

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-610-06

空气源热泵在川西地区的供暖影响分析

甘灵丽 王 曦

(四川省建筑设计研究院有限公司 成都 610000)

【摘要】 对川西代表性城镇气象资料进行了整理统计,分析了结霜、室外干球温度、海拔高度对空气源热泵的影响,评估了结霜情况下空气源热泵供暖的适宜性,给出了在海拔高度影响下空气源热泵蒸发器侧风量(风速)的扩大倍数,提出了在一定温度下宜采用低温型空气源热泵并按需配置相应的辅助热源措施,得到了空气源热泵机组制热量的综合修正系数。

【关键词】 空气源热泵; 结霜; 海拔; 干球温度
中图分类号 TU831 文献标识码 B

Impact Analysis of Heating of Air Source Heat Pump in Western Sichuan

Gan Lingli Wang Xi

(Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610000)

【Abstract】 In this paper, Meteorological data of representative cities and towns in Western Sichuan are sorted and counted, The effects of frosting, outdoor dry bulb temperature and altitude on air source heat pump are analyzed, the suitability of air source heat pump heating under frosting is evaluated, expansion multiple of blowing rate of evaporator of air source heat pump under the influence of altitude is given, it is suggested that air source heat pump for low temperature should be used at a certain temperature and the necessary measures of Auxiliary heat source should be configured, comprehensive correction coefficient of the heating capacity of air source heat pump unit is obtained.

【Keywords】 air source heat pump; frosting; altitude; dry bulb temperature

作者(通讯作者)简介: 甘灵丽(1983.04-),女,硕士研究生,高级工程师, E-mail: 154617397@qq.com
收稿日期: 2021-12-30

0 引言

空气源热泵是以空气为低位热源的热泵,它是通过电能驱动制冷工质热力循环,把低位热能转换成高位热能的设备。空气源热泵的低位热源空气,取之不尽,用之不竭,可以无偿获取,同时空气源热泵的安装、操作、维护、管理较方便灵活,使得空气源热泵在各种建筑中得到广泛的应用。

目前我国学者主要从温度、结霜、经济性和地区适宜性^[1-6]几个方面对空气源热泵进行研究,空气源热泵的运行性能与使用地的气候环境有紧密的关系,由于不同地区气候环境差异较大,空气源热泵的既有研究结论并不具有普遍的指导意义。川西地区大部分区域属于高寒地区,供暖是当地城镇

功能正常运转的基本保障,当地技术管理水平较低,空气源热泵安装、操作、维护、管理较方便灵活的特点十分适合当地技术管理水平,但是川西地区高寒气候环境对空气源热泵运行性能影响较大,又使得空气源热泵在该地区的使用受到一定的限制。目前我国学者对空气源热泵在川西高寒地区供暖的研究较少,因此本文将对空气源热泵在川西地区的供暖进行研究分析。本文选取具有川西地区代表性(考虑社会支撑条件、地理特征、气候分区及社会经济等因素)的典型城镇和其他城镇作为对象,分析川西地区气候环境对空气源热泵供暖的影响。主要从以下4个方面进行分析:(1)结霜对空气源热泵的影响;(2)海拔高度对空气源热泵的影响;

(3) 干球温度对空气源热泵的影响; (4) 综合影响。

1 结霜对空气源热泵的影响

空气源热泵机组结霜不仅会增加室外换热器表面热阻, 降低室外换热器的传热系数, 还会增大空气流过室外换热器阻力, 减少空气流量。伴随着室外换热器壁面霜层的生长, 机组制热量降低, 风机性能衰减, 输入电流增大, 供热性能降低, 严重时会出现压缩机停机, 导致机组不能正常工作。因此, 结霜对严寒和寒冷地区空气源热泵供暖的可靠性和适宜性有着重要影响。

