

文章编号:1001-4179(2015)19-0110-04

# 砂石骨料加工废水电絮凝处理实验研究

汤显强<sup>1,2,3</sup>, 郝敬丽<sup>1,2</sup>, 李青云<sup>1,2</sup>

(1. 长江科学院 流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**针对利用传统絮凝沉淀法处理水电工程砂石骨料加工废水效果不理想的问题,通过室内实验研究了电絮凝处理砂石骨料加工废水中高浓度悬浮物的性能,并优化了相关的工艺参数。结果表明,铝适合用作电絮凝阳极材料,最佳电流强度和电解时间分别为 0.08 A 和 4 min,初始悬浮物浓度宜控制在 50 000 mg/L 以内。电絮凝前,自然沉降能够有效去除粒径在 8  $\mu\text{m}$  以上的悬浮颗粒和总体悬浮物负荷,最佳的自然沉降时间为 2 h。通过比较絮凝前后及自然沉降后的悬浮物颗粒粒径分布,发现电絮凝对粒径 1~2  $\mu\text{m}$  的细颗粒去除性能优异。若采取沉淀+电絮凝的措施,对砂石骨料加工废水高浓度悬浮物的处理效果更佳。

**关键词:**砂石骨料; 悬浮物; 电絮凝; 颗粒粒径

中图法分类号: TV42.2

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.19.026

## 1 研究背景

在水电工程施工中,大量砂石骨料在加工过程中需加水冲洗,使其含泥量、裹粉程度满足混凝土生产要求,这一过程会产生大量高浊度废水。监测资料表明,砂石骨料加工废水主要污染物为悬浮物,浓度高达 30 000~120 000 mg/L<sup>[1]</sup>,远远超过《污水综合排放标准》(GB8978-1996)中规定的采矿、选矿企业废水悬浮物最高允许排放浓度(一级标准为 70 mg/L,二级标准为 300 mg/L;砂石骨料加工用水标准悬浮物浓度不大于 100 mg/L(SL303-2004))。砂石骨料加工废水若未经处理直接排放或处理不达标排放,将会淤塞河道、污染河流水质,并影响水生生物的生存环境。

进入 20 世纪 90 年代后期,我国水电站建设的环保要求不断提高,砂石骨料加工系统开始普遍配套设计废水处理厂,常用的处理方法为自然沉淀法和混凝沉淀法。砂石骨料加工废水处理量大、悬浮物浓度高,配套建设的大规模沉淀池直径常常超过 30 m,较大的占地面积造成沉淀池在高山峡谷地区的选址和建设异常困难<sup>[2]</sup>。为提高沉淀分离效果,大量絮凝剂如 PAC

和 PAM 等通过配水加药进入沉淀池,在提高悬浮物处理效率的同时,也产生了大量泥渣,并时常因排渣不畅中断沉淀池的运行<sup>[3]</sup>。此外,絮凝剂的使用极大增加了处理成本。

电絮凝是利用可溶性金属阳极在电解过程中产生的金属氢氧化物絮凝去除水中污染物质的水处理工艺。该技术能有效去除水中胶体和悬浮物类污染物质。研究表明,电絮凝可使屠宰废水和电镀废水的悬浮物浓度从 2 390 mg/L 和 2 737 mg/L 分别降至 31 mg/L 和 57 mg/L<sup>[4-5]</sup>。在不添加任何电解质的情况下,电解 5 min 后,悬浮物浓度由 76 mg/L 降至不足 4 mg/L。与传统混凝沉淀相比,该方法具有无药剂投入和二次污染、泥水分离效果好、泥渣含水率低、占地面积小、易于实现自动控制等优点。目前电絮凝技术在处理低于 5 000 mg/L 的悬浮物方面效率极高,然而却尚未应用于高浓度悬浮物,在砂石骨料加工废水处理方面也鲜有报道。

本文通过室内实验,研究砂石骨料加工废水电絮凝处理性能,重点分析电解前静止时间、阳极材料、电流强度、电解时间、悬浮物浓度等对悬浮物去除的影响。

收稿日期:2015-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51209011&51379017);长江科学院研转基金项目(CKZS2014013/SH)

