

风冷冰箱蒸发器非均匀结/除霜特性研究综述

韩旭东 张心怡 王寒 赵日晶 黄东

(西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

摘要 非均匀结霜是风冷冰箱蒸发器表面结霜的显著特征,也是导致蒸发器性能衰减的重要诱因之一。文章从风冷冰箱蒸发器非均匀结霜特性、基于该特性的除霜优化以及霜检测优化3方面综述研究进展,简要介绍了风冷冰箱蒸发器非均匀结霜的形成机制、影响因素及其对冰箱性能的影响;系统总结了风冷冰箱蒸发器的霜热匹配除霜优化及抑霜策略;分析直接和间接霜检测技术在非均匀结霜条件下面临的复杂挑战及解决思路,最后总结和讨论风冷冰箱蒸发器非均匀结霜研究中的不足,指出其未来潜在发展方向,为风冷冰箱的高效运行与节能优化提供参考。

关键词 风冷冰箱;非均匀结霜;除霜;回风道;霜检测

中图分类号: TB61⁺1;TB657.4

文献标识码: A

Review of the Non-Uniform Frosting/Defrosting Characteristics of Air-Cooled Refrigerator Evaporators

HAN Xudong ZHANG Xinyi Wang Han ZHAO Rijing HUANG Dong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract Non-uniform frost is a significant feature of evaporator surface frost in air-cooled refrigerators. It is also one of the important causative factors leading to evaporator performance degradation. This paper reviews related extant research in three distinct areas: non-uniform frost characteristics of air-cooled refrigerator evaporators, defrost optimization based on these characteristics, and frost detection optimization. A concise introduction is provided into the formation mechanism of non-uniform frost on air-cooled refrigerator evaporators, the influencing factors, and their impact on refrigerator performance. Optimization of frost-heat matching defrosting and frost suppression strategies for the evaporators of air-cooled refrigerators are systematically summarized. The complex challenges and solutions of direct and indirect frost detection techniques under nonuniform frost conditions are analyzed. The performance degradation of air-cooled refrigerator evaporators is summarized and discussed. Finally, this study identifies shortcomings in the research field of nonuniform frost on air-cooled refrigerator evaporators and proposes potential future development directions. This study aims to provide a framework for the efficient operation and energy-saving optimization of air-cooled refrigerators.

Keywords air-cooled refrigerators; non-uniform frosting; defrosting; return air duct; frost detection

随着人们生活水平的提高,冰箱作为家庭中不可或缺的电器,其性能与能效备受关注。风冷冰箱因其冷量分配均匀、冷却速度快等优势,成为冰箱行业的主流发展方向^[1]。在风冷冰箱运行过程中,蒸发器表面易出现非均匀结霜现象,非均匀结霜的形成机制复杂,涉及温度场、湿度场与流场的多物理场耦合,其空间与时间维度的动态演化特征进一步加剧了除霜控制的难度。霜层的非均匀生长一方面引发霜层局部堵塞、加剧冰箱性能衰减;另一方面引起除霜过程的不同步,增大除霜过程热空气渗透量,是除霜过程问题的成因之一^[2-3]。因此霜层的非均匀生长对于风冷冰箱周期性结、除霜过程中蒸发器性能的影响至关重要。

近年来,研究者围绕非均匀结霜的形成机制、影响因素及其对冰箱性能的影响展开了深入研究,并提出了多种除霜优化策略与除霜启动控制技术。本文从风冷冰箱蒸发器非均匀结霜特性、基于该特性的除霜优化以及霜检测优化3个方面综述研究进展,分析当前技术的优势与局限,并展望未来研究方向,为风冷冰箱的高效运行与节能优化提供参考,本文结构框架如图1所示。

1 非均匀结霜特性

1.1 非均匀结霜机理

风冷冰箱蒸发器表面的非均匀结霜具有区别于冷表面结霜的显著特征,在空间维度上表现为霜层

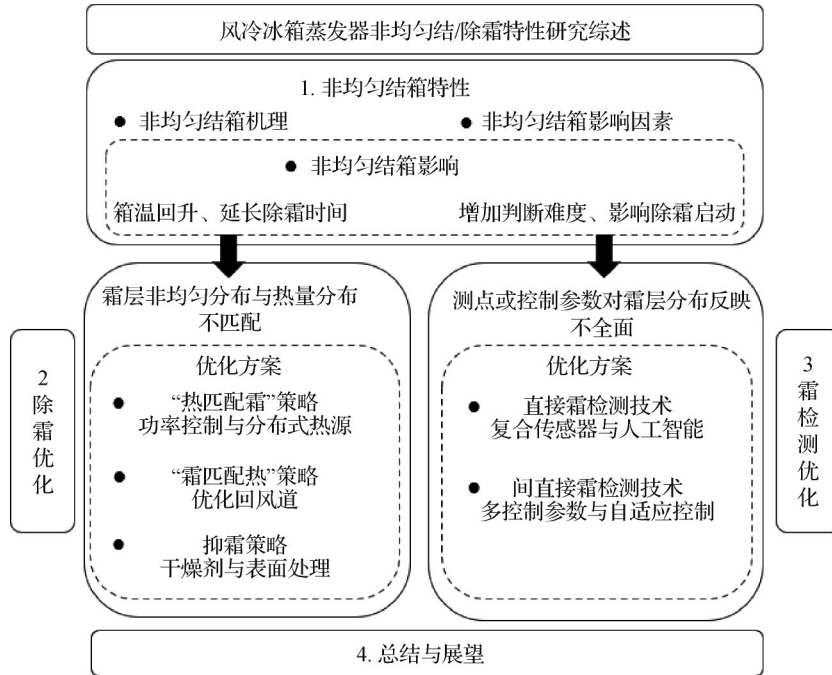


图1 本文结构框架

Fig.1 Structural framework of the paper

厚度、密度及形态的显著差异,而在时间维度上呈现动态演化与周期性积累特征^[4-5]。宏观上,霜层厚度分布呈现显著的空间差异性,如图2所示,在冷藏回风口附近、翅片间隙狭窄区及蒸发器上游区域,霜层厚度可达到其他区域的3~5倍,形成局部堵塞,诱发蒸发器各部位不同的风阻,迫使蒸发器迎风来流速度产生差异和再分布,来流速度再分布又会反作用于霜层非均匀成长,加剧局部堵塞^[6-7]。同时该空间分布的差异性随运行时间进行非线性演变:初期霜层扩展受控于蒸汽扩散速率,分布相对均匀;中期霜层增厚引发气流再分布,低风速区蒸汽滞留时间延长,结霜速率提升40%~60%;后期局部霜层堆积形成自强化反馈环路,霜层堆积区域温度进一步降低,结霜驱动力增强,霜层加速增厚。此外,周期性除霜残留的霜层会成为次周期结霜的优先成核点,残留霜层区域的结霜速率较清洁表面提高30%~50%,该正反馈效应会进一步恶化结霜的非均匀程度,形成恶性循环,呈现周期性积累特征^[8]。

针对蒸发器结霜特性的仿真研究,很多翅片管蒸发器结霜性能仿真模型已开始考虑霜层增厚和风阻增大诱发的风机流量衰减^[10]。J. Cui等^[11]建立了基于CFD的翅片管蒸发器结霜仿真模型,结果表明,霜层易积聚在迎风管排和管的迎风面,翅片间距小、相对湿度高、风速低和蒸发温度低均会加剧蒸发器性能的恶化。S. K. Padhmanabhan等^[12]考虑了霜层增厚和风阻增大所引起的气机流量减小,引入“来流

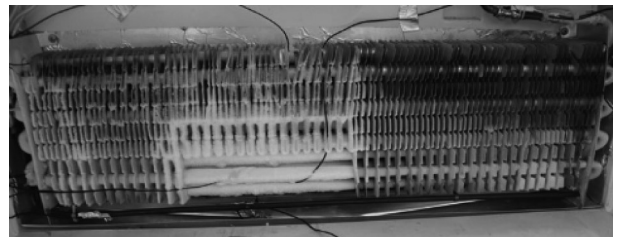


图2 风冷冰箱蒸发器表面非均匀结霜^[9]

Fig.2 Non-uniform frosting on the evaporator surface of air-cooled refrigerators^[9]

速度再分布”算法以考虑因霜层厚度不同所诱发的蒸发器各部位来流速度差异和再分布,模型预测精度提高约20%~50%。D. L. Da Silva等^[13]建立并实验验证了含有风机性能曲线的等翅片间距蒸发器结霜性能仿真模型,发现霜层表面水蒸气过冷度变大,会增大霜层厚度和风阻,风机流量和蒸发器结霜性能剧烈衰减的时刻均会被提前。F. Brèque等^[14]建立了微通道换热器准三维结霜性能仿真模型,提出了基于霜层局部最大厚度计算风阻的方法,提高了风机流量衰减的预测精度。

