

引文格式:彭贵熊,王天星,王江飞,等. ChCl-EG 中电化学共沉积制备 Ni-Co 合金及  $\text{Co}^{2+}$  的动力学行为[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(3): 115-122.

PENG Guixiong, WANG Tianxing, WANG Jiangfei, et al. Electrochemical codeposition of Ni-Co alloys in ChCl-EG system and kinetic behavior of  $\text{Co}^{2+}$  [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(3): 115-122.

# ChCl-EG 中电化学共沉积制备 Ni-Co 合金及 $\text{Co}^{2+}$ 的动力学行为

彭贵熊<sup>1</sup>, 王天星<sup>2</sup>, 王江飞<sup>3</sup>, 王昊<sup>2</sup>, 余杰<sup>2</sup>, 何世伟<sup>2</sup>

(1. 西北矿冶研究院, 甘肃 白银 730900; 2. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243000; 3. 金昌泵鑫旺达环保科技有限公司, 甘肃 金昌 737100)

[摘要] 本研究在氯化胆碱-乙二醇体系中系统解析  $\text{Co}^{2+}$  的电化学行为及其对 Ni-Co 合金制备的影响机制。通过循环伏安(CV)、交流阻抗(EIS)与线性扫描伏安(LSV)法分析发现,  $\text{Co}^{2+}$  浓度提升可显著增强其氧化还原反应活性, 且负电位区传荷电阻  $R_c$  降低, 证实高浓度体系更利于电子转移促进  $\text{Co}^{2+}$  还原; Levich 方程拟合 LSV 数据显示扩散系数( $D$ )与  $\text{Co}^{2+}$  浓度呈正相关。对电化学共沉积制备的 Ni-Co 合金进行表征和分析, 扫描电子显微镜和透射电子显微镜(SEM/TEM)分析结果显示, 镀层的镍钴比随电解液镍钴浓度比增加而增加, X 射线衍射仪(XRD)分析结果证实 Ni-Co 合金为单相固溶体结构, Co 原子以置换形式占据 Ni 晶格位点, 未形成金属间化合物相。

[关键词] Ni-Co 合金; 电化学沉积; ChCl-EG 体系; 电化学行为; 动力学行为

[中图分类号] TF125.2+11 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)03-0115-08

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/TF.2025.03.012

## 0 引言

Ni-Co 合金因优异的高温抗氧化性、耐腐蚀性、磁性及催化活性等, 被广泛用于能源开发(析氢电极)、医疗(人工关节涂层)、航空航天(涡轮叶片防护层)等高端领域<sup>[1-5]</sup>。作为功能性涂层材料时, Ni-Co 合金可提升基体材料的耐磨性和高温稳定性, 这种合金的性能优势源自其独特的置换固溶体结构与可控的微观形貌, 而制备方法的选择直接影响这些特征的形成。目前, 主要的 Ni-Co 合金制备

方法包括电沉积法、粉末冶金法、气相沉积法等, 其中电沉积法因工艺参数精准可控、设备投资低及沉积速率高等综合优势, 成为了制备 Ni-Co 合金的工艺。

传统电沉积法在制备 Ni-Co 合金时因析氢反应导致镀层孔隙率升高及氢脆风险, 且复杂的镀液成分导致调控精度不足; 而离子液体电解质能有效抑制析氢, 确保镀层致密度与力学稳定性<sup>[6-7]</sup>。近年发展的低共熔溶剂策略具备宽电化学窗口、低毒性及成本优势, 被公认为一种环保型溶剂, 可通过简化工艺、提升沉积速率实现高品质 Ni-Co 合金的绿色制备, 现已成为电沉积领域的主流电解质体系<sup>[8]</sup>。

目前低共熔溶剂中镍钴的电沉积研究取得显著进展。Li 等<sup>[9]</sup>在氯化胆碱-尿素体系中研究了  $\text{Co}^{2+}$  的电化学行为, 发现  $\text{Co}^{2+}$  还原是受扩散控制的不可逆过程, 扩散系数为  $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ; You 等<sup>[10]</sup>在氯化胆碱-乙二醇体系实现纯镍与 Ni-Co 合金薄膜

[收稿日期] 2024-12-21

[第一作者] 彭贵熊(1982—), 男, 傣族, 云南永仁人, 高级工程师, 主要从事矿物加工、湿法冶金方面的研究工作。

[通信作者] 何世伟(1988—), 男, 汉族, 安徽芜湖人, 副教授, 博士, 主要从事冶金电化学、亚稳态材料表面改性、电解水用电极材料开发的研究工作。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(No. 51904005)。

的可控制备,通过原位电化学分析阐明沉积动力学机制,并证实  $\text{Ni}^{2+}/\text{Co}^{2+}$  浓度比对薄膜形貌与耐蚀性具有显著调控作用,为合金成分设计提供理论依据。

