

王勇, 张炜杰, 吴思奇, 等. 寒冷地区污水处理厂生化池进水升温工程实例[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 192-198.

Wang Y, Zhang W J, Wu S Q, et al. Project practice of influent heating for Biochemical Tank in WWTP in cold region[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 192-198.

寒冷地区污水处理厂生化池进水升温工程实例

王 勇¹, 张炜杰^{1,*}, 吴思奇², 田欣媛¹, 徐军礼¹, 熊家晴³

(1. 陕西市政建筑设计研究院有限公司, 陕西西安 710021; 2. 陕西环保集团水环境有限公司, 陕西西安 710065; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055)

摘 要 【目的】 陕西北部某污水处理厂(设计规模为 $1.5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$) 冬季进水最低温度仅为 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 氨氮去除率降至 51.2% , 出水氨氮超标 $3\sim 5$ 倍。常规处理工艺的调控幅度有限, 管网源头改造周期长、难以应急, 亟须在过渡期内通过工程化升温措施保障冬季稳定达标。【方法】 针对上述困境, 本文提出了生化池进水升温的技术路线。按处理规模和升温需求计算热负荷为 8.0 MW 。热源方案比选表明, 天然气锅炉运行成本为 $3.40 \text{ 元}/\text{m}^3$, 仅为电锅炉的 43% 。换热方式对比表明, 汽水混合加热换热效率达 99% 以上, 设备投资仅为间接换热的 $40\%\sim 60\%$ 。据此确定“燃气锅炉供汽+汽水混合加热”的技术路线, 并采用旁路分流加热设计: 50% 污水升温至 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 后与未加热污水混合达 $12 \text{ }^\circ\text{C}$, 使加热系统处理规模减半, 投资和占地降低 40% 。【结果】 系统运行 140 d , 累计处理污水量达 186.2 万 m^3 , 生化池进水温度稳定维持在 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 出水氨氮稳定在 3 mg/L 以下, 氨氮去除率达 93% , 实现达标排放。系统经营成本为 $2.21 \text{ 元}/\text{m}^3$, 总成本费用为 $2.35 \text{ 元}/\text{m}^3$, 相比较于次氯酸钠应急方案(成本费用为 $6.77 \text{ 元}/\text{m}^3$) 降低 65.3% , 单季节省综合费用为 823 万元 。【结论】 “燃气锅炉供汽+汽水混合加热+旁路分流”技术路线在投资、运行成本及处理效果上均具有显著优势, 可为北方寒冷地区污水处理厂应对冬季低温进水问题提供有效的工程化解决方案。

关键词 低温污水; 升温调控; 汽水热交换; 低温脱氮; 工程实践

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)08-0192-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.020

Project Practice of Influent Heating for Biochemical Tank in WWTP in Cold Region

Wang Yong¹, Zhang Weijie^{1,*}, Wu Siqi², Tian Xinyuan¹, Xu Junli¹, Xiong Jiaqing³

(1. Shaanxi Municipal Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710021, China;

2. Shaanxi Environmental Protection Group Water Environment Co., Ltd., Xi'an 710065, China;

3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract [Objective] A wastewater treatment plant (WWTP) in northern Shaanxi (capacity: $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) suffered from extremely low influent temperature down to $2 \text{ }^\circ\text{C}$ in winter, which reduced the ammonia nitrogen removal efficiency to 51.2% and caused effluent ammonia nitrogen concentrations to exceed the discharge standard by $3\sim 5$ times. Conventional process adjustments yielded only marginal improvement, while sewer-network source-control retrofits required long implementation periods and could not address the immediate need. Engineering-based influent heating measures were therefore urgently required to ensure stable compliance during the transitional period. [Methods] To address the above challenges, an influent heating scheme for the biological reactor was proposed. The heat load was calculated as 8.0 MW based on the treatment capacity and the required temperature rise. Heat-source comparison showed that the operating cost of a natural gas boiler was $3.40 \text{ yuan}/\text{m}^3$, only 43% of that of an electric boiler. Heat-exchange comparison indicated that direct steam-water mixing achieved a heat-transfer efficiency exceeding 99% , with equipment investment being only $40\%\sim 60\%$ of that of indirect heat exchange. Accordingly, a technical route combining a gas-fired steam boiler

