

活性炭对铅酸电池负极活性物质结构与性能的影响

高 军¹ 陈学能¹ 蔡跃宗¹ 黄连清² 林宏名² 杨 勇^{1,✉}

1 厦门大学化学化工学院 厦门 361005

2 福建省闽华电源股份有限公司 泉州 362442

本工作研究了在铅酸电池负极活性物质中添加高比表面积活性炭对其微观结构与性能的影响。模拟电池实验结果发现,添加0.5%的SPC04型活性炭可以使负极1C、5C、10C的放电容量分别提高18.36%、42.68%、44.01%,2C 60 s的放电循环寿命提高1倍。6-FM-9F型实际电池测试结果表明,不仅在部分荷电态高倍率(HRPSoC)充放电条件下电池的循环寿命得到了显著提高,而且在完全充放电下电池的循环寿命也得到了显著提高。负极活性物质的微观结构测试结果表明,活性炭材料的加入可以明显改变其颗粒形貌和孔隙结构,活性炭可以使负极活性物质颗粒及孔隙分布较为均匀,粒径大小适中,增加了活性物质颗粒间有效孔径范围(0.4~3 μm)的占比。

关键词 铅酸电池 负极 活性物质 活性炭

中图分类号: TM912.1 文献标识码: A

The Effects of Active Carbon on the Microstructure and Electrochemical Performance of Negative Electrode Active Material in Lead-acid Batteries

GAO Jun¹, CHEN Xueneng¹, CAI Yuezong¹, HUANG Lianqing², LIN Hongming², YANG Yong^{1,✉}

1 College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005

2 Fujian Minhua Power Source Co., Ltd, Quanzhou 362442

The effects of active carbon with high specific surface area on the microstructure and electrochemical properties of the negative electrode active material of lead-acid battery were studied. The results show that the addition of 0.5% SPC04 type active carbon into negative electrode is able to increase the discharge capacity of the negative electrode at 1C, 5C and 10C rates by 18.36%, 42.68% and 44.01%, and the discharge cycle life of the negative electrode at 2C 60 s is doubled. The test results of 6-FM-9F type battery show that not only under high-rate partial-state-of-charge (HRPSoC) conditions, but also under full-charge and full-discharge conditions the cycle life has been significantly improved. Through the analysis of the microstructure of active material, it is believed that the addition of active carbon can significantly change the particle morphology and pore structure. The addition of active carbon can make the particles and pore distribution of the negative electrode more uniform, the size of the particle is moderate, and the ratio of the effective aperture range (about 0.4~3 μm) between the particles of the active material is increased.

Key words lead-acid battery, negative electrode, active material, active carbon

0 引言

铅酸电池技术成熟、成本低廉,且在高温性能、组合一致性、回收再利用性、安全可靠等方面具有优势,是目前化学电源市场中份额最大、使用范围最广的一种电池产品。铅酸电池被广泛应用于交通(汽车、摩托车、电动自行车、火车、船舶、航空)、电力、通信、医院、银行、军工等各个领域,在国民经济中发挥着重要作用。随着新技术的发展,铅酸电池须具备更长的循环使用寿命、更高的比能量、更优异的快速充电性能等,以适应新形势的发展。

在铅酸电池负极活性物质中适量添加碳材料,有利于提高电池在部分荷电态高倍率(HRPSoC)下的循环寿命^[1-3]。不同的碳材料以及不同的加入量会给负极带来不同的影响,而且差异较大。研究人员为研制适用于铅酸电池的碳材料做了大量工作^[4-6]。一般认为高比表面积的碳材料构建了负极的多孔结构^[7-10],有利于反应的进行,进而提高了铅活性物质的利用率。高电导率的碳材料还可以增强负极的导电性,减小活性物质间的孔径,抑制硫酸铅晶体的长大,有效地保护负极板,即抑制了硫酸盐化现象,从而延长了电池的循环寿命^[10-12]。

