

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.012

华北地区某大型污水源热泵系统引退水工程设计

张琪^{1,2}, 曹立峰³

(1. 天津中德应用技术大学 能源工程学院, 天津 300350; 2. 天津市政工程设计研究总院有限公司 第四设计研究院, 天津 300392; 3. 南京市市政设计研究院有限责任公司 天津分院, 天津 300120)

摘要: 针对大型污水源热泵系统引退水工程的特点,以华北地区某大型污水源热泵系统为例,论述引水工程中引水量计算、引水量对污水系统的稳定性影响、引水点选择、引水预处理工艺及引水泵站设计,退水工程中消能措施、退水点选择以及引退水管道设计,并对引退水工程进行经济性分析。系统实际运行效果良好,可为类似工程设计提供参考。

关键词: 污水源热泵; 引退水工程; 预处理工艺; 消能井; 引退水管道

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0078-05

Design of Water Intake and Drainage Project for a Large-scale Sewage Source Heat Pump System in North China

ZHANG Qi^{1,2}, CAO Li-feng³

(1. School of Energy Engineering, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China; 2. The Fourth Design & Research Institute, Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300392, China; 3. Tianjin Branch, Nanjing Municipal Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300120, China)

Abstract: Considering the characteristics of water intake and drainage projects in large-scale sewage source heat pump systems, this paper systematically examined the key aspects of the water intake project of a large-scale sewage source heat pump system in North China, including the calculation of water intake volume, the impact of water intake on the stability of the sewage system, the selection of water intake points, the pre-treatment process of diverted water, and the design of water intake pumping station. Additionally, it explored energy dissipation measures, the selection of drainage points, and intake and drainage pipeline design. An economic analysis of the water intake and drainage project was also conducted. The system demonstrated effective operational performance, offering valuable reference for similar engineering designs.

Key words: sewage source heat pump; water intake and drainage project; pre-treatment process; energy dissipation well; water intake and drainage pipeline

1 研究背景

市政污水管路中蕴含大量的城市废热,这种储存于城市原生污水中的能源属于清洁的可再生能源。污水源热泵是利用城市原生污水中丰富的热

量资源作为冷热源,进行能量转换的供暖制冷空调系统^[1]。污水经换热设备返回污水干渠,密闭循环,与其他设备或系统无接触,不污染环境^[2-3]。

根据污水水质的不同,污水源热泵系统取热端

分为直接式和间接式,当污水水质满足热泵蒸发器进水要求时,可采用直接式;反之,需采用中介水换热系统,即为间接式。某项目采用原生污水源热泵供热系统,一般仅设置格栅等设施,原生污水不经过生化处理,因此取热端为间接式。原生污水源热泵系统主要包括污水引退水系统、污水换热器、中介水循环系统、热泵机组以及一次网供回水系统等,其原理见图1。小型污水源热泵引退水系统的环境污染风险小,与污水系统之间的相互影响较小^[4];而大型污水源热泵引退水系统的设计则需结合环境污染、污水系统的构造及运行要求、污水水质及污水处理厂等综合考虑,从而保证引退水系统的安全可靠^[5]。

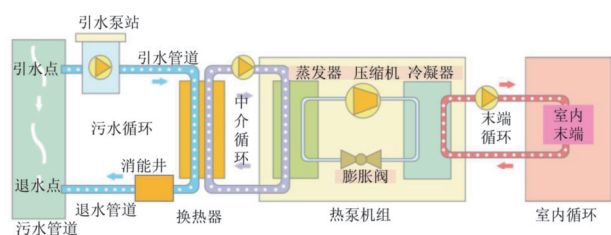


图1 污水源热泵系统原理

Fig.1 Schematics of the principle of sewage source heat pump system

2 项目概况

该项目位于华北地区,计算热负荷94.58 MW,与该负荷中心直线距离为1 km处建有1座污水提升泵站,其进、出水管规格为 $d3\ 200\ \text{mm}$,泵站上游污水主干管道全长6 km,下游主干管道全长10 km,末端接至污水处理厂。工程总平面布置见图2。

