

## 3D-SS-Ti/Pt-AC体系处理黄金冶炼含氰废水

杨 玮<sup>1,2,3</sup>, 张 睿<sup>1,2,3</sup>, 龙 涛<sup>1,2,3\*</sup>, 邓 莎<sup>1,2,3</sup>, 杨 超<sup>1,2,3</sup>, 宝冬润<sup>1,2,3</sup>(1. 西安建筑科技大学资源工程学院; 2. 陕西省黄金与资源重点实验室;  
3. 西安建筑科技大学绿色选冶协同技术与装备研究所)

**摘要:**通过构建三维电极体系(3D-Ti/Pt-SS-AC),以改性活性炭作为颗粒电极,对某黄金冶炼厂产生的含氰废水进行处理。试验结果表明:反应150 min时,游离氰化物和总氰化物的去除率分别为99.9%和96.04%,Cu、Fe和Zn的去除率分别为98.52%、99.28%和91.04%。SEM和EDS结果显示,反应后阴极表面存在大量Cu、Fe和Zn沉积;XRD表征检测到铜氧化物和Fe的特征衍射峰;XPS分析观察到Zn 2p<sub>3/2</sub>和Zn 2p<sub>1/2</sub>轨道的特征峰,证实了金属的有效沉积。FTIR分析显示,反应后颗粒电极表面含氧官能团比反应前减少,证明含氧官能团参与了反应过程,起到提供活性位点、增强催化性能的作用。研究证实了三维电极体系去除氰化物和重金属的可行性,为含氰废水的绿色净化治理提供了新的思路和研究方法。

**关键词:**三维电极;含氰废水;颗粒电极;电化学;黄金冶炼;绿色治理

中图分类号:TD15 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)09-0132-07

doi:10.11792/hj20250917

## 引言

氰化物作为现代工业中不可或缺的重要化工原料,在冶金<sup>[1-2]</sup>、采矿<sup>[3]</sup>、石油<sup>[4]</sup>和煤炭<sup>[5]</sup>等领域得到了广泛应用。然而,其在工业生产过程中产生的含氰废水毒性强、成分复杂,对生态环境和生物安全构成严重威胁。氰化提金技术作为传统的冶金工艺,目前仍占据主导地位<sup>[6]</sup>。氰化提金过程中会产生大量剧毒含氰废水,主要成分为铜、锌、铁等重金属和游离氰化物(CN<sup>-</sup>)及金属氰络合物(主要形态为[Cu(CN)<sub>4</sub>]<sup>3-</sup>、[Cu(CN)<sub>2</sub>]<sup>-</sup>、[Zn(CN)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>、[Fe(CN)<sub>6</sub>]<sup>4-</sup>等<sup>[7]</sup>),部分工艺还会产生硫氰根离子(SCN<sup>-</sup>)等<sup>[8]</sup>。这些物质对水生生物和土壤环境具有毒害性,且废水中的重金属及络合物还会通过食物链生物富集作用威胁人体健康。部分金属氰络合物化学稳定性较高,在自然环境中降解速率十分缓慢,导致污染持续存在,治理难度较大。因此,开发兼具高效性和环境友好性的含氰废水处理技术,不仅是工业污染治理的迫切需求,而且是推动黄金选冶领域绿色发展的重要方向。

传统的化学氧化法如碱性氯化法<sup>[9]</sup>、高铁酸盐氧化法<sup>[10]</sup>、SO<sub>2</sub>-空气氧化法<sup>[11]</sup>和沉淀法<sup>[12]</sup>等,虽已广泛应用,但大多存在需持续投加化学物质、易造成二次

污染等问题,难以满足现代工业废水处理对清洁性和可控性的需求。电化学法因其环境友好性、具备反应调控预期等优势,潜在应用价值较高。然而,二维电极体系因电极反应接触面积小、传质效率低等缺点,在处理复杂废水时表现出明显的局限性<sup>[13]</sup>。有研究通过光电催化进行氰化物的电化学降解,反应150 min时,氰化物去除率高于60%<sup>[14]</sup>。目前,许多研究者因二维电极反应速率的局限性将电化学法与其他方法进行联合以提高氰化物去除速率。曾鑫辉等<sup>[15]</sup>通过加入NaCl,Cl<sup>-</sup>在阳极表面被氧化生成Cl<sub>2</sub>和ClO<sup>-</sup>,对溶液中的污染物进行氧化降解,在电压为6 V、pH值为9、电解时间为3 h、极板间距为1.5 cm、NaCl添加量为10 g/L的条件下,总氰化合物、化学需氧量和铜氰络合物的去除率最高分别达到97.2%、96%和97.7%。作为二维电极的优化方法,三维(3D)电极技术<sup>[16]</sup>通过引入颗粒电极形成立体化的反应界面,大幅提高了电极的活性面积和传质效率,提高了污染物的降解效果<sup>[17]</sup>。相关研究多将多孔活性炭、金属或导电陶瓷等材料作为颗粒电极构建高比表面积反应界面,提升电极/溶液界面的传质效率与活性位点密度以实现高效反应<sup>[18]</sup>。