旋转圆盘电极(RDE)技术通过稳态流体动力学控制,可精准解析电化学传质与反应动力学参数,广泛应用于电沉积、电催化及电池体系研究<sup>[11-17]</sup>。本文采用 RDE 技术测试了  $\text{ChCl}-\text{EG}$  体系中不同浓度  $\text{Co}^{2+}$  的阴极极化曲线,通过 Levich 方程拟合获得其扩散系数  $D$ 。在此基础上,通过调节  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  浓度比在铜片表面电沉积  $\text{Ni}-\text{Co}$  合金,并采用扫描电镜与透射电镜(SEM, TEM)表征镀层的形貌, X 射线衍射(XRD)分析证实镍钴合金镀层的晶体结构。

## 1 实验部分

### 1.1 低共熔溶剂制备

取物质的量比为 1:2 的氯化胆碱与乙二醇,在 80 °C 下恒温搅拌 2 h,直至形成均质透明的低共熔溶剂(DES);接着向溶剂中加一定浓度的  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  或  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  恒温搅拌 2 h,确保金属盐充分溶解并与 DES 形成稳定络合体系。

### 1.2 电化学测试

利用电化学工作站(CHI760E)在三电极系统中进行 CV、LSV 和 EIS 测试。工作电极为聚四氟乙烯包裹的玻碳 RDE(表面积 0.125 7 cm<sup>2</sup>)及静态玻碳电极(直径 3 mm),参比电极为  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ,对电极为高纯石墨电极,实验全程于 80 °C 恒温油浴中开展。CV 测试在 +1.3 ~ -1.3 V 电位范围内以 10 mV s<sup>-1</sup> 速率扫描。LSV 阴极极化范围为 -1.0 ~ -1.6 V(扫描速率 10 mV s<sup>-1</sup>),其中 RDE 转速梯度设置为 600 ~ 2 400 r/min。EIS 测试频率覆盖 100 kHz ~ 0.1 Hz(扰动幅值 10 mV)。所有工作电极在测试前依次经 3 000 目(约 5 μm)砂纸机械抛光至镜面光洁、去离子水超声清洗、干燥后以供使用。动力学参数测定中,采用 NDJ-9S 黏度计精确测量 80 °C 下不同浓度溶液的黏度和密度,并基于 Levich 方程拟合  $I_L$  和  $\omega^{1/2}$ ,由此计算出扩散系数( $D$ ),详见式(1)。

$$I_L = 0.62nFAD_R^{2/3}\omega^{1/2}v^{-1/6}C_R \quad (1)$$

式中: $n$  为反应电子数; $F$  为法拉第常数 96 485, C/mol; $A$  为电极表面积,cm<sup>2</sup>; $D_R$  为反应物的扩散系数,cm<sup>2</sup>/s; $\omega$  为电极旋转的角速度,rad/s; $v$  溶液的

动力黏度,cm<sup>2</sup>/s; $C_R$  为反应物的物质的量浓度, mol/cm<sup>3</sup>。

### 1.3 电沉积实验

实验采用三电极体系,以  $\text{ChCl}-\text{EG}$  为基础电解液,分别添加 0.1 mol/L  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  与 0.1 ~ 0.3 mol/L  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  作为金属离子源。电沉积过程通过电化学工作站(CHI760E)控制,设定沉积电位恒定为 -1.2 V,沉积时间为 1 h。其中,工作电极有效面积为 1 × 1 cm<sup>2</sup> 铜片,对电极为高纯石墨电极,参比电极选用  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ,三电极间距及浸入电解液的深度具严格控制在 1 cm。实验前,所有电极依次用去离子水和无水乙醇清洗,随后在真空干燥箱中干燥,其中铜片电极需经机械抛光处理以彻底去除表面氧化层。

### 1.4 材料表征

材料微观形貌及成分表征采用 NANO SEM430 场发射扫描电子显微镜(SEM),在 15 kV 加速电压下对电极表面进行高分辨形貌观测,并同步结合能谱仪(EDS)对表面元素分布进行定量分析。晶体结构表征通过日本理学 SmartLab (9 kW) X 射线衍射仪(XRD)完成,测试范围覆盖镀层物相组成、晶格参数及晶体取向等信息。为进一步解析材料纳米尺度结构特征,采用美国 FEI Talos F200x 场发射透射电子显微镜(TEM),在 200 kV 加速电压下对样品进行原子级分辨成像及选区电子衍射分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{Co}^{2+}$ 在 $\text{ChCl}-\text{EG}$ 中的电化学行为

图 1 展示了  $\text{ChCl}-\text{EG}$  空白体系((a)图)及其复合不同浓度  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ((b)图)的循环伏安曲线对比。在(a)图中,当电位正向扫描至 1.0 V 时出现显著阳极电流激增,此现象是体系中氯化胆碱分解生成的  $\text{Cl}^-$  发生氧化反应生成  $\text{Cl}_2$  引起的<sup>[18]</sup>,反应见式(2);当电位负向扫描至 -1.3 V 时,阴极电流的急剧衰减则与胆碱阳离子  $[\text{Ch}]^+$  或溶剂中微量水的还原过程相关<sup>[19]</sup>,反应见式(3)。引入  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  后((b)图),在 -0.25 V 和 -1.25 V 附近分别呈现特征性的氧化峰与还原峰,且两峰电流值随  $\text{Co}^{2+}$  浓度增加而显著增强。动力学分析表明:-0.25 V 处氧化峰对应于  $\text{Co}$  的溶解行为(反应(4)),其氧化起始电位随  $\text{Co}^{2+}$  浓度升高不断负移;而 -1.25 V 处还原峰则对应  $\text{Co}^{2+}$  的电沉积过程(反

