

喷液技术在低温空气源热泵系统中的应用

Application of Liquid Injection Technology in Low Temperature Air Source Heat Pump System

陈文强

Wenqiang Chen

广东美的暖通设备有限公司 中国·广东 佛山 528311

Guangdong Midea HVAC Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528311, China

摘要: 论文介绍了喷液技术在低温空气源热泵系统中的应用原理、系统控制方法、应用效果, 并对其控制中的关键技术做了详细分析和研究。

Abstract: This paper introduces the application principle, system control method, application effect of liquid injection in air source heat pump system, and makes analysis and research carefully about the key technologies in the control of this system.

关键词: 喷液技术; 低环温高水温; 空气源热泵

Keywords: liquid injection technology; high water temperature at low ambient temperature; air source heat pump

DOI: 10.12346/etr.v3i12.5043

1 引言

随着国民经济的飞速发展和城市化进程的加快, 能源的消耗也在逐年提高, 建筑能耗约占中国总能耗的 21.8%^[1], 而生活热水、采暖能耗在整个建筑热负荷中的比例从已有建筑的 10%~15% 上升到低能耗建筑的 45%。对于工商业生产, 如屠宰、煮茧剥丝、印染、食品加工、电镀、热处理、餐具洗消……行业也有大量的工艺用热水需求。而目前燃煤锅炉仍是提供采暖、生活、工艺热水的主要方式。

近年来中国多处多次发生大面积持续性的雾霾天气, 相关数据分析表明, 春夏秋三季, 京津冀区域 PM_{2.5} 的主要污染源是工业, 但是一进入冬季, 55% 左右的污染源都来自供暖的散煤。在北京冬季采暖燃煤排放占大气污染总排放的 16.7% 是造成中国北京雾霾天气的重要原因之一。现有的燃煤锅炉供热系统供热温度低、效率差、污染严重, 并且已经出现供热缺口, 供热热源亟待解决。

空气源热泵作为一种可再生能源, 节能环保, 受到越来越广泛的重视和应用, “煤改电” 便是最好的佐证。但是, 空气源热泵受自然条件的限制大, 在低温环境下, 其制热量、能效比和供水温度都大幅衰减, 而华北、西北等地冬季的气温可达到 -35℃ 以下。同时, “煤改电” 工程大多是旧工程

改造, 采用的多是铸铁散热器, 需 55℃~65℃ 才能达到预期的供暖效果。

传统热泵在解决低温环境下制热能力和水温方面, 通常会花费较大的代价, 造成设备初投资上升, 阻碍热泵采暖的推广, 亟需一种以较经济的方式解决在超低温环境温度条件下能够稳定有效地供应高水温热水的空气源热泵机组。

2 高水温低环温空气源热泵市场概况

目前, 业内大多都集中在提高热泵出水温度方面的研究和应用, 对于使用单级压缩机的 R410A 热泵系统, 通常只能在低于 55℃ 的回水温度下才能实现高于 65℃ 以上的出水温度, 回水温度上限通常止于 55℃, 在此回水温度下对于需要小温差大流量的循环系统, 出水温度仅能达到 58℃~60℃, 无法满足分布式集中采暖系统和生产工艺控制用水。现有研究能达到回水温度超过 60℃ 的热泵系统通常都是采用 R134a 冷媒, 但是其运转环境温度下限通常止步于 -7℃, 抑或采用复叠循环方式 (见图 1)^[2] 来达到 -20℃ 以下的运转环境温度和 65℃ 以上的出水温度, 但这些方式都会增加额外的经济器、中间换热器或多个压缩机, 无疑都会增加系统的复杂度和增加设备初投资, 经济性较差。

