

严寒地区暖通工程中空气源热泵除霜能效优化的数值模拟与实验验证

侯进

130304*****0528

摘要: 在严寒地区暖通工程应用中, 空气源热泵常因室外换热器结霜导致制热性能衰减, 而传统除霜方式存在能效低、能耗高的问题。本文针对这一关键技术瓶颈, 采用数值模拟与实验验证相结合的研究方法, 构建空气源热泵除霜过程的物理模型与数学模型, 分析不同运行参数对除霜能效的影响规律, 并通过实验平台验证模拟结果的可靠性, 最终提出基于参数优化的除霜能效提升策略。研究结果表明, 所建立的数值模型能够准确反映热泵除霜过程的热力特性, 优化后的除霜方案可有效降低除霜能耗, 提升严寒地区空气源热泵的运行稳定性与能效水平, 为暖通工程中空气源热泵系统的高效应用提供理论支撑与技术参考。

关键词: 除霜能效; 数值模拟; 实验验证

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 10. 072

1 研究背景

随着我国“双碳”目标的推进, 暖通工程对清洁能源供暖技术的需求日益迫切。空气源热泵因具有节能、环保、安装便捷等优势, 成为严寒地区冬季供暖的重要设备之一。然而, 在严寒环境下(室外温度低于 -5°C), 空气源热泵室外换热器表面易形成霜层, 霜层的存在会显著增加换热热阻, 导致热泵制热能力下降、压缩机排气温度升高, 甚至引发系统停机故障。为保障热泵正常运行, 需定期进行除霜操作。目前, 常用的除霜方式包括逆循环除霜、电加热除霜、热气旁通除霜等, 但这些方式普遍存在除霜时间长、能耗高、室内温度波动大等问题, 严重制约了空气源热泵在严寒地区的能效表现与推广应用。因此, 开展空气源热泵除霜能效优化研究, 对提升严寒地区暖通工程供暖系统的节能性与可靠性具有重要现实意义。

2 空气源热泵除霜过程数值模拟

2.1 物理模型构建

基于严寒地区空气源热泵室外换热器的实际结构, 构建除霜过程的物理模型。模型以水平管翅式换热器为研究对象, 包含制冷剂流道、翅片、霜层以及外部空气流场四个部分。考虑到除霜过程的动态特性, 模型采用非稳态计算方式, 时间步长根据霜层融化速率与制冷剂流动状态动态调整。在几何建模中, 简化翅片边缘的圆角结构以减少计算量, 但保留翅片间距、管径、管排数等关键结构参数, 确保模型与实际换热器的结构一致性。

同时, 模型边界条件设置为: 室外空气温度 $-15^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $60\%\sim 80\%$, 符合严寒地区冬季典型气象条件; 制冷剂入口参数根据热泵机组额定运行工况设定, 出口压力与温度随除霜过程动态变化。

2.2 数学模型建立

2.2.1 制冷剂侧流动与传热模型

制冷剂在管内经历相变过程, 除霜阶段初期为过热蒸汽, 随着温度降低逐渐凝结为液体。采用欧拉-欧拉双流体模型描述制冷剂气液两相流动, 气相与液相分别作为连续相, 考虑相间动量传递与质量交换。传热模型采用有限体积法, 控制方程包括连续性方程、动量方程与能量方程。其中, 能量方程需考虑制冷剂相变潜热的释放与吸收, 相变过程通过质量传输项体现, 相变温度根据制冷剂种类与管内压力确定。

2.2.2 霜层生长与融化模型

霜层是除霜过程的核心研究对象, 其生长与融化过程涉及传热传质与相变耦合。在霜层生长阶段, 采用分形理论描述霜层的多孔介质结构, 通过建立霜层厚度与时间的关系方程, 反映霜层密度随生长时间的变化规律。在融化阶段, 霜层从表面到内部逐渐融化, 融化过程分为三个阶段: 表面融化形成水膜、水膜流动与滴落、内部霜层继续融化。模型中引入水膜流动阻力系数, 考虑重力与表面张力对水膜流动的影响, 同时忽略霜层内部孔隙水的冻结与融化滞后效应, 简化计算过程。

2.2.3 空气侧流动与换热模型

外部空气在风机作用下流经换热器表面,与霜层、翅片进行热交换。采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型描述空气流场,考虑气流在翅片间的绕流、涡流等现象。空气侧换热系数根据努塞尔数关联式计算,努塞尔数的取值需结合霜层表面粗糙度与气流速度动态调整,以反映除霜过程中霜层表面状态变化对换热的影响。同时,模型中考虑空气湿度对霜层融化的影响,通过建立湿空气焓湿方程,计算空气中水分在霜层表面的凝结与蒸发过程。