在三维电极体系中,适宜的电极组合是实现污染

收稿日期:2025-04-25; 修回日期:2025-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52374277)

作者简介:杨 玮(1971—),男,教授,博士,从事稀贵金属选冶、资源综合回收及矿业经济研究工作;E-mail:yangwei@xauat.edu.cn

\*通信作者:龙 涛(1985—),男,副教授,从事矿物资源综合利用与环境保护研究工作;E-mail:longtao@xauat.edu.cn

物高效去除的重要因素。针对含氰废水特性,本文采用电极改性的方式构建了3D-Ti/Pt-SS-AC反应体系,通过该体系对黄金冶炼含氰工业废水进行了处理研究。结合多种分析手段,对反应后电极结构和反应机制进行了验证分析,为含氰废水处理的材料设计与技术优化提供了试验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

仪器:恒温加热磁力搅拌器(ETS-1),反应釜(四氟内胆),pH计(pHS-3C),电子分析天平(JJ124BC),直流稳压电源(JP2005D),电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 5110)。

药剂:十六烷基三甲基溴化铵( $C_{19}H_{42}BrN$ , CTAB),硝酸银( $AgNO_3$ ),试银灵(对二甲氨基亚苄基罗丹宁),氢氟酸(HF),氯铂酸( $H_2PtCl_6$ ),丙酮( $CH_3COCH_3$ ),乙二胺四乙酸二钠( $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ ),硝酸( $HNO_3$ ),异丙醇( $C_3H_8O$ ),无水乙醇( $C_2H_5OH$ )。

试验用含氰废水由河南某黄金冶炼厂提供,其主要成分分析结果如表1所示。

表1 含氰废水主要成分分析结果

Table 1 Main composition analysis results of cyanide-containing wastewater

成分	CN <sup>-</sup>	Cu	Fe	Zn	总氰化合物
$\rho/(mg \cdot L^{-1})$	728.56	345.9	74.01	331.61	1 665.28

### 1.2 电极制备

将网状钛片(50 mm×50 mm×1.5 mm)作为基底材料,经600目砂纸抛光至表面光滑,随后浸入由HF、HNO<sub>3</sub>和去离子水(体积比1:4:10)配制的混酸溶液中,进行2 min酸洗去除其表面氧化膜和部分杂质,然后依次用无水乙醇和去离子水清洗各3次,最后放置烘箱中在60℃下干燥。铂涂层通过多步涂覆和热处理工艺制备,涂覆液由10 g/L H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>·6H<sub>2</sub>O和10%异丙醇溶液配制。钛基体上的涂覆溶液浸涂均匀后,在300℃下热处理30 min,使氯铂酸分解形成初始涂层,为确保涂层的均匀性和厚度,涂覆与热处理循环3次。此时涂层数达到3层,干燥10 min并在400℃的条件下烧结2 h,待冷却至室温后取出,得到多层覆盖的Ti/Pt电极片。颗粒电极采用溶剂热法制备,具体方法为:将采用去离子水超声清洗6 h,并在60℃恒温干燥箱中烘干至恒质量后的颗粒活性炭置于盛有HNO<sub>3</sub>和CTAB(9.75% HNO<sub>3</sub>,  $5.49 \times 10^{-5}$  mol/L

CTAB)的混合溶液中,协同改性时间为120 min,改性后的活性炭用去离子水洗涤3次,然后在烘箱烘干至恒质量后密封。

### 1.3 反应条件

研究采用改性后的活性炭作为颗粒电极,Ti/Pt和不锈钢(SS)分别作为阳极和阴极,构成三维电极体系对氰化物进行电解氧化。厚度1.5 mm,长×宽为50 mm×50 mm的不锈钢阴极片和Ti/Pt阳极片分别作为阴、阳极板,采用直流稳压电源。本装置设置了带孔固定槽,使颗粒电极悬挂式存在于阴极和阳极之间。反应控制条件为电压4 V,极板间距34 mm,反应水样体积300 mL。试验均在常温条件下完成。

### 1.4 电极表征

采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS Sigma 300)观察反应后电极的表面形貌,以50 μm分辨率拍摄,并通过能谱法(EDS)分析元素组成。采用X射线光电子能谱仪(XPS, 美国Thermo Scientific K-Alpha)对3D反应后SS阴极表面进行测试分析,测试面为阴极板表面,工作电压为12 kV,灯丝电流为6 mA,激发源为Al Kα射线(1 486.6 eV),电子发射角为60°,刻蚀速率为0.29 nm/s,扫描能量为150 eV,步长1 eV;以C 1s结合能284.80 eV为能量标准进行荷电校正。采用X射线衍射仪(XRD, 德国Bruker D8 Advance)对3D反应后SS阴极进行表征,确定样品晶体结构及组成。将铜靶作为测试靶材,扫描角度为10°~80°,扫描速度2°/min。采用傅里叶红外光谱(FTIR, 美国Thermo Fisher Scientific Nicolet iS20)测定处理实际废水前后活性炭官能团变化,活性炭进行粉体常规压片,使用红外光源,测试波数为400~4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>。

