

文章编号:0253-4339(2021)06-0045-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.06.045

# 空气源热泵自然冷源过冷制热性能实验研究

牛建会 步秋军

(河北建筑工程学院能源工程系 张家口 075000)

**摘要** 冬季我国北方室外环境蕴含大量天然冷源,热力学分析表明热泵工质过冷释放的热量可以在蒸发器的等温吸热过程中获得补偿。为了研究大气自然冷源对热泵制热性能的影响,增设室外过冷器,搭建利用自然冷源过冷的空气源热泵实验装置。实验结果表明:当室外环境温度大于 0℃,冷凝温度小于 45℃的条件下,自然冷源过冷对热泵制热量与制热 COP 影响均较小,系统制热量维持在 6.22~6.70 kW,制热 COP 维持在 3.03,压缩机排气温度维持在 103℃以下;当室外环境温度小于 -10℃,冷凝温度大于 50℃时,随过冷度的增加,压缩机功率增加、排气温度显著增高,系统制热量呈先缓慢增加后减小趋势,制热 COP 降至 2.3。基于上述研究提出一种空气源热泵过冷融霜新型除霜方式,融霜同时不停止制热。

**关键词** 空气源热泵;过冷;制热性能;融霜

**中图分类号**:TB61<sup>+</sup>2;TB657.5

**文献标识码**:A

## Experimental Study on Heating Performance of Air-source Heat Pump with Natural Cold Source Subcooling

Niu Jianhui Bu Qiujun

(Department of Energy Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, 075000, China)

**Abstract** There are many natural cold sources in the northern China in winter, and thermodynamic analysis shows that the heat released by the working medium subcooling can be compensated in the isothermal heat absorption process of the evaporator. To determine the influence of a natural cold source on the heating performance of a heat pump, an outdoor sub-cooler was added, and an air-source heat pump experimental device using a natural cold source was built. The influence of subcooling on the heating performance of the air-source heat pump was experimentally investigated. The experimental results show that subcooling has minimal influence on the heating capacity and heating coefficient of performance (COP) of the heat pump when the outdoor temperature is above 0℃ and the condensing temperature is less than 45℃. The heating capacity of the system is maintained between 6.22 kW and 6.70 kW, the heating COP is maintained at approximately 3.03, and the discharge temperature of the compressor does not exceed 103℃. However, when the outdoor and condensing temperatures are -10℃ and 50℃, respectively, as the subcooling increases, the compressor power and its discharge temperature increase significantly, the heating capacity of the system increases slightly at first and then decreases, and the heating COP decreases to 2.3. The results show the feasibility of the proposed air-source heat pump system, which uses subcooling for defrosting and can achieve defrosting without stopping heating.

**Keywords** air-source heat pump; sub-cooling; heating performance; defrosting

空气源热泵能够以较低的能量消耗将低温位热能输送至高温位,可大量利用广泛存在的自然能源,很好地满足建筑冬季采暖的要求<sup>[1]</sup>。电动热泵系统是建筑物供暖、供热水的高效清洁技术装备,特别是气候寒冷地区的中心城市,使用电动热泵带来的节能减排效果尤其显著。同时它还具有占用空间小、节能、环保、方便等优势,并能实现一机两用<sup>[2-3]</sup>。在我国北方“煤改电”工程中,空气源热泵是主流产品。

空气源热泵在寒冷高湿地区应用时,随着室外环境温度降低,当蒸发温度降至使换热器外壁面温度低

于 0℃且低于空气露点温度时,换热器表面将会结霜。结霜不仅增大空气流动阻力,同时还降低热泵制热能力,严重时还会使机组停机<sup>[4-6]</sup>。除霜时,需要消耗大量热量,影响供热效果及机组的稳定运行<sup>[7]</sup>。目前针对空气源热泵常规除霜方法有逆循环除霜<sup>[8-9]</sup>、热气除霜<sup>[10]</sup>、电热除霜<sup>[11]</sup>等,在使用上述方法除霜时,一方面可能增加额外电耗、另一方面可能使系统管路复杂化,甚至还会引起人体不舒适,因此针对空气源热泵寻求新型除霜方式尤为重要。

