

三维煤基吸附电极处理氰化废水试验研究

刘巧妮

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:目前, 矿产、金属工业、电子设备制造等行业的快速发展引起工业废水产出量急剧升高, 废水中多种有毒离子(如铬、镉、砷等)及锌、镍、金等贵金属, 特别是氰化提金过程中产生的 CN_T 、 SCN^- 、 CN^- 等危害大, 必须进行无害化治理。为解决氰化废水中大量有害离子的污染问题, 提高氰化废水处理效率, 探索三维煤基电极废水处理办法, 自制的三维煤基电极以阴、阳电极和活性炭粒子 3 个组件为主。以电压、时间为变量, 分析氰化废水中 Zn^{2+} 、 CN_T 浓度的变化规律, 结果显示, CN_T 、 Zn^{2+} 去除率符合 Lagergren 一级动力学模型, 随着煤基电极长周期、连续使用, 废水中 CN_T 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 CN^- 、 SCN^- 的去除率分别为 93.74%、97.28%、95.22%、95.13%、97.05%; 增加煤基电极循环使用次数, 废水中有害离子的去除率微幅下降, 6 次循环后, CN_T 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 CN^- 、 SCN^- 的去除率分别为 92.17%、94.65%、92.67%、90.14%、97.02%。升高电压, 有害离子的去除率不再随电极板自身的吸附饱和发生变化, 煤基电极可重复使用。煤基三维电极设备可简易、低耗、高效地进行工业废液去除处理, 值得推广。

关键词: 三维煤基电极; 活性炭粒子; Zn^{2+} 、 CN_T 去除率; 吸附饱和; 氰化废水

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)04-0152-06

Experimental study on treatment of cyanide wastewater using three-dimensional coal-based adsorption material as electrode

LIU Qiaoni

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China)

Abstract: At present, the rapid development of mineral industry, metal industry, electronic equipment manufacturing and other industries has led to a sharp increase in the output of industrial wastewater. A variety of toxic ions (such as chromium, cadmium, arsenic, etc.) and precious metals such as zinc, nickel and gold in wastewater, especially CN_T , SCN^- , CN^- produced in the process of gold extraction by cyanidation, are harmful and so the harmless management must be carried out. In order to solve the pollution problem of a large number of harmful ions in cyanide wastewater and improve the treatment efficiency of cyanide wastewater, the wastewater treatment method of three-dimensional coal-based electrode was explored. The self-made three-dimensional coal-based electrodes were mainly composed of anion, anode and activated carbon particles. The variation of Zn^{2+} , CN_T in cyanide wastewater was observed with voltage and treatment time as variables. The results show that the removal rates of Zn^{2+} and CN_T ions are in agreement with the Lagergren first-order kinetic model. With the long-term and continuous use of coal-based electrodes, the experimental results show that the removal rates of CN_T , Cu^{2+} , Zn^{2+} , CN^- and SCN^- are 93.74%, 97.28%, 95.22%, 95.13% and 97.05% respectively. With the increase of coal-based electrodes recycling times, the removal rate of harmful ions in each wastewater decreases slightly. After six cycles, the removal rates of CN_T , Cu^{2+} , Zn^{2+} , CN^- and SCN^- are 92.17%, 94.65%, 92.67%, 90.14%, 97.02%. When the voltage is increased, the removal rate of harmful ions does not change with the adsorption saturation of the electrode plate itself, and the coal-based electrode can be reused. Coal-based three-dimensional electrode equipment can be used for industrial waste liquid removal with simplicity, low consumption and high efficiency, which is worth of promotion.

Key words: three-dimensional coal-based electrode; activated carbon particle; removal rule of Zn^{2+} and CN_T ; adsorption saturation; cyanide wastewater

收稿日期: 2019-01-04; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19010401

基金项目: 陕西省青年自然科学基金资助项目(2018JQ2044)

作者简介: 刘巧妮(1986—), 女, 陕西西安人, 工程师, 主要研究方向为煤化工新技术开发。E-mail: liuqiaoni0122@126.com

引用格式: 刘巧妮. 三维煤基吸附电极处理氰化废水试验研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 152-157.

