

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.014

污水处理厂微孔曝气器污染特征及曝气性能恢复

丁心雅¹, 蒋路漫¹, 李晶², 张鸣³, 黄晓俊², 陈琪炜²,
赵剑文², 周振¹

(1. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 上海城投污水处理有限公司
白龙港污水处理厂, 上海 201203; 3. 上海竹园第二污水处理厂, 上海 200137)

摘要: 为探究材质对微孔曝气器在长期运行中累积的污染物特征及氧传质性能的影响,选取运行多年的高密度聚乙烯(HDPE)和三元乙丙橡胶(EPDM)微孔曝气管进行分析。由于污染物在微孔曝气管表面及气孔内聚集,HDPE和EPDM管的氧传质效率分别下降26.7%和6.4%;压力损失分别增至新管的1.25和2.97倍。经机械擦洗后EPDM管的曝气性能几乎恢复到和新管相当的水平;而由于HDPE管的污染物大多沉积于气孔内部,无法通过机械擦洗得到有效去除,经化学清洗后其曝气性能得到较大改善,但仍无法恢复至原先水平。HDPE管的物理不可逆污染占比更高,原因在于其孔径较大,无机污染物容易在孔内沉积,而且其运行时间较长,不断累积的可逆污染物逐渐转化为物理不可逆污染。HDPE管的物理可逆、化学可逆和不可恢复污染分别占35.8%、42.8%和21.4%,EPDM管的物理可逆和物理不可逆污染分别占52.9%和47.1%。蛋白质是HDPE管有机污染物的主要成分,而总细胞是EPDM管有机污染物的主要成分,这是由于微生物会将EPDM膜中的软化剂作为碳源吸收利用,生长繁殖加快,因此EPDM膜表面的生物污染加剧。

关键词: 微孔曝气器; 污染特征; 曝气性能; 氧传质效率; 污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0091-08

Fouling Characterization and Aeration Performance Recovery of Fine-pore Diffuser in Wastewater Treatment Plants

DING Xin-ya¹, JIANG Lu-man¹, LI Jing², ZHANG Ming³, HUANG Xiao-jun²,
CHEN Qi-wei², ZHAO Jian-wen², ZHOU Zhen¹

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Bailonggang Wastewater Treatment Plant, Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 201203, China; 3. Shanghai Zhuyuan Second Wastewater Treatment Plant, Shanghai 200137, China)

Abstract: To investigate the effects of fine-pore diffuser material on foulant accumulation and oxygen transfer performance during long-term operation, high-density polyethylene (HDPE) and ethylene propylene diene monomer (EPDM) fine-pore diffuser tubes that had been in operation for several years were selected for comparative analysis. Due to the accumulation of foulants on the surface and inside the pores of fine-pore diffuser tubes, the oxygen transfer efficiencies of HDPE and EPDM tubes decreased by

基金项目: 国家自然科学基金资助青年项目(51808332)

通信作者: 蒋路漫 E-mail: jiangluman@shiep.edu.cn

26.7% and 6.4%, respectively, while the pressure losses increased to 1.25 times and 2.97 times that of the new tubes, respectively. After mechanical scrubbing, the aeration performance of the EPDM tube was almost restored to the level of a new tube. Furthermore, since most contaminants in the HDPE tube were deposited inside the pores, they could not be effectively removed by mechanical scrubbing. Although chemical cleaning significantly improved aeration performance, it still could not restore the performance to the original level. The HDPE tube exhibited a higher proportion of physically irreversible fouling, primarily due to its larger pore size, which facilitated the deposition of inorganic contaminants within the pores. Additionally, prolonged operation led to the gradual transformation of initially reversible fouling into physically irreversible forms. The physically reversible, chemically reversible and irrecoverable fouling of HDPE tube accounted for 35.8%, 42.8% and 21.4%, respectively, while for the EPDM tube, the physically reversible and physically irreversible fouling accounted for 52.9% and 47.1%, respectively. Proteins were the main component of organic pollutants in the HDPE tube, while total cells were the main component of organic pollutants in the EPDM tube. This was because microorganisms absorbed and utilized the softener in the EPDM membrane as a carbon source, promoting their growth and reproduction, and exacerbating the biofouling on the surface of the EPDM membrane.

