

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.013

高速离子气浮预处理屠宰和肉类加工废水应用研究

林莉峰

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 屠宰和肉类加工废水TN、SS与油类含量较高,一般采用气浮作为预处理。常规溶气气浮在此类高浓度废水预处理中常需提高回流比以强化处理效果,导致能耗与运行成本升高,且难以满足稳定性与负荷削减的要求。某工业园区新建屠宰和肉类加工废水处理厂选用高速离子气浮工艺,通过中试并结合实际工程运行情况,分析了高速离子气浮和常规溶气气浮对屠宰和肉类加工废水的预处理效果。中试结果表明,高速离子气浮工艺出水水质优于常规溶气气浮,对COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、SS和油类的平均去除率分别为 $(72.6\pm 9.5)\%$ 、 $(56.1\pm 14.4)\%$ 、 $(35.3\pm 7.9)\%$ 、 $(96.7\pm 0.1)\%$ 、 $(95.7\pm 1.7)\%$ 和 $(99.6\pm 0.5)\%$ 。高速离子气浮的高溶气效率 (98.7%) 和产生的带电荷微纳米气泡可有效增强对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、SS和油类的去除效果,平均TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为常规溶气气浮的3.6和3.5倍,有利于后续生化系统的稳定运行。在 $3.5\text{万 m}^3/\text{d}$ 屠宰和肉类加工废水处理厂实际工程运行中,高速离子气浮的运行成本为 $2.67\text{元}/\text{m}^3$,仅为常规溶气气浮的 84.2% ,在满足预处理目标的同时具备较好的成本优势。

关键词: 提标改造; 高速离子气浮; 屠宰和肉类加工废水; 预处理工艺优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0086-06

Research on the Application of High-speed Ion Air Flotation for Slaughtering and Meat Processing Wastewater Pretreatment

LIN Lifeng

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Slaughtering and meat processing wastewater typically contains elevated TN, SS, and oils, while air flotation is always used for pretreatment. For such high-strength influents, conventional dissolved air flotation often relies on increased recycle ratios to intensify treatment, which raises energy consumption and operating costs while making it difficult to satisfy the stability and load-reduction requirements. Against this backdrop, a newly constructed wastewater treatment plant for slaughtering and meat processing wastewater treatment in an industrial park adopted a high-speed ion air flotation process. The pretreatment effect of high-speed ion air flotation and the original conventional dissolved air flotation on slaughtering and meat processing wastewater were compared through a pilot-scale experiment combined with a full-scale engineering. The high-speed ion air flotation has high pollutants removal efficiency for slaughtering and meat processing wastewater, and the average removal efficiency of COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP, SS, and oil were $(72.6\pm 9.5)\%$, $(56.1\pm 14.4)\%$, $(35.3\pm 7.9)\%$, $(96.7\pm 0.1)\%$, $(95.7\pm 1.7)\%$ and $(99.6\pm 0.5)\%$, respectively. The high dissolved air efficiency of 98.7% and the generation of charged

通信作者: 林莉峰 E-mail: linlifeng@smedi.com

micro-bubbles effectively enhanced the removal efficiency of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, COD, SS and oils. The average TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency in the high-speed ionic air flotation were 3.6 and 3.5 times as high as that of conventional dissolved air flotation, which is conducive to the stable operation of the subsequent biochemical system. During full-scale operation at the 35 000 m^3/d slaughtering and meat processing wastewater treatment plant, the operation cost of the high-speed ion air flotation unit was 2.67 CNY/ m^3 , which is 84.2% of that of conventional dissolved air flotation and indicates a clear cost advantage while meeting the pretreatment targets.

