

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-550-07

夏热冬冷地区空气源热泵供暖结霜规律研究

陈 崑¹ 张 楠² 赵本军³ 张亨鉴⁴ 郑翰杰⁵

(1. 成都城建投资管理集团有限公司 成都 610000;

2. 成都城投置地集团有限公司 成都 610000;

3. 中建国际投资发展有限公司 苏州 215000;

4. 德阳市人民医院 德阳 618000;

5. 西华大学建筑与土木工程学院 成都 610039)

【摘要】 基于“双碳”目标,我国各领域电能替代工作取得了蓬勃发展。在建筑领域,目前我国正在大力推广空气源热泵供暖技术,为了探究其电力替代可行性,基于空气源热泵结霜机理,提出了一种基于气象参数及水相图的结霜理论判断方法,并选取夏热冬冷地区10个典型城市进行了空气源热泵供暖结霜规律分析。结果表明,夏热冬冷地区整体较适合开展空气源热泵供暖,但工程实践中应结合不同城市结霜规律针对性制定除霜控制策略。此外,提出的空气源热泵结霜判断方法相较于传统研究具有一定优势,可有效避免热泵机组结霜时长被低估等问题。该理论方法为解决夏热冬冷地区“双碳”目标与健康舒适人居所面临的挑战提供了有力支撑。

【关键词】 “双碳”目标;夏热冬冷地区;空气源热泵;水相图;结霜

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Research on the Frost Law of Air Source Heat Pump Heating in Hot Summer and Cold Winter Areas

Chen Kun¹ Zhang Nan² Zhao Benjun³ Zhang Hengjian⁴ Zheng Hanjie⁵

(1.Chengdu City Construction Investment & Management Group Co., Ltd, Chengdu, 610000;

2.Chengdu City Investment Land Group Co., Ltd, Chengdu, 610000;

3.China Construction International Investment and Development Co., Ltd, Suzhou, 215000;

4.Deyang People Hospital, Deyang, 618000;

5.Department of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu, 610039)

【Abstract】 Based on the goal of "dual-carbon", China's electric energy substitution work in various fields has achieved vigorous development. In the field of construction, China is now vigorously promoting air source heat pump heating technology, in order to explore the feasibility of electricity substitution, this study is based on the frost mechanism of air source heat pump, puts forward a theoretical judgment method of frost based on meteorological parameters and hydrographs, and selected 10 typical cities in hot summer and cold winter areas for the analysis of the frost pattern of air source heat pump heating. The results show that the hot summer and cold winter areas are more suitable for air source heat pump heating, but the engineering practice should be combined with the frost law of different cities to develop a targeted defrost control strategy. In addition, the air source heat pump frost judgment method proposed in this study has certain advantages compared with traditional research, which can effectively avoid problems such as the underestimation

作者简介: 陈 崑 (1971.03-), 男, 本科, 工程师, E-mail: 373207435@qq.com

通讯作者: 郑翰杰 (1993.08-), 男, 博士, 讲师, E-mail: 496321043@qq.com

收稿日期: 2024-01-05

of the frost duration of the heat pump unit. This theoretical approach provides a strong support for solving the challenges of "double carbon" target and healthy and comfortable living space in hot summer and cold winter areas.

【Keywords】 "Dual-carbon" targets; Hot summer and cold winter areas; Air source heat pump; Water phase diagram; Frosting

0 引言

我国“双碳”目标明确了建筑领域应坚持推进创新驱动的绿色低碳高质量发展,进一步减少建筑领域碳排放和能源消耗。中国建筑节能协会最新能耗报告显示,2000-2018 年全国能耗重心南移 0.9° (纬度),碳排放重心南移 1.1° (纬度),夏热冬冷地区建筑能耗占比提高 6%,冬季供暖是导致该地区建筑能耗持续增长的主要因素^[1]。2020 年,江亿院士撰文表示:“当前我国建筑领域的直接碳排放已经达峰,唯一存在疑惑的是长江中下游地区冬季采暖问题”^[2]。随着我国社会发展,夏热冬冷地区冬季供暖是人民生活水平提高后的自然需求^[3]。在全球变暖、能源危机等背景下,如何在既保障居民冬季供暖权益又最大限度地消减对生态环境的负面影响,是当前该地区建筑节能工作所面临的最严峻考验。