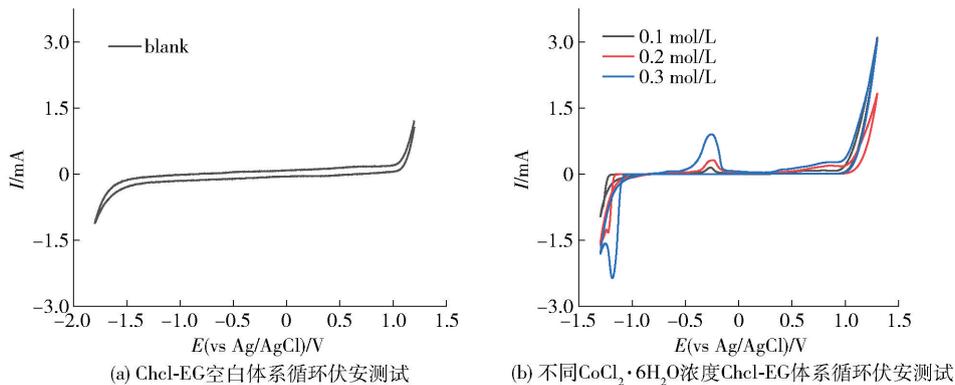
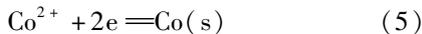
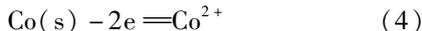
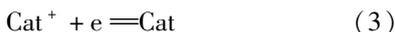
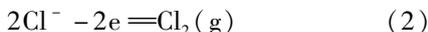


图 1 ChCl-EG 空白体系的循环伏安图及不同浓度  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的循环伏安测试

Fig. 1 Cyclic voltammetry of ChCl-EG blank system and different concentrations of  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  in ChCl-EG system

应(5)),其还原起始电位与峰值电位均呈现不断正移趋势。值得注意的是,氧化峰负移与还原峰正移的协同效应,证实了高浓度  $\text{Co}^{2+}$  可显著提升体系氧化还原反应活性,这为调控电沉积过程中金属成核/生长动力学提供了关键实验依据。



## 2.2 $\text{Co}^{2+}$ 在 ChCl-EG 中的动力学行为

EIS 作为解析电极界面动力学行为的关键技术,通过向电化学系统施加微幅正弦电位扰动,并同步采集相应电流响应信号,构建复平面阻抗谱以表征体系频率依赖的阻抗特性。图 2 展示了含  $0.2 \text{ mol/L } \text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的 ChCl-EG 低共熔溶剂体系在  $\text{Co}^{2+}$  还原特征电位 ( $-1.25 \text{ V}$ ) 下的 EIS 测试结果。采用 R(QR) 等效电路模型(图 2 插图)对实验数据进行拟合,拟合数据见表 1。

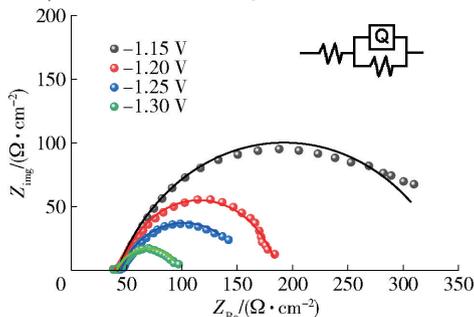


图 2 在不同电位下阻抗图

Fig. 2 Impedance diagram at different potentials

表 1 不同电位下  $\text{Co}^{2+}$  阻抗图拟合数据

Table 1  $\text{Co}^{2+}$  impedance map fitting data at different potentials

沉积电位/ V	溶液电阻 $R_s$		电荷电阻 $R_{ct}$	
	电阻值/ $\Omega$	误差/%	电阻值/ $\Omega$	误差/%
-1.15	41.98	0.845	301.2	2.579
-1.2	41.25	0.848	158.4	3.622
-1.25	44.65	0.900	114.2	4.595
-1.3	41.08	1.251	57.06	5.155

电化学阻抗谱分析表明,不同电位下溶液电阻  $R_s$  保持相对稳定,表明电解液本体的导电性未受显著影响。当电位负向偏移至  $\text{Co}^{2+}$  还原特征电位 ( $-1.25 \text{ V}$ ),电荷转移电阻显著降低,电极表面容易接受电子加速了  $\text{Co}^{2+}$  还原反应的进行。这一现象归因于阴极极化增强促进了电极界面的电子传递效率:负电位驱动电极表面电子密度升高,降低了  $\text{Co}^{2+}$  还原反应的活化能垒,从而加速了金属离子的电沉积动力学过程。因此,溶液中传荷电阻  $R_{ct}$  的降低与还原峰电流的增强趋势一致,进一步验证了电位越负越有利于提升电化学反应速率的结论。