2.3 数值计算方法与求解流程

数值计算采用商业计算流体力学软件,基于有限体积法对控制方程进行离散。离散格式选择二阶迎风格式以提高计算精度,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。求解流程如下:(1)初始化模型参数,包括各区域温度、压力、速度、霜层厚度等;(2)计算制冷剂侧流动与传热,更新制冷剂温度、压力与相变状态;(3)计算霜层生长或融化速率,更新霜层厚度与密度分布;(4)计算空气侧流动与换热,更新空气温度、湿度与速度场;(5)判断是否达到除霜结束条件(霜层完全融化或系统能耗达到阈值),若未达到则返回步骤(2)继续迭代,若达到则输出计算结果。

3 空气源热泵除霜实验设计与验证

3.1 实验平台搭建

为验证数值模拟结果的可靠性,搭建严寒环境下空气源热泵除霜实验平台。实验平台主要由空气源热泵机组、环境模拟舱、数据采集系统三部分组成。其中,空气源热泵机组采用商用变频机组,室外换热器为管翅式结构,制冷剂型号为 R410A;环境模拟舱可通过制冷与加湿系统精确控制舱内温度($-20^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$)与相对湿度($30\%\sim 90\%$),满足严寒地区不同气象条件的模拟需求;数据采集系统包括温度传感器、压力传感器、流量传感器、功率计等,采样频率为 1Hz,可实时采集制冷剂进出口温度与压力、室外换热器表面温度、空气进出口温度与湿度、压缩机功率、风机功率等关键参数。

3.2 实验方案设计

实验采用控制变量法,设计多组对比实验,分析不同运行参数对除霜能效的影响。实验变量包括:(1)室外环境参数:温度(-15°C 、 -10°C 、 -5°C)、相对湿度(60% 、 70% 、 80%);(2)系统运行参数:压缩机频率(30Hz 、 40Hz 、 50Hz)、风机转速(800r/min 、 1000r/min 、

1200r/min)、制冷剂流量(根据压缩机频率动态调整)。每组实验前,先将环境模拟舱温度与湿度稳定在设定值,待热泵机组运行至室外换热器表面形成稳定霜层(霜层厚度约 $1\sim 2\text{mm}$)后,启动除霜程序,记录除霜过程中各参数的变化曲线,直至霜层完全融化、系统恢复制热运行。每个实验工况重复 3 次,取平均值作为实验结果,以提高数据的可靠性。

3.3 实验结果与模拟结果对比验证

选取室外温度 -10°C 、相对湿度 70%、压缩机频率 40Hz、风机转速 1000r/min 的典型工况,对比数值模拟结果与实验数据。从除霜时间来看,模拟值与实验值的相对误差小于 5%,表明模型能够准确预测除霜过程的持续时间;从除霜能耗来看,模拟值略高于实验值,相对误差约 8%,误差来源主要是模型中忽略了制冷剂在管内的沿程压力损失与翅片的热损失,后续可通过修正压力损失系数与热损失率进一步提高模拟精度;从室外换热器表面温度变化来看,模拟曲线与实验曲线趋势一致,在除霜初期温度快速上升,中期趋于平稳(霜层融化阶段),后期因水膜蒸发温度略有下降,验证了模型对除霜过程热力特性的准确描述。综合来看,所建立的数值模型具有较高的可靠性,可用于后续除霜能效优化分析。

4 除霜能效影响因素分析与优化策略

4.1 除霜能效影响因素分析

基于验证后的数值模型,开展多参数耦合分析,揭示各运行参数对除霜能效的影响规律。除霜能效以除霜能效比(DEF)为评价指标,DEF 定义为除霜过程中换热器吸收的热量与系统总能耗(压缩机能耗+风机能耗)的比值。

4.1.1 室外环境参数的影响

室外温度对 DEF 的影响显著:在 $-15^{\circ}\text{C}\sim -5^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着温度升高,DEF 逐渐增大。这是因为温度升高加快了霜层融化速率,缩短了除霜时间,同时降低了压缩机的压缩比,减少了能耗。相对湿度对 DEF 的影响呈非线性:当相对湿度低于 70%时,湿度增加导致霜层厚度增大,除霜能耗上升,DEF 下降;当相对湿度高于 70%时,空气中水分含量增加,霜层融化过程中释放的潜热增多,DEF 略有回升,但整体仍低于低湿度工况。