Key words: fine-pore diffuser; fouling characterization; aeration performance; oxygen transfer efficiency; wastewater treatment

作为市政污水处理厂(WWTP)活性污泥工艺的关键步骤,曝气供氧不仅能提供充足的氧气以维持微生物基本生命活动,而且可使污泥保持悬浮状态,吸附并去除污染物。曝气还是污水处理厂能耗最高的单元,占全厂总能耗的45%~75%^[1],因此,曝气系统的性能直接影响污水处理厂的处理效果和运行成本^[2-3]。曝气设备是曝气系统的重要元部件,微孔曝气器因其较高的氧传质效率(OTE)在市政污水处理厂最为常用。然而,在长期运行过程中,污染物不可避免地在曝气器表面和气孔内部逐渐积累,为保证出水水质,需设置鼓风机提供额外的风量,造成能耗上升。此外,污染导致气孔堵塞程度加剧和曝气器材质变化^[3-4],曝气器元件的压力损失(DWP)会随着运行时间的延长而增加^[5],鼓风机的出口风压增大,进一步造成能源浪费^[3]。

微孔曝气器表面及气孔内部累积的污染物包括生物污染、有机污染和无机污染。有机污染由有机物的吸附沉淀及微生物分泌物的沉积形成;无机污染一般为多价阳离子形成的化学沉淀,如金属氧化物^[2]。根据能否被物理清洗去除,污染物又可分为物理可逆污染和物理不可逆污染^[6]。物理可逆污染可通过简单的机械擦洗等物理方式去除,这类污染物松散地附着在微孔曝气器表面。物理不可逆

污染无法通过物理清洗去除,需进行更彻底的化学清洗^[7]。物理不可逆污染中,可进一步通过化学清洗去除的污染物为化学可逆污染^[8];而经化学清洗也无法去除的污染则为不可恢复污染^[9]。

目前,国内采用的微孔曝气器包括传统的三元乙丙橡胶(EPDM)等橡胶材质和高密度聚乙烯(HDPE)等新型材质。HDPE曝气器的布气层是通过将熔融聚合物包覆在内层输气管上形成的,气孔孔径约为 (4.0 ± 0.5) mm,具有良好的化学、机械和抗冲击性能,使用年限长,但其孔径大小不一,分布不均匀,污染物容易在气孔内沉积^[10]。EPDM材质柔性高,由机械切口打孔,曝气器单位面积孔数较多,气泡直径更小(最小可达0.5 mm),且橡胶膜亲水性较好,有利于气泡形成^[10-11];但微生物更倾向于在EPDM材质表面附着生长^[12],以其中的软化剂为基质^[13];同时软化剂的消耗会使曝气器材质变硬,最终导致其疲劳损坏、使用寿命缩短。因此,有必要探明两种材质微孔曝气器的污染物累积规律,以及由此导致的氧传质效率和压力损失的变化。

笔者以两座工艺条件相似的市政污水处理厂运行多年后更换的微孔曝气器为研究对象,对曝气器污染物进行分层提取和表征分析,以明晰污染物的主要成分;在此基础上,评价清洗手段对微孔曝

气器氧传质效率恢复情况的影响,以期对微孔曝气系统的长期优化稳定运行提供基础数据和技术参考。

1 材料与方

1.1 污水处理厂简介

两座污水处理厂位于上海市,均以厌氧-缺氧-

好氧(AAO)作为主体工艺。污水处理厂 A 采用旋流沉砂池+传统 AAO+高效纤维滤池+紫外线消毒工艺,污水处理厂 B 采用曝气沉砂池+传统 AAO+高效沉淀池+紫外线消毒工艺,出水水质均稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。具体设计及运行参数见表 1。

表 1 污水处理厂 A、B 设计及运行参数

Tab.1 Design and operating parameters of WWTP A and B

项目	污水处理厂 A	污水处理厂 B	项目	污水处理厂 A	污水处理厂 B
处理能力/(m ³ ·d ⁻¹)	3.0 × 10 ⁵	2.5 × 10 ⁵	厌氧池水力停留时间/h	1.5	2.2
进水 BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	165	160	缺氧池水力停留时间/h	2.7	4.3
进水 COD/(mg·L ⁻¹)	270	360	好氧池水力停留时间/h	7.1	10.2
系统设计泥龄/d	12.5	16.8	有效水深/m	7	6
MLSS/(mg·L ⁻¹)	4 000	3 000	单管风量/(m ³ ·h ⁻¹)	15	12~14

1.2 曝气器污染物提取及表征分析

实验所用微孔曝气器为 A 厂采集的管式 HDPE 微孔曝气器(Ecopolemer,乌克兰)和 B 厂采集的管式 EPDM 微孔曝气器(EDI-FlexAir,美国),两者照片见图 1。HDPE 旧管运行时长为 10 年,尺寸 D×L=120 mm×1 000 mm,孔径为(4±0.50) mm,可产生 2~5 mm 的微气泡。EPDM 旧管运行时长为 3 年,尺寸 D×L=91 mm×1 003 mm,可产生 1.0~1.2 mm 的微气泡,气泡直径最小可达 0.5 mm。

