

# 高压实纳米磷酸铁锂材料合成工艺研究

王敬超<sup>1\*</sup>, 邢盛洲<sup>2</sup>, 李奂其<sup>2</sup>, 罗红成<sup>1</sup>

(1. 东风鸿泰控股集团有限公司, 湖北 武汉 430056;

2. 湖北睿派新能源科技有限公司, 湖北 襄阳 441048)

**摘要:**通过探究预烧温度、碳分配比例、分散剂加入量、烧结温度、粒度级配等核心影响因素, 制备出高压实密度纳米磷酸铁锂正极材料。材料压实密度为 2.59 g/cm<sup>3</sup>, 0.1 C 下放电容量为 160.16 mAh/g, 1 C 倍率下循环 200 圈容量保持率为 97.81%, 表现出优异的电化学性能。该研究对高压实磷酸铁锂材料开发具有重要指导意义, 在高性能动力电池领域具有广泛的应用前景。

**关键词:**磷酸铁锂; 高压实密度; 分散剂; 烧结温度; 碳分配比例

中图分类号: TQ152

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S2-0354-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.061

## Research on synthesis process for highly compacted nano lithium iron phosphate materials

WANG Jing-chao<sup>1\*</sup>, XING Sheng-zhou<sup>2</sup>, LI Huan-qi<sup>2</sup>, LUO Hong-cheng<sup>1</sup>

(1. Dongfeng Hongtai Holding Group Co., Ltd., Wuhan 430056, China;

2. Hubei Rep New Energy Technology Co., Ltd., Xiangyang 441048, China)

**Abstract:** Through investigating key influencing factors, including pre-sintering temperature, carbon distribution ratio, dispersant dosage, sintering temperature, and particle size distribution, this study prepares highly compacted nano lithium iron phosphate (LFP) cathode materials successfully. The prepared materials exhibit a bulk density of 2.59 g/cm<sup>3</sup>, a discharge capacity of 160.16 mAh/g at 0.1 C, and a capacity retention rate of 97.81% after 200 cycles at 1 C, demonstrating excellent electrochemical performance. This research provides significant guidance for the development of highly compacted LFP materials, which has broad application prospects in the field of high-performance power batteries.

**Key words:** lithium iron phosphate; high compaction density; dispersant; sintering temperature; carbon allocation ratio

锂离子电池作为新能源汽车最广泛使用的动力电池之一, 主要由正极材料、负极材料、隔膜和电解液等构成。正极材料是锂离子电池的核心组成部分, 其性能直接决定了电池的整体性能, 也是制约电池向高能量、长寿命和低成本方向发展的关键因素。在众多正极材料中, 磷酸铁锂(LiFePO<sub>4</sub>, 简称 LFP) 因其优异的热稳定性、高安全性和低成本等优势, 已成为动力电池市场主流材料之一<sup>[1-3]</sup>。

近年来, 磷酸铁锂电池在国内外市场占比持续增长。数据显示, 2021 年至 2023 年, 国内 LFP 电池在动力电池市场的销售占比分别为 57%、58%、59%, 2024 年更是达到了 72.6%, 展现出强劲的发展势头。预计 2025 年, 国内 LFP 电池的市场渗透率将提升至 75%。在欧洲市场, 尽管三元电池仍占据主导地位, 但磷酸铁锂因其成本优势逐渐受到关注; 在美国市场, 部分特斯拉车型已采用磷酸铁锂电池, 进一步推动了磷酸铁锂在全球范围内的应