作者简介:汤显强,男,高级工程师,博士,研究方向为水资源保护与水污染控制。E-mail:ckyshj@126.com

响,并分析絮凝前后水体颗粒粒径分布的变化,通过综合比较能耗、电极板消耗与悬浮物去除效率,来确定砂石骨料加工废水的电絮凝最佳工艺参数。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

砂石骨料加工废水采自大岗山水电站,SS 浓度为 50 000 ~ 120 000 mg/L,砂石料主要为微风化至新鲜的黑云二长花岗岩。电絮凝采用的阳极为铁片和铝片,阴极为不锈钢,实验前打磨阳极和阴极表面,并用丙酮、体积分数为 10% 的盐酸及去离子水冲洗。阳极和阴极尺寸均为 4 cm × 5 cm × 0.1 cm。电絮凝采用直流稳压电源,最高电压 30 V。

### 2.2 实验方法

采用自来水和自大岗山砂石骨料加工废水配置不同初始悬浮物浓度的溶液,测定自然沉降曲线,分析电极材料、电流强度、电解时间和悬浮物浓度对电絮凝的影响,测定电解前后颗粒粒径分布。

(1) 自然沉降曲线。配置 250 mL 悬浮物浓度为 9 000,40 000 mg/L 和 120 000 mg/L 的砂石骨料废水,在 0,1,2,3,4,5,6,7 h 和 8 h 时采集上清液,测定悬浮物浓度。

(2) 电极材料选择。配置 250 mL 初始浓度为 6 000 mg/L 的砂石骨料废水,阳极材料为铁片与铝片,阴极采用不锈钢,在烧杯中电解 6 min,静置 30 min 后观察溶液颜色与澄清状况。

(3) 电流强度的影响。配置 250 mL 初始浓度为 6 000 mg/L 的砂石骨料废水,在烧杯中电解 6 min,电流强度分别为 0.24,0.16,0.08 A 和 0.03 A,电解后静置 30 min,取上清液测定悬浮物浓度。

(4) 电解时间的影响。配置 250 mL 初始浓度为 9 000 mg/L 的砂石骨料废水,在烧杯中电解 2,4 min 和 6 min,电流强度为 0.08 A,电解后静置 30 min,取上清液测定悬浮物浓度。

(5) 悬浮浓度的影响。配置 250 mL 初始浓度分别为 15 000,30 000,45 000,50 000 mg/L 和 90 000 mg/L 的砂石骨料废水,在烧杯中电解 2,4 min 和 6 min,电流强度为 0.08 A,电解后静置 30 min,取上清液测定悬浮物浓度。

(6) 电絮凝对颗粒粒径的影响。配置 250 mL 初始浓度分别为 15 000,45 000 mg/L 和 90 000 mg/L 的砂石骨料废水,在烧杯中电解 4 min,电流强度为 0.08 A,电解后静置 30 min,取上清液测定颗粒粒径分布。

### 2.3 样品分析与数据处理

悬浮物浓度经过抽滤后,将滤饼烘 2 h (80℃) 并

称重,按照《水与废水水质分析(第四版)》中所述方法检测废水中的悬浮物(SS)。电解后颗粒粒径采用马尔文 Mastersizer 3000 激光粒度仪测定。SS 去除率按式(1)计算。

$$\text{SS 去除率} = \frac{SS_0 - SS_t}{SS_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $SS_0$  为电解开始时废水的悬浮物浓度,mg/L;  $SS_t$  为电解  $t$  时刻废水的悬浮物浓度,mg/L。

电絮凝过程中,电能消耗及阳极损失是重要的经济指标。在优选出阳极材料(铝)后,考察电絮凝过程中每吨水的能耗( $E$ )及阳极损耗( $m$ )。

$$E = \frac{UIt}{V} \quad (2)$$

式中,  $E$  为电能消耗,kW · h;  $U$  为电压,V;  $I$  为电流,A;  $t$  为电絮凝时间,h;  $V$  为废水处理量,t。

$$m(\text{Al}) = \frac{ItM}{zFV} \quad (3)$$

式中,  $m(\text{Al})$  为阳极铝消耗的质量,kg;  $I$  为电流,A;  $t$  为电絮凝时间,h;  $M$  为铝的摩尔质量,0.027 kg/mol;  $z$  为电荷数,取 3;  $F$  为法拉第常数,96 500 C/mol;  $V$  为废水处理量,t。