相关文献实验研究表明^[5], 根据空气温湿度、空气露点温度及蒸发器换热温差之间的关系及空气源热泵最低运行环境温度, 可以得出空气源热泵理论结霜区域。空气干球温度在-15℃~11.5℃之间, 相对湿度在 30%~100%之间。随着相对湿度的增大和空气温度的降低, 结霜速率逐渐加快, 当相对湿度增至 65%后或温度降至-5℃后, 结霜速率明显加快, 因此, 将-5℃和 65%分别作为划分结霜区域干球温度和相对湿度的分界线。据此, 可将结霜区域细分为四个区: 重霜区、一般结霜区、低温结霜区、轻霜区。重霜区空气温度在-5℃~11.5℃之间, 相对湿度在 65%~100%之间; 一般结霜区空气温度在-5℃~11.5℃之间, 相对湿度在结霜区域下限与 65%之间; 低温结霜区空气温度在-15℃~-5℃之间, 相对湿度在 65%~100%之间; 轻霜区空气温度在-15℃~-5℃之间, 相对湿度在结霜区域下限与 65%之间。

根据上述判定方法, 分析各典型城镇供暖期室外逐时温湿度下空气源热泵不同程度结霜的概率。各典型城镇供暖期空气源热泵结霜特性分析见图 1-图 5 和表 1。

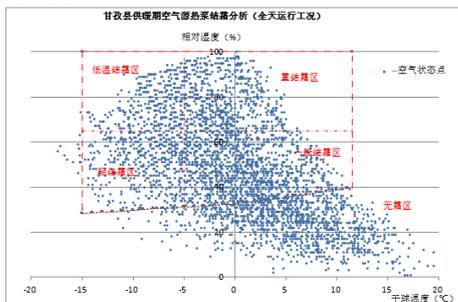


图 1 甘孜县结霜特性分析

Fig.1 Analysis of Frosting Characteristics in Ganzi County

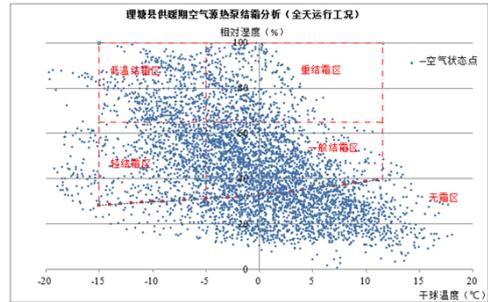


图 2 理塘县结霜特性分析

Fig.2 Analysis of Frosting Characteristics in Litang County

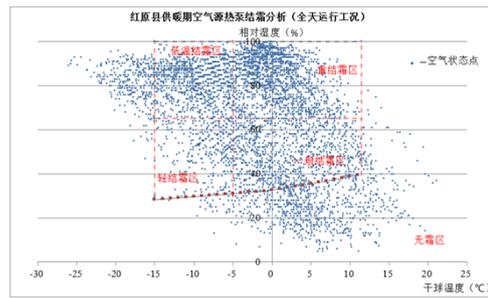


图 3 红原县结霜特性分析

Fig.3 Analysis of Frosting Characteristics in Hongyuan County

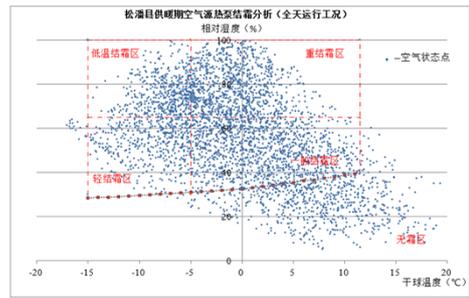


图 4 松潘县结霜特性分析

Fig.4 Analysis of Frosting Characteristics in Songpan County

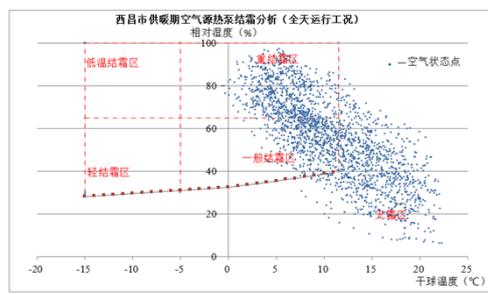


图 5 西昌市结霜特性分析

Fig.5 Analysis of Frosting Characteristics in Xichang City

表 1 典型地区供暖期空气源热泵机组的结霜时间

Table 1 Frosting time of Air Source Heat Pump Unit in Heating Season in the typical area

