对冷柜进行供冷，试验结果表明，该技术可使敞开式冷藏陈列柜节约 44%的运行能耗。袁培等[58-59]通过试验测得敞开式冷藏陈列柜在室外温度 3 ℃以下时，自然冷源完全可满足食品的冷藏条件，且不需要附加其他条件，自然冷源陈列柜能耗仅是传统陈列柜的 34%，但柜内温度均匀性有很大波动。目前，自然冷源直接引入冷柜内，一定程度上可以达到节能降耗的目的，但受室外温度限制。对此，袁培等[60]搭建了自然冷源冷藏陈列柜系统，通过蓄冷罐将自然冷源间接引入陈列柜中，并通过试验探究了自然冷源和蓄冷罐对陈列柜制冷系统性能的影响，结果表明，蓄冷罐 12 h 的蓄冷量能满足陈列柜 9 h 的冷量需求，能够使系统的能耗降低 68.45%。

3.2 相变材料及热管技术

在敞开式冷藏陈列柜中使用相变材料可以有效减少融霜期间柜内温升，且有助于提高柜内温度的均匀性[61]。许多研究人员研究了相变材料（Phase Change Material，PCM）安装在蒸发器、冷凝器或搁架对柜内温度均匀性及制冷系统能耗的影响，表 2 列出了在制冷系统的主要部件上应用相变材料的优缺点[62]。

表 2 制冷系统组件使用相变材料的优缺点

Tab.2 Advantages and disadvantages of using phase change materials in various applications of refrigeration systems

组件	优点	缺点
蒸发器	增强系统性能；降低噪音；减少峰值用电量；降低制冷系统总成本	冷凝温度较高；单个循环中压缩机工作增加
冷凝器	提高 *COP*；降低冷凝温度和压力；提高过冷度	压缩机频繁启停；单循环中制冷剂损失增加
搁架	减少储存物品的温度波动；降低能耗；降低融霜期间柜内温升	减少搁架储物空间；相变材料容易泄漏

HOANG 等[63]将相变材料应用在食品外包装，建立了封装相变材料的传热模型，结果表明，与标准包装的食品相比，使用相变材料延长了食品的货架期。WU 等[64]使用 3 种有机石蜡基相变材料 RT3，RT4 和 RT5，探讨了相变材料与冷藏陈列柜温度波动的关系，结果表明，相比普通陈列柜，采用相变材料可以增强柜内温度均匀性。BEN-ABDALLAH 等[65]设计了应用在敞开式冷藏陈列柜风道中的蓄冷换热器，蓄冷换热器结构如图 8 所示，总传热面积为 25 m^2，使用 7 kg 水作为 PCM，试验结果表明，在 2 h 的停机时间内，蓄冷换热器将柜内温升限制在 1 ℃以内，而未安装蓄冷换热器的陈列柜，相同条件下柜内温度升高 2 ℃。此外，由于在释冷过程中柜内空气与 PCM 之间的温差较大，PCM 的蓄冷过程比释冷过程的时间长约两倍。将相变材料填充至冷藏陈列柜的搁架内，当压缩机工作时相变材料蓄冷，当压缩机停机时相变材料释放冷量，维持柜内温度。