[收稿日期] 2026-01-01

[作者简介] 王勇(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事水污染防治、城市排水防涝、城乡安全供水、黑臭水体、海绵城市、生态环境保护、城市基础设施生命线等工作, E-mail: 420657626@qq.com。

[通信作者] 张炜杰(1993—), 男, 注册公用设备工程师(给排水), 主要从事给排水工程设计等工作, E-mail: liuliu6854@126.com。

with direct steam-water mixing was adopted, together with a bypass-split heating design in which 50% of the influent was heated to 22 °C and then blended with the unheated stream to reach 12 °C. This design halved the capacity of the heating system and reduced both investment and footprint by 40%. [**Results**] The system operated continuously for 140 days, treating a cumulative volume of $1.862 \times 10^6 \text{ m}^3$ of wastewater. The influent temperature of the biological reactor was stably maintained above 12 °C, the effluent ammonia nitrogen concentration remained below 3 mg/L, and the ammonia nitrogen removal efficiency reached 93%, achieving consistent compliance with the discharge standard. The operating cost was 2.21 yuan/ m^3 and the total cost was 2.35 yuan/ m^3 , representing a 65.3% reduction compared with the sodium hypochlorite emergency dosing scheme, for which the dosing cost was 6.77 yuan/ m^3 , with a single-season saving of 8.23 million CNY in comprehensive expenditure. [**Conclusion**] The integrated route of “gas-fired steam boiler + direct steam-water mixing + bypass-split heating” demonstrates significant advantages in investment, operating cost, and treatment performance, providing an effective engineering solution for WWTPs in cold regions of northern China to cope with low influent temperatures in winter.

Keywords low-temperature wastewater; temperature regulation; steam-water heat exchange; low-temperature denitrification; Project practice

城镇污水处理厂是维持水生态环境稳定与水资源循环利用的重要基础设施。目前,以活性污泥法为代表的生物处理工艺被广泛应用于污水处理领域,其效能高度依赖于微生物活性,而水温是影响微生物活性的关键因素^[1-2]。

在我国北方寒冷地区,污水处理厂冬季进水温度过低的问题较为普遍^[3]。由于城市地下管网雨污分流不彻底、建设质量参差不齐等原因,低温的雨水、融雪水等大量渗入污水管,显著降低进入污水处理厂的水温。以本文研究的污水处理厂为例,其冬季进水最低温度仅为 2 °C。已有研究表明,当水温低于 12 °C 时,硝化菌活性受到抑制,硝化反应速率显著下降;当水温降至 8 °C 以下时,硝化反应近乎停滞^[4-8]。这是因为低温胁迫导致氨单加氧酶(AMO)等关键代谢酶活性受抑、细胞膜传质阻力增大,在双重抑制下自养硝化菌世代周期大幅延长,极易随剩余污泥排出而流失,最终导致硝化系统效能急剧衰退且难以自我恢复。在此极端低温条件下,即便采取增加污泥含量、投加碳源或耐低温菌种等传统工艺调控手段,也往往收效甚微,难以保障出水水质稳定达标。

推进雨污分流、完善污水管网体系是从源头解决进水低温问题的根本途径。然而,此类工程实施周期长、建设投资高、受制因素多,短期内难以解决出水超标的现实问题。因此,在过渡期内,采用工程措施主动提升污水进水温度,确保生化系统维持在有效温度区间,已成为保障冬季处理效果的必要之举。本文以陕西省北部某污水处理厂为例,详细论述该厂进水升温改造工程的方案

论证、设计与实践,可为面临类似挑战的地区提供技术参考。

1 工程概况

1.1 污水处理厂概况

某县城污水处理厂位于陕西北部寒冷地区,设计处理规模为 1.5 万 m^3/d ,分 2 期建设,一期、二期处理能力均为 0.75 万 m^3/d 。目前,厂区已接近满负荷运行。

该厂主要承担县城生活污水的处理任务,设计进水水温为 12 °C。出水水质执行《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018)表 1 中的 A 标准。95%保证率条件下的实际进水水质与设计出水水质主要指标如表 1 所示。

