磷酸铁合成方法及微反应器在磷酸铁合成中的应用研究进展

李茂刚，田　锐，廖富霞，龙安椿，徐绍霞

（贵州川恒化工股份有限公司，贵州 福泉　550505）

［摘　要］磷酸铁是磷酸铁锂正极材料的关键前驱体，其品质直接决定锂电池性能与成本。本文系统综述磷酸铁的主要合成方法，包括共沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法、模板法及空气氧化、微波辅助等方法，对比各方法的工艺特点、产物形貌与工业化适用性；重点阐述微反应器在磷酸铁合成中的应用进展，分析其高效传质传热、精准控温、连续化生产等优势，以及在控制粒径、提升纯度、改善批次一致性方面的作用。研究表明，微反应器可有效解决传统反应器混合不均、产品均一性差等问题，为高品质电池级磷酸的规模化制备提供新路径。最后展望了工艺优化、设备集成与智能控制等未来发展方向，为磷酸铁及磷酸铁锂材料的高效制备提供参考。

［关键词］磷酸铁；合成工艺；微反应器；锂电池前驱体；共沉淀法；材料制备

［中图分类号］TQ126.3+5；TM912.9　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）07-0069-07

Research progress on synthesis methods of iron phosphate and application of microreactors in iron phosphate synthesis

LI Maogang, TIAN Rui, LIAO Fuxia, LONG Anchun, XU Shaoxia

(*Guizhou Chanhen Chemical Co., Ltd., Fuquan* 550505, *China*)

Abstract: Iron phosphate is a key precursor for lithium iron phosphate cathode materials, and its quality directly determines the performance and cost of lithium batteries. The main synthesis methods of ferric phosphate, including coprecipitation, hydrothermal, sol gel, template, air oxidation, microwave and other auxiliary methods, are systematically reviewed. The process characteristics, product morphology and industrial applicability of each method are compared; Emphasis is placed on the application progress of microreactors in the synthesis of iron phosphate, analyzing their advantages in efficient mass and heat transfer, precise temperature control, continuous production, as well as their role in controlling particle size, improving purity, and enhancing batch consistency. Research has shown that microreactors can effectively solve problems such as uneven mixing and poor product uniformity in traditional reactors, providing a new path for the large-scale preparation of high-quality battery grade phosphoric acid. Finally, future development directions such as process optimization, equipment integration, and intelligent control are discussed, providing reference for the efficient preparation of iron phosphate and lithium iron phosphate materials.

Key words: iron phosphate; synthesis process; microreactors; lithium battery precursor; coprecipitation method; material preparation

随着居民生活品质的提升，汽车产业实现快速发展，在“双碳”目标推进与传统能源储量有限的双重背景下，高碳排放的燃油汽车向新能源汽车转型已成为必然趋势，新能源汽车也成为未来汽车技术发展的核心方向[1-2]。锂离子电池因能量密度高、安全无毒、环境友好、循环稳定性优异等特点，成为新能源汽车领域的核心研究对象[3-4]。

锂离子电池的正极材料对电池的性能有着关键性作用，常见的正极材料有三元镍钴锰（铝）酸锂、磷酸铁锂、钴酸锂、锰酸锂等[5-6]。其中，具

收稿日期：2026-04-17

作者简介：李茂刚（1992—　），男，四川江油人，工程师，研究方向为磷酸铁、磷酸铁锂制备。

通信作者：徐绍霞（1981—　），女，山东栖霞人，工程师，研究方向为磷酸铁、磷酸铁锂制备。

有橄榄石结构的磷酸铁锂具有较好热稳定性及长循环寿命的优点，并且原料铁的价格低廉、资源丰富；因此，磷酸铁锂成为动力型锂离子电池中极具研究价值的正极材料之一[7]。实际上，磷酸铁锂材料的电化学性能与前驱体磷酸铁的形貌、结构、纯度、粒径等性能指标息息相关[8-9]，而合成方法与设备是影响这些物理指标的关键因素。另外，在磷酸铁锂的原材料成本构成中，磷酸铁占比接近40%。

由此可见，优化磷酸铁的制备技术与生产设备，对提升磷酸铁锂正极材料的电化学性能至关重要。本文系统综述了磷酸铁锂前驱体磷酸铁的多种合成方法，分析了新型合成设备微反应器在液相合成磷酸铁领域的应用研究进展，并结合当前研究现状对该领域的未来发展方向进行展望，以期为研发低成本、形貌均一、性能稳定的锂离子电池正极材料前驱体提供技术思路。

1 磷酸铁的合成方法研究

磷酸铁，又称正磷酸铁，自然环境中主要以二水合物形式存在，经加热脱除结晶水生成无水磷酸铁。无水磷酸铁具有多种晶体结构，主要有：正交晶系的异磷锰铁矿、单斜晶系以及属于三方晶系的α-石英结构等[10-11]。目前，磷酸铁合成方法主要有共沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法、模板法、空气氧化法、微波法等[12]。

