

污水源余热在暖通供暖中的应用研究

赵 冲

信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司河北分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]城市污水含有大量低位热能, 数量大、水温较为恒定、冬季较温暖夏季较凉爽等特点, 是良好的低温余热源。本文主要研究污水源余热在暖通供暖方面的利用情况, 介绍了城市污水热能资源产生原因以及其性质特点, 简述了污水源热泵的工作过程, 在此基础上对污水源热泵供暖方式、换热方法、预处理手段以及防堵防腐等问题进行详细论述。根据城市集中供暖、建筑单体供暖以及区域热力站的不同需求, 探讨污水源余热供暖的应用形式。为解决系统运行过程中出现的污水水质变化大、换热器结垢腐蚀严重以及投资成本高问题提出了一系列措施。结果表明该污水源热泵供暖系统的能效比可以达到 4.0 以上, 相比于传统的燃煤供暖方式可大幅度降低污染物排放量, 具有较好的经济效益和社会效益, 值得进一步推广应用。

[关键词]污水源热泵; 余热利用; 暖通供暖

DOI: 10.64635/ja.2026.1222

中图分类号: TU83

文献标识码: A

Research on the Application of Sewage Source Waste Heat in HVAC Heating

Zhao Chong

Hebei Branch, The Eleventh Design & Research Institute of IT Electronics Technology Engineering Corporation Limited,
Shijiazhuang, Hebei 050000, China

Abstract: Urban sewage contains a large amount of low-grade thermal energy. With its large volume, relatively stable water temperature, warmer temperature in winter, and cooler temperature in summer, it serves as a favorable low-temperature waste heat source. This paper mainly studies the utilization of sewage source waste heat in HVAC heating. It introduces the causes, properties, and characteristics of urban sewage thermal energy resources, and briefly describes the working process of sewage source heat pumps. On this basis, the paper discusses in detail the heating modes, heat exchange methods, pretreatment measures, anti-blocking measures, and anti-corrosion issues of sewage source heat pump systems. According to the different needs of urban central heating, individual building heating, and regional heating stations, the application forms of sewage source waste heat heating are explored. To address problems such as large fluctuations in sewage water quality, severe scaling and corrosion of heat exchangers, and high investment costs during system operation, a series of measures are proposed. The results show that the coefficient of performance of sewage source heat pump heating systems can exceed 4.0. Compared with traditional coal-fired heating, this system can significantly reduce pollutant emissions and has good economic and social benefits, making it worthy of further promotion and application.

Keywords: sewage source heat pump; waste heat utilization; HVAC heating

引言

伴随着我国城镇化的快速发展以及建筑能耗不断上升, 暖通空调系统所消耗能量已经成为建筑节能的关注焦点, 在碳达峰、碳中和背景下, 开发可再生能源是暖通行业的发展趋势。而城市污水是城市日常生活产生的副产物, 其中蕴含热量未被充分利用。城市污水水量较大、水温变化较小、冬季水温高于外界温度、夏季水温低于外界温度,

是很好的低品位热源。热泵技术是将热量由低温度转移到高温度的方法, 而污水源热泵就是以城市生活污水以及工业废水中的热量为能源, 用于向建筑物供热、供冷的空调。相比于传统的供暖方式, 污水源热泵供热系统有着明显的优势, 在节能减排方面也有突出的表现, 符合我国当前提出的绿色低碳发展要求。本文首先介绍了污水源余热的特点, 然后详细阐述了污水源热泵供热的工作原理、