LIU Qiaoni. Experimental study on treatment of cyanide wastewater using three-dimensional coal-based adsorption material as electrode[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 152-157.



移动阅读

0 引言

目前,矿产、金属工业、电子设备制造等行业的快速发展使工业废水产出量急剧增加,废水中多种有害离子(如铬、镉、砷等)及锌、镍、金等贵金属,特别是氰化提金过程中产生的 CN_T 、 SCN^- 、 CN^- 等危害较大,必须进行无害化治理。目前处理废水中有害离子或贵金属的传统方法有碱性氯化法、 SO_2 空气法、电解法和 H_2O_2/O_3 氧化法、活性炭吸附法、酸化法、离子交换法、铜/锌盐沉淀法、乳化液膜法等^[1-3]。

电化学方法是一种较清洁的水治理方式,不会产生二次污染,即在电场作用下,污染离子通过在电极上直接或间接发生电化学反应而从废水中去除的方法,与传统方法相比,其处理工艺、设备简易且不会引入其他有害杂质,还可去除多种有害离子。宋光辉等^[4]利用自制煤基电极高强度去除低浓度贵金属贫液,结果表明,保持原液 pH 值不变,电压为 1.6 V,温度 50 °C,经 6 h 后,溶液中铂、钯的去除率分别为 97.13% 和 99.32%,达到资源回收效果。吴娜娜等^[5]分别以铁板和石墨板为阴、阳极,活性炭/纳米铁粒子为第三电极处理孔雀石绿染料废水,研究时间、pH 值、电解质、电压、极板间距等对脱色率和 COD 去除率的影响,认为三维电极-电 Fenton 法能够有效处理孔雀石绿染料废水,对废水的色度和 COD 均有较高的去除率。崔彬等^[6]采用三维电极电解法对 TNT 废水进行处理,研究不同槽电压对电解效果的影响,并得到处理 TNT 废水的最佳工艺,发现增大槽电压有利于有机物的去除,但槽电压过高使析氧副反应加剧,阻碍了污染物在电极表面的有效富集^[7]。三维电极体系是以二维电极体系为基础,在阴阳极中间增加一粒子电极为第三极,通过电吸附和电化学氧化/还原反应有效去除废水中的有害离子^[7-8]。与传统的二维电极体系相比,三维电极体系具有电流效率更高、传质距离更短、体面比更高、能耗更低等优点^[9];因此在上述优势条件下,三维电极废水处理已成为国内外研究的热点。

以煤为原料制成的煤基电极,可通过物理或化学方法改变其组织结构和表面基团,采用聚合、共价键等方式使煤基电极材料表面形成特殊的微结构,其物理性质和化学性质稳定,且具有良好的耐高温和导电性。本文以自制的煤基电极板作为阴极和阳极、活性炭粒子为第三电极,分析 Zn^{2+} 、 CN_T 去除率的动力学特性,以及改变电压、时间和电极重复使用后对氰化废水中 CN_T 、Cu、 Zn^{2+} 、 SCN^- 、 CN^- 等去除率

的影响,以期分析三维煤基电极废水处理的内在机理,为高效处理氰化废水的方法选择提供理论依据和参考。

1 试验

1.1 原料

选取中金嵩县嵩原黄金冶炼厂生产过程中产生的未经处理的氰化废水,其主要有害成分种类及浓度见表 1。采用低变质粉煤、液化残渣、去离子水按一定比例混合均匀,经模具压制成型,炭化热解、活化加工成 $\phi 35\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的煤基板作为阴极、阳极^[10]。市场普通活性炭粒子为第三电极,粒径为 1~2 mm。

