

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.020

叶宗国, 林钇君, 杨力, 等. 含复合添加剂的胶体电解质性能 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(3): 234-242.

含复合添加剂的胶体电解质性能

叶宗国¹, 林钇君¹, 杨力², 郑尚华², 何荣幸¹

1. 西南大学 化学化工学院, 重庆 400715; 2. 四川力扬工业有限公司, 四川 遂宁 629000

摘要: 为改善胶体电解质的性能并实现胶体电池综合性能的提升, 分别探究了含有聚乙烯醇衍生物 (Polyvinyl Alcohol Derivatives, PVAD)、十二烷基苯磺酸钠 (Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, SDBS)、磷酸钠 (Trisodium Phosphate, TSP) 和聚乙烯吡咯烷酮 (Polyvinyl Pyrrolidone, PVP) 4 种不同添加剂的胶体电解质性质, 并在此基础上利用正交试验制备复合添加剂。胶体稳定性测试表明, 添加了 PVAD 和 PVP 的胶体电解质稳定性得到提高, 在 PVAD 质量分数为 0.003 0% 时, 胶体稳定性最佳。循环伏安和电化学阻抗测试结果表明, 4 种添加剂均可改善铅电极在胶体电解质中的氧化还原过程, 提升活性物质的利用率; 在一定质量分数范围内, PVAD、TSP 和 PVP 可以提高析氧或析氢过电位, 抑制自放电; 4 种添加剂均可降低电化学反应时的电荷转移内阻。正交试验给出的优化方案为 0.020 0% SDBS、0.006 0% PVAD、0.400 0% TSP、0.002 5% PVP, 测试结果表明该复合添加剂能够提高析氧析氢过电位, 降低电荷转移内阻, 同时含有该复合添加剂的电池性能得到全面提升。

关键词: 胶体电解质; 添加剂; 表面活性剂; 磷酸盐; 正交试验

中图分类号: O648.12

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)03-0234-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Colloidal Electrolyte Performance with Additive Combinations

YE Zongguo¹, LIN Yijun¹, YANG Li²,
ZHENG Shanghua², HE Rongxing¹

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Sichuan Liyang Industrial Co., Ltd., Suining Sichuan 629000, China

Abstract: In order to improve the performance of colloidal electrolyte and realize the comprehensive improvement of the performance of colloidal batteries, the properties of colloidal electrolytes containing four different additives. Polyvinyl alcohol derivatives (PVAD), sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS),

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(21173169); 重庆市高等学校创新团队建设项目(CXTDX201601011)。

作者简介: 叶宗国, 硕士研究生, 主要从事铅酸电池研究。

通信作者: 何荣幸, 教授。

trisodium phosphate(TSP) and polyvinyl pyrrolidone(PVP) were explored, and the compound additives were prepared by orthogonal experiments on this basis. The stability test showed that the addition of PVAD and PVP improves the stability of the colloidal electrolyte, and the optimal PVAD content was 0.003%. The cyclic voltammetry and electrochemical impedance tests indicated that the four additives could improve the redox process of lead electrode in colloidal electrolyte and boost the utilization rate of active substances. Within a certain content range, PVAD, TSP and PVP could increase the overpotential of oxygen or hydrogen evolution and inhibit self-discharge of the colloidal electrolyte. All four additives reduced the internal resistance of charge transfer during electrochemical reactions. The optimization scheme given by orthogonal experiments was 0.020 0% SDBS, 0.006 0% PVAD, 0.400 0% TSP and 0.002 5% PVP. Test results demonstrate that the composite additive enhances the overpotential for hydrogen and oxygen evolution reactions, reduces the charge transfer resistance, and contributes to a comprehensive improvement in the overall performance of batteries containing this additive.

Key words: colloidal electrolytes; additive; surfactant; phosphate; orthogonal experiments

阀控式铅酸蓄电池根据电解液固定方式的不同,分为吸附式玻璃纤维隔板电池和胶体电池^[1-2]。胶体电池将电解质固定于凝胶中,具有不漏酸、自放电小、活性物质不易脱落、耐过充和深循环性能好的特点,因此在某些应用场景中较玻璃纤维隔板电池更有优势^[3-4]。但是,胶体电池内阻偏大,充电过程中容易造成电池浮充不均衡,并且胶体电解质在充放电过程中较容易出现水化分层现象,形成明显的固液界面,使电池失效^[5-6]。

胶体电解质是影响胶体电池性能的关键因素之一,除基本成分(如水、硫酸、气相二氧化硅)外,还可以在电解质中加入添加剂^[7-9]。典型的添加剂包括磷酸、硼酸、氨基酸和硫酸钠等^[10-13]。然而,这些添加剂多用于以液体为电解质的传统铅酸电池中,其在凝胶电解质体系中的作用机制与液体电解质存在显著差异。这是因为添加剂可以与凝胶剂相互作用,从而影响电池性能。此外,某种添加剂虽可能提升铅酸电池某一方面的性能,但也可能对其它性能产生反作用。例如,在 100% 放电深度条件下,胶体电解质中的藜芦醛可提高电池性能,但其在部分状态充电条件下可降低电池性能^[14];苯胺可在初期提升电池性能,但存储 3 个月后,可导致电池容量急剧降低^[15];磷酸可以减少充放电过程中的不可逆硫酸化,但会降低铅酸电池的容量;在电解质中加入碳材料可以提高电池的循环性能,但会加快充电过程中负极的析氢速率^[16];短链小分子多元醇,如乙二醇和季戊四醇,可以提高胶体电池性能,但长链聚乙二醇则会使胶体电解质无法形成凝胶^[17]。胶体电解质添加剂的主要作用可以总结为 4 个方面:① 改善胶体电解质的凝胶性能,抑制使用过程中的水化分层现象;② 提高活性物质的利用率,提高放电效率;③ 抑制析氢析氧,延长电池寿命;④ 提高铅在氧化还原过程中的可逆性,提升电池充放电性能。

