

基于风冷散热的锂电池热管理数值模拟研究

时天禄, 安周建, 刘在伦

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 圆柱形锂离子电池布置方式和热物性参数对电池的热特性及安全性具有重要影响。首先建立了 18650 型 LiFePO_4 单体电池产热模型以及电池组散热模型, 分析了排布方式、电池间距等电池模块几何参数以及径向导热系数等热物性参数对电池模块散热特性的影响。结果表明, 电池的间距越大, 其平均温度越低, 温差越小, 散热效果越好; 单就冷却效果而言, 叉排排布结构最优, 综合考虑电池模块的能量密度和冷却效果, 六边形排布结构最优; 径向导热系数由 $0.2174 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $1.7174 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时, 电池最高温度由 306.15 K 降低到 302.90 K , 减小了 3.25 K , 电池模块温度分布更加均匀。研究为基于风冷的锂离子电池组热管理系统结构的设计和优化提供了重要参考。

关键词: 锂离子电池; 风冷散热; 优化设计

中图分类号: TM 912.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-087X(2021)07-0885-05

DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2021.07.015

Research on numerical simulation of lithium-ion battery thermal management based on air-cooling

SHI Tianlu, AN Zhoujian, LIU Zailun

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: The configuration and thermos-physical parameters of cylindrical lithium-ion battery have a significant influence on its thermal characteristics and safety. This paper established heat generation model for single 18650 LiFePO_4 battery firstly and then the battery module heat dissipation model was also developed. The effect of geometric parameters of battery module such as the arrangement and battery spacing, and thermal physical parameters on the heat dissipation characteristics of battery module were analyzed. The results show that the average temperature, the temperature difference and cooling effect of batteries decrease with the increase of battery space, were also improved. The staggered arrangement is the optimal structure as far as the cooling effect only. However, the hexagonal configuration shows an excellent compressive performance when the energy density of battery module is considered. When the thermal conductivity in radial direction increases from $0.2174 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to $1.7174 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, the maximum temperature of battery decreases from 306.15 K to 302.90 K , which shows a 3.25 K reduction, and the temperature distribution in battery module becomes more uniform. This research provides an important reference for the design and optimization of air based thermal management system for battery module.

Key words: lithium-ion battery; air-cooling; optimal design

锂离子电池因其能量密度和功率密度高、使用寿命长、自放电低、污染少等优良性能, 近些年来得到了广泛应用^[1]。然而在电池充放电过程中, 由于其内部电化学反应速率和温度的相关性, 导致局部温度过高或过低, 造成单体电池内部不同电芯单元及电池模块中不同电池单体之间的温度以及放电不平衡现象, 在散热不良条件下甚至容易引发电池热失控而产生安全事故^[2-4]。因此, 保证电池处于最佳运行温度区间, 同时提高其温度均匀性至关重要。

以空气为介质的锂离子电池冷却技术, 是目前工程应用较为广泛的电池冷却技术^[5]。姜贵文等^[6]对圆柱形锂离子电池进行了传热分析, 发现电池的最高温度随底部换热系数或

侧面换热系数的增大而减小, 增大侧面换热系数, 更能提高电池的散热效果。Mohammadian 等^[7]开展了基于方形锂离子电池的风冷散热研究, 发现将铝制针状翅片插入气流通道可以同时实现电池单元内部温度降低以及温度分布均匀性提升的双重目标。Wei T 等^[8]开发了一种热-电化学模型, 考虑了包括电池间隔、电池排列方式和反转频率等因素, 研究分析了不同强制空气冷却条件下的电池热性能。

国内外学者对以空气为介质的电池冷却技术的研究主要集中在电池模块中风道结构、风量以及送风路径对冷却系统性能的影响。然而, 在数值模拟计算时, 极大部分文献都未考虑电池内部的导热系数各向异性特征对电池散热的影响, 而在改善电池模块结构设计时也未能够将电池模块的能量密度这一关键参数纳入考虑范围。本文首先建立了 18650 型 LiFePO_4 单体电池产热模型以及电池组散热模型, 分析了排布方式、电池间距等电池模块几何参数以及径向导热系数

