

引文格式:王姝羨,刑利,李晓燕,等.在 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体中电解铝合金试验研究[J].中国有色冶金,2026,55(2):158-165.

WANG Shuxian, XING Li, LI Xiaoyan, et al. Experimental study on the electrolysis of aluminum alloy in AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquid[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 158-165.

在 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体中电解铝合金试验研究

王姝羨^{1,2}, 刑利¹, 李晓燕¹, 郑家宝¹, 罗欢²

(1.内江师范学院 化学与环境工程学院, 四川 内江 641100;

2.昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

[摘 要] 现行铝电解工艺存在高温、高能耗、高排放的问题,有文献探索在离子液体中电解铝的工艺,但存在合成工艺复杂、成本高的问题。三氯化铝-苯基三甲基氯化铵(AlCl_3 -TMPAC)离子液体价格低廉、电化学窗口宽、可溶性好,但电导率相对较低,而甲苯(TL)可显著提高离子液体的电导率。本研究以三氯化铝-苯基三甲基氯化铵-甲苯(AlCl_3 -TMPAC-TL)离子液体为电解液,铜片为基体,在 80°C 采用恒电流法电解铝合金,考察了甲苯含量(体积分数:0%、20%、35%、50%)对电解铝的影响。结果表明,温度的升高和甲苯含量的增加都显著提升了电解液的电导率,体系黏度随温度的升高和甲苯含量的增加而降低;循环伏安测试表明,电解液中甲苯的存在显著加快了铝的还原反应和氧化反应;电解实验表明,采用 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体电解铝合金可以得到纯铝;电解液中甲苯的存在提高了阴极电流效率、降低了直流电耗;随着电解液中甲苯含量的增加,阴极产物形貌由不规则的微米片转变为杉树状结构然后过渡为微米块体;电解液中甲苯含量的增加促进了产物铝在(111)和(200)晶面的生长。

[关键词] 铝电解;能耗;离子液体;甲苯;电导率;黏度;反应速度;铝纯度

[中图分类号] TF821; TF804.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0158-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.017

0 引言

铝因其卓越的耐腐蚀性,良好的导电性、导热性,低密度以及无毒等特性,被广泛应用于航空航天、交通运输、建筑及电子工业等多个行业,是一种具有应用潜力的优良材料^[1]。现行铝的生产主要采用冰晶石熔盐电解工艺^[2],但该电解工艺能耗高、排放量大,且生产过程需要高温条件,不仅增加了生产成本,也对环境造成了不可忽视的影响。因此,探索和开发更加高效、环保、低能耗的电解铝新技术,成为了现代工业发展的重要研究课题。

离子液体作为一类具有独特物理化学性能的电解质,具有不挥发、不易燃、高热稳定性以及宽的电化学窗口等显著优势,这些特性使其在电解铝领域展现出巨大潜力,受到了广泛关注^[3,4]。Reddy等^[5]以氯化铝-氯化-1-丁基-3-甲基咪唑氯(AlCl_3 -BMIC)为电解质,于 90°C 在铜基体上获得了结节状的产物铝;电化学分析表明该反应受瞬时三维扩散过程控制。Chang等^[6]以氯化铝-氯化-1-乙基-3-甲基咪唑(AlCl_3 -EMIC)离子液体为电解质,成功在镁合金表面电沉积得到了致密的铝层;并对未包覆和铝包覆镁合金基体的耐蚀性进行了评价,结果表明,在镁合金中加入保护铝层可以显著降低镁合金的腐蚀速率。Wang等^[7]采用氯化铝-氯化-1-苄基-3-甲基咪唑(AlCl_3 -[BzMIM]Cl)离子液体中电沉积铝,并研究了铝在离子液体中的阳极溶解行为,证实了铝在 AlCl_3 -[BzMIM]Cl离子液体的溶解过程中产生了钝化。文献调研结果表明,利用离子液体

[收稿日期] 2025-11-08 [修订日期] 2025-12-22

[录用日期] 2025-12-23 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 王姝羨(1995—),女,汉族,四川成都人,博士,讲师,研究方向为有色金属冶金、离子液体电化学。

[基金项目] 四川省大学生创新创业训练计划项目(X2024061、X2025204);内江师范学院校级科研项目重点项目(2024ZDZ10);内江市基础研究与应用基础研究项目(2024NJJCYNJSY019)。