Keywords: upgrading and renovation; high-speed ion air flotation; slaughtering and meat processing wastewater; pretreatment process optimization

福建某屠宰和肉类加工园区原有4座小型废水处理厂,主要处理屠宰和肉类加工废水,该类废水含有大量的脂肪、蛋白质和纤维素,其含氮化合物丰富、油脂和SS浓度较高。其中,SS主要由易腐化有机物组成,必须在进入处理系统前加以拦截,以防管道、设备堵塞;油脂则会影响活性污泥的传质过程,降低后续生化处理效率。现新建一座规模为3.5万 m^3/d 的屠宰和肉类加工废水处理厂对该园区废水进行集中处理,以实现提标改造。新标准要求出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP等指标执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准,其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,即“准Ⅳ类”标准。

园区内原有小型污水处理厂设施陈旧,预处理工艺采用常规溶气气浮,为满足SS与油类出水控制要求,通常需要提高回流比,但会显著升高电耗与药耗,且常规溶气气浮对TN与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除能力有限,后续生物单元面临氮负荷与传质受抑的双重压力,成为系统稳定达标的关键。针对“准Ⅳ类”提标任务,新建污水处理厂引入高速离子气浮作为预处理核心单元。虽然理论上高速离子气浮在含油工业废水处理中具有良好的适用性,且在印染、制药等行业也有应用案例,但其对屠宰与肉类加工废水的实际处理效果尚不明确。为此,本研究开展高速离子气浮的中试与全规模工程验证,系统评估其对主要污染物的去除效果及运行经济性,并与常规溶气气浮对照,论证其作为提标改造预处理单元的适用性与优势。

1 气浮工艺及其运行原理

1.1 常规溶气气浮和高速离子气浮

气浮工艺通过微小气泡上浮捕捉水中悬浮物、

胶体和油脂,实现固液分离,达到净化目的。在各类气浮方式中,常规溶气气浮因稳定性高、操作简便而应用广泛。该工艺核心设备为压力溶气罐和减压阀,通过加压溶气和减压释放生成气泡,仅靠压力差完成溶气过程[见图1(a)],应用范围广,运行稳定,维护简单方便,且具有剩余污泥量少、节约预处理成本的特点^[1]。但在预处理高油脂、高悬浮物浓度的屠宰与肉类加工废水时,该工艺存在溶气效率低、气泡粒径大、能耗高等局限^[2]。

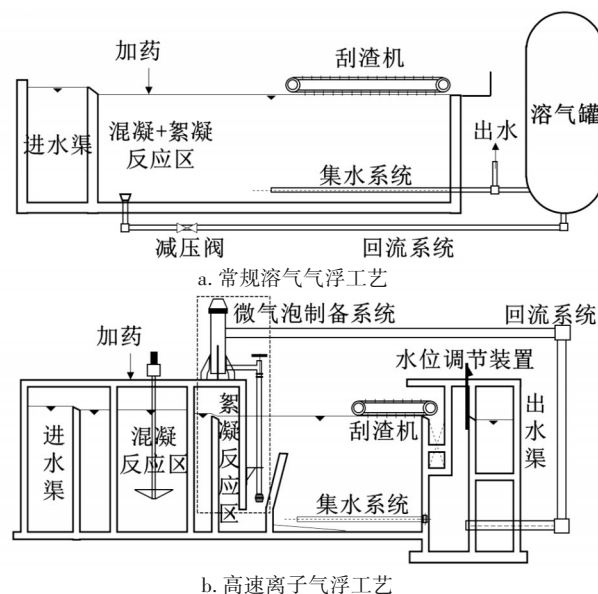


图1 常规溶气气浮与高速离子气浮工艺结构对比

Fig.1 Structure comparison of the conventional dissolved air flotation and high-speed ion air flotation processes

高速离子气浮在常规溶气气浮基础上进行优化,集成高速混凝装置与微气泡制备系统[见图1(b)],具备更高的溶气效率、更强的颗粒吸附性能和更低的运行能耗,尤其适用于油脂和有机物含量高、水质波动大的工业废水预处理。然而,目前关