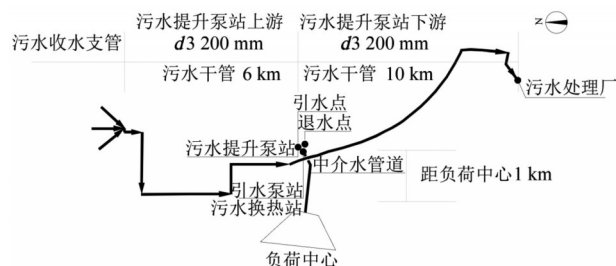


图2 工程总平面布置

Fig.2 General plan layout of the project

经实测,1月份污水提升泵站最低日平均流量为 $5.32 \times 10^5\ \text{m}^3/\text{d}$,最低小时流量为 $1.78 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{h}$;污水最低温度为 $13.1\ ^\circ\text{C}$,平均温度为 $14\ ^\circ\text{C}$,低于 $14\ ^\circ\text{C}$ 的天数为5 d;污水中COD、氨氮、总氮、总磷、pH等指标均能够满足《城镇污水热泵热能利用水质》(CJ/

T 337—2010)的要求。

3 引水工程设计

3.1 引水量计算及校核

冬季污水源热泵按制热工况运行时,所需污水总量的计算^[1]见下式:

$$V_{\text{gw}} = \frac{Q_h}{c\rho\Delta T} \cdot \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \quad (1)$$

式中: V_{gw} 为所需污水体积流量, m^3/h ; Q_h 为冬季空调总热负荷,取 $94\ 580\ \text{kW}$; c 为水的定压比热容,取 $4.2\ \text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ρ 为水的密度,取 $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$; ΔT 为污水换热温差, $^\circ\text{C}$; COP为热泵机组制热性能系数,取4。

为减小系统整体装机容量,剔除最不利的5 d数据,最不利期间启动调峰热源补充供能,其他时间水温基本在 $14\ ^\circ\text{C}$ 以上,因此,可将污水引退水温定为 $14/9\ ^\circ\text{C}$,则式(1)中 $\Delta T=5\ ^\circ\text{C}$ 。计算得到 $V_{\text{gw}}=12\ 198\ \text{m}^3/\text{h}$,约占污水提升泵站最低小时流量的68.5%,占最低日平均流量比例约55%。

考虑到污水处理厂的生物处理要求,较高的进水温度可提高生物处理效率,根据城镇污水处理厂工程设计及运行经验,建议进水温度不低于 $10\ ^\circ\text{C}$,可根据下式进行校核:

$$\frac{V_y}{V_z} = \frac{t_y - t_i}{t_y - t_l} \quad (2)$$

式中: V_y 为污水引水量, m^3/h ; V_z 为污水系统总流量, m^3/h ; t_y 为污水引水温度, $^\circ\text{C}$; t_l 为污水退水温度, $^\circ\text{C}$; t_i 为退水与原管道内污水混合后温度, $^\circ\text{C}$ 。

由式(2)计算最低小时流量下污水混合后温度为 $10.58\ ^\circ\text{C}$,满足污水处理厂进水温度要求。

3.2 污水系统的稳定性分析

该项目污水主干管全长16 km,全线无污水支管汇入;污水由引水管进入污水换热器,再经退水管回到污水主干管,全程耗时约250 s,从时间和空间效应上对污水系统的影响均较小。

下游至污水处理厂的污水主干管道埋深基本在8 m以下,所处深度地温受太阳辐射较小,经土壤热响应实验可知,土壤温度基本恒定为 $13\ ^\circ\text{C}$;且下游管线较长,污水退水与泵站出水混合后,排至污水处理厂的水温基本恒定为 $10.58\ ^\circ\text{C}$,对污水处理厂的生物处理影响较小。

3.3 引水点选择

由于污水源热泵的运行需要稳定的污水流量,

因此,其建设一般在污水系统建成运行后再实施,污水引水点的选取也需结合污水系统的整体情况考虑。引水点可以选择设于污水管道、污水检查井和污水提升泵站处,当在污水管道上引水时,需对现有管道进行破拆,对破拆处采取保护措施并新建

检查井;当在污水检查井处引水时,需结合原有设计以及现状寻找检查井位置,并对其进行改造;当在污水提升泵站进行引水时,需结合泵站设计、污水水质、引退水水位情况确定引水点^[6-8]。不同引水点选择的优缺点对比见表1。

表1 不同引水点选择的优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of the selection of different water intake points

