

引用格式:杨天宇,吴恒,邢志林.生物反应器在有色冶金废水处理中的应用[J].有色设备,2024,38(4):27-33.

YANG Tianyu, WU Heng, XING Zhilin. Application of bioreactor in nonferrous metallurgical wastewater treatment [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 27-33.

生物反应器在有色冶金废水处理中的应用

杨天宇¹, 吴恒^{2,3*}, 邢志林³

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 重庆理工大学 化学化工学院, 重庆 400054)

[摘要] 有色冶金废水浓度高、污染物复杂,排放前必须经过有效处理。生物反应器是常用的有色冶金废水处理设备,但是有关不同反应器的研究进展缺乏总结、比较。通过文献计量分析指出了生物反应器研究概况,并明确生物反应器属于未来的热点技术之一。此外,对3种具有代表性的生物反应器膜生物反应器(Membrane bioreactor, MBR)、移动床生物膜反应器(Moving bed biofilm reactor, MBBR)、生物滤池(Biological filter, BF)进行系统性综述和比较,提出了各自的适用场景、强化措施和未来研究方向。本文系统总结了MBR、MBBR和BF的特点,为有色冶金废水实际处理中装置选择提供了参考依据。

[关键词] 冶金污染; 生物反应器; 废水处理; MBR; MBBR; BF

[中图分类号] X758 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)04-0027-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.005

0 引言

随着有色冶金工业飞速发展,相应的污染物排放量也逐渐递增^[1]。由于有色金属冶炼过程存在多个用水工序,导致了大量废水产生,包括设备冷却水、设备冲洗水、湿法冶金废水等^[2]。另外,部分工业园区并未将生活排污区与工业排污区分开,生活污水与工业污水一并排放^[3]。因此,有色冶金废水污染物成分复杂、浓度高、排放量大,排放之前必须进行有效处理。

在废水处理过程中,相比于费用高昂的物理化学技术,生物技术更具有可持续性^[4]。其主要依赖于功能微生物的富集、代谢,采用固定设备为微生物提供稳定的生长环境,实现污染物去除^[5]。常用的

有色冶金废水生物处理设备是生物反应器,其主要包括膜生物反应器(Membrane bioreactor, MBR)^[6]、移动床生物膜反应器(Moving bed biofilm reactor, MBBR)^[7]、生物过滤器(Biological filter, BF)^[8]等。然而,截至目前,生物反应器在冶金废水处理领域的研究概况缺乏论述,研究短板暂不清晰;由于运行条件、结构设计等因素的差异,不同生物反应器对微生物固定化效果存在差异,各生物反应器应用特点缺乏比较,适用场景不够明确;生物反应器在应对高浓度有色冶金废水时微生物代谢活性削减,需要采取措施进行强化,但相关的强化措施缺乏关注。

基于此,本文通过文献计量分析介绍了生物反应器的研究概况,指出了需要关注的问题;通过比较不同生物反应器的应用特点,讨论了各自的适用场景;根据生物反应器各自的研究现状,强调了其改进措施和发展方向。本文系统性综述了生物反应器的研究概况、适应场景、强化措施,可以为实际有色冶金废水处理提供参考。

1 有色冶金废水特征及生物反应器文献研究概况

文献中报道的有色冶金废水金属浓度特征总

[收稿日期] 2024-06-12

[第一作者] 杨天宇(2003—),男,云南普洱人,大学本科,主要研究方向为环境监测。

[通信作者] 吴恒(1997—),男,四川南充人,博士研究生,主要研究方向为污水与固废资源化。

[基金项目] 重庆市教委技术研究项目(KJQN202201131);重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX0540)。

结如下,常见参数为镉 50 ~ 150 mg/L、镍 100 ~ 300 mg/L、铅 20 ~ 34.5 mg/L,另外,汞、铜、锌、铬质量浓度略低,为 23.8 ~ 50 mg/L^[9-12]。为了准确分析生物反应器在有色冶金废水处理领域的研究概况,在知网检索文献后,利用所得数据进行文献计量分析。首先,检索有色金属废水主题,获得 3 350 篇文献,根据年份作图。图 1 显示了从 2003—2023 年有色冶金废水领域的研究热度,文献数量大幅增加,特别是在 2015 年,表明该领域受到较多关注。进一步地,检索了关键词为有色金属废水和生物反应器的文章,获得 193 篇文献,根据年份作图。如图 2 所示,2003—2023 年相关研究数量总体呈增加态势,表明该领域也是研究热点,值得关注。其中,在检索到的文献中,基础研究缺乏关注。