针对等翅片间距蒸发器结霜性能仿真模型,研究者逐步意识到霜层增厚和风阻增大所诱发的风机流量非线性衰减以及霜层非均匀生长所诱发的“来流速度再分布”效应,并加以考虑,但来流温/湿度非均匀分布比“来流速度再分布”对霜层生长过程的影响程度要更显著且更复杂,而目前针对该条件下的研究较少。Wu Siyuan等^[15]建立了准静态3-2-1-1结

霜模型,考虑换热器三维结构、来流温/湿度二维分布、速度一维再分布、霜层一维生长,结果表明,迎风面气流温湿度非均匀和均匀分布下,蒸发器表面霜层质量相近,但霜层分布差异较大。Ni Chenxi等^[16]建立了冰箱1D-3D耦合模拟方法,通过1D模拟提供系统级的动态数据,将其作为3D模拟的边界条件,从而实现数据交互和耦合计算,更全面地进行换热和流动分析,为冰箱设计提供了一个全面、高效、灵活的优化框架,但未对霜层非均匀成长过程的多因素耦合作用进行研究。

现阶段研究人员尝试将蒸发器结霜模型与机器学习结合,整合大量数据进行模型训练,实现对霜层各项参数的模拟与预测。J. M. Han等^[17]应用人工神经网络实现非线性复杂生长机制。Y. H. Eom等^[18]基于深度学习模型提出了一种定量预测由于霜层生长导致性能变化的模型。S. Aleem等^[19]使用神经网络与梯度提升回归器建立霜层预测模型,并通过机器学习开发了修正实验数据的经验关联式。在该趋势下,针对风冷冰箱蒸发器非均匀结霜,在非均匀温湿度来流条件下,或可通过机器学习融合多源数据构建高维特征空间,通过神经网络实现非线性复杂生长机制。构建霜层非均匀生长模型,进而探明影响霜层非均匀成长过程的多因素耦合作用机制,得出霜层局部堵塞的生成要素和特征,建立主要影响因素与霜层分布非均匀率的定量关系仍然是非均匀结霜领域的研究热点,机器学习或为解决问题的有效途径之一。

1.2 非均匀结霜影响因素

风冷冰箱蒸发器表面非均匀结霜现象的本质是多物理场(温度场、湿度场、流场)的耦合失衡,关键影响因素是温湿度分布、流场与翅片排布^[6]。蒸发器表面温湿度梯度是结霜的主要驱动力,当蒸发器表面温差超过5℃时,结霜速率提高40%以上^[20-21]。受限于冰箱结构布置,风道无法均匀掺混温湿度差异较大的冷藏冷冻回风,高湿度空气优先接触蒸发器迎风区域,局部蒸汽通量超过其他区域2倍,形成结霜“热点”^[22-23]。由于轴流风扇的射流特性,蒸发器表面流场一般呈非均匀分布,蒸发器中心区域风速相比边缘区域高2~4倍,因此蒸汽扩散速率较高抑制霜层生长。翅片排布对蒸发器非均匀结霜同样具有显著影响,间距小于2 mm的窄翅片易因霜层堵塞完全封堵气流通,而间距大于4 mm的宽翅片虽然能延缓堵塞,但会降低换热效率^[24]。管排布置方式同样关键,错列布置可增强气流扰动,减缓霜层堆积,但会增大风阻影响换热^[25-26]。

针对蒸发器结霜性能及其影响因素的实验研究,大多针对热泵空调蒸发器,且多在来流温/湿度均匀分布条件下进行^[27]。Song Mengjie等^[28]实验发现,随着表面温度的降低,结霜厚度迅速增加,当环境温度为-17.5℃时,相对湿度起重要作用。Zhao Baiyu等^[29]对结霜过程进行了模拟研究,发现当湿空气温度在1~3℃之间时,霜层最厚。罗超和韩星等^[30-31]研究均表明,来流的相对湿度是影响结霜最显著的环境因素。Chen yongping等^[32]研究发现当大气压力降低时,相变驱动力减小,水蒸气变成液滴和凝结的时间变长,霜晶的形状也从树枝状变为柱状和无规则状,霜层厚度也会减小。Huang Dong等^[33]发现霜层厚度增加会增大风阻,诱发风机“失速”使风机风量急剧衰减,是结霜性能衰减的主导因素。A. B. Olcay等^[34]实验发现蒸发器风阻曲线变化的临界点与风机的“失速区”直接对应,该临界点也是霜层从增厚生长变为增密生长的转折点。目前针对来流温/湿度不均匀分布对蒸发器结霜影响的研究较少,缺乏霜层局部堵塞抑制蒸发器换热潜力发挥的研究,未来如何实现可调控的湿度非均匀分布并在该条件下开展实验成为研究热点。

1.3 非均匀结霜影响

风冷冰箱蒸发器表面非均匀结霜现象是制冷系统能效衰减与稳定性下降的核心原因之一,迎风管排处较厚的霜层会使翅片间流通面积减小,风阻增大,风机提前到达其性能“失速区”,风量骤减高达约30%,蒸发器热质交换性能剧烈衰减^[15]。冷藏回风口附近管排的“霜层局部堵塞”现象,使气流无法到达下游相应区域,抑制了该区域的换热潜力,甚至出现传热失效,二者都会导致蒸发器换热量剧烈衰减,增加除霜频次和耗电量,损坏食品的冷储品质和安全性。同时风冷冰箱蒸发器非均匀结霜给除霜过程带来巨大挑战,一方面非均匀分布的霜层导致除霜过程中出现明显的“先下后上”融霜现象,这种不同步性会延长除霜时间,造成底部区域过度加热,导致除霜热气渗漏,冷藏冷冻室箱温回升,影响食品储存品质,而顶部区域仍残留霜层,严重影响除霜效率^[35];另一方面传统单点霜厚传感器在非均匀结霜条件下误判率高达约40%,局部测量无法反映整体霜量,常导致过早或过晚除霜,过早除霜增加30%的除霜频次,过晚除霜则使风机风量衰减达35%,严重影响系统能效^[36]。

面对非均匀结霜带来的挑战,解决方向可总结如下:针对除霜过程,可采用阶梯式功率控制和分布式加热器布局实现热量与霜量的动态匹配;或通过

“渐扩式回风道+智能导流板”优化气流组织,调整风量分布,实现霜量与热量匹配;或使用干燥剂、涂层等抑霜策略减少总霜量。针对霜检测过程,开发高精度多测点传感器以应对非均匀结霜情况,通过大数据模型提高霜层检测准确性,进一步降低检测误差。在智能控制方面,采用模糊控制与自适应算法,结合开门频率、环境温湿度等多参数实现动态除霜。

2 基于非均匀结霜的除霜优化

风冷冰箱蒸发器霜层非均匀成长与除霜热空气自然对流/辐射复合传输方式协同作用,使除霜过程出现融霜不同步现象,加剧蒸发器的过度加热,增大除霜热空气渗漏量,影响冷储品质^[35]。研究人员初步研究发现,因热空气自下而上的自然对流,蒸发器各部位霜层开始融化和融尽的时刻并不同步,上部比下部的霜层融尽时刻滞后约 15 min,存在“先下后上”现象,滞后时长约占除霜总时长的 50%。融霜不同步性不仅会延长除霜时长,还会加剧蒸发器底部的过度加热,温度高达约 60 °C,远高于制冷时的约 -26 °C,显著降低了除霜热量的有效利用率;同时部分除霜热空气还会渗入箱内,造成箱温明显回升,除霜终止时冷冻室温度已达到约 0 °C,严重偏离了 -18 °C 的冷冻存储温度,是除霜过程问题的主要诱因之一^[37-38]。

针对该现象,赵日晶等^[39]以融霜迟滞率(蒸发器底部霜层融尽较顶部和中部的滞后时间与融霜阶段总时长的比值)评价除霜过程的同步性,发现导热式电加热除霜的融霜迟滞率为 61.4%,冷冻室箱温呈线性回升,辐射对流式电加热除霜的融霜迟滞率为 83.6%,除霜同步性较差,箱温回升速度在除霜过程中逐渐加快。在此基础上,唐学强等^[40]通过实验研究了不同阶段箱温回升特性如图 3 所示,排水阶段箱温在 6.5 min 内快速上升 6.6 °C,分析认为融霜阶段开始时底部霜层逐渐融化使向上的流动空间增大、流动阻力减小,热量传递至冷冻室进而引起箱温回升。从现有研究可知,融霜不同步现象的本质是空间上霜量的非均匀分布与时间上除霜热量分布的不匹配,解决问题的关键是匹配霜量与热量,实现“霜匹配热”或“热匹配霜”,或通过抑霜减小总霜量。