表 1 厂区进出水水质主要指标
Tab. 1 Influent and Effluent Water Quality Parameters

项目	实际进水水质 (95%保证率)	设计出 水水质
化学需氧量(COD)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	394	30
五日生化需氧量(BOD ₅)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	180	6
悬浮物(SS)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	320	10
氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	42	1.5(3)
总氮(TN)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	62	15
总磷(TP)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	5.5	0.3
pH 值	6~9	6~9

注:括号外数值为水温>12 °C 时的控制指标,括号内数值为水温≤12 °C 时的控制指标。

在工艺方面,污水处理厂一期和二期工程均采用“生物处理+深度处理”的技术路线。在生化处理

阶段,设计混合液悬浮固体(MLSS)均为 4 000 mg/L,其中,一期工程采用“厌氧池+氧化沟”工艺,池容为 8 400 m³;二期工程采用“多级厌氧-好氧(AO)”工艺,池容为 5 634 m³。在深度处理阶段,一期二期均

采用“磁混沉+滤布滤池”工艺。在污泥处理阶段,采用“机械浓缩+板框压滤”工艺,脱水至含水率 60%以下后外运处置。厂区总体工艺流程如图 1 所示。

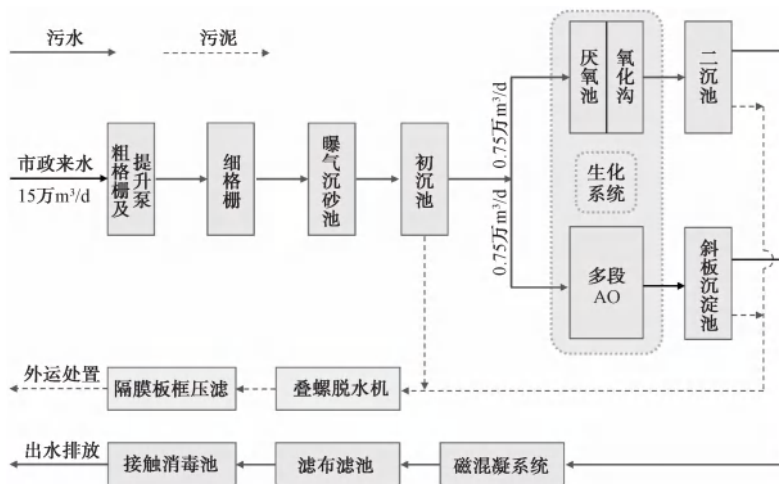


图 1 厂区工艺流程图

Fig. 1 Process Flow Diagram of the Plant

1.2 生化池低温问题分析

该污水处理厂地处黄土高原中部,属暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为 9.1 ℃,冬季日平均气温可降至 0 ℃以下,极端最低气温为-20 ℃。受低温气候及管网雨污分流不完善、地下水渗入等因素影响,污水处理厂进水温度呈显著季节性变化(图 2)。在冬季低温期(11 月—次年 4 月),厂区进水温度持续低于 12 ℃设计值,最低可达 2 ℃,其中 1 月—2 月水温持续低于 6 ℃。水温过低会严重抑制硝化细菌活性,当进水温度低于 6 ℃时,出水氨氮质量较常温期上升 5~10 倍,冬季氨氮去除率仅为 51.2%,出水难以稳定达标。

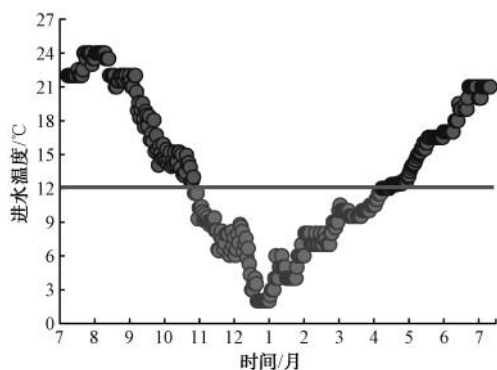


图 2 污水处理厂进水温度变化

Fig. 2 Influent Temperature Variation of the WWTP

1.3 已采用的低温应对措施成效

针对低温导致的污水处理厂脱氮能力不足问题,厂区采取了池体保温、污泥含量调控、菌剂投加和溶解氧控制等多项措施。

(1)池体保温。在池体加装保温盖板后,水温无明显变化,出水氨氮无明显改善。

(2)污泥含量调控。投加活性污泥及葡萄糖提升污泥活性。实施后污泥镜检显示钟虫、轮虫数量明显增多,COD 和 TP 去除效果提升,但氨氮去除无明显改善。低温条件下硝化菌增长速率和酶活性受到严重抑制,单纯提高污泥含量无法弥补微生物活性下降^[9]。