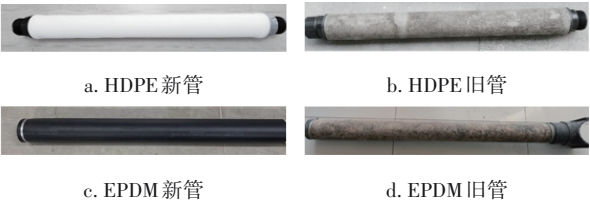


图 1 实验所用管式微孔曝气器照片

Fig.1 Photos of fine-pore diffusers used in the experiment

将 HDPE 旧管和 EPDM 旧管分别从好氧池取出,放置在保鲜膜上,使用去离子水冲洗曝气管表面。对曝气管进行机械擦洗,即用火烤过的刀片刮下附着在曝气器表面的污染物。

为进一步研究污染对微孔曝气管氧传质性能的影响,对 HDPE 管进行化学清洗,即将机械擦洗后的 HDPE 管分别采用 5% 的 HCl 和 5% 的 NaClO 溶液浸泡 24 h。将旧管、机械擦洗后以及化学清洗后的微孔曝气器置于 60 ℃烘箱(XMTS-6000 型)中干燥 60 h,对其表面进行扫描电子显微镜(SEM, JSM-7800F, 日本)微观观察、能量色散 X 射线光谱仪(EDX, 牛津仪器,英国)分析、共聚焦激光扫描显微

镜(CLSM, TCS SP8, 德国)观察。HCl 浸泡后的清洗溶液经 0.45 μm 滤膜过滤,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP, ICPS-7510, 日本)对其中的多价阳离子(包括 Ca、Mg、Al 和 Fe 离子等)进行定量分析。由于 HCl 和 NaClO 会使 EPDM 管的膜片变性、老化,因此未对 EPDM 管进行化学清洗。将 EPDM 管裁剪为 5 cm×5 cm 的膜片,并采用 HCl 浸泡,对浸泡后清洗溶液中的多价阳离子进行定量分析。

1.3 曝气器氧传质性能测试装置与方法

微孔曝气器的氧传质性能按照《微孔曝气器清水氧传质性能测定》(CJ/T 475—2015)进行测试,测试装置见图 2。

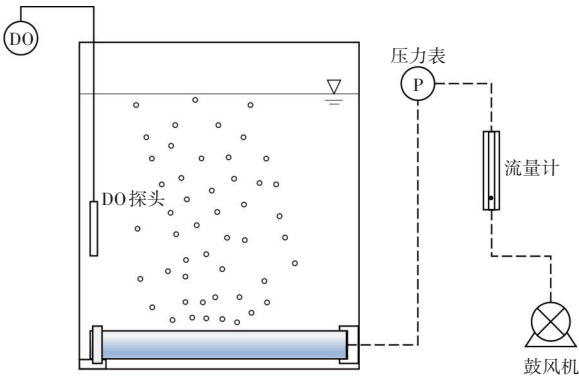


图 2 微孔曝气器氧传质性能测试装置示意

Fig.2 Schematic diagram of the testing device for oxygen transfer performance of fine-pore diffusers

装置为不锈钢结构,尺寸为 1.2 m×0.3 m×1.4 m,两侧设置有机玻璃视窗。采用金属支架将微孔曝气器固定在装置底部中间位置,浸没深度为 1.0 m,采用多参数水质分析仪(哈希 HQ30D,美国)实时

监测水中溶解氧(DO)浓度,以无水亚硫酸钠为消氧剂,氯化钴为催化剂,压力表数据即为微孔曝气器的压力损失值(DWP,kPa)。对测量结果进行温度、盐度和DO修正,使用标准化后的氧传质效率(SOTE,%)作为评价指标^[14]。

鼓风机的能耗与供风量、出口风压均相关,这两个参数分别受微孔曝气器SOTE和DWP影响,因此采用曝气能耗指标 $J(\text{kPa} \cdot \text{h/g})$ ^[15],即曝气器SOTE和DWP的综合效果来评估微孔曝气器性能,定义为每传递单位质量氧,微孔曝气器所要克服的压力损失。根据微孔曝气器DWP/SOTE与供风量线性回归拟合的斜率求得 J ,具体见下式:

$$\frac{\text{DWP}}{\text{SOTE}} = J \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \hat{y}_{\text{O}_2} \cdot \text{AFR} \quad (1)$$

式中:AFR为供风量, m^3/h ; ρ_{air} 为空气密度,20℃时取 $1.29 \times 10^3 \text{ g/m}^3$; $\hat{y}_{\text{O}_2}$ 为空气中氧气的含量,取 $0.23 \text{ gO}_2/\text{g}$ 空气。

