

动力型磷酸铁锂电池关键性能与 电解液锂盐浓度的关系

张励

(福建巨电新能源股份有限公司 研发技术部, 福建 南平 354299)

摘要 磷酸铁锂电池在动力领域受到广泛的关注, 因为极片孔隙率低、厚度厚, 电解液中锂盐浓度对电池各关键性能的影响更为显著。本文利用不同锂盐浓度电解液制备高能量密度磷酸铁锂电池, 并考察了容量、内阻、倍率、高低温、循环性能。实验表明, 1.1~1.2 mol/L 的锂盐浓度电解液制备电池, 有低温放电性能好、倍率放电性能高、5 C 放电倍率循环容量保持率高的优势, 而 0.9~1.0 mol/L 的锂盐浓度电解液制备的电池, 内阻低、1 C 充放电循环性能好、高温性能稍优、经济效益高, 可用于对循环性能及成本的要求高的电池。

关键词 锂离子电池; 高能量密度; 动力电池; 锂盐浓度; 电解液

[中图分类号] TQ

[文献标识码] A

[文章编号] 1007-1865(2022)03-0015-03

The Relationship between the Key Performances of Power Lithium Iron Phosphate Battery and the Lithium Salt Concentration of Electrolyte

Zhang Mai

(R&D Technology Department Fujian super power new energy Co., Ltd., Nanping 354299, China)

Abstract: Lithium iron phosphate batteries have attracted extensive attention in the field of electric vehicles. Because of the low porosity and high thickness of the electrode, the lithium salt concentration in the electrolyte has more significant impacts on the key performances of the battery. In this paper, the high energy density lithium iron phosphate battery was prepared by using different salt concentration electrolyte, and the capacity, resistance, rate capability, high-low temperature performance, cycle capacity retention were investigated. The results show that batteries prepared by the electrolyte with 1.1~1.2 mol/L salt concentration has the advantages of high discharge capacity retention under low temperature or high rate, and good cycle performance when using 5 C discharge, while the batteries prepared with 0.9~1.0 mol/L lithium salt concentration electrolyte have the advantages of low resistance, good 1 C charge-discharge cycle performance, slightly better high temperature performance and high economic benefit. The electrolyte with 0.9~1.0 mol/L lithium salt concentration can be used in batteries which are required high cycle performance and cost.

Keywords: lithium ion battery; high energy density; power battery; lithium salt concentration; electrolyte

1 背景

在动力锂离子电池领域, 能量密度一直是电池的核心性能。为了提升动力系统的续航能力, 同时降低载重量以减少能量损失, 必须持续提升电池能量密度以满足市场需求。然而, 电池能量密度的提升对电池的安全性能带来巨大挑战, 同时市场广泛应用的三元电池成本一直居高不下^[1]。人们对基于锂金属电极及固态电解质的电池寄予厚望, 但如何实现产业化依旧是一个较大的挑战, 基于此, 近年来磷酸铁锂电池以其安全性高及材料成本低的优势, 在动力领域逐渐受到更为广泛的研究和关注^[2-3]。

为了提升磷酸铁锂电池的能量密度, 电池的结构设计及材料的开发优化一直是研发工作的重点。对于正极磷酸铁锂, 研究者们制备了高压实密度的磷酸铁锂。通过湿法球磨结合喷雾干燥, Liu 等人设计了核壳结构的 LiFePO_4/C 材料, 该材料不仅有高压实密度, 且低温性能也得到改善^[4]。Shen 等人采用铁粉作为原材料得到低成本高振实密度的 LiFePO_4/C 材料^[5]。元素掺杂也是提高磷酸铁锂振实密度与导电性的重要手段之一^[6]。对于负极方面, 提高石墨的振实密度是提高能量密度的重要手段之一^[7]。特殊的极片制造工艺, 如冷冻铸造等, 也被提出用于制备更厚且性能较好的电极^[8]。那么在使用高面密度与高压实密度的极片时, 如何避免其他电性能因低孔隙率厚极片的影响而过大, 是当前开发的难点。

