

林静. 高温污水源热泵在市政污泥干化系统中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(11): 108-115.

LIN J. Application of high temperature-wastewater source heat pump in municipal sludge drying system[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(11): 108-115.

高温污水源热泵在市政污泥干化系统中的应用

林 静*

(上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘 要 天然气锅炉是市政污泥干化系统的重点用能设备,是城镇污水处理厂节能降碳、降本增效的重要目标。高温污水源热泵(HT-WSHP)制冷供热项目具有良好的经济效益与碳中和效果。为实现污水处理厂减污降碳协同增效目标,文章研究HT-WSHP替代天然气锅炉作为市政污泥干化系统热源的技术和经济可行性。结果表明,采用双头压缩机设计的HT-WSHP系统出水温度可达85~90℃,在保证污泥干化效果的前提下,HT-WSHP系统出水温度稳定,机组平均制热性能(COP)指标不低于2.6,利用一台HT-WSHP替代一台天然气锅炉后,天然气单耗下降了65.5%,能源成本下降了17.2%,碳排放强度下降了18.2%,能耗强度下降了7.7%。

关键词 高温污水源热泵 天然气 能源成本 碳排放 能耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)11-0108-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.11.014

Application of High Temperature-Wastewater Source Heat Pump in Municipal Sludge Drying System

LIN Jing*

(Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract Natural gas boilers are the key energy consuming equipment in municipal sludge drying systems. They are important targets for energy saving, carbon reduction, cost reduction and efficiency enhancement in urban wastewater treatment plants (WWTPs). High temperature-wastewater source heat pump (HT-WSHP) refrigeration and heating project has good economic benefits and carbon neutrality effect. In order to achieve the synergistic efficiency goal of pollution and carbon reduction in WWTPs, this paper studied the technical and economic feasibility of using HT-WSHP to replace natural gas boilers as heat sources for municipal sludge drying systems. The results showed that water temperature of dual compressors HT-WSHP could be heated to 85~90℃. On the premise of ensuring the sludge drying effect, effluent temperature of the HT-WSHP was stable, the average heating coefficient performance (COP) indice of HT-WSHP was no less than 2.6. After replacing one natural gas boiler with a HT-WSHP, the unit natural gas consumption decreased by 65.5%, and the unit energy cost decreased by 17.2%. The unit carbon emission intensity decreased by 18.2%, and energy consumption intensity decreased by 7.7%.

Keywords high temperature-wastewater source heat pump (HT-WSHP) natural gas energy cost carbon emission energy consumption

我国污水处理行业所产生的碳排放量占全社会总碳排放量的1%~2%,能源消耗所产生的碳排放量约占污水处理总碳排放量的50%^[1]。在双碳

背景下,多途径开发利用污水、污泥中的资源与能源是当前的热点话题。城市社区产生的余热有40%包含在污水中^[2],这也决定了相较空气源热泵与地源热泵,污水源热泵系统抵抗季节变化的稳定性更优^[3]。齐浩然等^[4]归纳污水处理厂不同节能技术路线的碳中和率,得出污水源热泵的碳中和率可达487.63%,远高于光伏发电的19.03%

[收稿日期] 2024-03-11

[基金项目] 上海市科委课题(22dz1209202)

[通信作者] 林静(1986—),女,硕士,研究方向为水处理技术、能源与双碳管理,E-mail:15001724887@139.com。

与沼气热电联产的 12%；污水源热泵可产生 74.22 t 标准煤热能，而污泥厌氧消化仅能回收 3.03 t 标准煤热能和 2.97 t 标准煤电。国内外已有较多关于污水热能利用的研究与应用。这些研究与应用主要聚焦于将污水源热泵应用于污水处理厂厂区或周边的制冷供热^[5-6]，该类项目具有较好的经济和社会效益。刘志斌等^[7]发现，国内几个污水源热泵项目的系统平均制热性能 (COP) 指标为 3.75~4.10。另外，国内外也有相关研究聚焦于污

