电解液添加剂 Br^- 或 I^- 对铝空气电池负极电化学性能的影响研究①

余海林[1]，李怡凡[1]，黎红兵[2]，程皓[1]，李馨怡[1]，田忠良[1,3]，彭可[1]
（1.中南大学 冶金与环境学院，湖南 长沙 410083；2.长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012；3.有色金属增值冶金湖南省重点实验室，湖南 长沙 410083）

摘　要：为提升铝空气电池的电化学性能，采用电负性较弱的 Br^- 或 I^- 调控电解液氢键结构和修饰电极/电解液界面，抑制铝负极的析氢腐蚀。结果表明，随着电解液中 Br^- 或 I^- 的引入，铝负极的析氢速率和自腐蚀速率显著降低，铝负极及铝空气电池的电化学性能明显提升。向电解液中分别加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 后，铝负极的析氢速率、自腐蚀速率分别降至 13.79、9.54 mL/(cm^2 · h)或 13.5、11.5 mg/(cm^2 · h)，其缓蚀效率分别为 42.4%或 50.9%，对应的铝空气电池在 25 mA/cm^2 下的放电比容量分别为 1 167.1 mAh/g 或 1 674.4 mAh/g。

关键词：铝空气电池；电解液；添加剂；析氢腐蚀；溴离子；碘离子；铝负极
中图分类号：TM911.41　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.023
文章编号：0253-6099(2026)04-0150-08

Effects of Electrolyte Additives Br^- and I^- on Electrochemical Properties of Aluminum-Air Battery Anode

YU Hailin[1], LI Yifan[1], LI Hongbin[2], CHENG Hao[1], LI Xinyi[1], TIAN Zhongliang[1,3], PENG Ke[1]
(1.*School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 2.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan, China*; 3.*Hunan Provincial Key Laboratory of Value-Added Metallurgy of Nonferrous Metals, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: To improve the electrochemical performance of aluminum-air batteries, Br^- and I^- with weak electronegativity were adopted to regulate the hydrogen-bond structure of electrolyte and modify the electrode-electrolyte interface, so as to suppress hydrogen evolution corrosion of aluminum anode. The results indicate that the introduction of Br^- and I^- into electrolyte can significantly reduce the hydrogen evolution rate and self-corrosion rate of aluminum anodes, and remarkably improve the electrochemical performance of both aluminum anodes and aluminum-air batteries. After adding 3 mol/L KBr and 5 mol/L KI into KOH electrolyte, the hydrogen evolution rate and self-corrosion rate of aluminum anodes decrease to 13.79 mL/(cm^2 · h) and 13.5 mg/(cm^2 · h), 9.54 mL/(cm^2 · h) and 11.5 mg/(cm^2 · h), respectively. The corresponding corrosion inhibition efficiencies are 42.4% and 50.9%. Furthermore, the discharge specific capacities of the aluminum-air batteries can reach 1 167.1 mAh/g and 1 674.4 mAh/g at 25 mA/cm^2.

Key words: aluminum-air battery; electrolyte; additive; hydrogen evolution corrosion; bromide ion; iodine ion; aluminum anode

铝空气电池因其较高的理论能量密度(8 100 Wh/kg)、优异的安全性和低廉的成本，被认为是一种较有潜力的绿色化学电源[1-3]。为保持金属铝负极的反应活性，避免氧化铝薄膜和不溶性 $Al(OH)_3$ 所引起的极化，铝空气电池主要采用强碱性溶液作为电解液[4]。然而，铝负极在碱性环境下存在的析氢腐蚀不仅增加了电极极化，还降低了负极利用率，从而恶化铝空气电池性能[5-8]。

① **收稿日期**：2026-01-26
基金项目：国家自然科学基金(52474384)
作者简介：余海林(2000—)，男，河南信阳人，硕士研究生，主要研究方向为铝基电池电极材料与电解液改性。E-mail:1431157385@qq.com
通信作者：彭可(1971—)，男，湖南邵阳人，高级实验师，主要研究方向为铝空气电池金属负极与电解液改性。E-mail:pengke_msg@csu.edu.cn

卤素离子(F^-、Br^-、I^-等)电负性强、电荷密度高,可与氢原子产生较强的相互作用[9]。当溶液中引入卤素离子时,溶液中水分子构成的氢键网络会被结合强度更强的卤素离子-水分子氢键网络取代[10],通过更强的氢键作用束缚电解液中自由水分子,降低水分子的反应活性。同时,卤素离子极性强,可作用于金属表面形成一层保护膜,减少金属表面的析氢活性位点,进一步抑制金属的析氢腐蚀[11]。因此,可从氢键结构调控、电极/电解液界面修饰两方面调控电极反应行为,抑制铝负极的析氢腐蚀。文献[12]采用 16 mol/L KF 作为水系电解液添加剂,其电导率仍可达到 196 mS/cm,即使卤素离子浓度很高,该电解液仍能保持良好的导电性能,不会因为添加剂用量增加造成电极极化等问题,对电解液的物化性质影响较小,可有效提升电池的电化学性能。课题组前期探究了氟化钾对铝负极和铝空气电池电化学性能的影响[13],相对于其他卤素离子(Br^-、I^-等),F^-的半径最小且电荷密度最大,电负性极强,与电极之间产生的强结合作用会阻碍铝负极的放电过程,因此高浓度 F^-引入溶液后,会加剧电极极化,降低铝空气电池电化学性能。

基于此,本文选择 Br^-或 I^-作为电解液添加剂调控铝负极的析氢腐蚀和放电行为,以此改善铝空气电池的电化学性能。通过研究 Br^-、I^-分别与水分子、铝负极表面的界面作用及其对析氢过程的影响,揭示其抑制铝负极析氢腐蚀的作用机制;同时探究 Br^-或 I^-对铝负极析氢腐蚀、电化学性能以及铝空气电池电化学性能的影响,以优化添加剂用量。

