

文章编号: 1671-6612 (2019) 01-094-4

# 蒸发器面积对高寒地区热泵结霜的影响分析

阳 豪 雷 波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘 要】** 研究了蒸发器面积对空气源热泵机组蒸发器表面温度的影响, 通过对我国高寒地区主要代表性区域的气象资料进行整理分析, 统计了蒸发器面积为  $S_0$ 、 $1.5S_0$ 、 $2S_0$  时的机组结霜时间, 并分析了其对空气源热泵机组结霜的影响效果。当室外蒸发器面积为  $2S_0$  时, 空气源热泵机组的蒸发器表面温度平均提高了约  $2.4^\circ\text{C}$ , 空气源热泵机组在采暖季运行时间内, 机组在不同地区的结霜时间相对减少了  $2.89\%\sim 13.38\%$ 。

**【关键词】** 高寒地区; 空气源热泵; 蒸发器; 结霜  
中图分类号 U453.5 文献标识码 A

## Effects of Evaporator Area on Frosting Condition of Heat Pump in Cold Highland Areas

Yang Hao Lei Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** This paper analyzes the effects of evaporator area to evaporator surface temperature of air source heat pump, according to the analysis of the outdoor meteorological conditions of the main representative regions in cold highland areas, calculates the frost time of heat pump with the different evaporator area by  $S_0$ ,  $1.5S_0$  and  $2S_0$ , and analyzed its effect on frosting condition of heat pump. The results indicate that when the evaporator area is  $2S_0$ , the evaporating temperature can be raised about an average of  $2.4^\circ\text{C}$ , and the frost time in different regions can be shortened about  $2.89\%\sim 13.38\%$  in heating seasons.

**【Keywords】** cold highland areas; air source heat pump; evaporator; frost

## 0 引言

高寒地区主要包括青藏高原等寒冷、严寒地区。其具有气压低、空气温度低、昼夜温差大、冬季供暖时间较长等特点<sup>[1]</sup>。

高原寒冷地区空气源热泵应用可行性研究已经得到多方证实<sup>[2,3]</sup>, 但空气源热泵在冬季运行过程中, 室外蒸发器表面存在结霜的问题, 随着霜层厚度的增加, 霜层热阻不断增加, 严重的影响了热泵机组的制热能力。因此, 有必要根据高寒地区气候特点探讨减少空气源热泵结霜问题的措施, 为高寒地区空气源热泵机组研发设计提供参考。

国内外学者对空气源热泵结霜问题进行了大

量研究, 王伟等<sup>[4]</sup>针对空气源热泵在北京地区运行中结霜、误除霜、低温及脏堵等关键问题进行了系统能耗分析。S N Kondepudi<sup>[5]</sup>进行了空气源热泵机组详细的翅片换热器结霜特性分析, 并讨论了如迎风面积、翅片密度、相对湿度等因素对热泵机组性能的影响。文献<sup>[6]</sup>根据我国 18 个城市的气象资料, 将空气源热泵结霜区间按照结霜程度划分成重霜区、一般结霜区、低温结霜区和轻霜区 4 个区域。文献<sup>[7]</sup>研究了基于分区结霜图谱的新型 THT 除霜控制方法。

尽管国内外学者对空气源热泵结霜程度和结霜范围作出了大量的研究, 但针对空气源热泵在高

作者简介: 阳 豪 (1993.09-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: haoyangneil@163.com

通信作者: 雷 波 (1961.05-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: leibo@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018-04-20

寒地区的结霜研究较少。本文以空气源热泵在代表性高寒地区结霜状况进行研究,分析室外气象条件来判断机组在高寒地区运行时是否结霜以及结霜的时间比例,并分析增大蒸发器面积对减少热泵机组结霜的效果。

## 1 蒸发器表面结霜分析

### 1.1 蒸发器模型

制冷剂在蒸发器内流动换热主要经历两相区与单相区(过热区),建立模型时做出如下假设:

(1) 采用均相流模型;(2) 两相流在同一流动界面上气相和液相的压力相等;(3) 管壁热阻忽略不计。

#### 1.1.1 制冷剂侧换热关联式

##### (1) 单相区

对于单相区(过冷区、过热区),制冷剂换热系数采用 Dittus—Boeler 关联式<sup>[8]</sup>:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