目前,有关胶体电解质添加剂的研究虽取得了一定进展,但许多关键问题仍未解决,它们制约着添加剂性能的优化以及胶体电池整体性能的提升,具体体现在 3 个方面:① 添加剂往往需满足降低内阻、提升电解液稳定性、提升充放电效率等多重指标,这些指标之间可能会相互制约;② 添加剂在胶体电解质中参与的反应较为复杂,目前对其作用机制的研究不够深入;③ 部分性能优异的添加剂因其原材料成本昂贵或合成复杂,导致规模化应用受限。聚乙烯醇衍生物(PVAD)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)与聚乙烯吡咯烷酮(PVP)均为表面活性剂,具有良好的吸附作用及渗透性,可作为添加剂应用于胶体电池。此外,高分子表面活性剂能够改善胶体电解质的凝胶性,使电解质分散更加均匀,抑制使用过程中的水化分层现象,从而

提升胶体电池性能^[18]。磷酸钠(TSP)能够改善极板与板栅之间的相互作用,提升析氢析氧过电位,降低胶体电池的水消耗并延长电池寿命。上述 4 种添加剂价格低廉,易于获得,具有广泛的工业应用前景。

本文研究了上述 4 种添加剂对胶体电解质稳定性与电化学性能的影响,利用多种表征手段揭示了不同添加剂的作用机理。鉴于单一添加剂对电池性能的提升十分有限,通过正交试验确定了复合添加剂的优化方案,分析了复合添加剂中各组分对电池内阻的影响,并测试了复合添加剂对胶体电解质和电池性能的影响,最终实现了胶体电池性能的综合提升。

1 材料与方法

1.1 主要药品

十二烷基苯磺酸钠(分析纯):重庆川东化工试剂有限公司;聚乙烯醇(分析纯):天津希恩思生化科技有限公司;聚乙烯吡咯烷酮(分析纯):上海阿拉丁生化科技有限公司;磷酸钠(分析纯):重庆川东化工试剂有限公司;气相二氧化硅(99.8%):上海阿拉丁生化科技有限公司;硫酸(分析纯):重庆川东化工试剂有限公司;高纯铅片(99%):富翔金属材料有限公司;实验用水均为去离子水。

1.2 主要仪器设备

高速剪切分散乳化机:FJ200-SH,上海沪析实业有限公司;电化学工作站:CHI660E,上海辰华仪器有限公司;分析天平:BSA224S,美国赛多利斯科学仪器有限公司;蓄电池综合测试仪: μ C-ZS08,江苏张家港市金帆电源有限公司;磁力搅拌器:84-1,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;高速冷冻离心机:TGL-20 M,长沙湘仪离心机仪器有限公司。

1.3 胶体电解质的制备

将 10 g 气相二氧化硅分散于 190 g 水中,使用高速分散乳化机剪切 25 min,得到胶体母液;将密度为 1.535 g/cm^3 的硫酸置于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温处理 2 h;将 PVAD、SDBS、TSP、PVP 分别制备成不同浓度的溶液。将母液、硫酸以及含有不同添加剂的溶液进行混合,制得含有 4% 气相二氧化硅、38% 硫酸和不同质量分数添加剂的胶体电解质。

1.4 胶体电解质的稳定性测试

取完全凝胶后的胶体电解质 5 mL 装入离心管,称量此时的离心管质量,然后使用离心机将离心管以 $5\ 000 \text{ r/min}$ 转速离心 10 min,将离心管中析出的水倒掉后再次称量离心管的质量,前后两次的质量差即为胶体电解质的析水量,析水量越小说明胶体电解质越稳定^[19]。

1.5 胶体电解质电化学性能测试

在 CHI660E 电化学工作站进行电化学测试,分别以铅片、铂片和 $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_4$ 电极作为工作电极、对电极和参比电极。循环伏安曲线输入电压为开路电压,扫描范围为 $-2 \sim 2 \text{ V}$,扫描速度 0.1 V/s 。电化学阻抗谱在 $100 \sim 1\ 000 \text{ kHz}$ 下进行,初始电压为开路电压。

1.6 电池性能测试

电池性能测试在蓄电池综合测试仪上进行,测试方法参照国家标准《摩托车用铅酸蓄电池》(GB/T 23638—2009),包括电池容量、低温起动能力、充电接收能力和自放电测试。