地区	供暖期	供暖时长 (h)	易结霜时长 (h)	重霜区占比 (%)	一般结霜区占比 (%)	低温结霜区占比 (%)	轻结霜区占比 (%)	无霜区占比 (%)
甘孜	10.24~4.7	3894	3058	16.0	38.0	9.9	12.9	23.2
理塘	10.18~5.7	4848	3452	10.0	38.6	9.9	12.7	28.8
红原	9.29~5.13	5448	4438	33.6	20.9	20.4	6.5	18.5
松潘	10.27~4.6	3888	3353	24.4	36.4	13.0	12.4	13.8
西昌	11.16~2.14	2184	1296	32.6	26.8	-	-	40.7

从图 1-图 5 和表 1 可以看出,各典型城镇空气源热泵易结霜时间占比均较长,均在 59%以上。甘孜约 21%的时间为重结霜区,约 50%的时间为一般结霜区;理塘约 14%的时间为重结霜区,约 54%的时间为一般结霜区;红原约 41%的时间为重结霜区,约 50%的时间落在一般结霜区和低温结霜区;松潘约 28%的时间为重结霜区,约 30%的时间为一般结霜区;西昌约 55%的时间为重结霜区,约 45%的时间为一般结霜区。

红原和西昌相对湿度较大,重结霜区的占比较大,需慎用空气源热泵,确需使用空气源热泵时,应有较好的除霜控制技术和策略;甘孜、理塘、松潘地区,大部分时间也处于易结霜区,但因供暖期相对湿度较低,总体结霜程度比红原、西昌地区轻,可使用空气源热泵机组。

同理还可以得出其他城镇空气源热泵供暖结霜特性如图 6 所示。

其他城镇空气源热泵供暖期结霜特性分析

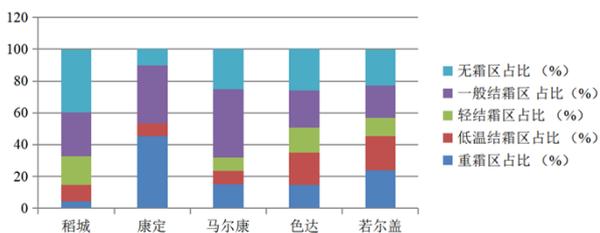


图 6 其他城镇供暖期空气源热泵机组结霜特性

Fig.6 Analysis of Frosting Characteristics of Air Source Heat Pump Unit in Heating Season in other cities and towns

从图 6 可以看出,康定县约 80%时间处于易结霜模式,48%的时间为重结霜区,从结霜角度考虑,该地区供暖建筑慎用空气源热泵机组,确需使用空气源热泵时,应有较好的除霜控制技术和策略;马尔康、色达、若尔盖结霜几率较高,但重结霜区占

比较低,可采用空气源热泵机组;稻城结霜几率较其他地方低,且多处于一般结霜区,较宜采用空气源热泵机组。

考虑机组运行的可靠性和节能性,在川西地区使用空气源热泵时一定注重除霜技术。

2 海拔高度对空气源热泵的影响

假设空气为理想气体,则海拔、大气压力、温度、空气密度的关系可表示为:

$$p = p_0 \times \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15}\right)^{5.25588} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{1000P}{RT} \left(1 - 0.378 \frac{e}{P}\right) \quad (2)$$

式中, H 为海拔高度, m ; p 为海平面处的大气压强, kPa ; p_0 为海拔 H 处的大气压强, kPa ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; P 为大气压强, kPa ; R 为气体常数,取 287; T 为空气热力学温度, K ; e 为空气中的水汽压, kPa 。