ChCl-EG 体系中不同浓度  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的阴极极化曲线呈现两类典型行为,如图 3 所示。对于第一类(图 3(a)),曲线可分为四个阶段:初始零电流区(反应未启动);随电位负移出现  $\text{Co}^{2+}$  还原为 Co 的电流上升区;电流达到峰值后形成短暂平台,此时峰值电流等于极限扩散电流,其持续时间受微量水干扰而缩短;胆碱离子  $[\text{Ch}]^+$  或痕量水的还原导致

电流再次上升区。第二类(图 3(b),(c))则表现为五阶段特征:初始零电流区;Co<sup>2+</sup>还原电流上升区;电流过峰值后随电位负移下降区(形成拐点,表明峰值电流高于极限扩散电流);短暂平台区以及[Ch]<sup>+</sup>或少量水还原主导的电流上升区。此外,LSV 测试显示,RDE 转速升高可增大极限扩散电流值,这归因于高转速减薄表面扩散层厚度,促进 Co<sup>2+</sup>向电极表面的传质过程。

图 3(d) 基于 Levich 方程对阴极极化曲线

(LSV)的极限扩散电流( $I_L$ )与旋转角速度的平方根( $\omega^{1/2}$ )进行线性拟合,相关动力学数据列于表 2。结果表明:随着 CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 浓度增加,溶液黏度显著降低,这归因于每引入 1 mol 的 Co<sup>2+</sup>时伴随的 6 mol H<sub>2</sub>O 对 ChCl-EG 体系的稀释效应,这在文献[20]中也有报道。扩散系数随浓度变化呈先减小后增大的趋势,其最小值( $1.23 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ )与最大值( $2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ )分别对应于 0.2 mol/L 与 0.3 mol/L 浓度条件。

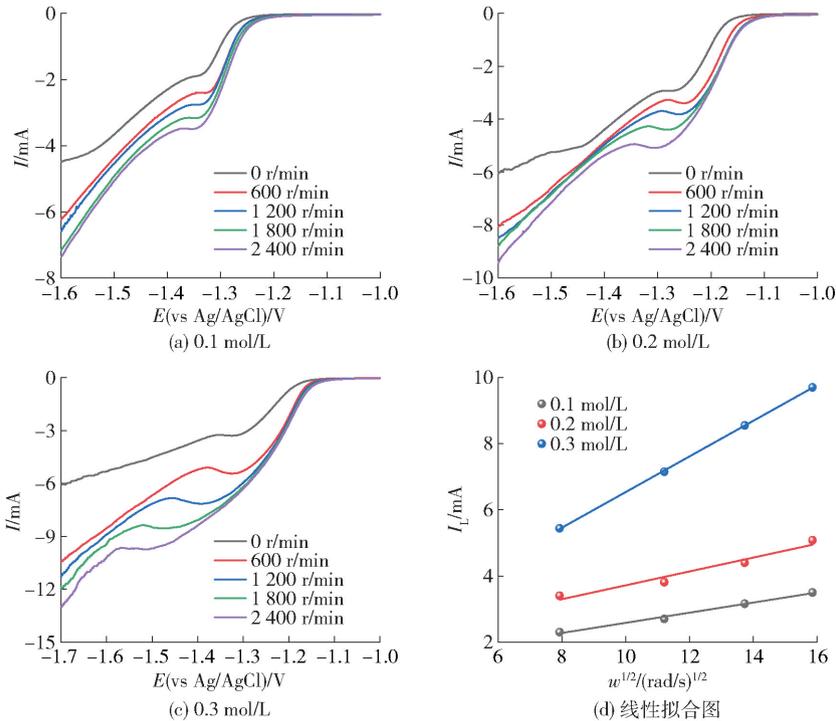


图 3 不同浓度的 CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 在 ChCl-EG 体系中的阴极极化曲线

Fig. 3 Cathode polarization curves of different concentrations of CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O in ChCl-EG system

表 2 在不同浓度的电解质中由 Levich 方程计算获得的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters calculated by Levich equation in electrolytes of different concentrations

浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	Levich 方程: $I_L = (0.62nFAD^{2/3}\nu^{-1/6}C)\omega^{1/2}$					
	$\mu$ /(Pa·s)	$\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	$\nu$ /(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	斜率	$D$ /(cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
0.1	2.8E-04	1.093 3E03	2.561 05E-07	1.532 64E-04	2.314 41E-07	
0.2	2.2E-04	1.086 5E03	2.024 85E-07	2.096 80E-04	1.234 71E-07	
0.3	1.4E-04	1.067 2E03	1.311 84E-07	5.385 63E-04	2.482 09E-07	

### 2.3 Ni-Co 合金的制备

基于前期测定的 Co<sup>2+</sup> 扩散系数数据,在含 0.1 mol/L NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 的电解液中调节 Ni:Co 物质的量比为 1:1、1:2、1:3 进行对比实验。图 4(a) 显示 3 种