## 3 结果与讨论

### 3.1 自然沉降性能

砂石骨料加工废水悬浮物自然沉降曲线见图 1,随着静置时间增加,悬浮物去除率不断上升,无论是低浓度还是高浓度废水,自然沉降 8 h 后,悬浮物平均去除率基本达到平衡(接近 95%),但清液中悬浮物浓度仍然远远超过《污水综合排放标准》(GB8978 - 1996)规定的排放标准 70 mg/L。砂石骨料加工废水自然沉降过程中,大颗粒在重力作用下快速沉降,初期 2 h 内悬浮物平均去除率较高,此后细颗粒通过胶体脱稳等作用逐渐下沉,悬浮物去除率变缓并趋于稳定。从自然沉降曲线可看出,电絮凝处理前让悬浮物自然沉降 2 h,一方面可快速高效和低成本地削减 SS 负荷,一方面还可以提高电絮凝处理小颗粒悬浮物的性能。

### 3.2 电极材料优选

不同阳极材料的电絮凝效果见图 2。电絮凝过程中,阳极被电解氧化生成  $\text{Fe}^{3+}$  或  $\text{Al}^{3+}$  等金属离子,金属离子及其水解产物如多核氢氧化物絮状物进而通过吸附-电中和压缩絮凝等方式去除悬浮物<sup>[6]</sup>。从图 2 可看出,采用铁阳极时,悬浮物絮凝去除效果很好,但电解过程中阳极铁离子溶出,导致上清液呈橙黄色,增加了水体色度。采用铝电极,悬浮物絮凝后清澈透明,因此建议后续实验中采用铝作阳极。

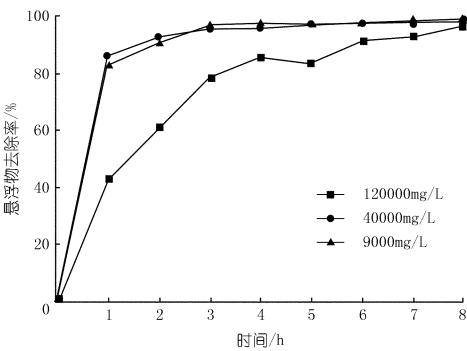


图1 砂石骨料加工废水悬浮物的自然沉降曲线



(a) 铁阳极



(b) 铝阳极

图2 铁阳极和铝阳极的絮凝效果

3.3 电流强度的影响

电解时间一定时,阳极生成  $Al^{3+}$  的量与电流强度成正比,电流强度越大,絮凝性能越好。从表1可看出,对初始悬浮物浓度为 6 000 mg/L 的砂石骨料加工废水来说,当电流强度从 0.03 A 增至 0.24 A 时,悬浮物平均去除率从 95.7% 上升至 99.9%,每吨废水平均能耗从 0.06 kW·h 增至 2.88 kW·h,阳极平均损耗从 4 g 增至 32 g,电流强度的增加在提升悬浮物去除能力的同时,增加了能耗和阳极损耗。从节能增效考虑,建议电流强度不高于 0.08 A。

3.4 电解时间的影响

电流强度为 0.08 A 和初始悬浮物浓度为 9 000

mg/L 时,不同电解时间下悬浮物去除率、能耗与阳极损耗情况见表2。从表2可看出,电解时间越长,悬浮物去除率越高,能耗和阳极损耗越大。与自然沉降相比,电絮凝可提高悬浮物平均去除率 70% 左右。根据法拉第定律,在电流强度一定的条件下,电解阳极产生  $Al^{3+}$  的量与通电时间成正比<sup>[8]</sup>,因此增加电解时间能提高  $Al^{3+}$  生成量,进而提高悬浮物絮凝去除效率。