式 (1) ~ (2) 可以看出空气密度随着海拔高度的升高和温度的上升而减小。有文献研究表明^[6],空气密度的减小会降低空气源热泵蒸发器空气侧的表面换热系数,空气侧的表面换热系数的减小会引起蒸发器传热系数的显著下降,从而影响空气源热泵性能系数。以常用的平直型翅片蒸发器的空气源热泵为例,当空气受迫湍流换热时,则空气侧表面传热系数 h 为:

$$h = 0.982 \cdot \lambda \cdot d^{-1} \cdot \left[\left(\frac{v \cdot d}{\mu}\right)^{0.424} \cdot \left(\frac{s_1}{d_3}\right)^{-0.0887} \cdot \left(\frac{N \cdot s_2}{d_3}\right)^{-0.159}\right] \cdot \rho^{0.424} \quad (3)$$

式(3)中, h 为空气侧表面换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; v 为空气流速, m/s ; d 为蒸发器管径, m ; μ 为空气动力粘度, $N \cdot s/m^2$; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; s_1 为垂直空气流动方向翅片

间距, m ; s_2 为沿空气流动方向管间距, m ; d_3 为翅根直径, m ; N 为管根数。

上述各参数中, d 、 s 等翅片结构形状尺寸参数不随海拔高度变化, λ 、 μ 等空气物性参数随海拔高度变化不大, 可忽略不计。

表 2 海拔高度对各城镇空气源热泵蒸发器空气侧表面换热系数的影响

城镇名称	西昌	康定	马尔康	松潘	甘孜	若尔盖	红原	稻城	色达	理塘
海拔	1590	2617	2664	2850.7	3393.5	3441	3491.6	3729	3896	3948.9
h/h_0	92.20%	87.30%	87.10%	86.20%	83.70%	83.50%	83.20%	82.20%	81.40%	81.20%

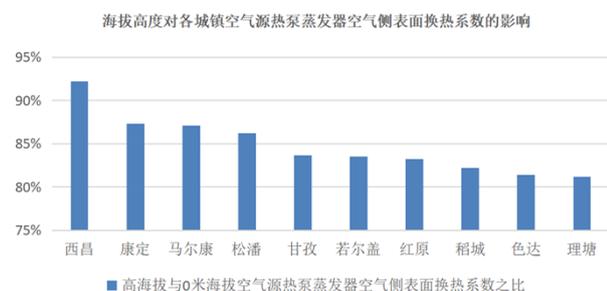


图 7 海拔高度对各城镇空气源热泵蒸发器空气侧表面换热系数的影响

Fig. 7 Effects of altitude on surface heat transfer coefficient of evaporator of Air Source Heat Pump in cities and towns

由表 2 和图 7 可以看出海拔越高, 蒸发器空气侧表面换热系数降低的比例越大。甘孜、理塘、红

表 3 各城镇空气源热泵蒸发器侧风量扩大倍数

典型城镇名称	甘孜	理塘	红原	松潘	西昌	马尔康	康定	稻城	若尔盖	色达
海拔 (m)	3393.5	3948.9	3491.6	2850.7	1590	2664	2617	3729	3441	3896
风量或风速扩大倍数	1.522	1.635	1.540	1.420	1.212	1.296	1.378	1.589	1.531	1.624

从表 3 可以看出, 海拔 3000 米以上的城镇风量或风速扩大倍数均在 1.5 以上, 海拔越高, 风量或风速扩大倍数越大。在川西地区使用空气源热泵供暖时, 需对机组制热量参数进行海拔高度修正后选择, 或对空气源热泵机组厂家提出风量 (风速) 的扩大修正要求。

3 干球温度对空气源热泵的影响

空气源热泵在冬季随着室外空气温度的降低, 机组的制热量也减少。以某品牌模块式空气源热泵

联合式 (1) ~ (3) 可以得出, 川西典型城镇和其他城镇海拔高度和温度对空气源热泵空气侧表面换热系数的影响, 如表 2 (表中 h_0 为海拔高度为 0 米时的空气源热泵蒸发器空气侧表面换热系数) 和图 7 所示。

原、色达、稻城、若尔盖等 3000 米高海拔以上的地区蒸发器空气侧表面换热系数约降低 16%~19%, 松潘、马尔康、康定等 2500 米海拔以上的地区蒸发器空气侧表面换热系数约降低 13%~14%, 西昌地区蒸发器空气侧表面换热系数约降低 8%。