2 结果与分析

2.1 新、旧及清洗后微孔曝气管氧传质性能

图3为不同供风量下微孔曝气管的SOTE和DWP。

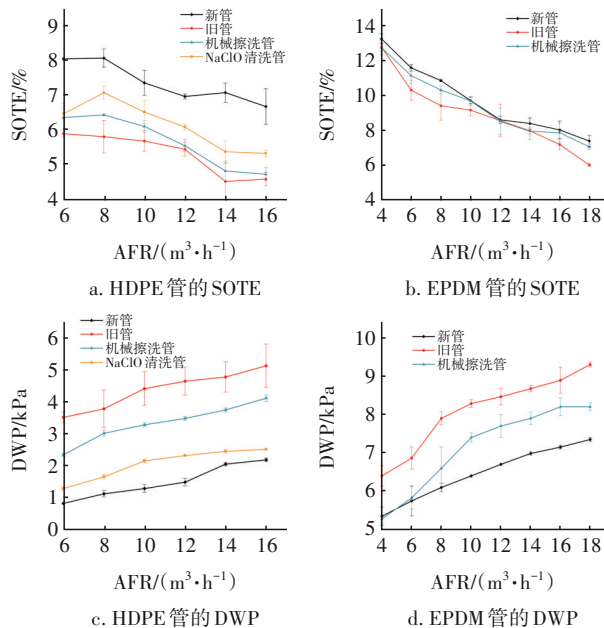


图3 不同供风量下微孔曝气管的SOTE和DWP

Fig.3 SOTE and DWP of fine-pore diffusers at different AFRs

由图3(a)、(b)可知,HDPE新管和EPDM新管的SOTE分别为 $(7.36 \pm 0.53)\%$ 和 $(9.68 \pm 1.84)\%$ 。EPDM管形成的气泡直径更小,比表面积更大,气液

传质接触面积及停留时间增加,因此SOTE更高^[10-11]。两种曝气管的SOTE均随AFR增大而下降,这是因为AFR增大会增加气泡产生的数量及气泡的初始速度,导致气泡碰撞加剧从而形成更大的气泡,不利于氧从气相向液相转移^[16-17]。EPDM管的SOTE随AFR增大而下降的趋势较HDPE管更加明显,原因在于HDPE曝气器的气孔为刚性孔,不会因AFR的变化而改变;而EPDM曝气器的气孔为柔性孔,气孔因AFR增大而张开,形成更大的气泡,进一步降低SOTE。

长期运行后,HDPE管的SOTE降至 $(5.39 \pm 0.62)\%$,下降率为26.7%,主要是由于污染物累积使气孔堵塞,减少了可产生气泡的有效气孔数量。机械擦洗使HDPE管的SOTE提升至 $(5.59 \pm 0.66)\%$,性能恢复并不显著,可能由于HDPE管的污染物除了附着于表面,还有较多沉积于气孔内,难以通过机械擦洗清除^[18-19]。Jiang等^[15]研究发现,NaClO能有效去除HDPE管的污染物,恢复其曝气性能。经NaClO清洗后,HDPE管的SOTE恢复至 $(6.14 \pm 0.63)\%$,为新管的83.4%,仍无法恢复至新管的水平,这是由于随着微孔曝气器运行时间的延长,污染物会紧密附着成为曝气器材质的一部分,改变气孔结构,阻塞气流逸出,增大气泡并聚几率,使气泡的比表面积和停留时间减小,从而阻碍氧气的传递^[4,20]。同时,污染会导致曝气器布气不均,整体性能下降。

EPDM旧管的SOTE降至 $(9.06 \pm 1.75)\%$,下降率为6.4%。除污染物累积导致的气孔堵塞外,生物污染消耗材质中的软化剂,使曝气器材质硬化,变形的气孔无法恢复原状,产生的气泡直径变大,导致SOTE降低^[19,21]。机械擦洗可使EPDM管的SOTE提升至 $(9.47 \pm 1.87)\%$,几乎恢复到与新管相当的水平,说明EPDM管的污染物松散地附着于曝气管表面,机械擦洗即可去除大部分污染物。

由图3(c)、(d)可知,EPDM新管的DWP为 $(6.47 \pm 0.66) \text{ kPa}$,远高于HDPE新管的DWP $[(1.47 \pm 0.49) \text{ kPa}]$,这是由于EPDM管的气孔孔径比HDPE管小,因此气泡挤压通过时受到的阻力更大^[10-11]。长期运行后,HDPE旧管的DWP增至 $(4.36 \pm 0.56) \text{ kPa}$,为新管的2.97倍。DWP的升高与气孔堵塞程度和材质改变均有关。机械擦洗使HDPE管的DWP降至新管的2.25倍,NaClO清洗则

使其降至 (2.04 ± 0.45) kPa,为新管的 1.39 倍,再次说明 HDPE 管上的污染物大多沉积于气孔内部,无法通过机械擦洗得到有效去除,需使用 NaClO 清洗恢复其曝气性能。EPDM 旧管的 DWP 增至 (8.10 ± 0.94) kPa,为新管的 1.25 倍,机械擦洗后降至新管的 1.10 倍。