【作者简介】陈文强 (1981-), 男, 中国重庆人, 本科, 高级工程师, 从事暖通空调工程技术研究。

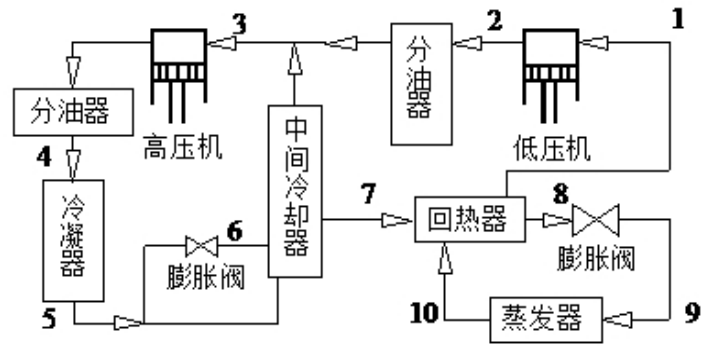


图 1 双压缩机两级压缩系统示意图

3 自适应喷液冷却低温强热技术

3.1 技术背景

普通空气源热泵系统在低环境温度下，蒸发温度低、吸气比重小、系统冷媒循环量小、吸气过热度无法保证，使得系统制热量低，系统运行不可靠，甚至导致压缩机液击等故障，难以满足寒冷地区冬季的采暖需求。

两级压缩是将来自蒸发器的低压制冷剂先经过低压级压缩机压缩到中间压力，然后再由高压级压缩机压缩到较高的冷凝压力，将较大压缩比分摊到两个压缩机上来实现低环温高水温。但是两级压缩系统结构复杂、成本高昂，不利于大量推广使用。

基于两级压缩原理，简化后发展了单压缩机的准两级压缩喷气增焓系统（如图 2 所示）^[3]。其原理是通过中间压力吸气孔吸入一部分中间压力的气体，与经过部分压缩的冷媒混合再压缩，以单台压缩机实现两级压缩，增加了冷凝器中

的制冷剂流量，加大了主循环回路的焓差，从而大大提高了压缩机的效率。虽然对二级压缩进行了简化，但还是需要一个经济器，使得系统复杂化和成本上升过多。由于喷气增焓压缩机的喷射位置通常都是处于压缩腔的中部位置，喷射的是气态制冷剂，无法有效降低压缩腔内冷媒的温度，无法实现较高的压缩比和系统冷凝温度。

综上所述，喷气增焓系统可以应用于低温低水温的场合，但无法满足低环温高水温的应用要求。

3.2 准两级压缩喷液冷却低温强热技术

3.2.1 喷液冷却低温强热系统原理

空气源热泵在低温环境下运行时，系统的蒸发压力较低，制取高温热水要求系统冷凝压力较高，如此系统压缩比会随着环境温度的降低而加大。而大压缩比又会导致排气温度的迅速上升甚至超标，有可能会造成压缩机润滑油的碳化、绕组线圈绝缘性能下降等问题，从而导致热泵系统的可靠性下降。