2.1 “热匹配霜”策略

为实现融霜过程中热量与霜量的动态匹配,研究人员通过优化加热器功率调控及热源分布策略,提出多种创新性方法,旨在提升除霜效率并降低能耗。Zhao Rijing 等^[9]基于箱温回升特性,在排水阶段降低加热功率,有效改善了融霜不同步现象,并显著

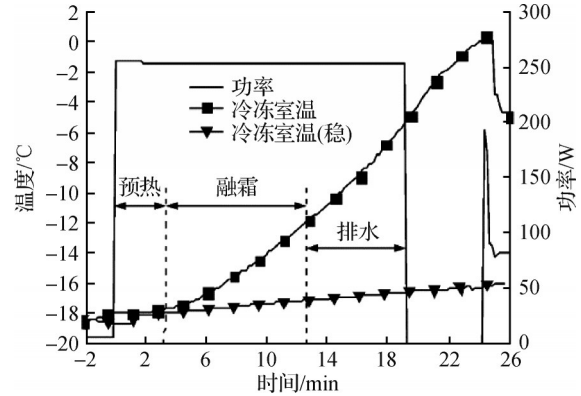


图3 冰箱除霜过程箱温回升特性^[40]

Fig.3 Acoustic sensor frost detection principle and signal transmission method^[40]

降低了冷冻室的箱温回升。在此基础上,马迪等^[41]进一步优化加热方式,采用间歇式加热取代传统连续加热模式,充分利用电热管余热,实现了蒸发器温度的精准控制,相比连续加热模式单位时间能耗降低 18.2%。为进一步解决霜层融化与恒定加热功率不匹配的问题,Zhao Rijing 等^[42]提出了阶梯步降的功率控制策略,通过动态调整加热功率,缓解了热量分配不均问题,相比连续加热模式单位时间能耗降低 27.1%。此外,Y. Yoon 等^[43]引入双电加热器并采用不同的脉冲控制策略,实现了箱温回升由 11 °C 降至 5 °C,除霜效率提升 15%。针对融霜不同步问题,Zhao Rijing 等^[44]指出关键在于使除霜热量与霜层分布相匹配,提出在蒸发器中部增加加热器以提供额外热量,相比于仅在底部放置加热器的方案,除霜周期缩短 3.3 min,冷冻室箱温回升降低 1.1 °C。H. Jeong 等^[45]提出同时采用热传导式与辐射式加热器,通过合理分配加热功率,使蒸发器表面温度分布更均匀,除霜效率提高 6.7%。余涛等^[46]从热传递效率角度出发,将加热器管路集中靠近蒸发器,并根据冰箱运行阶段优化功率分配,显著提高了热量利用效率,改进后冰箱的标准耗电量降低 6.4%,化霜过程导致的额外电量消耗降低 43.3%。具体功率控制方案如表 1 所示。

以实现热量与霜量的精准匹配为核心目标,研究者们从加热器功率调控、热源分布优化及热传递效率提升等多个维度提出了创新性解决方案。通过动态调整加热功率、采用间歇式加热、引入阶梯步降功率控制以及优化加热器布局等策略,有效解决了霜层融化与热量分配不均的问题,显著提升了除霜效率并降低能耗。

2.2 “霜匹配热”策略

为实现融霜过程中霜量与热量的匹配,需要调

表 1 电加热器功率控制优化
Tab.1 Power control optimization of electric heaters

研究人员	年份	功率控制策略	优化效果
马迪等 ^[41]	2019	间歇加热模式,化霜加热管加热 2 min,停顿 1 min	相比于连续加热能耗降低 18.4%
Zhao Rijing 等 ^[42]	2023	阶梯式降低电加热器功率,在加热器工作 4 min 后,每 6 min 降低 20 W 加热器功率	相比于连续加热能耗降低 27.2%
Y Yoon 等 ^[43]	2018	采用不同频率的脉冲模式分别控制两个电加热器	实现了箱温回升由 11 °C 降至 5 °C,除霜效率提升 15%
H Jeong 等 ^[45]	2021	根据霜层累计量的不同,匹配相应的导热式和辐射式加热器功率	蒸发器表面温度分布更加均匀,除霜效率提高 6.7%
余涛等 ^[46]	2022	延迟 3~4 min 启动电加热器并关闭风扇,对蒸发器进行预热	标准耗电量降低 6.4%,化霜过程导致的额外电量消耗降低 43.3%

整蒸发器表面霜层分布改善气流组织,即调整回风道结构^[47-48]。回风道与蒸发器作为风冷冰箱制冷系统的核心组件,如图 4 所示,其结构设计及布置方式对箱内气流组织及湿度分布具有决定性影响^[49]。通过优化回风道结构及蒸发器布置,实现蒸发器表面结霜分布与除霜加热器热量分布的精准匹配,是解决上述问题的关键^[50]。李智强等^[51]提出一种如图 5

所示的风冷冰箱回风道优化除霜设计方法,基本路线为:实验测量除霜加热器表面温度分布,确定除霜加热器除霜热量分布,得出与之匹配的最优霜层分布,基于最优霜层分布,得出与之匹配的最优风量分布,基于最优风量分布设计回风道结构,为制冷系统协同优化提供工程实现路径。

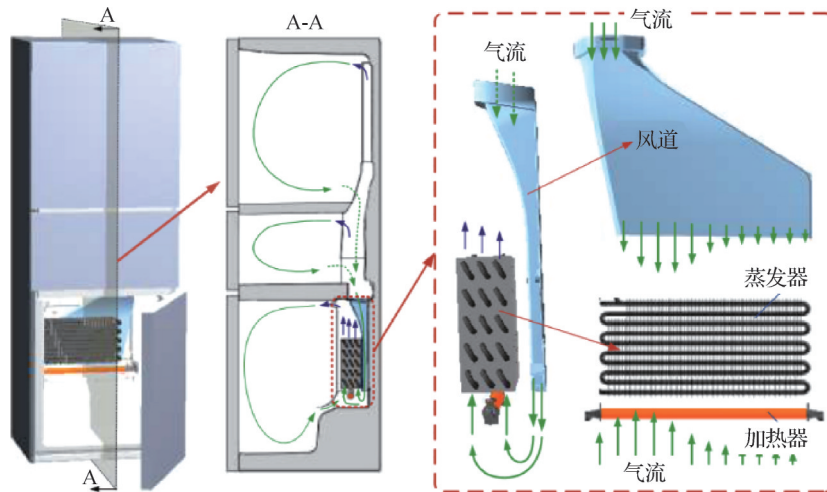


图 4 风冷冰箱空气循环示意图^[52]

Fig.4 Air-cooled refrigerator air circulation schematic^[52]

基于该风道设计工程路线,研究者通过优化回风道结构及导流装置,实现了风量分布与除霜加热器热量分布的精准匹配,显著提升了除霜效率并降低能耗。李智强等^[51]提出将回风道布置于蒸发器背部,采用风道宽度渐扩设计,并合理布置导流板,通过仿真分析与理论计算验证,该方案使除霜时间缩短 38.9%,冰箱制冷量增加 3.43%。在此基础上,李智强等^[52]进一步优化导流板设计,并将其应用于多门风冷冰箱,结果表明除霜效率提高 29.8%,整机能耗降低 2%。韩丽丽等^[53]在其研究基础上,通过加大回风口宽度至蒸发器宽度,并减小风道间隙,使除霜时间缩短 28.6%,箱温回升降低 22.5%,进一步验证

了回风道结构优化对霜层分布及除霜性能的显著改善。

由于回风道结构两端需与冰箱箱体装配,变更装配尺寸需同步调整箱体装配尺寸,甚至改动箱体发泡模具,成本较高。为提高经济性,研究人员提出保留回风道外部结构不变,通过优化内部结构(如导流片的长度、数量和弧度)来改善风量分布。郭策等^[54]通过减小风量大的通道、扩大风量小的通道,实现了风量的均匀分配,同时优化回风道内部结构及导流筋布局以降低风阻,优化后除霜耗电量降低 18.53%,整机能耗降低 1.66%。芮群娜等^[55]通过调整导流片的长度、弧度及数量,同时优化风口尺寸,