组成结构及应用形式等,最后针对实际工程项目中存在的问题给出相应的解决建议,希望对污水源余热应用于暖通空调供暖起到一定的借鉴作用。

1 污水源余热资源特性与利用原理

城市污水携带热量来自居民日常生活、商业和服务行业以及工业生产过程中排放的废热水。污水在输送和处理过程中会与外界进行热量交换,从而产生一定温度低品位热源。研究表明,城市污水所蕴含热量非常丰富,即使是利用其中很小一部分热量也可以供大量建筑物供热使用。污水温度具有周期性波动特点。由于人的生活习性和季节变换原因,污水温度在一天之内变动不大,在一年中变化也较小,一般在10~15℃之间,冬季污水温度一般在10~16℃左右,远远高于外界气温,因此有利于冬季供热。由于污水水温相对稳定,所以它是比空气源更为可靠热源。污水源热泵是基于逆卡诺循环工作进行热量转移。系统主要包括四个部分:即蒸发器、压缩机、冷凝器以及膨胀阀等。液体制冷剂在蒸发器内吸取污水中的低位热能而汽化;然后蒸汽状制冷剂被压缩机压缩,使其温度和压力迅速增加;高温高压蒸汽状制冷剂进入到冷凝器向供热系统放热,同时自身冷凝成液体;之后液体制冷剂再经过膨胀阀减压冷却后又回到蒸发器,如此循环往复。在整个过程中,只需要消耗一小部分电能就可以得到远远大于该部分电能的热量从低温处搬运到高温处。污水源余热应用于暖通供暖有如下优点:第一,污水源热泵COP较高,据相关研究表明,在相同供暖情况下,污水源热泵综合COP可达4.0以上,即每消耗1度电即可得到4度热量,相比电采暖直接电热转换率要高得多;第二,系统运行可靠,不受外界环境变化影响,克服了空气源热泵在冬季低温环境中制热量下降问题;第三,能够做到供暖、制冷以及提供生活热水三位一体,充分利用能源。但同时也有不足之处:第一,原始污水成分复杂,存在较多悬浮物、油类物质等

杂质以及腐蚀性物质,容易导致换热器被堵塞或者腐蚀。其次,污水源热泵系统初始投资大,在此基础上污水换热器以及预处理设施等也大大增加项目开支。再次,系统的设计及运行管理复杂程度高,需有经验丰富的工程师来进行操作。

2 污水源余热供暖系统构成与关键技术

2.1 取热方式及换热技术

污水源热泵系统的取热方式是影响系统性能的重要因素。根据污水与热泵机组之间有无中间介质,可以分为直接换热和间接换热两种方法。直接换热将原生污水直接通入热泵蒸发器实现热量传递。这种方法不需要经过中间换热过程,降低传热阻力,有利于提高换热效果。但是直接换热对污水质量要求较高,污水中的泥沙、纤维、油污等容易导致蒸发器堵塞及污染问题,从而影响整个系统的工作情况。间接换热是在污水与热泵机组之间增加一个中间换热器,污水首先进入这个中间换热器与其中间介质(一般是水或者防冻液)发生热交换后再把热量传递给热泵机组。这种方法将污水与热泵主机相隔离,可以大大减少污水对主机造成的腐蚀以及堵塞的可能性,增加系统的稳定性。而间接式系统由于增加了一个换热过程,会造成一定的能量损耗,但是在实际工程中使用间接式系统的整体效率也是非常高的,在有相关案例表明该系统的运行效率可达5.5以上,相比于传统的间接式系统提高了10%~20%左右。根据不同的水质情况,需要选择不同的换热器。未经处理的原生污水,应首选宽流道式的或者是离心式的换热器,宽流道式的换热器中的污水侧通道的高度不应低于80mm,以增大通道面积避免杂物沉积。离心式换热器采用纯逆流换热方式,换热系数可达每平方米1200瓦以上,比一般换热器提高约15%,而对已经过沉淀、过滤,悬浮物较少的再生水,则可以使用高效板式换热器提高换热效果。

表1 不同取热方式对比

取热方式	换热效率	系统复杂度	初投资	运行可靠性	维护要求	适用条件
直接换热	高	低	较低	较差	高	水质较好的再生水
间接换热	较高	中	较高	良好	较低	原生污水、一般水质

2.2 污水预处理与防堵防腐技术

污水预处理是保证整个系统正常运行的前提条件。由于原生污水具有较高悬浮物浓度以及易结垢特性,在实际应用中一般会设置格栅、过滤器、沉淀池等预处理设备。为避免换热面上沉积物过多而影响换热效果,通常会在系统中加入反冲洗措施,如周期性改变水流方向或者短时间