1.1 共沉淀法

共沉淀法也叫液相沉淀法，该方法通过向反应体系中加入沉淀剂，或通过化学反应在体系内生成沉淀剂，通过调控沉淀产物颗粒的生长速率，制备出超细磷酸铁颗粒。目前共沉淀法主要分为均相沉淀法与快速沉淀法[13]：均相沉淀法借助化学反应使溶液中的构晶离子缓慢且均匀地释放，可通过调节沉淀剂浓度控制颗粒生长速率，最终获得粒度均匀、纯度较高的磷酸铁产品；快速沉淀法是在搅拌过程中直接加入沉淀剂，使沉淀快速生成，该过程易出现局部反应不均匀问题，影响产品均一性[14]。

郑典模等[15]采用改进的均相沉淀法，以H_3PO_4为磷源、$FeSO_4·7H_2O$为铁源、乙醇为沉淀助剂和分散剂、氨水溶液为pH调节剂，成功制备了$FePO_4·xH_2O$，进一步煅烧得到$FePO_4$。Zhang等[16]利用一种能够控制微沉淀环境的微反应器研究了铁源（$Fe(NO_3)_3·9H_2O$）和磷源（$(NH_4)_3PO_4$）间的直接沉淀过程，发现Fe^{3+}的水解和混合物的pH对副产物的生成有决定性的影响；实验结果发现，加入H_3PO_4是一种抑制Fe^{3+}水解和调节混合物pH的有效方法，通过优化H_3PO_4的添加量，成功制备了平均尺寸为20 nm的磷酸铁。Guo等[17]考察了液相沉淀法制备磷酸铁过程中表面活性剂类型对其纯度、形貌、粒度的影响，优化结果表明，合理使用表面活性剂可以降低磷酸铁的杂质含量，并细化其粒径，减少颗粒团聚。Palacios等[18]在室温下以Fe_2O_3、H_3PO_4、$NH_3·H_2O$（调节pH）为原料，采用沉淀法在$n(Fe):n(P)$为1:3、pH为5的条件下陈化5 h得纳米球状的$FePO_4$。

共沉淀法制备磷酸铁的优势在于设备要求低、生产成本相对低廉，通过精准调控反应条件可制备出满足电池使用要求的高品质磷酸铁，易于实现规模化工业生产；但沉淀过程中难以精准控制体系pH，易导致产品形貌与粒度均匀性较差[19]。

1.2 水热法

水热法属于湿化学制备技术，其核心是将反应体系（通常为水溶液）置于密闭反应器中，通过特殊处理营造高温高压的反应环境，使常规条件下难溶或微溶的物质发生溶解与重结晶。水热法是无机材料制备与超细粉体材料合成的常用方法[20]。

Song等[21]以$FeCl_2$、H_3PO_4、LiCl为原料，混合密封在聚四氟乙烯内衬的不锈钢高压釜中，并在145～170 ℃下加热4～12 h，结果发现当反应时间超过8 h，得到纯相的单斜晶系$FePO_4·2H_2O$；在较短的反应时间内，初始pH为0.57，得到了单斜晶系和粒径更大的正交晶型$FePO_4·2H_2O$的混合物。赵曼等[22]采用水热法，以磷铁、磷酸、硝酸为原料制备电池级磷酸铁，研究反应过程中硝酸浓度、反应温度、反应时间及体系浓度对产品性能的影响。实验结果表明：以磷铁为原料，用水热法在一定实验条件下制备的$FePO_4·2H_2O$为正磷酸铁。Yin等[23]采用一步水热法合成磷酸铁，以H_3PO_4、尿素、$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2·6H_2O$和十二烷基硫酸钠（SDS）为原料（$n(Fe^{2+})/n(PO_4^{3-})$为1:2），在混合均匀后，转移到高压釜中，并加热到80 ℃保持12 h，自然冷却至室温后，离心收集产物，分别用乙醇和双蒸馏水依次洗涤，然后在80 ℃下干燥12 h，得到了壳厚约为40 nm的非晶态$FePO_4$空心纳米球。

水热反应在密闭容器中发生，是一种均相反应，产品粒径小，分布均匀。然而，水热法也有其自身的缺点，如技术难度高，安全性能差，并且受高压反应器容器尺寸的限制，工业化相对困难。