收稿日期: 2020-12-06

作者简介: 时天禄(1993—), 男, 宁夏回族自治区人, 硕士研究生, 主要研究方向为锂电池热管理技术。

等热物性参数对电池组散热特性的影响。

1 模型建立

1.1 锂离子电池模型建立

基于风冷散热的锂离子电池模块包含24个单体电池,单体电池采用18650型LiFePO₄电池,其参数为:直径18 mm,高度65 mm,标称容量2.2 Ah,标称电压3.6 V,质量44.79 g。排布结构方式如图1(a)~(d)所示,(a)为电池模块冷却结构的三维模型图,(b)、(c)和(d)分别为电池顺排排布、叉排排布和六边形排布结构的俯视图。三种排布结构中,进口与第一列电池距离为50 mm,为了防止回流对仿真结果的影响,出口与第六列电池距离为100 mm。电池模块的左侧整个侧面均设置为空气进口,右侧整个侧面设置为空气出口。每种排布结构相邻电池之间的距离分别设置为2、4、6和8 mm。其中顺排和叉排排布采用4×6方式,即电池模块共4排,每排6个单体电池。

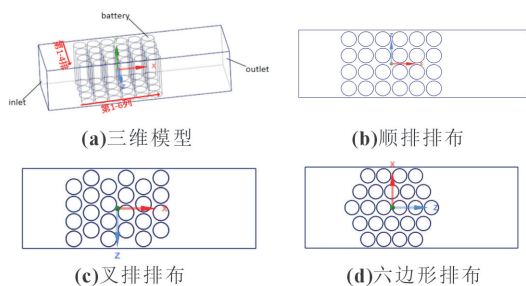


图1 电池模块排布结构方式

1.2 控制方程

由于锂离子电池实际产热情况比较复杂,在建立锂离子电池三维热数学模型时,假设18650电池的各种性能参数为定值,电池内部产热均匀,电池导热系数各向异性 and 同一方向导热系数恒定,且电池内部的对流传热和辐射散热忽略不计,基于该假设锂离子电池三维瞬态传热微分方程可描述为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (1)$$

式中: ρ 为电池密度(kg/m³); c 为电池比热容[J/(kg·K)]; T 为电池温度(K); t 为时间(s); λ 为电池导热系数[W/(m·K)]; Q 为电池内部单位体积的产热速率(W/m³)。

根据Bernardi理论^[9],电池产热速率计算公式为:

$$Q = \frac{I}{V} \left(U_0 - U - T \frac{dU_0}{dT} \right) \quad (2)$$

式中: U_0 为电池开路电压(V); U 为电池工作电压(V); I 为电池工作电流(A); V 为电池体积(m³); dU_0/dT 为熵热系数,本文取值为-0.3 mV/K^[10]。

式(2)中的(U_0-U)可用放电电流和欧姆内阻乘积表示。因此式(2)可以简化为:

$$Q = \frac{I}{V} \left(IR - T \frac{dU_0}{dT} \right) \quad (3)$$

式中: R 为电池内阻(Ω)。本文将所研究的锂离子电池内阻视为恒温常量,取值28.55 m Ω ^[11]。将已知参数代入式(3)得到 Q 的表达式为:

$$Q = 0.02855 I^2 + 0.0003 IT \quad (4)$$

1.3 仿真设置

本文考虑锂离子电池以2 C倍率进行放电,放电电流为

4.4 A的情况下,由式(4)计算可得产热速率为57 239.31 W/m³。经查阅文献[11],本文采用的18650型LiFePO₄电池热物性参数为:电池密度2 707.9 kg/m³,比热容1 242.38 J/(kg·K),径向导热系数1.217 4 W/(m·K),轴向和周向导热系数14.15 W/(m·K)。冷却介质空气的物性参数为:密度1.225 kg/m³,比热容1 006 J/(kg·K),导热系数0.024 2 W/(m·K)。

模型中冷却通道入口边界条件设置为速度入口,入口冷却空气初始温度设置为25℃,入口速度为3 m/s;出口边界条件设置为压力出口,表压0 Pa。当进口风速为3 m/s时,计算得到该模型的雷诺数 $Re=5\ 056$,选择 $k-\epsilon$ 湍流模型计算仿真,在FLUENT中瞬态仿真,求解器选用SIMPLE算法。

1.4 模型验证

为了验证仿真模型的准确性,本文选择单体18650型LiFePO₄电池作为研究对象,在放电倍率为2 C,放电电流为4.4 A,环境温度为25℃,产热速率为57 210 W/m³,对流换热系数为10 W/(m²·K)情况下,对单体锂离子电池进行仿真分析其温度场。从图2可以看出单体锂离子电池在2 C放电结束时,电池的最高温度和最低温度分别为42.21和41.41℃,与文献[11]在相同参数条件下,模拟单体锂离子电池温度场所得到的最高温度42.3℃和最低温度41.5℃相差均为0.09℃,差距小于0.1℃。基于该对比验证结果,可沿用该模型做进一步的仿真分析。

