

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-607-06

空气源热泵除霜研究现状及展望

孙茹男 罗会龙

(昆明理工大学建筑工程学院 昆明 650000)

【摘要】 空气源热泵具有高效节能、冷暖两用等特点, 被广泛应用于供热和空调等领域, 但在低温工况下的结霜问题制约着空气源热泵发展。通过总结国内外学者对空气源热泵除霜所做的研究, 分析了目前的除霜技术存在的问题, 并根据目前的研究现状, 展望了未来空气源热泵除霜研究的发展动向。

【关键词】 空气源热泵; 除霜; 问题; 展望

中图分类号 TB657.2 文献标识码 A

Research Status and Prospect of Defrosting of Air Source Heat Pump

Sun Runan Luo Huilong

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650000)

【Abstract】 Air source heat pump has the characteristics of high efficiency, energy saving, dual use of cooling and heating, etc, and it is widely used in the fields of heating and air conditioning. This paper summarizes the research of domestic and foreign scholars on air source heat pump defrosting, analyzes the existing problems of defrosting technology, and according to the research status currently, looks forward to the development trend of air source heat pump defrosting research in the future.

【Keywords】 Air source heat pump; Defrosting; Problem; Prospect

基金项目: 国家自然科学基金项目(51766005); 云南省烟草专卖局科技项目(2019530000241019)

作者简介: 孙茹男(1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事暖通空调研究, E-mail: 2109687272@qq.com

通讯作者: 罗会龙(1972-), 男, 博士, 教授, E-mail: huilongkm@126.com

收稿日期: 2020-01-07

0 引言

空气源热泵因其高效节能、控制方便、冷暖两用等优点被广泛应用。但空气源热泵在低温地区运行时, 当室外换热器表面温度低于零度, 且低于室外空气露点温度时, 室外换热器表面就会结霜^[1]。随着霜层厚度的增加, 室外换热器表面的附加热阻逐渐增大, 削弱了制冷剂与室外空气的流动传热; 同时, 结霜使得换热翅片间的空气流动阻力增大, 从而大大降低了热泵制热功率和制热系数, 且风机能耗增加, 导致空气源热泵的运行状况进一步恶化, 严重时甚至会引发事故。因此采取适当的方法对室外换热器进行周期性除霜, 对保障空气源热泵在低温地

区仍然具有良好的运行效率及空气源热泵技术的推广具有重要意义。

1 国内外研究现状

针对空气源热泵在低温地区运行时出现的结霜问题, 国内外学者们在除霜方面做了大量研究。主要包括以下几个方面:

1.1 加热除霜

加热除霜主要包括电加热除霜和太阳能辅助除霜两种, 利用电能或太阳能作为除霜能量, 对室外换热器入口空气或制冷剂工质进行加热, 以提高蒸发温度和压缩机入口制冷剂温度, 达到除霜或延

缓结霜的目的。Kwak 和 Bai 等^[2]将电加热器设置在室外换热器空气入口处,当室外环境达到结霜条件时,开启电加热器来提高室外换热器入口空气温度,并通过实验得出结论:与传统热泵相比,供热量提高了 38.0%,COP 提高了 57.0%,且在整个除霜期间可以持续稳定供热。Jaehong Kim 等^[3]通过研究发现,在储液器中设置电加热器来提高压缩机入口侧的制冷剂温度,增加热泵循环中的制冷剂流量,从而提高蒸发温度、冷凝温度和换热器温度。与逆向循环除霜相比,在 -5°C 的低温条件下,该方法的除霜效率提高 15%,除霜时间也缩短 15%。Tang 等^[4]分别在毛细管和室外换热器,室外换热器和压缩机之间设置电加热器,以提高室外换热器入口制冷剂温度,从而提高蒸发温度,改善空气源热泵系统的整体效率。