##### (2) 两相区

蒸发器中两相区沸腾换热系数关联式<sup>[8]</sup>为:

$$\alpha_p = 0.023 \left( \frac{\lambda}{d_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} F \quad (2)$$

式中:  $d_i$  为管内径。

#### 1.1.2 空气侧换热关联式

翅片形式采用平直形翅片,换热关联式<sup>[8]</sup>为:

$$Nu = 0.982 Re^{0.424} Pr^{0.33} \left( \frac{s_1}{d_3} \right)^{-0.0887} \left( \frac{Ns_2}{d_3} \right)^{-0.159} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\alpha_r d_3}{\lambda} \quad (4)$$

式中:  $s_1$  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;  $\alpha_r$  为空气侧换热系数。

### 1.2 蒸发器表面结霜与空气参数的关系

结霜的机理以及结霜对传热的影响因素有很多,一般认为热泵室外蒸发器结霜条件为蒸发器表面温度  $T_w$  与空气露点温度  $T_d$  满足关系式(5):

$$T_w < 0 \text{ 且 } T_w < T_d \quad (5)$$

式(5)中空气的露点温度  $T_d$  可以根据空气的

干球温度与相对湿度计算得出,因此空气干球温度和相对湿度是影响热泵结霜的重要因素。图1是根据日本学者对不同空气源热泵机组的实验结果拟合得出的结霜区域<sup>[9]</sup>。结霜的室外气象参数范围为:室外空气干球温度  $-12.8^\circ\text{C} \leq T_a \leq 5.8^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $\psi \geq 67\%$ , 如图1中阴影区域所示。当  $T_w > 5.8^\circ\text{C}$  时,可以不考虑结霜对热泵的影响;当  $T_w < 5.8^\circ\text{C}$ ,  $\psi < 67\%$  时,由于空气的露点温度  $T_d$  低于室外蒸发器表面温度  $T_w$ , 不会发生结霜现象;当  $T_w < -12.8^\circ\text{C}$  时,由于空气中的含湿量非常低,随着热泵运行时间的增长蒸发器表面会有微薄的冰层,也不会发生结霜现象。

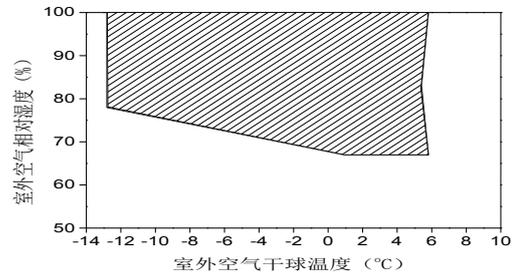


图1 空气源热泵结霜的室外空气参数范围

Fig.1 Outdoor air parameter range of air source heat pump frosting

### 1.3 不同蒸发器面积下的结霜区域

空气源热泵室外蒸发器表面结霜对机组性能的影响主要表现为:堵塞蒸发器肋片间的换热通道,增加了换热热阻,导致制热能力下降,严重时,将直接导致机组发生故障。判断蒸发器表面是否结霜,首先需要得到结霜判定条件中的蒸发器表面温度  $T_w$ 。本文通过以下假设来得出蒸发器表面温度。

在进行蒸发器结霜仿真模拟<sup>[8]</sup>时,通常考虑到翅片和管壁的热阻远小于霜的热阻,将管壁和翅片在厚度方向上的导热忽略不计。由霜层传入翅片的热量当作内热源处理,结霜过程中,蒸发温度保持恒定不变。根据文献<sup>[7,10]</sup>研究表明,当空气源热泵冬季运行时,可以认为蒸发器表面温度  $T_w$  与制冷剂蒸发温度  $T_e$  近似相等。当室外空气温度一定时,机组的蒸发温度也为定值。因此,研究蒸发器表面是否结霜的问题,转化成研究蒸发温度  $T_e$  与室外空气干球温度  $T_a$  的关系。

为了探究不同蒸发器面积对结霜的影响,本文设定蒸发器基准面积  $S_0$  的迎风尺寸为  $750\text{mm} \times 740\text{mm}$ , 压缩机额定功率为  $1.2\text{kW}$ , 室内

温度为 20℃。通过仿真得到蒸发器面积分别为  $S_0$ 、 $1.5S_0$ 、 $2S_0$  时的机组运行性能。统计各蒸发器面积下不同室外空气温度变化所对应的蒸发温度，如图 2 所示。