表 1 氰化废水中主要有害成分浓度

Table 1 Concentration of main harmful components in cyanide wastewater/mg mg/L

CN_T	CN^-	Cu^{2+}	Zn^{2+}	SCN^-	Fe
1 727.38	366.52	546.91	463.22	270.56	46.31

从表 1 可以看出,氰化法冶金废水中 CN_T 浓度非常高,是游离态的 CN^- 离子浓度的 4~5 倍,说明氰化废水样品中存在一定量的氰化络合离子,铜氰 $Cu(CN)_4^{3-}/Cu(CN)_3^{2-}$ 及锌氰 $Zn(CN)_4^{2-}$ 络合离子合离子浓度均较大,分别为 546.91 mg/L 与 463.22 mg/L,铁氰 $Fe(CN)_6^{4-}/Fe(CN)_6^{3-}$ 络合离子浓度相对较低。

1.2 试验方法

1.2.1 电极材料制备

分别取低变质粉煤 8 g 和液化残渣 2 g 混合均匀,加去离子水 1 g,搅拌均匀后放入模具中,经手动压片机压制成型(25~30 MPa),将压制成型的粉煤片放置马弗炉中,炭化工艺为 820 °C、30 min,随炉冷却至室温取出,放入 15% 的 HNO_3 溶液中活化 10~12 h,去离子水冲洗至 pH=7,放入干燥箱进行干燥待用。

1.2.2 氰化废水处理

将 50 mL 氰化废水倒入 100 mL 烧杯中,以煤基电极作为阴极、阳极,分别接入恒压电源的正负极,再将阴、阳电极平行插入溶液中,两极板间距为 15 mm,极板平面与液面垂直(图 1)。将活性炭加入烧杯中,烧杯置于电磁搅拌器上匀速搅拌。改变外加电压,按照设定的处理时间取样,测试离子浓度,并计算其去除率。试验结束后,用去离子水反复冲洗煤基电极板和活性炭第三电极,至清洗水的 pH=7。

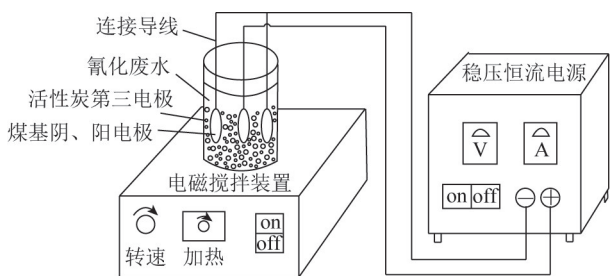


图1 煤基三维电极处理氰化废水装置

Fig. 1 Coal-based three-dimensional electrode equipment for Cyanide Wastewater Treatment

1.3 离子浓度测定与去除率计算

1.3.1 离子浓度测定

1) Zn^{2+} 测定。① 分别取 10 mL 待测液,加去离子水稀释至 100 mL,倒入 500 mL 锥形瓶中,分别加入 4 滴 HCl、4 g NH_4F 、20 mL 无水乙醇,为避免铜干扰,加入 10 mL CH_4N_2S 溶液和 100 mL 去离子水。放入电磁粒子,加热至 50 °C,用电磁搅拌器搅拌均匀;② 用 2 mol/L NaOH 溶液调节 pH = 5 ~ 6,加入 40 mL CH_3COONa 缓冲溶液 1 ~ 2 滴、0.5% 二甲酚橙指示剂滴定至溶液呈鲜红色^[4]。③ 立即用 EDTA 标准溶液滴定,溶液由红色变为黄色后,进行 ICP 分析。

2) CN_T 测定。量取 10 mL 待测定溶液,用蒸馏水稀释至 100 mL,倒入放有玻璃珠的蒸馏瓶中,加入 10 g/L EDTA-2Na 溶液 5 mL 和 H_3PO_4 5 mL,迅速盖上瓶塞,打开冷凝水,缓慢加热电炉,以 10 mL 浓度为 10 g/L 的 NaOH 作为接收液,接收至 50 mL;量取 10 mL 接收液倒入锥形瓶中,加入 5% KI 溶液 5 ~ 8 滴,用 0.01 mol/L (高浓度用 0.02 mol/L) 的 $AgNO_3$ 标准溶液进行滴定,滴定至溶液出现荧光色沉淀^[11],记录分析数据。

