

# 高压实磷酸铁锂制备技术探究

朱朝鹏<sup>1</sup>, 周静<sup>2\*</sup>, 彭海南<sup>1</sup>, 于思尧<sup>3</sup>

(1. 贵州磷化新能源科技有限责任公司, 贵州 贵阳 550300;

2. 黔南民族师范学院 化学化工学院, 贵州 都匀 558000;

3. 南开大学 化学学院, 天津 300350)

**摘要:**磷酸铁锂正极材料具有价格便宜、热稳定性好的优点,但磷酸铁锂正极材料的能量密度偏低。为了解决能量密度低的问题,以磷酸铁、碳酸锂、葡萄糖和聚乙二醇为原料对磷酸铁锂正极材料的压实密度进行了系统的实验,通过实验探究了不同砂磨时间、不同喷雾温度以及不同煅烧温度对磷酸铁锂压实密度的影响。实验结果表明:砂磨时间在5 min时,磷酸铁锂的压实密度可达2.41 g/cm<sup>3</sup>;随着砂磨时间的加长,压实密度呈递减趋势。当砂磨时间为1 h,喷雾温度从120 °C提高至200 °C,180 °C时压实密度最高为2.25 g/cm<sup>3</sup>;随着温度再升高,压实密度有所下降,喷雾温度对压实密度影响不明显。

**关键词:**磷酸铁锂; 能量密度; 压实密度; 砂磨

**中图分类号:** TM912    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-055X(2026)03-0037-10

当前,社会发展迅速,人们的生活水平逐步提高,随之对生活的环境更加注重绿色环保,而生活中大量化石能源的燃烧严重影响了人们生活环境。随着新能源技术行业的持续发展,新能源电池产业以及环境保护领域也都经历了迅速的发展。得益于其卓越的质量以及适中的生产成本,锂离子电池成为许多电池产品发展的主要方向。具有高安全性与较好的循环性能、物美价廉特点的磷酸铁锂电池,被迅速运用在锂离子正极材料之中<sup>[1-3]</sup>。提高其能量密度是解决磷酸铁锂正极材料问题的关键,而提高能量密度的关键在于提高压实密度<sup>[4-5]</sup>。磷酸铁锂的压实密度主要分为前驱体材料的影响以及后端成品的工艺合成过程。前端的前驱体材料颗粒大小主要取决于沉淀结晶过程的工艺参数。通过调控前驱体磷酸铁粒径来控制体系内的晶核数量避免爆发性成核,从而获得较大颗粒的磷酸铁产品。在此基础上,制备磷酸铁锂,优化其工艺过程中参数来提高磷酸铁锂的压实密度,从而优化电池材料的理化性质及电化学性能。

**收稿日期:** 2025-09-29

**基金项目:** 黔南州教育科学规划课题“基于OBE理念的民族地区学校有机化学课程高效课堂的构建及其推广”(项目编号:2022B028)。

**作者简介:** 朱朝鹏,男,贵州罗甸人,主要从事磷化工、新能源研究;周静,女,布依族,贵州都匀人,教授,主要从事磷化工、绿色化学研究;彭海南,男,黎族,贵州盘州人,主要从事磷系正极材料及其前驱体制备研究;于思尧,男,吉林通化人,主要从事锂电池制作研究。

**\*通信作者:** 周静

## 1 磷酸铁锂的结构及合成方法

### 1.1 磷酸铁锂晶体结构

$\text{LiFePO}_4$ 晶体为橄榄石结构,空间群为Pnma,晶胞参数 $a=10.334 \text{ \AA}$ , $b=6.010 \text{ \AA}$ , $c=4.693 \text{ \AA}$ ,晶胞体积 $V=291.5 \text{ \AA}^3$ (PDF#83-2092),如图1所示。