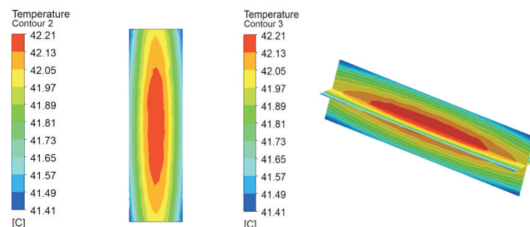


图2 单体电池温度分布云图

2 仿真结果与讨论

2.1 电池性能指标

本文中评估电池模块不同排布结构的性能时,采用电池模块中的最高温度、最低温度、电池之间的最大温差、电池的平均温度以及电池模块能量密度作为性能指标。单体电池最高温度及单体电池间的最大温差值越小,意味着冷却效果越好。电池模块能量密度是电池包单位体积内所储存能量的度量,其计算方法为:

$$\rho_{\text{energy}} = \frac{24 \times 3.6 \times 2.2}{H \times L \times W} \quad (5)$$

式中: H 为电池模块的长度(m); L 为电池模块的高度(m); W 为电池模块的宽度(m)。

2.2 排布结构的影响

图3~图5所示分别为放电结束时,不同电池间距时电池顺排、叉排和六边形排布结构中电池温度分布图。如图所示,每种排布结构下的温度变化趋势一致,从进风口至出风口,电池表面温度逐渐升高。电池间距较小(4 mm)时,顺排、叉排和六边形排布的电池最高温度依次为303.10、302.81和302.94 K;电池间距较大(6 mm)时,顺排、叉排和六边形排布的电池最高温度依次为303.02、302.56和302.84 K。由此可见,不管是顺排、叉排还是六边形排布,随着电池间距增大,