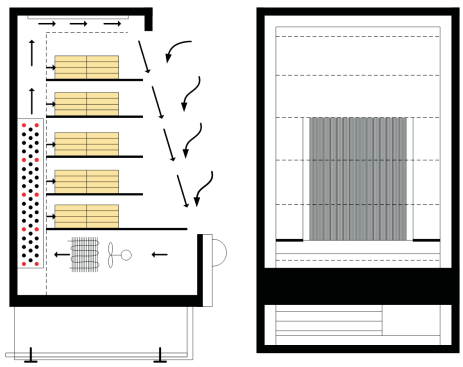


图 8 蓄冷换热器

Fig.8 Diagram of cold storage heat exchanger

么宇等[66]建立带有蓄冷搁架的敞开式冷藏陈列柜三维模型，采用数值模拟的方法，研究蓄冷

搁架对柜内温度场和流场的影响，结果表明，使用相变材料的搁架能够减小各层货架间的温差，降低柜内温度梯度，更有利于货物的冷藏保存。ALZUWAID 等[67]研究蓄冷换热器中填充由水和成核剂组成的相变材料，在压缩机开启期间，当来自蒸发器的冷空气流过蓄冷换热器表面时开始蓄冷；在融霜期间压缩机关闭，柜内空气温度高于 PCM 的熔化温度，柜内空气与蓄冷换热器进行换热，能够使柜内温度下降，结果表明，在 24 h 内，压缩机的能耗降低了 5%，融霜阶段的柜内温升降低 2 ℃，压缩机工作状态随时间变化关系如图 9 所示。在此基础上，袁培等[68-69]利用 Fluent 软件对整个系统进行二维 CFD 数值模拟，并进行了试验对比验证，结果发现，与未使用 PCM 的标准机柜相比，该机柜的潜在节能率为 6.4%，随着压缩机循环次数减少 27%，压缩机寿命得到了提高。目前，影响相变材料性能的主要因素是相变温度、完全释冷时间及导热系数，这三者之间的关系还有待进一步的研究。

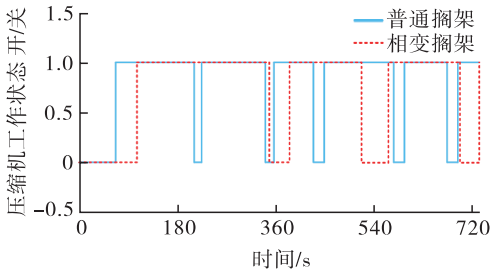


图 9 普通搁架与相变搁架的陈列柜压缩机工作状态随时间变化情况

Fig.9 The working status of the compressor of the display cabinet of the ordinary shelf and the phase change shelf changes with time

热管是一种基于液体蒸发和凝结特性的热传输装置，具有高效、稳定、噪声低和易于控制等优点，可以将大量的热通过很小的截面传输而无需额外动力[70]。LU 等[71]研究了热管搁架对食品温度均匀性的影响，以及热管与硼砂类相变材料构成的复合式搁架与柜内食品温度变化规律，所设计的热管搁架如图 10 所示，研究结果显示，在敞开式冷藏陈列柜融霜期间，热管搁架可以将柜内食品温度波动降低约 1.5 ℃。热管能有效解决制冷设备的性能衰减问题。YAU 等[72]研究热管换热器蒸发段和风机盘管的性能，结果表明，增加热管后，风机盘管的冷却能力有所提升。SHEN 等[73]根据平行流换热器的特点结合热管换热器模型，研究了热管换热器系统对设备制冷过程的增强作用，研究表明，热管换热器在降低了设备显热的同时提高了制冷效率。IBNU 等[74]通过试验探究热管在空调系统中的应用，应用带翅片 U 型热管换热器对空调的送回风过程进行预冷和再热，并与采用传统板式换热器的空调系统进行对比，结果表明，热管换热器对空调系统的预冷和再热过程影响显著，可以在一定程度上调节设备内空气状态，改善空气品质，且投资回收期较短，具有较好的节能潜力。