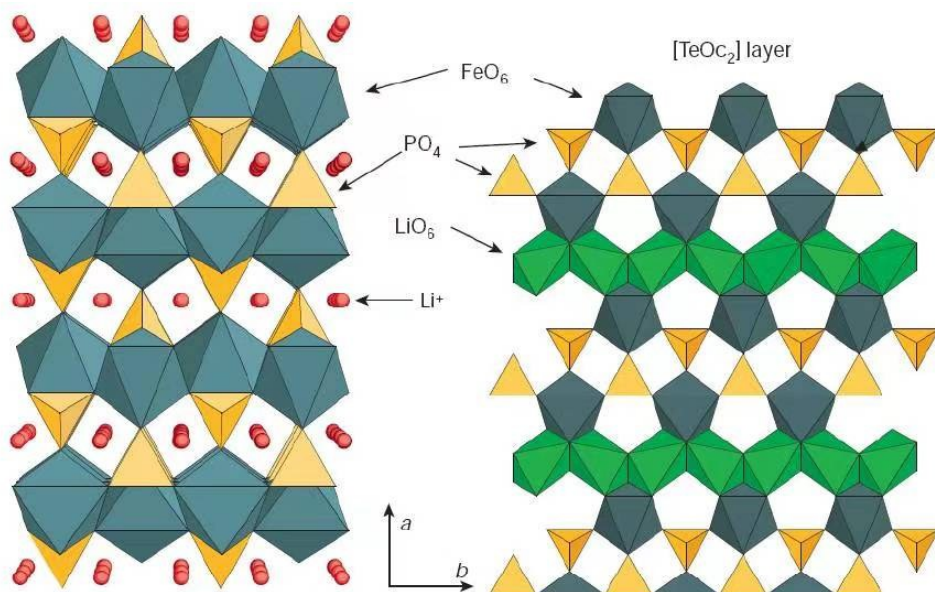


图1  $\text{LiFePO}_4$ 晶体结构示意图<sup>[6]</sup>

在图1中,O是六方密堆积,Li、Fe各占据1/4的八面体位置,P占据1/8的四面体位置,八面体在bc平面上以共棱的方式互相连接形成八面体长链,并且,在a轴方向上存在 $\text{PO}_4$ 四面体,将不同的 $\text{FeO}_6$ 八面体长链进一步相互连接,因此形成了优异的稳定结构,使磷酸铁锂材料在结构稳定性上具有独特的优势<sup>[6]</sup>。

### 1.2 磷酸铁锂合成方法

市场上主要生产厂商所采用的技术路线和材料体系基本相同,均采用锂源、磷源、铁源作为主要材料,仅在合成方法(固相法、液相法)和具体材料构成(磷酸铁、草酸亚铁、硝酸铁、氧化铁等)上有所差异。固相法工艺步骤相对简单,成本较低且易于工业化,磷酸铁锂常用该方法合成,高温固相法、碳热还原法就是最为常用的两种固相法;液相法虽能较好地控制物料晶型和粒径,但对生产环境及设备要求较高、工艺复杂,其产业化相比固相合成法难度要大,主要有水热法、共沉淀法等。

#### 1.2.1 高温固相法

高温固相法是一种比较传统且使用较广泛的方法,主要原料有铁源草酸亚铁( $\text{FeC}_2\text{O}_4$ )、磷源磷酸二氢铵( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )和锂源碳酸锂( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )等。其主要制备步骤有:称量、混合研磨、高温预分解(还原性气体环境)、再经过煅烧后可得磷酸铁锂粉末。相比之下该方法涉及的设备更简单,更适合工业化生产,缺点是合成产物颗粒较大,产品纯度低,原料混合不均匀。为了得到颗粒更小更为均一,有学者将前驱体进行纳米粉碎,然后与碳源混合、造粒后再进行煅烧后得到高品质磷酸铁锂正极材料<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2 碳热还原法

相比于高温固相法,碳热还原法则是基于高温固相法在反应原料中加入碳源,利用碳在高温下能生产还原性气体,可将三价铁还原为二价铁,更有益于制备出磷酸铁锂材料,而且碳能在成品表面形成一层碳包覆<sup>[8]</sup>,增强材料导电率,增加其电性能。

### 1.2.3 水热法

水热法采用的铁源、磷源以及锂源多为可溶性盐类,将各种原料按比例混合可在高温高压下直接合成磷酸铁锂材料。此方法相对简单且制备出的产品颗粒更小、粒径更均一,但制备过程中用到高压高温设备大大增加了生产成本,且不易于工业化生产。文倩倩等<sup>[9]</sup>用乙二醇、聚乙烯醇等为溶剂,合成了性能优异的磷酸铁锂,但溶剂法热合成的成本高,不适于商业化应用。

### 1.2.4 共沉淀法

共沉淀法通常是将各种原料按比例混合在液态环境下进行反应合成,关键控制因素在于溶剂浓度、溶液温度、pH、搅拌速度等<sup>[10]</sup>。通过此方法制备磷酸铁锂正极材料,控制好关键实验参数是制备高性能磷酸铁锂正极材料的基础。