于高速离子气浮在屠宰与肉类加工废水中的应用研究尚不充分,其实际运行效果和适用性有待进一步验证。

1.2 气浮工艺运行原理

1.2.1 溶气系统

研究表明,溶气系统的能耗约占常规溶气气浮总能耗的50%,溶气和气体释放是决定气浮设备能耗高低的关键。常规溶气气浮选用的压力溶气罐空气溶解率低,溶气效率通常为80%~90%,静态溶气过程仅靠压力差完成,受溶气压力的影响大且能耗较高^[3]。高速离子气浮选用微气泡制备系统,其电耗低至0.01 kW·h/m³,而回流比仅需3%~5%。为研究不同工作压力对高速离子气浮和常规溶气气浮溶气效率的影响,在进水量为273.2 m³/h、温度为15.5~18.1℃、压力为0.20~0.50 MPa运行条件下进行溶气效率测定试验。在相同运行参数下,两套系统稳定运行30 min,记录空压机工作完成时(即在高压状态下)的压力和再次工作启动时的压力(即高压后的任一低压状态),根据空压机停止工作后至再次启动的时间间隔计算溶气效率[见式(1)]^[4]。改变溶气罐运行压力后再次重复上述试验,可得到高速离子气浮与常规溶气气浮的溶气效率对比结果(见图2)。

$$\eta = \frac{\alpha}{7500kP} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为溶气效率,%; α 为实际气体释放量,mL/L; k 为亨利常数; P 为溶气罐压力,MPa。

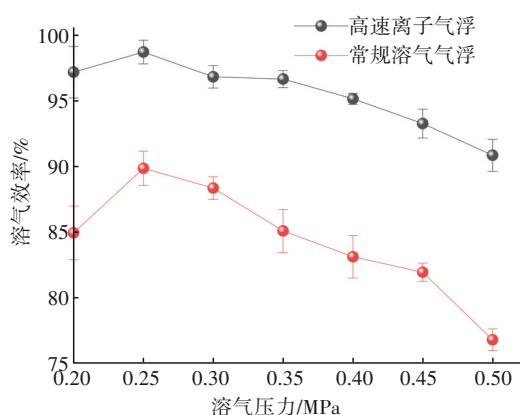


图2 不同气浮工艺的溶气效率对比

Fig.2 Comparison of dissolved air efficiency of different air flotation processes

由图2可知,在溶气压力为0.20~0.25 MPa范围内,高速离子气浮与常规溶气气浮溶气效率均上

升,其中高速离子气浮溶气效率最高为98.7%,比该压力下常规溶气气浮溶气效率高8.8个百分点。随着溶气压力继续增至0.50 MPa,高速离子气浮溶气效率逐渐降至90.1%。这是由于较高压力下空气传递效率出现“收益递减”现象,较大的压差使释压与管路局部过饱和导致的提前析气/自由气夹带显著增强,等效为释气量增加,其增幅超过溶解度增益,溶气效率反向下下降,曲线出现单峰拐点。式(1)同样表明,当 α 随 P 增长更快时, η 将下降,形成两曲线“先升后降”的现象。由于高速离子气浮的微气泡制备与相分离装置降低了管路阻力与自由气夹带,其释气量相对更小,因此在0.20~0.50 MPa压力范围内,高速离子气浮的溶气效率始终高于常规溶气气浮,较高的溶气效率保证了高速离子气浮对污染物的高效去除能力。