1　实验

1.1　实验材料与试剂

实验选用工业纯铝作为电池负极材料,其元素组成见表 1。正极采用负载 Mn_xO_y@Ag 催化层的空气电极,电极型号 M20,尺寸规格 34 mm×(85+5) mm。实验试剂包括氢氧化钾、溴化钾、碘化钾,均为分析纯。

表 1　工业纯铝元素组成(质量分数)

Table 1　Elemental composition of industrial pure aluminum　%

Fe	Si	Ga	V	Zn	Mn	Ni	Cu	Mg	Al
0.320	0.060	0.018	0.017	0.010	0.006	0.005	0.002	0.001	99.561

1.2　电解液制备

实验所用电解液制备:称量 224.44 g 氢氧化钾固体,加入 600 mL 去离子水后搅拌溶解并冷却至室温,定容配制成 4 mol/L 的 KOH 碱性溶液。配制不同添加剂含量的添加剂时,取 100 mL 碱性溶液置于烧杯中,并按照需要的浓度称量一定质量的溴化钾、碘化钾固体加入烧杯,待溶液搅拌均匀并冷却至室温。

1.3　物化性质及电化学性能测试

电解液物化性质测试:分别采用旋转式黏度计(NDJ-9S)以及雷磁电导率仪(DDS-307A)测定电解液的黏度及电导率,所取数据均为 3 次测量数据的平均值。

铝负极电化学性能测试:利用三电极体系测试铝负极的开路电位(OCP)以及 Tafel 极化曲线。三电极体系使用铂网作为对电极,参比电极为 Hg/HgO 电极,工作电极为自制的铝负极。测试前,使用 100#~1000#砂纸由粗到细逐级打磨铝负极表面,经去离子水、无水乙醇依次洗涤后干燥处理;将组装好的三电极体系浸入 70 mL 待测电解液中进行电化学性能测试。测试中 OCP 的测试时间为 10 min;Tafel 极化曲线扫描的电位范围为-1.8~-1.0 V,扫描速度为 10 mV/s。

全电池测试:使用工业纯铝片(6.0 cm×3.5 cm×0.1 cm)和空气正极(Mn_xO_y@Ag 催化层)作为电池的负极和正极,通过铝空气电池模具进行组装;取 100 mL 待测电解液放入瓶中,与电池、循环泵组成电解液循环系统。使用前,铝负极表面需使用 100#~1000#的砂纸由粗到细依次打磨,然后用去离子水以及无水乙醇洗涤、干燥。使用 LAND 测试系统进行放电测试时,循环泵的流速设置为 10 mL/min,在电流密度为 25 mA/cm^{2}的条件下恒流放电 4 h;间歇放电测试周期为 OCP 下静置 30 min,恒流密度(25 mA/cm^2)放电 30 min,截止电压为 0.1 V。称量反应前后铝片的质量,铝负极利用率(U)计算式[14]为:

$$U=\frac{900It}{\Delta mF} \tag{1}$$

式中:I 为电流,A;t 为放电时间,s;Δm 为铝负极放电前后的质量损失,g;F 为法拉第常数,96 485 C/mol。

2　结果与讨论

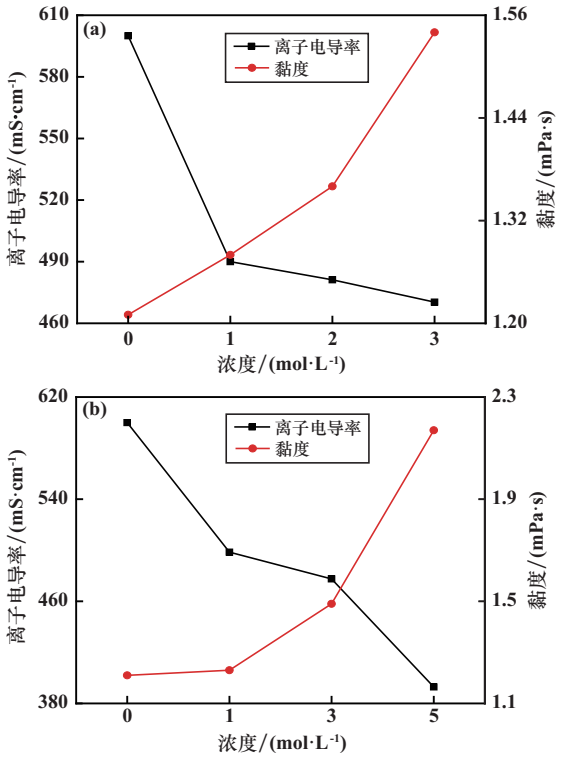
2.1　Br^-或 I^-对电解液物化性质的影响

电解液作为电池中离子传输的通道,其离子电导率以及黏度等物理性质决定着离子传输的速率,从而影响电池的电化学性能。图 1 为不同卤素离子浓度电解液的离子电导率和黏度。由图 1 可知,随着 Br^-或 I^-浓度增加,电解液离子电导率不断下降,黏度则不断上升。当加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 时,电解液离子电导率分别降至 470.3 mS/cm 或 392.9 mS/cm,黏度分别增至 1.54 mPa·s 或 2.17 mPa·s。在电解液中,卤素离子与水分子形成氢键,随着 Br^-或 I^-浓度上升,自由水的数

量会越来越少,进而导致黏度增大,离子电导率降低[15]。与 16 mol/L KOAc 盐包水电解液(黏度、离子电导率分别为 14.81 mPa·s、243.1 mS/cm)和 4 mol/L 甘油高浓度电解液(黏度、离子电导率分别为 12.53 mPa·s,86 mS/cm)相比,高浓度的溴离子及碘离子电解液仍然保持相对较高的离子电导率和较低的黏度[16-17]。