用<sup>[4]</sup>。根据测算, 2025 年全球动力电池出货量为 1 258 GWh, 全球 LFP 渗透率为 51%<sup>[5]</sup>。

磷酸铁锂的晶体结构为橄榄石型, 属于正交晶系, 空间群为 Pmnb。其结构由 FeO<sub>6</sub> 八面体和 PO<sub>4</sub> 四面体交替连接组成骨架, 锂离子镶嵌在 Z 字型通道中, 如图 1 所示。LiFePO<sub>4</sub> 脱锂后生成 FePO<sub>4</sub>, 但结构体积变化较小, 表明磷酸铁锂具有较好的结构稳定性<sup>[6-10]</sup>。然而, 由于氧原子的密堆积结构, 锂离子扩散的自由空间较小, 导致其扩散速率较慢, 限制了材料的电化学性能。因此, 优化磷酸铁锂合成工艺和结构设计成为提升其性能的关键。目前, 磷酸铁锂合成方法主要包括固相法、碳热还原法、水热/溶剂热合成法、喷雾热解法等<sup>[11-15]</sup>。经过市场和技术的多重筛选, 结合了固相法和碳热还原法的工艺路线因其工艺简单、成本低、原料易得等优点, 成为磷酸铁锂制备的主流工艺之一。该工艺通过将化学计量比的原料经混合、砂磨、干燥、热处理和粉碎等

收稿日期: 2025-03-17; 修回日期: 2025-07-28

作者简介: 王敬超(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源电池及材料, 通讯联系人, wangjingchao@dfhtkg.com.cn。

工序得到最终产品。然而,该工艺在大规模生产时面临产品均匀性和稳定性不足的问题<sup>[16]</sup>。

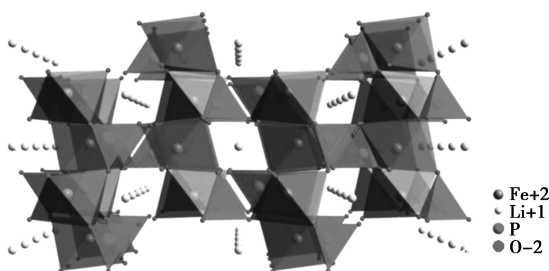


图1 磷酸铁锂晶体结构

近年来,高压实磷酸铁锂合成工艺逐渐成为研究热点。该工艺引入二次烧结步骤,通过优化烧结温度和时间,显著提高了材料的压实密度和电化学性能。然而,高温烧结也会导致磁性杂质  $\text{Fe}_2\text{P}$  的生成,可能对电池的安全性和性能产生不良影响。因此,如何通过优化烧结工艺和材料制备参数,实现高压密的同时减少杂质生成,成为研究的关键。此外,磷酸铁的制备、砂磨粒径调整、大小颗粒级配等工艺参数对最终材料的性能具有重要影响。磷酸铁的纯度、粒径和形貌直接影响磷酸铁锂的电化学性能<sup>[17]</sup>;砂磨工艺通过调整粒径可以优化材料的比表面积和表面活性,从而减少杂质生成并改善导电性;大小颗粒级配则通过优化颗粒间的空隙填充,显著提高粉体的压实密度和电池的电化学性能<sup>[18-22]</sup>。这些工艺参数的优化不仅能够提升磷酸铁锂的性能,还为其实现大规模、高质量生产提供了技术保障。

综上所述,高压实纳米磷酸铁锂材料的研究不仅是提升锂离子电池性能的关键,也是推动新能源汽车和储能领域发展的核心技术。本研究通过对材料制备工艺的优化和关键参数的控制,进一步提升磷酸铁锂的压实密度、电化学性能和稳定性,对于推动高压实磷酸铁锂材料开发应用具有重要意义。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

磷酸铁、碳酸锂、葡萄糖、聚乙二醇、二氧化钛、偏钒酸铵、有机碳源。

### 1.2 实验步骤

实验步骤如图2所示。

(1)将磷酸铁、碳酸锂按照  $n(\text{Li}) : n(\text{Fe}) = 1.035$  计算添加量,加入定量葡萄糖、聚乙二醇和二氧化钛配置成一定固含量的浆料。