## 1.3 磷酸铁锂的改性方法

磷酸铁锂材料虽具有环境友好、安全性高等优点,但因其自身结构特点,依然存在一些不足,如压实密度低、低温性能不理想等,针对这些缺点,学者们提出一系列改进方法,如表面包覆、离子束掺杂和控制磷酸铁锂颗粒尺寸等<sup>[11]</sup>。

### 1.3.1 表面包覆

表面包覆顾名思义是将一种导电性能更好的材料包覆在磷酸铁锂材料表面,使其具有更好的导电性能。关键在于选择什么样的材料作为包覆层,因碳具有导电性,于是有学者就选择不同碳源进行包覆改性<sup>[12]</sup>。此外,还有一些学者通过在材料表面包覆高导电的银、铜等金属或氧化物,来提高材料的导电性,但该方法成本较高,不易于工业化生产<sup>[13]</sup>。

### 1.3.2 离子掺杂

表面包覆改变了磷酸铁锂材料表面的导电性,而通过离子束掺杂则可提升其内部导电性。李立平等<sup>[14]</sup>采用铝、钛、铜等金属元素对磷酸铁锂进行掺杂,探究对磷酸铁锂电化学性能的影响。

### 1.3.3 粒径形貌控制

根据磷酸铁锂正极材料工作原理来看,在充放电工作过程中,锂离子会从正极脱嵌出来移动到负极,为了缩短锂离子扩散路径,提高充放电工作效率,可制备纳米级别的磷酸铁锂材料,改善充放电性能。通常采用水溶剂热法、溶胶凝胶法等合成的材料容易得到较小的颗粒,并且获得的产物颗粒均匀,分散性好。因此,采用纳米化和碳包覆相结合,依据有机水溶剂对磷酸铁锂的作用机理,制备出纳米级磷酸铁锂颗粒。纳米级磷酸铁锂材料,一方面有利于缩短离子的扩散路径,提高材料的循环性能;另一方面有利于扩大材料的比表面积,为界面反应提供更多的扩散通道<sup>[15]</sup>。

## 2 实验设计

### 2.1 实验流程

#### 2.1.1 前驱体磷酸铁的制备

**配液氧化:**取亚铁净化液和磷酸(85%)按铁磷比列1:0.935加入配液釜,搅拌均匀,完成配液。加入过量20%双氧水充分氧化30 min,尽可能将 $\text{Fe}^{2+}$ 完全氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ 。

**反应:**往配好的氧化液中匀速加入氨水进行反应,过程中启动搅拌器(JB-10型)快速搅拌,在线调节pH为1.88~1.90,达到指定pH后停止加入氨水,反应进行1 h,完成反应步骤。

**洗涤过滤:**将反应液浆料进行抽滤,滤饼加入(浆料与去离子水的比列1:1.2)去离子水洗涤、抽滤,完成洗涤过程。

**陈化转晶:**将上述洗涤好的反应滤饼后加入(浆料与去离子水的比列为1:1.2)去离子水,进行陈化,陈化温度为95℃,当达到设定温度后1~2 h内浆料由浅黄色变为乳白色,变白后维持1 h,完成陈化转晶过程。

**干燥煅烧:**将上述陈化浆料抽滤洗涤一次,得到滤饼放入鼓风机干燥(101-3S型)内干燥(150℃,1.5 h),得到干燥料进行破碎,最后将破碎后的干燥料放入箱式电阻炉(SX2-12-10分体式1000℃)煅烧(600℃,2 h),破碎后得到磷酸铁成品,工艺流程如图2所示。