为了改善使用低孔隙率的厚极片带来的问题, 电解液需要被着重设计, 尤其是电导率、对极片的浸润性等方面^[9-10]。除了低粘度溶剂及改善浸润性的添加剂外, 锂盐浓度对电解液的浸润性、电导率有最直接的影响^[11-13]。但锂盐浓度对电池关键性能的影响研究仅限于在实验室级别的扣式电池或小容量电池^[14], 在实际高能量密度电池中的相关研究还很缺乏。面对动力电池较高的循环要求、倍率要求及高低温要求, 对锂盐浓度的选择需要更为谨慎, 但高压实的极片是否使得高锂盐浓度

电解液失去了一定优势? 动力电池日益增加的成本要求也需要与电性能进行权衡进而获得一个折中方案。本文通过使用不同六氟磷酸锂浓度的电解液, 制备高能量密度软包磷酸铁锂电池, 并测试容量、内阻、倍率、高低温、循环等性能, 通过本文研究内容, 可以在动力锂离子电池开发过程中, 通过对电解液锂盐浓度的选用, 寻找锂离子电池性能与经济效益的平衡点。

2 实验

2.1 电解液的配置

在充满氮气的手套箱中, 将碳酸乙烯酯(EC, 电池级)、碳酸丙烯酯(PC, 电池级)、碳酸甲乙酯(EMC, 电池级)混合, 然后加入不同量的六氟磷酸锂(LiPF_6 , 电池级), 最后加入碳酸亚乙烯酯(VC, 电池级), 搅拌均匀后, 分别配置成六氟磷酸锂浓度为 0.9、1.0、1.1、1.2 mol/L 的电解液, 并测试电解液的电导率。

2.2 制备软包磷酸铁锂电池

使用不同六氟磷酸锂浓度的电解液, 制备标称容量为 4.0 Ah 的软包锂离子电池。正极使用磷酸铁锂(江苏产), 负极使用石墨(江西产)。每种锂盐浓度的电解液分别制备 20 个电池。制备电池的能量密度高于 160 wh/kg。

2.3 性能测试

容量及内阻测试: 在室温为 23 ± 3 °C 下, 测试软包锂离子电池在 0.5 C 下恒流放电至 2.5 V 的放电容量, 测试电池内阻, 并取 20 个电池的平均值。

倍率性能测试: 在室温为 23 ± 3 °C 下, 测试实验电池在 0.5 C、1 C、2 C、3 C、5 C、8 C 下恒流放电至 2.5 V 的放电容量。

高低温性能测试: 实验电池在 55 °C 下搁置 2 h, 再在此温度下以 0.5 C 电流恒流放电至 2.5 V, 记录放电容量, 同理测试电池在 25 °C、10 °C、0 °C、-20 °C 下放电至 2.0 V 的放电容量。

[收稿日期] 2021-12-30

[作者简介] 张励(1990-), 女, 福建福州人, 工程师, 博士, 主要研究方向为锂离子电池材料。

1C 循环性能测试: 实验电池以 1 C 恒流充电至 3.65 V, 恒压充电直至电流至 0.02 C 截止, 静置 2 min 后, 以 1 C 恒流放电至 2.5 V, 记录每个循环的放电容量。