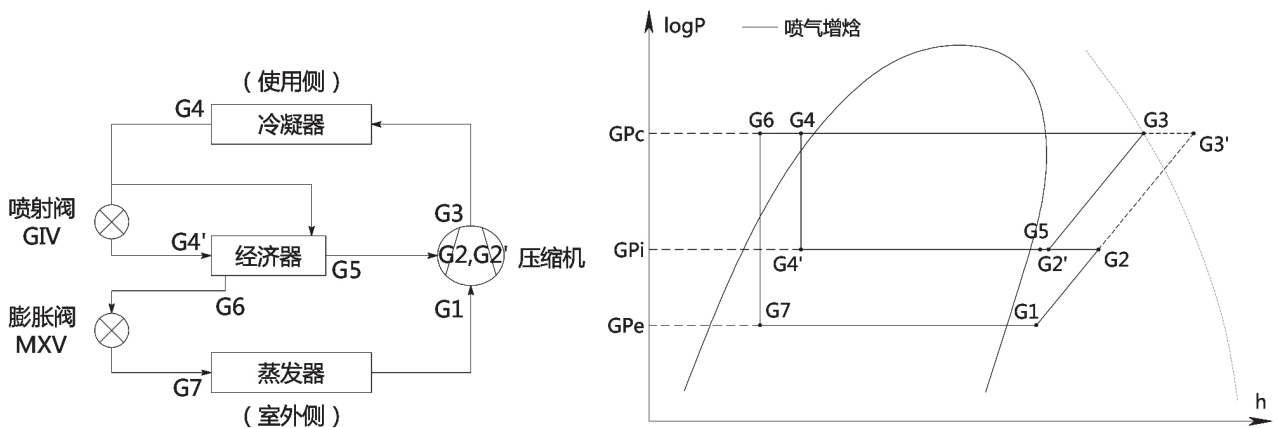


图 2 准两级压缩系统示意图

喷液冷却低温强热技术通过将来自冷凝器出口的液态冷媒喷入压缩机的高压部分压缩腔内，一方面增加压缩机整体冷媒循环流量，另一方面通过液态冷媒的闪发来吸收压缩腔内冷媒的热量，使得排气温度降低，避免排气温度过高而引起压缩机可靠性降低的问题。

通过带喷液阀 LIV (Liquid Inject Valve) 控制喷液量的设计，则可以通过精细的喷液量控制，将排气温度控制在安全范围内，系统原理图如图 3 所示。

如图 3 所示，制冷剂经压缩机压缩后进入冷凝器冷凝，从冷凝器出来的过冷态制冷剂一分为二：一路是主回路部分，经过主路 MXV 节流后进入蒸发器蒸发，蒸发后的过热气态制冷剂回到压缩机。另外一路是喷液回路，经过喷液阀 LIV 控制喷液量，喷液回路的制冷剂直接喷入压缩机的中高压腔内，与经过一级压缩的混合后进行二级压缩排至冷凝器，完成制热循环。该循环在压焓图上的表示如图 4 所示。

通过上述压焓图可以看出，得益于准两级压缩，排气温度从 T3' (对应 L3') 降为 T3 (对应 L3)。对于普通空气源热泵在冬季制热的运行中，高压缩比运行工况导致的排气温度过高的最大问题得到了有效解决，从而极大地提高了机组运行的可靠性。

3.2.2 喷液冷却低温强热压缩机设计

机构来实现准两级压缩。相对于喷气增焓的压缩机，喷液冷却压缩机喷射位置要求能够承受和吸收液体喷射的能量。涡旋盘喷液应力模拟分析如图 5 所示。

因采用涡旋盘内喷液的设计，一方面若喷射的液态冷媒量偏大，可能会引起压缩机涡旋盘发生带液压缩，会对涡旋盘产生较大冲击，另一方面在提高系统压缩比的同时也带来了涡旋盘压缩腔两端的压差增大，这些都要求对压缩机涡旋

盘进行强化设计。通过有限元仿真分析确认最大应力出现在液体喷射口附近，喷液时会形成一个涡旋盘径向的推力产生较大应力，需着重关注最高一级的压缩腔部分的涡旋盘设计，加强其结构强度。同时需要着重进行轴承和涡旋盘的加强可靠性试验，如表 1 所示。