(2)经过砂磨机粗磨、细磨控制物料粒度在

$0.4 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$  之间。

(3)利用喷雾干燥设备进行干燥并制成球形磷酸铁锂前驱体。

(4)将磷酸铁锂前驱体置入箱式炉中进行高温烧结合成预烧磷酸铁锂材料。

(5)预烧磷酸铁锂经过破碎,定量投入搅拌釜中进行湿混并补加适量的碳源、锂源、磷源、有机碳源并充分混合。

(6)混合后物料经过粗磨、细磨进行颗粒搭配并经过喷雾干燥去除水分。

(7)将喷雾料置入箱式炉中进行烧结后进行粉碎处理最终得到高压实纳米磷酸铁锂成品材料。

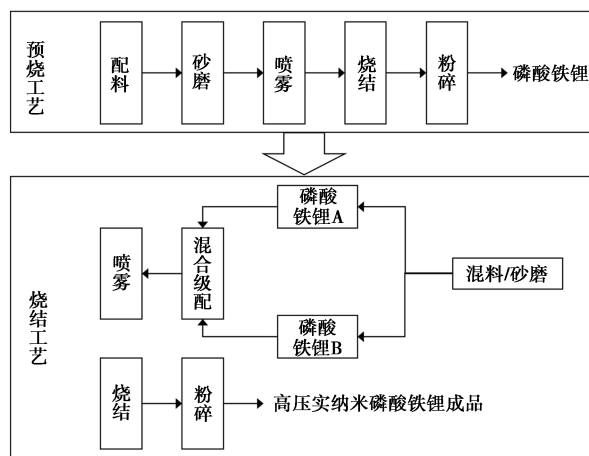


图2 实验步骤

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 预烧温度对预烧磷酸铁锂压实密度的影响

通过控制锂加入量、碳包覆量、分散剂、过渡金属掺杂量、砂磨粒度等关键因素,对预烧温度进行单因素实验研究。在  $n(\text{Li}) : n(\text{Fe}) = 1.035$ 、碳包覆量 1.3%、聚乙二醇加入量 300 g、Ti 掺杂量 0.3%、砂磨粒径 390 nm 条件下,预烧温度对预烧磷酸铁锂压实密度的影响如图3。由图3可知,随着预烧温度的升高,预烧磷酸铁锂压实密度呈提升趋势,这是由于提高温度时磷酸铁锂一次颗粒增大所致。图4为预

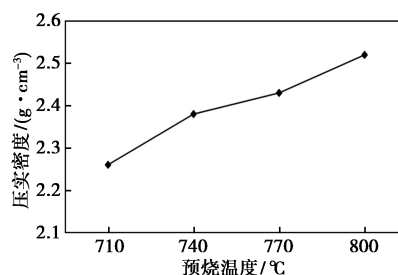


图3 预烧温度对预烧磷酸铁锂压实密度的影响

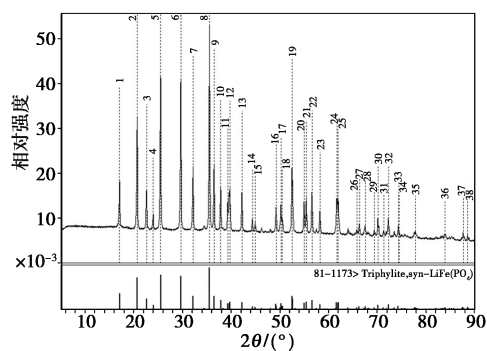


图 4 770℃ 预烧后样品的 XRD 图

烧材料的 XRD 图谱,当预烧温度超过 770℃ 时会出现 Fe<sub>2</sub>P 相。结合电化学性能得知,770℃ 预烧后的样品在 0.1 C 倍率下放电容量为 160.34 mAh/g,而 800℃ 预烧后的样品在 0.1 C 倍率下放电容量为 143.58 mAh/g,且循环测试容量保持率较差<sup>[23]</sup>。综合考虑压实密度及电化学性能,最佳预烧温度为 770℃。

### 2.2 聚乙二醇加入量对预烧磷酸铁锂压实密度的影响

分散剂可使导电剂与活性物质充分分散,使得导电碳在正极材料表面分散均匀,从而使锂离子更容易嵌脱。聚乙二醇作为分散剂在正极材料合成过程中应用较为广泛,因此对聚乙二醇作为分散剂的加入量进行单因素实验,条件为  $n(\text{Li}) : n(\text{Fe}) = 1.035$ 、碳包覆量 1.3%、Ti 掺杂量 0.3%、砂磨粒径 390 nm、预烧温度 770℃。由图 5 可知,随着聚乙二醇加入量增大,预烧材料压实密度呈先升高后降低趋势。聚乙二醇加入量为 3% 时,压实密度最大,为 2.45 g/cm<sup>3</sup>;进一步增加聚乙二醇加入量,则预烧材料压实密度会下降。对聚乙二醇加入量为 5% 时预烧后的样品进行扫描电镜分析,结果如图 6,样品表面存在较多絮状物并且存在多孔,这是由于聚乙二醇经过高温气化分解产生气量较大,使得碳包覆不均匀所致,因此最佳聚乙二醇加入量为 3%。