图 2 为不同电解液中水分子的^{1}H 核磁共振谱和 O—H 伸缩振动模式的局部红外光谱图。由图 2 可知,溶液中代表水分子上氢原子的核磁共振峰随着 Br^-或 I^-浓度增加逐渐向更高位移动,且化学位移逐渐减小。在 4 mol/L KOH 溶液中,^{1}H 的化学位移为 4.799,在电解液中分别加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 时,^{1}H 核磁共振峰分别偏移至 4.794 或 4.779,说明 Br^-或 I^-的加入使得水分子中氢原子外的电子云密度增大,氢原子受到更强的屏蔽效应[18]。这表明 Br^-、I^-与水分子之间均存在相互作用,随着卤素离子浓度增加,水分子间相互作用减弱。

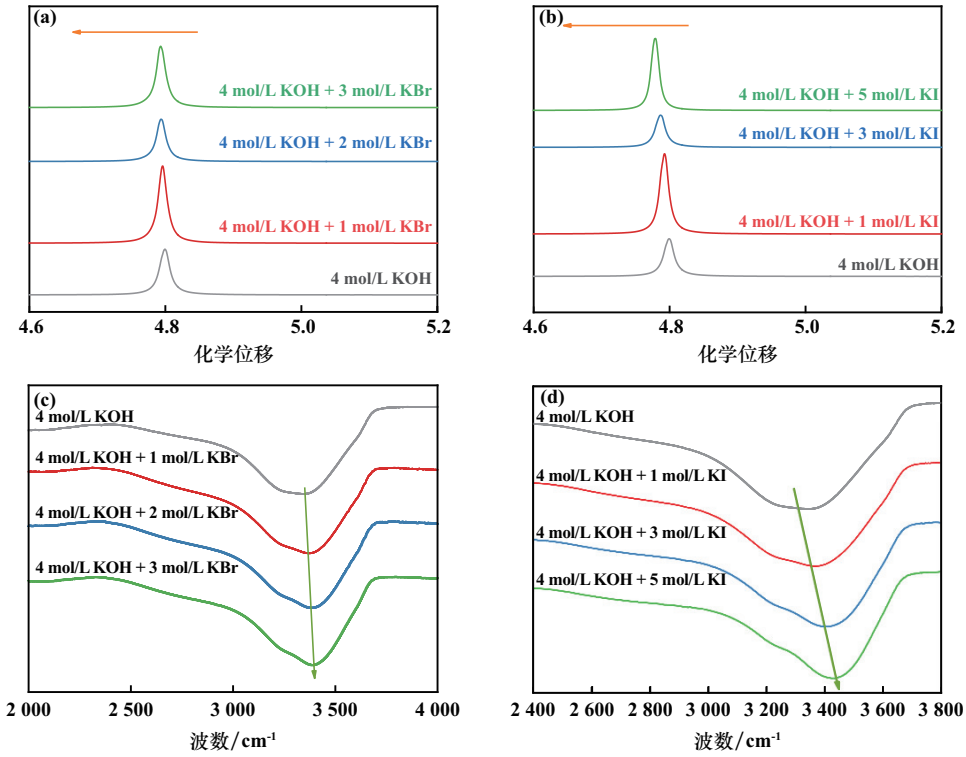
从红外光谱图可以看出,Br^-或 I^-引入导致 O—H 键的伸缩振动峰发生了蓝移,伸缩振动频率增强,伸缩振动峰变得窄而尖锐,且随着卤素离子浓度上升,其蓝移越明显,这说明 Br^-或 I^-与水分子之间形成了氢键,增强了水分子的稳定性[19]。而前期关于 F^-的研究表



(a) Br^-; (b) I^-

图 1 不同卤素离子浓度电解液的离子电导率和黏度

Fig. 1 Ionic conductivity and viscosity of electrolytes with different halogen ion concentrations



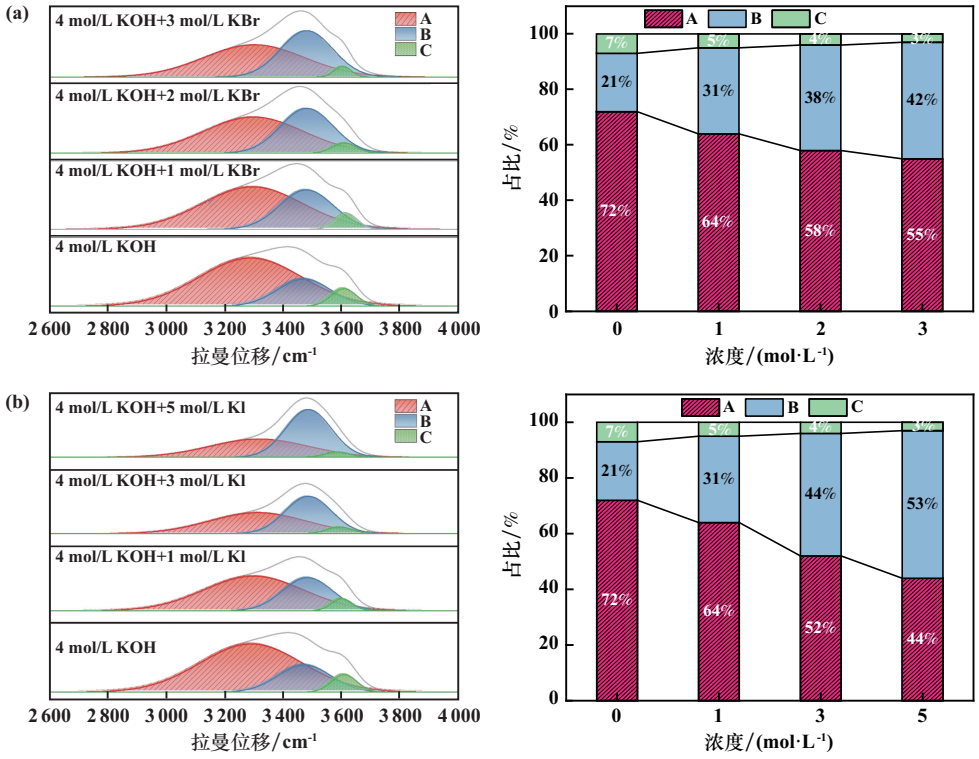
(a)~(b):^{1}H 核磁共振谱; (c)~(d):红外光谱图

图 2 不同电解液中水分子的^{1}H 核磁共振谱图和 O—H 伸缩振动模式的局部红外光谱图

Fig. 2 ^{1}H NMR spectra and local FT-IR of O—H stretching vibration mode for water molecule in different electrolytes