本工作将高比表面积和高电导率的活性炭材料掺入铅

酸电池负极活性物质中,拟通过活性炭的加入调节电极活性物质间的孔隙结构,发挥高比表面积碳材料在铅基活性物质中的“缓冲器”作用,从而提高电池性能。

1 实验

1.1 电池制备

实验模拟电池的制备:负极铅膏中除加入含量为0.2%的碳黑外,分别制备加入0.5%的不同活性炭材料(福建产SPC03和SPC04型,江西产D103型)的电极,同时制备不加活性炭的参照电极,分别标记为D103、SPC03、SPC04和Ref。和膏过程中,将各添加剂(涤纶短纤维、硫酸钡、腐植酸)与铅粉干混后,再依次加水、硫酸溶液(密度为1.4 g/cm³)进行和膏,经固化(湿度99%、温度65℃、30 h)和干燥(65℃、24 h)后,再经化成工艺制成极板。采用2片正极1片负极(外型尺寸为67 mm×44 mm×1.9 mm,额定容量为2 Ah)的配比,板栅为Pb-Ca-Sn合金,极板间加玻璃纤维隔板(厚度2.0 mm),加注1.28 g/cm³的硫酸,制成富液敞口式实验电池。

实际样品电池的制备:6-FM-9F型电池(12V 9Ah)由福建省闽华电源股份有限公司生产线制备。单格极板配组5正6负(极板型号E1.8+/BB2-),板栅为Pb-Ca-Sn合金。负极铅膏中加入0.15%乙炔碳黑与0.1%石墨,另加0.5%的

SPC04 型活性炭(福建产)。同时制备不加活性炭的同型号普通电池。

1.2 实验仪器

(1) 活性炭材料测试:采用 Winner2008 型激光粒度分析仪(济南产)测试材料的粒径分布。采用 FT-300 型电阻率测试仪(宁波瑞柯)测试材料的电导率(四探针法)。采用 TRISTAR 3020 型物理吸附仪(美国产)测试材料的比表面积(氮气静态吸附法)等。

(2) 负极活性物质表征:采用 S-4800 型扫描电子显微镜(SEM,日本 Hitachi 产)观察活性炭材料与负极活性物质的微观形貌。采用 Ultima IV 型 X 射线衍射仪(日本 Rigaku 产)对材料进行物相分析,扫描速度为 20 (°)/min, Cu 靶、扫描步长 0.0167°、管流 30 mA、管压 40 kV。采用水银孔隙率法

测定活性物质的孔隙率和孔隙尺寸分布,仪器为 AutoPore IV 9510 型全自动压汞仪(美国麦克产)。

(3) 实验用极板的制备与测试:实验室采用 RM300SA 型行星式重力搅拌机(绵阳世诺产)进行搅拌与和膏;采用 CT-3008W-5V30A 型电池测试仪(深圳新威尔产)进行极板化成与 2 V 单体实验电池的充放电性能测试。

(4) 实际样品电池测试:采用 CT-4008-20V30A-NA 型电池测试仪(深圳新威尔产)测试 12 V 电池的充放电性能。

2 结果与讨论

2.1 活性炭材料

由三种实验用活性炭的主要参数(表 1)可知,它们均具有较高的比表面积和高电导率,除 D103 的电导率略高于其他

表 1 实验用活性炭的主要参数

Table 1 The main parameters of active carbon used in this experiment

Active carbon model	BET surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Electrical conductivity/($\text{S} \cdot \text{mm}^{-1}$)	Pore volume/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	Ash content/%
D103	1 539	0.36	0.4—0.5	0.45
SPC03	1 661	0.24	0.4—0.5	0.44
SPC04	1 485	0.25	0.4—0.6	0.41

两种活性炭外,其余参数相差并不大。

由活性炭的粒径分布测试结果(图 1)可知,三种活性炭的粒径按照 SPC03、SPC04、D103 的顺序依次减小。SPC04 型活性炭的粒径大小适中,19 μm 以下的颗粒所占体积比达到了 90%。

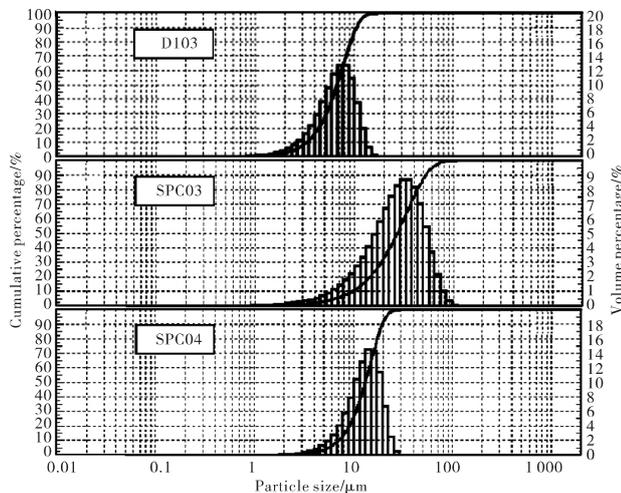


图 1 不同活性炭材料粒径分布图

Fig. 1 The particle size distribution diagram of different active carbon materials