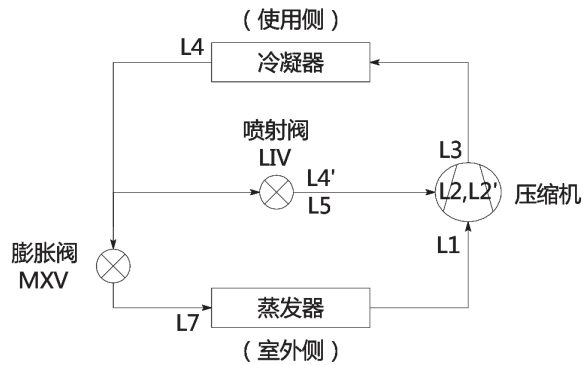


图 3 喷液冷却低温强热技术原理简图

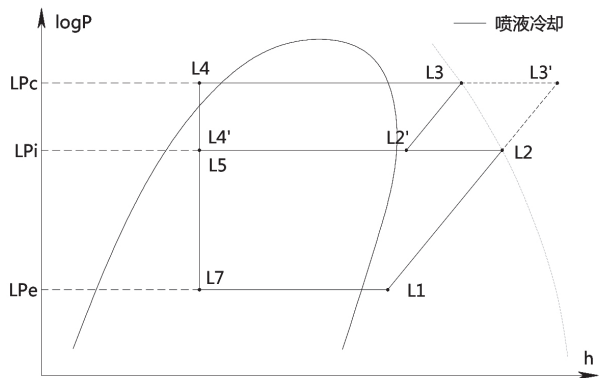


图 4 喷液冷却系统循环压焓图

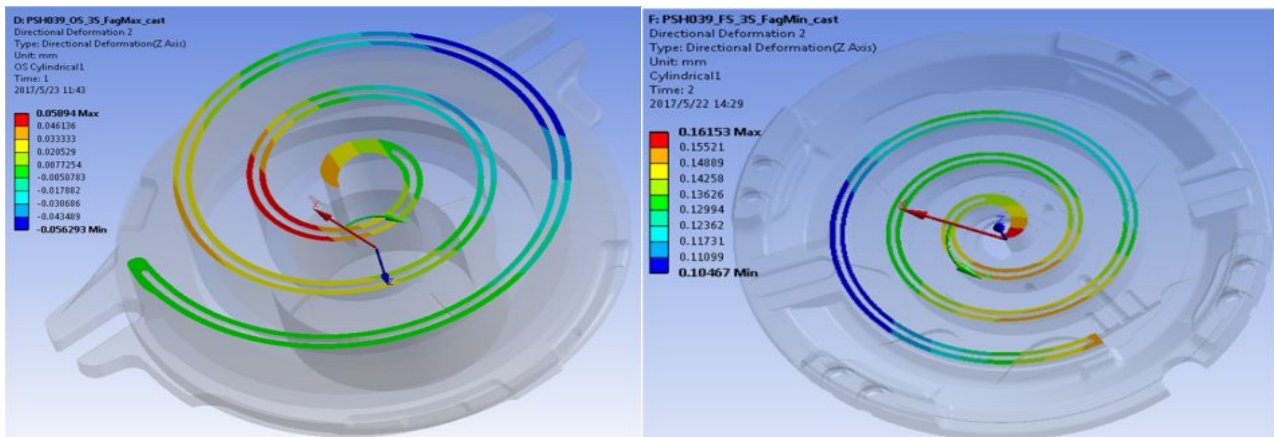


图 5 涡旋盘喷液应力模拟分析

表1 压缩机可靠性试验

项目	工况	试验条件	试验步骤
轴承加速磨损试验	最大负载	油稀释至最大回液浓度	启停循环10次/小时,持续2000小时
喷液可靠性试验	最大压比	喷液阀开度设置:100%	