作为电解液,可以实现铝的电解,但是上述离子液体合成工艺复杂、价格昂贵,极大限制了其应用。

三氯化铝-苯基三甲基氯化铵(AlCl_3 -TMPAC)离子液体因其价格低廉、电化学窗口宽、可溶性好等特点,被认为是电解铝的一种理想电解质。然而, AlCl_3 -TMPAC离子液体的电导率相对较低,这在一定程度上限制了铝电解的效率。甲苯(TL)作为一种常见的有机溶剂,具有良好的溶解性和增溶作用,研究表明,甲苯的加入可以显著提高离子液体的电导率,降低槽电压,进而提升电解铝过程的效率和稳定性^[8]。此外,甲苯还能在一定程度上改善沉积层的形貌,使其更加均匀、致密。Chou等^[9]研究了在 AlCl_3 -EMIC离子液体中以甲苯作为共溶剂来电沉积铝,结果表明,在含甲苯的离子液体中制备的铝镀层比在纯离子液体中制备的铝镀层具有更好的亮度和耐腐蚀性。田国才等^[10]应用量子化学和分子动力学模拟研究了甲苯对 AlCl_3 -BMIC离子液体的微观结构、物理化学性质和电沉积铝的影响,发现甲苯主要分布在阳离子周围,与阳离子有较强相互作用,在沉积过程中吸附于电极表面的凸出部分,抑制了电活性离子的还原而对沉积物起到整平作用。汪少杰等^[11]探讨了在 AlCl_3 -BMIC离子液体中甲苯添加剂含量对NdFeB磁体恒电流沉积铝层微观形貌及表面粗糙度的影响,结果表明,离子液体中甲苯的加入细化了产物粒径,使得铝沉积层更加致密、平整。综上,本文选取甲苯作为 AlCl_3 -TMPAC离子液体的助溶剂系统研究以下内容:①甲苯含量和温度对 AlCl_3 -TMPAC离子液体电导率和黏度的影响;② AlCl_3 -TMPAC离子液体中甲苯的存

在对铝氧化还原过程的影响;③甲苯含量对 AlCl_3 -TMPAC离子液体电解铝产物的微观结构、产物铝纯度、阴极电流效率、物相的影响。本研究结果可揭示甲苯对 AlCl_3 -TMPAC离子液体电解铝的影响机制,为优化电解铝工艺提供科学依据。

1 实验介绍

1.1 实验试剂

本研究所采用的化学试剂包括无水氯化铝(AlCl_3)、苯基三甲基氯化铵(TMPAC)、甲苯(TL)、癸烷等均购自中国国药化学试剂有限公司,试剂纯度均为分析纯。

1.2 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体的制备

将苯基三甲基氯化铵(TMPAC)置于真空干燥箱中于80℃温度下干燥24 h,然后迅速将其与无水氯化铝(AlCl_3)转移到充满氩气的真空手套箱中,按照 AlCl_3 :TMPAC=2:1的摩尔比称取一定量的无水氯化铝和苯基三甲基氯化铵,并分别放置于100 mL的电解杯中。随后缓慢多次将苯基三甲基氯化铵加入到无水氯化铝中,同时用玻璃棒迅速搅拌,直至形成棕黄色的透明液体,用橡胶塞塞紧电解杯杯口,封口胶密封。然后将该液体转置于油浴锅中,在60℃条件下充分搅拌一段时间,即可得到稳定的 AlCl_3 -TMPAC离子液体,如图1(a)所示。按照体积分数量取所需的 AlCl_3 -TMPAC和TL,混合得到 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体,如图1(b)所示。由于甲苯易挥发,故在配制好的 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体表面加入一层癸烷,以防止离子液体与空气发生反应^[12],如图1(c)所示。随后将装有离子液体的

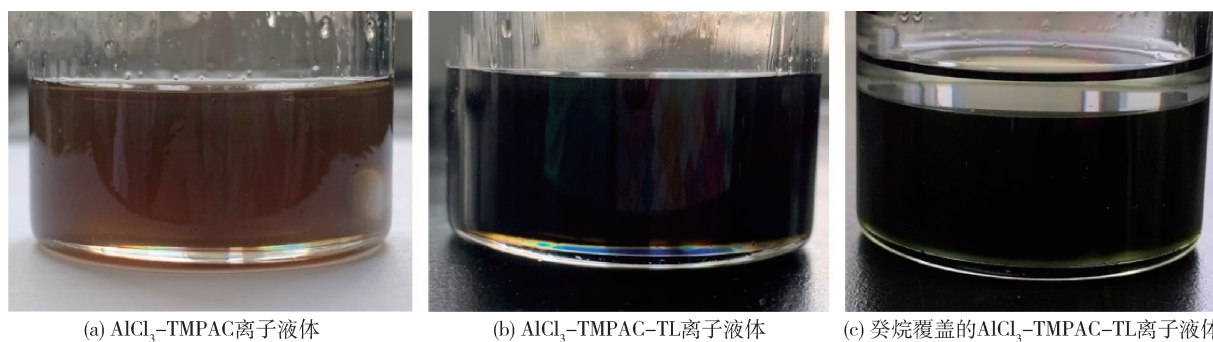


图1 (a) AlCl_3 -TMPAC离子液体,(b) AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体,(c)癸烷覆盖的 AlCl_3 -TMPAC-TL离子液体