1.2.2 气体释放系统

常规溶气气浮通过加压(300~500 kPa)向清水或回流的出水溶入压缩空气^[1],再通过释压器减压释放,使水中溶解的空气以气泡形式析出,产生的气泡直径为10~100 μm 。在屠宰和肉类加工废水等高浓度污染废水的预处理过程中,常规溶气气浮需要通过增加回流比等措施增加气泡量,以满足生物系统对油类和悬浮物浓度的处理要求,这是常规溶气气浮预处理高浓度污染废水时成本大幅上升的主要原因^[5]。在实际运行过程中,管路复杂、易堵塞和操作工序烦琐等问题同样会导致常规溶气气浮预处理成本增加。高速离子气浮选用的微气泡制备系统可通过相分离装置将水气混合物裂变出3~7 μm 的带电荷气泡云团,其尺度与表面电性共同发挥作用。一方面,气泡特征直径减小显著增大单位体积比界面面积并延长气泡在水中的停留时间,降低上升过程的摩擦阻力与滑移损失,从而提高与油滴、细小悬浮物及蛋白/血红素等的碰撞-黏附-卷吸概率;另一方面,带电气泡与经混凝调控后的颗粒/胶体之间形成有利的 ζ 电位差,削弱双电层排斥、促进界面脱稳,使亲水性胶体脱稳并与絮体共同上浮。在群体尺度上,微气泡因较高的拉普拉斯(Laplace)压力与界面弹性不易并团与滞留,可持续维持“气泡云团”弥散分布,减少管路局部提前析气与堵塞,从而在处理高污染屠宰和肉类加工废水时无需通过提高回流比来补气即可获得更高的去除效率与更低的能耗。这使得高速离子气浮的曝气系统不

易堵塞,操作简单,可长时间连续运行,且预处理高浓度污染废水时无需增大回流比,大幅降低设备运行能耗。

1.2.3 气泡技术

常规溶气气浮工艺产生的普通气泡通常肉眼可见,高速离子气浮则可以获得具有极强表面活性和吸附能力的微纳米气泡^[6]。微纳米气泡可以迅速与悬浮颗粒结合,使得出水浊度降至0.5 NTU,同时还能够达到95%以上的油脂去除率,大幅提升气浮效率^[2]。在一定体积下,微纳米气泡的比表面积理论上比普通气泡的100倍,与污水中杂质和污染物

充分接触可提高预处理效果。已有研究证明,当微纳米气泡大量存在时,极易通过吸附细颗粒(<13 μm)和超细颗粒(<5 μm)增强分离效率^[5,7]。

2 实际预处理效果对比

2.1 常规溶气气浮预处理效果评估

该污水处理厂内原有4座常规溶气气浮池,单座气浮区面积12 m²,设计流量260 m³/h,设计表面负荷21.7 m³/(m²·h),泥斗60°,污泥泵2台,溶气气浮机1台。混凝区和絮凝区分别投加FeCl₃、聚丙烯酰胺(PAM)和NaOH,投加量分别为1.6、0.02、0.6 kg/m³。常规溶气气浮池进、出水污染物指标见表1。

表1 常规溶气气浮池设计和实际进、出水水质对比

Tab.1 Comparison of design and actual influent and effluent quality for conventional dissolved air flotation

指标		COD	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	油类
气浮池进水	设计值	2 700	750	<80	<120	35	600
	实际值	1 878±357	553±128	72.5±11.3	88.2±15.8	10.6±3.7	172.9±34.5
气浮池出水	设计值	1 200	200	70	100	5	5~15
	实际值	1 040±182	172±23	65.1±13.7	74.3±18.5	0.4±0.1	10.8±2.9

由表1可知,中试期间污水处理厂内原有的常规溶气气浮池进水指标满足设计要求。常规溶气气浮池对TP的去除效果较好,出水TP<0.5 mg/L,满足设计出水水质要求。NH₄⁺-N和TN没有明显去除效果,平均去除率分别为(8.9±2.3)%和(13.7±3.4)%。这是因为气浮池进水TN主要为溶解态NH₄⁺-N(占比约82.2%),而常规溶气气浮主要去除胶体和颗粒态污染物,仅可通过吸附和共沉淀效应去除少量溶解态污染物。常规溶气气浮工艺对COD、SS和油类的去除率较低,这将极大影响后续生化处理效率。生化系统进水COD浓度过高易引起异养菌与硝化菌争夺溶解氧,导致硝化效率降低^[8]。油类附着在污泥絮体表面,影响氧的传质效果,同样会影响硝化效率^[9]。而气浮出水SS通常含有大量无机颗粒物,易在长期运行过程中堆积于生化系统内,影响系统的稳定性。原有常规溶气气浮设备出水水质难以满足排放要求,将影响整体工艺出水的达标排放,因此需更换气浮工艺以应对较高的进水NH₄⁺-N、SS和油类负荷。