喷液冷却压缩机通过涡旋型线、高强度耐磨钢密封圈、球墨铸铁、PTFE无铅聚酯轴承等系列的优化设计,使得喷液压缩机的运行范围较普通压缩机扩大很多,如图6、图7所示。

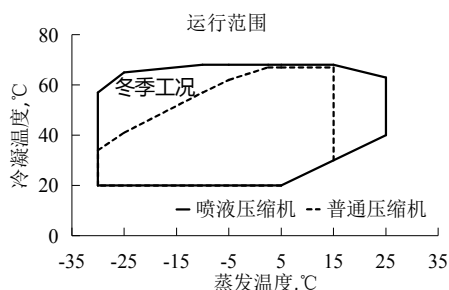


图6 压缩机运行范围

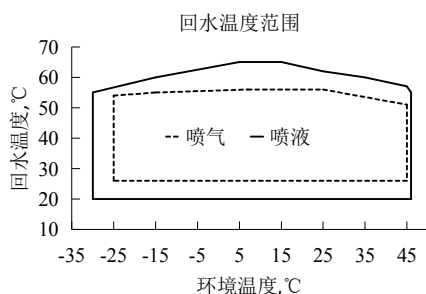


图7 回水温度范围

3.3 喷液阀与热泵主路节流阀联动控制

喷液冷却系统在低温工况需要通过喷液才能保持适宜的排气温度。随着环境温度的下降,热泵系统的蒸发温度和压

力都会下降,压缩机的吸气密度不断降低,导致压缩机输气量减小,压缩比增大,压缩机的容积效率降低,压缩热增加,从而导致排气温度升高,此时,可以通过向压缩机的压缩腔内喷射部分液体或气液混合的饱和冷媒,一方面增大后续压缩腔的吸气量,另一方面同时降低后续压缩腔的吸气温度,从而保证在低环境温度下保持适宜的排气温度和低温制热效果。

在喷液冷却热泵系统中,喷液量过小则无法有效降低排气温度,喷液量过多则会造成系统运行急剧波动(见图8),甚至有可能造成液压缩、破坏油膜等问题,易造成压缩机直接损坏或增大磨耗,降低压缩机寿命,降低系统可靠性。

如图9所示,喷液路与主路是并联关系,喷液阀LIV和主路的电子膨胀阀MXV会出现相互影响的状况:当提高喷液量时,主路的冷媒流量就会减小,从而会导致主路的蒸发压力降低,压缩机主路吸气量减小、压缩比增大,进而造成排气温度升高,抵消部分因为喷液量增加带来的排气温度降低效果;当减小喷液量时,主路的冷媒流量增加,蒸发温度提高,压缩机主路吸气量增大、压缩比减小,进而可以带来排气温度的降低,抵消部分因为喷液量减小而带来的对排气温度的不利影响。故而,喷液的控制需要通过精细的调整喷液阀LIV和主路电子膨胀阀MXV的动作和开度,使主路和喷液路的流量相互协调,向着最优控制点靠近,从而确保热泵系统具有较高的可靠性、较好的制热效果和较优的能源效率。

如图10所示,主路MXV和喷液阀LIV控制中,通过环境温度的实时检测判定,将主路主路MXV和喷液阀LIV的动作分开,实现解耦控制,避免主路MXV和喷液阀LIV同时因排气温度高而同时动作造成相互影响,使系统紊乱。

经过大量的试验确认,方法可行有效,低温下仅通过喷液阀LIV按照排气温度控制逻辑进行调整,即可达到很好的排气温度控制效果,使得空气源热泵系统在超低温下安全、可靠运行。