### 1.5 分析测定

采用电感耦合等离子体光谱法测定Cu、Fe和Zn含量。采用HJ 484—2009《水质 氰化物的测定容量法和分光光度法》测定总氰化合物含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三维电极体系处理含氰废水

#### 2.1.1 氰化物的去除

为探讨三维电极体系对实际含氰废水的处理效果,以CN<sup>-</sup>和总氰化合物(CN<sub>T</sub>)为研究对象,对体系的反应特性进行分析,结果如图1所示。由图1-a)、b)可知:在反应开始阶段,CN<sup>-</sup>质量浓度迅速降低,30 min后降至406.78 mg/L,去除率达44.17%。随反

应时间延长至 90 min,  $\text{CN}^-$  质量浓度降至 143.11 mg/L, 去除率提升至 80.36 %。反应 120 min 时, 残余  $\text{CN}^-$  质

量浓度为 34.69 mg/L, 去除率高达 95.24 %; 反应 150 min 时,  $\text{CN}^-$  去除率达 99.9 % 以上。

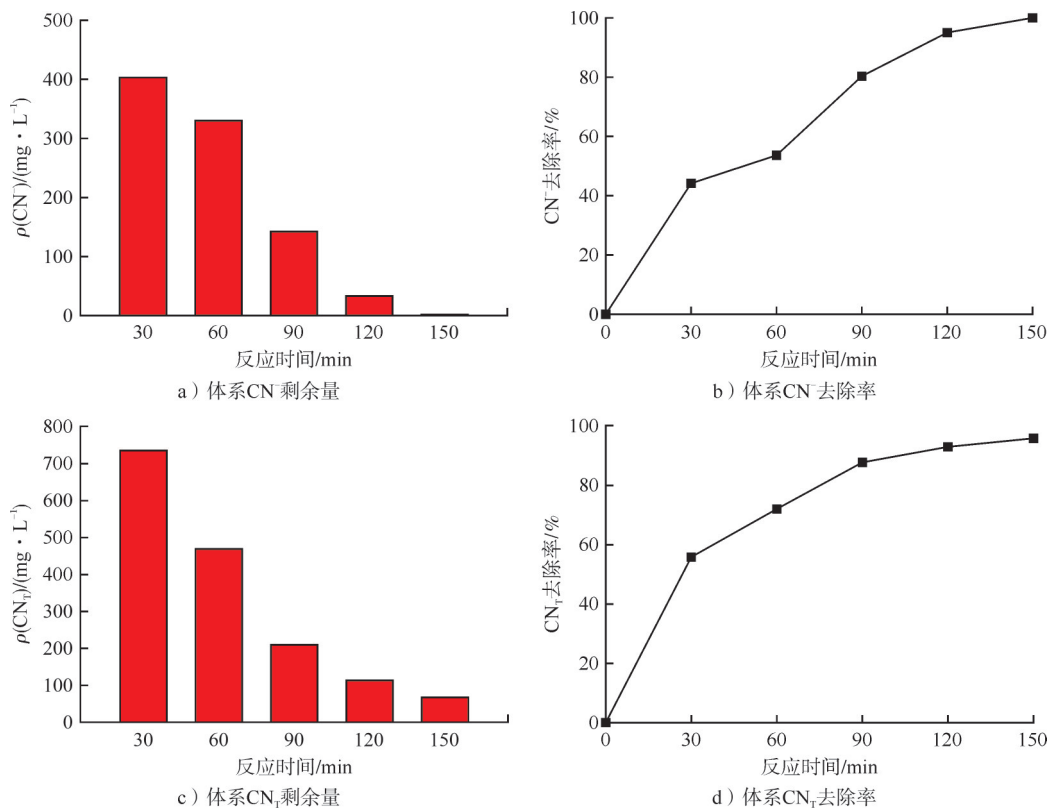


图 1  $\text{CN}^-$  和  $\text{CN}_T$  的去除结果

Fig. 1 Removal results of  $\text{CN}^-$  and  $\text{CN}_T$

由图 1-c)、d) 可知: 反应 30 min 时, 体系  $\text{CN}_T$  质量浓度迅速下降, 从初始的 1 665.28 mg/L 降至 732.9 mg/L, 去除率为 55.99 %, 即反应初期体系降解污染物的能力最强; 这是由于反应初期污染物质量浓度最高, 溶液导电性高, 传质速率快, 单位体积污染物的降解量大。随反应的持续进行,  $\text{CN}_T$  质量浓度稳步降低, 120 min 时降至 112.75 mg/L, 去除率达 93.23 %; 150 min 时  $\text{CN}_T$  质量浓度仅为 65.92 mg/L, 去除率达到 96.04 %, 显示出三维电极体系在深度处理阶段的高效性与稳定性。