明,F^- 的加入也可以降低溶液中水分子的活性,增强其稳定性,但是其与 Br^- 或 I^- 的作用机理略有不同[13]。这可能是 F^- 体积相对更小,当它与水分子结合时,更容易向 O—H 键转移更多的电荷,这会使得 H—F 键变得更短,在 O—H 键伸缩振动模式的局部红外光谱上就会表现为振动峰红移。而相对于 F^-,Br^- 或 I^- 的体积比水分子大,它们之间很难发生电荷转移,其强极化作用使得 O—H 键的伸缩振动峰发生蓝移,从而使得水分子变得更加稳定[20]。

图 3 为不同电解液中 O—H 键振动峰的局部拉曼光谱拟合结果以及各拟合峰的面积占比。由图 3 可知,A 峰对应于水分子的完全四面体氢键结构;B 峰归因于水分子的部分氢键结构;C 峰则对应于溶液中水分子的非氢键结构[21]。随着卤素离子浓度上升,A 峰和 C 峰面积占比逐渐减小,B 峰占比逐渐增加。当溶液中 Br^- 或 I^- 的浓度分别达到 3 mol/L 或 5 mol/L 时,其 B 峰占比由原来的 21%分别上升至 42%或 53%,这证明了 2 种卤素离子的加入不仅打破了溶液中水分子的全氢键结构,还能与溶液中非氢键结构的水分子结合,形成氢键 O—H∶X^-。综合分析可知,Br^- 或 I^- 在水溶液中可以与水分子形成更强的氢键,破坏溶液中原有的氢键网络。



(a) Br^-; (b) I^-

图 3　不同电解液中 O—H 键振动峰的局部拉曼光谱拟合结果以及各拟合峰的面积占比

Fig. 3　Local fitted Raman spectra of O—H bond vibration peaks and area fraction of each fitted peak in different electrolytes

2.2　Br^- 或 I^- 与铝负极表面的相互作用

对于金属铝来说,Al(111)晶面占总晶体表面积的百分比最高,并且是更容易暴露的面。利用 DFT 计算 Br^- 或 I^- 与铝负极之间的吸附能,得到 Br^- 或 I^- 与 Al(111)晶面之间的吸附能分别为-48.95 kJ/mol 或-107.11 kJ/mol。吸附能均为负值,说明 2 种卤素离子均能吸附在铝负极表面,其中 Al(111)晶面与 I^- 之间的吸附能更大,表明 I^- 在铝负极表面发生的吸附作用更强。

图 4 为铝负极在不同电解液中的 XPS 全谱以及局部谱图峰拟合结果。由图 4 可知,68.6 eV 和 615~630 eV 处出现的峰分别对应 Br 和 I 的特征峰,这说明 2 种卤素离子均存在于铝负极表面。峰拟合结果说明,浸泡在 4 mol/L KOH 中的铝金属仅显示与 Al_2O_3 相关的峰,相比之下,在 4 mol/L KOH 溶液中分别加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 时,铝金属不仅出现了与 Al_2O_3 相关的特征峰,还分别出现了与 Al—Br 或 Al—I 相对应的特征峰[22]。在 Br3d 或 I3d 的局部谱图中,也出现了与 Br—Al 键或 I—Al 键相关的特征峰。结合理论计算可证明 Br^- 或 I^- 能够与铝负极发生相互作用并存在于其表面。