Fig. 1 (a) AlCl_3 -TMPAC ionic liquid, (b) AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquid, and (c) Decane covered AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquid

电解杯转移到手套箱外备用。

1.3 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体的物理性质测定

采用便携式电导率仪(型号:DDBJ-350F,雷磁电化学分析仪器有限公司)测试不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体在不同温度条件下的电导率。采用数字旋转黏度计(型号:SNB-2,上海方瑞仪器有限公司)测试不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体在不同温度条件下的黏度。为最大限度减小测量误差,电导率和黏度测试均采用降温的方式进行。每次测试前在油浴锅中恒温 1 h,每个实验条件测定 3 次,电导率测试的误差范围约为 $\pm 0.02 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,黏度测试的误差范围约为 $\pm 0.05 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。在排除偶然误差的情况下取其算术平均值作为最终测量结果。

1.4 循环伏安曲线测试

采用电化学工作站(型号:CHI760D,上海辰华仪器有限公司)测试不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中铝在玻碳电极上的循环伏安曲线。以玻碳电极($\phi=2.0 \text{ mm}$)作为工作电极;以铂丝电极($\phi=1.0 \text{ mm}$)作为对电极;将高纯铝丝插入装有适量 AlCl_3 -TMPAC 离子液体的玻璃管中作为参比电极。测试温度为 80°C ,扫描速度为 50 mV/s 。

1.5 电解实验

为了均匀电流分布、减少能量损耗、减少副反应发生,得到均匀的沉积产物,电解实验采用双阳极进行。分别用 YL113 铝合金($\text{Al}:83.7\%$)和铜片(99.99%)作为阳极和阴极,极间距为 1 cm 。电解实验前,阳极和阴极材料均采用金相砂纸进行打磨,以去除材料表面的污渍和氧化物,随后浸泡在无水乙醇中进行超声清洗,再用蒸馏水冲洗干净,干燥称重。电解实验采用恒流方式,电源由直流稳压电源提供。在电解过程中,使用高精度电压表以固定的时间间隔(1 min)测量电解槽正负极之间的电压,取这些测量值的平均值作为平均槽电压。电解实验结束后,将得到的阴极产物立即浸泡在丙酮溶液中去掉表面的离子液体,然后用无水乙醇和去离子水依次冲洗,最后烘干称重表征。实验流程示意如图 2 所示,电解实验温度为 80°C ,电流密度为 $5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,电解时间为 2 h 。

1.6 产物表征

采用扫描电子显微镜(SEM,型号:XL 30 ESEM TMP,荷兰飞利浦公司)在加速电压为 15 kV 下对产

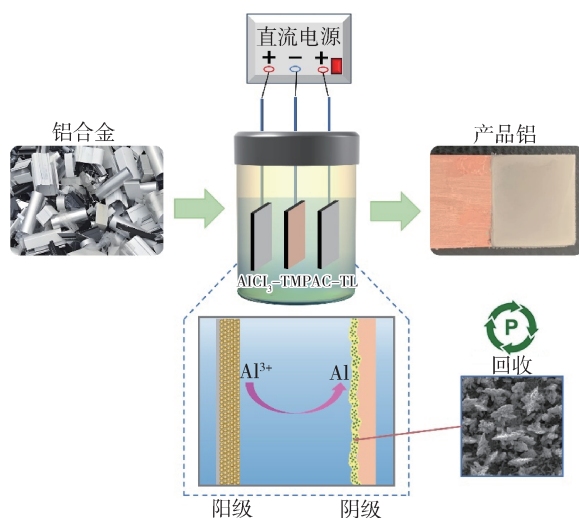


图2 实验流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental process

物的微观形貌进行分析。利用 X 射线荧光光谱(XRF,型号:Epsilon 3XLE,上海科学仪器有限公司)对产物中铝含量进行分析。采用 X 射线衍射仪(XRD,型号:Rigaku, Model D/max 2200,日本理学公司)的 $\text{Cu-K}\alpha$ 辐射源对产物的晶体结构进行测定,通过对比分析衍射峰的位置和强度对产物的物相组成进行鉴定。