北方冬季的外界环境中蕴含丰富的天然冷源,从

热力学角度分析,采用自然冷源对热泵供液过冷是提高制热性能的有效方法。过冷技术多应用于中低温领域的蒸气压缩制冷系统中<sup>[12]</sup>。如:环境冷却过冷、吸气管道过冷以及使用外部机械过冷<sup>[13-16]</sup>。黄成达等<sup>[17]</sup>实验研究了主路过冷和辅助回路过冷两种利用自然冷源过冷的循环,结果表明,过冷能有效降低压缩机排气温度的。代宝民等<sup>[18]</sup>采用辅助的蒸气压缩循环进行过冷,该方法可改善传统跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵系统冬季供暖性能,尤其在低环境温度工况下,性能提升显著。

为了充分利用自然冷源,本文对 R134a 为制冷剂的空气源热泵系统,增设室外过冷器,搭建利用自然冷源过冷的空气源热泵实验系统,从理论及实验两方面综合分析该系统制热性能,并据此提出一种空气源热泵过冷融霜的新型除霜方式。

### 1 热泵过冷制热循环原理

从冷凝器流出的高温液态制冷剂首先进入室外过冷器,与室外大气换热过冷,过冷后的液体进入另一台室外蒸发器进行蒸发吸热,称为过冷制热。空气源热泵过冷制热原理如图 1 所示,系统由压缩机、室内机组、节流阀、室外机组等 4 大部件组成。与普通机组不同,其室外机组为 2 台管翅式换热器并联(3、4),通过切换电磁阀可以实现将蒸发器 3 转换为过冷器,利用大气自然冷源过冷。即蒸发器 3 可以作为蒸发器正常蒸发吸热,也可以作为过冷器实现热泵系统过冷制热循环。