既有研究表明^[4-7],夏热冬冷地区不宜开展类似于北方地区的集中供暖模式,应坚持优先发展“部分时间、部分空间”供暖模式。在此背景下,空气源热泵凭借其系统综合能效高、便于利用可再生能源、系统设计灵活、设备安装维护方便等特点成为夏热冬冷地区的主流供暖设备^[8]。空气源热泵主要是从湿空气中提取热量,由于夏热冬冷地区冬季气候阴冷潮湿,故空气源热泵机组在该地区应用面临最严重的问题是换热器表面结霜^[9]。空气源热泵换热器表面结霜不仅会降低换热器表面传热系数、增大空气流动阻力,大大降低室外机空气侧换热性能及机组整体效率。在更严重情况下,机组还会因排气温度过高而停机,机组可靠性显著降低^[10]。上述问题是当前制约空气源热泵供暖技术发展的关键技术瓶颈,是阻碍我国建筑领域实现“双碳”目标的关键技术壁垒。

1 空气源热泵结霜规律研究综述

当湿空气遇到换热器冷表面时,换热器表面可能存在干冷、结露、结霜等状态,其中干冷和结露不会显著影响机组换热性能,但结霜却会对空气源热泵机组的运行产生严重影响。结霜是指湿空气中

的水蒸气在冷表面相变为固态冰的过程,既有实验研究表明结霜过程一般可分为两类(见图 1): (1) 湿空气中的水蒸气遇到冷表面先凝结成露后聚集生长并凝结成小冰晶再发育成霜; (2) 水蒸气直接在冷表面凝华成针尖状霜并逐渐发育成霜层^[11]。

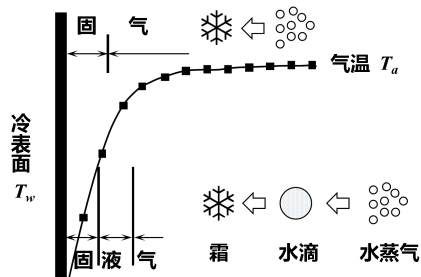


图 1 两种基本结霜方式

Fig.1 Two basic types of frosting

为了保持机组高性能运转,需妥善处理结霜问题,当前主流解决方法可概括为除霜^[12]和抑霜^[13]两类。由于抑制结霜技术尚未成熟且工程应用中较少,周期性除霜仍然是解决除霜问题的常见方法^[14]。当前的除霜方法主要包括超声波除霜^[15]、热气旁通除霜^[16]、反向循环除霜^[17]等,其中反向循环除霜是实际工程中应用最广泛的除霜方法^[18,19]。然而,在实际工况下仍存在除霜不良的情况,通常表现为提早、延迟、过度除霜等。因此,明确空气源热泵供暖工况下换热器表面结霜机理及规律,是针对性开展除霜设计、提高系统性能的基础和前提。

当前已有大量研究人员针对结霜规律进行了研究,并开发了相应的空气源热泵结霜图谱,以期指导设计更精细化的除霜控制策略。Adachi 等^[20]最早绘制了一种适用于空气温度为 -5°C – 7°C 、相对湿度为 60%–100%范围内的结霜图谱,但因该图谱过于简单,导致其无法真正被推广应用^[21]。王剑锋等^[22]在假定室外换热器风速为 2m/s 的基础上,基于理论计算开发了一种可粗略估算结霜速度的图谱。随后,Zhu 等^[23]提出了一种更完善的结霜图谱,在王剑锋研究基础上突破了室外风速、室外空气参数的限制(最低拓展至 -15°C),将结霜区划分为严重结霜区、一般结霜区和轻度结霜区,并通过后续实验证明了其良好的预测能力^[24]。随着变频热泵