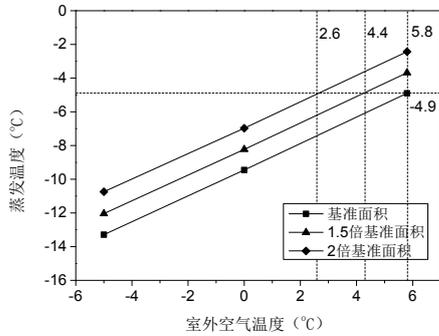


图 2 蒸发器面积、室外空气温度、蒸发温度三者之间的关系

Fig.2 The relationship between evaporator area, outdoor air temperature and evaporation temperature

由图 2 可以看出，当蒸发器面积一定时，机组的蒸发温度随室外空气温度的增大而升高。当室外空气温度一定时，机组的蒸发温度随蒸发器面积的增大而升高，这有利用减少机组的结霜情况，降低除霜功耗。

当蒸发器面积为  $2S_0$  时，机组的蒸发温度平均提高了约 2.4℃，即室外蒸发器的表面温度也将随着提高约 2.4℃。当蒸发器面积为  $S_0$  时，结霜区域室外空气温度边界值为  $T_w=5.8℃$ ，对应的机组蒸发温度为  $T_e=-4.9℃$ 。由于蒸发器的设计结构形式均相同，仅换热器面积大小改变，所以在蒸发器面积成倍增大时，同样应该在蒸发温度为  $T_e=-4.9℃$  时蒸发器表面具有临界结霜的条件。

因此，在基准面积  $S_0$  线上作出室外空气温度为 5.8℃ 对应的蒸发温度线，依次相交  $1.5S_0$ 、 $2S_0$  线，则结霜区域室外空气温度边界值依次降低为 4.4℃、2.6℃，再根据图 1、图 2 可以得出空气源热泵机组处于不同蒸发器面积下所对应的结霜区域，如图 3 所示。

在增大蒸发器面积后，相应的结霜区域也逐步减小，减小部分如图阴影区域 A、B 所示。空气源热泵机组处于不同蒸发器面积下的结霜区域分别为：

- 蒸发器面积为  $S_0$  时，结霜区域为：A+B+C；
- 蒸发器面积为  $1.5S_0$  时，结霜区域为：B+C；

蒸发器面积为  $2S_0$  时，结霜区域为：C；

由图 3 可以看出，如果蒸发器面积采用  $1.5S_0$ ，A 区域即为减小的结霜区域的空气参数范围，从而达到减小结霜问题的效果。

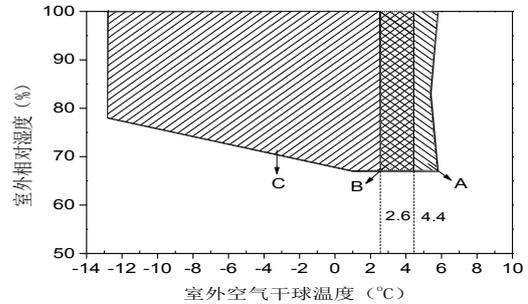


图 3 不同蒸发器面积下的结霜室外空气参数变化范围

Fig.3 Outdoor air parameter range of air source heat pump frosting under different evaporator area

## 2 热泵机组采暖季结霜时间分析

### 2.1 不同蒸发器面积下的结霜时间

表 1 不同运行模式下结霜时间的相对比较

Table 1 The relative comparison of the frost time of air source heat pump in different mode

地区	城市	$T$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
四川	甘孜	3984	24.40	24.27	22.44
	马尔康	2928	21.00	20.77	18.55
	红原	5448	47.45	45.72	41.10
甘肃	合作	4944	30.99	30.50	28.66
	西宁	3960	19.19	19.07	18.64
青海	玉树	4776	16.56	16.33	14.89
	格尔木	4224	1.63	1.63	1.63
	拉萨	3264	1.72	1.72	1.72
西藏	昌都	3552	12.61	12.33	11.63
	林芝	2784	25.68	24.86	22.52

本文选择高寒地区部分代表地区，根据图 3 中给出的不同结霜区域，对其热泵采暖季的室外气象资料<sup>[11]</sup>进行统计计算，分别得到  $S_0$  运行模式 (0)、 $1.5S_0$  运行模式 (1)、 $2S_0$  运行模式 (2) 下的机组发生结霜现象的时间。其中， $T$  为采暖季小时数， $T_i$  ( $i=0, 1, 2$ ) 为不同运行模式的热泵结霜时间，单位为 h。