(3)菌剂投加。采用“冲击启动+定期补加”策略,分 3 批次投加耐低温冻干硝化菌剂:首次按 2.8 t/次进行连续 3 d 冲击性投加,后续间隔 7 d 补加 1 次,每次补加量为 2.8 t,共补加 2 次。初期的出水氨氮降至 20 mg/L 左右,但仍未达到预期效果。水温过低(<8 ℃)会导致菌种生长缓慢、难以形成优势菌群,加之系统定期排泥会造成菌种流失,投菌的强化效果在约半个月后会消失。

(4)溶解氧控制。曝气阀门开至最大,将 2/3 池容改为好氧区。出水氨氮虽有所下降,但仍远超标准,且大面积曝气导致污泥沉降性能恶化,二沉池跑泥。

尽管采取了池体保温、生物强化和工艺优化等

多项措施,但在进水温度低于 8 ℃ 的条件下,生化系统脱氮效能仍严重不足,出水难以稳定达标。为确保达标排放,厂区被迫采取化学应急措施,向深度处理段投加次氯酸钠,利用其强氧化性将氨氮氧化去除。冬季最大日投加量达 60 t,日药剂费用高达 9 万元,运行成本激增。

2 生化池进水升温方案

常规工艺调控在极端低温下效果有限,化学强化处理成本高昂。完善管网系统虽为治本之策,但投资高、建设周期长,短期内见效缓慢。在此背景下,采用工程手段提升生化池进水温度成为保障出水稳定达标的现实选择。基于此,本节对生化池进水升温方案进行系统探究。

2.1 升温需求与热负荷计算

根据前述分析,厂区设计处理规模为 1.5 万 m³/d,冬季实际最低进水温度可降至 2 ℃。为保障生化系统稳定运行,需将生化池进水温度提升至设计温度为 12 ℃。理论热负荷计算方式如式(1)。

$$P_0 = Q \times \rho \times C_p \times \Delta T =$$

$$173.6 \times 1.0 \times 4.186 \times 10 \approx 7\,267 \text{ kW} \quad (1)$$

其中: P_0 ——理论热负荷,kW;

Q ——污水流量,173.6 L/s;

ρ ——污水密度,1.0 kg/L;

C_p ——污水比热容,4.186 kJ/(kg·℃),市政生活污水溶质质量分数极低,密度与比热容与清水近似;

ΔT ——升温温差,10 ℃(从 2 ℃ 升温至 12 ℃)。

考虑热损失等,实际所需热负荷约为 7 267 kW×1.1=7 994 kW≈8.0 MW。

2.2 热源方案比选

常用热源包括电锅炉、天然气锅炉、市政热网和工业蒸汽等。市政热网投资省,工业蒸汽成本低,均为优选方案,但本工程暂不具备使用条件。因此,可选热源为电锅炉和天然气锅炉。电锅炉热效率高(效率为 98%)、清洁环保,但运行成本高;天然气锅炉热效率为 85%~90%,运行成本较低。2 种方案的运行成本对比如表 2 所示。

表 2 热源方案运行成本对比
Tab. 2 Comparison of Operation Costs for Heat Source Options

热源类型	单位热量	热效率	能源单价	吨水能耗	吨水成本
电锅炉	3.6/(MJ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	95%	0.65/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	12.24/(kW·h)	7.96/(元·m ⁻³)
天然气锅炉	34.0/(MJ·m ⁻³)	85%	2.35/(元·m ⁻³)	1.45/m ³	3.40/(元·m ⁻³)

注:吨水成本按最不利条件(进水温度为 2 ℃,升温 10 ℃)计算;实际运行时,进水温度升高,运行成本降低;吨水能耗计算过程如式(2)。

$$E_c = \rho \times C_p \times \Delta T / (\eta \times Q_h) \quad (2)$$

其中: E_c ——吨水能耗;