$\text{CN}^-$  相比于氰络合物更易通过电化学氧化去除, 而络合氰的去除过程则可能受到络合键稳定性和体系内氧化环境的影响<sup>[19]</sup>。但是, 随着络合氰的解络,  $\text{CN}^-$  含量又会增加, 所以表现出  $\text{CN}^-$  去除率先增后降又增的现象。此体系对实际含氰废水具有高效的降解能力, 在对  $\text{CN}^-$  快速去除的同时也实现了络合氰的深度降解。

### 2.1.2 重金属的去除

废水中的 Cu、Zn 和 Fe 等重金属通常以氰络合物形式 ( $[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$ 、 $[\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$ 、 $[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$

和  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$  等) 存在, 其有效去除对含氰废水的深度处理尤为关键。Cu、Zn 和 Fe 去除试验结果如图 2 所示。由图 2 可知: Cu、Zn、Fe 等 3 种金属离子的质量浓度均随反应进行明显降低。反应进行至 30 min 时, Fe 去除率达到 70.59 %, 远高于 Cu 去除率 (63.97 %) 和 Zn 去除率 (44.9 %)。随着反应的继续进行, 3 种金属的去除率均逐步提高, 反应 120 min 时, Cu、Zn 和 Fe 的去除率分别达到 95.98 %、84.99 % 和 98.27 %。反应 150 min 时, Fe 已接近完全去除, 达到 99.28 %, Cu 去除率也高达 98.52 %, Zn 去除率为 91.04 %, 符合金属氰络合物的电位梯度模型。

### 2.1.3 电流动态变化

以上处理过程中, 废水中离子组成与含量会直接影响体系的导电性, 从而反映在电流强度的动态变化上, 此过程侧面印证了体系中存在多种不同反应。为更直观地展示此过程, 对比了配制氰化钾溶液 (仅含  $\text{CN}^-$ ) 与实际工业含氰废水在相同条件下的电流强度及  $\text{CN}^-$  去除率随时间的变化规律, 结果如图 3 所示。

由图 3-a) 可知: 在相同电解条件下, 配制氰化钾溶液电流强度随电解反应的进行逐渐降低并趋于稳

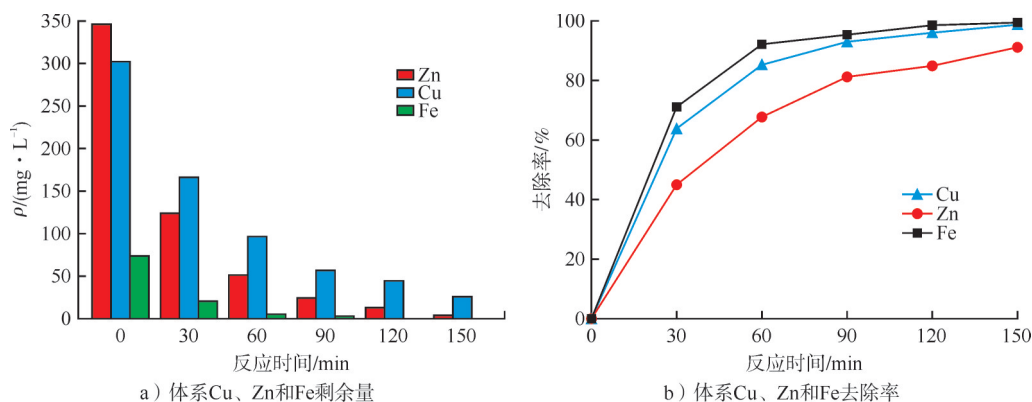


图2 Cu、Zn和Fe去除试验结果

Fig. 2 Removal test results of Cu, Zn, and Fe

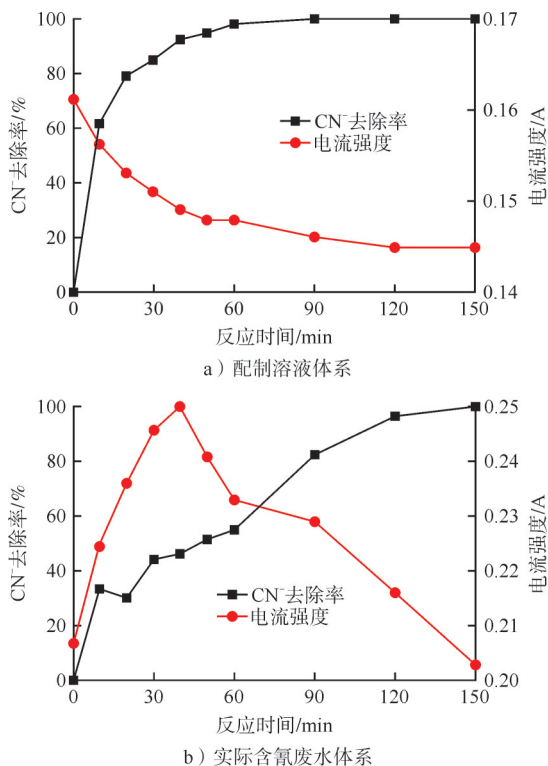


图3 电流动态变化结果

Fig. 3 Dynamic change of current

定,反应时间为90~150 min时,电流强度维持在0.145~0.146 A。CN<sup>-</sup>去除率则随反应时间延长而持续提高,90 min时去除率近100%。这种现象表明,CN<sup>-</sup>作为配制溶液体系主要导电离子,其快速氧化降解导致含量下降,溶液电导率随之减小,从而使电流强度随去除率升高而下降。