引水点位置	优点	缺点
污水管道	①引水点设置灵活;②探查方便;③水质较好	①对一些老旧管道造成破坏,不易修复;②引水量不易控制;③位于市政路上的管道施工时会造成交通拥堵;④影响原有污水系统运行;⑤需新建污水检查井
污水检查井	①不破坏原有管道;②引水量容易控制;③对原有污水系统影响较小	①需改造污水检查井;②引水点固定;③部分检查井位于现状建筑物附近,不易探查;④检查井处存在垃圾堆积,水质较差;⑤位于道路交叉口的检查井施工时会造成交通拥堵
污水提升泵站	①引水量可灵活控制;②不影响原有污水系统运行;③3种引水点中水质最好;④污水量较大,可满足大规模供热需求	①引水点固定,远离热负荷集中区域,无法实现就近引水;②需结合泵站现状进行适当改造

该项目污水提升泵站具备完善的除臭、格栅除污措施,出口处污水水质较入口处好,且设有事故排放口,因此引水点可设置于事故排放口处。引退水系统平面见图3。

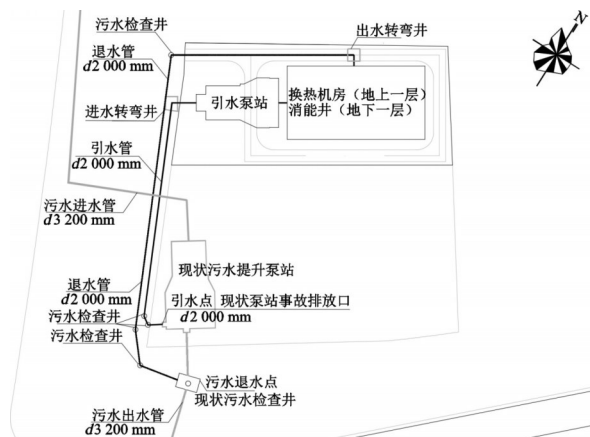


图3 引退水系统平面示意

Fig.3 Plan diagram of water intake and drainage system

3.4 引水预处理工艺

为保证污水换热器的连续稳定运行,污水在经泵提升至换热器之前,需经过预处理。通常采用机械除污格栅去除污水中较大固体杂质,因该项目污水引水点位于污水提升泵站出口,泵站本身建有粗格栅,故根据换热器对污水介质中杂质颗粒大小的实际要求,综合考虑选择细格栅除污机对污水中的固体颗粒进行去除。经预处理后,可有效保证污水

提升泵和污水换热器的稳定运行,延长机器设备的使用寿命。

3.5 引水泵站设计

污水与中介水系统通过污水专用换热器进行换热,由于换热过程需要换热介质保持一定的内压,因此需设置引水泵站以满足污水换热的要求。污水由引水点经重力流至引水泵站,经提升到达换热器内,换热后的污水依然有一部分多余压头,通过消能井降压后经重力流回到退水点。

污水在进入引水泵站前,需结合引水管、引水泵站水位关系,以及管道角度条件设计进水转弯井。引水泵站作为换热站的前置建筑,承担着预处理及提高污水压力的作用。为避免原生污水远距离输送对环境造成二次污染,在引水点处就近设计引水泵站和污水换热站。

引水泵站主体采用全地下结构形式,主要包括进水闸井、格栅井、集水池、出水池。进水闸井设置1台2.0 m×2.0 m电动铸铁方闸门。进水格栅井设置6条进水廊道,单条廊道宽2.1 m,其中设置1台钢丝绳抓斗式格栅除污机,共6台,并配有2套螺旋输送压榨机,将格栅所除污物予以清除后装车外运。集水池设置10台潜污泵,8用2备,单台流量1 525 m³/h,集水池有效容积按单台泵5 min水量进行校核。潜水泵的电机与水泵连体,直接安装于集水池内。为确保水泵布水均匀,在每台泵之间设置导流