3) SCN^- 测定。采用 7200 型分光光度计,① 在 50 mL 容量瓶中分别放入浓度为 10 g/L 的 NaSCN 标准溶液 0.5、1.0、1.5 mL,加入浓度 6% FeCl 溶液 2 mL,定容至 50 mL 摇匀;② 取 0.1 mL 待测溶液重复步骤①,将配置溶液静置 5 min 后使反应充分显色^[12];③ 设定分光光度计波长为 453.0 nm,绘制标准曲线,读取 SCN^- 浓度。

1.3.2 去除率计算方法

溶液中 CN_T 、Cu、 Zn^{2+} 及 CN^- 等离子浓度采用化学滴定法分析, SCN^- 采用分光光度计测量,离子去除率 φ 的计算公式^[4]为

$$\varphi = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_0 为离子的初始质量浓度,mg/L; C_1 为处理后离子的质量浓度,mg/L。

1.4 电极重复使用试验

采用煤基电极,极板间距为 15 mm,外加电压 4 V,活性炭粒子 4 g,在三维电极试验装置中处理原废水溶液 5 h,测定各离子去除量,更换处理过的氰化废水,用去离子水冲洗电极,重复试验 6 次。

2 试验结果与分析

2.1 吸附动力学模型

离子去除率的吸附动力学一般采用 Lagergren 一级吸附速率方程与二级吸附速率方程^[13],Lagergren 一级吸附速率方程为

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2)$$

式中, q_t 、 q_e 分别为 t 时刻和平衡时离子的吸附量,mg/g; k_1 为一级吸附速率常数, min^{-1} 。

离子去除率的二级吸附速率方程为

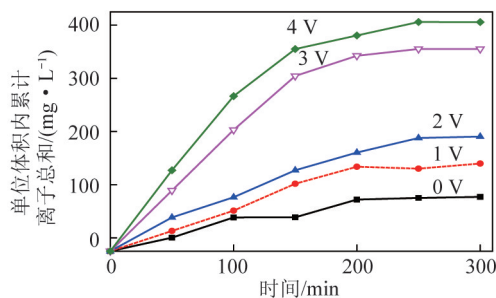
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

式中, k_2 为二级吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ 。

2.2 Zn^{2+} 的去除

取待处理的氰化废水 100 mL,设定电压为 0、1、2、3、4 V 进行三维电极电吸附处理试验,处理时间分别为 50、100、150、200、250、300 min,测定 Zn^{2+} 浓度,计算去除量,采用 Lagergren 一级、二级动力学方程进行拟合。

图 2 为不同电压下,三维煤基电极法去除废水中 Zn^{2+} 的试验结果。可以看出,随着时间延长,经处理后的废水中 Zn^{2+} 浓度逐渐减小,250 min 后几乎不再发生变化,达到吸附平衡。同时随外加电压的升高,三维煤基电极对废水中 Zn^{2+} 的吸附量不断增大,说明电压的升高对 Zn^{2+} 离子的去除具有促进作用。

图2 电压对 Zn^{2+} 去除的影响Fig. 2 Effect of voltage on removal of Zn^{2+}

Zn^{2+} 吸附动力学拟合参数见表 2。由表 2 可知,吸附量试验值与理论值和一级吸附动力学参数相差较小,线性相关系数较高,说明该方法去除氰化废水中的 Zn^{2+} 符合 Lagergren 一级动力学模型。