技术的发展,倪龙等^[21]开发了一种适用于严寒地区变频热泵的结霜图谱,并讨论了热负荷对结霜特性的影响。程康等^[25]采用相同的方法开发了适用于多种气候区的变频空气源热泵结霜图谱。

迄今为止,尽管业界围绕空气源热泵结霜问题展开了大量研究,但在这些工作中有关换热器表面过冷度的设置问题有待进一步讨论。实验观测表明,在冻结结霜工况下,蒸发器需维持一定的过冷温度,机组表面的结露才会进一步凝结成霜^[26],如付祥钊等^[27]在研究中将过冷度设置为 4-6°C,李晨等^[28]将过冷度设置为 6.28°C,程康等^[25]、倪龙等^[21]将过冷度设置为 1.7°C。需要注意的是,根据结霜机理可知,凝华结霜与换热器表面过冷温度无关,其本质是由水蒸气直接凝华成霜后附着在换热器表面^[11]。然而,当前已有研究并未对这两类结霜方式进行区分,笼统认为任何工况下均需要维持一定的过冷温度,换热器表面才会结霜。

综上可知,机组表面过冷度是影响机组结霜性能的重要参数,尤其是在夏热冬冷地区室外气候条件下。为推动夏热冬冷地区空气源热泵清洁供暖发展,亟需开发一种具有气候适用性的空气源热泵结霜规律分析方法。本文基于结霜机理及既往实验研究结果,提出了一种有效结合水相图和当地气象参数的空气源热泵结霜规律预测方法,并对夏热冬冷地区典型代表城市进行了分析。本研究的初衷是开发一种适用于夏热冬冷地区的空气源热泵结霜判断方法,以助力夏热冬冷冬季供暖实现低碳化、绿色化,助力建筑领域早日达成“双碳”目标。

2 空气源热泵换热器表面结霜判定方法

如图 2 所示,水按照聚集态可分为水蒸气、水、冰三个单相区,冰-水共存、冰-水蒸气共存、水-水蒸气共存三个双相共存区, O 为气、液、固的三相共存点, OA 为冰的升华线(水蒸气的凝华线), OB 为水与冰的凝融线, OC 为水与水蒸气的汽化线^[29]。对于纯水而言,三相共存点的温度 T_p 为 273.46K,压力 P_p 为 611.2Pa。在理想条件下,规定湿空气中水蒸气分压力为 P_v ,露点温度为 T_d ,热泵机组换热器冷表面温度为 T_w 。根据结霜机理及物质相图理论,湿空气流经空气源热泵机组换热器表面后,存在以下几种可能的工况:

(1) 凝华结霜。当空气处于图 2 中的状态点

1 (空气温度为 T_a 、相对湿度为 φ_1 、水蒸气分压力为 P_v), 即 $P_v < P_p$ 时, P_v 与升华线 OA 求交点可以得到该压力下的升华温度 T_f 。若 $T_w > T_f$, 此时热器冷表面不会出现结露和结霜现象; 若 $T_w < T_f$, 水蒸气经凝华过程直接变为冰, 附着在热泵机组换热器冷表面, 此时出现结霜现象。

(2) 冻结结霜。当空气处于图 2 中的状态点 2 (空气温度为 T_a 、相对湿度为 φ_2 、水蒸气分压力为 P_v'), 即 $P_v' > P_p$ 时, P_v' 与凝融线 OB 求交点可以得到该压力下的冰点温度 T_f' , P_v' 与汽化线 OC 求交点可以得到该压力下的露点温度 T_d ; 若 $T_w > T_d$, 此时热器冷表面不会出现结露和结霜现象; 若 $T_f' < T_w < T_d$, 此时水蒸气在热泵机组换热器冷表面凝结成水滴, 出现结露现象; 若 $T_w < T_f'$, 水蒸气凝结成液态并冻结成固态附着在冷表面上, 此时出现结霜现象。