相比之下,实际废水体系表现出的反应特征恰恰相反。由图3-b)可知:初始电流强度明显高于配制溶液(0.207 A),且反应前期(0~40 min)电流强度呈逐步升高趋势,最高达到0.250 A,而CN<sup>-</sup>去除率在前20 min出现了短暂下降,30 min时也仅达44.64%。CN<sup>-</sup>含量不降反升,这一特殊现象归因于体系中金属

氰络合物在电场作用下发生了解络反应,释放出大量CN<sup>-</sup>,使得体系中CN<sup>-</sup>含量在前期出现不明显的上升或降低波动。随着反应进一步深入,CN<sup>-</sup>含量逐渐降低,表明解络释放的CN<sup>-</sup>开始被进一步氧化降解。同时,释放出的金属离子(Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>)增加了溶液中可导电离子总量,电流强度随之上升。后续随着体系对CN<sup>-</sup>的持续氧化、金属离子的阴极还原沉积,二者共同使得溶液中离子含量逐步降低,电流强度由峰值回落至0.203 A(150 min),此时CN<sup>-</sup>去除率达到99.99%。实际废水电解过程更为复杂,既包括对CN<sup>-</sup>的直接氧化降解,也包含对金属氰络合物的破络释放一再沉积过程。多步反应使电流强度与CN<sup>-</sup>在前期呈一定程度的反向波动。

## 2.2 反应后电极材料表征

### 2.2.1 XRD分析

对反应后阴极表面进行XRD分析,结果如图4所示。由图4可知:经电沉积后的阴极沉积层中存在Cu及Fe的特征衍射峰。其中,位于 $2\theta \approx 43.3^\circ$ (111)的衍射峰与氧化铜(CuO, PDF#44-0706)的面心立方结构特征峰相匹配; $2\theta \approx 29.6^\circ$ (110)和 $74.1^\circ$ (220)处的衍射峰归属于氧化亚铜(Cu<sub>2</sub>O, PDF#34-1354)的立方晶系结构,表明铜元素在电沉积过程中存在不同价态氧化物共存现象。同时, $2\theta \approx 44.7^\circ$ (110)处检测到体心立方结构(BCC)金属铁( $\alpha$ -Fe, PDF#06-0696)的特征峰,证实反应体系中有金属沉积发生。

### 2.2.2 XPS分析

由于XRD表征中未观察到Zn特征峰,考虑Zn的存在不是结晶态而是非晶态或混合态,对Zn单独进行XPS检测分析,结果如图5所示。由图5可知:XPS谱图显示出明显的Zn特征峰(Zn 2p<sub>3/2</sub>: 1 022.42 eV, Zn 2p<sub>1/2</sub>: 1 045.53 eV)。可以看出覆盖于阴极板表面的Zn为二价,以Zn(OH)<sub>2</sub>或ZnO的形式分布在表层。

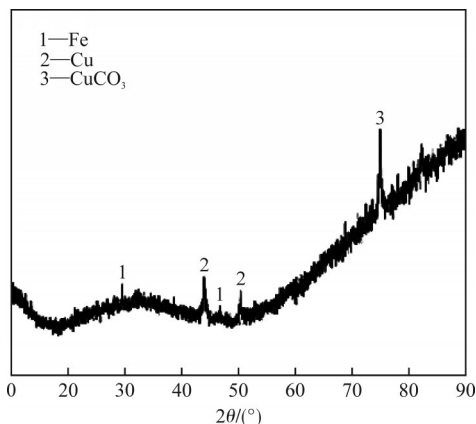


图4 SS表面沉积物XRD谱图

Fig. 4 XRD pattern of deposits on SS surface

根据试验结果,在电场作用下阴极电极局部pH升高促使 $Zn^{2+}$ 与 $OH^-$ 结合,形成 $Zn(OH)_2$ 沉积,而 $Zn(OH)_2$ 进一步脱水氧化为 $ZnO$ 。结合XRD分析,谱图中并未观察到 $ZnO$ 的特征峰,确定 $ZnO$ 为非晶结构,可以证实阴极表面锌沉积的存在。