2.3　Br^- 或 I^- 对铝负极析氢腐蚀的影响

图 5 为铝负极在不同电解液中的析氢量及析氢速率以及自腐蚀速率和缓蚀效率。由图5可知,铝负极

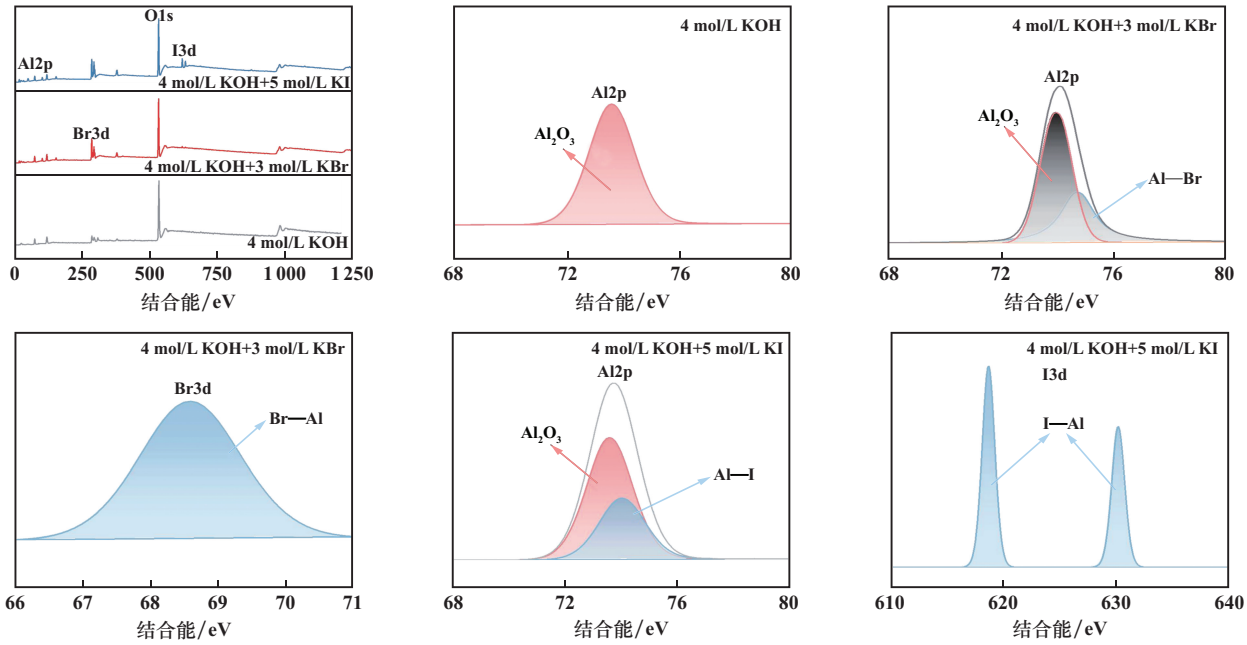
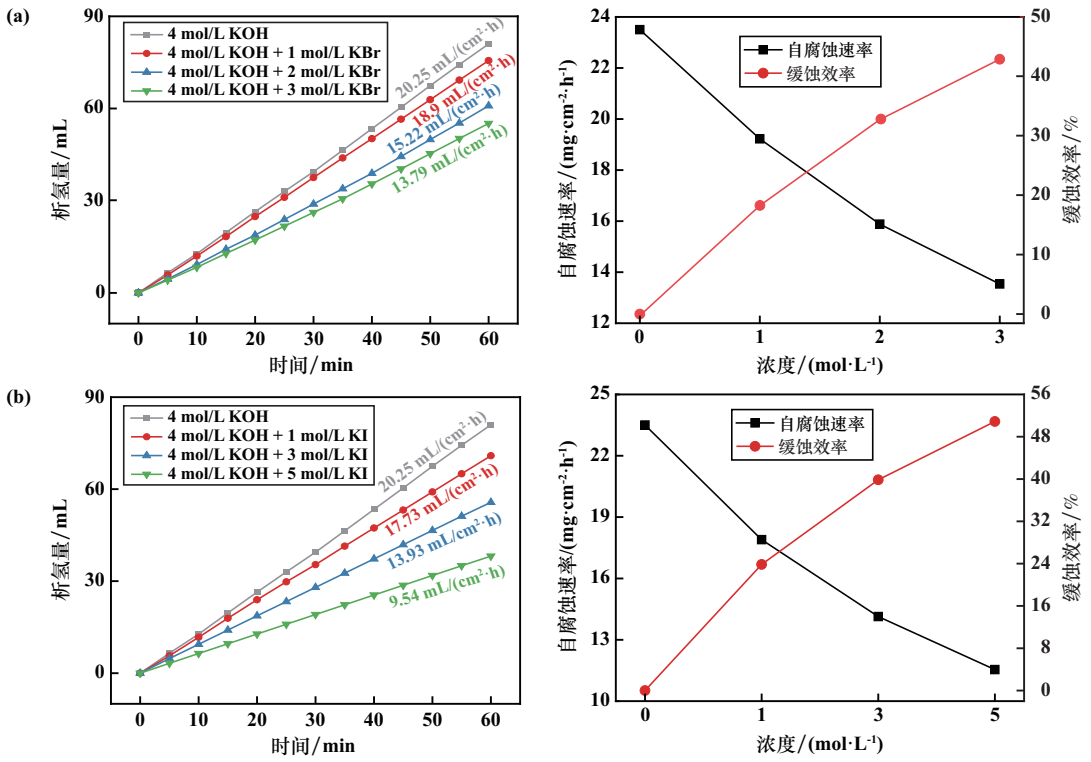


图 4 铝负极在不同电解液中的 XPS 全谱以及局部谱图峰拟合结果

Fig. 4 XPS full spectra and local spectral peak fitting results of aluminum anode in different electrolytes



(a) Br^-; (b) I^-

图 5 铝负极在不同电解液中的析氢量及析氢速率以及自腐蚀速率和缓蚀效率

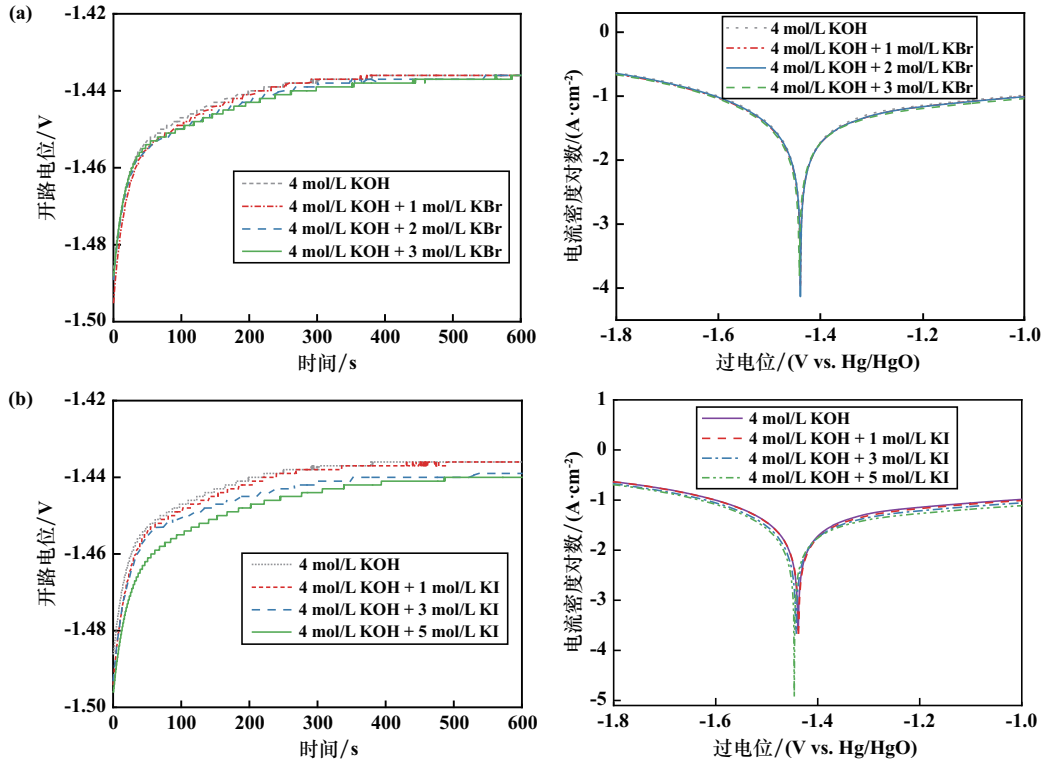
Fig. 5 Hydrogen evolution volume, hydrogen evolution rate, self-corrosion rate and inhibition efficiency of aluminum anode in different electrolytes