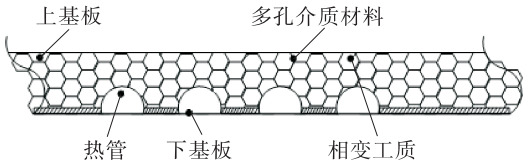


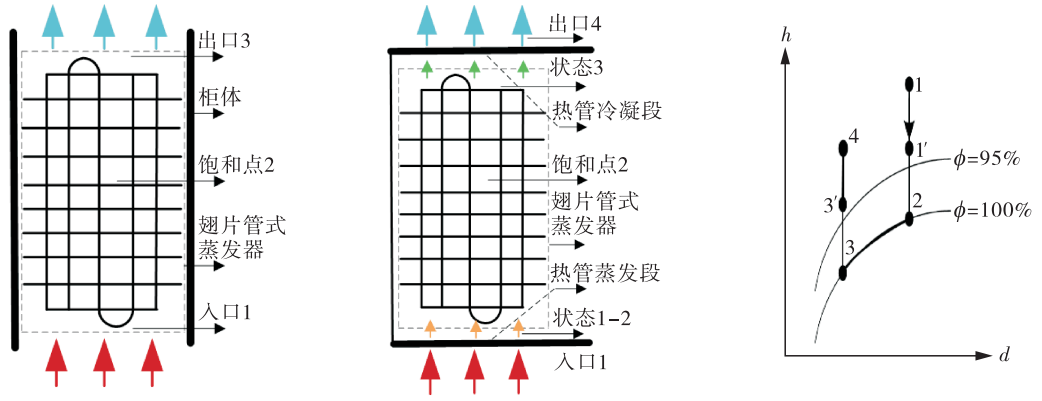
图 10 热管搁架示意

Fig.10 Schematic diagram of heat pipe rack

上述研究表明，热管技术在制冷设备中的应用是被动式的，不需要额外的能量输入，且不会显著改变现有的制冷系统。因此，热管在敞开式冷藏陈列柜中的应用具有良好的前景，不仅可以用于热管搁架，还可以改善设备内空气状态，如图 11 所示，热管改善了进出蒸发器的空气状态，有利于食品区空气质量的提高，从而保障食品品质。

3.3 负荷预测

敞开式冷藏陈列柜的负荷是反映柜体能耗的重要参数，由于其开式的结构特点，柜体的负荷呈现出非线性波动的特性[75]。因此，对于柜体负荷的研究能够为优化陈列柜的运行策略提供重要参考。BEN-ABDALLAH 等[76]基于 Modelica 语言建立了敞开式陈列柜瞬态热模型，用于预测柜内的热行为，并通过试验数据对模型进行验证，结果表明，该模型可以预测冷藏及除霜阶段的柜内气温。针对敞开式冷藏陈列柜负荷复杂多变且传统预测方法精确度较低的问题，YUAN 等通过引入深度学习算法对敞开式冷藏陈列柜的负荷进行预测，基于 CEEMD-IPSO-LSTM 组合算法，建立了冷藏陈列柜负荷预测模型，并与其他模型的预测结果进行比较，结果表明，CEEMD-IPSO-LSTM 模型的预测精度最高，模型的决定系数为 0.910 5，具有显著的优势[77-78]。



（a）普通陈列柜空气处理过程　（b）热管陈列柜空气处理过程　（c）显热降低情况

图 11　普通陈列柜与热管陈列柜空气处理过程及显热的降低情况

Fig.11　Air treatment process and sensible heat reduction of ordinary display cabinets and heat pipe display cabinets

4　结论

（1）对于敞开式冷藏陈列柜柜内气流组织的的研究，包括送回风参数、送回风口结构、风幕特性及风道结构等多个方面，研究多集中在单因素对于风幕性能的影响，多因素耦合与风幕性能的关系仍有待进一步研究。

（2）敞开式冷藏陈列柜柜内蒸发器结融霜的研究还存在不足，现有的研究仅考虑融霜方法，而从机理上探究蒸发器结融霜过程的研究较少，柜体性能与蒸发器结融霜的相互作用的关系有待解决。

（3）自然冷源技术在敞开式冷藏陈列柜中的应用受室外环境影响适用性较差。相变材料在敞开式冷藏陈列柜柜体中的应用还存在许多缺点，影响相变材料性能的研究还存在不足。热管技术在敞开式冷藏陈列柜中的应用主要集中于热管搁架，对于热管与蒸发器的相互作用关系的研究还存在不足。

5　展望

（1）气流组织优化方面。通过流体仿真研究柜内送回风参数、送回风结构、风幕特性及风道结构等对于柜体性能的影响，多角度分析气流组织对食品品质的影响。

（2）制冷系统改进方面。通过探究柜内蒸发器结融霜机理，分析结融霜与柜体能耗变化的作用关系，探究融霜最优策略及方法。

（3）柜体改进方面。将自然冷源技术在陈列柜中进一步应用，通过研究不同外部环境对自然冷源陈列柜柜体性能的影响，提高柜体适应性。综合分析影响相变材料性能的因素。通过流体仿真研究热管与蒸发器的相互作用关系，将相变蓄材料与热管技术耦合应用于陈列柜中，分析其对柜内食品品质的影响，是柜体改进的未来方向。

参考文献：

[1] XIA J，GUO J，WEI X，et al.Effect of shelf aperture ratio on the temperature distribution of an open refrigerated display cabinet[J].Applied Sciences，2022，12(20)：10296.