5 C 循环性能测试: 实验电池以 1 C 恒流恒压充电后, 以 5 C 恒流放电至 2.5 V, 记录每个循环的放电容量。

3 结果与讨论

3.1 不同锂盐浓度电解液的电导率

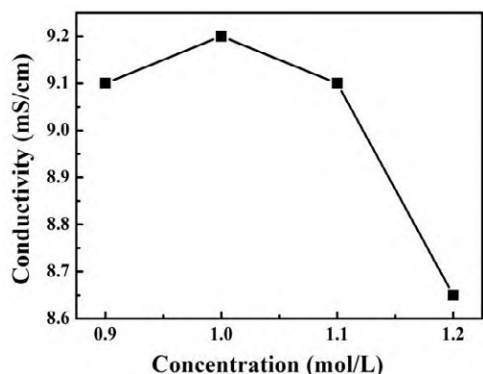


图1 不同锂盐浓度电解液的电导率

Fig.1 Conductivity of electrolyte with different lithium salt concentration

如图 1 所示, 不同锂盐浓度电解液的电导率并没有一直随着锂盐浓度的上升而增加, 而是在 1.0 mol/L 的锂盐浓度下, 电导率达到最大值 9.2 mS/cm, 当锂盐浓度大于 1.0 mol/L 之后, 电导率下降。整个电导率曲线呈现抛物线的趋势。在 1.0~1.2 mol/L 锂盐浓度下, 电导率随锂盐浓度升高而降低的原因主要有两点: 第一, 随着锂盐浓度上升, 电解液的粘度随之上升, 这导致了锂离子移动速率降低, 第二, 锂盐浓度的增加, 导致电解质阴阳离子的相互作用增强, 降低了游离的锂离子数量^[14]。因此, 综合电解液的粘度与游离的锂离子数量, 在 1.0 mol/L 的锂盐浓度下游离锂离子移动产生的电流传输速度最大, 因此电导率较大。

3.2 不同锂盐浓度电解液制备的电池的内阻与容量

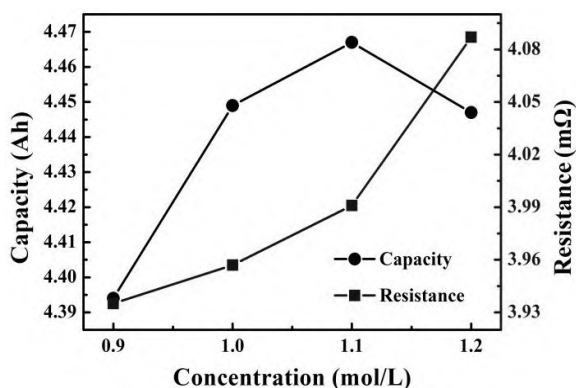


图2 不同锂盐浓度电解液制备的电池的内阻与容量

Fig.2 Resistance and capacity of batteries prepared by electrolyte with different lithium salt concentration

不同锂盐浓度电解液制备的电池的内阻如图 2 所示。实验电池的内阻随锂盐浓度的上升而变大。在 1.2 mol/L 的锂盐浓度下, 其电解液电导率相对于 1.1 mol/L 锂盐浓度电解液有较大变化, 而制备电池内阻也上升幅度较大, 这说明电池的内阻与电解液的电导率有一定关系, 但还受其他因素影响。不同实验电池内阻受到电解液的电导率、形成 SEI 膜的阻抗、电解液对正负极极片的浸润性影响。高锂盐浓度电解液被认为能够使 SEI 膜中 LiF 含量更高, 离子电导率更好^[15]。但对于高能量密度电池, 电解液难以浸润高压实的极片, 锂盐浓度越低, 电解液粘度越小, 对正负极极片的浸润性越好, 因此电解液对极片的浸润性是影响电池内阻的主要因素。

图 2 也展示了不同锂盐浓度电解液制备的电池的容量。在

0.9~1.1 mol/L 的锂盐浓度下, 实验电池的容量随锂盐浓度的上升而提高, 而 1.2 mol/L 的锂盐浓度下的实验电池容量下降。实验结果说明, 虽然电池的内阻随锂盐浓度的提高而升高, 但是电池的容量主要与锂离子在电池内部传输的速率有关, 影响因素包括电解液的电导率、锂离子在电解液与极片的界面的迁移等。对于电导率, 1.0 mol/L 的锂盐浓度电解液的电导率最大, 但是在电池化成成分形成 SEI 膜过程中, 电解液的成分发生了变化, 电导率也随之发生了变化。而对于锂离子在正负极与电解液界面的迁移, 随着锂盐增加, 虽然电解液对极片浸润度低, 但电解液锂离子溶剂化数减小, 且 SEI 膜离子电导率更好, 因此锂离子能够更快在电解液与电极界面传输。综合这两点因素, 在 1.1 mol/L 的锂盐浓度下, 实验电池的容量达到最大。

3.3 不同锂盐浓度制备电池的倍率放电性能

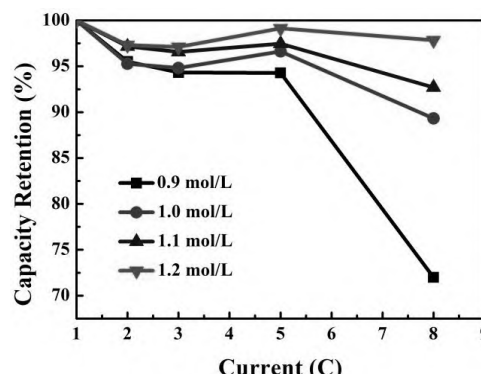


图3 不同锂盐浓度电解液制备电池的倍率放电性能

Fig.3 Rate capability of batteries prepared by electrolyte with different lithium salt concentration