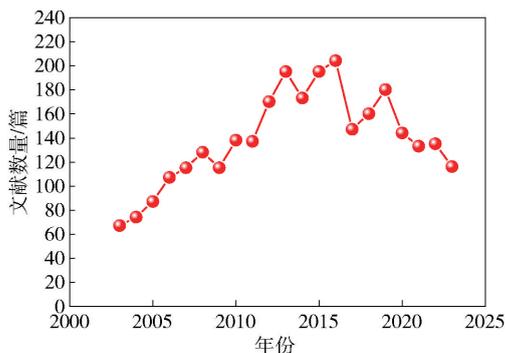


图 1 基于时间序列的有色冶金废水文献数量变化

Fig. 1 Changes in the number of literatures on non-ferrous metallurgical wastewater treatment based on time sequence

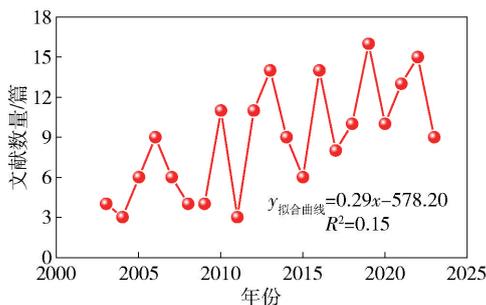


图 2 基于时间序列的生物反应器文献数量变化

Fig. 2 Changes in the number of bioreactor literature in non-ferrous metallurgical wastewater treatment based on time sequence

2 生物反应器特点与应用

2.1 MBR 反应器

MBR 反应器主要由填料、外壳两部分组成,其主要特点为占地面积小、处理效果稳定,结构如图 3 所示。MBR 中的膜组件可为微生物提供稳定的附着、生长环境,形成生物膜后,通过自身的吸附作用、代谢作用去除废水中的污染物^[13],但是,低曝气量导致其对于高浓度氨氮、化学需氧量 (Chemical oxygen demand, COD) 的去除效果不佳,特别是在面对高浓度重金属废水时,容易出现微生物系统崩溃。代表性的高浓度废水有有色冶金废水,如钨冶炼废水,其无机盐含量、氨氮浓度及钨浓度均很高^[14],MBR 难以高效处理。戚小忠等^[15]发现,通过不断驯化,可以逐渐增加 MBR 运行负荷,并有效提高其耐受性和处理效果。罗玲等^[16]采用 0.5% 盐度梯度逐渐驯化,最终在盐度 3.0%、COD 180 ~ 220 mg/L、氨氮 30 ~ 50 mg/L 条件下去除了 85% 的 COD 和 80% 以上的氨氮。这些研究表明驯化策略可有效提高重金属耐受性。另外,通过耦合活性污泥法,构建同时硝化和反硝化 (Simultaneous nitrification and denitrification, SNDMBR) 机制也是一种有效措施。吴昆泽等^[17]研究了 SNDMBR 对钨冶炼废水的处理效果,发现在 As^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{6+} 质量浓度分别为 12.25 ~ 12.50 mg/L、0.4 ~ 0.6 mg/L、1.5 mg/L、0.32 mg/L、0.01 mg/L 的胁迫条件下,进水氨氮浓度为 258 ~ 342 mg/L 时,SNDMBR 可去除 70% 的氨氮。但是,需要注意的是,活性污泥的加入会导致 MBR 中的膜组件污染加重。短期运行膜污染中 91.7% 为沉积物;长期运行后,凝胶极化阻力