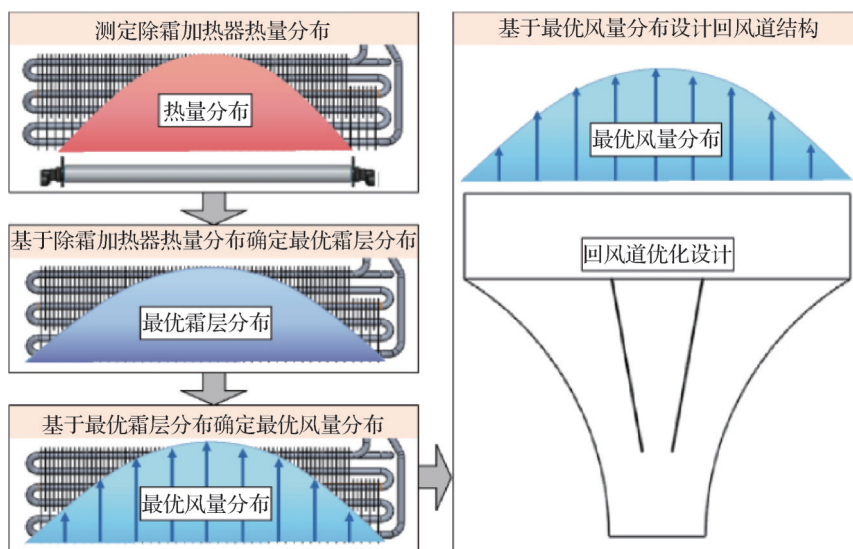


图5 回风道优化设计思路^[51]

Fig.5 Return air duct optimization design roadmap^[51]

在环境温度为 32 °C 时,化霜时间缩短 9.59%,除霜耗电量降低 18.53%,日耗电量降低 1.36%,有效改善了霜层分布并降低了除霜能耗。回风道结构与结霜情况优化前后对比如图 6 所示。综上所述,通过优化回风道结构及导流装置实现“霜匹配热”的优化策略可有效抑制霜层过度积累,缩短除霜周期,降低除霜能耗,从而显著提升冰箱整体制冷性能,为风冷冰箱的高效运行提供了重要的技术支撑。

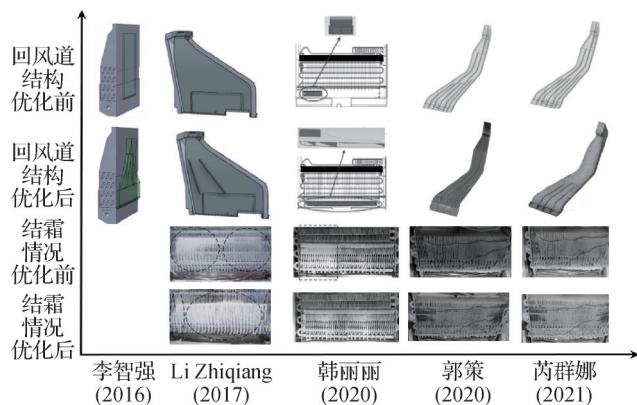


图6 回风道结构及结霜情况优化前后对比^[51-55]

Fig.6 Comparison of return air duct structure and frost condition before and after optimization^[51-55]

2.3 抑霜策略

除匹配化霜热量与霜量外,也可通过抑霜方法直接减少风冷冰箱蒸发器表面结霜总量,目前常用的技术和方法主要归结为两种:1)采用放置干燥剂或外加除湿系统降低进入蒸发器的空气湿度;2)采用表面改性处理,使用亲水、疏水、超疏水涂层对蒸发器表面处理。

降低空气湿度的抑霜方法主要通过降低相变驱动力来实现减缓霜层生长,一般采用放置干燥剂和外加除湿系统。外加除湿系统操作复杂、成本较高,目前在冰箱抑霜领域应用较少,相比之下成本低廉的干燥剂是更合适的选择^[56]。在冰柜中放置无毒干燥剂如硅胶、分子筛、蒙脱石 2 周内可减少超 40% 的霜,并降低能耗^[57]。使用干燥剂抑霜无须除霜加热器、排水管等除霜部件,但当干燥剂逐渐饱和,除湿能力大幅降低,抑霜效果显著下降。为解决该问题,可采用特殊的可再生干燥剂涂敷在换热器表面,降低空气湿度,同时利用系统排出的制冷剂冷凝热进行再生,解决了干燥剂失效及干燥剂再生能耗高的问题,实现高效节能^[58]。相比于固体干燥剂,液体干燥剂的再生需依赖相对复杂的系统,在热泵系统中有所研究,在冰箱领域尚未应用。因此实现干燥剂的简便再生是推广该方法亟需解决的问题。

针对蒸发器表面抑霜,表面处理方法凭借其不需要额外装置和能量输入的特点备受青睐,通过在蒸发器表面涂覆亲水、疏水、超疏水材料取得了较好的抑霜效果。较早应用的是亲水材料,通过在风冷冰箱蒸发器翅片表面涂覆亲水材料,可以有效地延缓结霜,冷却速率提升 15%,耗电量降低 5%~8%^[59]。李平等^[60]通过实验表明,采用亲水翅片可以缩短冰箱化霜及化霜恢复期时间,起到良好的抑霜效果并实现节能。但由于亲水涂层具有较好的润湿特性,融霜水不易完全排出,蒸发器表面残留的少量液膜会在下一个结霜周期冻结成冰影响蒸发器传热性能^[61]。疏水材料则避免了该问题,S. Jhee 等^[62]研究发现亲水处理后的蒸发器除霜效率提高约 3.5%,而

疏水处理后提高约 10.8%,表面残留水重量减少约 20%。张启花等^[63]将疏水材料应用在风冷冰箱蒸发器翅片上,结果表明,疏水处理后冰箱化霜时间缩短 7.7%,化霜水减少 37.5%,证明疏水材料抑霜的可行性。Hou Zhaoning 等^[64]将超疏水材料涂覆在风冷冰箱蒸发器翅片表面,相比于涂覆亲水材料和无涂层翅片霜层厚度减少 38.25% 和 41.56%,对霜层形成有更显著的延缓作用。对于具有微结构或普通超疏水表面,在结霜初期,随着凝结核在微结构间隙中形成和生长,冷凝液滴会润湿微结构表面,疏水表面进入 Wenzel 润湿状态,疏水性降低甚至消失,过程如图 7 所示,研究表明具有纳米结构超疏水表面可使冷凝液滴自发地从 Wenzel 状态转变为 Cassie 状态,避免疏水性失效^[65]。贾丽^[66]将纳米结构的超疏水材料涂覆在冰箱蒸发器翅片表面能够大幅延缓结霜速度,霜层出现时间延长 518%,具有较高的可靠性和优异的抑霜效果。使用纳米结构的超疏水材料抑霜将是表面处理技术未来的重要发展方向。

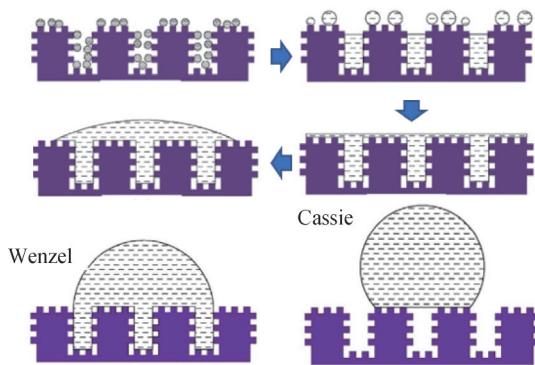


图 7 超疏水表面冷凝液滴形成示意图^[67]

Fig.7 Schematic diagram of condensation droplet formation on superhydrophobic surface^[67]

3 基于非均匀结霜的霜检测优化

冰箱除霜启动时间的精确控制对系统性能至关重要。过早启动除霜会导致箱温剧烈回升,增加压缩机功耗;过晚启动则因霜层过厚而降低蒸发器换热效率,增加能耗^[68]。非均匀结霜现象进一步加剧了除霜控制的复杂性,该种非均匀性不仅影响蒸发器的换热效率,还对霜检测技术的准确性提出更高要求。传统的霜检测方法常因霜层分布不均而出现误判,进而影响除霜启动的精确性。因此,优化除霜启动控制策略,特别是针对非均匀结霜的检测与处理,成为提升冰箱能效的关键。

3.1 直接霜检测技术

直接霜检测技术通过传感器直接监测霜层厚

度,具有响应速度快、判断准确的特点。然而,直接霜检测技术受传感器布点限制,在非均匀结霜条件下易产生局部采样偏差,出现以偏概全的问题。

目前,光学传感器和电容传感器是应用较为成熟的技术。光学传感器通过光狭缝或光衍射原理监测霜层厚度,但其检测结果受安装位置、环境温度和光照强度的影响较大。J. Xiao 等^[69]指出相同传感器在不同安装位置检测结果存在差异,明确传感器存在最佳位置。在此基础上,张龙浩等^[70]通过实验指出最佳安装位置霜层厚度应在 0~5 mm,此时监测准确度较高,相对误差小于 20%。电容传感器则利用霜层介电常数的变化进行检测,但融霜水介电常数较高排水不彻底会显著影响其准确性,检测过程如图 8 所示^[71]。杨晨^[71]将蒸发器金属表面作为一块极板,扩大检测范围的同时降低安装成本,改善非均匀结霜对判断霜层厚度的影响。