表1 不同电流强度下每吨废水中悬浮物去除率、能耗与阳极损耗情况

电流强度/A	悬浮物去除率/%	能耗/(kW·h)	阳极损耗/g
0.03	95.7±0.1	0.06±0.02	4.0±0.4
0.08	99.3±0.1	0.32±0.06	10.0±1.3
0.16	99.8±0.1	1.28±0.12	21.0±1.8
0.24	99.9±0.1	2.88±0.20	32.0±2.2

当电解时间从 2 min 增至 4 min 时,悬浮物平均去除率已达到 99.5%;与电解 4 min 相比,电解 6 min 时,悬浮物平均去除率仅增加 0.2%,而平均能耗与平均阳极损耗分别增加了 37% 和 60%,因此,建议电解时间不超过 4 min。

表2 不同电解时间下每吨水中悬浮物去除率、能耗与阳极损耗情况

电解时间/ min	悬浮物去除率/%		能耗/ (kW·h)	阳极损耗/ g
	电絮凝	自然沉降		
2	96.6±0.2	15.8±0.1	0.12±0.03	3.0±0.2
4	99.5±0.1	24.2±0.1	0.23±0.05	5.0±0.5
6	99.7±0.1	35.8±0.1	0.35±0.12	8.0±0.9

3.5 悬浮物浓度的影响

电流强度为 0.08 A 和电解时间为 4 min 时,不同悬浮物浓度的砂石骨料加工废水电絮凝处理效果见图3。从图中可看出,随着初始浓度增加,悬浮物电絮凝去除率呈现先稳定再下降的趋势。当悬浮物初始浓度超过 50 000 mg/L 时,其去除率显著下降,对初始浓度为 90 000 mg/L 的砂石骨料加工废水来说,电絮凝 4 min 后,悬浮物去除率仅 70% 左右,这是因为稠密的悬浮颗粒降低了溶液中新生成的  $Al^{3+}$  传质效率,进而影响了悬浮颗粒的吸附与絮凝。综上,电絮凝适宜处理的悬浮物浓度不宜超过 50 000 mg/L。

3.6 絮凝后颗粒粒径变化

电絮凝改变了砂石骨料加工废水中悬浮物颗粒的粒径分布。从表3可看出,电絮凝后(电解 4 min + 静置 15 min),悬浮物颗粒粒径总体趋小,4 μm 以下的小颗粒比例增多,2 μm 以下的增幅最为显著。对比电絮凝和自然沉降 19 min 后的粒径分布可看出,无论电絮凝还是自然沉降,粒径大于 32 μm 的悬浮颗粒的去除均较为彻底。电絮凝对于粒径 1~2 μm 的颗粒去

除性能优异,而对粒径 2 ~ 4 μm 的颗粒去除效果与自然沉淀相当,自然沉降更适宜去除粒径 8 μm 以上的悬浮颗粒。

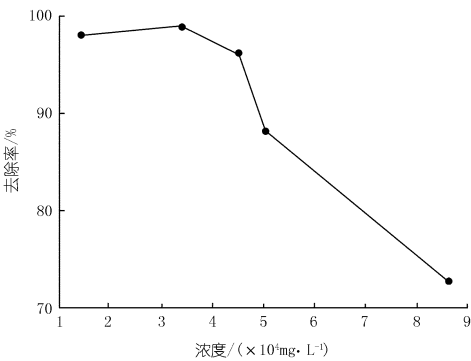


图 3 不同初始悬浮物浓度的电絮凝效果

表 3 不同初始浓度悬浮物溶液电絮凝前后的粒径平均分布

初始浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	工况	百分比/%						
		≤1μm	1~2μm	2~4μm	4~8μm	8~16μm	16~32μm	≥32μm
15000	絮凝前	8.66	17.17	28.53	26.59	14.15	4.45	0.45
	絮凝后	8.66	19.65	38.43	28.10	5.16	0.00	0.00
	自然沉降	16.60	30.62	38.43	13.90	0.45	0.00	0.00
45000	絮凝前	9.87	15.81	19.96	22.49	19.31	6.81	0.08
	絮凝后	24.23	32.78	18.35	5.07	2.16	1.77	1.26
	自然沉降	19.32	31.87	36.46	12.11	0.24	0.00	0.00
85000	絮凝前	5.34	8.94	14.26	18.74	22.49	20.58	9.64
	絮凝后	12.54	23.24	34.68	24.35	5.17	0.02	0.00
	自然沉降	21.85	32.58	34.92	10.50	0.15	0.00	0.00