比例体系的循环伏安曲线均呈现典型金属共沉积特征。恒电位沉积(-1.2 V, 1 h)的计时电流曲线(图 4(b))表明,Ni:Co = 1:1 与 1:3 体系电流呈现“下降-回升-稳定”趋势,而 1:2 体系则经历“下降-回升-

二次下降-回升-稳定”的波动过程。值得注意的是,稳定阶段电流强度与  $\text{Co}^{2+}$  扩散系数呈现正相关性; $\text{Ni:Co} = 1:3$  体系对应的稳定电流最高,该浓度的

$\text{Co}^{2+}$  的扩散系数最大;而  $1:2$  体系的稳定电流最低,对应  $\text{Co}^{2+}$  的扩散系数最小。

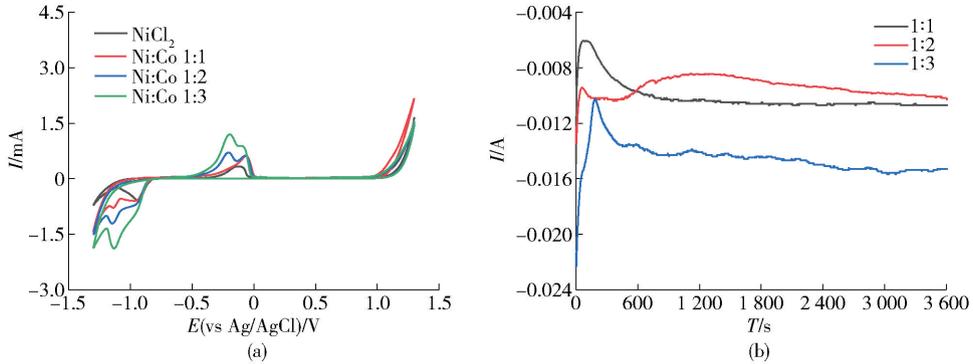


图 4 不同  $\text{Ni-Co}$  比的循环伏安图(a)及电解时间电流曲线(b)

Fig. 4 Cyclic voltammetry for different  $\text{Ni-Co}$  ratios (a) and electrolytic time-current curve (b)

图 5 对比了不同  $\text{Ni-Co}$  离子比沉积产物的 SEM 形貌和 EDS 分析结果。当  $\text{Ni:Co} = 1:1$  时,镀层呈松散球状结构,颗粒尺寸较大且分布不均(图 5

(a)); $\text{Ni:Co} = 1:2$  时,镀层表面出现明显裂痕(图 5 (c)); $\text{Ni:Co} = 1:3$  时则获得均匀致密的沉积层(图 5(e))。EDS 定量分析表明,不同  $\text{Ni:Co}$  比例的电