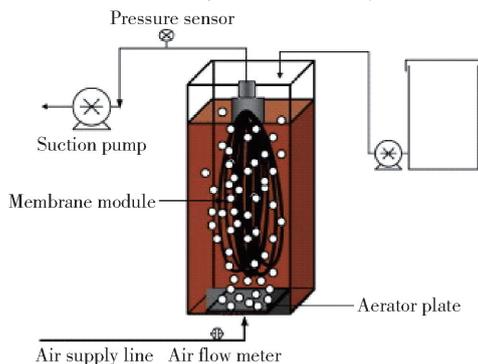


图 3 MBR 结构示意图^[22]

Fig. 3 Diagram of MBR structure^[22]

和内部污染阻力略有增加,膜污染主要成分仍是沉积物,占据 80% 以上^[18]。由此建议采用曝气清洗 + 超声波清洗 + NaClO 清洗 + NaOH 清洗 + HCl 清洗的措施对膜组件进行周期性清洗,膜组件透过率可恢复 91.2%^[18-19]。然而,仅仅提高耐受性不足以大规模应用,这些废水中除了氨氮、COD 之外,还有大量重金属需要去除。钒等有色金属冶炼废水使用大量铵盐作为沉淀剂,导致废水中有毒重金属与氨氮共存。Li 等^[20]对 MBR 进行改进,提出了膜生物膜反应器(Membrane biofilm reactor, MBfR),当初始浓度为 10 mg/L,对钒和氨氮的去除率分别达到(96.8 ± 0.8)%和(75.4 ± 1.2)%。进一步地,Yan 等^[21]提出了一种在以硫为基础的自养系统中同步生物消除钒酸盐和氨氮的新方法,在 24 h 内成功去除(96.7 ± 2.2)%的钒和(99.4 ± 0.8)%的氨氮,将钒转化为沉淀,将硫氧化为硫酸盐。该系统内,硫元素氧化、氨氮氧化和钒协同代谢的微生物机制如图 4 所示。这证实了 MBR 反应器实现多种污

染物同步去除的可行性。因此,常规 MBR 更适用于低浓度废水处理,需要驯化后才能实现对有色冶金废水高效处理,通过构建 MBR 和构建多途径协同 MBR 可以实现多种污染物去除。

2.2 MBBR 反应器

新型高效生物反应器 MBBR,是建立在流化床基础上的一种废水处理生物反应器。该反应器将悬浮生长的活性污泥法和附着生长的生物膜法相结合,具有生物量多、抗冲击负荷强、剩余污泥少、占地面积小等优点,因此被认为是处理废水的一种理想生物反应器之一^[23]。如图 5 所示,MBBR 结构与 MBR 相似,但其微生物载体为颗粒状三维镂空材料。刘尧兰等^[24]发现,MBBR 在处理钨冶炼废水的过程中表现出色,在 COD 500 mg/L、氨氮 50 mg/L 的条件下,COD、氨氮分别实现了 80% ~ 87%、70% 的去除率;若将 MBBR 出水再次经过混凝沉淀处理,则可以满足 GB 8978—1996 中规定的一级排放标准。苗利利等^[25]比较了 2 种冶金厂综合废水处