2 结果与讨论

2.1 电导率

在不同温度下,测定不同甲苯含量($0\sim 65\%$)的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电导率,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,当甲苯含量相同时, AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体的电导率随温度的升高而增大。这是因为离子液体由阴、阳离子组成,依靠离子迁移来导电,随着温度的升高,离子获得的能量增加,容易克服离子间的相互作用力,从而使体系的黏度降低,离子运动阻力减小,迁移速度加快,电导率增加^[13]。当温度一定时,离子液体的电导率随甲苯含量的增加而显著增大。离子液体是一种在室温或近室温下呈液态的盐,其黏度通常比传统有机溶剂高 2 个数量级,这种高黏度是离子液体重要的物理性质之一。当加入少量甲苯时,离子液体中的带电离子被稀释,削弱了带电离子间的相互作用,降低了溶液黏度,提高了带电离子淌度^[14],故离子液体的电导率随着甲苯含量的增大而增大。

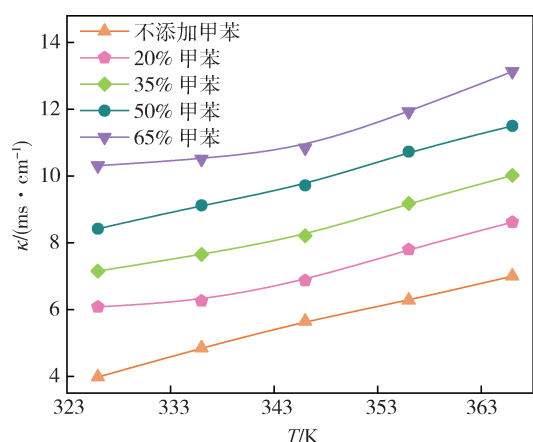


图3 不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体在不同温度下的电导率

Fig. 3 Conductivity of AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids with different toluene contents under different temperatures

根据 Arrhenius 公式 (式 (1))^[15], 将 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电导率的对数 ($\ln\kappa$) 与温度倒数 (T^{-1}) 作图, 结果如图4所示。从图4可以看出, $\ln\kappa$ 与 T^{-1} 呈现良好的线性关系, 根据拟合结果可以计算出不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电导活化能。通过拟合计算得知, 当甲苯含量分别为 0%、20%、35%、50%、65% 体积分数时, AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体的电导活化能分别为 13.30、8.71、8.17、7.51、5.78 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

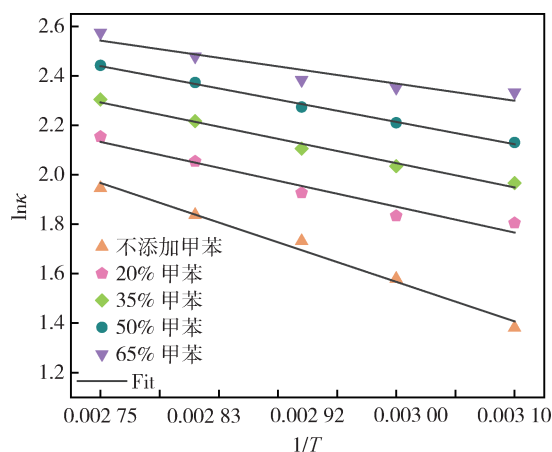


图4 不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电导率的对数 $\ln\kappa$ 与温度倒数 T^{-1} 的关系

Fig. 4 Relationship between $\ln\kappa$ and T^{-1} of conductivity of AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids with different toluene contents

$$\ln\kappa = \frac{E_\kappa}{RT} + \ln\kappa_0 \quad (1)$$

式中: κ 为电导率, $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$; κ_0 为常数; E_κ 为电导活化能, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T 为热力学温度, K 。

2.2 黏度

离子液体具有高黏稠性, 其黏度是影响物质在离子液体中传质速率的重要因素之一。图5为不同甲苯含量(0~65%)的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体在不同温度下的黏度。由图5可以看出, 甲苯含量相同条件下, AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体黏度随温度的升高而降低, 这是因为升高温度会促使离子的热运动增强, 离子间的距离加大, 产生更多的空穴, 因而离子的自由移动空间增大, 流动性增强, 从而使得体系黏度降低^[16]。此外, 升高温度会加快带电离子的运动速率, 减小离子的运动阻力, 使得体系黏度下降。当温度一定时, AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体的黏度随甲苯含量增加而急剧降低。这是因为离子液体中甲苯的存在会改变离子液体的结构和相互作用, AlCl_3 -TMPAC 离子液体中甲苯的加入稀释了体系的浓度, 减少了离子间的相互作用力, 进而影响了体系的流动性和黏度。此外还可以发现, 当离子液体中甲苯含量达到65%时, 体系的黏度相较于少量甲苯存在时下降的更为明显。这是因为离子液体中存在过多甲苯时, 甲苯会与电解液中的溶质和溶剂相互混合, 改变电解液的溶剂化结构,