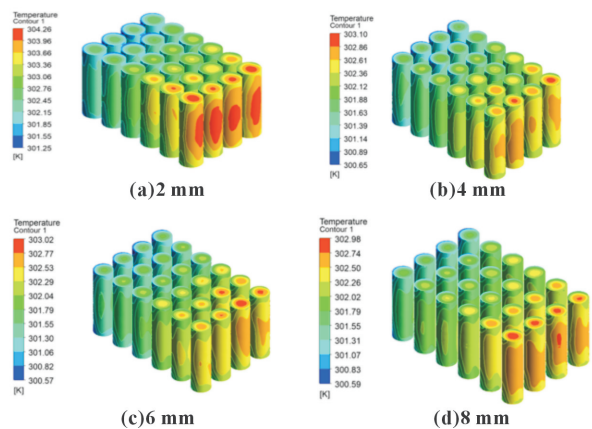


图3 顺排排布结构电池温度分布

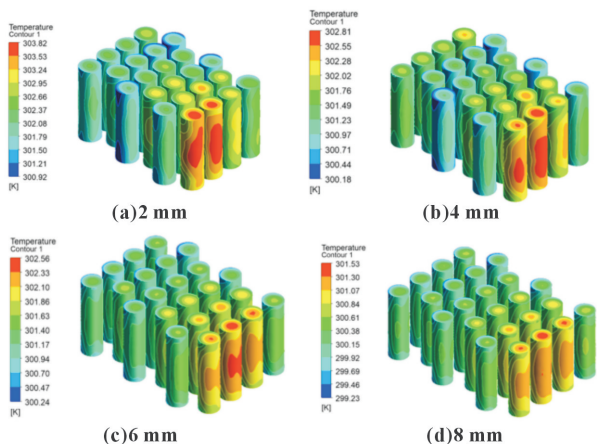


图4 叉排排布结构电池温度分布

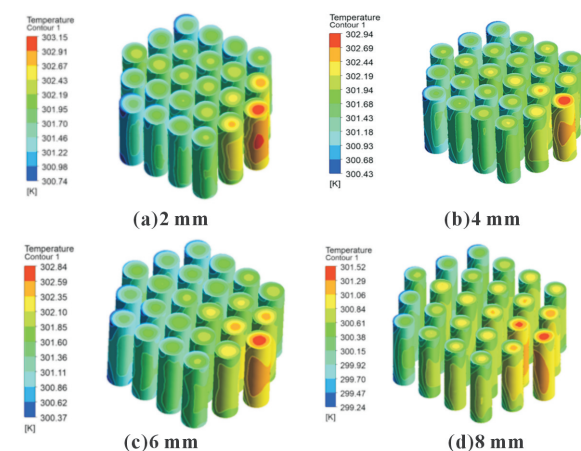


图5 六边形排布结构电池温度分布

其温度均降低;电池间距大小一致时,顺排排布的最高温度高于六边形和叉排排布,叉排排布方案的散热效果优于六边形和顺排排布,散热效果最优。

图6所示为12种不同排布结构的电池平均温度随时间的变化情况,12种方案的电池平均温度高低排序为: $T_{S2\text{mm}} > T_{C2\text{mm}} > T_{L2\text{mm}} > T_{S4\text{mm}} > T_{S6\text{mm}} > T_{S8\text{mm}} > T_{L4\text{mm}} > T_{L6\text{mm}} > T_{C4\text{mm}} > T_{C6\text{mm}} > T_{L8\text{mm}} > T_{C8\text{mm}}$ (下角标S代表顺排,C代表叉排,L代表六边形)。电池模块顺排且相邻两个单体电池之间为2 mm时,电池平均温度始终高于其他排布结构,平均温度的最大值可达到302.25 K。图7和图8分别为电池最高温度和最低温度随时间的变化情况。在三种排布结构中,随着电池间距增加,电

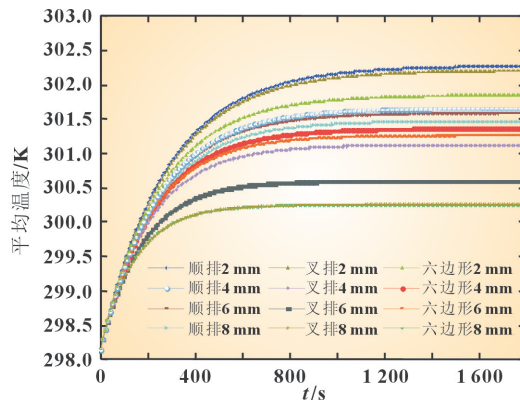


图6 平均温度随时间变化图

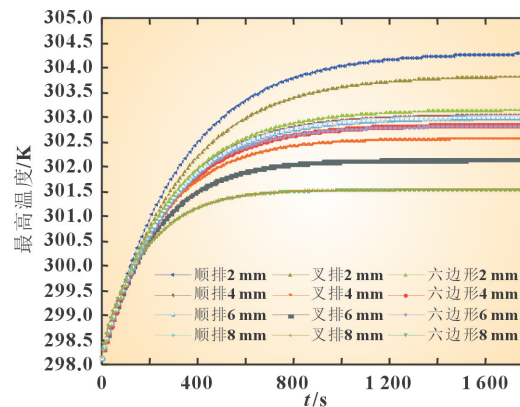


图7 最高温度随时间变化图

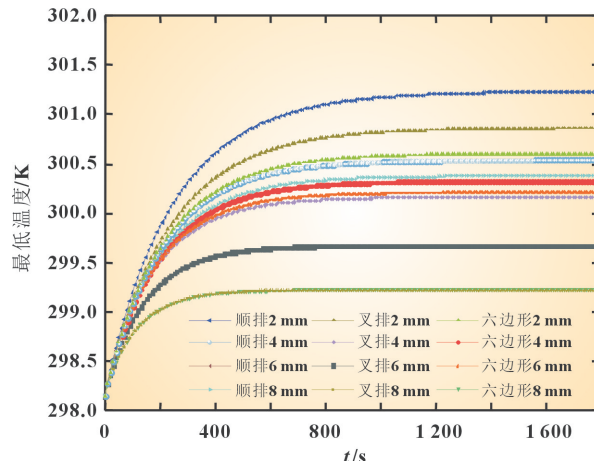


图8 最低温度随时间变化图

池最高温度和最低温度均逐渐降低,电池放电结束时,电池顺排间距2 mm时最高温度和最低温度的最大值为304.26和301.25 K,该排布结构的最高和最低温度在所有排布结构中最高。电池间距为8 mm时,顺排、叉排和六边形三种排布结构的最高温度和最低温度最大值依次分别为302.98和300.59 K、301.53和299.23 K以及301.52和299.24 K。间距相同时,顺排排布结构电池的最高温度和最低温度均高于叉排和六边形排布。此外,由图可知,在放电至300 s左右,电池模块的温升速率最快。