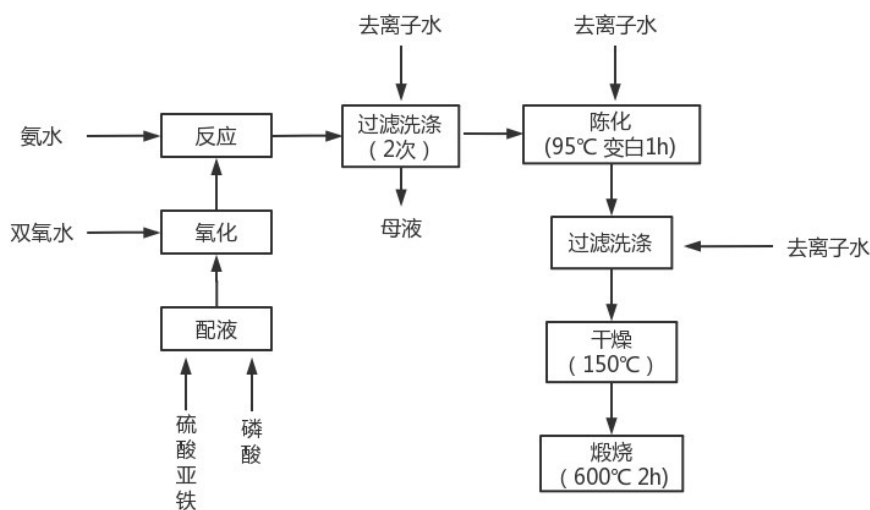


图2 前驱体磷酸铁工艺流程

#### 2.1.2 磷酸铁锂的制备

**砂磨:**将原料磷酸铁、碳酸锂、葡萄糖、聚乙二醇称量倒入250 mL烧杯中,加入150 mL去离子水并缓慢搅拌使其混合均匀,将混合浆料倒入砂磨机(M12BPS-0型)进行砂磨。

**喷雾干燥:**将砂磨好的混合浆料进行喷雾干燥,以获得颗粒大小均一的黄色粉末固体。

**煅烧:**将以上粉末固体通过管式炉(SK2-3-12TPA3型)进行煅烧,最终得到磷酸铁锂成品,工艺流程如图3所示。

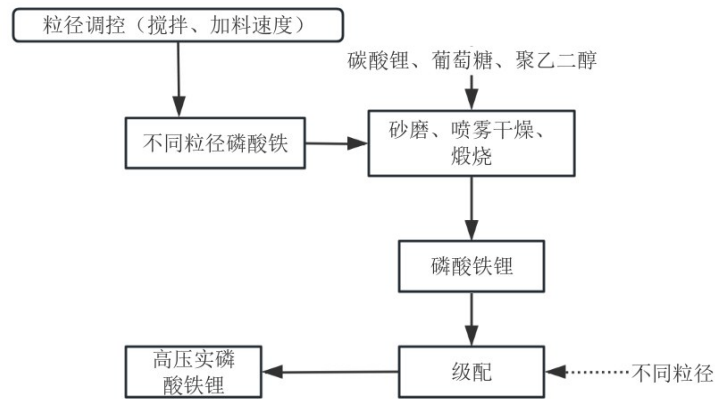


图3 磷酸铁锂工艺流程图

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 搅拌强度对磷酸铁粒径的影响

通过在沉淀反应前期快速搅拌速度,使体系内保持良好的混合状态,沉淀反应后期,降低搅拌速度,减少颗粒间的碰撞概率得到较大颗粒磷酸铁产品。重复实验4组。搅拌强度对粒径大小影响如表1所示。

表1 搅拌强度对粒径大小的影响

控制条件	序号	pH	水分/%	v/(r/min)	D <sub>10</sub> /μm	D <sub>50</sub> /μm	D <sub>90</sub> /μm	D <sub>99</sub> /μm	D <sub>100</sub> /μm
(反应前期 600 r/min, 后期300 r/min)	1	3.12	0.24	101.00	0.85	1.98	4.81	7.02	9.15
	2	2.92	0.31	109.00	0.74	1.80	3.72	28.47	50.47
	3	2.97	0.35	197.00	0.73	1.80	4.04	30.94	219.90
	4	2.99	0.24	137.00	0.67	1.55	4.00	49.21	249.50

表1中磷酸铁成品D<sub>10</sub>粒径最高为1.98 μm,均在2 μm以下,增大磷酸铁粒径效果不明显。基于低搅拌过程中磷酸铁在反应中团聚的原理,进一步实验研究,将搅拌转速分别调至100、300、500、700 r/min,通过改变搅拌速率去调控晶粒间有效碰撞的概率,从而得到不同粒径的磷酸铁粗产品。

对实验各阶段粒径大小进行取样测试分析,实验结果如表2和图4所示。

表2 成品粒径随搅拌转速变化趋势

搅拌转速/(r/min)	反应液粒径/μm	陈化液粒径/μm	干燥料粒径/μm	成品粒径/μm
100	12.47	5.47	2.80	2.96
300	10.86	4.12	1.87	2.03
500	12.06	3.45	1.92	1.96
700	9.04	3.12	1.99	1.88