除应用单类传感器之外,A. N. Malik 等^[72]提出一种如图 9 所示的混合型霜层检测与除霜系统,同时使用光学和电容传感器作为霜检测模块,电容器部分采用冰箱蒸发器表面作为一极板,另一极板采用导电材料,可充当电阻式除霜加热器,实现检测与除霜 2 种功能^[73]。该系统的除霜检测范围为 1.3~8 mm,误差为 5%,可降低 10% 的整机能耗,同时电容传感器采用蒸发器翅片管作为极板,减少霜层非均匀分布对霜检测的影响,两类传感器交叉验证确保检测的准确性,为除霜启动控制技术发展提供了新的方向。

解决霜层非均匀分布对传感器安装位置的影响,关键是探明不同位置霜层厚度对应的整机运行状态,本质是大数据分析,而不同冰箱机型蒸发器或有差异,考虑通用性和成本,不同机型配置相应的检测、控制逻辑难以实现,如何智能化匹配检测控制逻辑成为当下研究热点。研究人员尝试引入人工智能推动问题解决,使用不同安装位置下霜层厚度与运行状态的大量数据对神经网络智能模型进行训练,实现自适应、高精度的霜层检测。H. U. Rahman 等^[74]利用图像处理方法估算霜层厚度,结果表明,霜层厚度为 1~4 mm 时,霜层厚度的估算偏差最小,为 13.7%。在此基础上,Y. A. Andrade-Ambriz 等^[75]将图像处理方法与人工智能技术结合,使用采集的图像集对卷积神经网络模型进行即时训练,过程如图 10 所示,训练后该神经网络对霜层的分类准确性达到 99.75%,提高了系统的智能化水平和操作效率。Y. A. Andrade-Ambriz 等^[36]还将声学检测方法与人

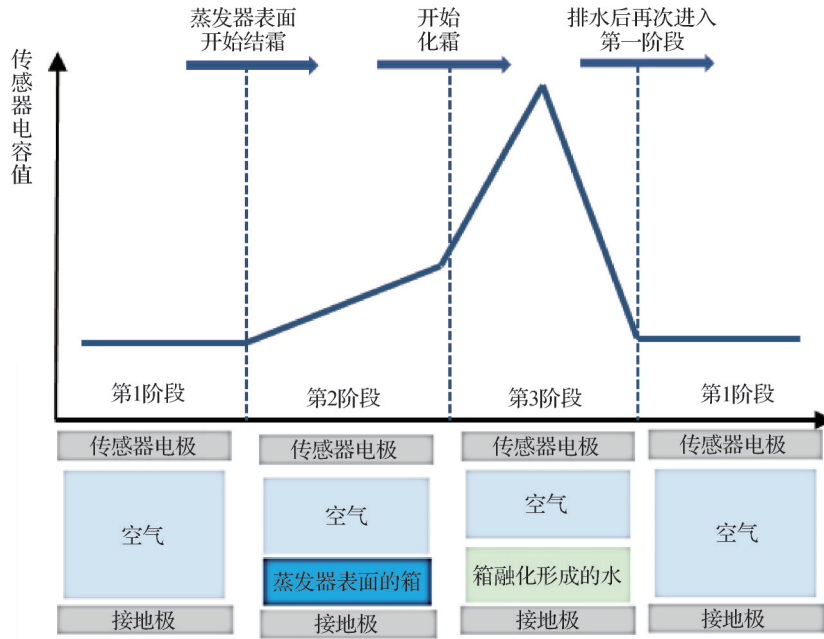


图8 电容传感器霜检测原理示意图^[71]

Fig.8 Capacitive sensor frost detection principle schematic^[71]

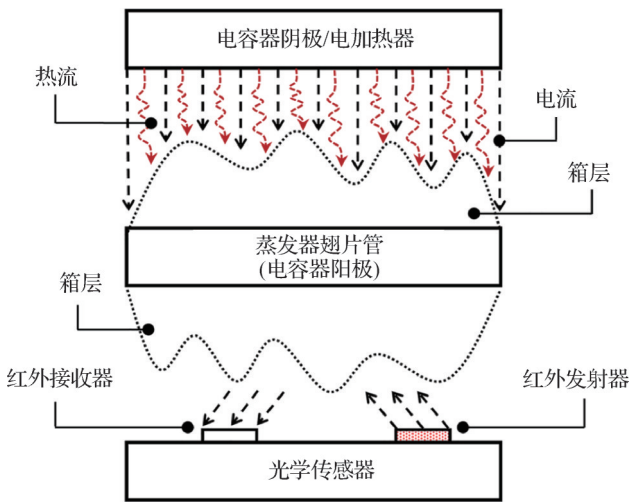


图9 混合型霜检测与除霜系统^[73]

Fig.9 Hybrid frost detection and defrosting system^[73]

型进行训练,总体精度达到94%。目前研究表明人工智能技术能够有效地解决直接霜检测技术受限于霜层分布不均匀的问题,并提高检测的准确性,但考虑成本及通用性目前尚未进入市场,仍然停留在学术研究领域。

3.2 间接霜检测技术

间接霜检测技术通过1个或多个系统参数对蒸发器表面结霜情况进行估计,无须考虑传感器在蒸发器表面安装位置,因而受霜层非均匀分布影响较小,关键是所选系统参数能否准确全面地反映蒸发器表面结霜情况^[76]。早期应用较广的定时除霜法不能准确判断霜层生长情况,常出现“有霜不除”和“无

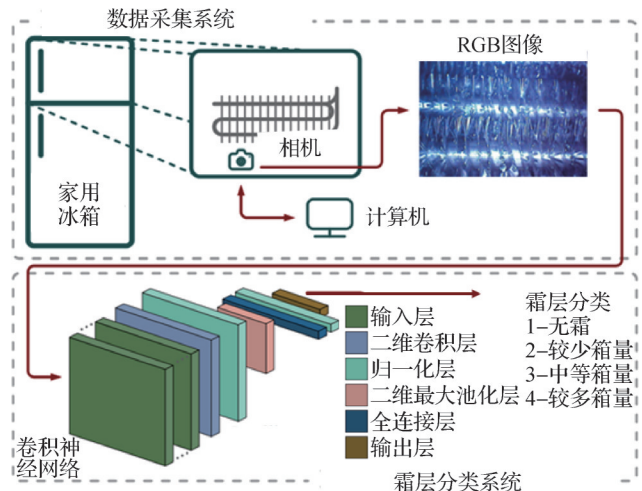


图10 霜层分类方法与卷积神经网络示意图^[75]

Fig.10 Schematic of the frost layer classification method with convolutional neural network^[75]

霜除霜”现象,同时高除霜频率导致除霜能耗较高,在节能环保的发展趋势下被逐渐淘汰,研究人员也在寻找更为准确的间接除霜启动控制方法。

最直接的优化方法是使用其他系统参数进行判断。汤晓亮等^[77]使用冷冻室温度与蒸发器温度的差值来反映冰箱制冷能力的衰减程度,据此判断冰箱除霜启动时间,除霜能耗占比下降约50%。考虑到结霜过程与湿度的强相关性,J. H. Zhu等^[78]根据室外干、湿球温度对结霜严重程度的影响,绘制对照图谱,提出了T-H-T(温度-湿度-时间)除霜控制方案,有效解决潜在的误除霜操作。K. Kim等^[79]定义了有

效质量流量比(effective mass flow, EMF),定性描述蒸发器传热速率的变化趋势,除霜启动时间的误差为10%,远小于定时除霜的50%,准确性较高,应用时仅需测量温度,操作简便。J. M. Maldonado等^[80]提出热变化容(thermal variation easiness, TVE),量化了热量通过蒸发器霜层的容易程度,TVE随着霜层生长逐渐降低,与定时除霜法相比,该方法可靠性更高,除霜能耗降低6%以上。

随着行业不断发展进步,用户使用体验成为产品考核的重要指标,相比于单个参数的监测,智能控制能够将用户的使用习惯(冰箱开门次数、开门时长等)作为参数用于除霜启动控制,目前应用较多的智能控制是模糊控制和自适应除霜。模糊控制可将操作者的使用经验转化为控制规则,采集冰箱运行状态参数和用户使用数据并进行模糊化运算处理,对结果进行分析判断,给出除霜指令^[81-83]。有文献^[84-86]表明,冰箱模糊控制逻辑中包含的信息越多,冰箱的节能效果越好,模糊控制准确性越高,可节能5%,同时能够更好地应对传感器失效和电压不稳定等突发情况。