相对于电加热除霜的研究,近年来太阳能辅助除霜发展较快。陈雁等^[5]提出在室外换热器入口处设置平板式集热器,利用太阳能预热入口空气可以有效提高蒸发温度,从而提高空气源热泵的性能系数 COP。董旭等^[6]对室外换热器表面进行太阳能吸收涂层处理,太阳能吸收涂层可以提高蒸发温度,有效抑制霜层的形成,冬季运行时系统的平均 COP 提高了 6.56%。冉思源等^[7]提出了一种新型间联式空气源热泵,通过太阳能制取热水为风冷换热器除霜,该方法在高效除霜的同时能够降低除霜能耗,满足热泵持续供热的需求。

综上所述,采用电加热除霜具有系统简单、除霜彻底、易于控制等优点,比较适用于小型热泵系统。采用太阳能辅助除霜其除霜能源清洁、可再生,易于实现热能能级的合理配置^[5],适用于太阳能资源丰富的地区。

1.2 逆循环除霜

逆循环除霜是利用四通换向阀换向将热泵从制热模式切换为制冷模式,此时室内换热器与室外换热器的作用互换,通过制冷剂放热来融化室外换热器上的霜层,除霜结束后恢复制热模式。采用逆循环除霜时只需切换四通换向阀,不用增加额外的装置和辅助热源,所以该方法操作简单,成本较低,适用性好,被广泛用于大、中、小型热泵除霜中,是目前使用最广泛的除霜方法之一。

目前,国内外研究者在逆循环除霜能耗和改善系统性能方面做出了大量研究,通过分析除霜能耗,

改善逆循环除霜的系统性能来提高除霜效率,缩短除霜时间,减少对热泵机组和室内环境的影响。Jiankai 等^[8]研究了逆循环除霜过程中的能量来源及能耗,实验结果表明:逆循环除霜的能量来源主要是室内空气的热能、室内换热器盘管余热和压缩机做功这三个方面,室内空气热能占除霜总能量的 71.8%,但打开室内风机,低温制冷剂从室内空气中吸收热量会导致室内环境恶化,降低室内热舒适度。在改善系统性能方面:黄东等^[9]对风机提前启动对逆循环除霜的影响进行了研究,通过实验得出除霜时采取风机提前启动的方式可以避免因高压保护导致的停机问题。Qu 等^[10]提出在节流机构方面做出改进,通过在除霜过程中采用制冷剂过热(DS)控制器调节电子膨胀阀来替代热力膨胀阀,可以有效提高除霜效率,减少热量损失。Wang 等^[11]提出制冷剂补偿的方法,在室外换热器与四通换向阀之间增设制冷剂补偿器,通过增加制冷剂循环流量来增大制冷剂放热量,提高压缩机吸气和排气压力,从而改善热泵除霜性能,缩短除霜时间。此外,Song 等^[12]提出通过调节室外换热器中的制冷剂分布来改善空气源热泵机组的逆循环除霜性能,通过实验得出结论:当室外换热器中的制冷剂分布均匀时,系统除霜效率提高了 7.4%。

1.3 热气旁通除霜

热气旁通除霜是在压缩机出口与室外换热器入口之间设置旁通管路,直接将来自压缩机的高温高压排气引入室外换热器中,利用高温气体自身的热量使霜层融化。由于热气旁通除霜时,四通换向阀无需换向,所以系统压力变化平稳,不会产生气流噪音,对机组冲击较小。同时,热气旁通法在整个除霜过程中所需的能量全部来自于压缩机壳体蓄热和压缩机做功,除霜时无需向室内吸热还能给室内提供少量热,室内温度波动较小,舒适性良好,同样适用于大、中、小型热泵除霜中,是目前广泛使用的除霜方法之一。

自 20 世纪 70 年代中期,人们提出热气旁通除霜法以来,国内外学者对此作出了大量研究。Buyn 等^[13]研究表明:采用热气旁通除霜时,旁路热气流量为制冷剂总流量的 20%时系统性能最好,与其他除霜方式相比,平均 COP 提高了 85%,供热能力提高了 5.7%,而且采用热气旁通法还能有效延缓结霜。相较于对热气旁通除霜性能的研究,近年来