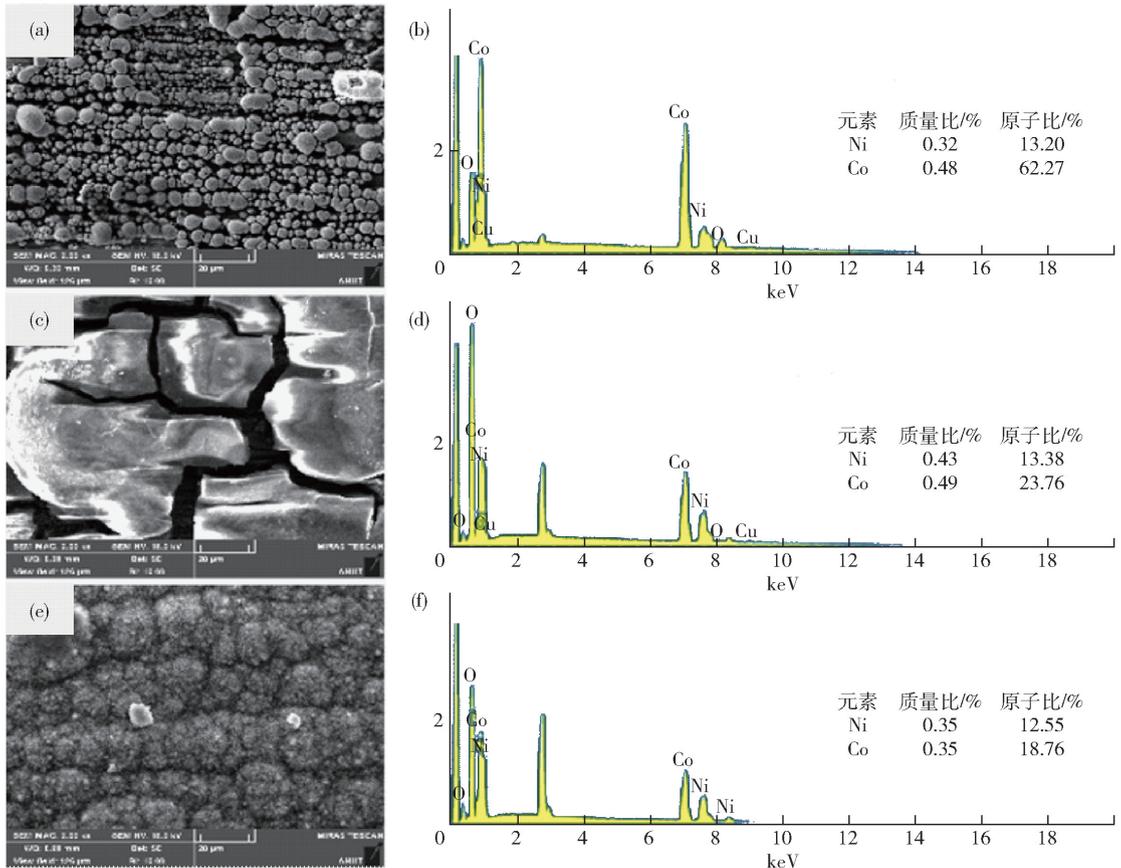


图 5 不同  $\text{Ni-Co}$  比的沉积 SEM 及 EDS 图

Fig. 5 SEM and EDS images of deposition with different  $\text{Ni-Co}$  ratios

解液体系沉积1 h 后镀层中 Ni: Co 原子比分别为 13.20: 62.27 (0.212), 13.38: 23.76 (0.563), 12.55: 18.76 (0.669), 证实镀层组成与电解液中镍钴离子浓度比呈正相关性。值得注意的是, Ni: Co =

1: 3 体系因  $\text{Co}^{2+}$  的扩散系数最大, 其沉积层致密性最优。为进一步解析该比例下合金的微观结构, 采用 TEM 对样品进行表征(图 6), 结果显示纳米晶粒尺寸均匀且无明显缺陷, 与 SEM 观测结果一致。

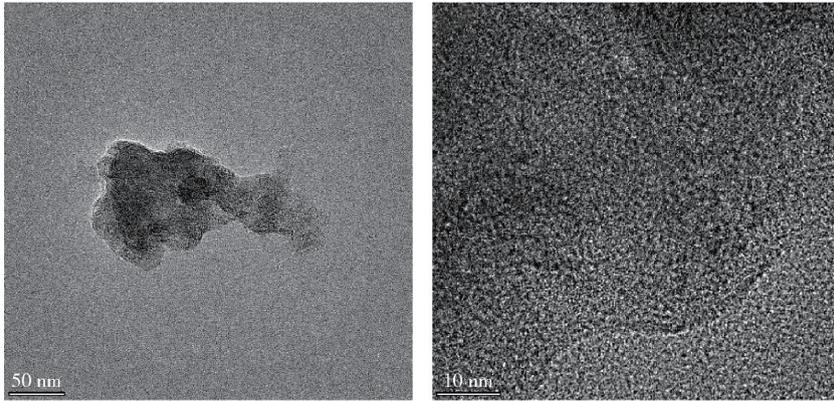


图 6 Ni-Co 比为 1: 3 时 TEM 图

Fig. 6 TEM diagramat Ni-Co ratio of 1: 3

图 7 展示了不同镍钴比沉积镍钴合金的 XRD 谱图。三种比例的衍射峰均与纯镍的标准峰位一致, 未检测到钴单质或其他金属间化合物的特征峰。这一现象表明, Co 原子以替代固溶形式嵌入 Ni 的面心立方晶格中, 形成单相固溶体结构<sup>[21]</sup>。

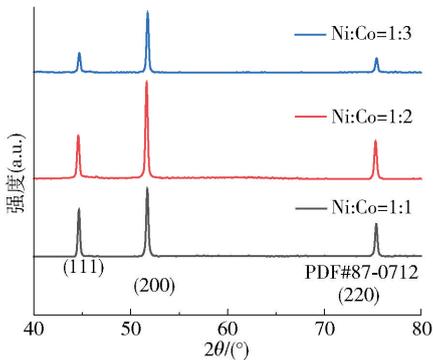


图 7 不同镍钴比沉积的镍钴合金的 XRD 谱

Fig. 7 XRD spectra of deposited Ni-Co alloys with different Ni-Co ratios

### 3 结论

本文在  $\text{ChCl}-\text{EG}$  体系中通过调节  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  浓度比在铜片表面电沉积 Ni-Co 合金, 并采用 RDE 技术测试不同浓度  $\text{Co}^{2+}$  的阴极极化曲线, 采用扫描电镜、透射电镜 (SEM, TEM) 及 X 射线衍射 (XRD) 技术对所制备的 Ni-Co 合金进行

表征和分析, 得到以下主要结论。

1) CV 测试发现,  $\text{ChCl}-\text{EG}$  体系的稳定电位窗口为  $-1.3 \sim 1.0 \text{ V}$ , 其中电位负于  $-1.3 \text{ V}$  时发生胆碱阳离子或水的还原, 正于  $1.0 \text{ V}$  时出现  $\text{Cl}^-$  氧化析氯反应。  $\text{Co}^{2+}$  的氧化峰 ( $-0.25 \text{ V}$ ) 与还原峰 ( $-1.25 \text{ V}$ ) 的起始电位分别随浓度增加呈现负移和正移的趋势, 证实高浓度  $\text{Co}^{2+}$  可提升氧化还原反应活性。