不同锂盐浓度电解液制备的电池在不同倍率下的放电性能有较大差异。图 3 所示的是实验电池在不同倍率放电下的容量保持率。随着放电倍率增加, 高能量密度电池的放电容量保持率并非一直降低。在 3 C 放电下, 0.9~1.2 mol/L 锂盐浓度电解液制备的电池的容量保持率分别是 94.33 %、94.82 %、96.57 %、97.11 %, 而在 5 C 放电下, 实验电池的容量保持率分别是 94.28 %、96.62 %、97.46 %、99.14 %。除了 0.9 mol/L 锂盐浓度电解液制备电池的 5 C 放电容量保持率相较于 3 C 放电容量保持率略有下降, 其余几个实验电池的容量保持率都稍有上升。这是因为在较大的放电倍率下, 高能量密度电池内部极化较大, 电池温度升高。较高的温度使得电池内部反应速率加快, 极化降低, 因此放电容量提高。

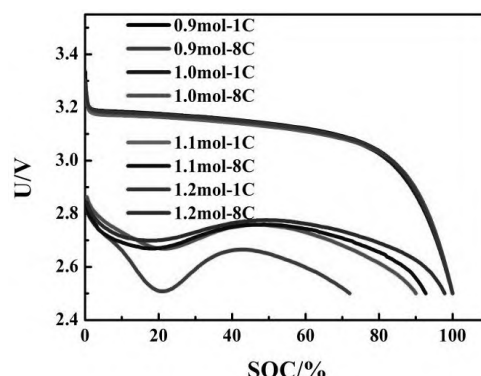


图4 实验电池在不同倍率下的放电曲线

Fig.4 The discharge curves of experimental batteries at different rates

在 8 C 的放电倍率下, 0.9~1.2 mol/L 锂盐浓度电解液制备电池的容量保持率相对于 5 C 放电倍率, 分别降低了 22.29 %、7.31 %、4.76 %、1.30 %。由此可见, 随着放电倍率增大, 锂盐浓度越高的电解液制备的电池容量保持率越高。通过图 4 所示的不同锂盐浓度电解液制备的电池在 8 C 下的放电曲线, 可以看到, 在放电初期, 因较大极化, 各个实验电池的电压都

下降较快,但随着电池温度上升,电压有一定的回升。锂盐浓度越高的电解液制备的电池,电压回升的拐点在更小的SOC出现,分别为21.25%、20.98%、17.98%、17.25%。这是因为在倍率放电过程中,高能量密度电池温度上升,电解液粘度随之降低,电解液的电导率提高,锂离子在电极-电解液界面上的嵌入脱出速度加快,因此电压回升。在较高的温度下,不同锂盐浓度电解液的电导率差异减小,不是制约不同放电倍率下容量保持率的主要因素。而因正负极极片密度大,在高倍率下需要嵌入脱出的锂离子数量大幅增加,电极-电解液界面上迁移的锂离子数量增多,高锂盐浓度电解液能够更快提供更多的锂离子,因此电压回升的SOC更小,容量保持率越高。

3.4 不同锂盐浓度电解液制备电池在不同温度下的放电容量保持率

不同锂盐浓度电解液制备的电池在不同温度下的容量保持率如图5所示。在55℃下,实验电池的放电容量保持率相差不大。这是因为在较高的温度下,锂离子传输加快,而1C充放电电流下正在传输的锂离子数量不多,因此锂盐浓度对电池的容量保持率没有较大影响。但在低温0℃及-20℃下,实验电池的容量保持率有较大差异。1.0 mol/L 锂盐浓度电解液制备电池的容量保持率最小,在1.0~1.2 mol/L 的锂盐浓度下,电池的放电容量保持率随电解液锂盐浓度的提高而上升。温度越低,实验电池的容量保持率相差越大。由实验结果可以推测,主要制约高能量密度电池低温性能的是电解液能提供的锂离子数,0.9 mol/L 锂盐浓度的电解液依旧保持了较低的粘度,锂离子传输速度稍快,而1.1~1.2 mol/L 锂盐浓度的电解液虽然粘度高,但能够提供的锂离子数量多。