在 4 mol/L KOH 溶液中析氢量和析氢速率分别为 80.99 mL 和 20.25 mL/(cm² · h);当溶液中分别加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 时,铝负极析氢量、析氢速率分别降至 50.82 mL、13.79 mL/(cm² · h)或 33.84 mL、9.54 mL/(cm² · h),自腐蚀速率由 23.5 mg/(cm² · h)分别降至 13.5 mg/(cm² · h)或11.5 mg/(cm² · h),缓

蚀效率可分别达到 42.4%或 50.9%。

2.4　Br^- 或 I^- 对铝负极电化学性能的影响

图 6 为铝负极在不同电解液中的开路电位和 Tafel 极化曲线图。由图 6 可知,Br^- 或 I^- 的开路电位变化趋势并不相同,其可归因于两个方面:① 卤素离子会吸附在铝负极表面的析氢活性位点上,降低析氢过电位并活化负极,从而改善铝负极的电化学性能,使得开路电位负移,不同的卤素离子对铝负极的活化效果存在差异;② 卤素离子浓度的上升会加剧电极附近的浓差极化,使得开路电位正移,降低铝负极的电化学性能。在 4 mol/L KOH 溶液中,铝负极的开路电位为 −1.436 V。而随着在 4 mol/L KOH 溶液中不断加入溴离子,铝负极的开路电位均保持在−1.436 V,这说明 Br^- 对铝负极的活化作用与其带来的极化作用相互抵消;而 I^- 浓度由 1 mol/L 升至 5 mol/L 时,铝负极开路电位由−1.436 V 减至−1.440 V。即使加入了 5 mol/L KI,造成了严重的极化作用,铝负极的开路电位仍然负移。I^- 对铝负极具有更好的活化作用,更有利于提升铝负极的电化学性能。往电解液中加入 Br^- 或 I^- 后,其 Tafel 极化曲线的形状并未发生改变,表明 2 种卤素离子的引入并不会改变铝负极的电化学反应机理。



(a) Br^-; (b) I^-

图 6　铝负极在不同电解液中的开路电位和 Tafel 极化曲线

Fig. 6　Open-circuit potentials and Tafel polarization curves of aluminum anodes in different electrolytes

后续又通过 Tafel 外推拟合得到铝负极在两种卤素离子电解液中腐蚀电位以及腐蚀电流密度,结果如表 2 所示[23]。由表 2 可知,铝负极的腐蚀电位和腐蚀电流密度均随着卤素离子浓度增加而减小。

2.5　Br^- 或 I^- 对铝空气电池电化学性能的影响

表 3 为铝负极在不同浓度卤素离子电解液中的恒流放电参数,图 7 为铝负极在不同电解液中的恒流放电曲线以及能量密度。由表 3 和图 7 可知,在 25 mA/cm^{2}的电流密度下,电解液中未加入卤素离子的铝空气电池放电比容量为 836.3 mAh/g,能量密度为 989.43 Wh/kg,负极利用率仅为 28.06%,说明析氢

表 2　铝负极在不同电解液中的开路电位以及 Tafel 极化曲线参数

Table 2　Open-circuit potential and Tafel polarization curve parameters of aluminum anodes in different electrolytes