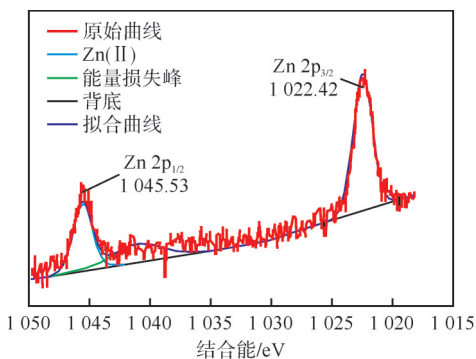


图5 3D电化学反应后阴极表面的XPS图谱

Fig. 5 XPS spectra of the cathode surface after 3D electrochemical reaction

### 2.2.3 FTIR分析

颗粒电极在3D电化学反应前后的傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析结果如图6所示。由图6可知:反应前后电极材料表面的官能团出现了变化。反应前颗粒电极的特征峰中, $3438\text{ cm}^{-1}$ 的宽峰对应于 $O-H$ 基团的伸缩振动吸收峰, $2925\text{ cm}^{-1}$ 和 $2856\text{ cm}^{-1}$ 处分别为 $C-H$ 键的不对称与对称伸缩振动峰, $1631\text{ cm}^{-1}$ 处为芳香结构或烯烃( $C=C$ )振动吸收峰。经电化学反应后, $O-H$ 键的特征吸收峰显著减弱,推测电极表面 $O-H$ 参与了降解反应,或与废水中释放的少量金属离子形成氢氧化物并进一步脱水形成少量金属氧化物( $M-O$ ),对应FTIR中 $500\sim 600\text{ cm}^{-1}$ 区域的新特征峰,推测其主要来源于颗粒电极对金属离子的弱吸附和随后的氧化沉积过程。这表明颗粒电极表面成

功引入了含氧官能团,且含氧官能团参与并加快了反应进程。

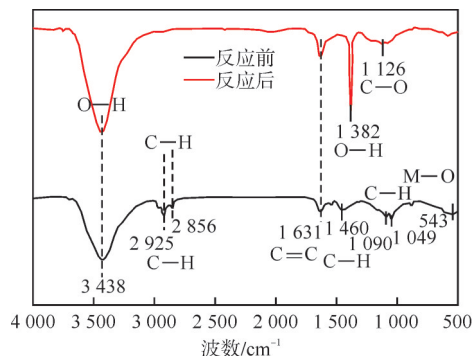


图6 3D电化学反应前后颗粒电极的FTIR谱图

Fig. 6 FTIR spectra of particle electrodes before and after 3D electrochemical reaction