图 4 为微孔曝气管 DWP/SOTE (记作 DWP') 随 AFR 的变化。

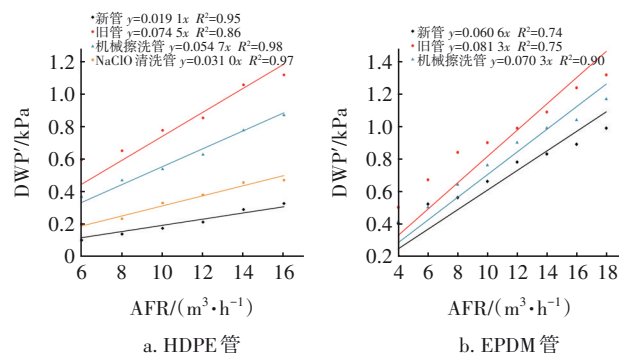


图 4 微孔曝气管 DWP' 随 AFR 的变化

Fig.4 Change in DWP' of fine-pore diffusers with AFR

采用线性回归方程拟合 DWP' 与 AFR,通过斜率得到能耗参数 J 。HDPE 新管和 EPDM 新管的 J 分别为 0.064 和 0.204 $kPa \cdot h/g$,说明每传递单位质量的氧气,EPDM 管需克服的压力损失更大。运行至更换时,HDPE 管和 EPDM 管的 J 分别增至 0.251 和 0.274 $kPa \cdot h/g$ 。曝气器污染导致压力损失升高,可能会影响鼓风机的安全运行。机械擦洗后,HDPE 管和 EPDM 管的 J 分别降至 0.184 和 0.237 $kPa \cdot h/g$ 。根据 J 的变化可以对微孔曝气器的污染物进行定量分析^[15]。旧管与机械擦洗管的 J 差值由物理可逆污染引起,机械擦洗管与新管的 J 差值由物理不可逆污染引起^[7];机械擦洗管与化学清洗管的 J 差值由化学可逆污染引起^[15],而化学清洗管与新管的 J 差值由不可恢复污染引起^[22]。图 5 为微孔曝气管能耗参数 J 的变化。

由图 5 可知,HDPE 管的物理可逆和物理不可逆污染分别占总污染的 35.8% 和 64.2%,其中化学可逆和不可恢复污染分别占 42.8% 和 21.4%;EPDM 管的物理可逆和物理不可逆污染分别占 52.9% 和 47.1%。不可恢复污染在曝气器使用初期并不会出现,但会随使用时间的延长而逐渐增加,并最终决定曝气器的使用寿命。因此,需制订合理的清洗计划,减缓污染物由可逆向不可逆的转变,最大程度

地减少不可恢复污染的累积^[12,21]。

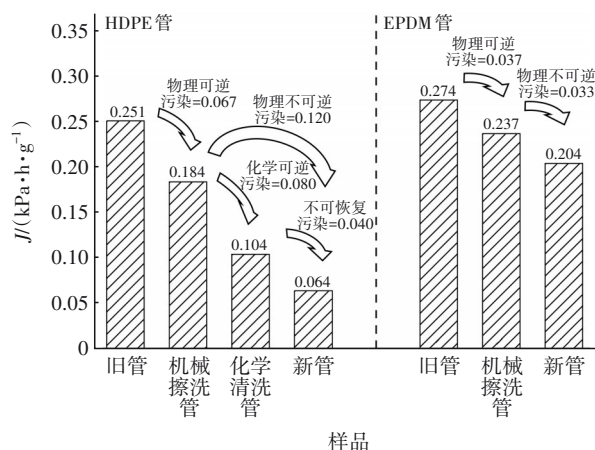


图 5 微孔曝气管能耗参数 J 的变化

Fig.5 Change in energy consumption parameter J of fine-pore diffusers

2.2 新、旧及清洗后微孔曝气管 SEM 观察

图 6 为新、旧及机械擦洗后曝气管表面的 SEM 照片。HDPE 新管的多孔结构清晰可见,而 EPDM 新管表面光滑、切口平整。运行数年后,曝气管表面形态均发生显著变化,凹凸不平的杆状、块状污染物将表面完全覆盖,气孔周围和内部均存在污染物聚集,阻碍氧传质并增大曝气管压力损失^[10,13]。机械擦洗后,EPDM 管表面的污染物几乎均得到去除,但气孔内仍被污染物堵塞;而 HDPE 管表面的污染物厚度减小,但气孔仍被污染物覆盖。

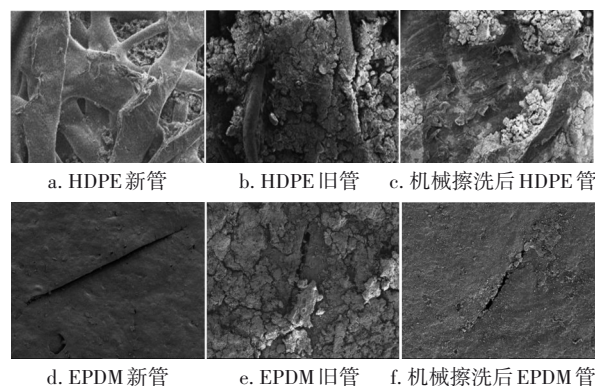


图 6 微孔曝气管 SEM 照片

Fig.6 SEM photos of fine-pore diffusers

2.3 新、旧及清洗后微孔曝气管无机污染分析

采用 EDX 进一步分析微孔曝气管表面的主要元素组成,结果如表 2 所示。在 HDPE 管和 EPDM 管表面均检测到碳、氧、铁、硅和钙,HDPE 管中还含有镁元素,EPDM 管还含有铝元素。推测 HDPE 管的