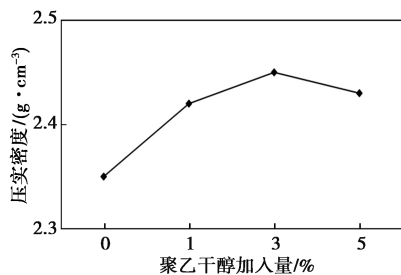


图 5 聚乙二醇加入量对预烧材料压实密度的影响

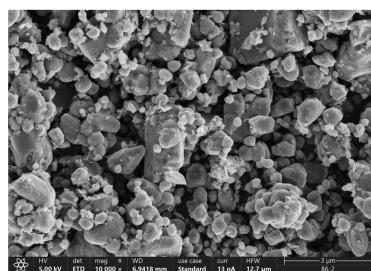
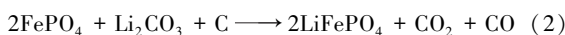
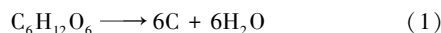


图 6 聚乙二醇加入量为 5% 时预烧后样品的 SEM 图

### 2.3 碳包覆量对预烧磷酸铁锂压实密度的影响

在无氧条件下,葡萄糖先受热分解生成碳单质和 H<sub>2</sub>O,生成的碳单质一部分作为还原剂,将磷酸铁中的三价铁还原成磷酸铁锂中的亚铁,一部分碳单质吸附在磷酸铁锂产品表面,增加产品的导电能力。整个反应的原理是以碳源作为还原剂,在炉窑中进行简单的高温还原反应,将三价铁还原成亚铁。高温预烧过程涉及的具体化学反应方程式如下:



部分葡萄糖在磷酸铁锂合成过程中会通过气相沉积方式将碳均匀包覆在磷酸铁锂颗粒表面,从而有效抑制磷酸铁锂一次颗粒的生长,并且由于碳的存在不仅提升了材料的导电率而且还影响材料的压实密度。因此,研究了碳包覆量对预烧材料粉末压实密度的影响关系,条件为  $n(\text{Li}) : n(\text{Fe}) = 1.035$ 、碳包覆量 0.5%~1.3%、聚乙二醇加入量 3%、Ti 掺杂量 0.3%、砂磨粒径 390 nm、预烧温度 770℃,结果如图 7 所示。随着碳包覆量的提高,预烧材料压实密度呈先提升后逐渐减小趋势,这是由于碳的加入使得磷酸铁锂材料颗粒变小、形貌变得圆润从而使材料的压实密度提升,但是碳大都是以无定型碳形式包覆在颗粒表面,过多的碳存在使得材料变得疏松,并不会较大地提升其压实密度,因此在预烧过程中最佳碳包覆量为 0.7%。

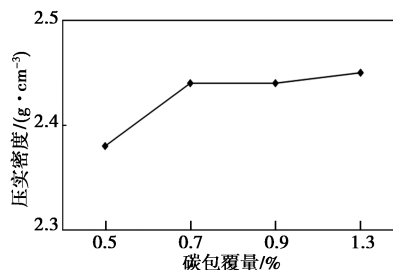


图 7 碳包覆量对预烧材料压实密度的影响

### 2.4 烧结温度对磷酸铁锂成品压实密度的影响

对于开发高压实密度材料,仅经过一次烧结

(预烧)其压实密度虽然能够达到  $2.5 \text{ g/cm}^3$  以上,但材料的电化学性能较差、所含磁性物质较多,很难应用于产业化。本研究经过预烧、烧结两步工艺设计,实现了在提升材料压实密度的同时,不影响其电化学性能。烧结温度是材料结晶生长最主要影响因素之一,为了探究烧结温度对材料压实密度的影响进行了一轮单因素实验,实验条件为粒度配比 = 6:4、补碳 0.55%、聚乙二醇加入量 3%,结果如图 8。随着烧结温度升高,磷酸铁锂成品的压实密度先呈快速提升趋势。当温度超过  $755^\circ\text{C}$  后,磷酸铁锂压实密度提升缓慢,这是由于在高温阶段小颗粒间会发生溶解并浸润较大颗粒,从而实现颗粒的二次生长,一部分颗粒变小而一部分颗粒变大,材料压实密度得以提升。当达到一定温度时,温度已经不是影响颗粒级配的控制因素,压实密度提升缓慢。由于温度过高使得能耗增加,不利于生产加工,综合考虑最佳烧结温度为  $775^\circ\text{C}$  [24]。