不同运行模式的结霜时间占采暖季总时间比例定义为：

$$\alpha_i = \frac{T_i}{T} \times 100\%, \quad i=0、1、2 \quad (6)$$

由此可以得出蒸发器面积对结霜时间的影响效果,如表1所示。

## 2.2 各地区的结霜时间分析

(1) 机组在高寒地区运行时,当机组蒸发器采用基准面积  $S_0$  时,结霜时间占采暖季总时间比例在 1.63%~47.45%,绝大多数地区结霜时间比例处于 20%左右,少部分地区结霜时间比例处于 30%以上,对于这部分地区而言,结霜仍然是一个比较严重的问题。在四川地区,由于冬季室外空气温度相对较高且相对湿度大,因此空气源热泵机组的结霜时间比例相对较高,平均值为 30.95%;在青海、西藏地区,由于冬季气候寒冷,相对湿度较低,空气源热泵机组结霜时间比例不高,特别是格尔木与拉萨,其结霜时间占采暖季总时间的比例非常小,分别为 1.63%、1.72%。

(2) 机组蒸发器面积增大后,对各地区的结霜时间有一定的影响,但普遍影响效果不大。其中,对于青海格尔木与西藏拉萨,改变蒸发器面积对结霜时间没有影响;影响最大的是四川、青海地区,当蒸发器面积为  $1.5 S_0$  时,结霜时间相对减少比例为 0.51%~3.64%;当蒸发器面积为  $2 S_0$  时,结霜时间相对减少比例为 2.89%~13.38%,主要是因为采用  $2 S_0$  时,机组的结霜边界条件由室外空气温度为  $5.8^\circ\text{C}$  降低到  $2.6^\circ\text{C}$ ,同时这些地区的冬季室外空气温度相对较高,室外逐时气象参数落在 A+B 阴影区域内的时间较长,因此其结霜时间减少相对较多。

## 3 结论

本文研究了适用于高寒地区的热泵机组理论结霜区域,并通过增大蒸发器面积来分析其减少结霜的效果。针对不同地区采暖季的结霜状况进行了评价分析,得到以下结论:

(1) 室外蒸发器面积增大为  $1.5 S_0$ 、 $2 S_0$  时,结霜区域室外空气干球温度边界值由  $5.8^\circ\text{C}$  依次降低至  $4.4^\circ\text{C}$ 、 $2.6^\circ\text{C}$ ,空气源热泵机组的蒸发器表面温度平均提高了约  $1.2^\circ\text{C}$ 、 $2.4^\circ\text{C}$ 。

(2) 对于格尔木与拉萨地区,机组结霜时间

占采暖季总时间的比例非常小,分别为 1.63%、1.72%,同时,蒸发器面积改变对该地区的结霜时间没有影响。其他地区的结霜时间占采暖季总时间的比例为 12.61%~47.45%。

(3) 当室外蒸发器面积为  $1.5 S_0$  时,在采暖季总时间内,机组的结霜时间相对减少比例为 0.51%~3.64%;当室外蒸发器面积为  $2 S_0$  时,在采暖季总时间内,结霜时间相对减少比例为 2.89%~13.38%。表明改变蒸发器面积对结霜有一定的效果,同时,不同地区的效果差异较大。

## 参考文献:

- [1] 赵娟,卢军,廖兴中,等.高原寒冷地区太阳辐射对室内热环境影响[J].煤气与热力,2014,34(9):17-21.
- [2] GB 5017—93,建筑气候区划标准[J].北京:中国计划出版社,1996.
- [3] 李林欣.拉萨地区空气源热泵供暖应用研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [4] 王伟,刘景东,孙育英,等.空气源热泵在北京地区全工况运行的关键问题及应对策略[J].暖通空调,2017,47(1):20-27.
- [5] L Kondepudi S N, O'neal D. Performance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions[J]. Int of refrigeration, 1993,16(3):175-184.
- [6] 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(12):9-12.
- [7] ZHU J H, SUN Y 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, 2015,54:45-54.
- [8] 丁国良,张春路.制冷空调装置智能仿真[M].北京:科学出版社,2013.
- [9] 井上宇市.空气调节手册[M].范存养(译).北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [10] 柴永金.增大室外换热器面积对空气源热泵的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [11] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.