2 结果与讨论

2.1 含不同添加剂的胶体电解质稳定性

含不同添加剂的胶体电解质析水量如图 1 所示。由图 1 可知,在测试的 4 种添加剂中,PVAD 和 PVP

可以降低胶体电解质的析水量, 增加其稳定性。其它 2 种添加剂会降低胶体的稳定性。此外, 随着 PVAD 与 PVP 质量分数的增加, 胶体电解质的析水量呈现先减小后增大的趋势, 当 PVAD 质量分数为 0.003% 时, 析水量最小, 这表明适量高分子表面活性剂的加入可以抑制胶体电解质老化析水, 但是随着 PVAD 和 PVP 质量分数的增加, 胶体电解质内部的三维网状结构被破坏, 导致胶体稳定性降低。

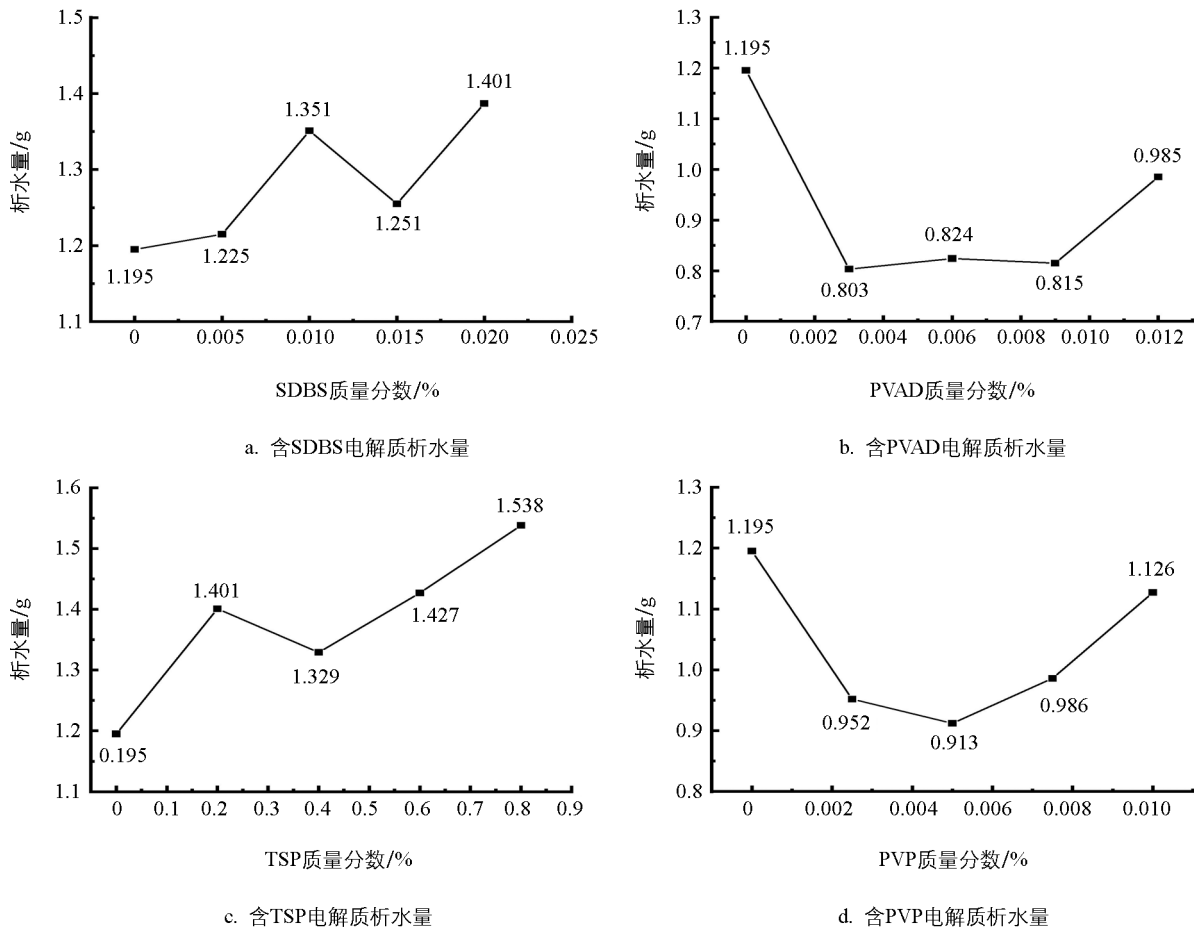


图 1 胶体电解质析水量

2.2 含不同添加剂的胶体电解质电化学性能

2.2.1 循环伏安曲线

铅电极在含不同添加剂的胶体电解质中的循环伏安曲线如图 2 所示。以图 2a 为例, A_1 为析氢过程; A_2 和 A_3 对应不同尺寸的 $PbSO_4$ 还原为 Pb 的负极还原过程; A_4 对应 Pb 氧化为 $PbSO_4$ 的过程; A_5 对应 PbO_2 还原为 $PbSO_4$; A_6 对应 $PbSO_4$ 氧化为 PbO_2 和析氧过程^[20]。