表2 Zn²⁺吸附动力学拟合参数Table 2 Fitting parameters of Zn²⁺ adsorption kinetics

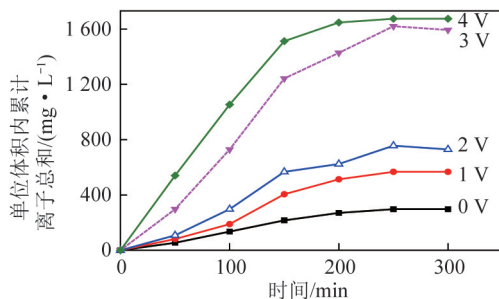
电压/V	吸附量(试验值)/ (mg·L ⁻¹)	一级动力学			二级动力学		
		$k_1/10^{-4}$	R_1^2	$q_e/(mg·L^{-1})$	$k_2/10^{-2}$	R_2^2	$q_e/(mg·L^{-1})$
0	102.1	-8.8	0.901 6	102.414 7	0.419	0.610 7	108.726 7
1	164.6	-16.7	0.908 9	168.938 9	0.210	0.475 5	179.848 3
2	215.5	-22.2	0.968 5	216.435 3	0.250	0.910 3	225.408 5
3	381.3	-66.5	0.926 9	367.723 7	0.141	0.837 5	409.303 2
4	432.1	-105.3	0.965 7	432.028 4	0.153	0.935 5	453.836 3

2.3 CN_T 的去除

取氰化废水 100 mL,外加电压设定为 0、1、2、3、4 V 对废水进行三维电极电解处理,处理时间分别为 50、100、150、200、250、300 min。图 3 为 CN_T 去除的试验结果。可知,随着时间延长,CN_T 的去除量增加,250 min 后几乎不再发生变化,可视为已达到电解平衡。CN_T 在电极的吸附量随电压的增大而增大,说明增大电压可促进 CN_T 电解,提高废水中 CN_T 的去除率。

CN_T 吸附动力学拟合参数见表 3。由表 3 知,吸附量试验值与理论值和一级吸附动力学参数差值

较小,说明该方法去除氰化废水中的 CN_T 符合 Lagergren 一级动力学模型。

图3 电压对 CN_T 去除的影响Fig. 3 Effect of voltage on removal of CN_T表3 CN_T 吸附动力学拟合参数Table 3 Fitting parameters of CN_T adsorption kinetics

电压/V	吸附量(试验值)/ (mg·L ⁻¹)	一级动力学			二级动力学		
		$k_1/10^{-2}$	R_1^2	$q_e/(mg·L^{-1})$	$k_2/10^{-4}$	R_2^2	$q_e/(mg·L^{-1})$
0	297.1	0.07	0.932 2	320.813 7	4.386 5	0.111 4	340.816 0
1	567.3	0.15	0.932 3	633.616 4	-3.927 6	0.064 2	697.257 6
2	729.3	0.20	0.929 7	800.582 3	-1.256 5	0.215 6	885.729 5
3	1 593.5	0.88	0.945 1	1 665.358 0	0.972 7	0.073 0	1 833.224 0
4	1 674.7	1.07	0.927 6	1 688.311 0	3.532 4	0.863 7	1 797.413 0

2.4 电压的影响

电压是电吸附、电解反应的基础条件,当外加电压小于废水的分解电压时,发生电吸附反应,废水中的带电离子在电场作用下发生定向迁移,集中吸附,从而达到去除的目的。

由图 2、3 可以看出,随着外加电压的提高,废水中离子的去除量呈明显变化。当电压为 0 V 时,离子的吸附量均较低;当电压升至 1 V 和 2 V 时,以电吸附为主,废水中的离子去除量较 0 V 时有小幅提升;当电压升至 3~4 V 时,以电沉积为主,电压增加至 4 V,废水中 CN_T、CN⁻、Cu、Zn²⁺ 和 SCN⁻ 的去除量达到最大值。说明粒子电极除发生吸附作用外,还在电场的作用下,其两端发生氧化还原反应,达到吸

附饱和^[4],从而提高废水中离子的去除量。

2.5 时间的影响

三维电极处理废水的过程主要包括表面催化氧化、脱附和吸附等电化学过程,其中处理时间对三维电极的去除效果有明显的影。时间过短,会使吸附过程不充分或不完全;时间过长,会造成效率下降和资源浪费。因此,合适的去除时间对三维电极处理废水具有直接影响。

由图 2、3 发现,处理时间 ≤ 2 h 时,废水中离子的去除量随时间的延长迅速提高;处理时间在 2~3 h 时,离子去除量略减;时间 > 3 h 时,废水中离子的去除量逐渐趋于平稳。这主要是由于在三维电极试验前期,废水中离子浓度较高,在外加电场作用下,