η ——锅炉热效率;

$\rho \times C_p \times \Delta T$ ——每吨污水升温 10 ℃ 所需热量,取值为 41 860 kJ/m³;

Q_h ——单位热量。

由表 2 可知,采用天然气锅炉,升温成本为 3.40 元/m³,仅为电锅炉方案的 43%,经济性显著。从全生命周期角度进一步分析,2 种方案基础设备造价接近(天然气锅炉造价约为 180 万元,电锅炉造价约为 160 万元),但 8.0 MW 的电锅炉方案需要接引 10 kV 高压专线,电网增容隐性成本高昂,且审批与建设周期不可控。相比之下,该污水处理厂所在地天然气供应充足,进厂天然气管道已在施工,外部配套可控且便捷。综合建设成本与运行成本 2 方面考虑,本工程热源采用天然气锅炉。

2.3 升温方式

污水升温可通过间接加热或直接加热方式实现。间接加热是指通过换热器将热量传递给污水,热源与污水不直接接触;直接加热是指热源与污水直接接触进行热交换。

2.3.1 间接加热

浸没式蛇管换热器是将盘管沉浸在污水中,热媒在管内流动放热,污水在管外受热升温。根据热负荷计算,满足 8.0 MW 加热需求需设置 DN250 不锈钢换热盘管 2 000 m 以上。该方案安装固定困难、投资高,且盘管污垢难以清洗,长期运行传热效果显著下降,不具备工程实用性。板式换热器具有传热系数高、占地小等优点,但板片间距仅为 0.4~0.8 mm,污水中悬浮物(质量浓度为 150~300 mg/L)极易堵塞通道,一旦堵塞,板片拆卸清洗工作量极大。此外,污水中的钙、镁离子和腐蚀性物质会加速

板片结垢腐蚀,导致换热效率持续下降直至系统故障。因此,板式换热器不适用于污水加热。

2.3.2 直接加热

针对间接加热存在的效率低、易堵塞等问题,直接加热将热媒与污水接触换热,从根本上避免了上述缺陷。直接加热可采用热水或蒸汽作为热媒。

热水直接混合:热水显热密度低(热水自 100℃降温至 12℃过程中可释放显热约 368 kJ/kg),单位质量携带热量少。本工程 8.0 MW 热需求所需热量约 1 876 m³/d,相当于增加进水量约 13%,显著增大了系统水量负荷,不利于污染物去除,且需配套大容量热水制备系统,占地大、投资高。

蒸汽直接混合:利用蒸汽冷凝释放的汽化潜热与凝结水显热协同加热水体,达到升温目的。0.4 MPa 饱和蒸汽释放热量约为 2 680 kJ/kg,是热水直接混合升温效果的 7 倍以上,蒸汽用量少(约为 250 t/d,系基于含 10%热损失系数的实际热负荷 8.0 MW 计算得出),仅增加污水量约 2%,对后续处理影响极小,且系统紧凑,投资和运行成本显著降低。此外,蒸汽冷凝为近中性纯水,对污水 pH 的影响可忽略;污水升温后溶解氧的溶解度有所下降,可在后续曝气过程中补偿。因此,升温方式确定为汽水混合加热。

2.4 方案确定

基于前述分析,本工程确定采用“天然气锅炉供汽+汽水混合加热”的技术路线。热源方面,天然气锅炉运行成本(3.40 元/m³)仅为电锅炉的 43%,经济性显著,且厂区燃气供应条件已具备。升温方式方面,汽水混合加热换热效率极高(99%以上),系统简单可靠,从根本上避免了结垢、堵塞等维护难题,设备投资仅为间接换热的 40%~60%,年维护费用降低 70%以上。

3 生化池进水升温系统设计

3.1 系统总体设计

污水升温系统流程如图 3 所示。升温系统布置在沉砂池之后,利用格栅、沉砂池去除悬浮物和砂粒,降低对升温设备的磨损。采用旁路分流加热方式:在沉砂池出水管设置旁通管道,冬季将 50%污水引入加热系统,经提升泵送至汽水混合换热器,升温至 22℃后与另外未加热的 50%污水(2℃)混合,使全部污水达到 12℃。该方式使加热系统处理规模减半(处理规模为 7 500 m³/d),设备投资和占地