自适应除霜控制方法能够根据用户实际使用情况和环境条件智能调整除霜周期,解决了无法适应环境温度变化和用户使用习惯带来的高能耗和低除霜效率问题。F. Ghadiri Modarres等^[87]提出的用于家用冰箱系统蒸发器除霜的自适应方法与固定除霜周期相比,能耗降低13%。M. F. Vitor等^[88]提出的单间冰箱自适应除霜控制方法能够通过估计环境和开门对结霜的影响来更新除霜启动判据,显著缩短冰箱除霜周期,同时减少0.8%的能耗,在冰箱门频繁开启的情况下可减少2.6%的能耗。智能除霜控制方法能够根据冰箱实际使用情况和环境条件智能调整除霜策略,提高除霜效率的同时降低系统能耗,提升用户实际使用体验,是除霜启动控制的重要发展方向。

4 总结与展望

风冷冰箱蒸发器表面非均匀结霜是诱发蒸发器性能衰减的核心原因,也是提升风冷冰箱能效的重要背景。本文系统综述了风冷冰箱蒸发器非均匀结/除霜特性的研究进展,重点围绕非均匀结霜特性、基于该特性的除霜优化以及霜检测优化3方面展开研究。主要结论如下:

1)蒸发器表面的非均匀结霜本质是温度场、湿度场和流场的耦合失衡,主要特征是空间维度上的分布差异性,时间维度上的动态演化与周期性积累

特征。空间分布的差异性带来的霜层局部堵塞加速风机风量衰减,抑制其他区域换热能力发挥,增加除霜频次和能耗,成为冰箱能效提升必须面对的核心问题。构建风冷冰箱蒸发器表面霜层非均匀生长模型,探明霜层非均匀生长过程的多因素耦合作用机制,得出霜层局部堵塞的生成要素和特征,建立主要影响因素与霜层分布非均匀率的定量关系仍然会是非均匀结霜领域的研究热点,难点是构建耦合的非均匀温湿度分布,结合机器学习建立多维耦合模型或为可行的解决思路。

2)非均匀结霜加剧了除霜过程中的融霜不同步和过度加热问题。通过调控电加热器功率及布置实现非均匀的热量分布的“热匹配霜”策略和通过优化回风道使霜层分布均匀化的“霜匹配热”策略在提高除霜效率和降低能耗方面取得了显著进展,通过降低湿度与表面涂层抑制蒸发器表面霜层生长的相关研究也取得较大突破。随着风冷冰箱朝着大容积方向发展,换热器安装空间不断压缩,分布式热源布置方式难以应用,开发具有实时反馈的自适应加热系统,优化热量分配是重要方向;基于“霜匹配热”策略创新回风道布局设计,实现气流和霜层的均匀分布,应用多物理场耦合分析,实现更优设计和更好效果也将是未来研究重点;开发可循环使用的干燥剂及微纳米结构超疏水材料也是抑霜领域研究热点。

3)准确的霜检测是实现精确除霜控制的关键,直接和间接霜检测技术在非均匀结霜条件下均面临挑战。未来应重点关注开发高分辨率、低成本的传感器,提高检测精度和可靠性;结合机器学习算法,实现霜层的实时预测和自适应除霜控制,融合多种检测方法,提升系统的鲁棒性和准确性。

参考文献

- [1] LIU Guoqiang, XIONG Tong, SUN Tengfei, et al. Frosting and defrosting characteristics of household refrigerators and freezers: Recent progress and perspectives [J]. Energy and Buildings, 2024, 303: 113755.
- [2] LIU Zhongbao, LI Ao, WANG Qinghua, et al. Experimental study on a new type of thermal storage defrosting system for frost-free household refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 256-265.
- [3] CHO H, KIM Y, JANG I. Performance of a showcase refrigeration system with multi-evaporator during on-off cycling and hot-gas bypass defrost [J]. Energy, 2005, 30 (10): 1915-1930.
- [4] KIM D H, KOYAMA S, KUWAHARA K, et al. Study on heat and mass transfer characteristics of humid air-flow in

- a fin bundle [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(7): 1434–1443.
- [5] KWON J T, KIM D H, HUH C, et al. Frost distribution characteristics of laminar airflow on cold surface of mini-channels [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38(7): 887–892.
- [6] 陈清华, 陆育, 关维娟, 等. 强制对流下翅片管蒸发器表面结霜实验[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(1): 19–26 (CHEN Qinghua, LU Yu, GUAN Weijuan, et al. Frosting surface of finned tube evaporator under strong convection [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2024, 45(1): 19–26.)
- [7] 张龙, 宋孟杰, 邵苛苛, 等. 管翅式换热器迎风侧翅片末端霜层生长模拟研究[J]. *化工学报*, 2023, 74(S1): 179–182. (ZHANG Long, SONG Mengjie, SHAO Keke, et al. Simulation study on frosting at windward fin end of heat exchanger [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(S1): 179–182.)
- [8] KLINGEBIEL J, HASSAN M, VENZIK V, et al. Efficiency comparison between defrosting methods: a laboratory study on reverse-cycle defrosting, electric heating defrosting, and warm brine defrosting[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121072.
- [9] ZHAO Rijng, HUANG Dong, ZHANG Zhenya, et al. Effect of defrost heat leakage on freezer temperature rise during periodical defrost cycles in a frost-free refrigerator-freezer with an electric defrost heater [J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2017, 23(1): 211–217.
- [10] 宋孟杰, 孔德翰, 余思锐, 等. 低温表面冷凝结霜特性预测模型研究进展[J]. *哈尔滨: 哈尔滨工业大学学报*, 2025. (SONG Mengjie, KONG Dehan, YU Sirui, et al. A review of research progress on prediction models for low-temperature surface condensation frosting characteristics [J]. *Harbin: Journal of Harbin Institute of Technology*, 2025.)
- [11] CUI J, LI W Z, LIU Y, et al. A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, 32(1): 249–260.
- [12] PADHMANABHAN S K, FISHER D E, CREMASCHI L, et al. Modeling non-uniform frost growth on a fin-and-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(8): 2018–2030.
- [13] DA SILVA D L, HERMES C J L, MELO C. First-principles modeling of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14): 2616–2621.
- [14] BREQUE F, NEMER M. Modeling of a fan-supplied flat-tube heat exchanger exposed to non-uniform frost growth [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 75: 129–140.
- [15] WU Siyuan, ZHAO Rijng, HUANG Dong, et al. Effect of non-uniform temperature & humidity distribution in the frontal airflow on evaporator frosting performance of a frost-free refrigerator [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 123: 150–158.
- [16] NI Chenxi, HUANG Haihong, CHEN Kaisong, et al. Development of a coupled 1D–3D simulation for domestic refrigerators design: a case study on indirect cooling prototype optimization and analysis [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2025, 171: 228–252.
- [17] HAN J M, PARK S H, PARK Y G, et al. Predictions on frost growth over a flat plate using surface characteristics: Machine learning methods [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 149: 248–259.
- [18] EOM Y H, CHUNG Y, PARK M, et al. Deep learning-based prediction method on performance change of air source heat pump system under frosting conditions [J]. *Energy*, 2021, 228: 120542.
- [19] ABBAS S, PARK C W. Machine learning based frost thickness prediction of carbon fiber-reinforced polymer composite fin for potential heat pump application [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 153: 107333.
- [20] 窦伟. 风冷换热器换热温差对结霜的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2020. (DOU Wei. Effect of temperature difference of air-cooled heat exchanger on Frost [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2020.)
- [21] 蔡灏亭, 张瑞敏, 赵玉刚. 界面结霜机理及抑霜技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2024, 45(5): 31–46. (CAI Haoting, ZHANG Ruimin, ZHAO Yugang. Review on interfacial frosting and anti-/defrosting techniques [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(5): 31–46.)
- [22] 沈雪豹, 魏建, 周思健, 等. 风冷冰箱回风预混及蒸发器结霜改善的优化研究[C]//2024年中国家用电器技术大会. 合肥: 中国家用电器协会, 2024: 499–507. (SHEN Xuebao, WEI Jian, ZHOU Sijian, et al. Optimization study on return air premixing of air-cooled refrigerator and frosting improvement of evaporator [C]// 2024 China Household Appliance Technology Conference. Hefei: CHEAA, 2024: 499–507.)
- [23] HE Guixiang, LIU Guoqiang, ZHAO Tianyang, et al. Moist air transfer and frost distribution characteristics in low-temperature refrigerator [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 164: 108875.
- [24] 肖宏新, 陈观生, 刘良德, 等. 三排变片距翅片盘管换

