

氨制冷-梯级热泵能源综合利用研究

卢晓明 刘信中 张传玺 朱 强 王军武
百威(台州)啤酒有限公司 浙江 台州 317200

摘 要: 随着社会对能源高效利用和环境保护的关注度不断提高,氨制冷与梯级热泵技术的综合利用成为能源领域的研究热点。本文深入探讨了氨制冷系统的特性、梯级热泵技术的原理及其在能源综合利用中的优势。通过分析两者结合的可行性,提出了一系列综合利用方案,并对其经济性、环境效益和技术挑战进行了详细阐述。研究表明,氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统具有显著的节能减排效果和广阔的应用前景,但同时也面临着一些需要解决的技术难题。

关键词: 氨制冷; 梯级热泵; 能源综合利用; 节能减排

引言

能源是人类社会发展的基础,随着经济和人口增长,能源需求攀升,但传统化石能源枯竭与环境污染问题日益严峻。提高能效、降低能耗与减少污染成为制冷与热泵领域的重要课题。氨作为天然制冷剂,具有优良热力学性能及环保优势,但传统系统忽视余热回收。梯级热泵技术可根据热源温度实现能量高效利用。将氨制冷与梯级热泵结合,可挖掘余热资源,提升整体能效,实现冷热协同优化,具重要应用价值。

1 氨制冷系统概述

1.1 氨的物理化学性质及制冷原理

氨(NH_3)是一种无色、有刺激性气味的气体,具有良好的热力学性质。其标准沸点为 -33.34°C ,在常温下容易液化,且汽化潜热较大,这使得氨在制冷循环中能够有效地吸收和释放热量。氨制冷系统的工作原理基于逆卡诺循环,主要由压缩机、冷凝器、节流装置和蒸发器等组成。在蒸发器中,液氨吸收被冷却介质的热量而汽化,形成低压氨蒸气;低压氨蒸气进入压缩机,被压缩成高温高压的氨蒸气;高温高压氨蒸气在冷凝器中向冷却介质(如水或空气)放热,冷凝成高压液氨;高压液氨通过节流装置节流降压后,进入蒸发器再次汽化,完成一个制冷循环。

1.2 氨制冷系统的应用现状及存在的问题

氨制冷系统广泛应用于大型冷库、化工、食品加工等行业。由于其制冷效率高、运行成本低等优点,在大规模制冷需求领域具有不可替代的地位。然而,氨制冷系统也存在一些不容忽视的问题。首先,氨具有毒性,在泄漏时会对人体健康和环境造成严重危害,因此对系统的密封性和安全性要求极高。其次,传统的氨制冷系统在能源利用方面较为单一,制冷过程中产生的大量余

热通常直接排放到环境中,造成了能源的浪费。此外,氨制冷系统的控制相对复杂,对操作人员的技术水平要求较高。

2 梯级热泵技术原理及优势

2.1 梯级热泵技术原理

梯级热泵技术是基于热力学第二定律和能量梯级利用原理发展起来的一种高效供热技术。在传统的单级热泵系统中,热源和热汇之间的温差较大,导致热泵的制热性能系数(COP)较低。而梯级热泵技术通过将热泵循环分为多个阶段,每个阶段采用不同的工作介质和运行参数,根据热源温度的不同,逐步提升热源的温度,实现能量的梯级利用^[1]。例如,在低温热源(如工业余热、地热尾水等)与高温热汇(如供暖热水)之间,设置多个热泵机组,第一个热泵机组从低温热源吸收热量,将温度提升到中间温度,然后作为第二个热泵机组的低温热源,依次类推,最终将热量提升到所需的供热温度。

2.2 梯级热泵技术的优势

梯级热泵技术具有显著的优势。首先,通过能量梯级利用,提高了热泵系统的整体制热性能系数,大大降低了能源消耗。与传统的单级热泵相比,梯级热泵可以在相同的热源条件下提供更高温度的热量,或者在提供相同温度热量的条件下消耗更少的电能。其次,梯级热泵技术可以充分利用各种低温热源,如工业余热、地热能、太阳能等,拓宽了热泵的应用范围,实现了能源的多元化利用。此外,梯级热泵系统可以根据实际需求进行灵活配置和优化运行,提高了系统的可靠性和稳定性。

3 氨制冷-梯级热泵能源综合利用的可行性分析

3.1 能量匹配的可行性

氨制冷系统在运行过程中会产生大量的余热,主要

包括压缩机排气余热、冷凝器冷却水余热等。这些余热的温度范围一般在30℃-70℃之间,而梯级热泵技术可以有效地利用这一温度范围的余热。通过合理设计梯级热泵系统的级数和工作参数,可以将氨制冷系统产生的余热逐级提升,用于供暖、生活热水供应等领域,实现能量的高效匹配和利用。