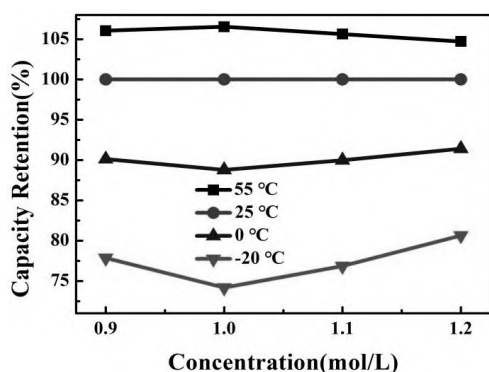


图5 不同锂盐浓度电解液制备电池的高低温度性能

Fig.5 High-low temperature performance of batteries prepared by electrolyte with different lithium salt concentration

表1 实验电池在不同温度下的放电容量保持率

Tab.1 The discharge capacity retention of experimental batteries at different temperature

锂盐浓度/(mol/L)	不同温度下的放电容量保持率/%			
	55 °C	25 °C	0 °C	-20 °C
0.9	106.05	100	90.13	77.85
1.0	106.55	100	88.79	74.18
1.1	105.64	100	89.99	76.85
1.2	104.72	100	91.42	80.64

3.5 不同锂盐浓度电解液制备电池在不同放电倍率下的循环性能

我们将实验电池在1C充电/1C放电以及1C充电/5C放电的情况下进行循环,直至循环保持率低于80%。图6所示的为实验电池在1C充电/1C放电下的循环性能。可以从图中看到,实验电池的循环性能基本相差不大,循环容量保持率低于80%的圈数分别为1981、2079、1777、1828圈。相对来说,0.9及1.0 mol/L 锂盐浓度电解液制备电池的循环性能稍好。由此说明,对于高能量密度电池,在较低的充放电电流下,极片浸润性对循环性能有一定影响。图7所示的为不同锂盐浓度电解液制备的电池在1C充电/5C放电下的循环性能。电解液的锂盐浓度越高,实验电池在1C充电/5C放电下的循环性能越

好。0.9 mol/L 锂盐浓度电解液制备的电池在循环100圈后,容量保持率低于80%,而1.2 mol/L 锂盐浓度电解液制备的电池在350圈循环后,容量保持率依然有81.37%。这是因为低锂盐浓度电解液制备的电池在高倍率充放电循环过程中,库伦效率低,在循环过程中容量损失快,因此循环性能较差。

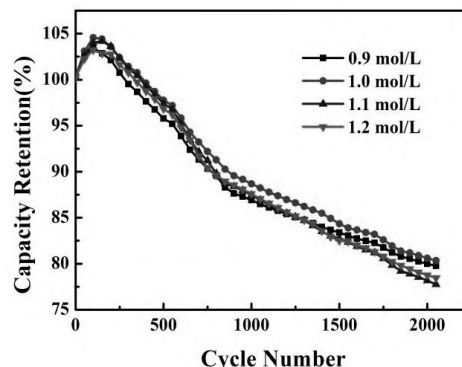


图6 实验电池在1C充电/1C放电下的循环性能

Fig.6 The cycle performances of experimental batteries under 1C charge/1C discharge

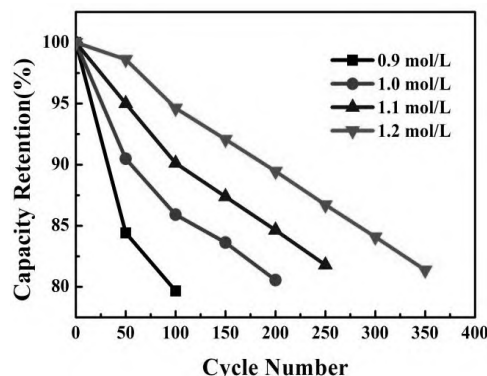


图7 实验电池在1C充电/5C放电下的循环性能

Fig.7 The cycle performances of experimental batteries under 1C charge/5C discharge