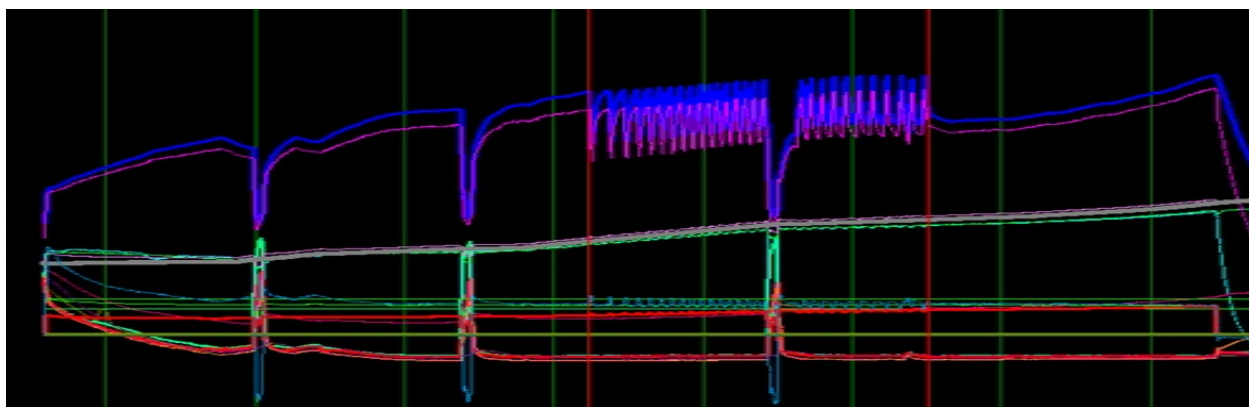


图8 喷液量过大造成系统运行急剧波动

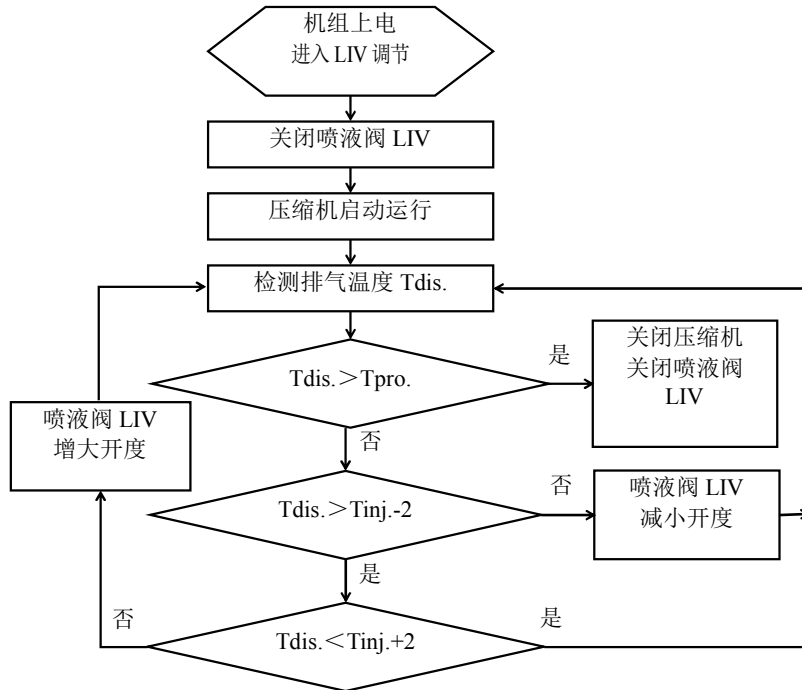


图 9 喷液阀 LIV 的 PI 调节逻辑

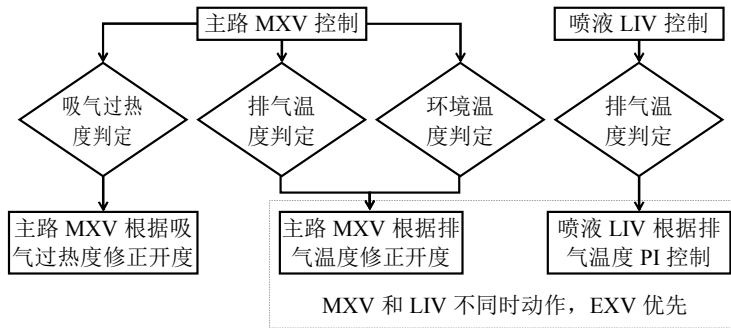


图 10 主路 EXV 与喷液 LIV 控制流程图

4 结语

通过搭载喷液冷却准二级压缩机，辅以喷液阀和主路节流阀的联动精细控制，可以使空气源热泵以较经济的方式在较宽的环境温度范围内提供较高的热水温度，满足生产生活的需求。例如，美的生产的烈焰系列空气源热泵就可以在 -30℃环境下提供回水 55℃的热水，在 -15℃环境下提供回水 60℃的热水，以及提供至高回水 65℃的热水，并以此技术获得中科院和工程院院士鉴定为国际领先技术。经过 3~4 年的大批量产品市场实地检验，证明该技术可靠实用，

是优秀的低温空气源热泵技术，值得大量推广应用。

参考文献

- [1] 中国建筑节能协会能耗专委会.中国建筑能耗研究报告(2020)[R].2020.
- [2] 赵瑞昌,杨永安,刘园,等.复叠与双级压缩系统的模拟对比分析[J].低温与超导,2018,46(7):5.
- [3] 王军辉.低环境温度工况下喷液和喷气增焓空气源热泵热[J].华东科技:综合,2019(5):1.