如图 2 所示,扫描电镜(SEM)照片也证实 D103 型活性炭的颗粒尺寸最小,在形貌上与 SPC03 和 SPC04 型活性炭存在明显差异。而 D103 型活性炭更容易团聚,这可能导致其在活性物质中较难分散,从而影响电池的性能。这一点将在后续的性能测试中得到证实。

2.2 极板性能测试与表征分析

2.2.1 不同倍率放电容量性能比较

对实验电池进行不同倍率放电容量性能测试的具体方

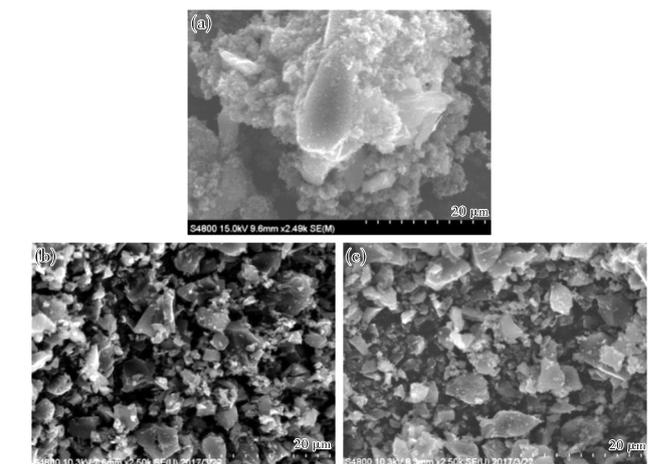


图 2 活性炭的 SEM 照片:(a) D103;(b) SPC03;(c) SPC04

Fig. 2 SEM images of active carbon: (a) D103; (b) SPC03; (c) SPC04

法如下:充电采用恒流 C/3 (0.67 A) 充电至 2.5 V,再以 2.5 V 恒压充电 5 h;放电时依次按 1C (2 A)、5C (10 A)、10C (20 A) 恒流放电至 1.7 V、1 V、0.5 V 截止,各倍率放电循环测试 10 次。负极放电的比容量($\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$)以测试得到的放电容量除以电极加入的活性物质(铅粉)质量计算得出。

测试结果表明(如图 3 所示),负极活性物质中添加 0.5% 的活性炭材料,电池在不同倍率下的放电容量均有明显提高。在 1C 电流放电时,添加 D103、SPC03、SPC04 型活性炭的电池与未添加活性炭的电池相比,容量分别提高了 7.22%、16.66%、18.36%;在 5C 电流放电时,容量分别提高了 17.90%、26.16%、42.68%;在 10C 电流放电时,容量分别提高了 19.65%、30.33%、44.01%。可见高倍率放电条件下,活性物质容量提高幅度更明显,其中以添加 SPC04 型活性炭电极的放电容量最高。

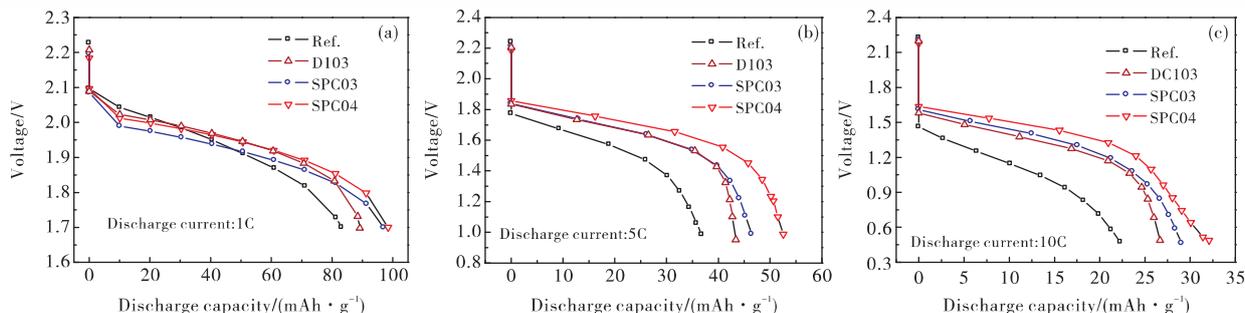


图3 负极添加0.5%不同活性炭的电池在不同倍率(1C、5C、10C)下的放电性能比较
 Fig. 3 Comparison of discharge performance of batteries with negative electrode adding 0.5% active carbon