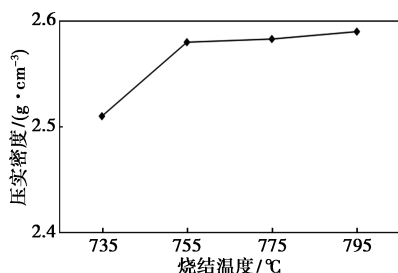


图 8 烧结温度对材料压实密度的影响

## 2.5 颗粒比对磷酸铁锂成品压实密度的影响

在烧结过程中小颗粒溶解、大颗粒长大的数量及比例并不能完全控制,因此增加了对烧结物料级配的研究。在二次粗磨、细磨阶段按照设计比例制备两批不同粒径的预烧材料并进行混合后,再经喷雾干燥进行干燥造粒,最后进行烧结制备高压实纳米磷酸铁锂成品材料,实验条件为补碳 0.55%、聚乙二醇加入量 3%、烧结温度  $775^\circ\text{C}$ ,结果如图 9 所示。不同比对材料压实密度具有显著的影响,颗

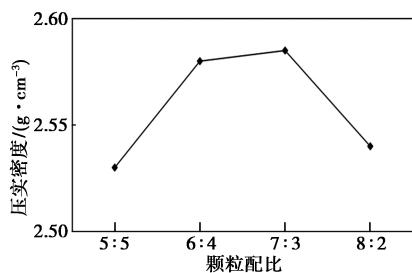
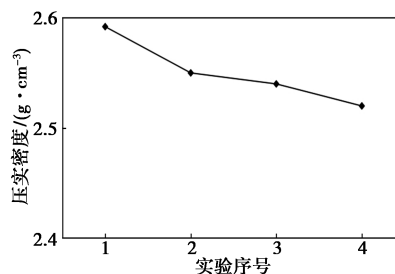


图 9 烧结颗粒比对磷酸铁锂成品材料压实密度的影响

粒堆积方式是影响压实密度的关键因素之一,适当比例的大小颗粒搭配有助于实现颗粒堆积,从而实现压实密度的提升。在颗粒配比为 7:3 时制备的磷酸铁锂成品压实密度最高可达  $2.59 \text{ g/cm}^3$ 。因此,在大颗粒  $1 \mu\text{m}$ 、小颗粒  $0.4 \mu\text{m}$  的条件下,颗粒搭配的最佳比例为 7:3。

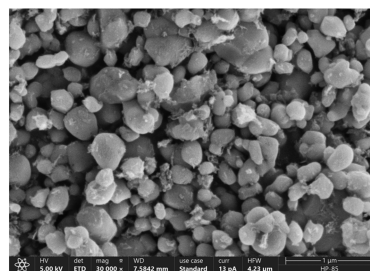
## 2.6 气碎工艺对成品材料压实密度的影响

为了便于控制粉碎粒径,烧结之后的物料需要进行气流粉碎。为了探究粉碎工艺对材料压实密度的影响,实验对给料频率、分级频率、磨体压力等关键因素进行实验设计,结果如图 10 所示。从实验结果来看,给料频率 25 Hz、分级频率 130 Hz、磨体压力 0.45 MPa 所得的材料样品压实密度最高。对该样品进行理化分析,由图 11、图 12、图 13、图 14 可以