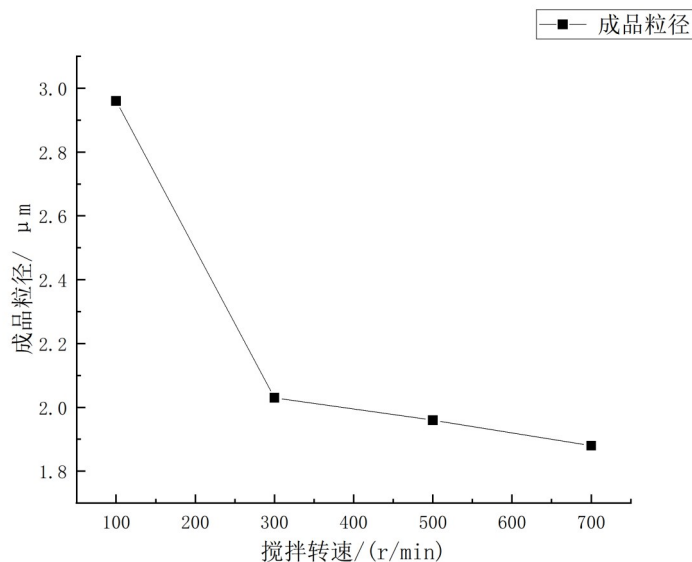


图4 不同转速对应粒径大小影响

随着搅拌速率的升高,从反应、陈化、干燥到成品整个工艺流程中粒径大小均呈现降低的趋势,特别是磷酸铁成品粒径从 $2.96\ \mu\text{m}$ (100 r/min)减小到 $1.88\ \mu\text{m}$ (700 r/min)。由此可知,在低搅拌速率下,磷酸铁颗粒间有效碰撞频率减小,更易接触团聚生成大颗粒。故可适当通过降低转速,获得大颗粒型磷酸铁成品。

### 3.2 氨水滴加入速率对磷酸铁粒径的影响

为探究反应阶段,氨水补入调控pH时,氨水加入速率对反应成核的影响,分别将同等量氨水于3、10、30 min内匀速加入进行反应,抽滤洗涤2次后,进行陈化、洗涤、干燥、煅烧得到产品,结果如表3所示。

表3 不同速率滴加氨水对应粒径大小

滴加时间/min	反应液粒径/ $\mu\text{m}$	陈化液粒径/ $\mu\text{m}$	干燥料粒径/ $\mu\text{m}$	成品粒径/ $\mu\text{m}$
3	11.77	3.55	1.59	1.41
10	10.84	2.79	1.08	1.64
30	11.76	4.53	2.07	2.32

表3显示了不同时间段内(加入氨水速率)所对应的各阶段样品粒径,由实验结果可知,成品粒径从 $1.41\ \mu\text{m}$ (3 min)增大至 $2.32\ \mu\text{m}$ (30 min),表明随着氨水加入时间的延长,成品粒径随之增大,即降低氨水加入速率可有效避免无定形磷酸铁爆发性成核,使得团聚程度增大,从而获得较大粒径的磷酸铁。

### 3.3 砂磨时间对压实密度的影响

不同砂磨时间可产生不同粒径分布,使产品中颗粒大小能有效搭配,减少颗粒之间的缝隙,对磷酸铁锂压实有一定的提升效果,结果如表4和图5所示。

表4 砂磨时间对压实的影响

砂磨时间/min	喷雾温度/°C	煅烧温度/°C	压实密度/(g/cm <sup>3</sup> )
5	150	680	2.41
10	150	680	2.36
30	150	680	2.30
60	150	680	2.20
120	150	680	2.00