- 热器结霜特性实验研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 71-76. (XIAO Hongxin, CHEN Guansheng, LIU Liangde, et al. Experimental study on frosting characteristics of three-row finned tube heat exchanger with different fin pitch [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(6): 71-76.)
- [25] SUN Yu, ZHAO Rijng, WU Siyuan, et al. Proposal, robustness analysis and equivalent implementation of optimization method for row-by-row fin distribution in multi-row frosting evaporator [J]. Energies, 2021, 14 (19): 6069.
- [26] PEGALLAPATI A S, RAMGOPAL M. Effect of heat transfer area distribution on frosting performance of refrigerator evaporator [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175: 121317.
- [27] MA Longxia, SUN Yongjun, WANG Fenghao, et al. Advancements in anti-frosting and defrosting techniques for air source heat pumps: a comprehensive review of recent progress[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124358.
- [28] SONG Mengjie, LEI Shangwen, HOSSEINI S H, et al. An experimental study on the effect of horizontal cold plate surface temperature on frosting characteristics under natural convection [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118416.
- [29] ZHAO Baiyu, BI Haiquan, WANG Honglin, et al. Experimental and numerical investigation on frosting of finned-tube heat exchanger considering droplet impingement [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119134.
- [30] 罗超, 黄兴华, 陈江平. 不同环境参数对间冷式冰箱蒸发器结霜换热性能的影响[J]. 制冷学报, 2008, 29 (1): 17-22. (LUO Chao, HUANG Xinghua, CHEN Jiangping. Effect of different parameters on frosting of evaporator in frost-free refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(1): 17-22.)
- [31] 韩星, 范巍, 陈剑波, 等. 复叠式空气热泵翅片管换热器的结霜因子研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 25-32. (HAN Xing, FAN Wei, CHEN Jianbo, et al. Study of the frosting factor based on finned-tube heat exchanger of air-source heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 25-32.)
- [32] Y.P. Chen, P.F. Lu, C.Q. Shen, Q. Zhang, Experimental study on frost formation on a cold surface in low atmospheric pressure [J], Applied Thermal Engineering, 2015, 90:86-93.
- [33] HUANG Dong, ZHAO Rijng, LIU Yun, et al. Effect of fin types of outdoor fan-supplied finned-tube heat exchanger on periodic frosting and defrosting performance of a residential air-source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 69(1/2): 251-260.
- [34] OLCAY A B, AVCI P, BAYRAK E, et al. Experimental investigation of frost issue on various evaporators having different fin types [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017, 86: 190-198.
- [35] ZHAO Tianyang, LIU Guoqiang, HE Guixiang, et al. Effect of structural improvement of gaskets on the heat leakage load and energy consumption of the refrigerator [J]. Energy, 2024, 300: 131430.
- [36] ANDRADE-AMBRIZ Y A, LEDESMA S, ALMANZA-OJEDA D L, et al. Accurate classification of frost thickness using visual information in a domestic refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 145: 256-263.
- [37] MELO C, KNABBEN F T, PEREIRA P V. An experimental study on defrost heaters applied to frost-free household refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 239-245.
- [38] YANG Peng, YANG Xinlei, LIU Yingwen. Experimental study on a new finned tube defrosting heater for household frost-free refrigerators [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 156: 92-101.
- [39] 赵日晶, 龚勤勤, 唐学强, 等. 电加热器型式对风冷冰箱除霜特性的影响[C]//2014年中国家用电器技术大会. 宁波: 中国家用电器协会, 2014: 4. (ZHAO Rijng, GONG Qinqin, TANG Xueqiang, et al. Effects of defrost heater types on defrosting performance of no-frost refrigerators [C]//2014 China Household Appliance Technology Conference. Ningbo: CHEAA, 2014: 4.)
- [40] 唐学强, 黄东, 龚勤勤, 等. 风冷冰箱蒸发器除霜特性及霜温回升的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48 (11): 81-85. (TANG Xueqiang, HUANG Dong, GONG Qinqin, et al. Experimental investigation for dynamic characteristics of defrosting process and effect on freezer compartment temperature in domestic frost-free refrigerator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(11): 81-85.)
- [41] 马迪, 毕海波, 朱莉. 通过间歇化霜控制对无霜冰箱制冷系统的优化[J]. 家电科技, 2019(1): 68-69. (MA Di, BI Haibo, ZHU Li. Optimization of refrigerator refrigeration system by intermittent defrosting control [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2019 (1): 68-69.)
- [42] ZHAO Rijng, WANG Zengpeng, HUANG Dong, et al. Electric-heater defrosting performance of frost-free refrigerator-freezer and its improvement by step-reduction power [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 226: 120147.
- [43] YOON Y, JEONG H, LEE K S. Adaptive defrost methods for improving defrosting efficiency of household refrigerator

- [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 511-516.
- [44] ZHAO Rijng, HUANG Dong, PENG Xueyuan, et al. Distributed heaters to reduce temperature rise in freezing cabinet during defrost process and its overall energy effect for a frost-free refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99: 186-193.
- [45] JEONG H, BYUN S, KIM D R, et al. Power optimization for defrosting heaters in household refrigerators to reduce energy consumption [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 237: 114127.
- [46] 余涛, 刘全义, 李清松. 对开门风冷冰箱化霜及恢复期耗电量增量降低方法研究[J]. 家电科技, 2022(3): 106-109. (YU Tao, LIU Quanyi, LI Qingsong. Methods to reduce the increment of power consumption in defrosting and recovery period of open-door air-cooled refrigerator research [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2022(3): 106-109.)
- [47] 田勇. 单循环无霜冰箱回风道的优化设计[C]//2018年中国家用电器技术大会. 宁波: 中国家用电器协会, 2018: 103-108. (TIAN Yong. Optimization design of air return duct in single-cycle frost-free refrigerator [C]//2018 China Household Appliance Technology Conference. Ningbo: CHEAA, 2018: 103-108.)
- [48] REN Haoshan, TIBBS M, MCLAUCHLAN C, et al. Refrigerator cost trap for low-income households: Developments in measurement and verification of appliance replacements [J]. Energy for Sustainable Development, 2021, 60: 1-14.
- [49] 李清松, 刘全义, 陈开松. 风冷冰箱换热器布局与间室关系的探究[J]. 日用电器, 2023(8): 51-54. (LI Qingsong, LIU Quanyi, CHEN Kaishong. Exploration on the relationship between heat exchanger layout and chamber of air-cooled refrigerator [J]. Electrical Appliances, 2023(8): 51-54.)
- [50] 陈文龙, 陈秀鹏, 王峰, 等. 回风道结构对冰箱容积和避免回风道结冰的研究[C]//2023年中国家用电器技术大会. 合肥: 中国家用电器协会, 2023: 8. (CHEN Wenlong, CHEN Xiupeng, WANG Feng, et al. Study for return air duct structure on refrigerator volume and avoidance of return air duct icing [C]//2023 China Household Appliance Technology Conference. Hefei: CHEAA, 2023: 8.)
- [51] 李智强, 赵丹, 丁国良, 等. 间冷冰箱回风道的优化除霜设计[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 77-83. (LI Zhiqiang, ZHAO Dan, DING Guoliang, et al. Return air duct design for indirect cooling refrigerator based on defrosting optimization [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 77-83.)
- [52] LI Zhiqiang, ZHAO Dan, DING Guoliang, et al. Improving defrosting performance by controlling frost distribution to match defrosting heat distribution in frost-free household refrigerators [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 77: 136-148.
- [53] 韩丽丽, 杨大海, 魏代同, 等. 风冷冰箱蒸发器回风道除霜设计研究[J]. 流体机械, 2020, 48(2): 79-82. (HAN Lili, YANG Dahai, WEI Daitong, et al. Research of return air duct design and evaporator defrosting in frost-free refrigerator [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(2): 79-82.)
- [54] 郭策, 刘安, 芮群娜. 风冷冰箱回风道优化设计对耗电量的影响[C]//2020年中国家用电器技术大会. 宁波: 中国家用电器协会, 2020: 5. (GUO Ce, LIU An, RUI Qunna. Influence of optimal design of air-cooled refrigerator's return air channel on power consumption [C]//2020 China Household Appliance Technology Conference. Ningbo: CHEAA, 2020: 5.)
- [55] 芮群娜, 许丹丹, 杨洪涛, 等. 风冷冰箱改善结霜不均的冷藏回风道优化设计[J]. 日用电器, 2021(10): 69-75. (RUI Qunna, XU Dandan, YANG Hongtao, et al. The optimization design of RC duct for improving uneven frosting in air-cooled refrigerator [J]. Electrical Appliances, 2021(10): 69-75.)
- [56] 刘中良, 黄玲艳, 勾昱君, 等. 结霜现象及抑霜技术的研究进展[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 1-6. (LIU Zhongliang, HUANG Lingyan, GOU Yujun, et al. A review on frost formation and anti-frosting technology [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 1-6.)
- [57] 孟微佳, 翁文兵, 王腾飞, 等. 干燥剂抑制冷冻冰柜内表面结霜的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(1): 71-74. (MENG Weijia, WENG Wenbing, WANG Tengfei, et al. Experimental study on defrosting on the inner surface of the cabinet by desiccant [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36(1): 71-74.)
- [58] ZHANG Li, FUJINAWA T, SAIKAWA M. Theoretical study on a frost-free household refrigerator-freezer [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 62: 60-71.
- [59] 刘忠宝, 高嘉阳, 李婧祎, 等. 亲水涂层翅片应用于风冷冰箱的性能研究[J]. 制冷与空调(四川), 2020, 34(4): 446-452. (LIU Zhongbao, GAO Jiayang, LI Jingyi, et al. Study on the performance of hydrophilic coated fins in air-cooled refrigerators [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2020, 34(4): 446-452.)
- [60] 李平, 楼伟, 程祥, 等. 冰箱亲水翅片应用研究[J]. 家电科技, 2018(增刊1): 121-124. (LI Ping, LOU Wei, CHENG Xiang, et al. Research of hydrophilic evaporator on refrigerator [J]. Journal of Appliance Science &