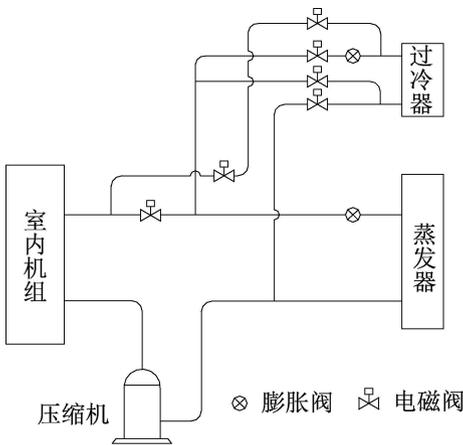


图 1 空气源热泵过冷制热循环原理

Fig.1 Principle of sub-cooling heating of air-source heat pump

### 2 过冷制热热力学分析

图 2 所示为空气源热泵过冷制热理论循环 lg p-h

图,图中 2-3 为制冷剂在冷凝器内放热过程,热泵冬季制热即为该段放热量,该段热量也是能够利用的热泵系统高品位热量,3-4 为液态制冷剂在过冷器内的过冷过程。

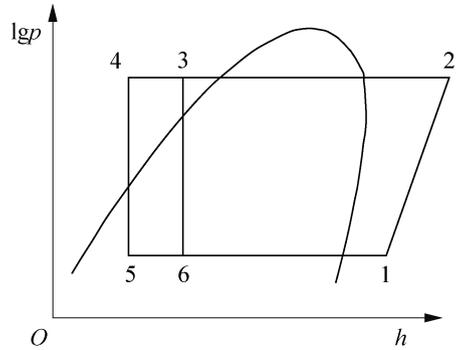


图 2 空气源热泵过冷制热循环 lg p-h 图

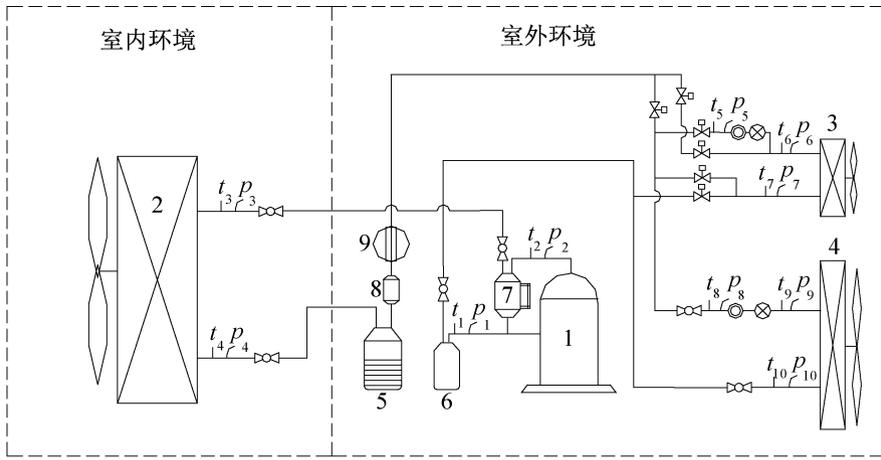
Fig.2 lg p-h diagram of sub-cooling heating cycle

由图 2 可知,制冷剂在过冷过程释放的热量可以在蒸发器的等温吸热过程中获得补偿并补回至系统中,即图 2 中的 5-6 过程被包含在 5-1 过程中。具有过冷的热泵循环与普通热泵循环相比并未增加压缩机功耗,同时由于回收过冷冷量,热泵循环的制热量得以提高。

### 3 实验装置

为了进一步研究自然冷源过冷对空气源热泵制热性能的影响,基于一台额定工况下 4.13 kW 的涡旋压缩机搭建了空气源热泵过冷制热实验装置。实验装置及测点布置如图 3 所示。

该装置由压缩机、室内机组、室外机组、电子膨胀阀、油分离器、储液器、气液分离器等组成。其中室外机组 I 的传热面积为室外机组 II 传热面积的三分之一。空气源热泵机组组装完毕后在人工环境控制室内进行测试,人工环境控制室包括室内环境模拟间和室外环境模拟间。室内侧温度控制范围为 10~50 °C,相对湿度为 30%~85%,室外侧温度为 -15~55 °C,相对湿度为 30%~95%,室内、外侧温度控制精度为 ±0.1 °C,湿度控制精度为 ±0.1 °C (WB)。压缩机功率通过高精度电量测试仪表获得。温度传感器采用 Pt100,精度为 ±0.15 °C;采用瑞士 Huba 压力变送器,精度为 ±0.5%;采用型号为 LZB-50 制冷剂流量计,量程为 0~150 kg/h,精度为 ±0.2%;采用型号为 DZFC-1 的电功率计,量程为 0~10 kW,精度为 ±0.5%;采用 HP34972A 安捷伦数据采集仪对温度、压力、流量、功率等进行数据采集。



1 压缩机; 2 室内机组; 3 室外机组 I; 4 室外机组 II; 5 储液器; 6 气液分离器; 7 油分离器; 8 干燥过滤器; 9 流量计。  
└ 压力变送器 └ 温度传感器 ⊗ 电子膨胀阀 ⊠ 电磁阀 ⊕ 球阀 ⊙ 视镜

图 3 空气源热泵过冷制热实验装置

Fig.3 Experimental device of sub-cooling heating of air-source heat pump

## 4 结果与分析

室内机风机转速由变频器控制,冷凝温度控制在 40~50 °C,室外温度控制在-15~0 °C,室外相对湿度设定为 30%,实现无霜制热运行。热泵工质采用 R134a。研究热泵在无霜工况下利用自然冷源过冷时,压缩机的排气温度、压缩机功率、系统制热量、制热 COP 等机组制热性能参数的变化和过冷过程过冷能量的变化。

系统制热量:

$$Q = q_m (h_3 - h_4) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为系统制热量, kW;  $q_m$  为制冷剂质量流量, kg/s;  $h_3, h_4$  为冷凝器进、出口制冷剂比焓值, kJ/kg。