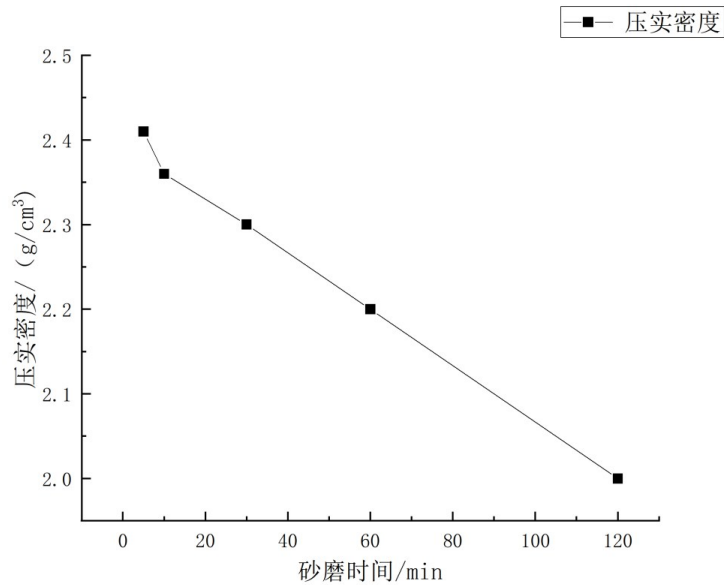


图5 不同砂磨时间对压实的影响

表4和图5显示了不同砂磨时间对磷酸铁锂压实密度的影响,由实验结果可知,成品压实密度由2.41 g/cm<sup>3</sup>(5 min)降低至2.00 g/cm<sup>3</sup>(120 min),表明随着砂磨时间的延长磷酸铁锂压实密度有所降低。因不同程度的砂磨可以使颗粒间填充效果更佳,产生更好的级配效应,故明显提高压实密度。

### 3.4 喷雾温度对压实密度的影响

对浆料进行喷雾干燥,此过程是一个造粒过程,形成一个个颗粒更均一的小球,小球间相互紧密堆叠,对提高压实密度有一定效果,结果如表5和图6所示。

表5 喷雾温度对压实的影响

砂磨时间/min	条件/喷雾温度/°C	煅烧温度/°C	压实密度/(g/cm <sup>3</sup> )
60	120	680	2.08
60	150	680	2.19
	180	680	2.25
	200	680	2.21

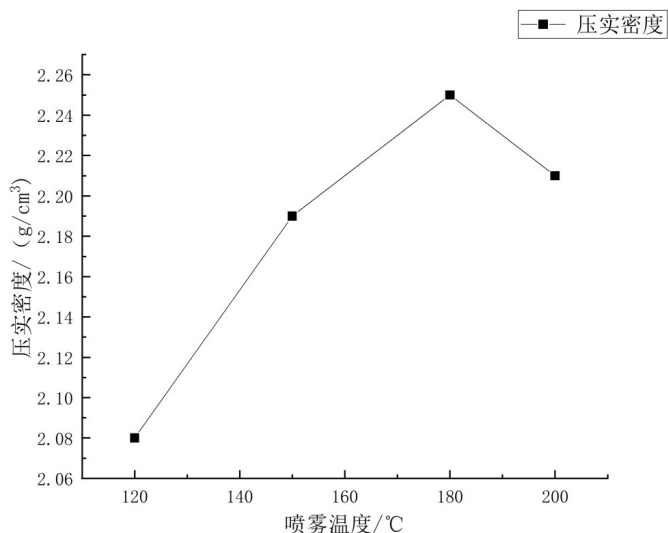


图6 不同喷雾温度对压实的影响

表5和图6表示喷雾温度对磷酸铁锂压实密度的影响,成品压实密度从2.08 g/cm<sup>3</sup>(120 °C)升高至2.25 g/cm<sup>3</sup>(180 °C)再降低至2.21 g/cm<sup>3</sup>(200 °C)。表明随着喷雾温度的上升压实也会有所增加,当温度超过180 °C时压实随温度增加而有所下降。

### 3.5 煅烧温度对压实密度的影响

将各种原料混合,砂磨时间为5 min,喷雾温度为180 °C,煅烧温度分别设置为600 °C、650 °C、700 °C、750 °C进行煅烧,得到磷酸铁锂粉末,结果如表6和图7所示。

表6 煅烧温度对压实的影响

砂磨时间/min	喷雾温度/°C	煅烧温度/°C	压实/(g/cm <sup>3</sup> )
5	180	600	2.40
		650	2.41
		700	2.43
		750	2.44