多集中于系统性能优化方面的研究。梁彩华等^[14]对传统的热气旁通除霜进行了改进,提出了显热除霜法,该方法直接将压缩机的高温高压排气引至电子膨胀阀之前,利用压缩机排气的显热量除霜。该方法能够缩短除霜时间,提高供热效率和系统可靠性,但该方法对系统控制的要求较高。Choi等^[15]提出了一种双热气旁通除霜法,通过在传统热气旁通的基础上增加一条连接压缩机排气口和室外换热器出口的旁通管路来提高压缩机排气压力,在保持持续高效供热的同时缩短除霜时间。Jang等^[16]提出了一种新的高温低压热气旁通除霜方法,系统供热能力提高17%,与逆循环除霜和电加热除霜相比,节能效率分别提高了8%和27%。虽然该方法在较低的技术成本下就能实现连续供热和节能,但该方法在实际应用中会受到一定限制。

1.4 蓄能除霜

蓄能除霜法是在逆循环除霜的基础上提出来的,将蓄热装置与空气源热泵结合起来,在系统制热运行时部分热量储存到蓄热装置中,除霜时再释放出热量。蓄能除霜法从根本上解决了传统热力除霜法能量来源不足的问题,在一定程度上提高了空气源热泵运行的可靠性和稳定性,是目前研究较多的一种除霜方法。

目前,对蓄能除霜的研究,主要停留在实验和模拟研究上。韩志涛等^[17]将相变蓄能装置引入热泵系统中,提出空气源热泵蓄能热气除霜新系统,该系统有效解决了除霜能量来源不足的问题,同时与传统热气除霜相比,除霜时间和室内恢复供热时间均有效减少。曲明璐等^[18]通过实验对不同蓄能模式进行比较得到,并联蓄能模式可以在部分负荷工况下使用,串联蓄能模式可以在全负荷工况下使用。张杰等^[19]通过实验发现,与换向除霜和热气旁通除霜相比蓄能除霜有效解决了室外换热器残留融水问题,除霜时间大大缩短,能量消耗降低,节能效果达到31.3%。郭浩增等^[20]通过模拟研究,提出一种利用蓄热装置储存谷电期和太阳能等多种辅助热源除霜的新型空气源热泵除霜方法,以提高除霜速度和盘管壁温回升速度。Liu等^[21]提出了一种用蓄热器包裹压缩机与热气旁通相结合的方法,冬季运行时,通过储存压缩机工作时的热量进行除霜,在夏季运行时,利用蓄热量来制热水。曲明璐等^[22]将复叠式空气源热泵与蓄能除霜结合起来,以解决

复叠式空气源热泵在寒冷地区运行时出现的除霜问题,并通过实验证明了复叠式空气源热泵采用蓄能除霜,除霜时间减少71.4%~77.6%,除霜能耗降低65.1%~85.2%。

1.5 增加外力场

除了上述除霜方法外,还可以通过增加外力场来除霜。增加外力场包括外加电场、磁场和超声波,其中,外加电场和磁场主要通过电场力或磁场力来影响霜晶的生长,霜晶在生长过程中受外力作用拉伸变得细长、易碎,同时在室外换热器表面的附着力降低,极易脱落;超声波除霜主要是通过施加适当频率的超声波与霜层产生共振效应,利用共振作用破坏霜层,达到除霜目的。