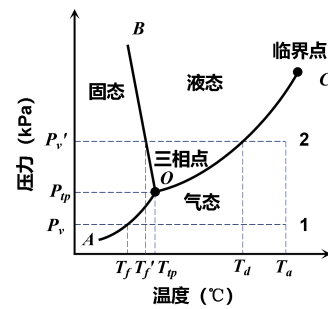


图 2 水的相图

Fig.2 The phase diagram of water

基于上述理论,本研究提出了一种基于水的三相图和室外气象参数的空气源热泵供暖结霜判定理论方法。该方法与既有研究的主要区别在于,按照基本结霜方式对过冷度的设置就行了细分,具体表述如下所示(见图 3)。

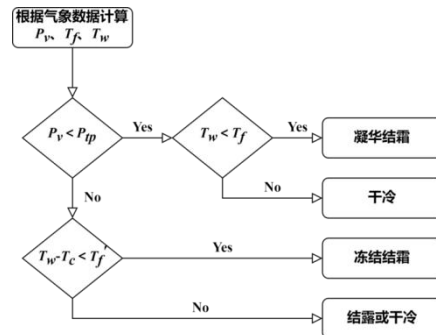


图 3 结霜判断流程图

Fig.3 Flowchart for determining whether an air source heat pump is frosted or not

第一步, 根据室外气象参数分别求出湿空气的 P_v 、 T_f 、 T_w ;

第二步, 比较 P_v 与 P_{tp} , 若 $P_v < P_{tp}$, 比较 T_f 与 T_w , 当 $T_w < T_f$ 时, 湿空气中的水蒸气会直接凝华成冰附着在换热器表面产生结霜现象;

第三步, 比较 P_v 与 P_{tp} , 若 $P_v > P_{tp}$, 当 $T_w - T_c < T_f'$ 时, 换热器表面为结霜工况。

3 空气源热泵结霜规律分析

3.1 分析用数据来源

3.1.1 蒸发温差

工质蒸发时换热器表面平均温度 T_w 与空气温度 T_a 的差值常被称作蒸发温差 Δt 。蒸发温差是影响换热器表面温度的关键因素, 既往研究中蒸发温差大多取自实验中的观测经验值, 通常在以下范围内取某固定值, 如 $2-9^\circ\text{C}$ ^[27]、 $9-13^\circ\text{C}$ ^[30]、 $8.3-10.1^\circ\text{C}$ ^[31]。随着热泵技术的发展, 有学者在实验中观测到热泵换热器表面温度一般会随着空气温度的变化而变化, 具体如下所述。

(1) 寒冷地区定频压缩机^[23]:

$$\Delta t = k_1 + k_2 \cdot T_a; k_1 = 10.26, k_2 = 0.17, R^2 = 0.69 \quad (1)$$

$$T_w = (1 - k_2)T_a - k_1 \quad (2)$$

(2) 严寒地区变频压缩机^[21]:

$$T_w = 1.07T_a - 2.79; R^2 = 0.998 \quad (3)$$

(3) 夏热冬冷地区变频压缩机^[25]:

$$T_w = -0.0006T_a^2 + 1.1997T_a - 6.394 \quad (4)$$

经对比可知, 不同气候区、不同压缩机频率下换热器表面温度与空气温度的关系并不相同。对于同一建筑, 其不同气候区的供暖负荷存在差异, 相应的热泵机组容量亦存在较大差异。由于蒸发温差与机组容量及压缩机频率密切相关, 故本研究选取式(4)进行结霜规律分析。

3.1.2 过冷度

对于冻结结霜工况, 理论上当换热器温度 T_w 低于露点温度 T_a 且低于冰点温度 T_f' (常压下取 0°C) 时, 湿空气在换热器表面将凝结成露随后冻结成霜。然而, 大量研究证实, 在冻结工况下蒸发器表面需维持一定的过冷温度才能将结露冻结成霜。当前的研究中关于过冷度 T_c 的设置存在较大差异, 常见的有 $4-6^\circ\text{C}$ ^[27]、 6.28°C ^[28]、 1.7°C ^[21]等。