内加大水量对换热面进行冲洗以清除其表面附着物。同时一些先进的污水源热泵装置还会通过对设备结构进行改进从而降低堵塞可能性以从根本上解决该问题。腐蚀也是污水源热泵所面临的一个问题。污水中的硫化物、氯化物等腐蚀性物质会对金属换热管产生持续腐蚀作用。解决腐蚀的方法有:选择耐腐蚀材料(如316L不锈钢、钛合金、

镍铜合金等)制造换热元件;在换热面上喷涂一层厚度约为纳米级防腐涂层;调节污水 pH 以及溶解氧含量等。对于规模较大的污水源热泵工程,则应使用外径不低于 25mm 加厚型换热管,并结合 316L 不锈钢、哈氏合金等防腐材料,在材料及工艺上保证设备寿命。

2.3 热泵机组选型与运行控制技术

热泵机组的选择需要根据建筑物的负荷情况、污水温度以及系统的大小来确定。而常见的热泵压缩机有螺杆式、涡旋式和离心式等,它们有不同的适配范围。新型反冲洗降膜式污水源热泵机组对于提高原生污水源热泵的回收率有着显著的效果,在工作时具备反冲洗及降膜蒸发器的功能,在运行中能够不断去除换热面上附着物。运行控制对整个系统的节能起着至关重要的作用。变流量可以根据末端的不同需求改变循环水的流量从而减少不必要的能耗。多个热泵机组之间的协调运行可以使各机组处于高效工况下工作,减少频繁启停所消耗的能量。一些学者研发基于物理机理模型及数据驱动方法相结合污水源热泵智能仿真及优化设计平台,可以进行精细化设计并且经济高效地运行,从而减少项目初始投资以及运行成本。

3 污水源余热在暖通供暖中的应用模式

3.1 城市集中供暖系统应用

在城市集中供热方面,污水源余热可以作为基础热源进入多能互补供热系统。而青岛李村河再生水清洁能源利用项目就是这一方式的一个成功案例,在此项目中每天有 14.4 万吨再生水流入,利用六台大功率热泵提取热量,使市政供热回水温度由原来的 45℃ 提高到 55℃,满足了 120 万 m² 的供热需求,一个采暖期使用再生水 2160 万 m³,产生热量约 54.4 万 GJ。这说明再生水热源系统完全可以成为城市集中供热的有效补充。另外,济南睿冠能源站也采用了污水源热泵和其他多种形式清洁能源联合供冷方式。该能源站服务于济钢新村 8300 多户居民,供热面积达到 86 万 m²,原生污水源热泵可满足 10 万 m² 区域供暖需求,具有很高的经济性,该项目利用了十种清洁能源组合方式,污水源热泵与其它能源相互配合使用,以保证整个社区供热稳定。

3.2 建筑单体供暖系统应用

针对医院、酒店、办公楼等有较大稳定热负荷需求的公共建筑,污水源热泵不仅可以解决建筑物供暖、制冷以及生活热水的需求,还可以实现能源梯级利用。沈阳市沈水湾污水处理厂在对厂区内供暖、空调进行改造时使用污水源热泵技术,由于其具备优越自然条件,在系统设计上

增设板式换热器起到隔绝作用避免了污水对热泵设备产生腐蚀现象,取得良好经济效益。而从单个建筑物来看则需要考虑如何选取合适污水源头及系统大小。对于距离城市污水主管线或者污水处理厂较近建筑可以直接连接原有污水;而对于距离污水源较远建筑则要分析建造单独污水输送管道是否划算。

3.3 区域能源站耦合应用模式

区域型能源站是污水源余热规模化利用的发展方向。在陕西地区的一些项目中采用污水源热泵联合冷却塔、燃气锅炉、储能装置等多种能源形式协同运行的方式进行供热,形成多层次能源利用方式,提高可再生能源利用率以及安全性与稳定性,总建筑面积达到约 438 万 m²。其主要优点有:污水源热泵作为基本负荷运行保证较高整体效率;储能装置起到削峰填谷的作用,在电价低谷期充电,在高峰时期放电,节省电费开支;燃气锅炉等辅助热源作为应急备用电源使用。这种方式充分利用了污水源热泵节能的特点同时也解决了单一类型热源不稳定的问题。