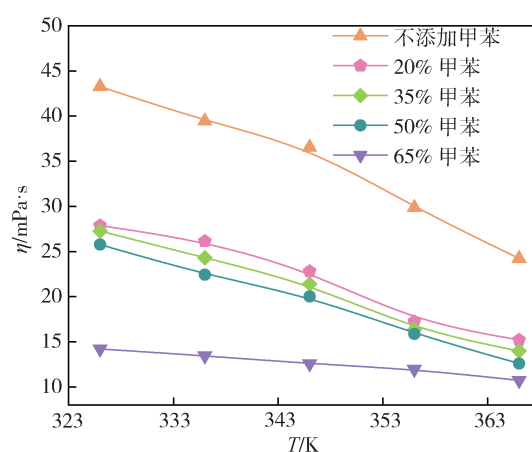


图5 不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体在不同温度下的黏度

Fig. 5 Viscosity of AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids with different toluene contents under different temperatures

这种改变使得电解液中离子之间的相互作用减弱,进而使电解液的黏度降低。因此, AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中过多甲苯的存在不利于铝的电解。

2.3 循环伏安曲线

图6为铝在 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中玻碳电极上不同甲苯含量的循环伏安曲线结果。从开路电位(OCP)0.2 V 开始往负方向扫描到-1.2 V,随后反向扫描监测电流回路到0.7 V,最后回到起始扫描电位。由图6可以看出,当电解液中未加入甲苯时,在约-0.82 V处(即图6中 c_1)观察到了铝的还原峰,在约0.30 V处(即图6中 a_1)观察到了铝的氧化峰。对循环伏安曲线仔细检查还可以发现,在铝大量沉积和还原之前的电位处分别出现了两个附加峰 c_2 和 a_2 ,这两个峰主要是因为铝的欠电位沉积(UPD)和随后的铝剥离引起的^[17]。此外还可以发现,循环伏安曲线表现出电流环路滞后,这是典型的需要成核过电位的沉积过程。这种电流环路的发生是因为在负向扫描过程中,铝在玻碳电极上的沉积需要相当大的过电位才能启动铝沉积的成核和后续生长,而当扫描反向时,还原电流会继续流动,因为现在铝的沉积发生在先前沉积的铝的表面上,而不是在裸露的玻碳电极上。从(图6)还可以看出,当电解液中含有35%甲苯时,铝的还原峰值电位逐渐正移,氧化峰值电位逐渐负移,且响应电流密度明显增大。这主要是因为电解液中甲苯的存在,降低了体系黏度、增大了电导率,使得铝的还

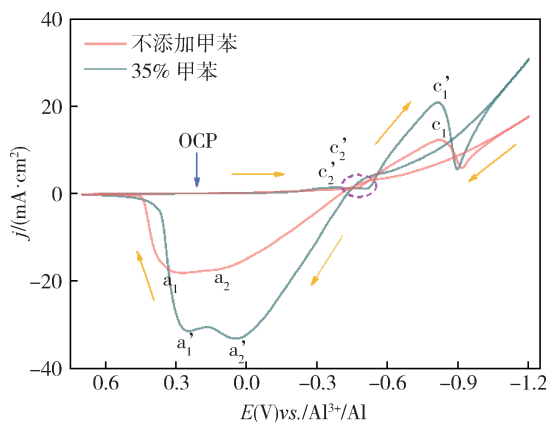


图6 铝在 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中玻碳电极上的循环伏安曲线

Fig. 6 Cyclic voltammetry curves of aluminum on glassy carbon electrode in AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids

原反应和氧化反应都加快。

2.4 产物微观结构

图7是温度为80℃和电流密度为 $5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的条件下,在不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中电解2 h得到的阴极产物微观结构。从图7可以看出,离子液体中甲苯含量的改变对产物的微观结构影响较大。当电解液中不含甲苯时,产物由不规则的微米片交错组成。随着电解液中甲苯含量的增加,片状结构开始堆积,逐渐形成类似于杉树状的结构。当电解液中甲苯含量达到50%时,阴极产物形貌发生了明显变化,由不规则的微米块体组成,且产物的致密性和平整性有明显改善。