造成上述差异的核心原因在于取值依据不同, 其中 $4-6^\circ\text{C}$ 的取值来自于冷表面水滴冻结静态实验^[32,33], 而 1.7°C 取值则来自空气源热泵机组现场实测研究^[26], 故本研究将过冷度 T_c 设置为 1.7°C 。

3.1.3 供暖期室外气象参数

本研究拟对夏热冬冷地区的 10 个典型城市进行分析, 各城市设计计算用供暖期 (见表 1) 取自《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012), 分析所用到的典型年逐时气象参数 (干球温度、相对湿度、露点温度、大气压力、海拔等) 取自《建筑节能气象参数标准》(JGJ/T 346-2014)。

表 1 夏热冬冷地区典型城市采暖期起止时间

Table 1 The start and end time of heating period in typical cities of the hot summer and cold winter climate zone

代表市/县	海拔 /m	大气压 /kPa	采暖期计算起始日期	采暖期计算终止日期	计算采暖期小时数
成都	506	95.67	12月08日	2月14日	1656
重庆	259	98.35	12月22日	2月12日	1272
上海	5.5	101.62	12月05日	3月07日	2232
杭州	42	101.17	12月06日	3月05日	2160
南京	7	101.57	11月24日	3月12日	2616
长沙	68	100.78	12月06日	3月03日	2112
合肥	26	101.24	11月24日	3月06日	2472
南昌	50	101.01	12月10日	2月13日	1584
武汉	23	101.35	11月27日	3月04日	2352
遵义	844	91.86	12月04日	3月04日	2184

3.2 典型城市结霜特性分析

这里引入不结霜保证率 ξ 这一概念, 定义为计算采暖期内不结霜的小时数 n 与整个采暖期总小时数 N 的比值, 其本质为时间频数。这一数值是整个采暖期理论结霜情况的数学表征, 其数值越大, 代表运行时结霜工况出现的频率越低, 对应地区也就越适合空气源热泵采暖技术。依据上述理论计算方法, 夏热冬冷地区典型城市不结霜保证率如图 4 所示。

由图可知, 夏热冬冷地区各典型城市间的不结霜保证率差异显著, 变化范围为 $59.40\% \sim 99.06\%$, 极差为 39.65% , 均值为 74.56% , 分布在 $50\% \sim 70\%$ 区间的城市有 3 个、 $70\% \sim 80\%$ 区间的城市有 5 个、

80%~90%区间的城市有 1 个、90%以上的城市有 1 个。具体地，川渝地区空气源热泵供暖适用性良好，重庆不结霜保证率最高、成都次之，二者均达到 85%以上水平；南京、合肥空气源热泵供暖适用性相对较差，不结霜保证率均不足 60%。整体而言，夏热冬冷地区空气源热泵供暖气候适用性较强，但需要注意的是，在供暖季不同城市空气源热泵应结合本地结霜规律和特点进行针对性除霜设计。

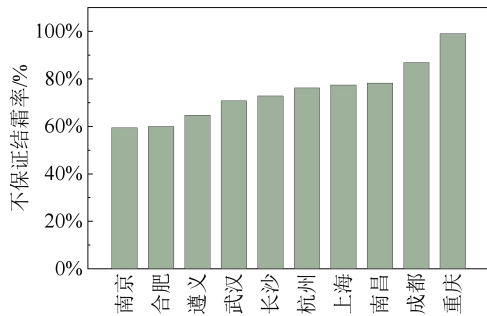


图 4 夏热冬冷地区典型城市不结霜保证率

Fig.4 Non-frost guarantee ratio in typical cities of hot summer and cold winter climate zone

本研究根据结霜机理及水的三相图分析得到两种常见的结霜方式，即冻结结霜与凝华结霜。夏热冬冷地区典型城市两种结霜工况小时数及其各自占比如图 5、图 6 所示。由图 5 可知，10 个不同城市冻结工况占比均值为 50.11%，凝华工况占比均值为 49.89%。重庆冻结工况占比达 100%，成都冻结工况占比达 81.11%，长沙冻结工况占比为 65.85%，其余 7 个代表城市冻结工况占比均低于 50%。此外，凝华工况占比最高的城市是杭州，占比最低的城市是重庆。