4 结论与展望

试验结果表明,砂石骨料加工废水电絮凝处理宜

选用铝为阳极、电流强度不高于 0.08 A、电解时间不宜超过 4 min。初始悬浮物浓度对电絮凝效果影响较明显,建议砂石骨料加工废水经 2 h 自然沉降后再进行电絮凝,且电絮凝初始悬浮物浓度不宜超过 50 000 mg/L。电絮凝改变了砂石骨料加工废水中悬浮物颗粒粒径组成,电絮凝后颗粒粒径总体趋小,4 μm 以下颗粒百分比增加。与自然沉降相比,电絮凝对粒径 1 ~ 2 μm 的颗粒去除性能优异,而自然沉降更适宜去除粒径 8 μm 以上的悬浮颗粒。

本文仅限于小规模室内技术研究,电絮凝技术若要应用于工程实践,还需进一步根据砂石骨料岩性、废水产生规模、水质动态特征,结合沉淀池进行设计布置,此外还需从经济层面优化能耗、阳极损耗等,提高电絮凝的经济可行性。

参考文献:

[1] 汤显强,李青云,吴敏,等.一种砂石骨料废水资源化利用的处理工艺.中国:201420395952.3[P].2014.

[2] 陈雯,王丽宏,王刚.构皮滩水电站砂石加工系统废水处理新工艺研究[J].人民长江,2010,41(22):64-66.

[3] 陈海云,刘增峰,韩建东.糯扎渡水电站砂石骨料加工系统废水处理工程工艺分析[J].西北水电,2012,(2):1-3.

[4] 张石磊,晋银佳,童美萍.单极并联式电絮凝反应器处理含 Zn<sup>2+</sup>和 Cd<sup>2+</sup>冶金废水[J].工业水处理,2012,32(10):19-22.

[5] 石淑云.周期换向脉冲电絮凝法处理屠宰场废水[J].水处理技术,2010,36(4):104-107.

[6] 何夏清.电絮凝技术在水处理中的研究进展[J].四川环境,2011,3(30):94-98.

(编辑:胡旭东)

Experimental research of electro – coagulation treatment of wastewater from sand and gravel aggregate processing

TANG Xianqiang<sup>1,2,3</sup>,HAO Jingli<sup>1,2</sup>,LI Qingyun<sup>1,2</sup>

(1. Department of Basin Water Environmental, Changjiang Scientific Research Institute, Wuhan, 430010, China; 2. Key Lab of Basin Water Resources and Eco – environmental Science in Hubei Province, Wuhan, 430010, China; 3. Collaborative Innovation Center for Geo – Hazards and Eco – Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor effect in the treatment of sand and gravel aggregate wastewater by using the conventional flocculation sedimentation method, the laboratory experiments were conducted to investigate the performance of suspended solids (SS) in waste water processed by electro – coagulation method, and the corresponding operational parameters were optimized. The experiment research results indicated that the aluminum was suitable as anode material, the optimal current intensity and electrolysis time were 0.08 A and 4 min respectively, and the initial SS loads should be controlled within 50 000 mg/L. Before the electro – coagulation, the SS loads and suspended particle of larger than 8 μm can be removed by natural sedimentation effectively, and the optimal natural sedimentation time was 2 h. According to the comparison of the distribution of particle size before and after the treatment, it is found that electro – coagulation functions well for removing SS with particle size of 1 to 2 μm. Therefore, sedimentation combined with electro – coagulation would be effective in processing the sand and gravel aggregate wastewater.

**Key words:** sand and gravel aggregate; suspended solids; electro – coagulation; particle size