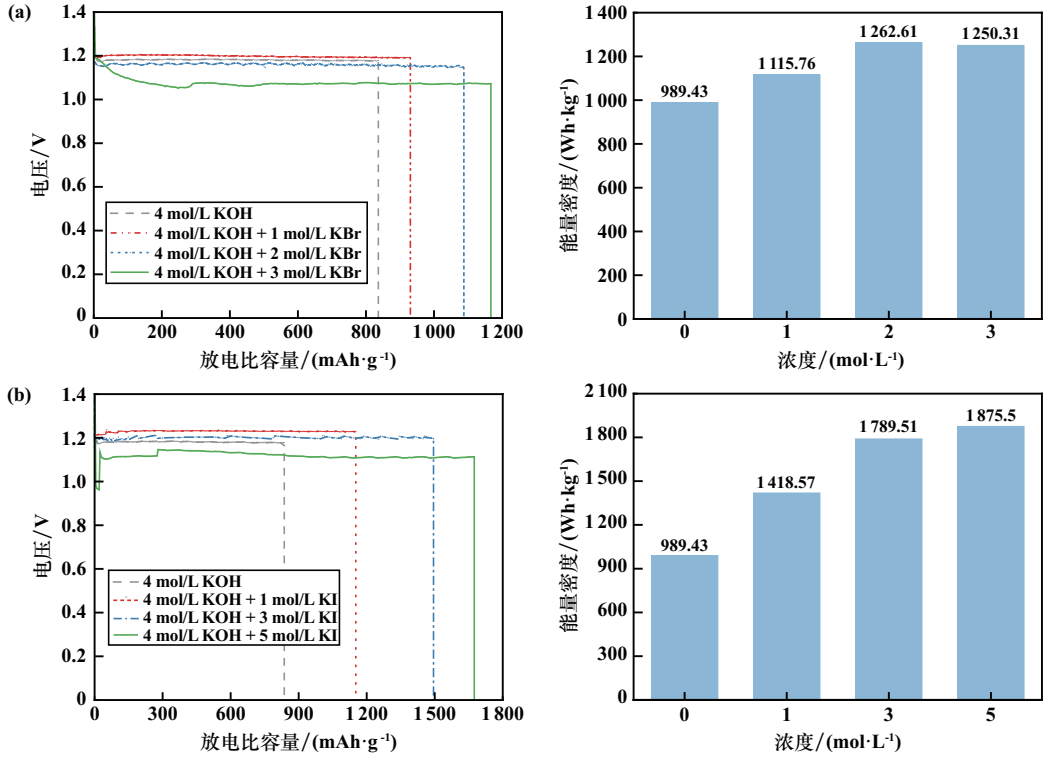
电解液组成	开路电位/V	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(mA·cm^{-2})
4 mol/L KOH	−1.436	−1.439	27.02
4 mol/L KOH + 1 mol/L KBr	−1.436	−1.439	25.18
4 mol/L KOH + 2 mol/L KBr	−1.436	−1.439	24.73
4 mol/L KOH + 3 mol/L KBr	−1.436	−1.441	24.44
4 mol/L KOH + 1 mol/L KI	−1.436	−1.438	24.61
4 mol/L KOH + 3 mol/L KI	−1.439	−1.442	23.27
4 mol/L KOH + 5 mol/L KI	−1.440	−1.446	20.89

腐蚀消耗了大量的铝,降低了放电性能。向电解液中分别加入 KBr 或 KI 后,其放电性能均会随着 Br^-或 I^-浓度增加而提升,当溶液中分别加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 后,电池的放电比容量分别增加至 1 167.1 mAh/g或 1 674.4 mAh/g,能量密度分别提高至 1 250.31 Wh/kg 或 1 875.5 Wh/kg,负极利用率分别升至 39.16%或 56.19%。铝空气电池工作电压随着 Br^-或 I^-浓度的增加呈现先升高后降低的趋势。这是因为当 Br^-或 I^-浓度较低时,其吸附在铝负极的析氢活性位点上,有效提升了工作电压;浓度过高时,会造成离子电导率降低、电极极化加剧等现象,工作电压降低,电池放电性能恶化。

表 3 铝负极在不同浓度卤素离子电解液中的恒流放电参数

Table 3 Constant-current discharge parameters of aluminum anodes in electrolytes with different halogen-ion concentrations

电解液组成	工作电压/V	放电比容量/(mAh·g^{-1})	负极利用率/%
4mol/L KOH	1.183 1	836.3	28.06
4mol/L KOH + 1 mol/L KBr	1.199 1	930.5	31.22
4mol/L KOH + 2 mol/L KBr	1.160 7	1 087.8	36.50
4mol/L KOH + 3 mol/L KBr	1.071 3	1167.1	39.16
4mol/L KOH + 1 mol/L KI	1.231 4	1 152.0	38.66
4mol/L KOH + 3 mol/L KI	1.197 4	1 494.5	50.15
4mol/L KOH + 5 mol/L KI	1.120 1	1 674.4	56.19



(a) Br^-; (b) I^-

图 7 铝负极在不同电解液中的恒流放电曲线以及能量密度

Fig. 7 Constant-current discharge curves and energy density of aluminum anodes in different electrolytes

后续又测试了铝负极在不同电解液中的间歇放电曲线,结果如图 8 所示。Br^-或 I^-的加入显著提升了电池的工作寿命,在 4 mol/L KOH 溶液中,电池的工作寿命仅为 25 h,而在含 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 的溶液中,铝电池的寿命分别延长至 29 h 或 33 h。而前期课题组关于 F^-的研究表明,5 mol/L KF 的加入可使电池的工作寿命延长至 32 h[13]。对比发现,I^-更有利于延长电池的工作寿命,这是因为 I^-体积更大,可以更好地调控电解液的溶剂化结构,展现出更好的析氢抑制效果以及铝负极电化学性能。

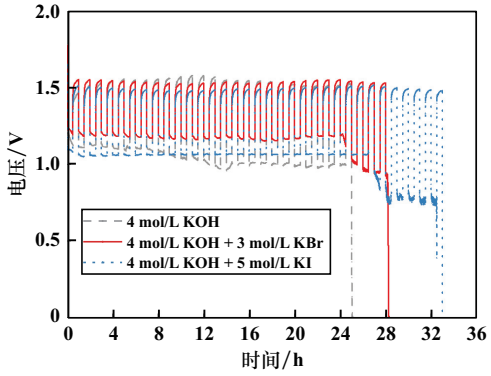


图 8 铝负极在不同电解液中的间歇放电曲线

Fig. 8 Intermittent discharge curves of aluminum anodes in different electrolytes

3　结论

1) 引入 Br^- 或 I^- 可显著降低铝负极析氢速率和自腐蚀速率。向 4 mol/L KOH 电解液中添加 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 后,铝负极析氢速率和自腐蚀速率均显著下降,缓蚀效率分别提高至 42.4%或 50.9%;同时体系腐蚀电流密度减小,开路电位、腐蚀电位负移,铝负极电化学性能增强。

2) 在 25 mA/cm^2 条件下,向 4 mol/L KOH 溶液中分别加入 3 mol/L KBr 或 5 mol/L KI 后,放电比容量由 836.3 mAh/g 分别提升至 1 167.1 mAh/g 或 1 674.4 mAh/g,能量密度、铝负极利用率由原来的 989.43 Wh/kg、28.06%分别提升至 1 250.31 Wh/kg、39.16%或 1 875.5 Wh/kg、56.19%。

3) Br^- 或 I^- 可通过强极化作用与水分子形成氢键,破坏电解液中原有氢键网络、降低水分子活性;借助氢键结构调控与电极/电解液界面修饰的协同作用,有效抑制铝负极的析氢腐蚀。

参考文献(References):

[1] Tian Z D, Liang Y Q, Chen K, et al. Advanced hollow cubic FeCo-N-C cathode electrocatalyst for ultrahigh-power aluminum-air battery[J]. Small, 2024,20(31):E2310694.