4 结论

由以上的实验数据,我们看到因为高能量密度电池较大的极化,电解液中锂盐浓度对电池各关键性能的影响更为显著。针对电池不同的电性能要求,需要对电解液锂盐浓度优选相应的方案。1.1~1.2 mol/L 的锂盐浓度电解液制备电池,有低温放电性能好、倍率放电性能好、倍率循环容量保持率高的优势,但0.9~1.0 mol/L 的锂盐浓度电解液制备的电池,内阻低、1C充放电循环性能好、高温性能稍优、经济效益高。在本实验中,我们通过制备高能量密度动力电池,综合考虑了高能量密度电池的情况以及经济效益的影响,因此实验结果对动力磷酸铁锂电池的开发有较大的参考价值。

参考文献

- [1]刘颖馨,陆春,张辰,等. 锂离子动力电池高安全关键组件研究进展[J]. 中国汽车, 2021, (12): 26-32.
- [2]Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology[J]. ACS Central Science, 2017, 3(10): 1063-1069.
- [3]Ma S, Jiang M, Tao P, et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(6): 653-666.
- [4]Liu H, Liu Y, An L, et al. High energy density LiFePO₄/C cathode material synthesized by wet ball milling combined with spray drying method[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(14): A3666.

(下转第7页)

化成充电 SOC 为 70 % 时电池性能接近。化成 SOC 为 40 % 时容量保持率明显下降, 仅 69.2 %, 性能最差;

(4)倍率充电性能: 化成充电 SOC 为 70 % 时电池 5 C 倍率充电容量保持率 100.5 % 最高, 电池主体最大温升 14.2 °C 稍高于化成充电 SOC 为 10 % 和 40 % 的电池;

(5)倍率放电性能: 化成充电 SOC 为 70 % 时电池 5 C 倍率放电容量保持率 97.9 % 最高, 同时电池主体最大温升 17.47 °C 为所有实验组最低, 显示出最佳的倍率放电性能;

(6)循环性能: 1 C 充电/1 C 放电, 100 % DOD 循环时, 各实验组循环性能无明显差别。1 C 充电/5 C 放电, 100 % DOD 循环时, 化成充电 SOC 为 70 % 和 100 % 时电池寿命最长, 分别循环 961 次及 977 次。化成充电 SOC 为 40 % 时, 电池寿命明显降低, 仅 524 次。

综上, 化成充电 SOC 为 70 % 及 100 % 时电池综合性能最佳。考虑到化成充电 SOC 为 100 % 时, 较低的容量和更长的充电时间都提高了制造成本, 因此当倍率充放电性能及成本要求更高时, 化成充电 SOC 可设为 70 %; 当高低温充放电要求更高时, 化成充电 SOC 可设为 100 %。

参考文献

- [1]韩景春. “双碳”目标下制造业企业在行动[J]. 金属加工(冷加工), 2022, (01): 25-27.
- [2]江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, (03): 345-359.
- [3]戴永年, 杨斌, 姚耀春, 等. 锂离子电池的发展状况[J]. 电池, 2005, (03): 193-195.
- [4]闫金定. 锂离子电池发展现状及其前景分析[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2767-2775.
- [5]宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(04): 1-7.
- [6]Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology[J]. ACS Central Science, 2017, 3(10): 1063-1069.
- [7]Zubi G, Dufo-López R, Carvalho M, et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 89: 292-308.
- [8]Nitta N, Wu F, Lee J T, et al. Li-ion battery materials: present and future[J]. Materials Today, 2015, 18(5): 252-264.
- [9]Shen X, Tian Z, Fan R, et al. Research progress on silicon/carbon composite anode materials for lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Chemistry, 2018, 27(4): 1067-1090.

[10]Kim J, Ma H, Cha H, et al. A highly stabilized nickel-rich cathode material by nanoscale epitaxy control for high-energy lithium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(6): 1449-1459.

[11]Xu C, Xiang W, Wu Z, et al. Highly stabilized Ni-rich cathode material with Mo induced epitaxially grown nanostructured hybrid surface for high-performance lithium-ion batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(18): 16629-16638.

[12]Wang X, Feng Z, Huang J, et al. Graphene-decorated carbon-coated LiFePO₄ nanospheres as a high-performance cathode material for lithium-ion batteries[J]. Carbon, 2018, 127: 149-157.