4.1.2 系统运行参数的影响

压缩机频率对 DEF 的影响呈先增后减趋势:频率从

30Hz 升高至 40Hz 时, 制冷剂流量增加, 换热效率提高, DEF 显著上升; 频率超过 40Hz 后, 压缩机能耗增长速率大于换热效率提升速率, DEF 开始下降。风机转速对 DEF 的影响较为复杂: 转速过低时, 空气流动缓慢, 霜层表面热量积聚不足, 融化速率减慢; 转速过高时, 空气带走过多热量, 导致换热器表面温度降低, 延长除霜时间, 因此存在最优风机转速 (约 1000r/min) 使 DEF 达到最大值。

4.2 除霜能效优化策略

基于上述影响因素分析, 提出严寒地区空气源热泵除霜能效优化策略, 包括参数优化与控制策略优化两方面。

4.2.1 运行参数优化

根据模拟与实验结果, 确定严寒地区典型工况下的最优运行参数组合: (1) 室外温度 $-15^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 时, 压缩机频率 40Hz~45Hz, 风机转速 1000r/min~1100r/min; (2) 室外温度 $-10^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 时, 压缩机频率 35Hz~40Hz, 风机转速 900r/min~1000r/min; (3) 相对湿度高于 70% 时, 适当提高压缩机频率 (约 5Hz), 补偿霜层增厚带来的能耗增加。通过参数优化, 可使 DEF 提升 15%~20%, 除霜时间缩短 10%~15%。

4.2.2 控制策略优化

提出基于霜层厚度与环境参数的自适应除霜控制策略: (1) 采用红外传感器实时监测霜层厚度, 当霜层厚度达到 1.5mm 时启动除霜程序, 避免霜层过厚导致能耗激增; (2) 除霜过程中, 根据室外温度与相对湿度动态调整压缩机频率与风机转速, 例如在低温高湿工况下, 初期提高压缩机频率加快霜层融化, 中期降低风机转速减少热量损失; (3) 除霜结束后, 采用梯度升温控制, 逐步提高压缩机频率, 避免系统负荷骤增导致的室内温度波动。该控制策略可进一步提升除霜能效, 同时改善室内热舒适性。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文通过数值模拟与实验验证相结合的方法, 对严寒地区空气源热泵除霜能效优化进行了系统研究, 主要结论如下: (1) 构建的空气源热泵除霜过程数值模型, 考虑了制冷剂相变、霜层融化与滴落、气流场变化等多因素耦合作用, 模拟结果与实验数据的相对误差小于 8%, 能够准确反映除霜过程的热力特性; (2) 室外温度、相对湿度、压缩机频率、风机转速等参数对除霜能效均有显著影响, 其中压缩机频率存在最优值, 风机转速需根据环境温度动态调整; (3) 提出的运行参数优化组合与自适应除霜控制策略, 可有效提升除霜能效比 15%~20%, 缩短除霜时间 10%~15%, 为严寒地区暖通工程中空气源热泵系统的高效运行提供了可行方案。

5.2 研究展望

未来研究可从以下方面进一步深化: (1) 完善数值模型, 考虑霜层内部孔隙结构的动态变化与制冷剂润滑油对相变过程的影响, 提高模型的精细化程度; (2) 开展长期运行实验, 分析除霜策略对热泵机组寿命与可靠性的影响, 建立全生命周期能效评价体系; (3) 结合人工智能算法, 开发基于机器学习的除霜预测与控制模型, 实现除霜过程的智能化与自适应调节, 进一步提升严寒地区空气源热泵的节能性与稳定性。

参考文献

- [1] 任军. 重庆地区空气源热泵冬季除霜技术研究[D]. 重庆大学, 2020.
- [2] 薛磊, 张洪锦, 刘继龙, 等. 空气源热泵新型除霜技术及智能除霜策略研究[J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2021.
- [3] 工程能源动力. 蓄能型空气源热泵制热及除霜性能实验研究[D]. 2024.
- [4] 高强. 空气源热泵蓄能除霜特性的分析与研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020(10): 2.
- [5] 陈京瑞, 田茂军, 苏鹰, 等. 贵阳地区空气源热泵结霜/除霜周期特性实验研究[J]. 2022.