2.2 高速离子气浮中试预处理效果评估

H500型高速离子气浮中试设备1组,长6.5 m,宽3.0 m,高4.0 m,水力停留时间12 h,预处理水量由271 m³/d逐渐增至738 m³/d,表面负荷为0.58~

1.58 m³/(m²·h),投加药剂分别为41%的FeCl₃溶液、30%的NaOH溶液和PAM,投加量分别为0.76、0.72、0.008 kg/m³。高速离子气浮中试进水为未经格栅和隔油池预处理的屠宰和肉类加工废水,预处理效果见图3。

高速离子气浮对各类污染物指标均表现出较好的去除效果,出水COD、TN、NH₄⁺-N、TP、SS和油类的平均浓度分别为(510.9±85.4)、(53.2±4.7)、(34.9±6.0)、(0.3±0.1)、(86.8±7.7)和(0.6±0.02) mg/L,平均去除率分别为(72.6±9.5%)、(56.1±14.4)%、(35.3±7.9)%、(96.7±0.1)%、(95.7±1.7)%、(99.6±0.5)%。高速离子气浮设备对TP的去除效果略高于常规溶气气浮,预处理出水TP接近“准Ⅳ类”标准的排放要求(<0.3 mg/L)。高速离子气浮对TN的去除率较好,前4天去除率为(70.2±3.7)%,受TN组成成分影响,后4天去除率仅为(45.6±6.7)%,但高于常规溶气气浮的TN去除率。高速离子气浮对NH₄⁺-N的去除率较高,中试期间NH₄⁺-N平均去除率达(35.3±7.9)%,为常规溶气气浮NH₄⁺-N平均去除率的3.5倍。高速离子气浮产生的带电荷微纳米气泡对以铵根离子形式(NH₄⁺)存在的NH₄⁺-N有一定吸附能力,这将减轻后续生物处理系统进水NH₄⁺-N负荷。相比于常规溶气气浮设