水源热泵系统的数学模型建立与系统运行优化^[8-12]，较为经典的数学模型一般都基于蒸发侧和冷凝侧的水温^[13-14]。

高温污水源热泵 (HT-WSHP) 是相对于普通污水源热泵或者常温污水源热泵而言的，一般指可以直接回收利用 20~55 °C 的低品位余 (废) 热资源，制备 65~95 °C 热水的污水源热泵机组。污水处理厂污泥干化的热源通常为天然气锅炉或市政蒸汽。比较几种热源的优缺点结果如表 1 所示。

表 1 几种热源的优缺点

Tab. 1 Advantages and Disadvantages of Several Heat Sources

热源	优点	缺点
天然气锅炉	初始投资较低； 供热量大； 持续供热时间长； 供热稳定	受气源条件限制，且有轻微污染，烟气排放口被纳入监管； 安装与运行管理复杂，噪声大，且存在安全隐患； 使用寿命短； 运行费用高； 天然气供应高度依赖进口，存在能源供应安全风险； 有保底量要求
市政蒸汽	供热量大； 持续供热时间长； 供热稳定； 绿色低碳	初始投资较高； 存在热能输送损失； 有保底量要求
水源热泵	环保节能； 效率高，寿命长； 运行费用低； 占地少； 无排烟和新风管道； 机房无需做防爆和隔爆处理	系统性能参数易受温度等因素影响； 初始投资比天然气锅炉高

国内关于 HT-WSHP 在污水处理厂的应用研究仍处于空白。文章基于实际案例介绍 HT-WSHP 系统在污水处理厂污泥低温真空干化环节的应用，研究 HT-WSHP 系统在污水处理厂污泥处理环节应用的技术和经济可行性，分析 HT-WSHP 的节能降碳效果。

1 技术原理

HT-WSHP 是一种以污水处理厂原水/尾水为低温热源，借助双头压缩机，通过消耗少量电能，完成制冷剂 (冷媒) 的相变，实现对外供热的成套设备。机组主要由压缩机、蒸发器、冷凝器、节流装置等部件组成，循环热水温度可控制在 85~90 °C。该技术可将污水处理厂污水治理与能源回收利用相结合，在保证污泥干化效果的同时极大降低污泥处理的能耗，实现污水处理厂减污降碳协同增效的目标。

HT-WSHP 系统主要工作原理如图 1 所示。热

泵机组启动时，低温低压的制冷剂气体被吸入压缩机压缩成高温高压气体。在冷凝器内，高温高压气体与循环热水进行热交换，制冷剂气体释放热能后凝结为高压液体。高压液体经热力膨胀阀节流降压为低压液体。在蒸发器内，低压液体直接/间接吸收污水处理厂尾水中的热能而汽化。汽化后的制冷剂气体重新被吸入压缩机进行压缩，如此周而复始，循环往复。

与常规制冷供热水源热泵相比，HT-WSHP 在污泥低温真空干化环节的应用存在以下特征。

- (1) 与建筑制冷供暖需求不同，污泥低温真空干化系统为恒定供热工况。
- (2) 系统出水温度高于一般建筑供热热水温度，需要耗费更多电能，从而导致系统 COP 相较制冷供热水源热泵系统低。
- (3) 使用污水处理厂原水或达标排放尾水作为水源，对系统运维要求更高。

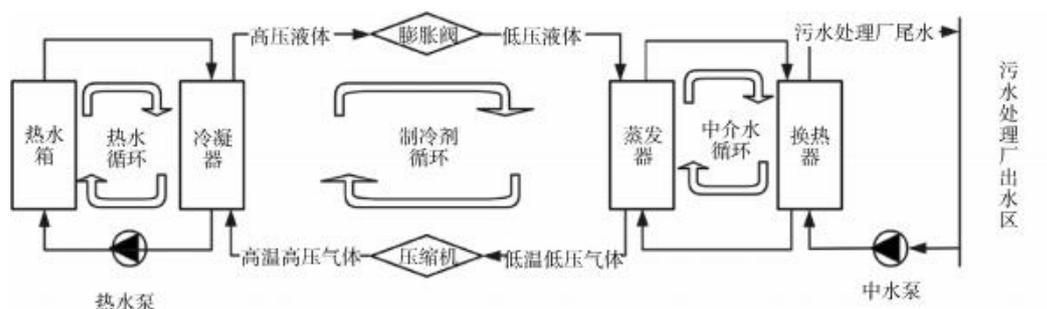


图1 HT-WSHP 系统原理

Fig. 1 System Principle of HT-WSHP

2 项目概况

项目位于华东某污水处理厂,该污水处理厂采用改良型 AO+深度处理工艺,设计处理规模为 20 万 m^3/d ,出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,其中氨氮、总磷达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)IV 类水标准。采用机械浓缩+低温真空干化技术将污泥含水率降低至 40% 以下,设计处理规模为 38 t DS/d。