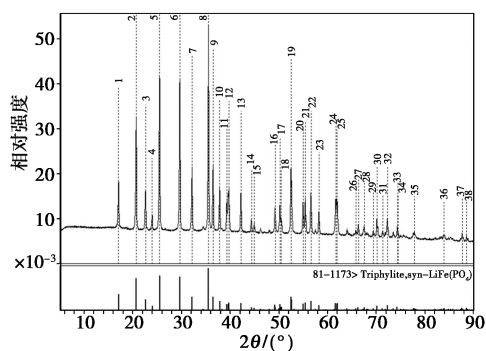


- 1—给料频率 25 Hz、分级频率 130 Hz、磨体压力 0.45 MPa;
- 2—给料频率 25 Hz、分级频率 110 Hz、磨体压力 0.55 MPa;
- 3—给料频率 20 Hz、分级频率 130 Hz、磨体压力 0.55 MPa;
- 4—给料频率 20 Hz、分级频率 110 Hz、磨体压力 0.45 MPa

图 10 粉碎工艺对材料压实密度的影响

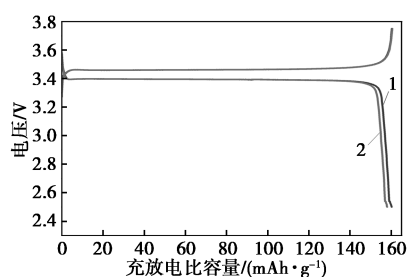


(a) SEM 图谱



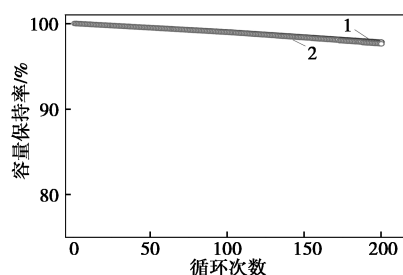
(b) XRD 图谱

图 11 磷酸铁锂成品的表征



1—样品;2—对照组

图 12 磷酸铁锂成品 0.1 C 充放电曲线



1—样品;2—对照组

图 13 磷酸铁锂成品 1 C 倍率下的循环曲线

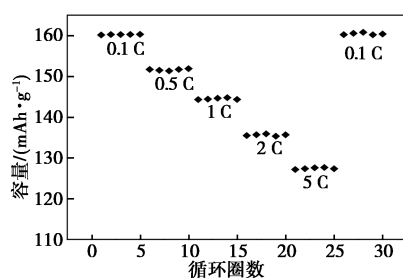


图 14 磷酸铁锂成品倍率循环曲线

看到,样品颗粒分布均匀、洁净度高,0.1 C 放电容量为 160.16 mAh/g,1 C 倍率下 200 圈循环容量保持率为 97.81%,具有优异的电化学性能。

### 3 结论

本研究提出两步烧结工艺技术,先通过预烧使磷酸铁锂材料初步结晶生长制备出预烧磷酸铁锂初品,再经过砂磨、级配、补碳后经二次烧结使得预烧磷酸铁锂在大小颗粒配比的情况下,实现晶体结构重筑、粒径控制、形貌修整等,从而达到提升磷酸铁锂成品压实密度的目的。实验结果表明,两步法制备出的高压实纳米磷酸铁锂材料压实密度为 2.59 g/cm<sup>3</sup>,0.1 C 放电容量为 160.16 mAh/g,1 C 倍率下 200 圈循环容量保持率为 97.81%,具有优异的电化学性能。此项工艺技术对高压实磷酸铁锂材料开发提供很好的指导意义,并且在高性能动力电池领域具有广泛的应用前景。