从公式 (3) 可看出, 管外空气侧换热系数与

$$(\rho v)^{0.424} \cdot \left(\frac{S_1}{d_3}\right)^{-0.0887} \cdot \left(\frac{S_2}{d_3}\right)^{-0.159} \text{ 均成正比。在}$$

高海拔地区, 若要维持原有换热效果, 可考虑加大风机风量或提高换热器迎面风速, 维持质量流速 ρv 不变。各城镇空气源热泵机组维持原有换热效

果时风机风量扩大倍数或扩大风速倍速如表 3 所示。

机组为例, 机组的额定出水温度 45°C , 冬季设计工况环境温度为 -15°C 时机组性能参数修正值为 0.5, 要满足《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》和《公共建筑节能设计标准》空气源热泵机组 COP 大于 2 的要求, 此时空气源热泵额定 COP 应大于 4, 而常规热泵机组的额定 COP 约 3.5, 为满足《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》和《公共建筑节能设计标准》的 COP 要求, 热泵 COP 大于 2 的冬季设计工况环境温度不能低于 -13°C 。

表 4 各城镇冬季供暖室外计算温度

Table 4 Outdoor calculated temperature of winter heating in cities and towns

典型城镇名称	甘孜	理塘	红原	松潘	西昌	马尔康	康定	稻城	若尔盖	色达
供暖室外计算温度 (°C)	-6.5	-10.5	-6.7	-6	4.7	-4.1	-5.1	-9.0	-14.6	-14.7

从表 4 可以看出,若尔盖、色达的供暖室外计算温度在-13°C以下,供暖设计工况下空气源热泵 COP 值已不满足规范要求,此时建议采用低温型空气源热泵,以同品牌空气源热泵为例,热泵的冬季设计工况温度为-15°C时,COP 均能大于 2,大部分产品在冬季设计工况温度为-20 °C时 COP 大于 2,部分产品在冬季设计工况温度为-25 °C时 COP 也大于 2。在川西地区选用低温空气源热泵时,还需考虑机组实际制热量与热负荷的供需平衡,当存在室外空气温度低至机组的供热量少于需求量时,应设置相应的辅助热源。

4 综合影响

在空气源热泵蒸发器空气侧保证空气质量流量下,空气源热泵的冬季制热量受到室外空气温度、

表 5 各城镇空气源热泵机组制热量综合修正系数

Table 5 Comprehensive correction coefficient of the heating capacity of Air Source Heat Pump Unit in cities and towns

典型城镇名称	甘孜	理塘	红原	松潘	西昌	马尔康	康定	稻城	若尔盖	色达
修正系数	0.65	0.57	0.65	0.66	0.76	0.59	0.69	0.6	0.46	0.46

从表 5 可以看出,除西昌外各城镇的综合修正系数均较小,均在 0.7 以下,若尔盖和色达甚至在 0.5 以下,如果不考虑加大风量或风速来解决热泵蒸发器空气侧空气质量流量,修正系数还需加上空气密度变化对制热量的影响,总的修正系数会更小。因此,在川西地区使用空气源热泵机组时一定要注重制热量的修正。

5 结论

(1) 川西各城镇空气源热泵易结霜时间占比均较长,均在 59%以上。其中红原、西昌、康定的重结霜区占比明显比其他城镇高,均在 40%以上,部分达到 50%以上,需慎用空气源热泵机组;甘孜、理塘、松潘、色达、马尔康和若尔盖重结霜区程度低的地区可使用空气源热泵机组;稻城空气源热泵供暖结霜几率较其他地方低,且多处于一般结霜区,较宜采用空气源热泵机组。但考虑空气源热泵运行的可靠性和节能性,在川西地区使用空气源热泵机

湿度和机组本身的融霜性能的影响,在设计工况下的制热量通常采用式(4)计算:

$$Q = qK_1K_2 \tag{4}$$

式(4)中, Q 为机组设计工况下的制热量,kW; q 为产品标准工况下的制热量, kW; K_1 为使用地区室外空调计算干球温度修正系数,按产品样本选取; K_2 为机组融霜修正系数,应根据生产厂家提供的数据修正,无数据时,可按每小时融霜一次取 0.9,两次取 0.8。