墙,泵与泵之间互不干扰。为防止水流回灌以及便于检修,在每根水泵出水管道上设置止回阀、闸阀。引水泵站平、剖面示意图见图4。

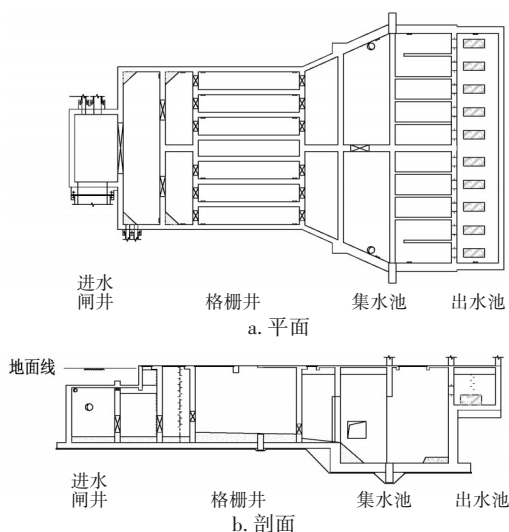


图4 引水泵站平、剖面示意

Fig.4 Plan and cross-section diagrams of water intake pumping station

4 退水工程设计

4.1 消能措施

换热机房及消能井平、剖面示意图见图5。

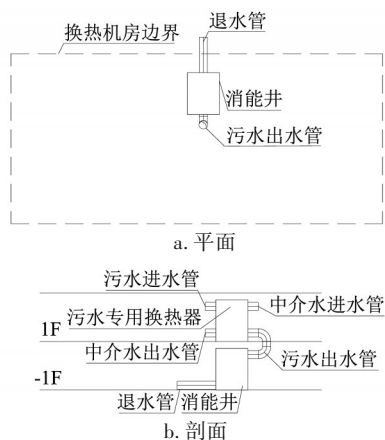


图5 换热机房及消能井平、剖面示意

Fig.5 Plan and cross-section diagrams of heat exchange room and energy dissipation well

污水经换热器换热后,出口压力依然较大,直接排入污水系统会造成污水检查井冒水、污水主管水位变化,影响污水系统正常工作,甚至可能引起向上游反流的情况。因此,需设置消能井以消除多余水头,保证污水系统的稳定运行^[7]。

消能井又称跌水井,根据进水管径不同,可分

为竖管式、竖槽式、阶梯式、消力槛式,其中前三者消能水头有限,而消力槛式的消能水头无限制,但需根据实际情况进行设计。该项目换热器出口为1根 $d2\,000\text{ mm}$ 退水管,水头富余量 2 m ,设置阶梯式混凝土跌水井1座,井室长 4.5 m ,宽 3.1 m ,高 5.25 m ,做法可参考《钢筋混凝土及砖砌排水检查井》(20S515)。为节约用地,消能井设置于换热机房地下一层。

4.2 退水点选择

污水流经消能井后,结合退水管线水位及管道接口角度关系设置出水转弯井。污水经换热器后水温会发生变化,因此,污水退水点应位于引水点下游。退水点位置可选择现有检查井,也可以根据实际情况选择在污水管道上新建1座检查井。

该项目在污水提升泵站出口下游有1处污水检查井,该检查井的污水主管接入面宽 11.5 m ,深约 12 m ,深度满足退水要求,其 6.5 m 宽的侧面墙体经开孔改造后,可以作为退水点(见图3)。

5 引退水管道设计

引水管道自污水提升泵站引出,接入引水泵站,退水管道由换热站引出,接入下游污水检查井(见图3)。该项目引退水管道沿线无其他现状建(构)筑物,可采用明开槽施工,其中引水管道平均埋深约 7.5 m ,长约 180 m ,退水管道平均埋深约 4.5 m ,长约 320 m ,引退水管道均采用 $d2\,000\text{ mm}$ 企口钢筋混凝土管。

6 经济分析

该项目中引退水工程(不含污水换热站)新建引水泵站1座、引退水管道约 500 m 、附属检查井5座、进水转弯井1座、退水转弯井1座、消能井1座,改造现状检查井1座。其中污水泵站土建部分费用约 $2\,300$ 万元,工艺设备安装费用约 $1\,070$ 万元,管道部分费用 $1\,360$ 万元。引退水工程费中工艺设备安装及管道部分投资约占总费用的 51% ,土建部分费用较高的原因在于引水泵站采用全地下结构形式,深基坑开挖及支护费用占比较大。整个引退水工程占项目总投资比例约 9% ,不同地区及规模的污水源热泵引退水工程投资占比需根据具体情况确定。