由表1电池工作过程中不同排布结构温差变化情况对比可以看出,顺排间距为2 mm的排布结构最大温差值最大,六边形间距8 mm的排布结构最大温差值最小,电池温度分布均匀程度最高。

表 1 不同排布结构下温度变化情况

排布方式	电池间距/mm	最高温度/K	最低温度/K	温差/K
竖排	2	304.26	301.25	3.01
	4	303.10	300.65	2.45
	6	303.02	300.57	2.45
	8	302.98	300.59	2.39
叉排	2	303.82	300.92	2.90
	4	302.81	300.18	2.63
	6	302.56	300.24	2.32
	8	301.53	299.23	2.30
六边形	2	303.15	300.74	2.41
	4	302.94	300.43	2.51
	6	302.84	300.37	2.47
	8	301.52	299.24	2.28

2.3 电池模块的能量密度分析

从电池冷却效果的角度来分析,排布形式的改变有效降低了电池最高温度以及最大温差,而同时电池模块排布形式的改变,尤其是电池间距的增大将导致电池模块能量密度降低,对以锂离子电池为动力源的新能源汽车而言将严重降低其续航里程。因此,锂离子电池模块冷却结构的设计必须考虑能量密度这一关键因素^[12]。表 2 所示为不同排布结构下电池模块的能量密度。从表 2 可见每种排布结构下的能量密度变化趋势一致,即随着电池间距的逐渐增大,电池能量密度逐渐降低。电池间距为 2 mm 时,顺排方案的电池能量密度为 317.72 kWh/m³,占单体电池能量密度的 66.32%,叉排排布结构能量密度最低,为单体电池能量密度的 58.78%,六边形排布结构能量密度居中,为单体电池能量密度的 63.56%。电池间距为 8 mm 时,叉排排布结构的电池能量密度为 181.28 kWh/m³,仅占单体电池能量密度的 37.84%,顺排排布结构能量密度占单体电池能量密度的 42.96%,六边形排布结构能量密度占单体电池能量密度的 41.01%。

表 2 不同排布结构下电池模块密度分析

排布方式	电池间距/mm	电池模块能量密度/(kWh·m ⁻³)	单体电池能量密度/(kWh·m ⁻³)	电池模块与单体电池能量密度的比值/%
顺排	2	317.72	479.07	66.32
	4	271.97	479.07	56.77
	6	235.45	479.07	49.15
	8	205.82	479.07	42.96
叉排	2	281.62	479.07	58.78
	4	240.49	479.07	50.20
	6	207.75	479.07	43.37
	8	181.28	479.07	37.84
六边形	2	304.49	479.07	63.56
	4	260.27	479.07	54.33
	6	225.02	479.07	46.97
	8	196.47	479.07	41.01

电池间距为 4 mm 时,叉排排布结构的最高温度为 302.81 K,六边形排布的最高温度为 302.94 K,温差为 0.13 K,而该间距下,叉排排布下的电池能量密度占单体电池能量密度的 50.20%,六边形排布下的电池能量密度占单体电池能量密度的 54.33%,其能量密度增加了 4.13%。因此,对于纯电动汽车等放电倍率相对较低的电池模块,可选用六边形的电池排布结构,满足其能量密度和冷却效果的双重需求。

2.4 径向导热系数的影响

径向导热系数是影响电池模块热管理性能的又一重要因素,Drake SJ 等^[13]通过研究测量,得到了 18650 电池径向导

热系数可低至 0.15~0.20 W/(m·K)。Keil 等^[14]通过使用热阻抗谱和红外传感器,获得了 18650 电池的径向导热系数在 3.10~3.60 W/(m·K)之间。在探讨径向导热系数的影响时选取 18650 六边形排布结构的电池模块为研究对象。当径向导热系数从 0.217 4 W/(m·K)增加到 1.717 4 W/(m·K)时,电池模块温度随时间的变化趋势如图 9 所示。由图可知,在单体电池轴向和周向导热系数一定时,随径向导热系数的增加,电池模块的最高温度逐渐降低,在径向系数为 0.217 4 W/(m·K)时,电池模块的最高温度为 306.15 K,最低温度为 299.73 K,最大温差达到了 6.42 K;当径向导热系数为 1.717 4 W/(m·K)时,电池模块中的最高温度和最低温度分别为 302.90 和 299.94 K,温差为 2.96 K,整个电池模块温度分布得更加均匀。可见,电池热导率各向异性特征越明显,电池模块温度分布均匀性越差。