污泥低温真空干化系统热源为 3 台天然气锅炉(单台锅炉制热量为 2.8 MW,运行方式为 2 用 1 备)。天然气锅炉的额定制热量为 2 800 kW,大、中、小火的输出功率分别为 2 800、1 400、400~800 kW。全厂碳排放量为 41 336 t CO_2/a ,天然气锅炉所产生的碳排放量占全厂碳排放量的 6.4%,电能利用产生的间接碳排放量占全厂碳排放量的 42.2%,合计 48.6%。

3 供热系统改造设计

3.1 设备参数

HT-WSHP 机组的主要参数如表 2 所示。

表 2 HT-WSHP 机组主要参数

Tab. 2 Main Parameters of HT-WSHP

设备	参数	数值
系统	名义制热量/kW	1 690
	名义制热输入功率/kW	588
	COP	2.57~2.87
蒸发器(中水侧)	噪声/dB	≤88
	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	190
	压力损失/kPa	63
冷凝器(热水侧)	接口管径	DN200
	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	290
	压力损失/kPa	65
	接口管径	DN200
	污水额定进、出口温度/°C	20、15
	热水额定进、出口温度/°C	80、85

3.2 负荷评估

该污水处理厂采用 DZG2000/800 污泥低温真空脱水干化一体化设备,单批次各个阶段热量需求如表 3 所示。

表 3 DZG2000/800 单批次各阶段参数

Tab. 3 Parameters at Each Stage of Single Output Batch of DZG2000/800

参数	进料阶段	压榨阶段	预热阶段	干化阶段	卸料阶段
时长/min	60	20	100	130	50
热量需求/kW	0	0	220	1 200	0

按照实际运行情况划分热量工况主要包括:用热高峰工况、用热平峰工况和用热谷峰工况。表 4 详细列出了各个热量工况下干化主机在不同运行阶段的运行数量以及总热量需求。

表 4 各阶段热量需求

Tab. 4 Heat Demand at Each Stage

项目	用热高峰	用热平峰	用热谷峰
(主机进料/压榨/卸料阶段的数量)/台	0	1	2
主机预热阶段的数量/台	2	2	2
主机干化阶段的数量/台	3	2	1
总热量需求/kW	4 040	2 840	1 640

按照主机 5 用 1 备,每台低温真空设备每天处理 4 个批次污泥,每天共处理 20 个批次进行热量负荷计算,可得 24 h 内每 10 min 的热量负荷分布如图 2 所示。

若新增两台 HT-WSHP,一台满负荷运行,另一台的日平均负荷率小于 50%,负荷率对应持续时间分布如表 5 所示。从投资回收角度分析,新增一台 1 690 kW HT-WSHP 的改造方案相比新增 2 台的改造方案性价比更高。