由图 2a 可知, SDBS 可以增加铅电极的氧化还原电流, 当 SDBS 质量分数为 0.010 0% 时, 氧化还原电流达到峰值, 同时铅的氧化与还原电位均发生正移, 说明 SDBS 可以促进铅电极在电解质中的氧化还原过程。由图 2b 可知, PVAD 对铅的氧化电流影响较小, 当 PVAD 质量分数增加到 0.006 0% 时, 铅电极的析氧过电位逐渐增大, 说明适量的 PVAD 可以降低水的消耗, 从而延长胶体电池的使用寿命。由图 2c 可知, TSP 可以增加氧化还原电流, 其质量分数为 0.200 0%~0.600 0% 时, 铅电极的析氢过电位随着质量分数的增大而增大。由图 2d 可知, PVP 能够增加析氢析氧过电位, 随着其质量分数的增加, 铅氧化还原电流也随之增加。

2.2.2 交流阻抗图谱

铅电极在含有不同添加剂胶体电解质中的交流阻抗图谱如图 3 所示。由图 3a 可知, 随着 SDBS 质量分

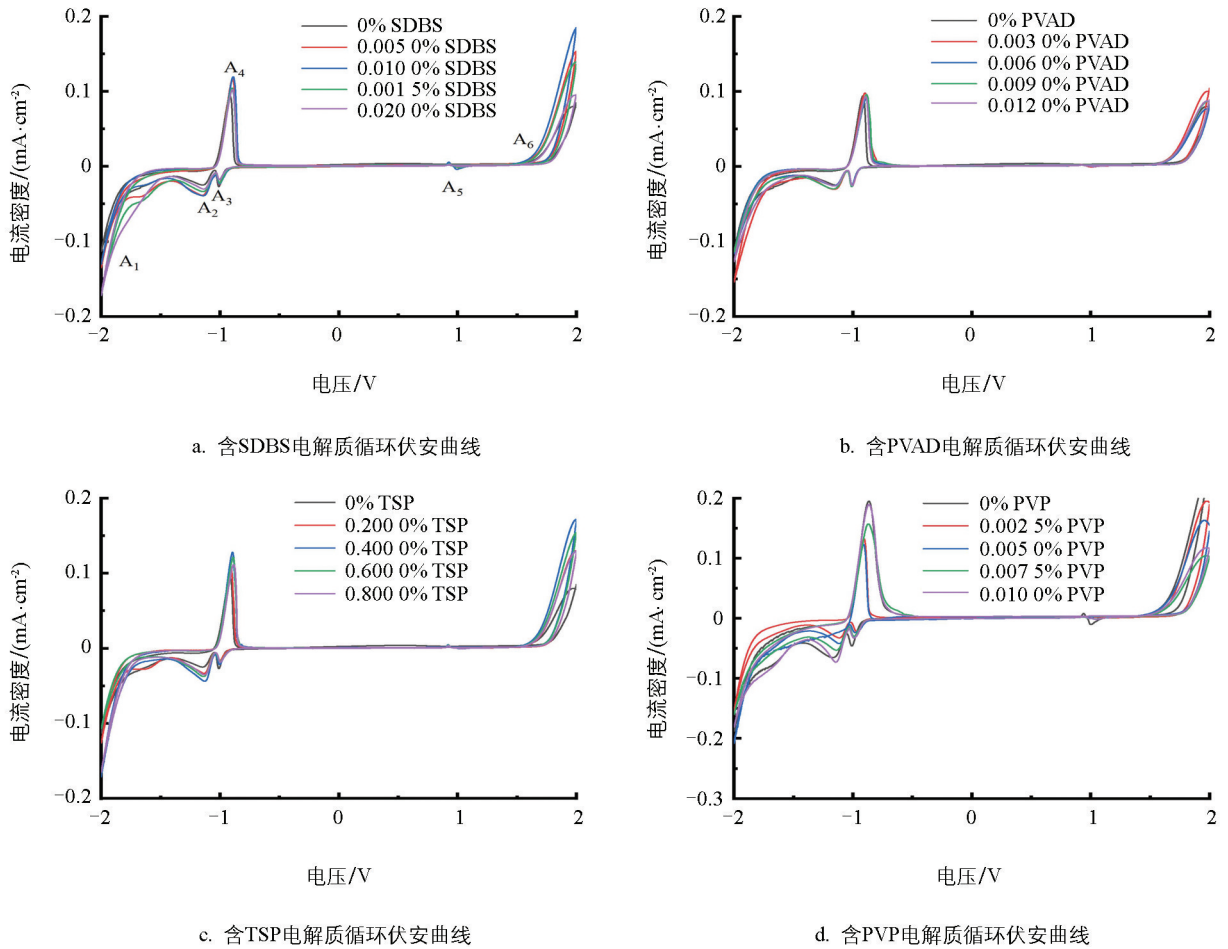


图 2 胶体电解质循环伏安曲线

数的增加, 半圆弧半径逐渐减小, 说明 SDBS 的加入可以降低电化学反应中的电荷转移内阻, 这有益于胶体电池性能的提升。由图 3b 可知, 半圆弧半径随着 PVAD 质量分数的增加先增加后减小, 当 PVAD 质量分数为 0.009 0% 时, 半圆弧半径最小, 此时电荷转移内阻最小。这表明 PVAD 质量分数的增加会使胶体电解质更加粘稠, 导致三维空间结构过于紧密, 从而阻碍了反应过程中的电荷传输, 对电池性能不利。由图 3c 可知, 磷酸钠的加入可以显著降低电荷转移内阻, 当其质量分数大于 0.600 0% 时, 电荷转移内阻变化不大。由图 3d 可以看出, 0.005 0% 的 PVP 可以降低电荷转移内阻。由以上结果可以看出, 在一定质量分数范围内, 4 种添加剂都能降低电荷转移电阻, 提升电池活性物质利用率, 从而提升电池性能。