增加外力场除霜是一种新兴的除霜技术,但目前的研究主要集中在对霜层的影响上,且国外学者研究较多,国内关于这方面的研究相对较少。1950年,Schaefer首次发现了外电场对霜层生长有影响,在高压电场作用下霜层结构变得非常脆弱^[23]。Wang等^[24]研究了自然对流条件下直流电场对结霜过程的影响,在电场存在的情况下,形成的霜层结构薄弱,在重力作用下容易破碎脱落,同时还发现,极性对霜层的生长也有重要影响,在负极性条件下,霜层结构更薄,且霜层生长速度和破碎频率比正极性条件下高出约30%~50%。Tudor等^[25]研究了交流电场对冷表面结霜的影响,研究发现,在交流电场作用下霜度降低高达46%,交流电场对减少冷表面结霜比直流电场更有效。勾昱君等^[26]通过实验研究得出,外加磁场情况下,冷表面上的凝结液滴体积减小、分布更加均匀、被冻结时间延迟,磁场对霜晶的生长有明显的影 响。Wang等^[27]研究发现,在适当的超声波作用下,能够有效破坏霜层,使霜随着重力脱落,抑制霜层生长,但不能彻底去除基底表面冻结的冰层。Tan等^[28]采用了间歇式超声共振,研究发现超声波除霜的主要机理是共振效应,次要机理是超声剪切应力。此外,谭海辉等^[29]研究发现,与逆除霜法相比,超声波除霜能够降低除霜能耗,且除霜效率提高了7倍,但只能除掉室外换热器表面一定区域内的结霜。

1.6 主动抑霜

除了上述除霜方法以外,研究者们通过对结霜机理的研究发现,采取主动抑制室外换热器结霜的方法可以从根本上解决空气源热泵结霜问题,目前

的研究主要通过改变系统流程来抑制室外换热器表面结霜。寇宏侨等^[30]从提高冷凝器进水温度的角度出发,提出在冷凝器冷水进口处设置混水装置的方法。通过设置混水装置以提高冷凝器制冷剂出口温度和压力,从而提高室外换热器入口制冷剂的温度和压力,压缩机的吸气压力和排气压力也随之提高,达到抑制空气源热泵室外换热器表面结霜,降低除霜频率,保证热泵在低温工况下高效、稳定运行的目的。该方法系统结构简单、易于控制。此外,还可以通过降低入口空气湿度来抑制结霜,Wang等^[31]提出在室外换热器空气入口处设置一个带有活性炭涂层的吸附床,通过吸附床里的固体吸附剂来降低入口空气的含湿量,同时可以通过吸附床上的活性炭涂层吸收太阳能来提高入口空气的温度,从而抑制室外换热器表面结霜。但研究发现,该方法最初时吸附剂能够有效降低入口空气的含湿量,抑霜效果明显,但吸附剂的吸附能力随着时间增长逐渐减弱,抑霜作用也随之失效,因此该方法在实际中不能广泛推广^[32]。

2 存在的问题

综上所述,除霜技术的研究推动了空气源热泵在低温地区的运用,促进了空气源热泵的大力发展。纵观国内外学者的研究,采用加热除霜、逆循环除霜或是热气旁通除霜、蓄能除霜、增加外力场等除霜技术都是解决空气源热泵在低温工况下运行时结霜问题的有效途径,但通过对国内外空气源热泵除霜的研究现状分析可知这些除霜技术仍然存在一定的问题。

(1) 电加热除霜最大的缺点是能耗过大,只能用于小型热泵,不适用于大、中型热泵,限制了该技术的使用范围,并且在应用过程中是将高品位热能降级利用,出现热能能级匹配不合理的问题^[5]。

(2) 逆循环除霜的首要问题是除霜能量不足和除霜时间长,除霜能量只有压缩机做功和室内换热器表面余热,随着室内换热器表面温度降低,蒸发温度也随之下降,从而引发低压切断或湿压缩问题,对压缩机造成严重损害;其次,四通阀换向时噪音较大,会对系统造成一定的冲击,影响机组性能和使用寿命;而且除霜过程中会中断供热,造成室内温度波动较大,室内热舒适性下降。