4 污水源余热供暖系统面临的问题与优化对策

4.1 污水水质波动与换热面污染问题

城市污水水质因季节、生活习惯以及工农业生产等影响发生变化,这对系统造成很大困扰^[1]。当污水水质变差后,其中悬浮固体含量增加,换热表面上污垢生成速度提高,传热性能降低。要解决这个问题就需要从两方面考虑。在设计上要留有余地,在选材上使用易自洁型换热器;而在管理上要制定定期清洗计划,使用具有自动反冲洗功能换热器可大大减少人工清理工时,节省开支。

4.2 换热设备结垢与腐蚀问题

污水中含有的钙镁离子在高温下容易结垢附着在换热面上,增大传热热阻;同时污水含有氯离子、硫化物等腐蚀性物质会对金属造成侵蚀,降低设备使用寿命。对于结垢以及腐蚀问题,在实际应用中可以使用大通道换热器或者离心式换热器,由于其旋流式通道使污水产生强烈的紊流,利用液体自身的冲刷作用去除附着物从而避免堵塞的问题^[2]。而从材质上考虑要根据污水的腐蚀程度选择合适的防腐材质,在腐蚀较严重的场合可以选择钛或者镍铜合金。

4.3 初投资与运行成本偏高问题

污水源热泵系统的一次性投入较大,主要是由于污水换热器、预处理设备以及专用热泵机组的成本较高^[3]。从经济效益来看,污水源热泵供暖的费用为每平方米 24.85 元,虽然高于三通道高效换热技术的每平方米 18.55 元,

但是却远低于空气源热泵的每平方米 38.94 元和大温差吸收式热泵的每平方米 27.49 元。节约一次性的投入可以从以下几个方面着手：合理选择系统的规模，不过度设计；使用标准化、模块化的装置；充分利用现有的污水管道和建筑物的空间，节约土建费用等。青岛李村河项目通过对煤改气后闲置厂房及设备进行盘活利用，共节省投资约 4000 万元，对减少污水源热泵投资具有积极意义。而降低运行费用主要靠科学管理，在合适时间开、关热泵主机，尽量让储能装置发挥作用来实现，还可以进一步节省开支，即结合相变储能技术，在晚上低价时用电制热储存起来，白天使用，可使运行费用较之前再下降 15%~20%。

5 结语

污水源余热利用是暖通空调行业实现节能减排的有效方法。本文详细阐述污水源热泵供暖的工作机理、组成结构、应用形式以及存在的问题。得出如下几点认识：污水源热泵系统效率较高、安全可靠、环保效果好，其总体能效比可以达到 4.0 以上，每年可减少大量 CO₂ 排放量。

间接换热是目前工程上普遍采用的方法，宽流道换热器以及离心式换热器对于防止堵塞有良好作用。污水源余热供暖可用于城市集中供热、建筑物供冷供热和区域综合能源站等多种场合，多能互补联合方式有利于提高系统的安全性。目前污水源热泵系统还存在水质变化大、设备易腐蚀、初期投资较高问题，需在技术上、标准及政策等方面共同发力。未来需加强高效防堵塞换热器的研发工作，制定更为合理完善的污水源热泵系统设计理念，提高相关政策扶持力度，使污水源余热供暖实现规模化以及智能化发展。

【参考文献】

- [1]查丽芳.冬季供暖系统中污水源热泵机组的应用分析[J].节能与环保,2023(07):69-71.
- [2]沈鲁光,周长兴,李东旭,等.城市集中供热节能型二级站应用分析[J].节能,2025,44(03):136-138.
- [3]宋翠翠,陈芳,王亮,等.某污水处理厂综合楼污水源热泵系统设计[J].自动化应用,2023,64(07):261-262.