系统制热 COP:

$$COP = Q/P_c \quad (2)$$

式中:  $P_c$  为压缩机功耗, kW。

过冷制热过程过冷量:

$$Q_{sub} = q_m (h_6 - h_7) \quad (3)$$

式中:  $Q_{sub}$  为过冷制热过程过冷量, kW;  $h_6, h_7$  为过冷器进、出口制冷剂比焓值, kJ/kg。

后文数据分析图中过冷度最小的位置处数据为过冷器停止工作系统无过冷时的系统性能参数。

### 4.1 室外温度 0 °C、冷凝温度 45 °C

图 4 所示为室外温度  $t_o$  为 0 °C、冷凝温度  $t_k$  为 45 °C 时,对比过冷器运行时系统有过冷与过冷器停止工作系统无过冷系统性能。由图 4 可知,压缩机功率和制热 COP 在有过冷和无过冷时差异较小,压缩机功率基本维持在 2.2 kW,且随过冷度的增加变化

也较小,制热 COP 基本维持在 3.03。过冷度为 35 °C 时,制热 COP 为 2.93,仅下降了 0.1。系统制热量在有过冷和无过冷时差异较小,当过冷度进一步增大时会稍有下降。在无过冷时,系统制热量为 6.7 kW,过冷度为 16 °C 时,系统制热量为 6.57 kW,下降 1.9%,而过冷度为 35 °C 时,机组制热量为 6.22 kW,下降 7.2%。

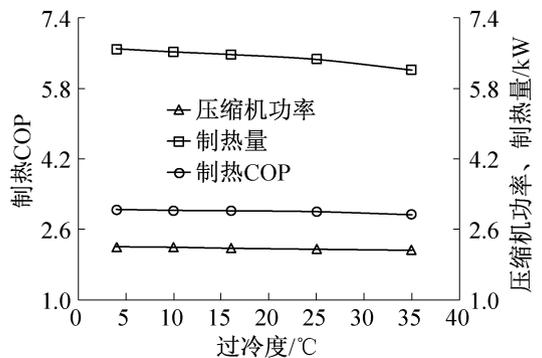


图 4  $t_o = 0$  °C、 $t_k = 45$  °C 时机组制热性能

Fig.4 Heating performance when  $t_o = 0$  °C and  $t_k = 45$  °C

### 4.2 室外温度-8 °C、冷凝温度 50 °C

图 5 所示为当室外温度  $t_o$  为-8 °C、冷凝温度  $t_k$  为 50 °C 时,对比过冷器运行时系统有过冷与过冷器停止工作系统无过冷系统性能。由图 5 可知,压缩机功率在有过冷和无过冷时差异较小,维持在 2.4 kW;系统制热量和制热 COP 在过冷度较小时,基本不变,过冷度较大时两者呈下降趋势,系统制热量由无过冷时的 6.67 kW 降至过冷度为 38.7 °C 时的 5.73 kW,下降约 16%,制热 COP 由 2.73 降至 2.41,下降 11.7%。

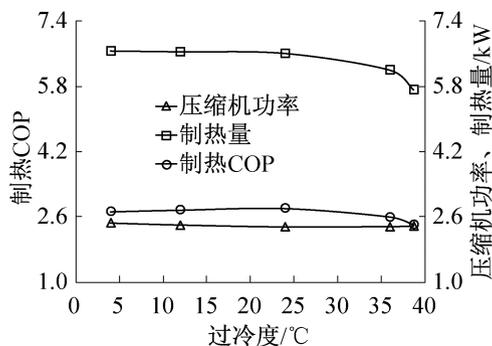


图 5  $t_o = -8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$  时机组制热性能

Fig.5 Heating performance when  $t_o = -8\text{ }^\circ\text{C}$  and  $t_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$