离子以较快的速度移动到主电极和粒子电极表面,且煤基电极材料自身对离子也有一定的吸附作用。随着时间延长,离子迁移数量逐渐下降,在2~3 h时,曲线趋于平缓,超过3 h后,电极沉积物越来越多,电阻率增大,电流效率降低,加之浓度减小,去除率逐渐趋于稳定^[7]。

2.6 电极重复使用试验

电极重复试验结果见表4。可以看出,第1次处理后,废水中 CN_T 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 CN^- 、 SCN^- 去除率分别为93.74%、97.28%、95.22%、95.13%、97.05%,随着煤基电极使用次数的增加,每次废水中有害离子的去除率均微降,6次后, CN_T 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 CN^- 、 SCN^- 去除率分别为92.17%、94.65%、92.67%、90.14%、97.02%。经炭化与硝酸活化后

的煤基电极材料和活性炭粒子电极均为多孔碳材料,其孔径分布均匀,且具有较大的比表面积,材料表面含有大量亲水性含氧官能团(如羧基、羟基、甲氧基等)^[14],进一步提高了碳材料的吸附能力。反应过程中粒子电极间会形成大量微电极,提高了反应效率。由于电吸附仅发生在阳极与粒子电极的阳极端,而物理吸附则发生在阴、阳极表面,因此在初次处理废水过程中,一部分有害离子被阴、阳电极及粒子电极自身吸附。随着试验次数增加,多孔材料自身吸附趋于饱和,且Cu、Zn金属及其他沉淀物质因电镀作用沉积于电极表面,炭化电极吸附孔被堵塞,去除量略有下降。电极经多次循环使用后,只发生电吸附反应,去除率基本稳定,且在90%以上,说明煤基电极可多次重复使用。

表4 煤基电极重复使用试验结果

Table 4 Experimental results of coal-based electrodes reuse

离子	原液离子浓度	重复试验次数											
		1		2		3		4		5		6	
		剩余离子浓度	去除率/%	剩余离子浓度	去除率/%	剩余离子浓度	去除率/%	剩余离子浓度	去除率/%	剩余离子浓度	去除率/%	剩余离子浓度	去除率/%
CN_T	1 727.38	108.07	93.74	112.11	93.50	123.57	92.85	121.10	92.99	130.41	92.45	135.21	92.17
Zn^{2+}	463.22	12.62	97.28	15.36	96.68	14.79	96.80	13.85	97.01	20.10	95.66	24.76	94.65
Cu^{2+}	546.91	26.09	95.22	28.17	94.85	28.20	94.84	30.47	94.43	42.29	92.27	40.10	92.67
SCN^-	270.56	13.18	95.13	13.23	95.11	14.10	94.79	18.61	93.12	20.62	92.39	26.67	90.14
CN^-	366.52	10.81	97.05	10.22	97.21	10.63	97.10	11.64	96.82	10.58	97.11	10.92	97.02

注:原液离子浓度单位为mg/L;剩余离子浓度单位为mg/L。

当外加电压超过有害物质的分解电压时,溶液中有害离子会随电流迁移到电极表面,从而达到吸附饱和。电压为4 V时,有害离子去除率不再随电极板的吸附饱和而发生明显变化,说明已达到分解电压,三维电极法去除有害离子性能趋于稳定。

3 结论

1) 三维煤基电极对氰化废水中的 Zn^{2+} 和 CN_T 的去除率,符合 Lagergren 一级吸附方程。

2) 在处理废水过程中,小部分有害离子会被煤基电极及粒子电极所吸附。随着煤基电极使用次数增加,造成其自身吸附饱和导致离子去除量小幅下降,各离子去除率仍在90%以上。当电压继续升高、时间延长时,有害离子的去除率不再随电极板的吸附饱和而发生明显变化,说明已达到分解电压。

3) 三维煤基电极处理氰化废水装置设备简易、低耗、高效,并且可重复使用,适用于工业废液处理,能高效回收贵金属并能去除氰根离子,值得推广。

参考文献(References):