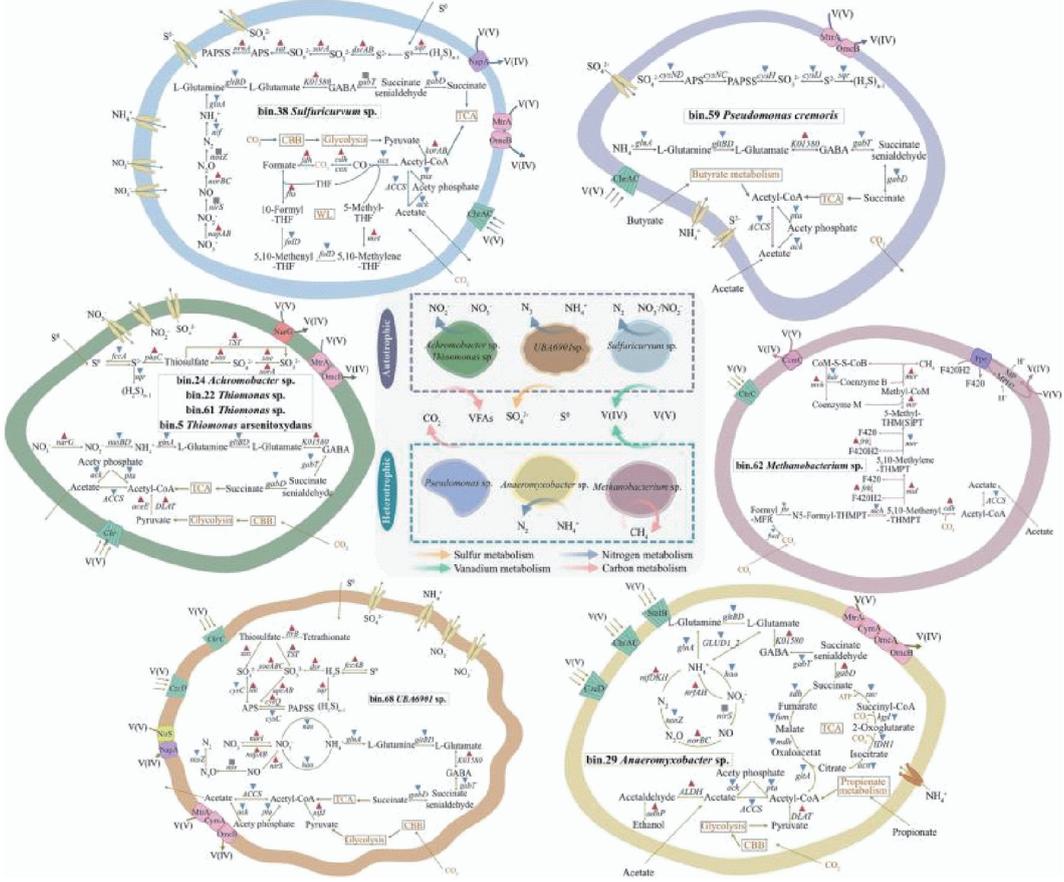


图 4 MBR 中潜在协同代谢途径概念模型^[21]

Fig. 4 Conceptual model of potential synergistic metabolic pathways in MBR^[21]

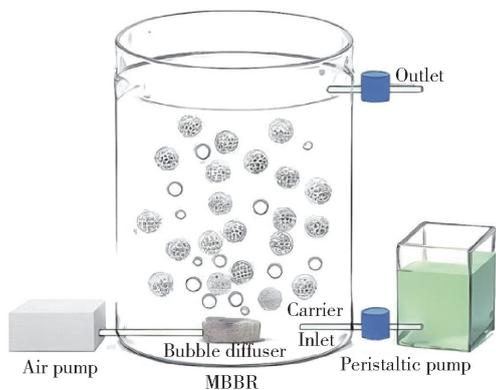


图 5 MBBR 结构示意图^[28]

Fig. 5 Diagram of MBBR structure^[28]

理工艺,发现将高效沉淀、过滤工艺与 MBBR 相结合,可以大幅提高出水稳定性和水质,同时降低成本。可见,MBBR 已广泛应用于高浓度废水处理。然而,相比于 MBR 稳定的微生物环境,MBBR 中的水力剪切力更大,容易造成微生物脱落,并不适合采用投加菌剂等方式对其进行强化。需要注意的是,MBBR 通常采用聚乙烯、聚丙烯、聚氨酯等材料作为载体,由于这些材料的生物亲和性、亲水性较差,MBBR 脱氮、去除重金属性能受限。为此,考虑到磁性材料对微生物具有定向促进作用,侯娜^[26]通过添加铁硼磁粉制备了新型磁性材料,提高了微生物挂膜富集效果,在 COD 400 mg/L、氨氮 50 mg/L 的