2) EIS 分析显示, 电位负向偏移至  $-1.25 \text{ V}$  时, 溶液中的传荷电阻  $R_{ct}$  显著降低, 促进  $\text{Co}^{2+}$  还原反应动力学。 LSV 测试结合 Levich 方程拟合表明,  $\text{Co}^{2+}$  扩散系数 ( $D$ ) 随浓度增加呈先减小 ( $1.23 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) 后增大 ( $2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) 的非单调变化。

3) 恒电位沉积制备的 Ni-Co 合金中, 镀层的镍钴原子比与电解液离子比呈正相关性。 XRD 结果表明, Co 原子只是以替代形式固溶于 Ni 晶格中, 形成单相固溶体。

#### [参考文献]

[1] 王丹, 高吉成, 张骥群, 等. 沉积参数对 Ni-Co 镀层成分及微观结构影响[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2013, 50(1): 118 - 124.  
WANG Dan, GAO Jichen, ZHANG Jiqun, et al. Effects of deposition parameters on composition and microstructure of Ni-Co coatings [J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2013, 50(1): 118 - 124.

- [2] LI Y J, XIA C Z, SHI L. (2010) Research status of welding of nickel base superalloy in China[J]. *Modern Weld* 7:1-4.
- [3] YANG X, LU X, ZHANG W, et al. Preparation and application of nano-Ni-Co alloy [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2023, 25(7): 152
- [4] NATHAL M V, MAIER R D, EBERT L J. The influence of cobalt on the tensile and stress-rupture properties of the nickel-base superalloy mar-m247 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1982, 13: 1767-1774.
- [5] JARRETT R N, TIEN J K. Effects of cobalt on structure, microchemistry and properties of a wrought nickel-base superalloy [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1982, 13: 1021-1032.
- [6] YAMAUCHI T, TSUKAHARA Y, YAMADA K, et al. Nucleation and growth of magnetic Ni-Co (Core-Shell) nanoparticles in a one-pot reaction under microwave irradiation [J]. *Chemistry of materials*, 2011, 23(1): 75-84.
- [7] 邹卫红, 张颖, 陶子峰. 离子液体中电沉积法制备不同形貌材料的研究进展[J]. *石油化工*, 2018, 47(10): 1149-1157. ZOU Weihong, ZHANG Ying, YAN Zifeng. Research progress in preparation of materials with different morphologies by electrodeposition in ionic liquids [J]. *Petrochemical Industry*, 2018, 47(10): 1149-1157.
- [8] 朱清云. [BMIM]HSO<sub>4</sub> 离子液体中电沉积镍及镍合金工艺及机理的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015. ZHU Qingyun. Study on process and mechanism of electrodeposition of Nickel and Nickel alloy in [BMIM]HSO<sub>4</sub> ionic liquid [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.
- [9] LI M, WANG Z W, REDDY R G. Cobalt electrodeposition using urea and choline chloride [J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 123: 325-331.
- [10] YOU Y H, GU C D, WANG X L, et al. Electrodeposition of Ni-Co alloys from a deep eutectic solvent [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(17): 3632-3638.
- [11] MILORA C J, HENRICKSON J F, HAHN W C. Diffusion coefficients and kinetic parameters in copper sulfate electrolytes and in copper fluoborate electrolytes containing organic addition agents [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1973, 120: 488-492.
- [12] YANG C C, CHEH H Y. Pulsed electrodeposition of copper/nickel multilayers on a rotating disk electrode: II. Potentiostatic deposition [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1995, 142: 3040-3043.
- [13] LEE H P, NOBE K. Rotating ring-disk electrode studies of Cu-Ni alloy electrodisolution in acidic chloride solutions; II., and Cu-Ni alloys, and Cu-Ni Alloys [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1993, 140: 2483-2489.
- [14] COSTENTIN C, DRIDI H, SAVEANT J M. Molecular catalysis of O<sub>2</sub> reduction by iron porphyrins in water: heterogeneous versus homogeneous pathways [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137: 13535-13544.
- [15] ZHOU R, ZHENG Y, JARONIEC M, et al. Determination of the electron transfer number for the oxygen reduction reaction: from theory to experiment [J]. *ACS Catalysis*, 2016, 6: 4720-4728.
- [16] ASHOK A, KUMAR A, BHOSALE R R, et al. Combustion synthesis of bifunctional LaMO<sub>3</sub> (M = Cr, Mn, Fe, Co, Ni) perovskites for oxygen reduction and oxygen evolution reaction in alkaline media [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 809: 22-30.
- [17] HIGUCHI K, CHANG T F M, SONE M. Electrode kinetic study of Cu electrodeposition with supercritical CO<sub>2</sub> by high pressure rotating disk electrode method [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022, 169: 020558-020567.
- [18] WHITEHEAD A H, POLZLER M, GOLLAS B. Zinc electrodeposition from a deep eutectic system containing cholinechloride and ethylene glycol [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 157(6): 328-334.
- [19] TAN Y, ZHANG J L, SUN J. Study on electrochemical behavior of nickel deposition in ChCl-EG eutectic solvent system [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(11): 255-260.
- [20] ZHAO B Y, XU P, YANG F X, et al. Biocompatible deep eutectic solvents based on choline chloride: characterization and application to the extraction of rutin from *Sophora japonica* [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3(11): 2746-2755.
- [21] SYUKRI, BAN T, OHYA Y, et al. A simple synthesis of metallic Ni and Ni-Co alloy fine powders from a mixed-metal acetate precursor [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 78(3): 645-649.