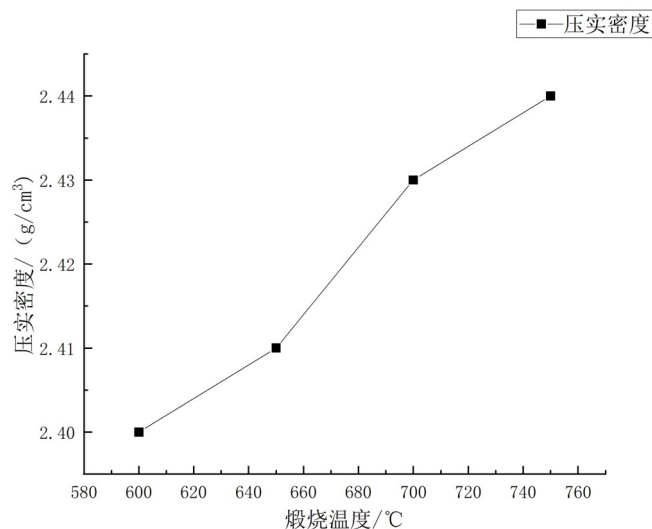


图7 不同煅烧温度对压实的影响

表 6 和图 7 表示煅烧温度对磷酸铁锂压实密度的影响,成品压实密度从  $2.40 \text{ g/cm}^3$  ( $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 升高至  $2.44 \text{ g/cm}^3$  ( $750 \text{ }^\circ\text{C}$ ),表明随着煅烧温度的升高压实密度有上升趋势。在较高的煅烧温度下,可以得到较大粒径的磷酸铁,从而在生成磷酸铁锂时产生更好的级配效果,从而提高压实密度<sup>[2,16-17]</sup>。

制备的磷酸铁锂产品在  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  管式炉中煅烧后得到 XRD 谱图,结果如图 8 所示。

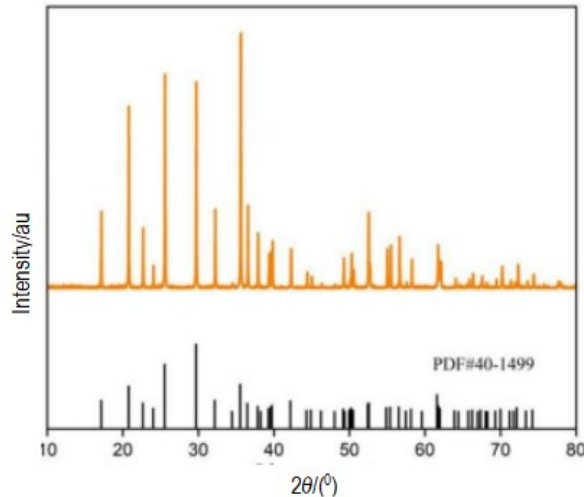


图 8  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  样品 XRD 图

图 8 中的谱图与标准卡片中的磷酸铁锂的特征峰相符,说明该煅烧产物为结晶完整、纯度高的磷酸铁锂。

## 4 研究结论

通过可行性实验研究,改变磷酸铁成核过程,获得不同粒径大小的磷酸铁成品,将其作为制备磷酸铁锂的原料,调控相关工艺参数,从而得出以下结论:

第一,降低反应阶段搅拌转速,可有效提高磷酸铁颗粒的质量。当搅拌转速为  $100 \text{ r/min}$  时,磷酸铁成品 D50 为  $2.96 \mu\text{m}$ ,当搅拌转速为  $700 \text{ r/min}$  时,磷酸铁成品 D50 为  $1.88 \mu\text{m}$ 。

第二,在反应阶段降低氨水加入速度可增大磷酸铁粒径。当控制加入氨水量、滴加速度一定时,加入时间为  $3 \text{ min}$ ,磷酸铁成品 D50 为  $1.41 \mu\text{m}$ ,加入时间为  $10 \text{ min}$ ,磷酸铁成品 D50 为  $2.32 \mu\text{m}$ 。

第三,在砂磨阶段,缩短砂磨时间可有效增大磷酸铁锂压实密度。当砂磨时间为  $5 \text{ min}$  时,制备出的磷酸铁锂压实密度为  $2.41 \text{ g/cm}^3$ ,当砂磨时间为  $2 \text{ h}$  时,磷酸铁锂压实密度为  $2.00 \text{ g/cm}^3$ 。

第四,在喷雾阶段,喷雾温度对磷酸铁锂压实密度影响不是很明显。在温度为  $120 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$  时,随着温度上升压实也会有所增加,当温度超过  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  压实随温度增加而有所下降。

第五,煅烧温度对压实结果有明显影响。当煅烧温度为  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  时,压实密度为  $2.40 \text{ g/cm}^3$ ,当煅烧温度为  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  时,压实密度为  $2.44 \text{ g/cm}^3$ ,随着温度上升压实密度也会有所增加。