2.2.2 部分荷电态下2C 60 s充放电性能比较

对实验电池进行部分荷电态下2C 60 s循环性能测试,即考查HRPSoC下的快速充放电性能。具体方法是先将满充电的实验电池以1C(2 A)恒流放电30 min,即电池处于50% SoC(部分荷电态),然后进行以下循环测试:2C恒流限压(2.5 V)充电90 s,搁置10 s后,再恒流2C放电60 s,循环至放电电压降至1.7 V终止测试。

测试结果表明(如图4所示),与普通参照极板相比,添加0.5%活性炭的3种负极在部分荷电态下2C 60 s快速放电循环寿命均有明显的提高。不同活性炭材料在性能上差异较大。其中,SPC04表现出最好的循环性能,循环次数超过12 000次,约为未添加活性炭的普通极板的2倍。

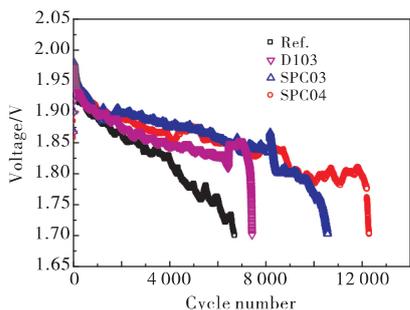


图4 负极添加0.5%不同活性炭材料的电池在HRPSoC下2C 60 s快速放电循环性能比较(电子版为彩图)
 Fig. 4 Comparison of 2C 60 s fast discharge cycle performance of batteries with negative electrode adding 0.5% active carbon under HRPSoC

2.2.3 活性物质表征分析

(1) 活性物质 XRD 分析

XRD 测试结果表明(如图5所示),添加活性炭对负极活性物质的晶型结构基本没有影响。活性物质主要成分为Pb和少量的残留PbO。

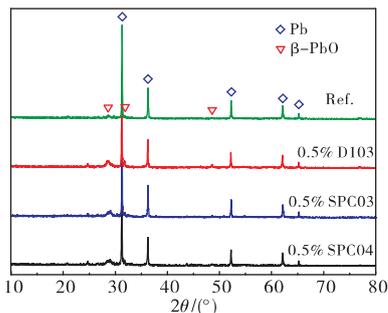


图5 不同负极活性物质的XRD谱
 Fig. 5 XRD patterns of different negative electrode active materials

(2) SEM 测试

铅酸电池负极活性物质的主要成分为海绵状金属铅,如图6a、c、e和g所示,活性物质的形貌差异较小,均为多孔结构。但从图6b、d、f和h更小倍率的SEM照片上看,加入不同活性炭的活性物质整体形貌差异较大,尤其是孔隙结构。SPC04极板活性物质及孔隙分布较为均匀,大小适宜且丰富的孔隙结构为放电时活性物质的体积增大(20℃下Pb的摩尔体积为18.27 cm³/mol, PbSO₄为48.21 cm³/mol,即理论上铅被氧化成硫酸铅时晶粒体积会增大约2.6倍)提供了有效的空间,有利于形成稳定的骨架结构,同时保证了电解液进出孔隙与活性物质反应的通道。这应该是SPC04极板能够得