### 参考文献

- [1] Hu J, Zheng J X, Pan F. Research progress into the structure and performance of LiFePO<sub>4</sub> cathode materials[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2019, 35(4): 361-370.
- [2] 张中太, 罗绍华, 唐子龙, 等. 氧位掺杂型磷酸铁锂粉体的制备方法; CN 200510112562.6[P]. 2005-10-11.
- [3] 杨勇, 张忠如, 朱昌宝. 基于磷位掺杂的磷酸铁锂正极材料及其制备方法; CN 200710008713[P]. 2007-03-16.
- [4] Liu H, Strobridge F C, Borkiewicz O J, et al. Capturing metastable structures during high-rate cycling of LiFePO<sub>4</sub> nanoparticle electrodes[J]. Science, 2014, 344: 6191-6197.
- [5] Malik R, Burch D, Bazant M, et al. Particle size dependence of the ionic diffusivity[J]. Nano Lett, 2010, 10(10): 4123-4127.
- [6] 王忠丽. 铁基磷酸盐正极材料的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [7] 王延社, 程仁飞, 杨金星, 等. 磷酸铁锂的高性能化研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2024, 45(Z1): 74-99.
- [8] 叶向果. 喷雾干燥法制备锂离子电池正极材料磷酸铁锂[J]. 新疆有色金属, 2014, 37(6): 56-57.
- [9] 陈泓舟, 褚晓东, 马俊, 等. 新型喷雾干燥法制备 LiFePO<sub>4</sub>/C 复合材料及其性能研究[J]. 功能材料, 2014, 45(22): 22096-22101.
- [10] 张文华, 裴锋, 刘平, 等. 磷酸铁锂电池循环过程中电化学交流阻抗研究[J]. 电源技术, 2015, 39(1): 54-57.
- [11] Zhang Y T, Xin P Y, Yao Q F. Electrochemical performance of LiFePO<sub>4</sub>/C synthesized by sol-gel method as cathode for aqueous lithium ion batteries[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 741: 404-408.
- [12] 张英杰, 朱子翼, 董鹏, 等. LiFePO<sub>4</sub> 电化学反应机理、制备及改性研究新进展[J]. 物理化学学报, 2017, 33(6): 1085-1107.
- [13] 徐土根, 王连邦, 李晟, 等. 锂电池中低成本碳包覆磷酸铁锂正极材料的合成及其性能[J]. 化学学报, 2009, 67(20): 2275-2278.
- [14] Naik A, Zhou J, Gao C, et al. Rapid and facile synthesis of Mn doped porous LiFePO<sub>4</sub>/C from iron carbonyl complex[J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(1): 21-29.
- [15] Tao F, Tang Z Y. Kinetic behavior of LiFePO<sub>4</sub>/C cathode material for lithium-ion batteries[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(15): 5071-5075.
- [16] Churikov A V, Ivanishchev A V, Ivanishcheva I A. Determination of lithium diffusion coefficient in LiFePO<sub>4</sub> electrode by galvanostatic and potentiostatic intermittent titration techniques[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(8): 2939-2950.
- [17] Liu X, Huang J Q, Zhang J Q, et al. Nanostructured metal oxides and sulfides for lithium-sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2017, 29(20): 1601759.
- [18] Hwang J Y, Myung S T, Sun Y K. Sodium-ion batteries: Present and future[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46(12): 3529-3614.
- [19] 梁广川, 宗继月. 锂离子电池用磷酸铁锂正极材料[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 2-9.

(下转第 366 页)

性高的萜烯酚树脂的加入显著提高了内聚力。总之,萜烯酚树脂对聚丙烯酸酯的剥离强度有所提升,但是存在最合适的添加量,加入萜烯酚树脂后共混物润湿性能有所下降。

#### 4 结论

本研究以苯酚和松节油为原料,调节二者比例合成了 4 种萜烯酚树脂,并与一系列合成的丙烯酸酯均聚物和共聚物组成了不同的共混物。通过对萜烯酚树脂和共混物测试表征,得到如下结论。

(1)通过软化点测试、红外吸收光谱以及凝胶渗透色谱发现,4 种萜烯酚树脂结构和分子量都较为相似,软化点和极性随着配方中苯酚用量的增加先增大后几乎保持不变,大小顺序为:TF2100 < TF3100 < TF4100 ≈ TF5100, TF4100 与 TF5100 极性十分接近。

(2)通过 DMA 测试发现,聚丙烯酸酯分子量大小对其与萜烯酚树脂的相容性影响不大,而 3 种均聚物中,极性最大的 PMA 与萜烯酚树脂相容性最佳;增加共聚物中单体 MA 的比例,可以提高萜烯酚树脂与共聚物的相容性。萜烯酚树脂与聚丙烯酸酯的相容性与二者的结构与性质有很大关系,极性较小的萜烯酚树脂与聚丙烯酸酯相容性更好,且提高聚丙烯酸酯的极性有利于二者的相容性。