### 4.3 室外温度 -10 °C、冷凝温度 50 °C

图 6 所示为当室外温度  $t_o$  为 -10 °C、冷凝温度  $t_k$  为 50 °C 时,对比过冷器运行时系统有过冷与过冷器停止工作系统无过冷系统性能。由图 6 可知,随着过冷度的增加,压缩机功率稍有增加,无过冷时压缩机功率为 2.0 kW,过冷度为 21 °C 时,压缩机功率为 2.2 kW,而过冷度为 38 °C 时,压缩机功率为 2.4 kW,比无过冷时增加了 20%。压缩机功率增加的同时,系统制热量呈现先少量增加再下降的趋势,由于压缩机功率逐步升高,最终导致制热 COP 随着过冷度增加而下降。制热量在无过冷时为 5.82 kW,而过冷度为 21 °C 时,机组制热量为 6.2 kW,增加了 0.38 kW,当过冷度增至 37.6 °C 时,机组制热量又降至 5.5 kW,而此时机组制热 COP 为 2.3。

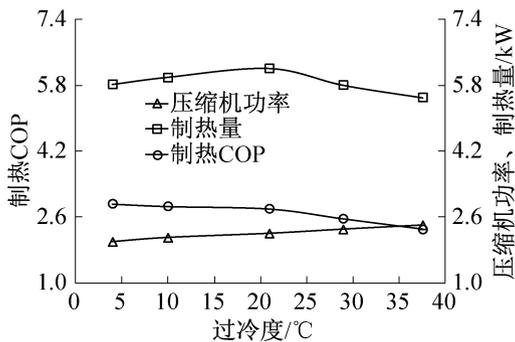


图 6  $t_o = -10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$  时机组制热性能

Fig.6 Heating performance when  $t_o = -10\text{ }^\circ\text{C}$  and  $t_k = 50\text{ }^\circ\text{C}$

### 4.4 不同工况下排气温度

图 7 所示为上述 3 种运行工况下,压缩机排气温度的变化。由图 7 可知,无论在何种工况下,压缩机的排气温度均随过冷度的增加逐渐增加,且冷凝温度越高,排气温度也越高,其增加的速率增大。当室外温度  $t_o$  为 0 °C、冷凝温度  $t_k$  为 45 °C 时,压缩机排气温度随过冷度增加缓慢增加,在过冷度达到最大值

35 °C 时,其排气温度也达到最高,不超过 103 °C,始终运行在压缩机允许温度范围之内。而当室外温度  $t_o$  为 -10 °C,冷凝温度  $t_k$  为 50 °C 时,随着过冷度增加,压缩机排气温度增加较快,当过冷度为 21 °C 时,其排气温度已达 110 °C,达到了压缩机允许排气温度上限。

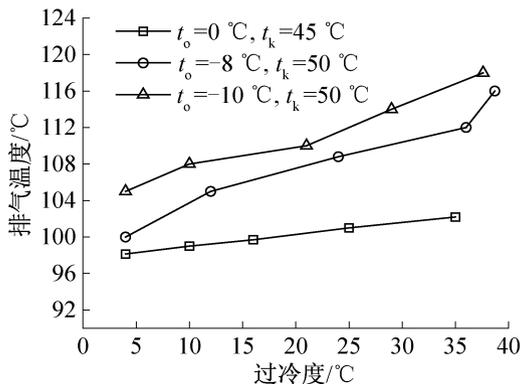


图 7 压缩机排气温度变化

Fig.7 Variation of compressor discharge temperature

### 4.5 不同工况下过冷量

图 8 所示为不同工况下过冷器运行状态下的过冷放热量(简称过冷量)和过冷量能够融化的霜层质量。由图 8 可知,随着室外环境温度  $t_o$  的降低,过冷增强,过冷量增加,融化的霜层质量增加。当  $t_o$  为 0 °C、 $t_k$  为 45 °C 时,过冷量为 0.65 kW;当  $t_o$  为 -8 °C、 $t_k$  为 50 °C 时,过冷量为 0.816 kW,增加了 25.5%;而当  $t_o$  为 -10 °C、 $t_k$  为 50 °C 时,过冷量为 0.88 kW,比  $t_o$  为 0 °C、 $t_k$  为 45 °C 时增加了 0.23 kW。