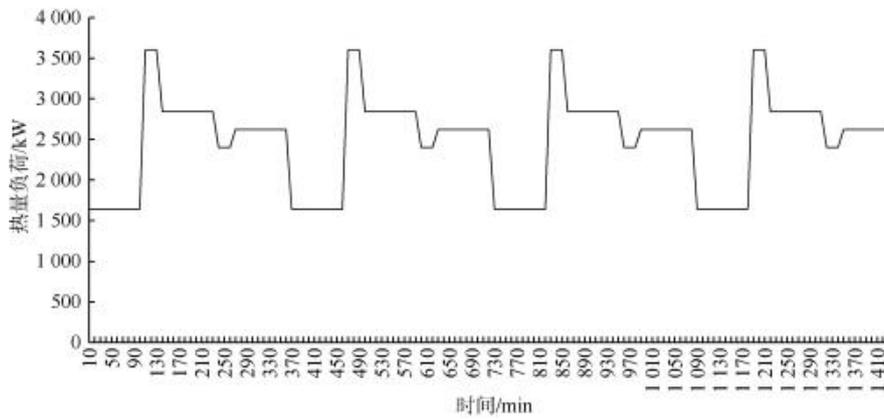


图2 24 h 热量负荷分布

Fig. 2 Heat Load Distribution in 24 Hours

表5 第二台 HT-WSHP 负荷率分析
Tab. 5 Load Rates of the Second HT-WSHP

负荷率	持续时间/h
0	6.7
42%	2.0
55%	6.7
68%	6.7
100%	2.0

3.3 水质水量

HT-WSHP 的蒸发器与冷凝器本质上属于换热器,参考《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2024)标准,对照直流冷却用水、间冷开式循环冷却水系统补充水的水质要求,分析该污水处理厂出水水质。各项水质指标对标结果如表6所示。

表6 不同水质对标结果
Tab. 6 Comparison Results of Different Water Qualities

指标	间冷开式循环冷却水系统 补充水、工艺用水、产品用水	直流冷却水、洗涤用水	实际水质
pH 值	6.0~9.0	6.0~9.0	7.7
浊度/NTU	≤5	-	1.0
色度/度	≤20	≤20	2
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	≤10	≤10	7.2
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	≤50	≤50	28.0
氨氮/(mg·L ⁻¹)	≤5	≤5	0.5
总氮/(mg·L ⁻¹)	≤15	≤15	12.6
总磷/(mg·L ⁻¹)	≤0.5	≤0.5	0.1
阴离子表面活性剂/(mg·L ⁻¹)	≤0.5	≤0.5	0.1
石油类/(mg·L ⁻¹)	≤1	≤1	<0.06
总碱度/(mg·L ⁻¹)	≤350	≤350	139
总硬度/(mg·L ⁻¹)	≤450	≤450	262
总溶解固体(TDS)/(mg·L ⁻¹)	≤1 000	≤1 500	394
氯离子/(mg·L ⁻¹)	≤250	≤400	138
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	≤250	≤600	69.0
铁/(mg·L ⁻¹)	≤0.3	≤0.5	0.2
锰/(mg·L ⁻¹)	≤0.1	≤0.2	0.084
二氧化硅/(mg·L ⁻¹)	≤30	≤50	9.0
粪大肠菌群数/(MPN·L ⁻¹)	≤1 000	≤1 000	130.0
总余氯/(mg·L ⁻¹)	0.1~0.2	0.1~0.2	1.09

水质对标分析结果显示,该污水处理厂出水基本满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2024)对再生水用作直流冷却水、间冷开式循环冷却水系统补充水的要求,可以直接作为热交换系统的热源。由于污水中存在一定浓度的硬度、碱度、铁等结垢与腐蚀因子,HT-WSHP 系统在污水处理厂污泥低温真空干化环节应用时,一方面需加强换热系统的防腐性能,另一方面需增加换热系统的在线清洗与除垢频次。

1 690 kW HT-WSHP 额定中水取水量为 190 m³/h,即 4 560 m³/d;当中水水温在 20 ℃左右波动时,流经机组热源端的中水量也会呈现一定程度的波动。由于该污水处理厂设计处理水量为 20 万 m³/d,实际日均处理水量为 19.6 万~21.9 万 m³/d (图 3),折算成 1 h 处理水量为 8 169~9 122 m³;在正常生产工况下,该污水处理厂的 1 h 处理水量可满足 HT-WSHP 机组的取水量需求。