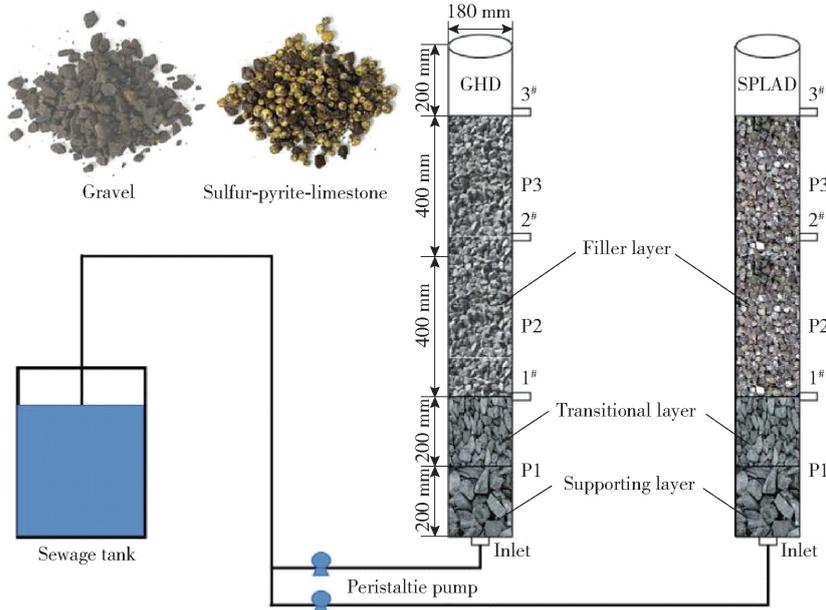


图 6 BF 结构示意图^[33]

Fig. 6 Diagram of BF structure^[33]

条件下,出水 COD、氨氮平均去除率分别达到 89.48%、81.43%。这证实了填料改性强化 MBBR 脱氮性能的有效性。此外,还可以通过添加竹炭粉等吸附性材料,制备成具有良好吸附性能的填料载体,在去除氨氮、COD 的同时,还可以实现对重金属的吸附^[27]。但是需要考虑其循环利用效果和重金属回收率,这是经济性评价的关键指标。因此,MBBR 更适用于高浓度废水处理,应用范围广泛,但是强化策略报道较少,应重点关注填料改性。

2.3 BF 反应器

BF 的结构如图 6 所示,BF 与 MBBR 的区别在于其颗粒状填料填充比例更高,堆砌成布满孔隙的填料床,附着有大量微生物。当废水通过滤床时,微生物通过自身吸附作用、代谢作用实现对废水中的污染物去除。铍冶炼过程通常需要投加大量铵盐调节 pH 值,导致其冶炼废水不仅含有高浓度的铍,还有大量氨氮。为此,孙芳等^[29]构建了曝气 BF,并将其用于铍冶炼废水处理,在进水氨氮浓度 200 mg/L、铍 50 ~ 100 $\mu\text{g/L}$ 的条件下,经处理后出水氨氮浓度低至 1.8 ~ 10.0 mg/L,而铍浓度则小于 5 $\mu\text{g/L}$ 。值得一提的是,去除铍的主要机制是微生物吸附,其吸附容量达到了 684.9 $\mu\text{g/g}$ 。关永年^[30]也报道了基于 BF 处理重金属废水的实例,发现将 BF 与混凝沉淀、水解酸化、MBR、臭氧催化氧化等工艺结合,