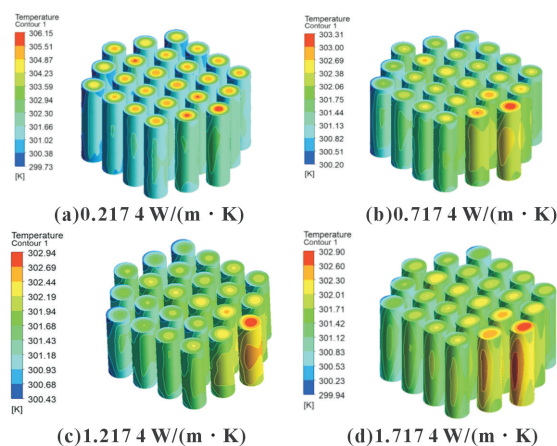


图 9 不同径向导热系数电池温度分布图

3 结论

圆柱形锂离子电池布置方式、电池间距以及热物性参数等对电池的热特性及安全性具有重要影响,综合本文针对该问题进行了研究,得出的主要结论如下:

- (1) 电池模块的散热效果主要取决于各单体电池间的距离,间距较大时,电池最大温度越低,温差越小,散热效果越好;
- (2) 单就冷却效果而言,叉排排布结构是最优选择;综合考虑电池模块的能量密度、冷却效果和整体电池温度分布均匀程度,六边形排布结构具有最佳的冷却效果;
- (3) 当单体电池轴向以及周向导热系数一定时,随径向导热系数的增加,电池的最高温度和单体电池间温差均逐渐降低,使电池模块温度分布得更加均匀。

参考文献:

- [1] AN Z J, JIA L, DING Y, et al. A review on lithium-ion power battery thermal management technologies and thermal safety[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(5): 391-412.
- [2] 张天时, 宋东鉴, 高青, 等 电动汽车动力电池液体冷却系统构建及其工作过程仿真[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(2): 387-397.
- [3] REDDY T. Linden's Handbook of Batteries[M]. New York: MC Graw-Hill, 2011.
- [4] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 377-382.
- [5] CHEN D, JIANG J, KIM G H, et al. Comparison of different

- cooling methods for lithium ion battery cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94:846-854.
- [6] 姜贵文, 黄菊花, 庄玲, 等. 圆柱形动力锂电池传热分析及升温特性[J]. 南昌大学学报(理科版), 2018, 42(5): 431-435.
- [7] MOHAMMADIAN S K, ZHANG Y. Cumulative effects of using pin fin heat sink and porous metal foam on thermal management of lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2017: 375-384.
- [8] TONG W, SOMASUNDARAM K, BIRGERSSON E, et al. Thermo-electrochemical model for forced convection air cooling of a lithium-ion battery module[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 672-682.
- [9] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy-balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1):5-12.

- [10] SRINIVASAN V, WANG C Y. Analysis of electrochemical and thermal behavior of Li-ion cells[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2003, 150(1):A 98-A 106.
- [11] 邵艳涛. 电动汽车用锂离子电池风冷散热结构研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017: 30-45.
- [12] 安周建. 基于流动沸腾的 LiFePO_4 电池冷却及热安全研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 48-49.
- [13] DRAKE S J, WETZ D A, OSTANEK J K, et al. Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 252:298-304.
- [14] KEIL P, RUMPF K, JOSSEN A. Thermal impedance spectroscopy for Li-ion batteries with an IR temperature sensor system[J]. World Electric Vehicle Journal, 2013,6:581-591.

(上接第856页)