以某品牌模块式空气源热泵机组为例,机组的额定出水温度 45 °C,在低温下融霜间隔可做到每小时内一次,机组融霜修正系数可取 0.9,结合产品非额定制热工况下性能修正系数可得到空气源热泵机组制热量综合修正系数如表 5 所示。

组时需注重除霜技术。

(2) 海拔越高,空气源热泵室外空气侧盘管外表面换热系数越低,相同机型的换热量减小,为了保证制热效果,需对空气源热泵制热量参数进行海拔高度修正,或对空气源热泵厂家提出风量(风速)的扩大修正要求。当采用扩大风机风量或风速时,海拔 3000 米以上的城镇风量或风速扩大倍数均在 1.5 以上。

(3) 若尔盖、色达的供暖室外计算温度在-13 °C以下,常规空气源热泵机组能效已不满足规范要求,此时建议采用低温型空气源热泵。在川西地区选用低温空气源热泵时,还需考虑机组实际制热量与热负荷的供需平衡,当存在室外空气温度低至机组的供热量少于需求量时,应设置相应的辅助热源。

(4) 在空气源热泵蒸发器空气侧保证空气质量流量时,川西各城镇的修正系数均较小,除西昌外均在 0.7 以下,若尔盖和色达甚至在 0.5 以下;考虑空气密度变化对制热量的影响时,总的修正系

数会更小。因此,在川西地区使用空气源热泵机组时一定要注重制热量的修正。

参考文献:

- [1] 柴沁虎. 空气源热泵低温适应性研究的现状及进展[J]. 能源工程,2002,(5):25-31.
- [2] 范存养,龙惟定. 上海地区空气源热泵的应用与展望[J]. 制冷技术,1994,(2):1-8.
- [3] 罗鸣,谢军龙. 风冷热泵机组中的热气除霜方法[J]. 制冷与空调,2003,(6):47-49.
- [4] 姜益强,姚杨,马最良. 空气源热泵冷热水机组供热最佳能量平衡点的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,(3):83-87.
- [5] 张富荣. 冷表面结霜机理及空气源热泵在我国的结霜区域研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
- [6] 李欣林. 拉萨地区空气源热泵供暖应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [7] 王林平,王松明,郑学林,等. 喷雾水中溶解氧对冷凝器翅片的腐蚀性研究[J]. 发电与空调,2013,34(1):47-51.
- [8] 常银玲,张天坤,斯一波,等. 翅片管式换热器的翅片耐腐蚀涂层研究[J]. 制冷与空调,2018,18(6):18-22.
- [9] 詹飞龙,丁国良,赵夫峰,等. 空调换热器长效性能衰减的研究进展[J]. 制冷学报,2015,36(3):17-23,40.
- [10] 刘忠民,蒋金龙. 铝制换热器的耐腐蚀性探讨[J]. 电器,2012(S1):269-276.
- [11] 2020 年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护,2021,49(11):47-68.
- [12] Feriha S Birol, Yucel Birol, Margarita Slamova. Corrosion Behavior of Aluminum Finstock Alloys[J]. Materials Science Forum, 2002,396-402(3):1511-1516.
- [13] 刘志孝,王磊,曹勇,等. 翅片管换热器与微通道换热器腐蚀对比分析[J]. 制冷与空调,2015,15(7):78-81.
- [14] 武滔. 高耐腐蚀铝箔换热器应用研究[J]. 家用电器,2018,(2):44-45.
- [15] 彭楚堂,王琳,陈龙,等. 空调换热器铝管材料的抗腐蚀性研究[J]. 制冷与空调,2020,20(8):29-32.
- [16] 颜圣绿,刘志孝,王磊. 微通道换热器耐中性盐雾腐蚀特性的试验研究[J]. 制冷技术,2015,35(5):20-24.
- [17] 祁小松,早濂岳,赵志勇,等. 微通道热交换器的耐腐蚀

(上接第 591 页)