双金属极板梯度设计在电絮凝技术中的应用

刘 江, 田晓棠

(包钢集团节能环保科技产业有限责任公司运维分公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 金属极板作为电絮凝技术的核心部件, 其结构、性能直接决定了它的处理效率与运营成本。传统单金属或普通双金属极板存在电极易钝化、腐蚀速率快、反应效率低等问题。文章聚焦双金属极板梯度合金设计工艺的优势, 从金属材料配比、电极钝化抑制效果及氟去除率等方面, 通过在同等反应条件下运行的实际数据, 论证该工艺技术的可行性与关键指标上的独特优势。

关键词: 电絮凝; 双金属极板; 梯度合金工艺; 正交试验

中图分类号: X741 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2026)01 - 0091 - 04

Applications of Gradient Design for Bimetallic Plate in Electrocoagulation Technology

Liu Jiang, Tian Xiaotang

(*Operation and Maintenance Branch Co. of Baotou Steel Group Energy Saving and Environmental Protection Technology Industry Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: As the core component of electrocoagulation technology, the structure and performances of metal plate directly determine its treatment efficiency and operating costs. Traditional single metal or conventional bimetallic plate is with such problems that electrode is easy to be passivated, corrosion rate is rapid and reaction efficiency is low. In this paper, the advantages of gradient alloying design process for bimetallic plate are focused as well as its feasibility and unique advantage of key indexes are demonstrated from such aspects as proportion of metal materials, inhibition effect of electrode passivation and removal rate of fluorine through actual data of operations under the same reaction conditions.

Key words: electrocoagulation; bimetallic plate; gradient alloying process; orthogonal test

电絮凝技术是通过金属阳极板电溶解作用, 产生金属阳离子, 水解、聚合形成絮凝体, 通过静电吸附作用实现氟化物的高效去除。传统金属极板以单金属或简单复合的双金属材料为主, 存在两大局限性: 一是单金属极板电离离子种类有限, 难以形成多级絮凝效应, 且析氧过电位较高, 导致反应效率降低, 能耗增加, 阳极板钝化现象显著, 腐蚀产物易结块[1]; 二是普通双金属极板金属界面结合较差, 易出现层间剥离现象, 从而缩短了极板的使用寿命。在电絮凝反应过程中, 采用双金属极板梯度合金工艺的设计, 不仅能够构建起金属极板的功能层、过渡层与支撑层[2], 还可实现金属离子释放时序的合理

收稿日期: 2025 - 07 - 16

作者简介: 刘 江(1989 -), 男, 内蒙古包头市人, 助理工程师, 现从事工业废水综合利用设备管理工作。

调控,进而优化了传统极板性能的不稳定性,成为电絮凝核心材料技术创新的关键发展方向。

1 试验方案与材料准备

1.1 方案设计

本次试验改变极板铝铁比例、电流密度、电解时间、初始 pH 值、反应浓度等工艺条件,采用正交试验设计,系统验证了双金属极板材料的最优配比、极板钝化抑制效果以及氟去除率,论证了双金属极板梯度设计的优越性和可行性。

1.2 试验准备与实施

试验所用化学试剂均为分析纯,试验用水为人工配制的模拟含氟污水,氟化钠作为氟源,电解质为 Na_2SO_4,根据需要用 HCl 或 NaOH 调节 pH 值。电絮凝反应装置及试验设备为有机玻璃矩形反应器、直流稳压电源、pH 计、离子色谱仪、测氟浓度仪、高精度数字电压表、小型恒定转速搅拌器等,阳极极板材料选用单金属铝极板和铝铁比例分别为 3∶7、5∶5、7∶3 的金属极板,阴极板为不锈钢材质,所有极板间距可调节。表 1 为试验条件。

表 1 试验条件

试验条件	样品 1	样品 2	样品 3
铝铁比例	3∶7	5∶5	7∶3
电流密度/(A·m^{-2})	20	30	40
电解时间/min	30	60	90
pH 值	4	6	8

2 试验验证

2.1 极板金属配比的验证

每组试验取定量模拟含氟废水样品置于反应器中,调节至接近工业废水的 pH 值,开启搅拌装置和直流电源,在预设的恒定电流密度下开始电絮凝反应。金属配比试验每 30 分钟取样测试一次氟浓度,每组试验平行测定三次,计算出氟去除率的平均值。以单金属纯铝极板反应结果作为基准条件进行参照对比,验证各种比例的双金属梯度极板在不同条件下除氟效率的变化。具体试验数据如表 2 所示。