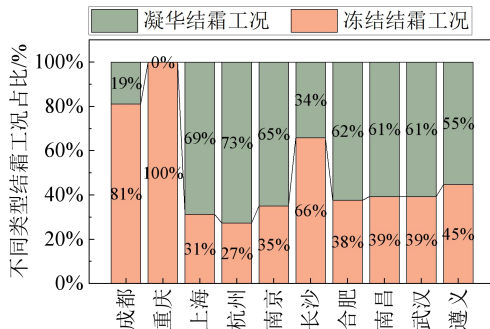


图 5 夏热冬冷地区典型城市两种结霜工况小时数占比

Fig.5 Proportion of hours of two frosting conditions in typical cities of hot summer and cold winter climate zone

由图 6 可知，10 个不同城市冻结工况小时数变化范围为 12~378h，均值为 235.5h。凝华工况小

时数变化范围为 0~691h，均值为 331.9h。虽然重庆冻结工况占比最高，但是其冻结结霜时刻仅为 12h。长沙冻结工况小时数最多，高达 378h。南京凝华结霜工况小时数最多，高达 691h。横向来看，10 个典型城市中凝华工况的总时长为 3319h，而冻结工况则为 2355h，故凝华结霜是夏热冬冷地区空气源热泵换热器表面结霜发生频率最高的形式。

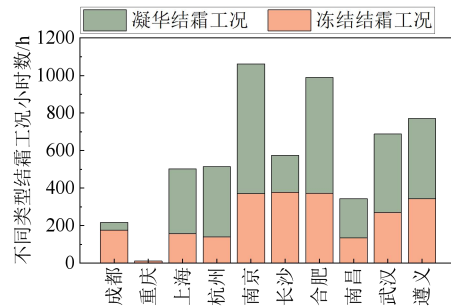


图 6 夏热冬冷地区典型城市两种结霜工况小时数

Fig.6 Hours of two frosting conditions in typical cities of hot summer and cold winter climate zone

3.3 与传统研究的对比

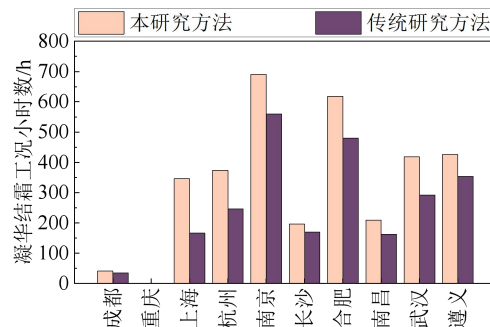


图 8 本研究与传统研究计算结果的对比

Fig.8 Comparison of the calculation results between this study and traditional research

本研究基于结霜机理及水的三相图，提出了一种结霜判断方法，并将结霜方式划分为冻结结霜与凝华结霜。根据结霜判断流程图（见图 3）可知，本研究区别于传统研究的关键在于过冷度设置问题，即仅需对满足冻结工况的状态点设置过冷度。在此基础上，进一步对比本文所采用的方法与传统研究（冻结、凝华工况均设置过冷度）计算结果的差异性，具体如图 8 所示。对比可知，传统研究计算方法所得结霜工况小时数偏小，这将导致对结霜的错误估计，平均低估量为 85.7h。其中，上海、合肥、南京、杭州、武汉等被严重低估，低估量分别为 180h、138h、131h、128h、126h。综上可知，

对夏热冬冷地区这种低温(最冷月均温 $2\sim 7^{\circ}\text{C}$)、高湿(最冷月均湿 $70\sim 85\%$)气候条件而言,凝华结霜是该地区空气源热泵换热器表面结霜发生频率最高的形式,因此本研究提出的空气源热泵结霜判断方法具有较好适用性。