2.3 复合添加剂正交试验

为实现电池性能的综合提升, 拟向胶体电解质中同时加入上述 4 种添加剂, 根据 2.2 中的实验结果, 考虑添加剂对胶体电解质析水量与电解质内阻的综合影响, 选取适当的添加剂质量分数进行四因素三水平正交试验。表 1 为正交试验因素水平表, 表 2 为正交试验结果。

表 1 正交试验因素水平表

水平	SDBS 质量分数/%	PVAD 质量分数/%	TSP 质量分数/%	PVP 质量分数/%
1	0.010 0	0.003 0	0.200 0	0.002 5
2	0.015 0	0.006 0	0.400 0	0.005 0
3	0.020 0	0.009 0	0.600 0	0.007 5

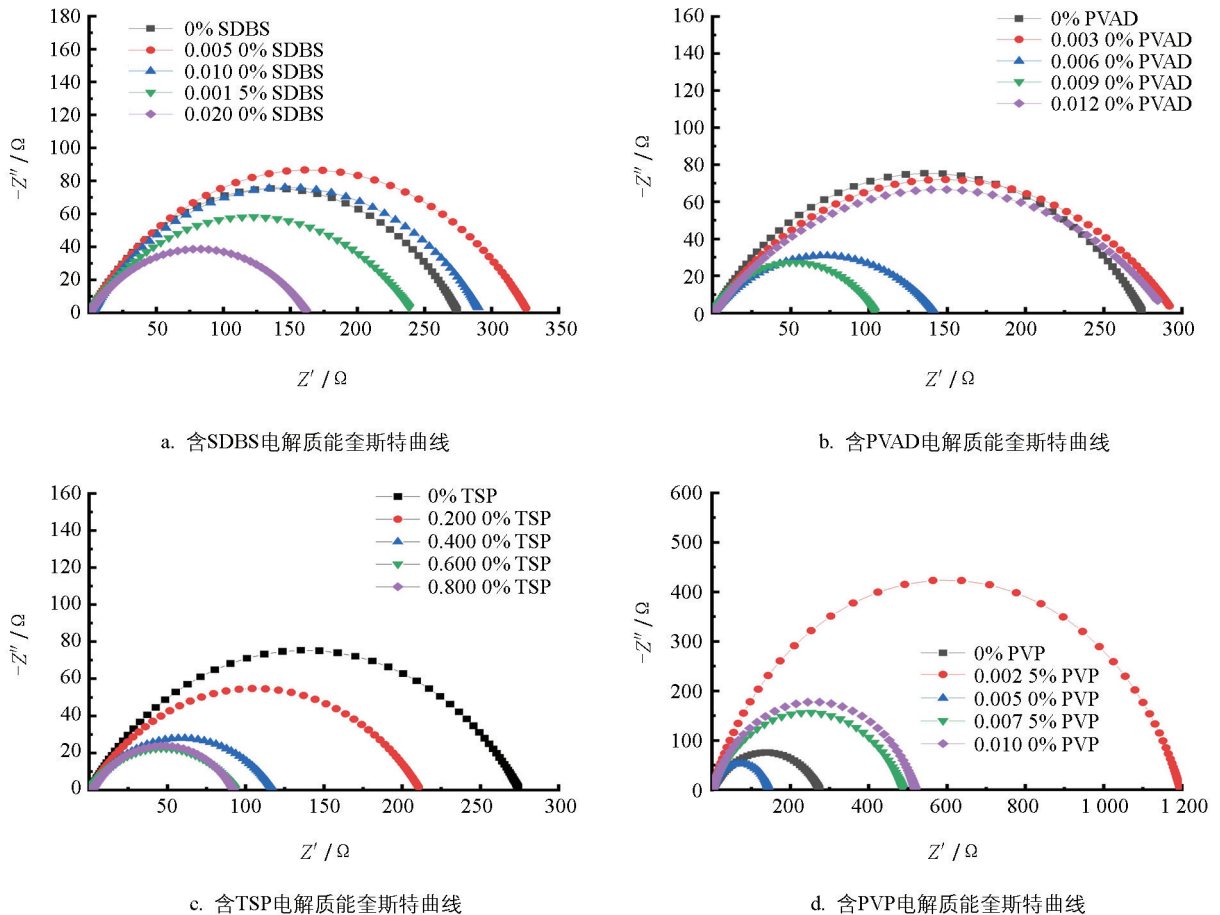


图 3 胶体电解质交流阻抗图谱

总内阻(K)的计算: 某个因素所对应的一个水平和其他因素不同水平组合后进行实验所对应的内阻之和。例如, 将每列所对应水平 1 的内阻相加($0.590\ 2+0.505\ 6+0.578\ 7=1.674\ 5$), 就得到该列的 K_1 值。 K_2 、 K_3 的计算方法与 K_1 类似。平均内阻(k)的计算方法: k_1 、 k_2 、 k_3 分别由 K_1 、 K_2 、 K_3 除以水平等级数(3)得到。例如 $k_1=K_1\div 3=1.674\ 5\div 3=0.558\ 2$ 。极差 R 是每列中 k 值分布的最大间距, 即 $R=k_{\max}-k_{\min}$ ^[21]。