4 设计方案

4.1 改造方案

采用“1 台 HT-WSHP 替代 1 台锅炉”的改造方案,即新增 1 台 HT-WSHP 并保留原天然气锅炉,原

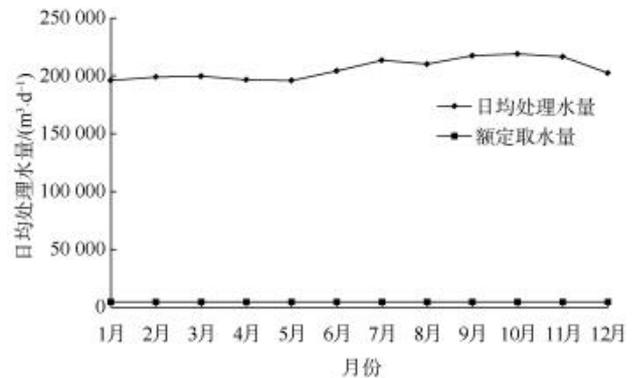


图 3 日均处理水量

Fig. 3 Average Daily Treated Water

天然气锅炉作为污泥干化调峰+备用热源。新增 1 段中水管路以将污泥真空冷凝器冷却水(污水处理厂尾水)引入水源热泵机组蒸发器,再从蒸发器引出至污水处理厂尾水排放母管,设计中水循环量为 190 m³/h。新增热水管路,建立热泵机组至热水箱的循环管路,设计热水循环泵流量为 290 m³/h。污水处理厂尾水水质较好,故采用直接型污水源热泵系统^[15]。系统生产的热水温度为 80~90 ℃。改造后的系统流程图如图 4 所示。

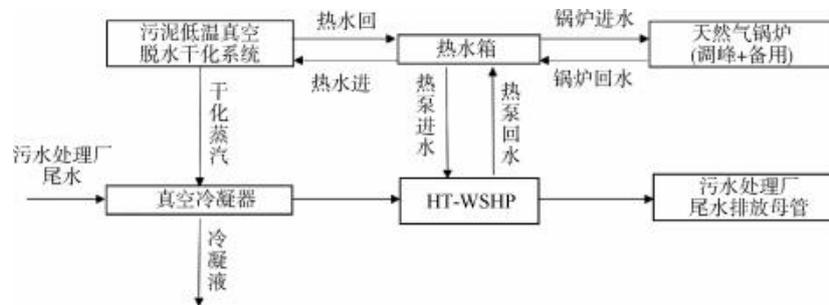


图 4 系统流程

Fig. 4 Flow of System

4.2 运行方案

正常工况下,系统采用 1 台水源热泵常开、1 台燃气锅炉调峰、其他燃气锅炉备用的运行方案。污泥干化主机各用热工况及不同热量需求阶段运行策略如表 7 所示。

5 结果分析

5.1 制热 COP

该污水处理厂位于片区污水管网上游,出水月平均温度为 15.6~30.3 ℃,全年温度曲线如图 5 所示。

HT-WSHP 的制热 COP 计算如式(1)所示。

表 7 运行策略

Tab. 7 Operation Solution

项目	用热高峰	用热平峰	用热谷峰
主机预热阶段的数量/台	2	2	2
主机干化阶段的数量/台	3	2	1
总热量需求/kW	4 040	2 840	1 640
热源供给形式	热泵+ 锅炉大火	热泵+锅炉 中/小火	热泵

$$C = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

其中: C——HT-WSHP 机组制热 COP;

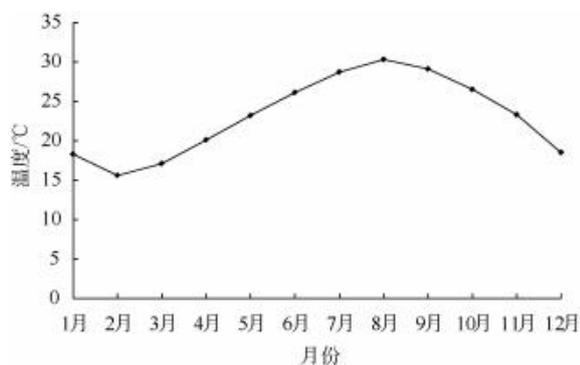


图5 温度趋势

Fig. 5 Temperature Trend

Q ——HT-WSHP 机组制热量, GJ;

W ——HT-WSHP 机组耗电量, kW·h。

相较空气源热泵, HT-WSHP 机组在冬季的制热性能相对稳定, 制热系数为 2.6~3.4, 不低于机组额定制热系数。分析 HT-WSHP 的 COP 时, 系统总能耗由污水源热泵机组电耗与水泵电耗组成, 系统制热系数为 2.3~2.9。

5.2 经济效益

5.2.1 天然气单耗

改造前, 该污水处理厂污泥干化环节的天然气单耗为 $103.54 \text{ N}\cdot\text{m}^3/(\text{t Ds})$ 。采用一台 HT-WSHP 替代一台天然气锅炉后, 天然气用量明显下降, 天然气单耗下降为 $35.77 \text{ N}\cdot\text{m}^3/(\text{t Ds})$, 同比下降了 65.5%。