[2] 王雅博，郑洋，李雪强，等．工况参数对冷藏陈列柜性能影响的研究[J]．家电科技，2022(6)：103－109.
WANG Y B，ZHENG Y，LI X Q，et al.Study on the influence of working condition parameters on the performance of refrigerated display cabinet[J]. Journal of Appliance Science & Technology，2022(6)：103－109.

[3] DEMIRPOLAT H.The energy efficiency and environmental analysis of open-type commercial display cabinet with a multi-flow air curtain design[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments，2023，60：103555.

[4] YUAN P，ZENG Q，LEI Z H，et al.Experimental and numerical study of heat transfer and flow characteristics with different placement of the multi-deck display cabinet in supermarket[J].Open Physics，2021，19(1)：256－265.

[5] XIE Y，BRECHT J K，ABRAHAN C E，et al.Improving temperature management and retaining quality of fresh-cut leafy greens by retrofitting open refrigerated retail display cases with doors[J].Journal of Food Engineering，2021，292：110271.

[6] HUANG S J，CHEN Q，LIU G Q，et al.Performance improvement for an open refrigerated display cabinet by

limited coverage on the air curtain opening[J].International Journal of Refrigeration,2024,158:111 – 123.

[7] ROCHA T T M,TEGGAR M,TREVIZOLI P V,et al.Potential of latent thermal energy storage for performance improvement in small-scale refrigeration units:A review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2023,187:113746.

[8] ERTEN S,ÖDER M,AKTAŞ M,et al.Design and experimental analysis of condensate pan for plug-in refrigerated display cabinets:Improving drying efficiency[J].Applied Thermal Engineering,2024,248:123198.

[9] LIN C H,CHENG P S,HSIEH C H,et al.Investigations on predictions of cooling capacity for open refrigerated display cabinet using CFD approach with different positions of perforated back panels[J].Thermal Science and Engineering Progress,2023,43:102018.

[10] DE FRIAS J A,LUO Y G,ZHOU B,et al.Effect of door opening frequency and duration of an enclosed refrigerated display case on product temperatures and energy consumption[J].Food Control,2020,111:107044.

[11] DE FRIAS J A,LUO Y G,KOU L P,et al.Improving spinach quality and reducing energy costs by retrofitting retail open refrigerated cases with doors[J].Postharvest Biology and Technology,2015,110:114 – 120.

[12] 吴学红,王春煦,李伟平,等.敞开式食品冷藏陈列柜研究进展[J].食品与机械,2016,32(6):208 – 214.
WU X H,WANG C X,LI W P,et al.Research progress of open type food refrigerated display cabinets[J].Food & Machinery,2016,32(6):208 – 214.

[13] 邱雪君,赵宜范,樊博玮,等.敞开式冷藏陈列柜研究进展[J].冷藏技术,2020,43(2):55 – 59.
QIU X J,ZHAO Y F,FAN B W,et al.Research progress on open refrigerated display cabinets[J].Journal of Refrigeration Technology,2020,43(2):55 – 59.

[14] 盖若男,矫佳伟,王天娜,等.商用敞开式冷藏陈列柜节能技术研究进展[J].冷藏技术,2023,46(2):59 – 63.
GAI R N,JIAO J W,WANG T N,et al.Research progress of energy saving technology for open commercial refrigerated display cabinets[J].Journal of Refrigeration Technology,2023,46(2):59 – 63.

[15] CHAOMUANG N,FLICK D,DENIS A,et al.Experimental and numerical characterization of airflow in a closed refrigerated display cabinet using PIV and CFD techniques[J].International Journal of Refrigeration,2020,111:168 – 177.