综上所述,降低反应阶段搅拌转速,降低氨水加入速度,缩短砂磨时间,合适的喷雾温度和煅烧温度是获得磷酸铁锂的最佳优化条件。

## 5 参考文献

- [1] 王兵,邹野,黄琳荔,等. 磷酸铁锂系列产品工艺研究进展[J]. 山东化工,2024,53(1):137-139.
- [2] 林鹤,马亮,王全恒,等. 磷酸铁锂电池的优势及其性能对比分析[J]. 专用汽车,2024(5):92-94.
- [3] 陈帅,欧玉静,张鑫,等. 电池级磷酸铁前驱体制备方法研究进展[J]. 当代化工研究,2024(21):14-16.
- [4] 李森,于永利,吴剑扬,等. 高能量密度磷酸铁锂正极设计[J]. 储能科学与技术,2023,12(7):2045-2058.
- [5] 许汉良,伍斌,陈仁鹏,等. 添加分散剂和造孔剂制备高密度磷酸铁锂正极[J]. 电池,2024,54(1):89-93.
- [6] 李梦. 一步或两步法合成不同形貌的LiFePO<sub>4</sub>/C及其性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2019:30.
- [7] 杨凯欣. 磷酸铁锂正极材料制备研究进展[J]. 信息记录材料,2022,23(5):37-40.
- [8] 王瑞林. 锂离子电池正极材料磷酸铁锂的碳热还原法制备及电化学性能的研究[J]. 中国新技术新产品,2023(16):30-32.
- [9] 文倩倩,贾梦秋. 水热还原法制备的LiFePO<sub>4</sub>/C的性能[J]. 电池,2013,43(1):18-21.
- [10] 王紫涵,李军,陈明,等. 硝酸铁和磷酸共沉淀法制备电池级磷酸铁工艺研究[J]. 无机盐工业,2023,55(7):51-57.
- [11] 周正会,胡淑婉. 锂离子电池正极材料的研究现状[J]. 电源技术,2018,42(9):1393-1394.
- [12] 柳娜. 碳包覆对磷酸铁锂高温循环性能的影响机理[J]. 无机化学学报,2023,39(12):2287-2294.
- [13] 冯晓晗,孙杰,何健豪,等. 磷酸铁锂正极材料改性研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(2):467-486.
- [14] 李立平. 铝、钛、铜元素掺杂对磷酸铁锂正极材料性能影响的研究进展[J]. 广州化学,2022,47(5):1-8.
- [15] 苏玉长,龚瑾瑜,汤洪波,等. 水热法合成纳米LiFePO<sub>4</sub>/石墨烯复合材料的组织结构及其光学特性[J]. 矿冶工程,2015,35(5):117-120.
- [16] 许汉良,伍斌,陈仁鹏,等. 添加分散剂和造孔剂制备高密度磷酸铁锂正极[J]. 电池,2024,54(1):89-93.
- [17] 黄本赫,闫远滔,戴中秋. 压实密度对石墨基LiFePO<sub>4</sub>电化学性能的影响[J]. 科技创新与应用,2018(30):13-14.

## Research On The Preparation Technology Of High Salt Lithium Iron Phosphate

Zhu Chaopeng<sup>1</sup>, Zhou Jing<sup>2\*</sup>, Peng Hainan<sup>1</sup>, Yu Sirao<sup>3</sup>

(1.Guizhou Phosphating New Energy Technology Co.,Ltd., Guiyang 550300, China;

(2.Department of Chemistry and Chemical Engineering, Qiannan Normal College for Nationalities, Duyun 558000, China;

3.College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Lithium iron phosphate cathode material has the advantages of low cost and good thermal stability, but its the energy density is low. To address the issue of low energy density, a systematic experimental study on the compaction density of lithium iron phosphate cathode material was carried out using iron phosphate, lithium carbonate, glucose, and polyethylene glycol as raw materials. The effects of different sand milling times, spray drying temperatures, and calcination temperatures on the compacted density of lithium iron phosphate were investigated. The experimental results show that the compaction density of lithium iron phosphate can reach 2.41 g/cm<sup>3</sup> when the sand milling time is 5 min; as the sand milling time increases, the compaction density shows a decreasing trend. When the sanding time is 1 h and the spray drying temperature is increased from 120 °C to 200 °C, the highest compaction density of 2.25 g/cm<sup>3</sup> is achieved at 180 °C; further increasing the temperature leads to a decrease in compaction density. The effect of spray drying temperature on the compaction density is not significant.

**Keywords:** Lithium iron phosphate; Energy density; Compaction density; Sand milling

[责任编辑:杨 洪 江 伟]