备,高速离子气浮设备更有利于后续生化处理系统的稳定运行。

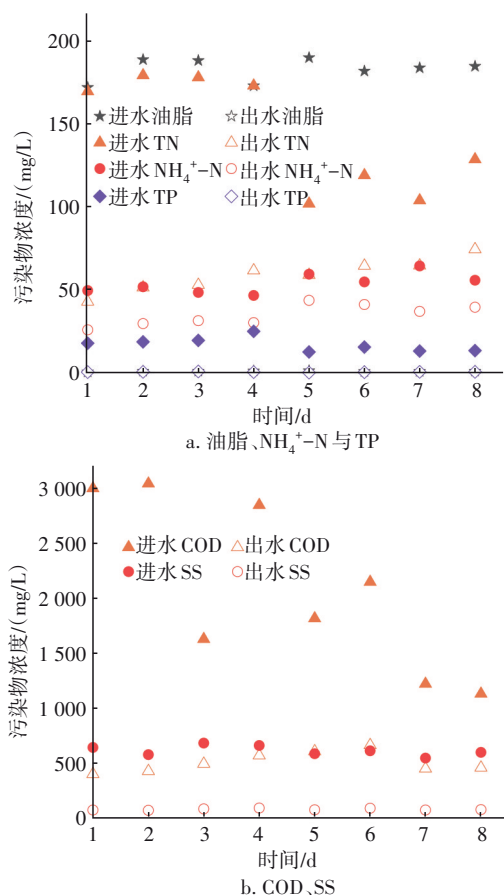


图3 高速离子气浮进、出水水质

Fig.3 Water quality of influent and effluent in high-speed ion air flotation

表2 高速离子气浮对污染物的去除效果

Tab.2 Removal effect of high-speed ion air flotation on various pollutants

mg/L

指标	COD	SS	NH_4^+-N	TN	TP	油类
平均进水	2 515±273	1 338.2±359.9	83.5±28.6	113.5±31.0	35.9±12.3	383.2±223.7
平均出水	701±82	98.1±40.9	66.8±8.7	82.2±18.9	0.5±0.2	2.6±1.3
污水处理厂总出水	22±8	0.3±0.04	0.8±0.3	5.7±1.1	0.20±0.03	0.4±0.1

在实际工程运行中,高速离子气浮同样表现出对屠宰和肉类加工废水的高效预处理能力。TP去除率最高达到99.4%,高速离子气浮联合后续生物处理和深度处理可保证总出水TP始终满足“准Ⅳ类”标准。在工程运行中,高速离子气浮对TN和 NH_4^+-N 的平均去除率高于常规溶气气浮的中试结果,分别为(28.3±6.7)%和(19.6±3.9)%,该结果再次验证高速离子气浮对TN和 NH_4^+-N 具有较好的去除效果。高速离子气浮出水COD/TN为7.5~10.1,且屠宰和肉类加工废水可生化性较好,后续生物处

3 高速离子气浮工程应用效果及成本分析

3.1 处理效果

为进一步验证高速离子气浮在实际工程应用中,对屠宰和肉类加工废水的预处理效果,进行了60 d的运行效果验证,废水总处理量3.5万 m^3/d 。高速离子气浮池分为4组,每组池壁内侧宽6.00 m,絮凝搅拌区内侧长2.50 m,曝气反应区内侧长14.50 m,池壁厚度0.25 m,池高4.45 m,运行水位平均高度为3.08 m,设计絮凝反应时间5 min。主要设备涉及混凝搅拌反应机、絮凝搅拌反应机及气浮成套设备,以及配套的气浮溶气设备、刮渣机等。

该系统配套有氯化铁加药泵6台($Q=300\text{ L/h}$, $H=30\text{ m}$, $N=0.40\text{ kW}$),流量计13个(De25 mm, 1.0 MPa, 0.11~11.3 m^3/h), FeCl_3 卸料泵2台($Q=30\text{ m}^3/\text{h}$, $H=10.5\text{ m}$, $N=1.5\text{ kW}$), FeCl_3 搅拌机2台(转速60 r/min,叶轮直径1 500 mm, $N=2.2\text{ kW}$),PAM制备装置2台(三槽式连续制备系统,溶解箱容积3 000 L, $N=3.7\text{ kW}$),PAM投加泵6台($Q=1.63\text{ m}^3/\text{h}$, $P=0.3\text{ MPa}$, $N=2.2\text{ kW}$),NaOH投加泵3台($Q=300\text{ L/h}$, $H=30\text{ m}$, $N=0.40\text{ kW}$),电动单梁悬挂起重机1台(起质量2 t,跨度5 m),加药清洗泵1台($Q=10\text{ m}^3/\text{h}$, $H=36\text{ m}$, $N=3.0\text{ kW}$),翻板液位计3套(0~6 m, 4~20 mA)。实际工程运行过程中各种药剂投加量与中试一致。由于实际进水水质波动较大,进、出水各污染物浓度为每日等时间间隔取样平均值,运行结果如表2所示。

理过程中无外加碳源。对于常规溶气气浮难以有效预处理的SS和油类,高速离子气浮对其去除率分别高达(92.7±1.8)%和(99.4±0.9)%。该园区屠宰和肉类加工废水经高速离子气浮联合三级AO生物池和高效磁混凝沉淀池处理后,新建污水处理厂出水各项水质指标均满足“准Ⅳ类”标准要求。