COD、氨氮、总磷去除率均达95%以上,这证实了BF可以耐受重金属胁迫。

但是冗长的工艺无疑降低了处理效率,并且增加了占地面积。为了提高BF性能,研究人员对填料进行了改性以提高微生物的附着量,强化吸附能力。例如,方正等^[31]对聚氨酯泡沫塑料进行改性,发现微生物负载率从改性前的53.8%提高至69.2%,改性聚氨酯泡沫负载微生物后吸附 Cd^{2+} 量达到了112 mg/g。此外,还可以采取措施提高填料本身的吸附性。蔡维炯^[32]采用硝酸铁对石英砂表面进行改性,制备成涂铁砂,将填料比表面积增加了5.07倍,提高了对 $\text{Mn}(\text{II})$ 、 $\text{Pb}(\text{II})$ 、 $\text{Sb}(\text{III})$ 的吸附性能,最大吸附量分别达到了0.197 mg/g、0.448 mg/g、2.403 mg/g。但是填料改性时需注意与不同重金属的相互作用,富里酸-涂铁砂复合体虽然进一步将 $\text{Pb}(\text{II})$ 、 $\text{Sb}(\text{III})$ 的吸附量分别提升了25.4%、14.3%,但由于金属-富里酸配合物条件稳定常数差异, $\text{Mn}(\text{II})$ 吸附量反而降低了15.2%。不同的改性方法会直接影响载体参数,需要结合反应器性能综合考量最优策略。唐玮媛^[34]比较了 MnCl_2 、聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钠和PAM-EDTA改性膨润土的重金属吸附效果,发现锰改性膨润土效果最好,在 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度分别为1 mg/L、0.1 mg/L的条件下, Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附率分别达到了95%、96.7%, Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 出水浓度分别低至0.042 mg/L、0.003 3 mg/L。虽然材料改性可以提高其对重金属的吸附性能,但是吸附后如何洗脱重金属、回收吸附材料是需要考虑的关键问题。因此,相比之下,BF比MBR更耐受重金属,且比MBBR稳定性更好,综合性能更好,填料改性已经被广泛应用,但是如何实现重金属回收还缺乏关注。

3 生物反应器工程实践

通过检测真实废水处理效果可以衡量生物反应器能否应用于实际工程^[35-36]。甘雪慧等^[37]采用驯化策略实现了真实污水处理:将江西省某铝业公司富含砷、铜、锌的废水按照梯度进行稀释,然后由低比例到高比例依次引入MBR中,最终提高了MBR对重金属和盐度的耐受性。在进水COD 180~200 mg/L和氨氮60~65 mg/L条件下分别获得了约86%和80%去除率。然而,该研究缺乏对应用条件的优化。水力停留时间(Hydraulic retention time,

HRT)对钨冶炼废水处理效果至关重要,而pH值则影响较小。王宗丽等^[14]对经过驯化的MBR运行参数进行曲面响应优化,获得最优条件为HRT 21.7 h、pH值7.7~8.0、DO 1 mg/L,此时MBR可耐受5%盐度,对COD、氨氮和总氮去除率高达91.24%、83.87%和75.26%。进一步,袁野^[38]以国际水协提出的活性污泥数学模型(Activated Sludge Model No. 1, ASM1)作为基础,结合重金属污水实际情况引入了溶解性微生物产物特征参数、胞外聚合物特征参数以及相应动力学参数,建立适用于MBR处理重金属废水的ASM1-MBR数学模型,通过敏感性分析、龙格-库塔法模拟计算对该模型进行优化,最终将模型误差控制在5%以内,为实际应用提供了一定的理论指导。

4 结论与展望

4.1 结论

有色冶金废水属于浓度高、成分复杂的高难废水,处理难度大。尽管物化技术处理有色冶金废水效率高,但其处理成本高,相比之下,生物反应器处理有色冶金废水成本更低、更可持续,优势显著。综上所述,可以得到以下结论。

1)生物反应器在有色冶金废水处理领域研究热度逐年递增,属于热点技术。但是缺乏对机制方面的深入报道,这限制了生物反应器的进一步改进、强化。建议增加对生物反应器中微生物机制的研究。

2)MBR适用于低浓度废水处理。梯度驯化是提高MBR对有色冶金废水耐受性的重要手段。此外,通过构建MBfR和构建多途径协同MBR可以实现多种污染物去除。

3)MBBR耐冲击性能优异,适用于高浓度废水处理。但是运行中难以为微生物提供稳定环境,相关的强化策略还报道较少,应该重点关注其填料改性、工艺耦合方面。

4)BF综合性能更好。填料改性是BF性能强化的主要手段,但是填料中重金属回收仍然缺乏关注,相应的措施鲜见报道。

5)虽然生物反应器广泛应用于钨冶炼废水,但是处理规模还停留在小试阶段,需要进一步扩大。此外,关于其他重金属实际废水的处理报道较少。

4.2 展望

然而,生物反应器面对高浓度冶金废水容易受到抑制,导致处理效果差,限制了其大规模应用。需要采取措施进行强化,满足愈发严峻的环保要求。工艺耦合、生物强化、构建新基质反应器是主要的三种思路,是未来的主要改进思路。