5.2.2 污泥干化能源成本

污泥干化热源的能源成本计算如式(2)。

$$M = \sum_{i=1}^3 U_i P_i \quad (2)$$

其中: M ——污泥干化的能源成本, 元/(t Ds);

U_i ——第 i 种能源单耗, 天然气 (U_1)、电 (U_2)、热能 (U_3) 单耗单位分别为 $\text{N}\cdot\text{m}^3/(\text{t Ds})$ 、 $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{t Ds})$ 、 $\text{GJ}/(\text{t Ds})$;

P_i ——第 i 种能源单价, 天然气 (P_1)、电 (P_2)、热能 (P_3) 单价单位分别为 元/($\text{N}\cdot\text{m}^3$)、元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)、元/GJ。

改造前, 天然气费用占全厂能源费用的 22%。不考虑锅炉引风机、水泵等电耗, 仅污泥干化热源部分的能源成本为 462.84 元/(t Ds)。改造后, 污泥干化热源成本为 383.19 元/(t Ds) (包含热泵使用增加的电费与热泵热力费), 同比下降约 17.2%。

详细数据如表 8 所示。

表 8 改造前后单耗与成本比较
Tab. 8 Comparison of Unit Energy Consumption and Cost before and after Reconstruction

项目	改造前	改造后	同比下降量
$U_1/[\text{N}\cdot\text{m}^3\cdot(\text{t Ds})^{-1}]$	103.54	35.77	67.77
$U_2/[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{t Ds})^{-1}]$	0.00	240.91	-240.91
$U_3/[\text{GJ}\cdot(\text{t Ds})^{-1}]$	0.00	2.43	-2.43
$M/[\text{元}\cdot(\text{t Ds})^{-1}]$	462.84	383.19	79.65

注: 本次仅比较热泵机组与天然气锅炉的相关数据。

5.2.3 节能降碳

通过比较改造前后污泥干化环节的碳排放强度与能耗强度的变化, 分析 HT-WSHP 的节能降碳效果。碳排放强度、能耗强度计算分别如式(3)、式(4)。

$$C_u = U_1 c_1 + U_2 c_2 \quad (3)$$

$$E_u = U_1 e_1 + U_2 e_2 \quad (4)$$

其中: C_u ——碳排放强度, $\text{t CO}_2/(\text{t Ds})$;

c_1 ——天然气碳排放因子, $\text{t CO}_2/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$, 取值为 $0.002165 \text{ t CO}_2/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$;

c_2 ——电力碳排放因子, $\text{t CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$; 取值为 $0.00042 \text{ t CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$;

E_u ——能耗强度, $\text{t ce}/(\text{t Ds})$;

e_1 ——天然气折算标煤系数, $\text{t ce}/\text{m}^3$; 取值为 $0.0012997 \text{ t ce}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$;

e_2 ——电力折算标煤系数, $\text{t ce}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; 取值为 $0.0028564 \text{ t ce}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

如表 9 所示, 改造后该厂的天然气消耗量明显下降, 污泥干化热源碳排放强度下降约 18.2%, 能耗强度下降约 7.7%。基于改造前后碳排放强度差额, 结合干化污泥量, 计算改造项目的年碳清除量为 675 t CO_2 。对该污水处理厂碳中和贡献率为 1.6%。

表 9 节能降碳效果分析

Tab. 9 Analysis of Energy-Saving and Carbon Reduction Effects

项目	改造前	改造后	同比下降量
$C_u/[\text{t CO}_2\cdot(\text{t Ds})^{-1}]$	0.22	0.18	0.04
$E_u/[\text{t ce}\cdot(\text{t Ds})^{-1}]$	0.13	0.12	0.01

未来, 光伏、风电等清洁能源发电比例增大、火力发电效率提升等因素会使市政电力的碳排因子逐

步下降,污水源热泵消耗的电能产生的碳排放量也将随之下降,污水源热泵的节能与降碳效益将得到进一步扩大。此外,HT-WSHP 系统每年从污水处理厂排放尾水中提取并生产的热能达 3.3 万 GJ,相当于减少了污水处理厂尾水中的热污染 3.3 万 GJ。