[2] Hosseini S, Xu T H, Masoudi Soltani S, et al. The efficient acetoxy-group-based additives in protecting of anode in the rechargeable aluminium-air batteries[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(1):501-516.

[3] Liu X, Jiao H D, Wang M Y, et al. Current progresses and future prospects on aluminium-air batteries[J]. International Materials Reviews, 2022,67(7):734-764.

[4] 施辉献,杨亚刚,杨妮,等. 铝空气电池废电解液生产超细氢氧化铝工艺条件研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):136-138.
Shi Huixian, Yang Yagang, Yang Ni, et al. Processing conditions for producing ultrafine aluminum hydroxide from waste electrolyte of aluminum-air battery[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2):136-138.

[5] Xiao F, Yang R J, Liu Z H. Active aluminum composites and their hydrogen generationvia hydrolysis reaction: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(1):365-386.

[6] Tan W C, Saw L H, Yew M C, et al. Characterization of the aluminium-air battery utilizing a polypropylene separator with corrosion inhibition ability[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,488:151106.

[7] Do H H, Tran N T, Truong H B, et al. Review: recent advances in nickel phosphide-based heterostructures for electrochemical hydrogen evolution reaction[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2024, 171(2):026501.

[8] Do H H, Hui K N, Vu P G, et al. MOF-derived copper selenides implanted in octahedral carbon matrix for efficient hydrogen evolution reaction[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023,170(9): 093503.

[9] Jiang Y F, Liu C L, Xue J, et al. Insights into the polymorphic transformation mechanism of aluminum hydroxide during carbonation of potassium aluminate solution[J]. CrystEngComm, 2018,20(10):1431-1442.

[10] Dereka B, Yu Q, Lewis N H C, et al. Crossover from hydrogen to chemical bonding[J]. Science, 2021,371(6525):160-164.

[11] Crabtree R H. Hypervalency, secondary bonding and hydrogen bonding: siblings under the skin[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46(6):1720-1729.

[12] Hou R L, Wang Y, Sun Y L, et al. "Cation/anion with co-solvation" type high-voltage aqueous electrolyte enabled by strong hydrogen bonding[J]. Nano Energy, 2022,99:107377.

[13] Cheng H, Li Y F, Chen Z B, et al. Three-center-four-electron hydrogen bond bridged by fluorine enables advanced electrolyte for aluminum air batteries[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024,89:375-380.

[14] Luo L, Zhu C, Yan L J, et al. Synergistic construction of bifunctional interface film on anodevia a novel hybrid additive for enhanced alkaline Al-air battery performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2022,450:138175.

[15] Wang T, Tian Z L, You Z H, et al. Hydrogen-bond network manipulation of aqueous electrolytes with high-donor solvent additives for Al-air batteries[J]. Energy Storage Materials, 2022,45:24-32.

[16] Wu S G, Hu S Y, Zhang Q, et al. Hybrid high-concentration electrolyte significantly strengthens the practicability of alkaline aluminum-air battery[J]. Energy Storage Materials, 2020,31:310-317.

[17] Pham T H, Lee W H, Byun J H, et al. Improving the performance of primary aluminum-air batteries through suppressing water activity by hydrogen bond-rich glycerol solvent additive[J]. Energy Storage Materials, 2023,55:406-416.

[18] 闵婧,王力彦. 利用三中心氢键限制芳酰胺构象的核磁共振氢谱分析[J]. 高等学校化学学报, 2022,43(6):93-99.
Min Jing, Wang Liyan. ^{1}H NMR study on the conformation of aromatic amides limited by three-center hydrogen bonds[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2022,43(6):93-99.

[19] Pogorelov V, Doroshenko I, Pitsevich G, et al. From clusters to condensed phase-FT IR studies of water[J]. Journal of Molecular Liquids, 2017,235:7-10.

[20] Wang S H, Fang W H, Li T Y, et al. An insight into liquid water networks through hydrogen bonding halide anion: stimulated Raman scattering[J]. Journal of Applied Physics, 2016,119(16):163104.

[21] Hou Z G, Dong M F, Xiong Y L, et al. Formation of solid-electrolyte interfaces in aqueous electrolytes by altering cation-solvation shell structure[J]. Advanced Energy Materials, 2020,10(15):1903665.

[22] Pereda M D, Alonso C, Burgos-Asperilla L, et al. Corrosion inhibition of powder metallurgy Mg by fluoride treatments[J]. Acta Biomaterialia, 2010,6(5):1772-1782.

[23] 朱渊. 商业铝合金用作铝空气电池负极的电化学性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2023:23-43.
Zhu Yuan. Research on electrochemical performance of commercial aluminum alloy as anode for Al-air battery[D]. Changsha: Central South University, 2023:23-43.

引用本文:余海林,李怡凡,黎红兵,等. 电解液添加剂 Br^- 或 I^- 对铝空气电池负极电化学性能的影响研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):150-157.
Yu Hailin, Li Yifan, Li Hongbin, et al. Effects of electrolyte additives Br^- and I^- on electrochemical properties of aluminum-air battery anode[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):150-157.