3.2 预处理成本分析

高速离子气浮工艺的运行成本主要包括药剂费和电费,其中 FeCl_3 、PAM和NaOH的市场价分别为1 700、33 520和1 680元/t,药剂投加成本为2.57

元/ m^3 ;电耗为 $0.13 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,按照当地工业用电价格为 $0.7 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计,则电费为 $0.09 \text{ 元}/\text{m}^3$;总预处理成本为 $2.67 \text{ 元}/\text{m}^3$,仅为原常规溶气气浮预处理成本($3.17 \text{ 元}/\text{m}^3$)的 84.2% ,运行成本显著降低。

4 结论

① 中试和工程应用结果均表明,高速离子气浮设备对屠宰和肉类加工废水的去除效果优于常规溶气气浮工艺,高达 98.7% 的高溶气效率和 $3\sim 7 \mu\text{m}$ 带电荷微纳米气泡云团,使其具备较高的TN和 NH_4^+-N 去除能力,同时还解决了常规溶气气浮工艺对SS和油类去除率较低的问题,满足后续处理要求。

② 高速离子气浮工艺的预处理成本仅为常规溶气气浮工艺的 84.2% ,具有降低运行成本、保证整体运行工艺的稳定性 and 增强污染物去除能力的优势。屠宰和肉类加工废水经高速离子气浮预处理、三级AO生化处理和高效磁混凝处理后,各项出水指标均可稳定满足“准IV类”标准要求。

参考文献:

- [1] WANG C, LÜ Y L, SONG C, et al. Separation of emulsified crude oil from produced water by gas flotation: a review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 845: 157304.
- [2] 刘云奎. 净水厂气浮单元的系统性工艺优化及技术改造[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 101-105.
LIU Y K. Process optimization and technological upgrading of air flotation unit in a waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 101-105(in Chinese).
- [3] 何才昌. 高速气浮在伊朗大型海水淡化工程的应用[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 141-146.
HE C C. Application of high-speed air flotation in large seawater desalination project in Iran[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 141-146(in Chinese).
- [4] 张怡青,陈家庆,丁国栋,等. 3种内筒溢流型溶气罐结构改进设计方案的溶气性能对比分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 4088-4098.
ZHANG Y Q, CHEN J Q, DING G D, et al. Comparison and analysis of dissolved gas performance of three improved design schemes of internal cylinder overflow type dissolved gas tank[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(12): 4088-4098 (in Chinese).
- [5] RAJAPAKSE N, ZARGAR M, SEN T, et al. Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution, bubble size and rise velocity in dissolved air flotation: a review [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 289: 120772.
- [6] JIA J G, ZHU Z X, CHEN H, et al. Full life circle of micro-nano bubbles: generation, characterization and applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471: 144621.
- [7] 刘联胜,屈惠茹,霍鑫鹏,等. 基于气泡雾化喷嘴的低能耗含油污水处理试验研究[J]. 工业水处理, 2024, 44(4): 105-112.
LIU L S, QU H R, HUO X P, et al. Experimental study on oily wastewater treatment with low energy consumption based on effervescent atomizer [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(4): 105-112 (in Chinese).
- [8] LEON S, DE LÉON G E L, AZIZAN A, et al. Availability of carbon sources on the ratio of nitrifying microbial biomass in an industrial activated sludge[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 129: 133-140.
- [9] 王庆吉,胡景泽,孙秀梅,等. 石油石化含油废水混凝气浮处理系统研究进展[J]. 工业水处理, 2024, 44(3): 45-56.
WANG Q J, HU J Z, SUN X M, et al. Research progress of coagulation air flotation treatment system for petroleum and petrochemical wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(3): 45-56(in Chinese).

作者简介:林莉峰(1981—),男,上海人,硕士,高级工程师,主要研究方向为废水处理工程应用。

E-mail:linlifeng@smedi.com

收稿日期:2025-07-29

修回日期:2025-10-13

(编辑:丁彩娟)