[16] 张耀吉,石丽华,黄东.送风角度对冷藏室内流场及温度场的影响[J].家电科技,2018(增刊1):55 – 58.
ZHANG Y J,SHI L H,HUANG D.Effect of air-supplied angle on flow and temperature fields in refrigerating compartment of frost-free refrigerator[J].Journal of Appliance Science & Technology,2018(Sup.1):55 – 58.

[17] 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.
ZHEN B,SONG B Y,YANG P,et al.Outlet structure optimization of horizontal open refrigerated display cabinet[J].Food & Machinery,2014,30(1):93 – 97.

[18] 贾晓东.立式冷藏陈列柜蜂窝出风口优化设计的CFD仿真分析[J].内燃机与配件,2018(16):200 – 202.
JIA X D.Honeycomb design optimization of multi–deck refrigerated display cabinet using cfd simulation[J].Internal Combustion Engine & Parts,2018(16):200 – 202.

[19] 陈天及,周新栋,余克志,等.敞开式低温陈列柜送风系统的优化设计研究[J].低温与超导,2010,38(11):41 – 45.
CHEN T J,ZHOU X D,YU K Z,et al.Optimized design of the air curtain system for open frozen display case[J].Cryogenics & Superconductivity,2010,38(11):41 – 45.

[20] 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):2321 – 2331.

[21] CHANG Z,WU X,LU Y,et al.Numerical simulation on the food package temperature in refrigerated display cabinet influenced by indoor environment[J].Advances in Mechanical Engineering,2013:708785.

[22] SUN J,TSAMOS K M,TASSOU S A.CFD comparisons of open-type refrigerated display cabinets with/without air guiding strips[J].Energy Procedia,2017,123:54 – 61.

[23] 袁培,曾庆辉,雷正霖,等.翼型结构对立式敞开式冷藏陈列柜性能的影响[J].制冷学报,2021,42(3):121 – 127.
YUAN P,ZENG Q H,LEI Z L,et al.Influence of airfoil structure on performance of vertical open refrigerated display cabinet[J].Journal of Refrigeration,2021,42(3):121 – 127.

[24] 袁培,徐瑞聪,王谦,等.导流格栅对冷藏陈列柜性能影响的试验研究[J].热科学与技术,2020,19(4):327 – 331.

YUAN P,XU R S,WANG Q,et al.Experimental study on the effect of diversion grille on the performance of refrigerated display cabinets[J].Journal of Thermal Science and Technology,2020,19(4):327 – 331.

[25] 孟祥兆,俞炳丰,王洋浩.立式多搁架陈列柜风幕及柜内空气流动和换热的数学模型的研究[J].流体机械,2001(2):50 – 52.
MENG X Z,YU B F,WANG F H.A study on the mathematical modeling of air curtains and air flow and heat transfer inside vertical multi-shelf display cabinets[J].Fluid Machinery,2001(2):50 – 52.

[26] AMIN M,DABIRI D,NAVAZ H K.Effects of secondary variables on infiltration rate of open refrigerated vertical display cases with single-band air curtain[J].Applied Thermal Engineering,2012,35:120 – 126.

[27] WU X H,CHANG Z J,YUAN P,et al.The optimization and effect of back panel structure on the performance of refrigerated display cabinet[J].Food Control,2014,40:278 – 285.

[28] BAHMAN A,ROSARIO L,RAHMAN M M.Analysis of energy savings in a supermarket refrigeration/HVAC system[J].Applied Energy,2012,98:11 – 21.

[29] ZHANG L,FUJINAWA T,SAIKAWA M.Theoretical study on a frost-free refrigerated display cabinet[J].International Journal of Refrigeration,2016,74:95 – 104.

[30] CAO Z,GU B,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):1413 – 1424.

[31] TALBOT L,PURNELL G,JAMES S J,et al.Operating temperatures of supermarket frozen retail display cabinets[J].International Journal of Refrigeration,2020,117:81 – 93.

[32] ONUR KARAAĞAÇ M,ERGÜN A,ETEM GÜREL A,et al. Assessment of a novel defrost method for PV/T system assisted sustainable refrigeration system[J].Energy Conversion and Management,2022,267:115943.