面积降低约 40%。加热点位于沉砂池出水管,蒸汽经文丘里混合器与污水充分混合冷凝后,由初沉池缓冲进入生化系统,进水温度稳定控制在 12℃,系统设有温度自动控制装置,不存在蒸汽直接接触生化池或引发热冲击的风险。本系统采用汽水直接混合加热方式,蒸汽冷凝水直接融入污水,无独立冷凝水回收路径。

3.2 主要 subsystem 设计

系统主要由污水提升系统、蒸汽供应系统、汽水混合系统和自动控制系统 4 部分组成。

污水提升系统:设置干式污水泵 3 台(2 用 1 备),单泵流量为 170 m³/h,扬程为 22 m,功率为 22 kW。出口设流量计和流量调节阀。

蒸汽供应系统:设置超低氮燃气蒸汽锅炉 2 台,额定蒸发量为 6 t/h,额定蒸汽压力为 1.25 MPa,实际工作压力为 0.4 MPa,温度为 152℃。每台换热器蒸汽管道设调节阀和检修阀,2 阀分开设置。考虑到该厂冬季极端最低气温可达-20℃,为保障锅炉稳定运行,设置专用锅炉房并配置采暖设施,确保燃烧环境温度相对恒定,有效规避室外低温对锅炉热效率的不利影响。

汽水混合系统:采用文丘里式汽水混合换热器 8 台(6 用 2 备),单台处理能力约为 50 m³/h。换热器利用文丘里效应形成负压,自动抽吸蒸汽进入混合腔与污水换热。污水经渐缩管流速增大,在末端形成负压区,高温蒸汽通过环形缝隙(≥10 mm)高速喷入,与污水充分接触。蒸汽冷凝释放热量,污水从 2℃升至 22℃,换热效率可达 99%以上。该设计抗堵塞能力强、结构简单可靠(无运动部件)。冬季防冻方面,本系统在进水温度低于 12℃时持续运行,管内污水和蒸汽持续流通,不存在静止积水,无冻结风险;系统停机时外部环境已相应回升,亦不具备冻结条件。

自动控制系统:出水管设温度传感器,实时监测温度。可编程控制器(PLC)控制单元根据设定温度(22±1)℃与实际温度偏差,通过 PID 算法调节蒸汽主管电动阀开度,控制蒸汽流量。电动阀旁设手动阀,故障时可切换手动控制。