7 运行效果

该项目经1个供暖季的运行,热泵供暖效果良

好。由于供热负荷在白天出现峰值,夜间进入低谷,与污水流量峰谷匹配,因此,污水流量变化对供热系统取水量影响较小。引水泵站格栅处一周一清,未出现严重堵塞,消能井及下游污水井未出现冒水,污水退水点下游水温基本在12℃以上,满足下游污水厂进水要求。

8 结论与建议

① 通过监测污水系统1月份水温变化情况,结合污水换热器的要求及装机容量,合理确定污水引退水温度;通过监测污水系统流量变化情况,在保证污水系统稳定运行的基础上确定污水引水量;根据污水处理厂的生物处理要求,校核退水温度。

② 根据引水点上、下游污水系统情况,进行污水系统流量和温度的稳定性分析,满足其正常运行的要求。

③ 通过对不同引水点选择的优缺点进行综合论证,确定合适的引水点位。

④ 对污水水质进行调研,根据情况进行污水泵站预处理工艺设计,有效保证污水提升泵以及污水换热器的稳定运行,延长机器设备的使用寿命。结合环境因素、建设投资等进行引水泵站工程设计。

⑤ 对换热器出口的退水压力进行计算,如果不满足接入下游污水管道要求,需设置消能井,当国家标准图集无法满足所需消能井消能水头时,需进行二次设计。

⑥ 结合场地现状及地质情况,合理选择管材,进行引退水管道设计。

参考文献:

- [1] 孙春锦,吴荣华,孙源渊,等. 污水源热泵技术研究现状及分析[J]. 暖通空调,2015,45(9):49-53.
SUN Chunjin, WU Ronghua, SUN Yuanyuan, *et al.* Research status and analysis of sewage-source heat pump technology[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(9): 49-53(in Chinese).
- [2] 薛甜,石烜,赵楠,等. 污水管网不同汇流条件下沉积物运移分布规律[J]. 中国给水排水,2023,39(7):107-113.
XUE Tian, SHI Xuan, ZHAO Nan, *et al.* Migration and distribution of sediment in sewage sewer network under different confluence conditions [J]. China Water &

Wastewater, 2023, 39(7): 107-113(in Chinese).

- [3] 刘艳臣,戚祥,董筹,等. 城市污水系统微生物气溶胶产生及其安全防控策略[J]. 中国给水排水,2022,38(22):1-7.
LIU Yanchen, QI Xiang, DONG Qian, *et al.* Microbial aerosol generation in sewerage system and its prevention and control strategies [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(22): 1-7(in Chinese).
- [4] 潘祖栋,张国徽,杨松杰,等. 原生污水源热泵机组性能优化[J]. 暖通空调,2011,41(10):102-104.
PAN Zudong, ZHANG Guohui, YANG Songjie, *et al.* Performance optimization of urban sewage source heat pump units[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2011, 41(10): 102-104(in Chinese).
- [5] 吴荣华,王立波,李伟. 过流式污水源热泵技术的工程应用[J]. 暖通空调,2010,40(12):55-57.
WU Ronghua, WANG Libo, LI Wei. Engineering application of flow past type sewage source heat pump technology [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(12): 55-57(in Chinese).
- [6] 赵玺灵,付林,张世钢,等. 城市原生污水源热泵系统的应用[J]. 太阳能学报,2010,31(11):1458-1463.
ZHAO Xiling, FU Lin, ZHANG Shigang, *et al.* Performance study and engineering practice of urban original sewage source heat pump system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(11): 1458-1463(in Chinese).
- [7] WU R H, XU Y, SUN D X, *et al.* Technology economic analysis of heat pump temperature rising in sewage disposal process in cold climate area[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(3): 267-271.
- [8] 贾永宏,喻家帮,杨静波. 某信息产业园污水源热泵系统设计[J]. 暖通空调,2022,52(5):31-35.
JIA Yonghong, YU Jiabang, YANG Jingbo. Design of a sewage-source heat pump system for an information industry park[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(5): 31-35(in Chinese).

作者简介:张琪(1990-),男,山西晋中人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师(暖通空调),注册公用设备工程师(动力),研究方向为污水源热泵系统设计与优化。

E-mail: zhangqi@tsguas.edu.cn

收稿日期:2024-03-01

修回日期:2024-03-26

(编辑:沈靖怡)