(3) 热气旁通除霜存在吸气过热度低、除霜

时间较长的问题,由于除霜能量来源单一和除霜过程中能量损失较大,导致除霜时间长于逆循环除霜;同时除霜过程中吸气过热度较低导致压缩机排气和吸气温度较低,除霜时间过长会对压缩机安全运行造成危害。

(4) 蓄能除霜虽然解决了除霜能量来源不足的问题,但仍然存在除霜时供热中断的问题。另外,由于增加了蓄热装置,导致系统的复杂性和设备成本增加。而且,目前蓄能除霜技术仍处于实验研究阶段,实际产品很少,在真正应用时其运行的稳定性和可靠性尚不确定^[33]。

(5) 增加外力场除霜在目前的研究中有一定的除霜效果,但其除霜机理尚不明确,仍处于理论和实验研究阶段。同时外加电场具有一定危险性、耗能高,而超声波除霜只能去除一定区域内的结霜,并不能去除翅片上的基层冰。

3 展望

结霜问题严重制约着空气源热泵的大力发展,为提高空气源热泵在低温地区的适应性,国内外研究者在热泵除霜方面做了大量研究,本文通过从加热除霜、逆循环除霜、热气旁通除霜、蓄能除霜、增加外力场、主动抑霜方面对国内外研究进行了总结,分析了目前的除霜技术存在的问题,并对未来空气源热泵除霜研究的发展动向作出展望:

(1) 目前,对传统除霜技术有一定的改善,但仍存在一些不足之处,如何进一步改善传统除霜技术,提高除霜效率和除霜可靠性还需要进一步研究加以解决。

(2) 蓄能技术在除霜方面的应用取得了一定成果,但目前存在的蓄热材料、蓄热装置结构等问题导致的蓄热装置占地面积大、蓄热量少、工程初投资增加,在实际中不能广泛应用。因此,如何取得蓄热量大、占地面积小,且经济性较好的蓄热装置还需要深入研究。

(3) 主动抑霜技术能够从根本上解决空气源热泵结霜问题,它将成为未来研究的一个重要方向。

(4) 外加电场、磁场或超声波是一种新兴的除霜技术,从目前的研究来看,它们对室外换热器除霜有一定的作用,发展前景良好。但其除霜机理、如何在室外换热器上施加外力等问题有待于进一步研究,为解决空气源热泵结霜问题开辟新渠道。

参考文献:

- [1] 李延贺,臧润清等.空气源热泵除霜方法的研究与发展[J].低温与超导,2018,46(9):82-86.
- [2] Kyungmin Kwak, Cheolho Bai. A study on the performance enhancement of heat pump using electric heater under the frosting condition: Heat pump under frosting condition[J]. Applied Thermal Engineering, 2010,30(6/7):539-543.
- [3] Jaehong Kim, Hwan-Jong Choi, Kyung Chun Kim. 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.
- [4] Jinchun Tang, Guangcai Gong, Huan Su, 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, 2016,169:696-708.
- [5] 陈雁.太阳能辅助空气源热泵供暖实验和模拟研究[D].天津:天津大学,2006.
- [6] 董旭.太阳能/空气能蒸发集热器一体化热泵冷剂直热供暖装置性能及效益的研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [7] 思源,李先庭,徐伟.新型间联式太阳能空气源热泵用于供热的效果分析[J].暖通空调,2016,46(12):8-14.
- [8] Jiankai Dong, Shiming Deng, Yiqiang Jiang, et al. An experimental study on defrosting heat supplies and energy consumptions during a reverse cycle defrost operation for an air source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,37:380-387.
- [9] 黄东,袁秀玲,张波,等.风机提前启动对风冷热泵冷水机组除霜的影响[J].西安交通大学学报,2004,38(5):448-451.
- [10] Minglu Qu, Liang Xia, Shiming Deng, et al. An experimental investigation on reverse-cycle defrosting performance for an air source heat pump using an electronic expansion valve[J]. Applied Energy, 2012,97:327-333.
- [11] Wang Zhiyi, Wang Xinmin, Dong Zhiming. Defrost improvement by heat pump refrigerant charge compensating[J]. Applied Energy, 2008,85:1050-1059.
- [12] Song Mengjie, Liu Shengchun, Deng Shiming, et al. Experimental investigation on reverse cycle defrosting performance improvement for an ASHP unit by evenly adjusting the refrigerant distribution in its outdoor coil[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,114:611-620.
- [13] Ju-Suk Byun, Jinho Lee, Chang-Duk Jeon. Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas bypass method[J]. International Journal of Refrigeration, 2008,31(2):328-334.
- [14] 梁彩华,张小松.显热除霜方式的理论分析与试验研究[J].工程热物理学报,2006,27(4):559-561.
- [15] Hwan-Jong Choi, Byung-Soon Kim, Donghoon Kang, et al. Defrosting method adopting dual hot gas bypass for an air-to-air heat pump[J]. Applied Energy, 2011,88(12):4544-4555.
- [16] Ji Young Jang, Heung Hee Bae, Seung Jun Lee, et al. Continuous heating of an air-source heat pump during defrosting and improvement of energy efficiency[J]. Applied Energy, 2013,110:9-16.
- [17] 韩志涛,姚杨,马最良,等.空气源热泵蓄能热气除霜新系统与实验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(6):901-903.
- [18] 曲明璐,李封澍,余倩,等.空气源热泵不同蓄能除霜模式对室内热舒适度的影响[J].流体机械,2016,44(1):60-65.
- [19] 张杰,兰菁,杜瑞环,等.几种空气源热泵除霜方式的性能比较[J].制冷学报,2012,33(2):47-49.
- [20] 郭浩增,陈海峰.基于多热源辅助的新型空气源热泵除霜方法研究[J].暖通空调,2018,48(2):81-87.
- [21] Zhongbao Liu, Pengyan Fan, Qinghua Wang. Air source heat pump with water heater based on a bypass-cycle defrosting system using compressor casing thermal storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,128:1420-1429.
- [22] 曲明璐,李天瑞,樊亚男,等.复叠式空气源热泵蓄能除霜与常规除霜特性实验研究[J].制冷学报,2017,38(1):34-39.
- [23] Mohammed Amer, Chi-Chuan Wang. Review of defrosting methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,73:53-74.

- [24] Chi-Chuan Wang, Ren-Tsung Huang, Wen-Jenn Sheu, et al. Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004,47(14-16):3491-3505.
- [25] V Tudor a, M Ohadi. The effect of stationary and sweeping frequency AC electric fields on frost crystal removal on a cold plate[J]. International Journal of Refrigeration, 2006,29(4):669-677.
- [26] 勾昱君, 刘中良, 刘耀民, 等. 磁场对冷表面上结霜过程影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009,30(3):465-467.
- [27] Dingyuan Wang, Tangfei Tao, Guanghua Xu, et al. Experimental study on frosting suppression for a finned-tube evaporator using ultrasonic vibration[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012,36:1-11.
- [28] Haihui Tan, Tangfei Tao, Guanghua Xu, et al. Experimental study on defrosting mechanism of intermittent ultrasonic resonance for a finned-tube evaporator[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014,52:308-317.
- [29] 谭海辉, 陶唐飞, 徐光华, 等. 翅片管式蒸发器超声波除霜理论与技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2015,49(9):105-113.
- [30] 寇宏桥. CO₂热泵低温运行的热力性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [31] S W Wang, Z Y Liu. A new method for preventing HP from frosting[J]. Renewable Energy, 2005,30(5):753-761.
- [32] 盛伟, 李伟钊, 刘鹏鹏, 等. 抑制冷表面结霜的研究进展[J]. 制冷与空调, 2016,16(11):1-7.
- [33] 倪龙, 周超辉, 姚杨, 等. 空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J]. 制冷学报, 2017,38(4):23-30.