3.4 本研究的局限性

本文是基于典型气象年对空气源热泵的宏观、理论研究,虽然实验研究具有较强的实践性、直观性和可见性,但同时也存在着一定的局限性,如实验研究往往仅是局限于某一地区、某一型号设备等。因此,本研究理论计算过程暂不考虑具体措施结果的影响,如增大空气源热泵室外换热器肋片间距、减小沿气流方向的管排数及增大气流速度等都可以延缓结霜;不讨论疏水表面对霜层生长的抑制作用^[34,35];不讨论翅片结构类型(平片、波纹片及条缝片)对霜层增长速度的影响^[36];忽略了空气洁净度对结霜的影响^[37];也不考虑结霜初期,稀松霜层附着在翅片表面,换热面积增加带来的系统正向增益^[38]。因此,本文分析得出的结霜规律是基于最不利情况计算结果而来的,是空气源热泵技术应用的基础依据。

4 结语

(1) 本文从结霜机理出发,提出了一种基于水相图的空气源热泵结霜理论判断方法,并对夏热冬冷地区10个代表性城市的空气源热泵结霜规律进行了分析。

(2) 结霜规律分析结果表明,夏热冬冷地区空气源热泵供暖气候适用性较强,但需要注意的是在不同城市开展空气源热泵供暖时,应结合本地结霜规律和特点进行针对性除霜设计。

(3) 相比于既有研究,本研究提倡应首先根据结霜类型对机组运行工况进行分类,筛选出冻结工况后再针对性设置过冷温度,本研究采用的方法更适用于夏热冬冷地区气候特点,在一定程度上提高了结霜规律预测的准确性。

(4) 本研究提出的结霜规律分析方法是基于最不利工况而建立的,分析结果可为空气源热泵除霜策略开发提供基础数据依据。

参考文献:

[1] 中国建筑节能协会.中国建筑节能研究报告(2020)[R].

厦门:中国建筑节能协会,2020.

- [2] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告[R].北京:清华大学建筑节能研究中心,2020.
- [3] 何雨欣,等.住建部负责人回应供暖五大热点[EB/OL].新华网,2015-11-16/2024-01-05.http://www.xinhuanet.com/politics/2015-11/26/c_1117274896.htm,2015.
- [4] 屈睿瑰.空气渗透及其能耗的计算机动态仿真研究[J].制冷与空调,2003,(3):4-7.
- [5] 陈朝阳.夏热冬冷地区典型城市居住建筑能耗实测及负荷特性研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [6] 董旭娟,闫增峰,王智伟.夏热冬冷地区城市住宅供暖方式调查与室内热环境测试研究[J].建筑科学,2014,30(12):2-7.
- [7] 孙弘历.夏热冬冷地区住宅供暖特征研究及新型平板热管末端开发[D].北京:清华大学,2021.
- [8] 伍品,王智超,杨英霞,等.长江流域居住建筑空气源热泵结合太阳能屋顶的应用研究[J].暖通空调,2020,50(5):10-13.
- [9] 张龙爱,王传华,陈一,等.空气源热泵冷热水机组应用于长江流域供暖的适应性分析及节能性提升[J].暖通空调,2023,53(1):149-155.
- [10] Su W, Li W, Zhang X. Simulation analysis of a novel no-frost air-source heat pump with integrated liquid desiccant dehumidification and compression-assisted regeneration[J]. Energy Conversion and Management, Elsevier, 2017,148:1157-1169.
- [11] 徐煦,曲凯阳,段远源.两类结霜过程的实验研究[J].制冷学报,2002,2002(4):1-4.
- [12] Qu M, Tang Y, Zhang T, et al. Experimental investigation on the multi-mode heat discharge process of a PCM heat exchanger during TES based reverse cycle defrosting using in cascade air source heat pumps[J]. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2019,151:154-162.
- [13] Tang J, Gong G, Su H, et al. Performance evaluation of a novel method of frost prevention and retardation for air source heat pumps using the orthogonal experiment design method[J]. Applied Energy, Elsevier, 2016,169:696-708.
- [14] Wang F, Liang C, Zhang X. Research of anti-frosting technology in refrigeration and air conditioning fields: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,