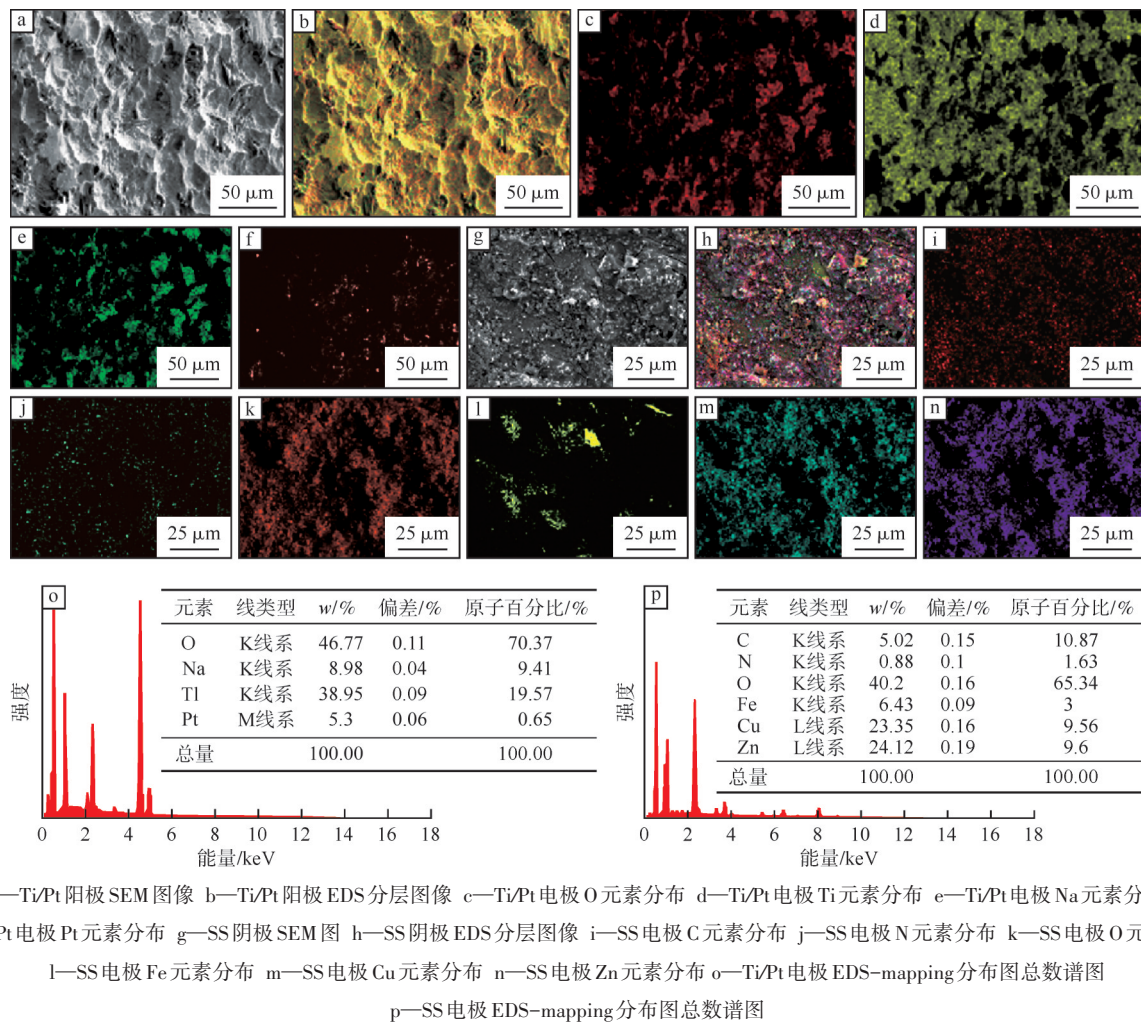
### 2.2.4 SEM-EDS分析

电极SEM-EDS分析结果如图7所示。图7-a~f展示了Ti/Pt阳极在3D电化学处理含氰废水150 min后的SEM图像,Ti/Pt阳极表面呈均匀网状结构(如图7-a所示),Pt涂层分布较为均匀,形成了构成均匀的Ti/Pt电极(如图7-f所示)。图7-g~n展示了SS阴极在3D电化学处理含氰废水150 min后的SEM图像,Cu、Zn的分布较为致密(如图7-m、n所示),且能够明显看到Cu、Fe和Zn元素的存在,证实了废水中的金属氰络合物在阴极表面发生了有效电还原沉积。根据阴极表面EDS谱图(如图7-p所示),电极板表面检测到大量金属元素,主要为Cu、Fe和Zn,质量百分比分别为23.35%、24.12%、6.43%,偏差分别为0.16%、0.19%和0.09%,原子百分比分别为9.56%、9.6%和3%。表明在电解过程中,废水中的金属氰络合物完全分解并在阴极板表面沉积,实现了废水中重金属的沉积。

## 3 结论

1)以Ti/Pt为阳极、不锈钢为阴极及改性活性炭为颗粒电极的三维电极体系,实现了对复杂含氰废水中氰化物和重金属离子的高效去除。电化学反应150 min时, $CN^-$ 去除率达到99.9%, $CN_r$ 去除率达96.04%,Cu、Fe和Zn的去除率则分别为98.52%、99.28%和91.04%,处理效果较好。

2)EDS显示电化学反应后SS阴极表面存在Cu、Fe和Zn沉积,表明废水中的金属氰络合物有效解络并实现了重金属的沉积。结合阴极板的XPS分析、XRD分析可知,阴极表面存在Cu、Fe和Zn多层沉积



a—Ti/Pt阳极SEM图像 b—Ti/Pt阳极EDS分层图像 c—Ti/Pt电极O元素分布 d—Ti/Pt电极Ti元素分布 e—Ti/Pt电极Na元素分布  
f—Ti/Pt电极Pt元素分布 g—SS阴极SEM图 h—SS阴极EDS分层图像 i—SS电极C元素分布 j—SS电极N元素分布 k—SS电极O元素分布  
l—SS电极Fe元素分布 m—SS电极Cu元素分布 n—SS电极Zn元素分布 o—Ti/Pt电极EDS-mapping分布图总数谱图  
p—SS电极EDS-mapping分布图总数谱图

图7 电极SEM-EDS分析结果

Fig. 7 SEM-EDS analysis results of electrodes

结构,符合金属氰络合物标准电极电势解络—沉积机理。同时,颗粒电极FTIR分析结果表明,电解反应过程中颗粒电极表面O—H基团参与了CN<sup>-</sup>及金属氰络合物的电化学氧化过程,证实了颗粒电极在强化电化学降解氰化物及重金属沉积过程中的作用。