## Electrochemical codeposition of Ni-Co alloys in ChCl-EG system and kinetic behavior of $\text{Co}^{2+}$

PENG Guixiong<sup>1</sup>, WANG Tianxing<sup>2</sup>, WANG Jiangfei<sup>3</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, YU Jie<sup>2</sup>, HE Shiwei<sup>2</sup>

(1. Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin 730900, China;

2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China;

3. Jinchang Pump Xinwangda Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jinchang 737100, China)

**Abstract:** This study systematically investigates the electrochemical behavior of  $\text{Co}^{2+}$  in a choline chloride-ethylene

glycol system and its impact mechanism on the preparation of Ni-Co alloy. Analysis via cyclic voltammetry (CV), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and linear sweep voltammetry (LSV) revealed that increasing  $\text{Co}^{2+}$  concentration significantly enhances its redox reaction activity. The charge transfer resistance ( $R_{ct}$ ) decreases in the negative potential region, confirming that a high-concentration system facilitates electron transfer and promotes  $\text{Co}^{2+}$  reduction. Fitting LSV data with the Levich equation demonstrated a positive correlation between the diffusion coefficient ( $D$ ) and  $\text{Co}^{2+}$  concentration. Characterization and analysis of the electrochemically co-deposited Ni-Co alloy showed that scanning electron microscopy and transmission electron microscopy (SEM/TEM) analyses indicated an increase in the nickel-to-cobalt ratio of the coating with rising Ni/Co concentration ratio in the electrolyte. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that the Ni-Co alloy possesses a single-phase solid-solution structure, with Co atoms occupying Ni lattice sites in a substitutional manner without forming intermetallic compound phases.

**Key words:** Ni-Co alloy; electrochemical deposition;  $\text{ChCl-EG}$  system; electrochemical behavior; kinetic behavior

## 江西理工大学研发省内首台数字化智能选矿摇床

赣南素有“世界钨都”之称,是全球钨矿资源最为富集的地区之一,钨矿开采与选矿工作始终是当地矿业发展的核心支撑。当前,摇床选矿机作为钨矿主体分选设备,传统选矿摇床在选矿效率、自动化程度以及能源消耗等方面存在技术瓶颈。

近日,江西理工大学高效矿冶装备及智能化团队成功研发出江西省内首台新型数字化智能选矿摇床,该设备可显著提升选矿效率,减少人工操作环节,同时降低能源消耗。

传统摇床主要由床头、给矿槽、给水槽、床面、手轮调坡结构、精矿截取板和机架构成。目前,摇床操作高度依赖人工,工人需观察矿带后,凭借经验调整床面坡度以改变摇床分选状态,并手动将精矿截取板位置调整至矿带分离点,从而实现精矿与尾矿的分离。

与传统摇床不同,新型选矿摇床被赋予了“眼睛”和“大脑”。其中,机器视觉系统充当“眼睛”,替代人工观察任务。通过安装在精矿端上方的高清摄像头采集矿物分带图像,运用机器视觉技术快速识别并提取床面矿物分带特征,如矿带分离点位置、矿带分界线与精矿端的夹角以及矿带宽度等。同时,构建以矿物回收率最大化为目标的“矿带特征—控制参数”智能优化控制模型,该模型作为“大脑”替代人工经验,精准调整床面坡度和精矿截取板位置,实现矿物智能分选。

“目前,受床面水膜反射光线影响,机器视觉的矿带特征识别准确率约为85%,我们期望能将其提高到96%。”团队学生负责人廖阳表示。

为何对矿带特征识别准确率要求如此严格?廖阳举例说明,过去赣南钨原矿纯度约为千分之一,历经长期开采,原矿纯度已降至万分之一,处理同吨位原矿收益降低。选矿越精准,越能避免钨矿资源浪费,同时为企业降低成本、提高效益,增强企业在行业内的竞争力。

目前,新型数字化智能选矿摇床已在实验室和矿山等场景完成测试,表现优异,性能指标稳定。该成果已获批国家发明专利一项,发表相关SCI论文3篇。团队指导老师刘惠中表示,这一创新成果不仅为矿业装备行业提供了更高效、更智能的解决方案,也为国内外选矿产业提供了技术参考,有力地推动了矿业行业向绿色、高效、智能化方向迈进。未来,团队将持续深化研究,推动选矿行业数字化转型,助力矿业行业实现可持续发展与升级。

(资料来源:中国有色金属报)