[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.
ZHANG W H,GONG Y,LYU Y L.Effect of pre-cooler on supply and return air of air curtain in display cabinet[J].Journal of Refrigeration,2014,35(2):111 – 114.

[34] WANG Y B,ZHENG Y,HU X Z,et al.Impact of condensate water recycling on the performance of open refrigerated display cabinet[J].Case Studies in Thermal Engineering,2024,54:104022.

[35] HEIDINGER G G,NASCIMENTO S M,GASPAR P D,et al. Experimental study of the fins arrangement pattern of refrigerated display cabinet evaporator towards thermal performance improvement[J].Applied Thermal Engineering,2018,138:246 – 253.

[36] 陈伟,燕子腾,曹昊敏,等.管径缩小后空调器室外换热器的优化设计与试验验证[J].流体机械,2022,50(12):42 – 48.
CHEN W,YAN Z T,CAO H M,et al.Optimization design and experimental validation of air conditioning outdoor heat exchanger with reduced pipe diameter[J].Fluid Machinery,2022,50(12):42 – 48.

[37] 朱珊云,戴源德,曹杰,等.小管径开缝翅片管式换热器空气侧传热综合性能研究[J].流体机械,2022,50(5):68 – 75.
ZHU S Y,DAI Y D,CAO J,et al.Analysis of comprehensive heat transfer performance at air-side of slotted fin-and-tube heat exchangers with small diameter[J].Fluid Machinery,2022,50(5):68 – 75.

[38] MCLINDEN M O,SEETON C J,PEARSON A.New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration[J].Science,2020,370(6518):791 – 796.

[39] GAO E,CUI Q,JING H,et al.A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry[J].International Journal of Refrigeration,2021,128:104 – 117.

[40] GE Y T,CROPPER R.Performance simulation of refrigerated display cabinets operating with refrigerants R22 and R404A[J].Applied Energy,2008,85(8):694 – 707.

[41] SUN Z,WANG Q,DAI B,et al.Options of low global warming potential refrigerant group for a three-stage cascade refrigeration system[J].International Journal of Refrigeration,2019,100:471–83.

[42] 唐俊杰,柳琳,李鹏,等.氨制冷剂应用与冷链可持续发展建议[J].冷藏技术,2019,42(2):1 – 4.
TANG J J,LIU L,LI P,et al.Application of ammonia refrigerant and sustainable development of cold chain[J].Journal of Refrigeration Technology,2019,42(2):1 – 4.

[43] SHANMUGAM S K G,MITAL M.An ultra-low ammonia charge system for industrial refrigeration[J].International Journal of Refrigeration,2019,107:344 – 354.

[44] 许晨怡,郭智恺,史婉君,等.HFOs 制冷剂在制冷空调领域的替代研究综述[J].制冷与空调,2019,19(8):1 – 13.

XU C Y, GUO Z K, SHI W J, et al.Substitution research summary of HFO refrigerants in refrigeration and air-conditioning field[J].Refrigeration and Air-Conditioning, 2019, 19(8): 1 – 13.

[45] 滑雪, 王文华, 刘圣春, 等. 超市绿色制冷剂应用现状与实践[J]. 制冷与空调, 2019, 19(9): 59 – 64.
HUA X, WANG W H, LIU S C, et al.Application status and practice of green refrigerant in supermarket[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2019, 19(9): 59 – 64.

[46] GULLO P, HAFNER A, BANASIAK K.Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 93: 269 – 310.

[47] KARAMPOUR M, SAWALHA S.State-of-the-art integrated CO_2 refrigeration system for supermarkets: A comparative analysis[J].International Journal of Refrigeration, 2018, 86: 239 – 257.

[48] CUI Q, GAO E, ZHANG Z, et al.Preliminary study on the feasibility assessment of CO_2 booster refrigeration systems for supermarket application in China: An energetic, economic, and environmental analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113422.

[49] CAO F, YE Z.Commercial transcritical CO_2 booster refrigeration system and technology application status[J].Refrig Air-Cond, 2017, 17: 68 – 75.