无机污染物为二氧化硅、碳酸钙、碳酸镁和磷酸铁,而EPDM管则为二氧化硅和氧化铝^[23],这些无机沉淀物由城镇污水和活性污泥中所含的无机离子在曝气器表面的浓度达到饱和后生成^[7]。对微孔曝气管进行机械擦洗后,其表面的无机元素与旧管之间差别较小,说明机械擦洗不能有效去除曝气管表面的无机污染物。Kim等^[2]发现,在长时间运行后,无机污染物会被有机污染物覆盖,紧密附着在微孔曝气管的表面和气孔内,难以通过机械擦洗的方式去除。

表2 旧的和清洗后的曝气器表面元素组成EDX分析结果

Tab.2 Analysis results of elemental composition on the surfaces of used and cleaned diffusers determined by EDX %

项目		C	O	Ca	Fe	Mg	Al	Si
HDPE管	旧管	44.37	42.54	1.12	6.59	1.62	0	2.48
	机械擦洗	63.58	29.03	0.95	4.23	0.72	0	0.77
	HCl清洗	80.22	18.87	0	0	0	0	0
EPDM管	旧管	62.23	25.27	1.43	1.94	0	2.26	3.40
	机械擦洗	77.91	16.55	0.71	0.37	0	1.66	2.05
	HCl清洗	77.61	14.54	0	0	0	0	0

HCl清洗后,微孔曝气管表面的金属离子被全部去除。HCl腐蚀掉部分覆盖在曝气管表面的有机物后,穿透有机物层与金属离子发生反应^[5],通过中和与分解双重作用去除无机沉淀物^[7]。对浸泡曝气管的HCl清洗液进行ICP分析,并由此计算曝气管中无机污染物的含量。HDPE管的Ca、Mg和Fe含量分别为18.00、1.62和13.90 mg/cm²,而EPDM管的Ca、Al和Fe含量分别为9.55、1.61和3.38 mg/cm²。

2.4 新、旧及清洗后微孔曝气管有机污染分析

为了能够定量考察微孔曝气器有机污染物的分布,采用Image J软件计算CLSM显微照片中总细胞、多糖和蛋白质分别所占的生物体积与基质覆盖率,以平均值作为最终结果(见图7)。

由图7(a)可知,蛋白质和总细胞分别是HDPE管和EPDM管有机污染物的主要成分,总体积最高可达 7.66×10^5 和 $7.02 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ 。EPDM管的总细胞量为HDPE管的2.5倍,与Garrido-Baserba等^[24]的结果一致。Garrido-Baserba等^[12]发现,旧EPDM曝气器的总DNA浓度比其他材质的曝气器高。Wanger等^[13]发现,当微生物附着于EPDM管后,如果周围环境中有机底物含量较少,微生物则会转而使用EPDM

膜中的软化剂。微生物可将软化剂作为碳源吸收利用,加快生长繁殖,从而加剧EPDM膜表面的生物污染。EPDM管的多糖和蛋白质含量远低于HDPE管,可能由于B厂的污泥龄高于A厂,造成胞外聚合物(EPS)的浓度降低^[25]。作为EPS的主要成分,微生物分泌的蛋白质和多糖成为A厂HDPE管表面有机污染物的重要来源^[15,26]。

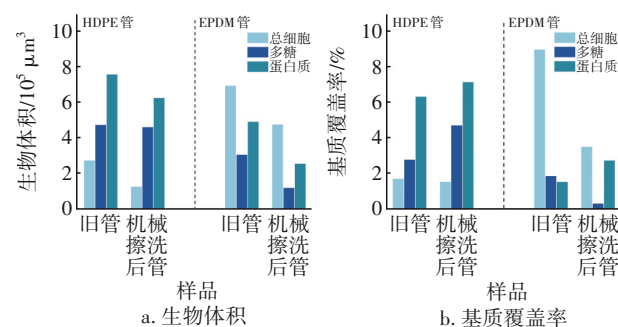


图7 旧管和清洗后曝气管的生物体积和基质覆盖率

Fig.7 Bio-volume and substrate coverage of used and cleaned diffusers

机械擦洗后,HDPE管的总细胞、多糖和蛋白质分别降低 1.49×10^5 、 0.13×10^5 和 $1.33 \times 10^5 \mu\text{m}^3$,EPDM管则分别降低 2.20×10^5 、 1.88×10^5 和 $2.38 \times 10^5 \mu\text{m}^3$,说明机械擦洗在一定程度上可以减少有机污染。但机械擦洗后,HDPE管上多糖和蛋白质的基质覆盖率由2.75%和6.28%增至4.67%和7.09%[见图7(b)],这是由于EPS具有较高的黏性^[13],机械擦洗反而使HDPE管上的蛋白质、多糖和无机污染物在曝气器表面的分布范围更广、覆盖面积更大,这可能是机械擦洗对HDPE管曝气效率恢复没有显著作用的主要原因。