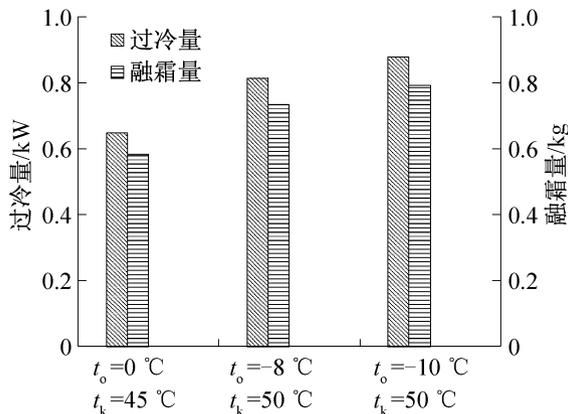


图 8 不同工况下过冷参数

Fig.8 Sub-cooling parameters under different conditions

霜融化成水需要的潜热为 333.4 kJ/kg,以融霜时间为 5 min 为例,当  $t_o$  为 0 °C、 $t_k$  为 45 °C 时,过冷量可以融化掉 0.585 kg 霜层;当  $t_o$  为 -10 °C、 $t_k$  为 50 °C 时,过冷量为 0.88 kW,可融化掉 0.792 kg 霜层。

利用大气自然冷源过冷,空气源热泵机组制热性能未被显著恶化,过冷过程放热量若用于冬季蒸发器融霜上,可以实现融霜过程不停止制热。基于此,针对空气源热泵提出一种过冷融霜新型除霜方式。采用多台并联的室外蒸发器,通过阀门切换,实现利用大气自然冷源过冷的同时,轮换除去蒸发器翅片上的霜层,同时不停止制热。该系统适用于北方冬季气温不太低,而结霜较为严重的地区。

## 5 结论

为了研究冬季利用自然冷源过冷对空气源热泵制热性能的影响,搭建具有利用自然冷源过冷的空气源热泵系统并进行制热运行实验,研究不同工况下,过冷对系统制热性能的影响,并在实验分析的基础上提出新型空气源热泵融霜方式。得到结论如下:

1) 当室外环境温度大于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冷凝温度小于  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下,自然冷源过冷对热泵制热量与制热 COP 影响均较小,系统制热量维持在  $6.22\sim 6.70\text{ kW}$ ,制热 COP 维持在  $3.03$ ,压缩机排气温度维持在  $103\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。

2) 当室外环境温度小于  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冷凝温度大于  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,随过冷度的增加,压缩机功率增加、排气温度显著增高,系统制热量先稍增加后减小,制热 COP 降至  $2.3$ 。

3) 过冷度越大,过冷过程所能融化的霜层质量越多,冬季利用过冷放热可以除去蒸发器翅片上的霜层。提出空气源热泵新型过冷融霜的除霜方式,融霜的同时不停止系统制热。

本文受河北省教育厅青年自然科学基金项目(QN2020045),2021年河北省级研究生示范课“冷热源工程”建设项目(KCJSX2021084)和2020年度校级研究生教育教学研究项目(2020YJSJG05)资助。(The project was supported by the Natural Science Fund Project of Youth of Hebei Education Department (No. QN2020045), Hebei Provincial Postgraduate Demonstration Courses Construction Project(No. KCJSX2021084) and Graduate Education and Teaching Research Project in Year of 2020(No. 2020YJSJG05).)

### 参考文献

[1] 饶荣水,谷波,周泽,等.寒冷地区用空气源热泵技术进展[J].建筑热能通风空调,2005,24(4):24-28,81. (RAO Rongshui, GU Bo, ZHOU Ze, et al. Development of air-source heat pump for cold regions[J]. Building Energy & Environment, 2005, 24(4): 24-28, 81.)

[2] 范存养,龙惟定.空气热源热泵的应用与展望[J].暖通

空调,1994,24(6):20-24,12. (FAN Cunyang, LONG Weiding. Application and prospects of heat pumps with air as heat sources [J]. Journal of HV&AC, 1994, 24(6): 20-24, 12.)