4 升温运行实效

污水升温系统建成后,于当年冬季投入运行。根据运行管理要求,当进水温度低于 12℃时启动升

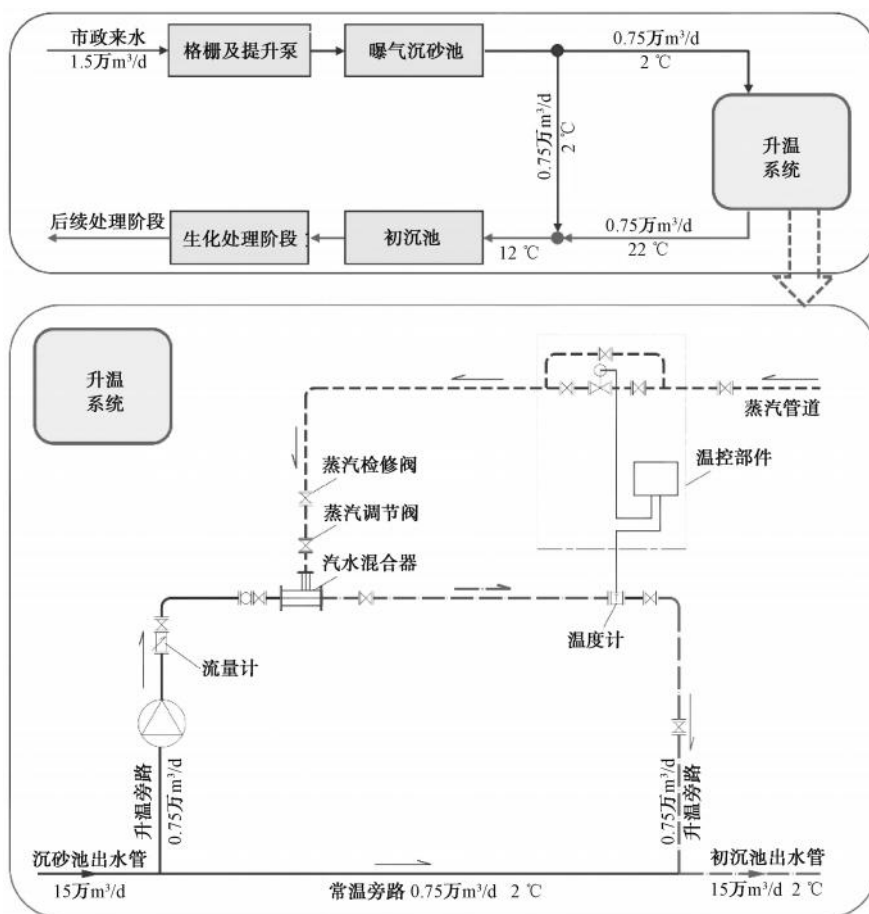


图3 污水升温系统示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Wastewater Heating System

温系统,自11月10日运行至次年3月29日,累计运行140 d。运行期间生化池水温及出水氨氮变化如图4所示。由图4可知,系统运行期间生化池水温稳定维持在12℃以上,满足设计要求;出水氨氮质量浓度稳定在3 mg/L以下,达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018)表1中的A标准要求(≤ 3 mg/L)。升温系统的投运有效解决了冬季低温导致的脱氮效率下降问题,保障了污水处理厂全年稳定达标运行。

5 技术经济分析

升温系统运行140 d,累计处理污水186.2万 m^3 。实际运行费用为411.09万元(天然气费为375.8万元、人工费为11.5万元、电费为7.5万元、锅炉维护费为7.6万元、工业盐费用为8.69万元),经营成本为2.21元/ m^3 。进一步计入固定资产折旧(总投资为419.96万元,折旧年限15年,残值率5%,直线法),年折旧额为26.6万元,折合吨水折旧费为0.14元/ m^3 ,包含折旧在内的总成本费用为

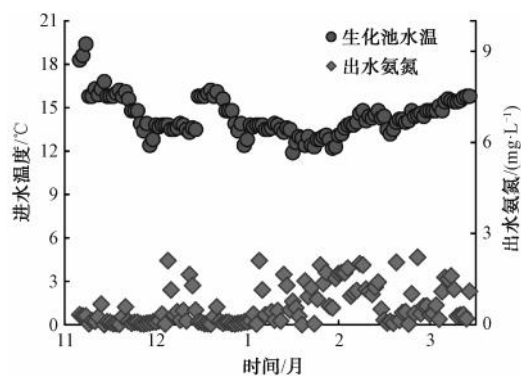


图4 升温系统运行期间生化池水温及出水氨氮

Fig. 4 Biochemical Tank Temperature and Effluent Ammonia Nitrogen during Heating System Operation

2.35元/ m^3 。

升温系统投运前,冬季为保证出水达标,采用投加次氯酸钠的化学法应急处理措施,单位成本为6.77元/ m^3 。相比之下,按总成本费用为2.35元/ m^3 计算,每吨污水节约4.42元,降低65.3%,单季累计节省综合费用为823万元。以替代次氯酸钠

方案的成本节约额作为收益,静态投资回收期约为 0.5 个运行季,经济效益显著。同时,升温方案从根本上解决了冬季低温对生物脱氮的影响,出水稳定达标,避免了大量投加次氯酸钠带来的余氯超标和环境风险,实现了经济效益与环境效益的双赢。

6 结论与展望

6.1 结论

本文针对北方寒冷地区污水处理厂冬季进水低温导致的脱氮效率下降问题,以陕西北部某污水处理厂为例,开展了进水升温改造工程的方案论证、设计与实践研究,得到以下结论:

(1)污泥含量调控、溶解氧提升、投加耐低温菌剂等常规措施在极端低温下效果有限,出水氨氮难以稳定达标。采用次氯酸钠应急处理虽可短期达标,但单位成本高达 6.77 元/ m^3 。