3.2 系统集成的可行性

从系统集成的角度来看,氨制冷系统和梯级热泵系统在设备和技术上具有一定的兼容性。两者都涉及到压缩机、换热器等关键设备,在设备选型和系统设计上可以相互借鉴和优化。例如,可以将氨制冷系统的冷凝器与梯级热泵系统的蒸发器进行集成设计,实现热量的直接传递,减少中间环节的能量损失^[2]。同时,随着自动化控制技术的发展,可以实现对氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统的智能化控制,提高系统的运行效率和稳定性。

3.3 经济性和环境效益的可行性

在经济性方面,虽然氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统的初始投资可能相对较高,但由于其显著提高了能源利用效率,降低了能源消耗和运行成本,在长期运行中可以获得可观的经济效益。此外,随着国家对节能减排政策的支持力度不断加大,对于采用高效节能技术的项目可能会给予一定的财政补贴和税收优惠,进一步提高了项目的经济可行性。在环境效益方面,该系统可以有效减少对传统化石能源的依赖,降低二氧化碳、二氧化硫等污染物的排放,对缓解全球气候变化和改善环境质量具有积极意义。

4 氨制冷-梯级热泵能源综合利用方案

4.1 基于工业余热回收的综合利用方案

在工业生产过程中,许多行业如化工、冶金、造纸等都会产生大量的低温余热。以某化工企业为例,其氨制冷系统在运行过程中,压缩机排气温度可达80℃左右,冷凝器冷却水温度在40℃-50℃之间。可以采用两级梯级热泵系统对这部分余热进行回收利用。第一级热泵以压缩机排气余热为热源,将冷却水温度从40℃提升到60℃;第二级热泵以第一级热泵的出水为热源,进一步将水温提升到80℃,用于企业的生产工艺热水供应或冬季供暖。通过这种方案,不仅可以回收利用氨制冷系统的余热,还可以减少企业对外部热源的需求,降低能源消耗和生产成本。

4.2 基于冷热电三联供的综合利用方案

在一些大型商业建筑或工业园区,存在冷、热、电等多种能源需求。氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统可以与分布式能源系统相结合,实现冷热电三联供。例

如,以天然气为燃料驱动燃气轮机发电,燃气轮机的排气余热作为氨制冷系统的热源,驱动氨制冷循环进行制冷。同时,将氨制冷系统产生的余热通过梯级热泵系统进行回收利用,用于供暖和生活热水供应。此外,还可以根据实际需求,将部分余热用于吸收式制冷机,进一步增加制冷量,实现能源的优化配置和高效利用。

4.3 基于区域能源供应的综合利用方案

在城市区域能源供应领域,氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统可以发挥重要作用。以某个新建的住宅小区为例,建设一套集中的氨制冷-梯级热泵能源站。在夏季,氨制冷系统为小区提供空调制冷服务,同时将产生的余热通过梯级热泵系统回收,用于制备生活热水。在冬季,梯级热泵系统以土壤源、水源等低温热源为热源,结合氨制冷系统在非制冷季节的部分设备运行(如压缩机等,通过适当改造),为小区提供集中供暖。这种区域能源供应方案可以实现能源的集中管理和高效利用,减少能源输送过程中的损失,提高能源供应的可靠性和稳定性。

5 氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统的经济性分析

氨制冷-梯级热泵系统的投资主要由设备费、安装调试费和土建工程费构成。其中,设备费用(如氨制冷机组、热泵等)是大头,整体投资在数百万元至数千万元间浮动。运行成本主要包括能耗费、设备维护费及人工成本。能耗费用占据了较大比例,涉及电力和可能的天然气消耗。高效运作能减少这部分开支,而维护费与设备质量、状态和管理水平相关。经济效益通过净现值(NPV)、内部收益率(IRR)和投资回收期来衡量。尽管初始投资较高,但因其高效的能源利用率,通常可在5到10年间收回成本,并表现出良好的经济效益。这表明系统不仅环保,而且在长期运行中具有较强的经济竞争力。

6 氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统的环境效益分析

6.1 节能减排效果

氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统通过回收利用氨制冷系统的余热,提高了能源的整体利用效率,减少了对传统化石能源的消耗。与传统分立的制冷和供热系统相比,该系统可以显著降低二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放^[3]。以一个中等规模的氨制冷-梯级热泵能源综合利用项目为例,每年可节约标准煤数千吨,减少二氧化碳排放数万吨,对缓解全球气候变化具有积极意义。