[50] 耿旭东, 周啸虎, 邵双全, 等. 集成式 CO_2 超市制冷系统的研究进展[J]. 流体机械, 2022, 50(9): 66 – 75.
GENG X D, ZHOU X H, SHAO S Q, et al.Latest research progress of integrated CO_2 supermarket refrigeration system[J].Fluid Machinery, 2022, 50(9): 66 – 75.

[51] PARDIÑAS Á Á, JOKIEL M, SCHLEMMINGER C, et al. Modeling of a CO_2-based integrated refrigeration system for supermarkets[J].Energies, 2021, 14(21): 6926.

[52] HUANG Z, ZHAO H, YU Z, et al.Simulation and optimization of a R744 two-temperature supermarket refrigeration system with an ejector[J].International Journal of Refrigeration, 2018, 90: 73 – 82.

[53] 林励冠, 代彦军, ARMIN H. 两级 R744 超市中央制冷系统节能特性[J]. 化工学报, 2018, 69(增刊2): 394 – 401.
LIN L G, DAI Y J, ARMIN H.Performance of R744 commercial centralized refrigeration systems[J]. CIESC Journal, 2018, 69(Sup.2): 394 – 401.

[54] 司春强, 李佳美, 孙志利. 商超用 CO_2 制冷系统能效测试及评价方法[J]. 制冷技术, 2019, 39(1): 72 – 78.
SI C Q, LI J M, SUN Z L.Energy efficiency testing and evaluation method of commercial CO_2 refrigeration system in supermarkets[J].Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(1): 72 – 78.

[55] 刘圣春, 李佳钰, 代宝民, 等. 商超两级节流跨临界 CO_2 制冷系统性能分析[J]. 流体机械, 2023, 51(8): 20 – 26.
LIU S C, LI J Y, DAI B M, et al.Analysis of the performance of transcritical CO_2 system with two-stage throttling for supermarket[J].Fluid Machinery, 2023, 51(8): 20 – 26.

[56] WANG Y, WANG Q, YU J, et al.A heat pump dual temperature display cabinet using natural refrigerants[J]. Applied Energy, 2023, 330: 120367.

[57] 孙莹, 余克志, 陈天及. 环境送风式冷藏陈列柜的开发研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2010, 31(2): 26 – 29.
SUN Y, YU K Z, CHEN T J.Experimental investigation on a cold display cabinet with environment air supply[J].Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2010, 31(2): 26 – 29.

[58] 袁培, 刘键, 常宏旭, 等. 供冷条件对自然冷源冷藏陈列柜性能影响的试验研究[J]. 制冷与空调, 2019, 19(1): 41 – 45.
YUAN P, LIU J, CHANG H X, et al.Experimental study on influence of cooling conditions on performance of cold storage display cabinet with natural cold source[J].Refrigeration and Air-Conditioning, 2019, 19(1): 41 – 45.

[59] 袁培, 刘键, 付云飞, 等. 室内环境对自然冷源陈列柜冷藏性能影响实验研究[J]. 热科学与技术, 2018, 17(3): 179 – 184.
YUAN P, LIU J, FU Y F, et al.Research on the effect of indoor environment on the refrigeration performance of natural cold display cabinet[J].Journal of Thermal Science and Technology, 2018, 17(3): 179 – 184.

[60] 袁培, 武宜霄, 曾庆辉, 等. 自然冷源冷藏陈列柜运行试验研究[J]. 流体机械, 2023, 51(1): 18 – 23.
YUAN P, WU Y X, ZENG Q H, et al.Experimental study on performance of food refrigerated display cabinet with natural cold source[J].Fluid Machinery, 2023, 51(1): 18 – 23.

[61] ABU-HAMDEH N H, ALNEFAIE K A.Assessment of thermal performance of PCM in latent heat storage system for different applications[J].Solar Energy, 2019, 177: 317 – 323.

[62] BISTA S, HOSSEINI S E, OWENS E, et al.Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM)

[J].Applied Thermal Engineering,2018,142:723 – 735.

[63] HOANG H M,LEDUCQ D,PEREZ–MASIA R,et al.Heat transfer study of submicro-encapsulated PCM plate for food packaging application[J].International Journal of Refrigeration,2015,52:151 – 160.