表 2 极板材质比例试验统计表

试验编号	铝铁比例	电流密度/(A·m^{-2})	电解时间/min	pH 值	氟去除率平均值/%
0	纯铝	30	60	6	61.5
1	3∶7	20	30	4	58.2
2	3∶7	30	60	6	65.3
3	3∶7	40	90	8	62.1
4	5∶5	40	30	6	75.2
5	5∶5	20	60	8	72.5
6	5∶5	30	90	4	78.3
7	7∶3	30	30	8	82.5
8	7∶3	40	60	4	89.2
9	7∶3	20	90	6	87.0

在基准反应条件下,将氟去除率为 61.5% 的纯铝金属极板作为比照样品,按照三种不同比例的金属阳极板,分别调整电流密度、电解时间及 pH 值,重复三次试验。通过对上述试验数据分析可知,铝铁双金属极板除氟效果显著优于纯铝极板,其中铝铁比例为 7∶3 时,氟去除率超 82.5%,较纯铝提高 34.1%,契合了铝离子的高效絮凝与含铁金属极板的氧化还原特性。在含氟废水 pH 值处于 4 ~ 6 时的弱酸反应条件下,通过延长电解时间,氟去除率有明显提高,反之,在碱性环境中效果较差。因此,在 pH = 4 的酸性条件下,电流密度为 40 A/m^2,金属比例为 7∶3 的双金属梯度极板优于其他比例的金属极板,能够促进阳极反应,释放出更多活性铝离子,加速絮体的形成。

2.2 除氟速率的验证

选用三种金属比例不同的金属极板(含单金

属),将待测极板置于三个同浓度(6.85 mg/L)的含氟废水样品反应器中。在相同反应时间内,通过调整不同比例的金属阴阳极板间距、搅拌速率,延长电解时间,统计出相同时间节点内氟离子浓度的变化,计算出最终的氟去除率。具体试验数据如表 3 所示。

表 3　氟浓度试验统计表

试验编号	铝铁比例	阴阳极板间距/mm	搅拌速率/(r·min^{-1})	电解时间/min	氟浓度/(mg·L^{-1})	氟去除率平均值/%
0	纯铝	30	600	60	3.85	61.5
1	3∶7	10	200	30	4.40	58.2
2	3∶7	20	400	60	2.58	65.3
3	3∶7	30	600	90	1.32	62.1
4	5∶5	10	200	30	4.50	75.2
5	5∶5	20	400	60	2.75	72.5
6	5∶5	30	600	90	1.68	78.3
7	7∶3	10	200	30	2.61	82.5
8	7∶3	20	400	60	1.25	89.2
9	7∶3	30	600	90	0.45	87.0

对试验数据分析可知,单金属极板虽能实现 61.5% 的氟去除率,但最终氟浓度仍达 3.85 mg/L,未达到更低残留的处理要求。双金属混合极板(1—6 号样品)通过两种金属的协同作用,使最终氟浓度降至 1.32 mg/L,氟浓度降解速率提高 2.91%,验证了双金属材质的优势。金属比例 7∶3 双金属梯度极板表现最优,最终氟浓度为 0.45 mg/L,氟去除率达 87.0%,较单金属极板氟浓度降解速率提高 8.5%,验证了双金属梯度结构极板对电絮凝除氟的强化作用远高于简单的双金属混合极板。

2.3　钝化抑制的验证

将三种金属比例不同的金属极板浸入同浓度的含氟工业废水中,利用高精度数字电压表测量每种样品的初始槽电压值,测定后切换至直流稳压电源,进行 8 小时连续运行和实时监测,检测槽电压的变化值,每 30 分钟记录一次三组极板样品的槽电压值。槽电压的上升是电极钝化最直接、最直观的表征[3]。在运行过程中,每隔半小时取样过滤一次,使用浓度计测定溶液中的铝离子浓度。金属铝离子浓度及槽电压的变化趋势,可以直观反映极板钝化导致的电离效率变化。具体测试值如表 4 所示。