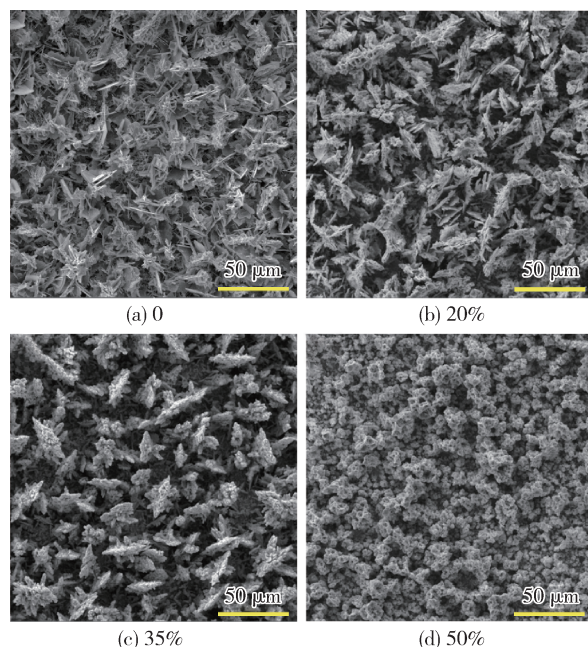


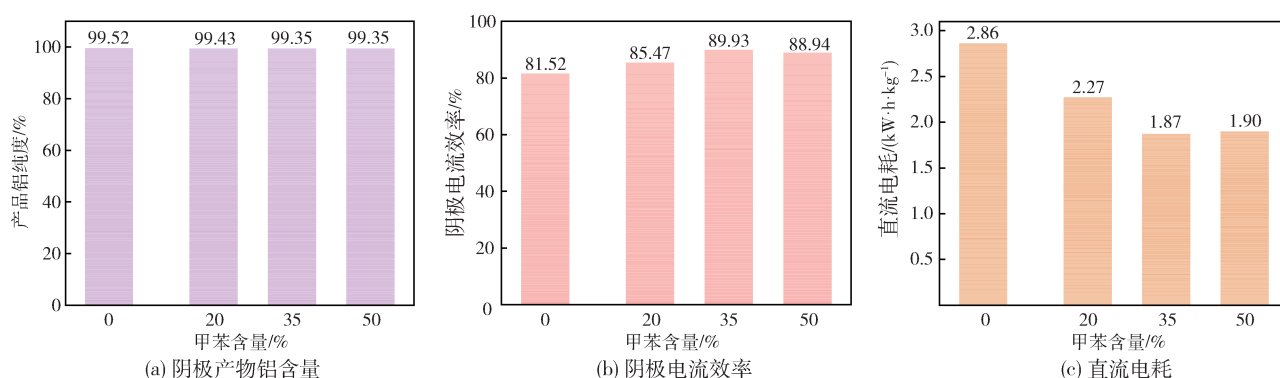
图7 不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电解铝产物的SEM照片

Fig. 7 SEM photographs of aluminum products electrolysis from AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids with different toluene contents

2.5 产物铝纯度、阴极电流效率和直流电耗

用刀片刮取阴极上的产物,采用X射线荧光光谱(XRF)对阴极产物中铝的含量进行分析,结果见图8(a)。从图8(a)可以看出,不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电解铝的阴极产物中铝纯度都大于等于99.35%,说明产物铝纯度很高。

采用式(2)、式(3)计算不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电解铝的阴极电流效率和直流

图8 不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电解铝Fig. 8 Electrolysis of aluminum from AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids with different toluene contents

电耗^[18],结果如图8(b)和图8(c)所示。从图8(b)和图8(c)可以看出,当 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中甲苯含量分别为0%、20%、35%、50%时,阴极电流效率分别为81.52%、85.47%、89.93%、88.94%,直流电耗分别为2.86、2.27、1.87、1.90 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。阴极电流效率呈先增加后降低的趋势,直流电耗呈先降低后增加的趋势。当甲苯含量为35%时,阴极电流效率达到最大,直流电耗达到最低。这是因为甲苯含量的增加使得体系电导率增加、黏度下降,从而增大了电解铝的阴极电流效率、降低了直流电耗。但当电解液中甲苯含量过高时($\geq 50\%$),阴极电流效率开始下降,直流电耗开始上升,这主要是因为电解液中过多的甲苯改变了体系的组成,使得电解液中电沉积铝的有效离子减少。因此, AlCl_3 -TMPAC 离子液体中过多甲苯的存在对于铝的电解是不利的。

$$\eta = \frac{m}{qIt} \times 100\% \quad (2)$$

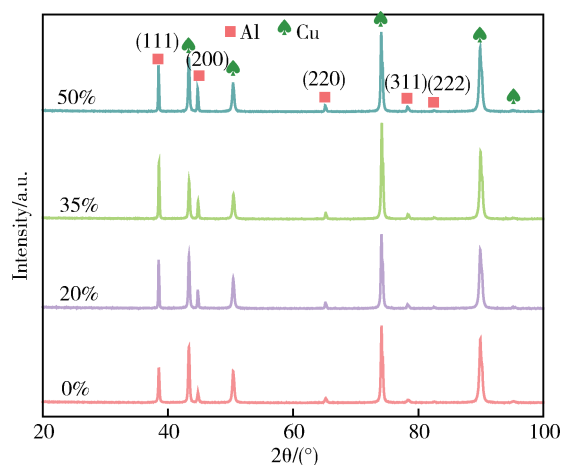
$$W = \frac{U}{q\eta} \quad (3)$$

式中: η 为阴极电流效率,%; m 为阴极产物质量,g; q 为铝的电化学当量,0.3355, $\text{g}/(\text{A}\cdot\text{h})$; I 为电流,A; t 为电解时间,h; W 为直流电耗, $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$; U 为平均槽电压,V。