经NaClO清洗后,HDPE管的总细胞、多糖和蛋白质分别降低 2.34×10^5 、 3.42×10^5 和 $4.53 \times 10^5 \mu\text{m}^3$,去除效率明显高于机械擦洗。NaClO将有机污染物的官能团氧化成酮基、醛酸基和羧基,这些官能团可增加其母体化合物的亲水性,减少污染物对曝气器的黏附;污泥絮体和胶体可被氧化剂进一步分解为细颗粒和溶解性有机物^[7]。

3 结论

① HDPE新管和EPDM新管的SOTE分别为 $(7.36 \pm 0.53)\%$ 和 $(9.68 \pm 1.84)\%$ 。EPDM管的SOTE随AFR增大而下降的趋势比HDPE管更明显,这是因为HDPE曝气器的气孔为刚性孔,不会因AFR的变化而改变;而EPDM曝气器的气孔为柔性孔,气孔

因AFR增大而张开,形成更大的气泡,进一步降低SOTE。

② 由于污染物在微孔曝气管表面及气孔内聚集,HDPE管的氧传质效率下降26.7%,压力损失增至新管的2.97倍。由于HDPE管的污染物大多沉积于气孔内部,机械擦洗效果并不显著。经化学清洗后,HDPE管的SOTE恢复至新管的83.4%,DWP降至新管的1.39倍,曝气性能得到较大改善,但污染物沉积导致其无法恢复至原先水平。HDPE管的物理可逆、化学可逆和不可恢复污染分别占35.8%、42.8%和21.4%。

③ 长期运行后,EPDM管的氧传质效率下降6.4%,压力损失增至新管的1.25倍。经机械擦洗后,EPDM管的曝气性能几乎恢复到和新管相当的水平,说明EPDM管的污染物松散地附着于曝气管表面,机械擦洗即可去除大部分污染物。EPDM管的物理可逆和物理不可逆污染分别占52.9%和47.1%。

④ 蛋白质是HDPE管有机污染物的主要成分,而总细胞是EPDM管有机污染物的主要成分。这是由于微生物将EPDM材质中的软化剂作为碳源吸收利用,生长繁殖加快,因此EPDM材质曝气器表面的生物污染加剧。

参考文献:

- [1] ROSSO D, STENSTROM M K. Comparative economic analysis of the impacts of mean cell retention time and denitrification on aeration systems[J]. *Water Research*, 2005, 39(16): 3773-3780.
- [2] KIM Y K, BOYLE W C. Mechanisms of fouling in fine-pore diffuser aeration [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1993, 119(6): 1119-1138.
- [3] KALIMAN A, ROSSO D, LEU S Y, *et al.* Fine-pore aeration diffusers: accelerated membrane ageing studies [J]. *Water Research*, 2008, 42(1): 467-475.
- [4] ROSSO D, LARSON L E, STENSTROM M K. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art[J]. *Water Science & Technology*, 2008, 57(7): 973-978.
- [5] 陈柳宇, 孙东奇, 蒋路漫, 等. 微孔曝气管化学清洗及曝气效率恢复[J]. *上海电力学院学报*, 2020, 36(1): 67-70, 77.
CHEN Liuyu, SUN Dongqi, JIANG Luman, *et al.*

Chemical cleaning and aeration efficiency recovery of fine-pore diffuser tube [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2020, 36(1): 67-70, 77 (in Chinese).