[3] 龙惟定,王长庆,丁文婷.试论中国的能源结构与空调冷热源的选择取向[J].暖通空调,2000,30(5):27-32. (LONG Weiding, WANG Changqing, DING Wenting. China's energy structure and trends in heating/cooling source selection[J]. Journal of HV&AC, 2000, 30(5): 27-32.)

[4] BYUN J S, LEE J, JEON C D. Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas bypass method[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 328-334.

[5] KONDEPUDI S N, O'NEAL D L. Effects of different fin configurations on the performance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions[J]. ASHRAE Transactions, 1990, 35(35): 439-444.

[6] KONDEPUDI S N, O'NEAL D L. Frosting performance of tube fin heat exchangers with wavy and corrugated fins[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1991, 4(5): 613-618.

[7] 刘康,吕静.空气源热泵除霜研究[J].制冷与空调(四川),2011,25(4):421-424. (LIU Kang, LYU Jing. Study of air-source heat pump defrosting[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(4): 421-424.)

[8] BYUN J S, JEON C D, JUNG J H, et al. The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(2): 191-198.

[9] COX-SMITH I R, CARRINGTON C G. Assessment of a domestic heat pump 2: component and frosting analysis [J]. International Journal of Energy Research, 1990, 14(1): 27-37.

[10] 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, 2011, 88(12): 4544-4555.

[11] KIM J, CHOI H J, KIM K C. A combined dual hot-gas bypass defrosting method with accumulator heater for an air-to-air heat pump in cold region [J]. Applied Energy, 2015, 147: 344-352.

[12] 申江,李园园.低环温空气源热泵系统的试验研究[J].工程热物理学报,2008,29(6):943-946. (SHEN Jiang, LI Yuanyuan. Experimental study on air-source heat pump in low temperature ambient[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 943-946.)

[13] 杜晓通.建筑物能效优化研究[D].济南:山东大学,2012. (DU Xiaotong. Research on building energy efficiency optimization[D]. Jinan: Shandong University, 2012.)

[14] QURESHI B A, ZUBAIR S M. Mechanical sub-cooling va-

- por compression systems: current status and future directions[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(8): 2097-2110.
- [15] 孟庆海, 秦海杰, 单永明, 等. 制冷系统中过冷技术的应用与分析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2009, 9(4): 87-90. (MENG Qinghai, QIN Haijie, SHAN Yongming, et al. Application and analysis of subcooling technology in refrigeration system[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2009, 9(4): 87-90.)
- [16] 秦海杰, 杜希刚, 单永明. 新型制冷循环在中央机组上的应用[J]. *流体机械*, 2004, 32(4): 54-56. (QIN Haijie, DU Xigang, SHAN Yongming. Application of new refrigerating cycle on rack unit [J]. *Fluid Machinery*, 2004, 32(4): 54-56.)
- [17] 黄成达, 许树学, 马国远, 等. 两种自然冷源过冷对热泵制热性能影响的对比[J]. *制冷学报*, 2019, 40(2): 68-73. (HUANG Chengda, XU Shuxue, MA Guoyuan, et al. Comparison of the heating performance of heat pumps based on two types of natural sub-cooling[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(2): 68-73.)
- [18] 代宝民, 刷成成, 梁梦桃, 等. 机械过冷跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵供暖系统性能分析[J]. *制冷学报*, 2019, 40(4): 29-36. (DAI Baomin, JU Chengcheng, LIANG Mengtao, et al. Performance analysis of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump with mechanical subcooling for space heating[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(4): 29-36.)

#### 通信作者简介

牛建会, 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 河北建筑工程学院能源工程系, 15324033180, E-mail: zjknjh@163.com。研究方向: 新型制冷热泵系统及其节能环保技术。

#### About the corresponding author

Niu Jianhui, female, Ph. D., associate professor, master supervisor, Department of Energy Engineering, Hebei University of Architecture, +86 15324033180, E-mail: zjknjh@163.com. Research fields: new type of refrigeration and heat pump technology and energy saving and environmental protection technology.