根据极差分析, R 值越大, 说明该因素对指标的影响越大。结果表明, 影响因素作用的大小顺序为 $PVP>PVAD>TSP>SDBS$ 。PVP 是非离子型表面活性剂与水溶性聚合物, 具有优良的溶解性, 可以提高硫酸铅的溶解度, 还能通过分散作用优化胶体电解质凝胶结构, 降低内阻。此外, 其高分子特性可增大胶体电解质三维网络空隙, 促进离子扩散, 进一步降低内阻^[18]。PVAD 与 SDBS 均为表面活性剂, 可以改善凝胶的稳定性与分散性。TSP 能够改善极板与板栅之间的相互作用, 有助于降低电解质内阻。以电解质内阻最小化为目标(k 值越小, 内阻越低), 通过分析各因素 k 值分布, 确定最优组合为: 0.020 0% SDBS、0.006 0% PVAD、0.400 0% TSP、0.002 5% PVP。

2.4 含复合添加剂的胶体电解质电化性能

铅电极在含有复合添加剂胶体电解质中的循环伏安曲线和交流阻抗图谱如图 4 所示。由图 4a 可知, 与不含添加剂的胶体电解质对比, 铅电极在含有复合添加剂的胶体电解质中具有更高的析氢析氧过电位, 说明该胶体电解质能够抑制铅电极的自放电并降低电池的水消耗。由图 4b 可知, 铅电极在含有复合添加剂的胶体电解质中具有更低的电荷转移电阻, 这说明该胶体电解质有利于提升活性物质的利用率, 提升胶体电池性能。

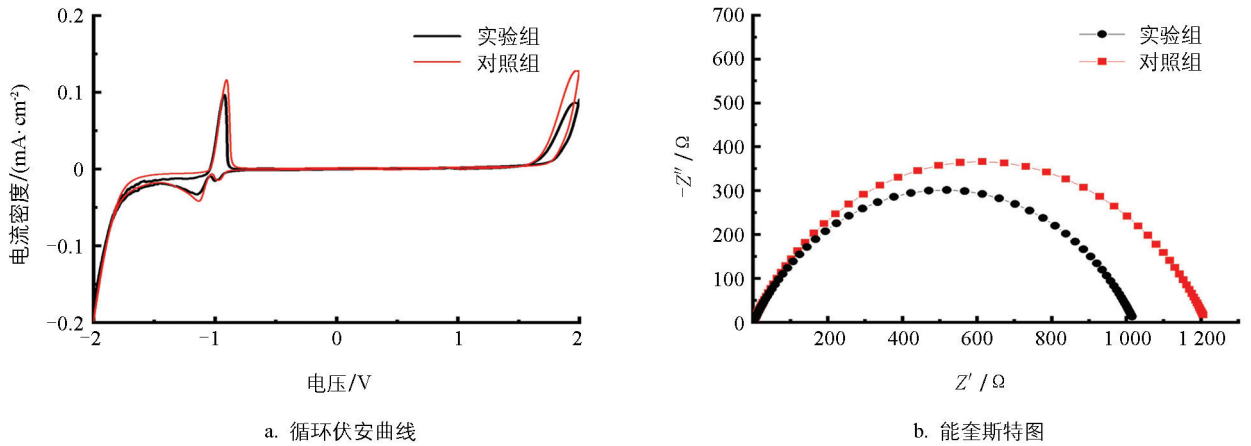


图 4 胶体电解质电化学性能

2.5 含复合添加剂的胶体电池性能

含复合添加剂胶体电池的性能测试结果如图 5 所示。容量与充电接受能力的计算公式分别为：

$$C = I_0 \times t \quad (1)$$

$$\alpha = I_{ca} / I_a \quad (2)$$

式中： I_0 的数值为电池额定容量的 1/10 (0.7 A)； I_a 为放电电流，数值为实际容量的 1/10； I_{ca} 则为放出电池实际容量一半后再对其充电的电流大小。

由图 5 可知，添加复合添加剂后，电池的性能得到了综合提升。容量由 7.49 Ah 提升到 8.06 Ah；低温起动能力提升约 20%；充电接收能力从 3.04 提升到 3.60，6 wk 后电池开路电压仅衰减 0.6%。这说明该复合添加剂能够增加胶体电池的活性物质利用率，缓解因环境温度降低而导致的电池容量下降现象，改善极板硫化，抑制不可逆硫酸铅的形成以及抑制电池自放电，提升电池寿命的优点。