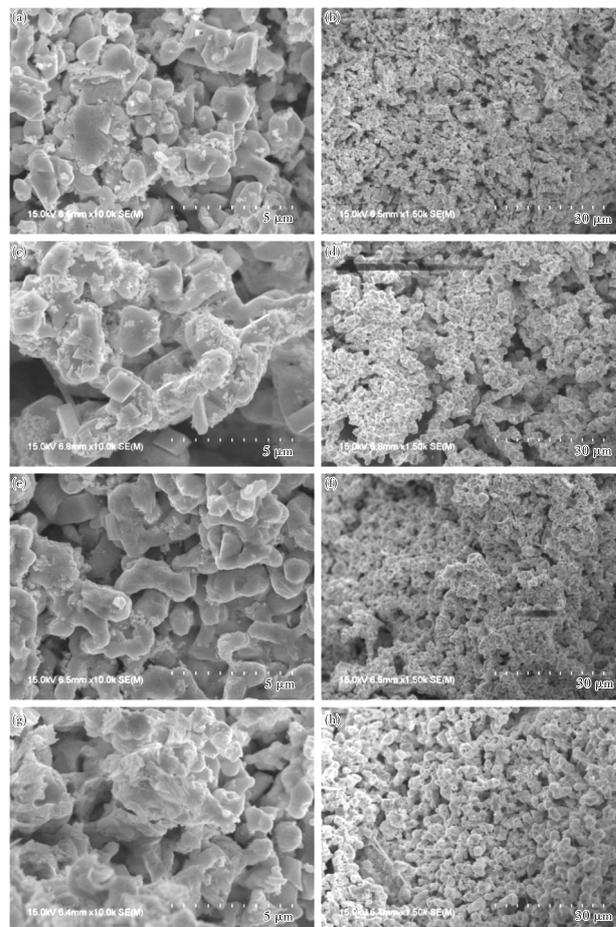


图6 不同负极活性物质的SEM照片:(a,b) Ref.;(c,d) D103;(e,f) SPC03;(g,h) SPC04
 Fig. 6 SEM images of active materials with different negative plates:(a,b) Ref.;(c,d) D103;(e,f) SPC03;(g,h) SPC04

到较好性能的主要原因。

铅酸电池在放电态时, 负极活性物质由铅氧化为硫酸铅。虽然添加活性炭对负极(充电态) 活性物质颗粒形貌没有较大影响, 但放电态却有较大不同。由 SEM 测试结果(图 7) 可见, 与加入活性炭的活性物质相比, 未加活性炭的负极活性物质粘连, 硫酸铅的晶体结构不规则, 而加入活性炭材料的 3 种极板呈现出规则的硫酸铅晶体结构, 并且 SPC03 的颗粒较大, SPC04 的颗粒大小适中。

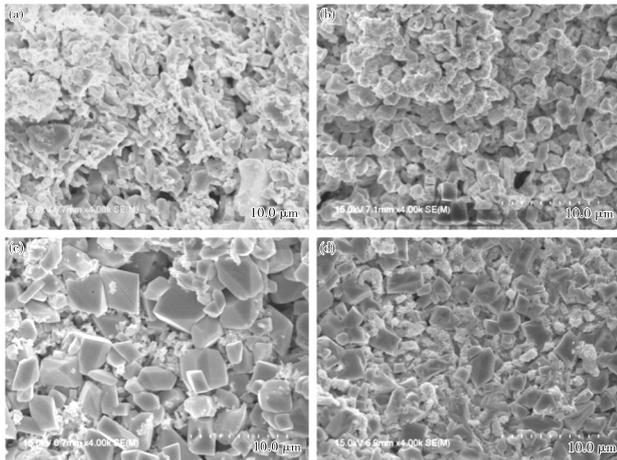


图 7 不同负极放电态的活性物质的 SEM 照片: (a) Ref.; (b) D103; (c) SPC03; (d) SPC04

Fig. 7 SEM images of active materials with different negative plates in discharge state: (a) Ref.; (b) D103; (c) SPC03; (d) SPC04

因此, 在铅酸电池负极中适当添加高比表面积、高电导率的活性炭材料能够显著提高电池的性能。不同的活性炭对电池的影响存在很大差异。选择不易团聚、粒径大小适中的活性炭可以取得更好的效果。

(3) 活性物质孔隙参数的测定与分析

为了进一步验证活性物质孔隙的差异, 采用压汞法对活性物质的具体孔隙参数进行测定。结果(表 2) 表明, 加入活性炭可以调整极板活性物质的孔隙率、表观密度、孔径等参数, 使得其平均孔径明显降低, 而总孔容变化不大, 说明未添加活性炭的极板大孔占比较多, 通过添加活性炭增加了较小孔径的孔的数量。这对极板的性能起到了积极的影响。

据此推测, 极板总的孔隙率参数不是最重要的, 最重要的是得到大小适宜的孔及提高有效孔的孔隙率比例。SPC04 的总孔容相对最小, 证明了该极板活性物质中大的无效孔较少。从不同孔径参数分布情况比较(图 8) 可以看出, 活性炭的加入明显提高了孔径为 0.4~3 μm 的孔的占比(孔隙率), 因此相应提高了电池性能。前文中关于实验电池测试的性能(见 2.2.1 和 2.2.2 部分) 优劣排序为 SPC04>SPC03>D103>Ref. 这与孔径 1~2 μm 的孔的占比呈线性关系。据此认为, 活性物质间最佳的孔径范围为 1~2 μm。

分析认为, 性能良好的极板中活性物质的颗粒及孔隙分布较为均匀, 粒径大小适中, 且具有丰富的孔隙结构, 因此可为充放电时活性物质的体积变化提供有效的伸缩空间, 有利于稳定材料的骨架结构。同时, 保证了电解液进出孔隙与活性物质反应的通道, 孔隙也可成为 H₂SO₄ 分子的“储液器”, 能够提供大量反应时需要的 H⁺ 和 HSO₄⁻, 进而有利于电化