2.6 产物物相

对不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电解铝得到的阴极产物进行XRD测试,结果如图9所示。从图9中可以看出,除了基体Cu的特征峰外,产物均为面心立方(fcc)结构的金属铝。随着电解液中甲苯含量从0%增加到50%,(111)和(200)晶面的衍射峰强度逐渐增加,说明电解液中甲苯含

量的增加促进了阴极产物铝在(111)和(200)晶面的生长。此外,电解液中甲苯含量的增加对产物铝在(220)、(311)和(222)晶面的生长情况影响不大。

图9 不同甲苯含量的 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电解铝产物的物相分析Fig. 9 Physical phase analysis of aluminum electrolysis products from AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquids with different toluene contents

3 结论

针对现行铝电解工艺高温、高能耗、高排放的问题,本文以三氯化铝-苯基三甲基氯化铵-甲苯(AlCl_3 -TMPAC-TL)离子液体为电解液,铜片为基体,在80℃采用恒电流法电解铝合金,考察了甲苯含量(体积分数:0%、20%、35%、50%)对电解铝的影响,得到以下主要结论。

1) AlCl_3 -TMPAC 离子液体中甲苯的存在显著提

高了体系的电导率、降低了体系的黏度。 AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体电导率随温度的升高而增大, AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体黏度随温度的升高而降低。

2) AlCl_3 -TMPAC 离子液体中的甲苯使铝的还原峰值电位正移,氧化峰值电位负移,响应电流密度明显增大,加快了铝在电解液中的还原反应和氧化反应。

3) AlCl_3 -TMPAC-TL 离子液体中甲苯提高了阴极电流效率、降低了直流电耗。离子液体中不含甲苯时,产物由不规则的微米片交错组成;随着离子液体中甲苯含量的增加,产物呈杉树状结构;当离子液体中甲苯含量达到50%时,产物由不规则的微米块体组成。

4) 离子液体中甲苯含量的增加促进了产物铝在(111)和(200)晶面的生长,而对其在(220)、(311)和(222)晶面的影响不大。

[参考文献]

- [1] WU X D, ZHANG W K. A review on aluminum matrix composites' characteristics and applications for automotive sector [J]. *Heliyon*, 2024, 10(20): e38576.
- [2] 戴小平. 铝电解清洁生产工艺现状及发展趋向[J]. *世界有色金属*, 2005(6): 18-22.
DAI Xiaoping. Aluminum electrolysis clean production process status and development trends [J]. *World Non-Ferrous Metals*, 2005(6): 18-22.
- [3] FORSYTH S A, PRINGLE J M, MACFARLANE D R. Ionic liquids—an overview [J]. *Australian Journal of Chemistry*, 2004, 57(2): 113-119.
- [4] MANIAM K K, PAUL S. A review on the electrodeposition of aluminum and aluminum alloys in ionic liquids [J]. *Coatings*, 2021, 11(1): 80.
- [5] PRADHAN D, REDDY R G. Mechanistic study of Al electrodeposition from EMIC- AlCl_3 and BMIC- AlCl_3 electrolytes at low temperature [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 143(2): 564-569.
- [6] CHANG J K., CHEN S Y, TSAI W T, et al. Electrodeposition of aluminum on magnesium alloy in aluminum chloride (AlCl_3)-1-ethyl-3-methylimidazolium chloride (EMIC) ionic liquid and its corrosion behavior [J]. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(7): 1602-1606.
- [7] WANG S X, XU C Y, HUA Y X, et al. Anodic dissolution of aluminum in AlCl_3 -[BzMIM]Cl ionic liquid [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2021, 900: 115715.
- [8] ŁUCZAK J, JUNGnickel C, MARKIEWICZ M, et al. Solubilization of benzene, toluene, and xylene (BTX) in aqueous micellar solutions of amphiphilic imidazolium ionic liquids [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2013, 117(18): 5653-5658.
- [9] CHOU L H, HUSSEY C L. Corrosion resistance of aluminum films electroplated on steel from chloroaluminate ionic liquids containing toluene as a co-solvent [J]. *ECS Transactions*, 2014, 64(4): 549-561.
- [10] 田国才, 袁青香. 二氯甲烷和甲苯对咪唑离子液体结构和性质及铝电沉积的影响 [J]. *工程科学学报*, 2021, 43(8): 1037-1046.
TIAN Guocai, YUAN Qingxiang. Effect of dichloromethane and toluene on the structure, property, and Al electrodeposition in 1-butyl-3-methylimidazolium chloroaluminate ionic liquid [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(8): 1037-1046.
- [11] 汪少杰, 谢婷婷, 余超, 等. NdFeB 磁体表面离子液体电沉积 Al 层的组织结构及耐蚀性能 [J]. *材料保护*, 2012, 45(8): 1-3, 70.
WANG Shaojie, XIE Tingting, YU Chao, et al. Microstructure and corrosion resistance of aluminum coating electrodeposited on NdFeB magnet from ionic liquid [J]. *Materials Protection*, 2012, 45(8): 1-3, 70.
- [12] BAKKAR A, NEUBERT V. A new method for practical electrodeposition of aluminium from ionic liquids [J]. *Electrochemistry Communications*, 2015, 51: 113-116.
- [13] 王姝溪, 徐存英, 陈晓, 等. AlCl_3 /urea 类离子液体电沉积铝 [J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(3): 217-224.
WANG Shuxian, XU Cunying, CHEN Xiao, et al. Electrodeposition of aluminum using AlCl_3 /urea ionic liquid analogues [J]. *Advanced Engineering Science*, 2023, 55(3): 217-224.
- [14] 宁汇, 侯民强, 杨德重, 等. 二元混合离子液体的电导率与离子间的缔合作用 [J]. *物理化学学报*, 2013, 29(10): 2107-2113.
NING Hui, HOU Minqiang, YANG Dezhong, et al. Ionic association in binary ionic liquids by conductivity [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2013, 29(10): 2107-2113.
- [15] OKOTURO O O, VANDERNOOT T J. Temperature dependence of viscosity for room temperature ionic liquids [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2004, 568: 167-181.
- [16] 薛宇, 华一新, 汝娟坚, 等. 低共熔溶剂中电解分离铜镍合金 [J]. *有色金属工程*, 2021, 11(9): 75-79.
XUE Yu, HUA Yixin, RU Juanjian, et al. Electrolytic separation of copper-nickel alloy in deep eutectic solvent [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(9): 75-79.
- [17] JIANG T, BRYM M C, DUBÉ G, et al. Electrodeposition of aluminium from ionic liquids: Part II—studies on the electrodeposition of aluminum from aluminum chloride (AlCl_3)-trimethylphenylammonium chloride (TMPAC) ionic liquids [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(1-2):