[64] WU X H,LI W P,WANG Y L,et al.Experimental investigation of the performance of cool storage shelf for vertical open refrigerated display cabinet[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,110:789 – 795.

[65] BEN–ABDALLAH R,LEDUCQ D,HOANG H M,et al.Experimental investigation of the use of PCM in an open display cabinet for energy management purposes[J].Energy Conversion and Management,2019,198:111909.

[66] 么宇,闫淑晴,付健,等.蓄冷型冷藏陈列柜温度场及速度场的数值模拟研究[J].冷藏技术,2019,42(3):16 – 19.
YAO Y,YAN S Q,FU J,et al.Numerical simulation and experimental research on temperature field of fresh product self-collection cabinet[J].Journal of Refrigeration Technology,2019,42(3):16 – 19.

[67] ALZUWAID F,GE Y T,TASSOU S A,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.

[68] 袁培,付云飞,刘键,等.自然冷源陈列柜食品温度分布的数值模拟[J].低温与超导,2016,44(9):66 – 71.
YUAN P,FU Y F,LIU J,et al.Numerical simulation of temperature distribution of food in the display cabinet by natural cold source[J].Cryogenics & Superconductivity,2016,44(9):66 – 71.

[69] ALZUWAID F A,GE Y T,TASSOU S A,et al.The novel use of phase change materials in an open type refrigerated display cabinet:A theoretical investigation[J].Applied Energy,2016,180:76 – 85.

[70] PAN R,ZHANG K F,WANG W X,et al.Heat transfer characteristics analysis of heat pipe based on COMSOL[J].Annals of Nuclear Energy,2024,204:110549.

[71] LU Y L,ZHANG W H,YUAN P,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,2008,30(2):85 – 91.

[72] YAU Y H,AHMADZADEHTALATAPEH M.Predicting yearly energy recovery and dehumidification enhancement with a heat pipe heat exchanger using typical meteorological year data in the tropics[J].Journal of Mechanical Science and Technology,2011,25(4):847 – 853.

[73] SHEN C,ZHANG B W,ZHANG D W,et al.Experimental study on the parallel-flow heat pipe heat exchanger for energy saving in air conditioning[J].Journal of Building Engineering,2023,75:106842.

[74] IBNU H I,SUKARNO R,PUTRA N.Utilization of U-shaped finned heat pipe heat exchanger in energy-efficient HVAC systems[J].Thermal Science and Engineering Progress,2021,25:100984.

[75] TASSOU S A,GE Y,HADAWEY A,et al.Energy consumption and conservation in food retailing[J].Applied Thermal Engineering,2011,31(2):147 – 156.

[76] BEN–ABDALLAH R,LEDUCQ D,HOANG H M,et al.Modeling and experimental investigation for load temperature prediction at transient conditions of open refrigerated display cabinet using Modelica environment[J].International Journal of Refrigeration,2018,94:102 – 110.

[77] 刘宇轩,牛晓文,周坤.数据中心用液体动力型回路热管背板空调系统的性能研究[J].液压气动与密封,2024,44(12):8 – 12.
LIU Y X,NIU X W,ZHOU K.Performance study of liquid power loop heat pipe backplane air conditioning system for data centers[J].Hydraulics Pneumatics & Seals,2024,44(12):8 – 12.

[78] YUAN P,LEI Z L,ZENG Q H,et al.Load forecasting of refrigerated display cabinet based on CEEMD–IPSO–LSTM combined model[J].Open Physics,2021,19(1):360 – 374.

作者简介：袁培(1982)，男，教授，研究方向为制冷及低温设备节能技术，通信地址：450001 河南省郑州市科学大道 136 号郑州轻工业大学新能源学院，E – mail:yuantung@zzuli.edu.cn。

本文引用格式：
袁培,陈帅良,郭晓林,等.敞开式食品冷藏陈列柜柜体节能研究进展[J].流体机械,2025,53(2):74 – 85.
YUAN P,CHEN S L,GUO X L,et al.Research progress of energy saving in cabinet of open food refrigerated display cabinet[J].Fluid Machinery,2024,53(2):74 – 85.