表 4　槽电压变化统计表

运行时间/min	单金属极板		双金属混合极板		双金属梯度极板	
	槽电压/V	铝离子浓度/(mg·L^{-1})	槽电压/V	铝离子浓度/(mg·L^{-1})	槽电压/V	铝离子浓度/(mg·L^{-1})
0	4.2	12.7	4.1	11.3	4.0	6.33
30	4.8	18.3	4.5	13.5	4.3	9.75
60	5.5	22.6	4.7	16.8	4.5	12.5
90	6.1	28.5	5.2	18.4	4.6	14.2
120	6.8	30.5	5.4	20.6	4.4	14.9

在测试钝化抑制的试验中,槽电压上升的直接原因是电极表面形成钝化膜,导致电极阻抗增加,进而降低电离效率。初始阶段,单金属极板槽电压从 4.2 V 升至 4.8 V,增幅为 14.3%。铝离子浓度增幅为 44.1%,易形成均匀致密钝化膜;双金属混合极板电压增幅为 9.6%,铝离子浓度增幅为 19.5%,能抑制氧化膜生成。双金属梯度极板电压增幅为 7.5%,铝离子浓度增幅为 54%,槽电压增幅显著低

于单金属和双金属混合极板。中期阶段,单金属极板钝化加速,电压持续飙升;双金属混合极板槽电压增速放缓,反应60分钟后,电压为4.7 V,增幅为14.6%;双金属梯度极板槽电压平缓上升,60分钟仅为4.5 V,增幅为12.5%,钝化抑制持续性更强。后期阶段,单金属极板槽电压仍有高增幅,为61.9%;双金属混合极板槽电压增幅为31.7%;双金属梯度极板槽电压增幅为10%,增速进一步降低。双金属梯度极板稳定性最优,能长期保持低槽电压,减少电流损失。

综上所述,通过总结三项试验的结果得知,梯度工艺设计出的双金属阳极板在电絮凝极板反应中的除氟效率、抗钝化效果及材质稳定性方面,具有绝对优势,相比单金属及普通双金属极板更具使用价值。同时实现了在电絮凝技术中核心材料的升级与推广。

3 结束语

针对传统电絮凝除氟技术中单一金属极板及普通双金属极板存在的除氟效率有限、易钝化、使用寿命短等问题,采用双金属极板的梯度合金工艺设计,通过正交试验系统研究了铝铁双金属极板比例、工艺参数对除氟效率的影响,同时验证了其除氟效率强化效应与抑制钝化性能,为电絮凝核心材料的技术创新提供了试验与理论依据,为含氟工业废水治理提供高效、经济、可靠的技术方案,在水质净化领域具备优越的工程应用前景与推广价值。后续可进一步优化极板梯度结构参数,探究其在实际工业废水处理中的长期运行性能,为技术规模化应用提供更全面的支撑。

参 考 文 献

[1] 严群. 电絮凝处理电镀废水过程中聚苯胺对阳极缓蚀过程研究[D]. 无锡:江南大学,2023.

[2] 游松. 水泥基电絮凝极板的制备及其去除水体中重金属离子的研究[D]. 武汉:武汉纺织大学,2022.

[3] 黄雪琪,靖波. 电絮凝过程中倒极消除极板钝化[J]. 环境工程学报,2019,13(11):2661-2667.

(上接第64页)

[2] 袁良增,姜金星,赵丽洋,等. 加热温度对X80管线钢显微组织和低温韧性的影响[J]. 上海金属,2023,45(4):77-80.

[3] 董露,郝世英,张骁勇,等. 加热温度对X100热煨弯管钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(6):42-46

[4] 章传国,郑磊. 轧后加热温度对高NbX80管线钢板组织性能的影响[J]. 钢铁,2013,48(1):82-86.

[5] 刘迎来,池强,王鹏. 加热温度对X80弯管钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理. 2010,35(10):2-4.

[6] 田晨超,许飞,焦磊,等. 加热温度对X80钢级热煨弯管组织性能的影响[J]. 焊管,2014,37(6):11-16.

[7] 谭会杰,王海燕,李德超,等. X80管线钢连续冷却相变及组织研究[J]. 金属热处理. 2015,40(7):91-94.

[8] Xu W, XIAO F R, FU Y H, et al. Material development for grade X80 heavy-wall hot induction bends[J]. Material and Engineering A, 2011,530:539-547.

[9] 蒋昌林,林涛,诸建阳,等. 加热温度对X80钢级弯管用管线钢板冲击韧性的影响[J]. 宽厚板,2019,25(4):5-8.