6 结论与建议

HT-WSHP 应用于城镇污水处理厂污泥低温真空干化系统技术可行,且具有良好的经济效益与节能降碳效果,是污水处理厂实现减污降碳协同增效的重要路径之一。

(1)污水处理厂出水水温的稳定性确保了 HT-WSHP 机组的 COP 相对空气源热泵具备更高的稳定性。

(2)利用 HT-WSHP 为污泥干化系统供热具有明显的价格优势。相较完全采用天然气锅炉供热的方式,利用 HT-WSHP 替代 1 台天然气锅炉的方式可使污泥干化能源成本降低了 17.2%。双热源系统也可为污泥干化环节提供更安全可靠的能源保障。

(3)HT-WSHP 系统节能降碳效果显著,对该污水处理厂碳中和贡献率为 1.6%。

(4)双热源的设计增加了运行控制的复杂性;分时电价导致设备能效最高并非等同于综合能耗费用最低。因此,运营单位需要综合考虑运行能耗、能效、费用,优化运行控制策略,形成费用最低、能效较优的运行策略。

参考文献

- [1] 戴晓虎,张辰,章林伟,等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1-5.
DAI X H, ZHANG C, ZHANG L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5.
- [2] ZHOU W Z, LI J X. Sewage heat source pump system's application examples and prospect analysis in China [C]. Purdue; International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2004.
- [3] SHEN C, JIANG Y Q, YAO Y, et al. Experimental performance evaluation of a novel dry-expansion evaporator with de-fouling function in a wastewater source heat pump[J]. Applied Energy, 2012, 95: 202-209. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.02.030.
- [4] 齐浩然,尹明山,唐兆国,等. 城镇污水处理厂节能减碳实现路径与技术探讨[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 16-27, 53.
- QI H R, YIN M S, TANG Z G, et al. Discussion on realization path and technology of energy conservation and carbon reduction in urban WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 16-27, 53.
- [5] 吕燕. 污水源热泵技术在上海市区某污水处理厂的节能潜力测算[J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 146-148.
LÜ Y. Calculation of energy-saving potential of applying sewage-source heat pump technology for a sewage treatment plant in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s1): 146-148.
- [6] 杨建,王坦,钱靓. 污水源热泵在综合医院生活热水系统中的应用[J]. 给水排水, 2023, 49(2): 103-109.
YANG J, WANG T, QIAN L. Application of sewage source heat pumping domestic hot water system of general hospital [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(2): 103-109.
- [7] 刘志斌,张延,姚伟君,等. 城市原生污水作为热泵空调系统冷热源的应用探讨[J]. 工程建设与设计, 2007(11): 5-8.
LIU Z B, ZHANG Y, YAO W J, et al. The research on applying the urban sewage as hot and cool source of heat pump air conditioning system [J]. Construction & Design for Engineering, 2007(11): 5-8.
- [8] 李晓源,刘一氟,种道坤,等. 污水源热泵供热系统运行优化控制策略研究[J]. 建筑节能, 2023(9): 48-54.
LI X Y, LIU Y C, ZHONG D K, et al. Optimal control strategy of a wastewater source heat pump heating system [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2023(9): 48-54.
- [9] 庄兆意. 直接式原生污水源热泵系统的防堵技术及换热特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHUANG Z Y. Clog-proof technique and heat exchange characteristic research of the direct untreated sewage source pump system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] 姚杨,赵丽莹,马最良,等. 某药厂污水源热泵系统的模拟与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(5): 797-800.
YAO Y, ZHAO L Y, MA Z L, et al. Simulation and analysis of a sewage-source heat pump in one medicine factory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(5): 797-800.
- [11] 宫晔,曲云霞,金振家. 沉浸式污水源热泵系统夏季变工况性能实验研究[J]. 可再生能源, 2008, 26(2): 100-103.
GONG Y, QU Y X, JIN Z J. Experimental study on the performance of immersed sewage source heat pump systems in variable conditions in summer [J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(2): 100-103.
- [12] 郑仁春. 污水源热泵年运行性能实验研究及预测[J]. 建筑节能, 2020, 48(9): 29-35.
ZHENG R C. Experimental study and prediction of the annual performance of sewage source heat pump [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2020, 48(9): 29-35.
- [13] JIN H. Parameter estimation based models of water source heat