- [1] 李亮,方学友,金小颖,等. 活性炭填充三维电极电解法处理氨氮废水研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):40-43.
LI Liang, FANG Xueyou, JIN Xiaoying, et al. Treatment of ammonia nitrogen wastewater by activated carbon filled three-dimensional electrolysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(2):40-43.
- [2] PARK D, KIM Y M, LEE D S, et al. Chemical treatment for treating cyanides-containing effluent from biological cokes wastewater treatment process[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 143(1/2/3):141-146
- [3] CHEN C Y, KAO C M, CHEN S C. Application of klebsiella oxytoca immobilized cells on the treatment of cyanide wastewater[J]. Chemosphere, 2008, 71(1):133-139.
- [4] 宋永辉,雷思明,周军. 沉淀-电吸附联合处理氰化提金废水[J]. 黄金科学技术,2015,23(4):75-79.
SONG Yonghui, LEI Siming, ZHOU Jun, et al. Treatment of cyanide gold extraction wastewater by precipitation-electroadsorption[J]. Gold Science and Technology, 2015, 23(4):75-79.
- [5] 吴娜娜,钱虹,郑璐,等. 三维电极-电 Fenton 法处理孔雀石绿

- 染料废水研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2018, 34(1): 183-188.
- WU Nana, QIAN Hong, ZHENG Lu, et al. Treatment of malachite green dye wastewater by three-dimensional electrode-electro-fenton process[J]. Journal of Shenyang Architectural University, 2018, 34(1): 183-188.
- [6] 崔彬, 张国珍, 刘晓燕, 等. 电压对采用三维电极处理 TNT 废水的影响[J]. 净水技术, 2009, 28(4): 46-49.
- CUI Bin, ZHANG Guozhen, LIU Xiaoyan, et al. Effect of voltage on TNT Wastewater treatment with three-dimensional electrode[J]. Water Purification Technology, 2009, 28(4): 46-49.
- [7] 宋永辉, 姚迪, 张珊, 等. 三维电极处理氰化废水的研究[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(5): 116-121.
- SONG Yonghui, YAO Di, ZHANG Shan, et al. Treatment of cyanide wastewater by three-dimensional electrode[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(5): 116-121.
- [8] 宋永辉, 田慧, 雷思明, 等. 电吸附处理氰化废水过程中外加电压的影响研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(8): 904-911.
- SONG Yonghui, TIAN Hui, LEI Siming, et al. Study on the influence of applied voltage on the treatment of cyanide wastewater by electroadsorption[J]. Rare Metals, 2017, 41(8): 904-911.
- [9] 黄琳琳. 电催化氧化用于废水深度处理实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [10] 宋永辉, 田慧, 李延侠, 等. 硝酸浓度对煤基电极材料结构与性能的影响[J]. 煤炭转化, 2015, 38(4): 84-88.
- SONG Yonghui, TIAN Hui, LI Yanxia, et al. Effect of nitric acid concentration on structure and properties of coal-based electrode materials[J]. Coal Conversion, 2015, 38(4): 84-88.
- [11] 吴春辰. 煤基吸附材料为电极处理含氰废水的实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [12] 刘建军, 李建芬, 周汉芬. 分光光度法检测废水中的硫氰酸根含量[J]. 武汉轻工大学学报, 2009, 28(4): 60-62.
- LIU Jianjun, LI Jianfen, ZHOU Hanfen. Spectrophotometric determination of thiocyanate in Wastewater[J]. Journal of Wuhan University of Light Industry, 2009, 28(4): 60-62.
- [13] CHIOU Ming-Shen, LI Hsing-Ya. Equilibrium and kinetic modeling of adsorption of reactive dye on cross linked chitosan beads[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 93(2): 233-248.
- [14] GE X, MA X, WU Z, et al. Modification of coal-based activated carbon with nitric acid using microwave radiation for adsorption of phenanthrene and naphthalene[J]. Research on Chemical Intermediates, 2014, 41(10): 1-21.