(3)在基础聚丙烯酸酯样品 E1B1M2 中分别添加了 10%、20% 和 30% 质量分数的 4 种萜烯酚树脂,通过粘接性能测试发现,萜烯酚树脂对 E1B1M2 的粘接性能有所提升,但是对共混物玻璃化转变温度和润湿性能有负面影响;不同极性的萜烯酚树脂对共混物粘接性能的影响有所差异,极性较高的萜烯酚树脂有利于持粘性能而不利于剥离强度。剥离强度的提升存在最适合的萜烯酚树脂添加量。在实际产品开发过程中,应该根据产品需求和侧重的性能来选择合适种类和添加量的萜烯酚树脂。

#### 参考文献

- [1] 赵振东,王婧卢,言菊等.松脂精细化学利用对个性化松树资源的需求分析[J].林产化学与工业,2021,41(3):1-10.
  - [2] Lligadas G, Ronda J C, Galì M, *et al.* Renewable polymeric materials from vegetable oils: A perspective[J]. *Materials Today*, 2013, 16(9):337-343.
  - [3] Sha Y, Chen X, Sun W, *et al.* Chemically recyclable rosin-based polymers[J]. *European Polymer Journal*, 2024, 213:113141.
  - [4] TAPPI. 1998 Hot Melt Symposium [C]. Atlanta: TAPPI Press, 1998.
  - [5] 王兴益.萜烯酚树脂的研制[J].兴义民族师范学院学报,2011,(6):105-109.
  - [6] Song S H. Influence of eco-friendly processing aids on silica-based rubber composites[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(20).
  - [7] Shybi A A, Siby V, Neethu V, *et al.* Solvent-based polychloroprene contact adhesives; Effect of tackifier[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022, 36(1):21-34.
  - [8] Zhang H D, Zhang F, Jiang S N, *et al.* Preparation and properties of polyacrylate pressure-sensitive adhesive emulsion for fabric pasting[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2024, 320:100511.
  - [9] Sun L, Cao S, Xue W L, *et al.* Reactive hot melt polyurethane adhesives modified with pentaerythritol diacrylate; Synthesis and properties[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, 30(11):1212-1222.
  - [10] 袁友珠,程芝.萜烯酚树脂的研制[J].南京林业大学学报(自然科学版),1989,(1):22-31.
  - [11] Paul C W, Silverberg E. Pressure-Sensitive Adhesives (PSAs) [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
  - [12] Czech Z, Wesolowska M. Development of solvent-free acrylic pressure-sensitive adhesives[J]. *European Polymer Journal*, 2007, 43(8):3604-3612.
  - [13] 卢晨晨,钱军,石一峰.不同光引发剂的丙烯酸酯 UV 热熔压敏胶的性能研究[J].现代化工,2025,45(3):189-193.
  - [14] Chen J H, Li S T, Wang X, *et al.* Synthesis and characterization of pressure-sensitive adhesives based on a naphthyl curing agent[J]. *Polymers*, 2023, 15(23):4516.
  - [15] Lovell P A, Schork F J. Fundamentals of emulsion polymerization[J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(11):4396-4441.
  - [16] Kumooka Y. Analysis of tackifier resin by field desorption mass spectrometry[J]. *Bunseki Kagaku*, 2011, 60(3):293-300. ■
- (上接第 358 页)
- [20] Liang Y C, Wen K C, Mao Y W, *et al.* Shape and size control of LiFePO<sub>4</sub> for high-performance lithium-ion batteries[J]. *ChemElectroChem*, 2015, 2(9):1227-1237.
  - [21] Wang Y, Zhang J P, Xue J J, *et al.* LiFePO<sub>4</sub>/C composites with high compact ion density as cathode materials for lithium-ion batteries with high volumetric energy density[J]. *Ionics*, 2021, 27(11):4687-4694.
  - [22] Shen C Q, Li G R, Liu L, *et al.* Facile fabrication of compact LiFePO<sub>4</sub>/C composite with excellent atomically efficient for high-energy-density Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 496:229759.
  - [23] Sun J C, Li Z F, Ren X, *et al.* High volumetric energy density of LiFePO<sub>4</sub>/C microspheres based on xylytol-polyvinyl alcohol complex carbon sources[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 773:788-795.
  - [24] 聂国昌,王涛,陈文杰,等.超低温圆柱形磷酸铁锂电池的研发[J].当代化工研究,2021(23):142-144. ■