- [6] TSUYUHARA T, HANAMOTO Y, MIYOSHI T, *et al.* Influence of membrane properties on physically reversible and irreversible fouling in membrane bioreactors[J]. *Water Science & Technology*, 2010, 61(9): 2235-2240.
- [7] WANG Z, MA J, TANG C Y, *et al.* Membrane cleaning in membrane bioreactors: a review [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 468(13): 276-307.
- [8] 熊雪君, 徐慧, 吴晓晖, 等. 二沉池出水有机物表征及膜污染机理分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(6): 1272-1281.
XIONG Xuejun, XU Hui, WU Xiaohui, *et al.* Characterization of organic matters in secondary effluent and investigation of membrane fouling mechanism [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(6): 1272-1281 (in Chinese).
- [9] 陈柳宇. 微孔曝气系统传氧效率规律研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2020.
CHEN Liuyu. Analysis on the Oxygen Transfer Efficiency of Fine-pore Aeration System [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2020 (in Chinese).
- [10] 周鹏飞. 污水处理厂微孔曝气器选型的探讨[J]. *四川环境*, 2013, 32(2): 37-41.
ZHOU Pengfei. Discussion of selecting microporous aerator in sewage treatment plant [J]. *Sichuan Environment*, 2013, 32(2): 37-41 (in Chinese).
- [11] 梁远, 王佳伟, 李洁, 等. 微孔曝气器充氧性能变化对污水处理厂能耗的影响[J]. *给水排水*, 2011, 37(1): 42-45.
LIANG Yuan, WANG Jiawei, LI Jie, *et al.* Influence of oxygenation capacity of bubble aerator on energy consumption in wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(1): 42-45 (in Chinese).
- [12] GARRIDO-BASERBA M, ASVAPATHANAGUL P, PARK H D, *et al.* Impact of fouling on the decline of aeration efficiency under different operational conditions at WRRFs [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639(8): 248-257.
- [13] WAGNER M, HOESSLE R V. Biological coating of EPDM-membranes of fine bubble diffusers [J]. *Water*

- Science & Technology, 2004, 50(7): 79–85.
- [14] BAILLOD C R, EDWIN L B, HENRY H B, *et al.* Standard Guidelines for In-process Oxygen Transfer Testing[M]. Reston: ASCE Publishing, 1997: 1–49.
- [15] JIANG L M, CHEN L, ZHOU Z, *et al.* Fouling characterization and aeration performance recovery of fine-pore diffusers operated for 10 years in a full-scale wastewater treatment plant[J]. Bioresource Technology, 2020, 307(6): 123–135.
- [16] 李小冬, 齐鲁, 刘国华, 等. 通气量对微孔曝气器充氧性能影响的中试研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(5): 81–84.
- LI Xiaodong, QI Lu, LIU Guohua, *et al.* Impact of airflow rate on oxygen mass transfer in a pilot-scale fine bubble aeration system[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(5): 81–84(in Chinese).
- [17] 尹训飞, 范海涛, 齐鲁, 等. 通气量及曝气密度对微孔曝气器充氧性能影响的中试研究[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 27–30, 121.
- YIN Xunfei, FAN Haitao, QI Lu, *et al.* Pilot study on influence of air flow rate and diffuser density on oxygenation performance of fine-pore diffuser in aeration system[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(7): 27–30, 121(in Chinese).
- [18] 贾荣畅, 刘颖, 朱燕, 等. 微孔曝气器孔径与运行气量对微孔曝气氧传质的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(8): 75–79.
- JIA Rongchang, LIU Ying, ZHU Yan, *et al.* Effect of pore diameter and air flow rate on oxygen mass transfer in fine pore aeration [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(8): 75–79(in Chinese).
- [19] ODIZE V O, NOVAK J, ROSSO D, *et al.* Reverse flexing as a physical/mechanical treatment to mitigate fouling of fine bubble diffusers [J]. Water Science & Technology, 2017, 76(7): 1595–1602.
- [20] GILLOT S, CAPELA-MARSAL S, ROUSTAN M, *et al.* Predicting oxygen transfer of fine bubble diffused aeration systems—model issued from dimensional analysis[J]. Water Research, 2005, 39(7): 1379–1387.
- [21] ROSSO D, LIBRA J A, WIEHE W, *et al.* Membrane properties change in fine-pore aeration diffusers: full-scale variations of transfer efficiency and headloss [J]. Water Research, 2008, 42(10/11): 2640–2648.
- [22] ROSSO D, STENSTROM M K. Economic implications of fine-pore diffuser aging [J]. Water Environment Research, 2006, 78(8): 810–821.
- [23] SHIRAZI S, LIN C J, DONG C. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes—a critical review [J]. Desalination, 2010, 250(1): 236–248.
- [24] GARRIDO-BASERBA M, ASVAPATHANAGUL P, MCCARTHY G W, *et al.* Linking biofilm growth to fouling and aeration performance of fine-pore diffuser in activated sludge [J]. Water Research, 2016, 90(3): 317–328.
- [25] DREWS A, VOCKS M, IVERSEN V, *et al.* Influence of unsteady membrane bioreactor operation on EPS formation and filtration resistance [J]. Desalination, 2006, 192(1): 1–9.
- [26] 李云辉. 长期运行期间微孔曝气系统氧传质效率的影响因素及污染控制[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 28–34, 61.
- LI Yunhui. Influencing factors and fouling of oxygen mass-transfer efficiency for fine-bubble aeration system during long-term operation [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 28–34, 61(in Chinese).

作者简介: 丁心雅(1999–), 女, 河南南阳人, 硕士, 主要研究方向为污水处理。

E-mail: dingxy@mail.shiep.edu.cn

收稿日期: 2024-03-24

修回日期: 2024-05-25

(编辑: 沈靖怡)