反应的进行, 尤其是高倍率条件下离子的传输。

表 2 活性物质孔隙参数测定结果

Table 2 Determination of pore parameters of active materials

Plate	Porosity %	Apparent density g · mL ⁻¹	Average pore diameter/nm	Total intrusion volume/(cm ³ · g ⁻¹)
Ref.	22.2	4.783	4711.1	0.0598
D103	24.8	4.899	2702.1	0.0673
SPC03	17.2	3.270	2061.5	0.0635
SPC04	19.5	4.700	2695.3	0.0516

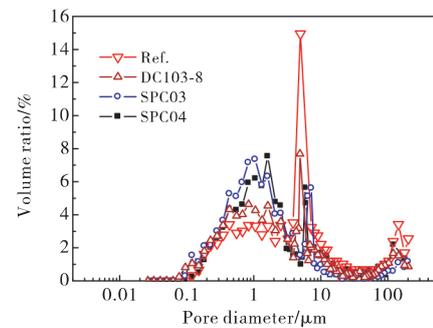


图 8 不同负极活性物质孔隙分布情况比较

Fig. 8 Comparison of pore distribution of active materials with different negative plates

2.3 电池性能测试

选择性能最优的 SPC04 型活性炭制备批量的 6-FM-9F 型样品电池(标记为 QT-SPC04), 添加比例为相对铅粉质量含量的 0.5%。同时制备未添加活性炭的参照电池(标记为 US-REF), 并抽样进行性能测试。

2.3.1 电池放电容量性能比较

电池的测试温度保持在(25±5) °C 之间, 每种电池各取 3 只分别测试 2HR 容量(3.5 A 电流放电至 10.5 V) 和 10HR 容量(0.9 A 电流放电至 10.8 V)。

由测试结果(表 3) 可知, 两种电池的放电容量差别不大。普通参照电池 2HR 和 10HR 平均放电容量分别为 6.75 Ah 和 8.07 Ah, 添加活性炭的电池则分别为 6.67 Ah 和 8.05 Ah。两种电池放电容量相近的原因主要是电池采用了单格 5 正 6 负的正极限容方案, 此时负极添加活性炭对电池容量的影响很小。

表 3 电池放电容量数据比较

Table 3 Comparison of discharge capacity of batteries

Battery type	2HR discharge capacity/mAh			10HR discharge capacity/mAh		
	Battery 1	Battery 2	Battery 3	Battery 1	Battery 2	Battery 3
US-REF	6756.8	6736.4	6762.3	7934.0	8155.3	8113.6
QT-SPC04	6735.3	6673.6	6588.6	7996.0	8136.4	8016.5

2.3.2 完全充放电循环性能比较

电池完全充放电循环性能测试方法为: 以 3.5 A 恒电流充电(限压 15.0 V), 以 7.0 A 电流放电至 10.5 V, 循环测试充放电过程至放电容量小于 3 Ah 结束。

测试结果(图 9) 表明, 同种工艺条件下, 添加 0.5% SPC04 型活性炭的电池(QT-SPC04) 的完全充放电循环性能(377 次) 明显高于普通电池(122 次), 其循环寿命是普通电池循环寿命的 3 倍多。

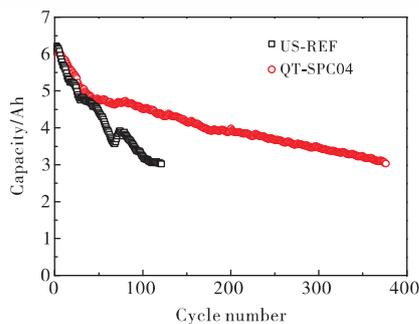


图9 电池完全充放电循环性能比较
Fig. 9 Performance comparison of battery under full-charge and full-discharge conditions

理论上,由于碳的析氢过电位比铅低,在电池充电后期会加速析氢反应,加剧电池电解液失水(电池减重);同时析出气体的冲刷作用会造成活性物质结合力的下降,导致电池性能衰退。本工作通过电池称重法判断电池失水、析氢状况。表4给出了两种电池循环至寿命终止时的重量减少情况。在完全充放电循环过程中,就失水速率而言,长循环寿命的QT-SPC04电池的失水速率小于普通电池,证明负极添加0.5% SPC04型活性炭的电池在充电过程中没有出现大量析氢,从而未导致电池过多失水现象的发生。可见,通过在负极中加入活性炭调整了活性物质的孔隙结构,显著改善了电极动力学过程,抑制了负极的硫酸盐化,而并没有增加析氢等副反应过程,因而能够显著延长电池的寿命。