10–18.

[18] 付程程, 华一新, 汝娟坚, 等. 低共熔溶剂中电解分离高铅锡合金制备高纯锡粉[J]. 矿冶, 2021, 30(5): 55–60.

FU Chengcheng, HUA Yixin, RU Juanjian, et al. Electrolytic

separation of high purity Sb powders from Pb-containing Sb alloy in deep eutectic solvent [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(5): 55–60.

Experimental study on the electrolysis of aluminum alloy in AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquid

WANG Shuxian^{1,2}, XING Li¹, LI Xiaoyan¹, ZHENG Jiabao¹, LUO Huan²

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China;

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Current aluminum electrolysis processes face challenges such as high temperatures, high energy consumption, and high emissions. Research has explored aluminum electrolysis in ionic liquids, but these methods suffer from complex synthesis processes and high costs. The aluminum trichloride-phenyltrimethylammonium chloride-toluene (AlCl_3 -TMPAC-TL) ionic liquid is low-cost, has wide electrochemical windows, and exhibits good solubility. However, its conductivity is relatively low, whereas toluene (TL) can significantly enhance the conductivity of the ionic liquid. This study employs an aluminum trichloride-phenyltrimethylammonium chloride-toluene (AlCl_3 -TMPAC-TL) ionic liquid as the electrolyte and a copper sheet as the substrate. Aluminum alloy electrolysis was conducted using a constant current method at 80°C . The influence of toluene content (volume fractions: 0%, 20%, 35%, and 50%) on aluminum electrolysis was systematically investigated. The results demonstrate that increasing temperature and toluene content significantly enhances the electrolyte's conductivity while decreasing its viscosity. Cyclic voltammetry test showed that the presence of toluene in the electrolyte significantly accelerated the reduction and oxidation reactions of aluminum. Electrolysis experiments indicated that pure aluminum can be obtained by electrolysis of aluminum alloy from AlCl_3 -TMPAC-TL ionic liquid. The presence of toluene in electrolyte improved the cathodic current efficiency and reduced the direct energy consumption. With the increase of toluene content in electrolyte, the product morphology evolved from irregular micron-scale flakes to cedar-like structure and then transitioned to micron blocks. Furthermore, toluene promotes preferential growth of aluminum along the (111) and (200) crystal planes.

Key words: aluminum electrolysis; energy consumption; ionic liquid; toluene; conductivity; viscosity; reaction rate; aluminum purity