- Technology, 2018(Suppl. 1): 121–124.)
- [61] LI L T, WANG W, SUN Y Y, et al. Investigation of defrosting water retention on the surface of evaporator impacting the performance of air source heat pump during periodic frosting-defrosting cycles [J]. *Applied Energy*, 2014, 135: 98–107.
- [62] JHEE S, LEE K S, KIM W S. Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(8): 1047–1053.
- [63] 张启花, 陈开松, 孔俊, 等. 疏水材料在冰箱蒸发器上抑制结霜实验分析[J]. *家电科技*, 2020(增刊1): 188–189. (ZHANG Qihua, CHEN Kaisong, KONG Jun, et al. Experimental analysis on frost suppression of hydrophobic materials on refrigerator evaporator [J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2020 (Suppl. 1) : 188–189.)
- [64] HOU Zhaoning, YANG Zhao, ZHAO Yanfeng, et al. Study on the anti-frosting performance of hydrophobic fin with non-toxic for the R600a frost-free refrigerator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 122033.
- [65] ZHANG Qingyu, SUN Dongke, ZHANG Youfa, et al. Lattice Boltzmann modeling of droplet condensation on superhydrophobic nanoarrays [J]. *Langmuir*, 2014, 30 (42): 12559–12569.
- [66] 贾丽. 疏水功能材料的制备及其在冰箱中的应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022. (JIA Li. Preparation and applied research of hydrophobic functional materials in refrigerator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.)
- [67] WANG Feng, LIANG Caihua, ZHANG Xiaosong. Research of anti-frosting technology in refrigeration and air conditioning fields: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 707–722.
- [68] 宋陈新. 冰箱中霜检测技术国内专利分析[J]. *制冷与空调*, 2021, 21(2): 1–7. (SONG Chenxin. Domestic patent analysis of frost detecting method in refrigerator [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2021, 21(2): 1–7.)
- [69] XIAO J, WANG W, ZHAO Y H, et al. An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric technique applied in defrost-control [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(6): 1350–1357.
- [70] 张龙浩, 张杰, 胡青. 红外式冰箱结霜传感器的设计和试验研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2013(5): 10–11. (ZHANG Longhao, ZHANG Jie, HU Qing. Design and experimental study of infrared refrigerator frost sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013(5): 10–11.)
- [71] 杨晨. 电容式感应除霜在家用电冰箱中的技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019. (YANG Chen. The technical research on capacitive sensing defrost in household refrigerators [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.)
- [72] MALIK A N, KHAN S A, LAZOGLU I. A novel hybrid frost detection and defrosting system for domestic refrigerators [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 117: 256–268.
- [73] MALIK A N, KHAN S A, LAZOGLU I. A novel demand-actuated defrost approach based on the real-time thickness of frost for the energy conservation of a refrigerator [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 131: 168–177.
- [74] RAHMAN H U, AKBAR H, MALIK A N, et al. Effective image processing-based technique for frost detection and quantification in domestic refrigerators [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 160: 217–228.
- [75] ANDRADE-AMBRIZ Y A, LEDESMA S, BELMAN-FLORES J M, et al. Frost thickness estimation in a domestic refrigerator using acoustic signals and artificial intelligence [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 201: 117071.
- [76] SHE Xiaohui, CONG Lin, NIE Binjian, et al. Energy-efficient and-economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: a comprehensive review [J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 157–186.
- [77] 汤晓亮, 王铁军, 杨帆, 等. 风冷冰箱除霜控制技术研究与应用[J]. *制冷学报*, 2013, 34(2): 49–54. (TANG Xiaoliang, WANG Tiejun, YANG Fan, et al. Study on defrosting control technology of air cooled refrigerator [J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(2): 49–54.)
- [78] ZHU J H, SUN Y Y, WANG W, et al. Developing a new frosting map to guide defrosting control for air-source heat pump units [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90: 782–791.
- [79] KIM K, LEE K S. Frosting and defrosting characteristics of a fin according to surface contact angle [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54 (13/14) : 2758–2764.
- [80] MALDONADO J M, DE GRACIA A, ZSEMBINSZKI G, et al. Frost detection method on evaporator in vapour compression systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 110: 75–82.
- [81] RODRÍGUEZ-VALDERRAMA D A, BELMAN-FLORES J M, HERNÁNDEZ-FUSILIER D, et al. Implementation of fuzzy control in a domestic refrigerator considering the influence of the thermal load [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 149: 23–34.
- [82] 赵明富, 张聪品, 吴东芳. 电冰箱模糊控制的算法及应用[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33 (2): 125–127. (ZHAO Mingfu, ZHANG Congpin, WU Dongfang. Calculation way and applications of the fuzzy

- control in refrigerator [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2005, 33(2): 125-127.)
- [83] BELMAN-FLORES J M, LEDESMA S, RODRÍGUEZ-VALDERRAMA D A, et al. Energy optimization of a domestic refrigerator controlled by a fuzzy logic system using the status of the door [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 104: 1-8.
- [84] 杨许, 湛清平. 基于模糊控制的智能除霜研究[J]. 家电科技, 2004(5): 76-78. (YANG Xu, CHEN Qingping. Research on intelligent defrosting based on fuzzy control [J]. Science and Technology of Household Electric Appliance, 2004(5): 76-78.)
- [85] 仪志恒, 郭树明, 王愚若. 一种电冰箱模糊控制系统的研究[J]. 家电科技, 2018(1): 23-25. (YI Zhiheng, GUO Shuming, WANG Yuruo. Study of fuzzy control system of refrigerators [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018(1): 23-25.)
- [86] 袁佳星, 刘世敏, 赵晨, 等. 模糊控制应用在节能冰箱方面的探究[J]. 日用电器, 2020(9): 109-113. (YUAN Jiaxing, LIU Shimin, ZHAO Chen, et al. Research on the application of fuzzy control in energy-saving refrigerators [J]. Electrical Appliances, 2020(9): 109-113.)
- [87] GHADIRI MODARRES F, RASTI M, MASTANI JOYBARI M, et al. Experimental investigation of energy consumption and environmental impact of adaptive defrost in domestic refrigerators [J]. Measurement, 2016, 92: 391-399.
- [88] VITOR M F, DOS SANTOS SILVEIRA A, FLESCH R C. Ambient virtual sensor based defrost control for single compartment refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114652.

通信作者简介

黄东,男,教授,博士生导师,西安交通大学能源与动力工程学院,029-82668738,E-mail:d_huang@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:速排水高效微通道换热器设计,微通道脉动热管技术及其应用,空调节能优化、抑霜除霜技术,风冷/直冷冰箱节能技术。

About the corresponding author

Huang Dong, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 029-82668738, E-mail: d_huang@mail.xjtu.edu.cn. Research interests: design of quick-drain high-efficiency microchannel heat exchanger, microchannel pulsating heat pipe technology and its application, energy-saving optimisation of air conditioner, frost suppression and defrosting technology, energy-saving technology of air-cooled/direct-cooled refrigerator.