表4 完全充放电循环过程中电池减重数据比较
Table 4 Comparison of batteries weight reduction under full-charge and full-discharge conditions

Battery type	Cycle number	Weight loss/g	Every hundred times weight loss (Water loss rate) /g
US-REF	122	4.2	3.44
QT-SPC04	377	5.0	1.33

2.3.3 按照欧洲汽车研发委员会混合动力车标准测试循环性能

按照欧洲汽车研发委员会(EUCAR)规定的混合动力车用电池测试方法^[13-14],测试电池的循环性能。具体方法为:将充满电的电池用2HR电流放电至60% SoC(即用3.0 A放电48 min),再按照如图10所示的具体程序进行循环测试,当以 $5C_2$ (30 A)电流放电至电压低于6 V时结束测试。

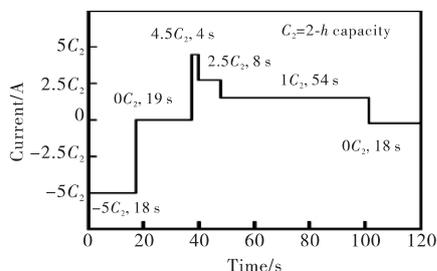


图10 EUCAR 循环寿命测试程序示意图
Fig. 10 Schematic diagram of EUCAR cycle life test program

测试结果(图11)表明,QT-SPC04电池寿命是普通参照电池的2倍多,负极添加活性炭可以显著延长电池在HRP-SoC下的充放电循环寿命。这是由于活性炭改善了负极活性

物质的孔隙结构,有利于硫酸电解液在极板中的储存与分散,就近提供反应所需电解液。同时,活性炭形成第二相分隔硫酸铅晶体,有利于形成更小的硫酸铅晶粒,抑制不可逆硫酸盐化。

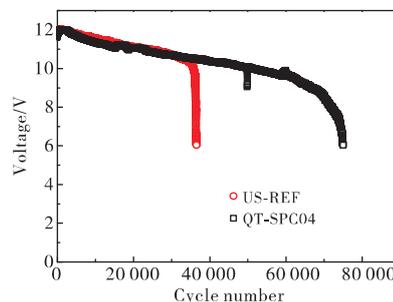


图11 按照EUCAR方法测试电池循环性能比较(电子版为彩图)
Fig. 11 Comparison of batteries cycle performance under EUCAR

3 结论

(1) 选择不易团聚、粒径大小适中的活性炭添加到铅酸电池负极中,能够显著提高电池的性能。活性炭的加入可以明显改变活性物质的颗粒形貌,性能良好的极板中活性物质的颗粒及孔隙分布较为均匀,可为充放电时活性物质的体积变化提供有效的伸缩空间,有利于稳定材料的骨架结构,同时保证了电解液进出孔隙与活性物质反应的通道。

(2) 添加活性炭可增加活性物质颗粒间的孔径在 $0.4 \sim 3 \mu\text{m}$ 的较小孔的占比。推测孔径为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的孔的占比对提高电池的倍率性能起到至关重要的作用。

(3) 添加0.5%的SPC04型活性炭不仅能够提高电池HRPSoC下的循环寿命,而且在完全充放电下电池的循环寿命也得到了显著提高(是普通电池寿命的3倍多)。负极添加活性炭的电池并没有表现出比普通电池多失水的现象,原因是活性炭可改善负极活性物质的孔隙结构,提高了负极充电接受能力,显著改善了负极的电极动力学过程。

参考文献

- Long Q Y, Ma G Z, Xu Q Q, et al. *Journal of Power Sources*, 2017, 343, 188.
- Zhao L, Chen B S, Wu J Z, et al. *Journal of Power Sources*, 2014, 248, 1.
- Boden D P, Loosemore D V, Spence M A, et al. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(14), 4470.
- Zhang W L, Yin J, Lin Z Q, et al. *Journal of Power Sources*, 2017, 342, 183.
- Xiang J Y, Hu C, Chen L Y, et al. *Journal of Power Sources*, 2016, 328, 8.
- Xue H T, Jiang L X, Li Z H, et al. *Battery Bimonthly*, 2015, 45(4), 202 (in Chinese).
薛海涛, 蒋良兴, 黎朝晖, 等. *电池*, 2015, 45(4), 202.
- Kong D L, Hu C, Wang H, et al. *Battery Bimonthly*, 2017, 47(5), 281 (in Chinese).
孙德龙, 胡晨, 汪浩, 等. *电池*, 2017, 47(5), 281.
- Moseley P T, Rand D A, Peters K. *Journal of Power Sources*, 2015, 295, 268.
- Hong B, Jiang L X, Xue H T, et al. *Journal of Power Sources*, 2014, 270, 332.
- Xiang J Y, Ding P, Zhang H, et al. *Journal of Power Sources*, 2013, 241, 150.
- Saravanan M, Ganesan M, Ambalavanan S. *Journal of Power Sources*,