1)工艺耦合指的是在原有工艺基础上改扩建、耦合,不仅可以对污染物进行深度处理,还可以耐受高浓度重金属冲击,效果稳定,最易于实践。

2)生物强化则是利用低成本功能微生物进行接种、富集,大幅提升反应器对特定污染物的去除效果,应用成本最低。

3)新基质反应器中新型材料吸附作用是污染物去除主要途径,可重复利用、回收,应用潜力最大。

[参考文献]

[1] 袁春燕,蒋晓云,徐先锋,等. 电化学与纳米晶磁组合技术在重金属废水处理中的应用研究[J]. 有色设备, 2020(1): 24-29.

[2] 高宝钗,易玉龙,岑家山,等. 难降解 COD 冶炼废水“近零排放”处理工艺研究[J]. 有色设备,2019(1): 6-11.

[3] 余文华,曾西,吴丕盛,等. 电解铝厂生产、生活污水零排放的实践[J]. 中国有色冶金,2013, 42(3): 75-78.

[4] 张欣月,张建刚,杜海军,等. 微生物提取低品位稀土资源的研究进展[J]. 中国有色冶金,2022, 51(2): 71-75.

[5] 吴恒,赵婷婷,陈爱玲,等. 固相反硝化微生物系统处理低碳污水动力学性能及经验模型研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(1): 215-221.

[6] 王明峰. 浅谈垃圾渗沥液处理的工程应用[J]. 有色设备,2019(4): 8-11.

[7] 杨颂,杨腾飞,付炳炳,等. MBBR 耦合多段 AO 工艺在大型市政污水处理厂的运行初探和实践成效[J]. 净水技术,2024, 43(1): 101-109.

[8] 瞿艳芝,李谦,叶正芳,等. 曝气生物滤池处理模拟选矿废水研究[J]. 中国有色冶金,2018, 47(2): 79-83.

[9] 田晓媛,杨水莲,王威燕,等. 反渗透膜处理有色冶金酸性无机复合重金属废水[J]. 水处理技术, 2014, 40(11): 61-64.

[10] 张景. 复合 $MnO_2-Fe_3O_4$ 吸附水中重金属及其循环利用的研究[D]. 上海:上海大学, 2016.

[11] 罗道成,易平贵,陈安国,等. 改性海泡石对废水中 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附性能的研究[J]. 水处理技术, 2003(2): 89-91.

[12] 程亮,侯翠红,徐丽,等. 纳米腐殖酸基离子交换复合

树脂动态吸附-脱附冶金镍镉废水[J]. 化工学报, 2016, 67(1): 349-357.

[13] 刘壮壮,刘崇涛,吴厚凯,等. 电化学膜生物反应器处理猪场污水运行效果[J]. 农业环境科学学报,2024, 43(8):1888-1895.

[14] 王宗丽,罗玲,袁野,等. 响应曲面法优化分析 MBR 钨冶炼废水处理过程研究[J]. 水处理技术,2023, 49(7): 38-44.

[15] 戚小忠,钟辉,袁野,等. 钨冶炼废水 MBR 耐盐驯化过程微生物特性及 HRT 效能影响[J]. 当代化工研究,2022(24): 46-48.

[16] 罗玲. 膜生物反应器(MBR)处理钨冶炼废水效能及膜污染特性研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2021.

[17] 吴昆泽,钟常明,王汝胜,等. 同步硝化反硝化膜生物反应器脱除钨冶炼废水中氨氮的影响因素研究[J]. 水处理技术,2013, 39(12): 83-87.

[18] 邓书妍,罗智江,简陈生,等. 钨冶炼废水 SNDMBR 过程膜阻力和清洗的研究[J]. 江西理工大学学报, 2015, 36(5): 11-16.

[19] 王汝胜. 钨冶炼废水 SNDMBR 过程膜污染机理的研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2014.

[20] Lei LI, Baogang ZHANG, Jiixin SHI, et al., Concurrent vanadate and ammonium abatement in a membrane biofilm reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 442: 136285.