[13]Chen J, Wu J, Wang X, et al. Research progress and application prospect of solid-state electrolytes in commercial lithium-ion power batteries[J]. Energy Storage Materials, 2021, 35: 70-87.

[14]Ahmed S, Nelson P A, Gallagher K G, et al. Energy impact of cathode drying and solvent recovery during lithium-ion battery manufacturing[J]. Journal of Power Sources, 2016, 322: 169-178.

[15]Liu Y, Zhang R, Wang J, et al. Current and future lithium-ion battery manufacturing[J]. Iscience, 2021: 102332.

[16]Yang Y, Okonkwo E G, Huang G, et al. On the sustainability of lithium ion battery industry-A review and perspective[J]. Energy Storage Materials, 2021, 36: 186-212.

[17]Hawley W B, Li J. Electrode manufacturing for lithium-ion batteries-Analysis of current and next generation processing[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100862.

[18]蒿豪, 杨尘, 李佳. 不同分散工艺对锂电池性能的影响[J]. 广东化工, 2020, 47(14): 60-61.

[19]鲁桂梅, 谢秋, 石永伉, 任卫斌. 锂离子电池化成工艺研究[J]. 化学工程与装备, 2011, (09): 46-47+40.

[20]王猛, 安冉. 化成工艺对高功率型锂离子电池性能的影响[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 89-91.

[21]杨娟. 锂离子电池化成条件对化成效果的影响[J]. 河南科技, 2017, (19): 139-140.

[22]Wood III D L, Li J, An S J. Formation challenges of lithium-ion battery manufacturing[J]. Joule, 2019, 3(12): 2884-2888.

[23]魏文飞, 钟宽, 蒋世用. 锂离子电池高温化成工艺研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(05): 908-912.

(本文文献格式: 魏佳骏, 弓梦丽. 化成充电 SOC 对软包磷酸铁锂电池性能的影响[J]. 广东化工, 2022, 49(3): 4-7)

(上接第 17 页)

[5]Shen C, Li G, Liu L, et al. Facile fabrication of compact LiFePO₄/C composite with excellent atomically-efficient for high-energy-density Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 496: 229759.

[6]Liu X, Li D, Hou H, et al. Mg²⁺-doped LiFePO₄/C cathode from expired lithium carbonate and ferrous sulfate tablets[J]. Surface Innovations, 2019, 7(5): 290-298.

[7]Jia-peng Z, Deng-ke W, Li-hui Z, et al. A wet granulation to dense graphite particles for high volumetric lithium-ion storage[J]. New Carbon Materials, 2021, 36: 1-10.

[8]Amin R, Delattre B, Tomsia A P, et al. Electrochemical characterization of high energy density graphite electrodes made by freeze-casting[J]. ACS Applied Energy Materials, 2018, 1(9): 4976-4981.

[9]Wang Q, Jiang L, Yu Y, et al. Progress of enhancing the safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect[J]. Nano Energy, 2019, 55: 93-114.

[10]Liu K, Liu Y, Lin D, et al. Materials for lithium-ion battery safety[J]. Science Advances, 2018, 4(6): eaas9820.

[11]Xu K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable

batteries[J]. Chemical Reviews, 2004, 104(10): 4303-4418.

[12]Shi J, Ehteshami N, Ma J, et al. Improving the graphite/electrolyte interface in lithium-ion battery for fast charging and low temperature operation: fluorosulfonyl isocyanate as electrolyte additive[J]. Journal of Power Sources, 2019, 429: 67-74.

[13]张涛, 朱坤庆, 黎露, 等. 锂离子电池高电压电解液溶剂研究进展[J]. 新材料产业, 2019, (10): 59-64.

[14]郑雪莹, 丁远雷, 负娇娇, 等. 电解液锂盐浓度对磷酸铁锂电池化学性能的影响[J]. 电源技术, 2017, 41(4): 512-516.

[15]Jeong S K, Kim J H, Jeong Y T, et al. Correlations between electrolyte concentration and solid electrolyte interphase composition in electrodeposited lithium[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2016, 16(3): 3049-3053.

(本文文献格式: 张劭. 动力型磷酸铁锂电池关键性能与电解液锂盐浓度的关系[J]. 广东化工, 2022, 49(3): 15-17)