#### [参考文献]

- [1] KUYUCAK N, AKCIL A. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes[J]. Minerals Engineering, 2013, 50: 13-29.
- [2] SONG Y H, LI Y F, HE X H, et al. Recycling of residual valuable metals in cyanide-leached gold wastewater using the N263-TBP system[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 106774.
- [3] MAMELKINA M A, HERRAIZ-CARBONÉ M, COTILLAS S, et al. Treatment of mining wastewater polluted with cyanide by coagulation processes: A mechanistic study[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 237: 116345.
- [4] KARIIM I, ABDULKAREEM A S, TIJANI J O, et al. Development of MWCNTs/TiO<sub>2</sub> nanoadsorbent for simultaneous removal of phenol and cyanide from refinery wastewater[J]. Scientific African, 2020, 10:e00593.
- [5] CHEN A, GUAN X H, PANG Z J, et al. Catalytic oxidation of biorefractory cyanide-containing coking wastewater by deconjugation effect of bimetal copper-loaded activated carbon[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(6): 111283.
- [6] 秦广林, 李光胜, 高腾跃, 等. 某黄金冶炼厂高铜贫液电沉积试验研究[J]. 黄金, 2021, 42(2): 87-89.
- [7] 董文强, 谢锋, 王伟, 等. 加压氧化处理黄金冶炼氰化废水[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(10): 147-153.
- [8] ZHANG H, ZHANG Y T, QIAO T Q, et al. Study on ultrasonic enhanced ozone oxidation of cyanide-containing wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 303: 122258.
- [9] 王洋, 王宝山, 高慧娟, 等. 碱性氯化法处理某金矿遗留含氰废水[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(1): 69-72.
- [10] GONZALEZ-MERCHAN C, GENTY T, BUSSIÈRE B, et al. Ferrates performance in thiocyanates and ammonia degradation in gold mine effluents[J]. Minerals Engineering, 2016, 95: 124-130.
- [11] 郭雪婷, 刘强, 倪燕群, 等. 某黄金矿山氰渣脱氧处理方法试验研究[J]. 黄金, 2020, 41(11): 77-79.
- [12] 单召勇, 杨海江, 刘旭坤, 等. 铜盐沉淀法处理高浓度含氰废水的试验研究[J]. 黄金, 2022, 43(7): 84-87.

- [13] JIA Y N, JIANG W F, HAO S J, et al. Feasibility study on coking waste water treatment by three-dimensional electrode[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 750/751/752: 1 437-1 440.
- [14] CASTELLANOS-LEAL E L, ACEVEDO-PEÑA P, GÜIZA-ARGÜELLO V R, et al. N and F codoped TiO<sub>2</sub> thin films on stainless steel for photoelectrocatalytic removal of cyanide ions in aqueous solutions[J]. *Materials Research*, 2017, 20: 487-495.
- [15] 曾鑫辉, 宋永辉, 李一凡, 等. 电解氧化法处理金矿废水[J]. *化学工程*, 2022, 50(2): 9-14.
- [16] 李海涛, 李玉平, 张安洋, 等. 新型非均相电-Fenton技术深度处理焦化废水[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 171-178.
- [17] 魏金枝, 张少平, 胡琴, 等. 三维粒子电极处理染料废水的效能及机制[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4): 1 715-1 720.
- [18] MA J W, TONG L L, YANG H Y. Progress in electrocatalytic treatment of cyanide-containing wastewater with various electrode materials[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2025, 121: 558-568.
- [19] HASSANI G, NASSERI S, GHARIBI H. Removal of cyanide by electrocoagulation process[J]. *Analytical and Bioanalytical Electrochemistry*, 2011, 3(6): 625-634.

### Treatment of cyanide-containing wastewater from gold smelting using a 3D-SS-Ti/Pt-AC system

Yang Wei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Rui<sup>1,2,3</sup>, Long Tao<sup>1,2,3</sup>, Deng Sha<sup>1,2,3</sup>, Yang Chao<sup>1,2,3</sup>, Bao Dongrun<sup>1,2,3</sup>

(1. *School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology*;

2. *Key Laboratory of Gold and Resources in Shaanxi Province*;

3. *Technology & Equipment Institute of Green Beneficiation-Metallurgy, Xi'an University of Architecture and Technology*)

**Abstract:** A 3D electrode system (3D-Ti/Pt-SS-AC) was constructed using modified activated carbon as particle electrodes to treat cyanide-containing wastewater generated by a gold smelting plant. The experimental results showed that after 150 min of reaction, the removal rates of free cyanide and total cyanide compounds reached 99.9 % and 96.04 %, respectively, while the removal rates of Cu, Fe, and Zn were 98.52 %, 99.28 %, and 91.04 %, respectively. SEM and EDS analyses revealed significant deposition of Cu, Fe, and Zn on the cathode surface after the reaction. XRD characterization detected characteristic diffraction peaks of Cu oxides and Fe, while XPS analysis observed characteristic peaks of Zn 2p<sub>3/2</sub> and Zn 2p<sub>1/2</sub> orbitals, confirming effective metal deposition. FTIR analysis showed a decrease in oxygen-containing functional groups on the particle electrode surface after the reaction compared with before, indicating that these functional groups participated in the reaction process by providing active sites and enhancing catalytic performance. This study confirms the feasibility of the 3D electrode system for the removal of cyanide and heavy metals, providing a new approach and research method for the green purification and treatment of cyanide-containing wastewater.

**Keywords:** 3D electrode; cyanide-containing wastewater; particle electrode; electrochemistry; gold smelting; green treatment