[21] Wenyue YAN, Siming CHEN, Min LI, et al. Genome-resolved metagenomic insight into vanadate and ammonium elimination in sulfur-based autotrophic biosystem[J]. Chemical Engineering Journal. 2023, 476: 146782.

[22] M. A. H. Johir, S. Vigneswaran, A. Sathasivan, et al. Effect of organic loading rate on organic matter and foulant characteristics in membrane bio-reactor[J]. Bioresource Technology, 2012, 113: 154-160.

[23] 梁一帆,潘增锐,喻盛华,等. MBBR 污水生化处理系统中泥膜的生物群落分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(23): 15-22.

[24] 刘尧兰. 混凝沉淀+MBBR 处理钨冶炼废水的工艺研究[D]. 南昌:南昌大学, 2013.

[25] 苗利利,朱明巍,段建新,等. 高效沉淀/MBBR/过滤工艺处理冶金厂综合废水[J]. 中国给水排水,2012, 28(6): 47-50.

[26] 侯娜. 磁性生物载体的制备及其在 AMBBR 工艺中的应用[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2021.

[27] 秦洁琼. 竹炭悬浮填料的筛选及其在 MBBR 工艺中的应用研究[D]. 南京:南京林业大学, 2012.

[28] Zhuqiu Sun, Jinying Xi, Ruili Yang, et al. Structures

- and compositions of biofilms in moving bed biofilm reactors pretreated by four drying methods[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477: 147228.
- [29] 孙芳, 孙卫玲. 曝气生物滤池处理高氨氮含铍废水研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(4): 153 – 157.
- [30] 关永年. 高排放标准下某高新园区污水处理厂工程实例[J]. *给水排水*, 2022, 58(12): 89 – 94, 111.
- [31] 方正. 改性聚氨酯泡沫塑料处理污水的研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- [32] 蔡维炯. 涂铁砂吸附去除重金属及实际应用有效性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
- [33] Ming ZHOU, Yantang WANG, Lisha ZHU, et al. Guoke ChenSulfur-pyrite-limestone biological filter for simultaneous nitrogen and phosphorus removal from wastewater treatment plant effluent; Interaction mechanisms of autotrophic and heterotrophic denitrification [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104301.
- [34] 唐玮媛. 改性膨润土深度处理重金属废水技术研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- [35] 吴恒, 李佳芮, 杨天宇, 等. 生物技术在有色冶金废水处理中的应用[J/OL]. *中国有色冶金*, 1 – 11 [2024 – 07 – 29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5066.TF.20240412.1652.002.html>.
- [36] 解增光, 吕勇, 张玲. 电化学废水处理技术在冶炼废水中的应用[J]. *有色矿冶*, 2021, 37(6): 49 – 53.
- [37] 甘雪慧, 钟辉, 刘佛财, 等. 钨冶炼高盐含氨氮废水膜生物反应器过程微生物菌群特性研究[J]. *中国钨业*, 2021, 45(5): 41 – 47.
- [38] 袁野. MBR 处理钨冶炼废水性能研究及活性污泥模型的构建[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.

Application of bioreactor in nonferrous metallurgical wastewater treatment

YANG Tianyu¹, WU Heng^{2,3*}, XING Zhilin³

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Non-ferrous metallurgical wastewater has high concentrations and complex pollutants, which must be effectively treated before discharge. The bioreactor is a commonly used non-ferrous metallurgical wastewater treatment equipment, but the research progress of different reactors lacks a summary and comparison. This review of bioreactors is pointed out by bibliometric analysis, and it is ascertained that bioreactor is one of the hot technologies in the future. In addition, the three representative bioreactors membrane bioreactor (MBR), moving bed biofilm reactor (MBBR) and biological filter (BF) are systematically reviewed and compared, and their respective applicable scenarios, strengthening measures and future research directions are proposed. This study systematically summarizes the research characteristics of MBBR, MBR and BF, and provides a reference for selecting devices to treat non-ferrous metallurgical wastewater.

Key words: metallurgical pollution; bioreactor; wastewater treatment; MBR; MBBR; BF