- 2014, 251, 20.
- 12 Chen D, Liu H, Xiang J Y, et al. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017 41(10), 1441 (in Chinese).
- 陈冬, 刘皓, 相佳媛, 等. *电源技术*, 2017 41(10), 1441.
- 13 Lam L T, Louey R, Haigh N P, et al. *Journal of Power Sources*, 2007,

- 174, 16.
- 14 Furukawa J, Takada T, Monma D, et al. *Journal of Power Sources*, 2010, 195, 1241.

(责任编辑 向秀洮)



Jun Gao received his B. E. degree in applied chemistry from the Northeast University of Technology in Aug. 1992, and received his Ph. D. degree in applied chemistry from the Harbin Institute of Technology (HIT) in Dec. 2005. He has published more than 30 journal papers, applied 10 national invention patents and 5 of them were authorized. His research interests are electrochemical power source and its related materials.

高军 厦门大学高级工程师。1992年8月,在东北工学院获得应用化学专业学士学位,2005年12月,在哈尔滨工业大学获得应用化学专业博士学位。在国内外学术期刊上发表论文30余篇,申请国家发明专利10项,其中授权5项。现主要从事化学电源及其相关材料的研究工作。曾经参与完成的研发项目包括:国家科技部“973”项目、国家自然科学基金、国防973和国防预研项目,以及福建省的科技计划项目等。



Yong Yang obtained his Ph. D. in physical chemistry from Xiamen University in 1992 with two years in-split PhD study in UK. Except for a one-year (1997—1998) academic visit at Oxford University, he has been working in the State Key Laboratory for Physical Chemistry of Solid Surface at Xiamen University since 1992. Now he is a distinguished professor in Chemistry and Director of Research Institute of Electrochemistry and Electrochemical Engineering over there. His main

research interests are new electrode/electrolyte materials for Li/Na-ion batteries, in-situ spectroscopic techniques, and reaction mechanism study in electrochemical energy storage and conversion system. He has published over 200

papers in national/international journals such as *Nature Energy*, *Energy & Environmental Science*, *Advanced Materials* and *Chem. Mater.*, etc. with citation more than 6 000. He is also one of the editors for *Journal of Power Sources*. He has obtained several national/international research awards, e. g. Contribution award given by Chinese Electrochemical Society in 2017, Technology Award given by IBA (International Battery Materials Association) in 2014.

杨勇 厦门大学闽江计划特聘教授,厦门大学电化学科学与工程研究所所长。英国牛津大学访问科学家。主要研究方向为能源电化学、材料物理化学及表面物理化学。曾荣获中国化学会电化学贡献奖(2017)、国际电池材料协会(IBA)技术成就奖(2014)、国家杰出青年科学基金获得者(1999)、人事部“新世纪百千万人才工程”国家级人选(2004)、并荣获国务院政府特殊津贴(2006),现担任国际知名电池杂志 *Journal of Power Sources* 主编、国际锂电池会议(IMLB)执委会委员与特种化学电源国家重点实验室学术委员会委员等学术兼职,同时长期担任国家军用电池专家组的专家。研究团队近年来对多种新型锂离子电池材料的合成、结构、表面修饰及其电化学性能进行了深入系统的研究,同时建立并运用多种原位电化学谱学技术(如电化学微分质谱、电化学同步辐射联用技术和固体核磁共振谱)对相关电极过程开展创新性研究。先后承担包括国家973、国防973、重点研发专项及其基金委重点项目在内的科研项目40余项。主编出版《固态电化学》专著1本(2017,化学工业出版社)。已在国内外学术期刊上正式发表论文300余篇,引用6000余次。申报中国发明专利等40余项,其中已获授权20项。培养毕业博士后/博士/硕士70余人。现在学博士后/博士/硕士研究生30余人。