表 2 正交试验结果

序号	SDBS 质量分数/%	PVAD 质量分数/%	TSP 质量分数/%	PVP 质量分数/%	胶体电解质内阻/ Ω
1	0.010 0	0.003 0	0.200 0	0.002 5	0.590 2
2	0.015 0	0.003 0	0.400 0	0.005 0	0.597 8
3	0.020 0	0.003 0	0.600 0	0.007 5	0.587 5
4	0.010 0	0.006 0	0.400 0	0.007 5	0.505 6
5	0.015 0	0.006 0	0.600 0	0.002 5	0.545 0
6	0.020 0	0.006 0	0.200 0	0.005 0	0.537 8
7	0.010 0	0.009 0	0.600 0	0.005 0	0.578 7
8	0.015 0	0.009 0	0.200 0	0.007 5	0.894 8
9	0.020 0	0.009 0	0.400 0	0.002 5	0.518 9
K_1	1.674 5	1.775 5	2.022 8	1.654 1	
K_2	2.037 6	1.588 4	1.622 3	1.714 3	
K_3	1.644 2	1.992 4	1.711 2	1.987 9	
k_1	0.558 2	0.591 8	0.674 2	0.513 7	
k_2	0.679 2	0.529 4	0.540 8	0.571 4	
k_3	0.548 1	0.664 1	0.570 4	0.662 6	
R	0.131 1	0.134 7	0.133 4	0.148 9	