6.2 对环境保护的贡献

除了减少温室气体排放外,氨制冷-梯级热泵能源综

合利用系统还对环境保护有其他方面的贡献。一方面，氨作为一种天然制冷剂，不会对臭氧层造成破坏，且其全球变暖潜能值极低，与传统的氟利昂类制冷剂相比，对环境的负面影响要小得多。另一方面，该系统通过回收利用余热，减少了废热的排放，降低了对周边环境的热污染，有利于改善生态环境质量。

7 氨制冷-梯级热泵能源综合利用技术面临的挑战及解决策略

7.1 技术挑战

7.1.1 系统安全性问题

氨具有毒性，在氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统中，如何确保系统的安全性是一个关键问题。氨泄漏不仅会对操作人员的生命健康造成威胁，还可能引发火灾、爆炸等安全事故。此外，系统中涉及到多种设备和复杂的管道连接，增加了安全管理的难度。

7.1.2 系统控制与优化问题

氨制冷-梯级热泵能源综合利用系统是一个多变量、非线性的复杂系统，其运行工况受到多种因素的影响，如环境温度、热源温度、负荷变化等。如何实现系统的优化控制，使系统在不同工况下都能高效稳定运行，是当前面临的技术难题之一。此外，系统中的各个子系统（氨制冷系统、梯级热泵系统等）之间存在相互耦合关系，需要建立合理的协调控制策略。

7.1.3 设备选型与匹配问题

由于氨制冷系统和梯级热泵系统在设备特性、运行参数等方面存在差异，在系统集成过程中，如何合理选型和匹配设备，确保各个设备之间能够协同工作，提高系统的整体性能，是一个需要解决的问题^[4]。例如，压缩机的选型需要考虑制冷和制热两种工况的需求，换热器的设计需要满足不同温度和流量条件下的传热要求。

7.2 解决策略

7.2.1 加强系统安全防护措施

为了确保系统的安全性，可以采取一系列安全防护措施。例如，采用先进的氨泄漏检测技术，实时监测系统内氨的浓度，一旦发现泄漏及时报警并采取相应的处理措施。加强系统的密封性设计，采用高质量的密封材料和先进的密封工艺，减少氨泄漏的可能性。同时，建立健全的安全管理制度和应急预案，加强对操作人员的安全培训，提高应对安全事故的能力。

7.2.2 研发智能控制系统

针对系统控制与优化问题，可以研发智能控制系统。利用先进的传感器技术、数据采集与处理技术和智能控制算法，实时监测系统的运行状态和环境参数，根据实际需求自动调整设备的运行参数，实现系统的优化控制。例如，采用模糊控制、神经网络控制等智能控制方法，对压缩机、水泵等设备进行变频调速控制，提高系统的能源利用效率和运行稳定性。此外，建立系统的仿真模型，通过仿真分析对系统进行优化设计和运行策略调整。

7.2.3 优化设备选型与匹配

在设备选型与匹配方面，需要进行详细的技术分析和计算。根据系统的设计负荷、热源温度等参数，选择合适的氨制冷机组和梯级热泵机组型号。对于换热器等关键设备，要进行精确的传热计算和流体力学分析，确保其传热性能和流体阻力满足系统要求。同时，在系统设计过程中，要考虑设备的可扩展性和兼容性，为系统的升级和改造留有余地。

结语

氨制冷-梯级热泵能源综合利用技术是一种创新性强、前景广阔的能源利用方式，通过整合氨制冷与梯级热泵系统，实现冷热协同优化和能量高效利用，在工业余热回收、冷热电联供等领域具有显著经济效益和环境效益。尽管在系统安全性、控制优化及设备匹配等方面仍面临技术挑战，但其发展潜力巨大。未来应加强基础理论与关键技术研究，提升系统性能与可靠性；推动政策法规建设，加快技术推广应用。同时，深化国际合作，借鉴先进经验，助力我国能源可持续发展与环保目标的实现。

参考文献

- [1]张华,刘业凤.制冷行业碳中和技术应用与发展趋势[C]//中国制冷学会.“2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛”会议论文集.上海理工大学,2023:124-131.
- [2]初壮,袁继新.考虑氨制冷和火电掺氨的综合能源系统优化调度[J/OL].电力建设,1-16[2025-06-04].
- [3]李友健.浅谈氨制冷系统升级改造[J].制冷,2024,43(05):71-74.
- [4]刘宁宁.液氨制冷系统工艺与设备安全设施设计探讨[J].上海安全生产,2024,(08):58-60.