- pumps[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 2002.
- [14] 刘洋, 刘金祥, 丁高. 水源热泵机组变工况运行的数学模型研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(3): 21-24.
LIU Y, LIU J X, DING G. Mathematical model of water source heat pump units under variant working conditions[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007, 37(3): 21-24.
- [15] SHEN C, JIANG Y, YAO Y, et al. An experimental comparison of two heat exchangers used in wastewater source heat pump: A novel dry-expansion shell-and-tube evaporator versus a conventional immersed evaporator[J]. Energy, 2012, 47(1): 600-608.
-
- (上接第 62 页)
- JIN W J S G L, XUE S, WANG Z, et al. Changes of dissolved organic matter and fluorescent materials in municipal sewage treatment processes[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9): 2298-2305.
- [11] 高连敬, 杜尔登, 崔旭峰, 等. 三维荧光结合荧光区域积分法评估净水厂有机物去除效果[J]. 给水排水, 2012, 38(10): 51-56.
GAO L J, DU E D, CUI X F, et al. Three-dimensional fluorescence combined with fluorescence area integration method to evaluate the removal effect of organic matter in water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(10): 51-56.
- [12] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(6): 706-719.
- [13] ZSOLNAY A, BAIGAR E, JIMENEZ M, et al. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. Chemosphere, 1999, 38(1): 45-50.
- [14] HANSEN A M, KRAUS T E C, PELLERIN B A, et al. Optical properties of dissolved organic matter (DOM): Effects of biological and photolytic degradation [J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61(3): 1015-1032.
- [15] AESCHBACHER M, GRAF C, SCHWARZENBACH R P, et al. Antioxidant properties of humic substances [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(9): 4916-4925.
- [16] ÖNNBY L, WALPEN N, SALHI E, et al. Two analytical approaches quantifying the electron donating capacities of dissolved organic matter to monitor its oxidation during chlorination and ozonation[J]. Water Research, 2018, 144: 677-689. DOI: 10.1016/j.watres.2018.06.060.
- [17] WANG W L, LEE M Y, DU Y, et al. Understanding the influence of pre-ozonation on the formation of disinfection byproducts and cytotoxicity during post-chlorination of natural organic matter: UV absorbance and electron-donating-moiety of molecular weight fractions[J]. Environment International, 2021, 157: 106793. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106793.
- [18] 肖雪, 张玉钧, 王志刚, 等. 矿物油-乙醇溶液三维荧光光谱的实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1549-1554.
XIAO X, ZHANG Y J, WANG Z G, et al. Experimental studies on three-dimensional fluorescence spectral of mineral oil in ethanol[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1549-1554.
- [19] WU Q Y, ZHOU T H, DU Y, et al. Characterizing the molecular weight distribution of dissolved organic matter by measuring the contents of electron-donating moieties, UV absorbance, and fluorescence intensity [J]. Environment International, 2020, 137: 105570. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105570.
- [20] SONG K, SHANG Y, WEN Z, et al. Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis[J]. Water Research, 2019, 150: 403-417. DOI: 10.1016/j.watres.2018.12.004.
- [21] 隋志男, 郅二铨, 姚杰, 等. 三维荧光光谱区域积分法解析辽河七星湿地水体 DOM 组成及来源[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 114-120.
SUI Z N, ZHI E Q, YAO J, et al. Characterization of DOM composition and origin using three-dimensional fluorescence spectroscopy coupled with region integration method in Qixing Wetland[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(2): 114-12.
- [22] 胡琼丹. 太湖沉积物中 DOM 的分子量组成和光谱学特征 [D]. 成都: 四川师范大学, 2014.
HU Q D. Composition and spectroscopy characteristics of molecular weight fractions of dissolved organic matters in the sediment from Taihu Lake, China [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014.
- [23] ROUGÉ V, VON G U, ALLARD S. Efficiency of pre-oxidation of natural organic matter for the mitigation of disinfection byproducts: Electron donating capacity and UV absorbance as surrogate parameters[J]. Water Research, 2020, 187: 116418. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116418.