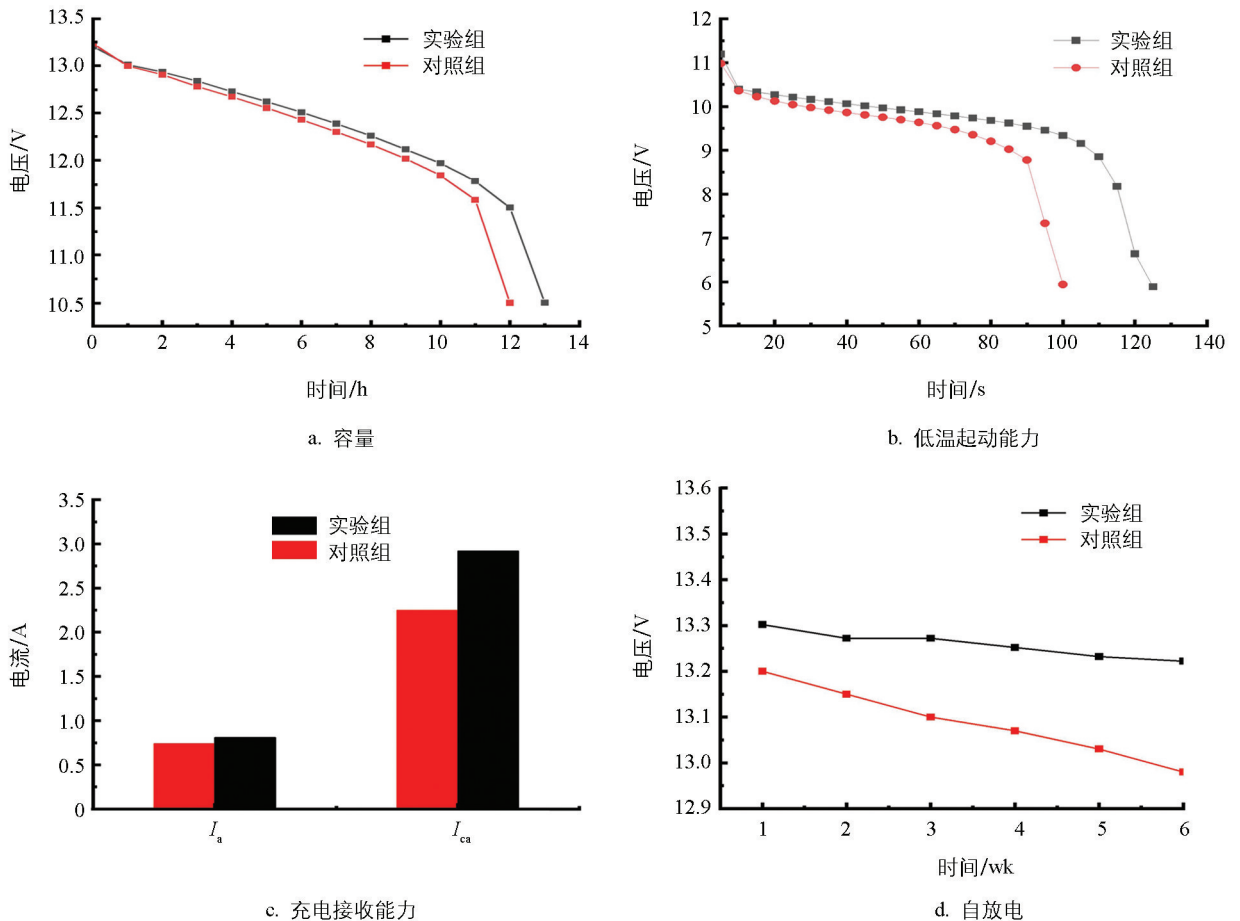


图 5 胶体电池性能

3 结论

本文对含有 4 种添加剂的胶体电解质进行了物理性质与电化学性能测试,发现 PVAD 和 PVP 可以减少胶体电解质的老化析水量,增加胶体电解质的稳定性,其中 PVAD 对增加胶体电解质稳定性效果最好,其质量分数为 0.003 0% 时,胶体电解质最稳定。在一定质量分数范围内,4 种添加剂均能降低铅电极在胶体电解质中的电荷转移内阻,TSP 对内阻降低作用最为显著,其质量分数为 0.600 0% 时,能够最大程度降低电荷转移内阻;4 种添加剂均能改善铅电极在胶体电解质中的氧化还原过程,PVAD、TSP 和 PVP 能通过增加析氢或析氧过电位来降低水消耗。通过正交试验,本文确定了添加剂的最优方案为:0.020 0% SDBS、0.006 0% PVAD、0.400 0% TSP、0.002 5% PVP。此方案可以提高析氢、析氧过电位,降低电化学反应电荷转移电阻。依据该方案制备的胶体电池的容量、低温起动能力与充电接受能力均得到显著提升,同时其自放电性能也得到了很大改善,可满足相关产品对续航和快速充电的需求。优异的低温起动能力可使胶体电池的应用领域更加广泛,而使用寿命的延长增强了其在市场竞争中的优势。综上所述,本文系统分析了 4 种添加剂对电池性能的影响机理,为胶体电池未来的发展提供了重要的理论依据,所开发的复合电解质为提升胶体电池性能、推动电池产业链升级提供了有效的技术方案。

参考文献:

- [1] 赵杰权,张骥小,柳厚田. 浅谈阀控式密封胶体电池技术(二)——胶体电池和 AGM 电池的比较 [J]. 蓄电池, 2016, 53(1): 35-44.

- [2] 尹立兵,李丰,王志文. 电动车用密封式胶体铅酸蓄电池的原理与维护 [J]. 船电技术, 2018, 38(6): 23-25.
- [3] 俞越. 气相二氧化硅和胶体电池 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45(10): 213-214.
- [4] 刁涵,杨晓东,孙言行,等. 储能用管式胶体蓄电池的设计 [J]. 蓄电池, 2023, 60(2): 92-95, 100.
- [5] 吴非. 胶体铅蓄电池的研制与性能优化 [D]. 扬州:扬州大学, 2011.
- [6] 陈巍. 电动车用胶体电解液式铅酸蓄电池研究 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2012.
- [7] 李晓景,林伯连,林齐锦,等. 搅拌速度对起动机型胶体蓄电池超低温性能的影响 [J]. 蓄电池, 2018, 55(2): 78-81.
- [8] 沈浩宇,王鹏伟,成梓铭,等. 胶体电解液分布均匀性对动力电池性能的影响 [J]. 蓄电池, 2016, 53(4): 162-166.
- [9] 霍玉龙,闫娜,王再红,等. 凝胶剂对铅酸蓄电池性能影响的研究 [J]. 蓄电池, 2022, 59(3): 106-109, 147.
- [10] MEISSNER E. Phosphoric Acid as an Electrolyte Additive for Lead/Acid Batteries in Electric-Vehicle Applications [J]. Journal of Power Sources, 1997, 67(1): 135-150.
- [11] BADAWY W A, EL-EGAMY S S. Improvement of the Performance of the Positive Electrode in the Lead/Acid Battery by Addition of Boric Acid [J]. Journal of Power Sources, 1995, 55(1): 11-17.
- [12] DEYAB M A. Hydrogen Evolution Inhibition by L-Serine at the Negative Electrode of a Lead-Acid Battery [J]. RSC Advances, 2015, 5(52): 41365-41371.
- [13] YU J Y, QIAN Z H, ZHAO M, et al. Effects of Sodium Sulfate as Electrolyte Additive on Electrochemical Performance of Lead Electrode [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2013, 29(2): 374-378.
- [14] TANTICHANAKUL T, CHAILAPAKUL O, TANTAVICHET N. Influence of Fumed Silica and Additives on the Gel Formation and Performance of Gel Valve-Regulated Lead-Acid Batteries [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(6): 2085-2091.
- [15] TANTICHANAKUL T, CHAILAPAKUL O, TANTAVICHET N. Gelled Electrolytes for Use in Absorptive Glass Mat Valve-Regulated Lead-Acid (AGM VRLA) Batteries Working under 100% Depth of Discharge Conditions [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(20): 8764-8772.
- [16] WANG S Q, XIA B J, YIN G P, et al. Effects of Additives on the Discharge Behaviour of Positive Electrodes in Lead/Acid Batteries [J]. Journal of Power Sources, 1995, 55(1): 47-52.
- [17] 陈妹琼,张敏,蔡志泉,等. 多元醇对气相二氧化硅胶体电解液电化学性能的影响 [J]. 蓄电池, 2010, 47(2): 58-62.
- [18] 白云. 胶体铅酸蓄电池的电解液研制与灌装工艺研究 [D]. 扬州:扬州大学, 2017.
- [19] 高宏宇. 电解液添加剂对铅酸电池低温性能影响的研究 [D]. 长春:吉林大学, 2020.
- [20] 马运法,林本慧. 含添加剂PVA的胶体铅酸电池电解质性能 [J]. 化工进展, 2014, 33(8): 2023-2026.
- [21] 冯芝娟,肖建斌. 正交实验设计法研究NR/EPDM共混胶性能 [J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(1): 20-23.

责任编辑 孙文静

柳剑