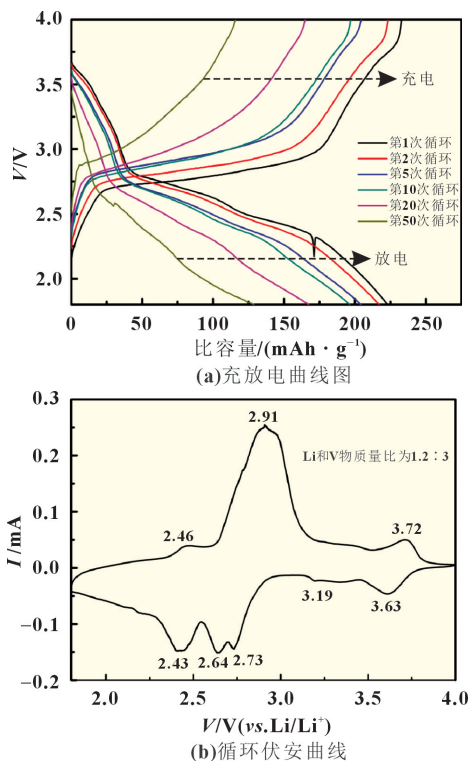


图7 最优条件下制备的 LiV_3O_8 材料的充放电曲线图和循环伏安曲线平衡电荷的作用,对于 LiV_3O_8 材料的结构起到稳定作用,在充放电循环过程不应脱出。因此,在氧化还原过程中,3.72 V 的氧化峰和 3.63 V 的还原峰本不应该出现,这是由于该氧化峰对应于锂离子从 LiV_3O_8 结构中的八面体位点脱出。因此 3.72 V 的氧化峰说明 LiV_3O_8 材料中尽管锂元素是该材料结构锂元素,而非用于充放电循环的锂离子,但是锂离子可以有一部分在该电位从材料中脱出,有可能对材料的结构稳定性有一定影响。

图8是在 Li 和 V 的物质的量比分别为 1.15:3 和 1.2:3 时最优煅烧条件下制备的 LiV_3O_8 材料的电化学阻抗(EIS)曲线。从图中可以看出,所制备 LiV_3O_8 材料的阻抗均较低。Li 和 V 的物质的量比为 1.2:3 时所制备 LiV_3O_8 材料的 SEI 膜迁移电阻(R_{sf})和电荷转移电阻(R_{ct})总和约为 180 Ω , Li 和 V 的物质的量比为 1.15:3 时所制备 LiV_3O_8 材料的阻抗和约为 195 Ω 。

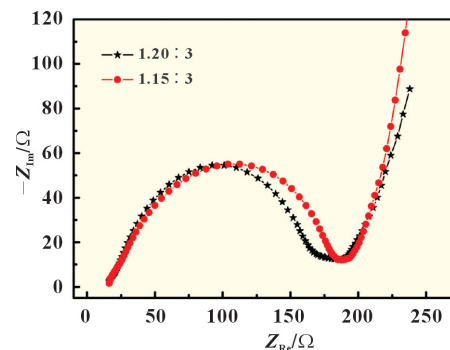


图8 LiV_3O_8 材料电化学阻抗(EIS)曲线
(图中比值为 Li 和 V 物质的量比)

3 结论

本实验以水热-煅烧结合法成功制备了锂离子电池正极材料 LiV_3O_8 , 主要对煅烧温度、煅烧时间、Li 和 V 物质的量比对所制备的 LiV_3O_8 晶型和纯度的影响进行了考察。结果表明水热煅烧结合法制备 LiV_3O_8 材料最优煅烧条件为 400 $^{\circ}\text{C}$ 3 h, 最优 Li 和 V 物质的量比为 1.2:3。该材料具有较高的比容量。

参考文献:

- [1] 邱亚丽. 锂离子电池正极材料 LiFePO_4 的软化学法合成及其电化学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [2] 王海燕. 新型高性能钒酸盐电极材料的制备及锂离子脱嵌机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [3] 潘安强. 钒-基纳米材料或纳米复合材料用作锂电池正极的性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [4] BAE K Y, JUNG Y H, CHO S H, et al. Design and analysis of an optimal cathode for Li- LiV_3O_8 secondary cells[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 704-711.
- [5] SONG H, LIU Y, ZHANG C, et al. Mo-doped LiV_3O_8 nanorod-assembled nanosheets as a high performance cathode material for lithium ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3: 3547-3558.
- [6] 王高军, 苏光耀, 李朝晖, 等. $\text{Li}_{1-x}\text{V}_3\text{O}_8$ 的中热固相法合成及其电化学性能[J]. 电源技术, 2005, 29(6): 349-352.
- [7] SARKAR S, BANDA H, MITRA S. High capacity lithium-ion battery cathode using LiV_3O_8 nanorods[J]. Electrochimica Acta, 2013, 99: 242-252.
- [8] PAN A, ZHANG J, CAO G, et al. Nanosheet-structured LiV_3O_8 with high capacity and excellent stability for high energy lithium batteries[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21: 10077-10084.