(2)“天然气锅炉+汽水混合加热”技术路线换热效率高(99%以上),系统简单可靠,无结垢堵塞问题,运行成本仅为电锅炉的 43%。设计采用 50%污水旁路分流加热方式,系统规模减半,设备投资和占地降低 40%。文丘里式换热器利用负压自动抽吸蒸汽,运行稳定,抗堵塞能力强,设备投资较间接换热降低 40%~60%。系统可通过独立调节旁路分流比例与蒸汽流量 2 个参数,灵活适应不同低温工况下的升温需求,运行灵活性强。

(3)系统运行 140 d,生化池水温稳定在 12℃以上,出水氨氮质量浓度稳定在 3 mg/L 以下,达标排放。污水升温成本为 2.21 元/ m^3 ,相较于次氯酸钠方案降低了 67.3%,每季度可节省 849 万元,同时从根本上解决了污水处理过程中的低温脱氮问题,避免了余氯超标等环境风险。

6.2 展望

进水升温有效解决了污水处理过程中的低温脱氮问题,但运行成本较高,已超过常规污水处理费用,是应对极端低温的不得已之举。从根本上看,完善污水收集系统才是治本之策。近年来,当地政府持续推进雨污分流改造和管网修复,冬季进水最低温度已从 2℃改善至 7℃以上,大幅降低了升温负荷与运行成本。随着管网不断完善,预计未来可逐步减少直至停用升温系统,实现低能耗、低碳化运行。升温系统停用后,锅炉系统将继续为厂区提供冬季供暖;遭遇极寒寒潮等极端工况时可作为应急

备用设施启用;若厂区未来规划污泥厌氧消化或热干化工程,本系统亦可直接作为优质热源接入。

本工程实践表明,污水升温是寒冷地区应对低温问题的有效过渡措施,但最终出路仍在于源头治理,实现污水处理的可持续发展。

参考文献

- [1] 王帆,李军,艾胜书,等. 三级 AO 耦合工艺低温污水处理脱氮机理[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1059-1067.
Wang F, Li J, Ai S S, et al. Analysis on denitrification mechanism of low temperature wastewater treatment by three-stage AO coupling process[J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1059-1067.
- [2] 郑人珩,杨开明,刘勇丽,等. 我国高寒地区城镇生活污水处理技术应用与强化措施[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(2): 427-435.
Zheng R H, Yang K M, Liu Y L, et al. Application and enhancement measures of urban domestic sewage treatment technology in alpine regions of China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(2): 427-435.
- [3] 高伟楠,田萌,李伟,等. 长期低温高水质浓度污水处理厂设计探讨[J]. 中国给水排水, 2025, 41(4): 62-68.
Gao W N, Tian M, Li W, et al. Discussion on design of wastewater treatment plant with high concentration wastewater in a long-term low temperature region [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(4): 62-68.
- [4] Xie Y D, Zhang Q H, Wu Q, et al. Advancing nitrogen removal in low-temperature sewage treatment: Role of the adaptive activated sludge process [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 504: 158887. DOI:10.1016/j.cej.2024.158887.
- [5] Ducey T F, Vanotti M B, Shriner A D, et al. Characterization of a microbial community capable of nitrification at cold temperature [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(2): 491-500.
- [6] Gilbert E M, Agrawal S, Karst S M, et al. Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(15): 8784-8792.
- [7] Liu X, Kim M, Nakhla G. Performance and kinetics of nitrification of low ammonia wastewater at low temperature [J]. Water Environment Research, 2018, 90(6): 498-509.
- [8] Zhou W T, Zhang Q, Wang B, et al. Temperature-based strategy for enhanced nitrogen removal in mainstream *via* selectively strengthening anammox or denitrification [J]. npj Clean Water, 2025, 8: 23. DOI:10.1038/s41545-025-00448-4.
- [9] 郭祥,郭新超,熊家晴,等. DO 和 C/N 对低温运行 A²/O-
MBR 脱氮除磷效能的影响研究 [J]. 环境工程, 2025, 43 (1): 118-124.
Guo X, Guo X C, Xiong J Q, et al. Effect of DO and C/N on nitrogen and phosphorus removal efficiency of A²/O-MBR at low temperature [J]. Environmental Engineering, 2025, 43 (1): 118-124.