- Elsevier, 2018,81:707-722.
- [15] Tan H, Xu G, Tao T, et al. Investigation on the ultrasonic propagation mechanism and its application on air-source heat pump defrosting[J]. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, 2016,107:479-492.
- [16] Choi H-J, Kim B-S, Kang D, et al. Defrosting method adopting dual hot gas bypass for an air-to-air heat pump[J]. *Applied Energy*, Elsevier, 2011,88(12):4544-4555.
- [17] Song M, Dang C, Higashi T, et al. Review of experimental data associated with the solidification characteristics of water droplets on a cold plate surface at the early frosting stage[J]. *Energy and Buildings*, Elsevier, 2020,223:110103.
- [18] Amer M, Wang C-C. Review of defrosting methods[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2017,73:53-74.
- [19] Wei W, Ni L, Wang W, et al. Experimental and theoretical investigation on defrosting characteristics of a multi-split air source heat pump with vapor injection[J]. *Energy and Buildings*, Elsevier, 2020,217:109938.
- [20] Adachi M, Inoue S, Aizawa T. On the refrigeration cycle property of heat pump air conditioners operating with frost formation[J]. *Refrigeration*, 1975,50(576):818-820.
- [21] 倪龙,林木森,魏文哲,等.变频空气源热泵供暖结霜图谱[J].*暖通空调*,2023,53(8):131-137.
- [22] 王剑锋,陈光明.空气热源热泵冬季结霜特性研究[J].*制冷*,1997,1997(1):4.
- [23] 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.
- [24] Zhu J, Sun Y, Wang W, et al. A novel Temperature-Humidity-Time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps[J]. *International Journal of Refrigeration*, Elsevier, 2015,54:45-54.
- [25] 程康.空气源热泵结霜图谱及除霜控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [26] Wei W, Ni L, Li S, et al. A new frosting map of variable-frequency air source heat pump in severe cold region considering the variation of heating load[J]. *Renewable Energy*, 2020,161:184-199.
- [27] 余丽霞;付祥钊;肖益民.空气源热泵在长江流域的气候适宜性研究[J].*暖通空调*,2011,41(6):96-99.
- [28] 李晨.居住建筑空气源热泵供暖气候潜力等级划分与室外计算参数[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
- [29] 沈维道,蒋智敏,童均耕.工程热力学[M].第五版.北京:高等教育出版社,2006.
- [30] 王伟,张富荣,郭庆慈,等.空气源热泵在我国应用结霜区域研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2009,36(S2):9-13.
- [31] Yao Y, Jiang Y, Deng S, et al. A study on the performance of the airside heat exchanger under frosting in an air source heat pump water heater/chiller unit[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, 2004,47(17-18):3745-3756.
- [32] 许旺发.冷面结霜机理及其抑制对策的实验研究[D].北京:清华大学,2005.
- [33] 王皆腾,刘中良,勾昱君,等.冷表面上水滴冻结过程的研究[J].*工程热物理学报*,2007,2007(6):989-991.
- [34] 梁彩华,汪峰,吕艳,等.翅片表面特性对结霜过程影响的实验研究[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2014(4):745-750.
- [35] 刘明辉.石墨烯材料在空气源热泵除霜技术中的应用研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
- [36] 谢福林,郭宪民,郭欣炜,等.翅片结构对换热器结霜特性影响的实验研究[J].*制冷学报*,2021,42(3):51-58.
- [37] 朱佳鹤.基于分区域结霜图谱的新型 THT 除霜控制方法的研究与开发[D].北京:北京工业大学,2016,(3):78.
- [38] 杨雅鑫,毛瑞勇,赵麒,等.贵阳地区空气源热泵结霜规律及抑霜策略研究[J].*节能技术*,2020,38(1):90-96.