1.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法用含高化学活性组分的化合物作

前驱体如无机盐或金属醇盐等，通过水解、缩聚在溶液中形成稳定溶胶，再经陈化逐渐转化为凝胶，经老化、干燥、焙烧等处理后获得样品[24]。

Kahoul等[25]以$Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$、$NH_4H_2PO_4$、柠檬酸和乙二醇为原料在90 ℃条件下搅拌得到混合物溶液，在140 ℃下进一步加热，以诱导得到凝胶，在180 ℃下真空干燥2 h，得到有机聚合物前驱体；将该固态聚合物在200 ℃下预处理4 h，在不同煅烧温度（350～650 ℃）下煅烧4 h均得到晶型完整的$FePO_4$。卢英君等[26]采用溶胶–凝胶法，在连续搅拌下，将4,4－二甲酸基－二苯酯基磷酸（$HOPO(OC_6H_4COOH)_2$）作为有机磷配体溶解在蒸馏水、乙醇混合溶液中，并加入$Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$，得到$OPO(OC_6H_4COOH)_2\cdot 0.5H_2O$前驱体，经热分解得到了分布均匀的$FePO_4$。Croce等[27]采用溶胶–凝胶法以$Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$和$H_3PO_4$为原料，并加入l–抗坏血酸作为络合剂来提高前驱体的溶解度，并用5% RuO_2进行改性，添加氨水调整溶液的pH为8，在60 ℃加热后得到了凝胶，然后在100～150 ℃下干燥，在500～600 ℃煅烧得到了α–石英型$FePO_4$，结果发现添加RuO_2的$FePO_4$电极的电荷转移电阻明显低于未改性的。

溶胶–凝胶法的优点是化学反应可在较低温度下进行，能在短时间内实现分子水平的均匀混合，制备的产品均一性良好；但该方法制备的凝胶内部存在大量微孔，在干燥过程中易发生凝胶收缩，影响产品形貌与结构稳定性[28]。

1.4　模板法

模板法是在溶胶–凝胶法的基础上，通过改变模板剂来得到不同性质的材料。常用的模板剂多为有机表面活性剂，主要有阳离子表面活性剂、阴离子表面活性剂、非离子表面活性剂等，另外还可以利用微生物体系作为模板剂[29]。

Yang等[30]以$FeCl_3$、油酸钠为原料合成油酸铁，再采用模板法将油酸铁、模板剂四甲基磷酸（TDPA）加入1–十八碳烯（ODE）中，在300 ℃下反应1 h后沉淀物用正己烷洗涤几次，并在室温下干燥；然后将所得产物在400 ℃的H_2/Ar气氛中煅烧5 h后得到有序2D结构的$FePO_4$纳米片，用作锂电池正极材料时具有优异的稳定性和高分辨率。Zhou等[31]以酵母细胞为生物模板，通过沉淀法合成了具有薄片状形态的磷酸铁纳米复合体，为调节$FePO_4$纳米颗粒的生长提供了成核位点；XRD和TG-DSC结果表明，在543 ℃条件下合成了纯度高而且粒度均匀的$FePO_4$晶体。

模板法可精准调控磷酸铁的粒径与形貌，制备的产品粒度分布均匀；但该方法制备流程复杂、模板剂成本较高，难以应用于大规模工业化生产。

1.5　其他方法

除了以上常用的方法外，近年来还出现了一些其他的新方法，如空气氧化法、微波法、微乳液法等[32]。空气氧化法是利用空气或氧气代替过氧化氢作氧化剂。唐涛等[33]以H_3PO_4和$FeSO_4\cdot 7H_2O$为原料，用价格低廉的氧气或空气作氧化剂，通过氧化沉淀法一步制得晶态$FePO_4\cdot 2H_2O$。微波辐射晶化法（简称微波法）是一种较新的合成方法，其利用微波提供化学反应的热源。彭昕[34]以H_3PO_4为磷源、$Fe(NO_3)_3$为铁源，加入硝酸，在pH为0.1～0.3的高酸度条件下，采用微波加热的方式制备出电池级$FePO_4$，并研究了微波结晶过程中温度、时间、浓度及酸度对磷酸铁产品产率和粒度以及表面形貌的影响规律。微乳液法是通过微乳液对纳米材料的粒径进行精确控制，限制纳米粒子的成核、生长、聚结、团聚等过程，从而合成纳米化的材料。张世明[35]采用环己烷作油相、Triton X-100作表面活性剂、正丁醇作助表面活性剂，与水溶液混合形成微乳液，再加入$Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$和$NH_4H_2PO_4$溶液，磁力搅拌直至澄清透明，再将这两种微乳液加入反应器中，以转速350 r/min进行机械搅拌，升温到45 ℃，用氨水（1:1）调节pH为2.6，反应3 h后得到$FePO_4$。

尽管磷酸铁锂正极材料已实现大规模工业化生产，但开发新型磷酸铁制备工艺、提升磷酸铁的品质与电化学性能，仍是该领域的研究重点。

1.6　不同制备方法对比

不同磷酸铁制备方法对比见表1。

表1　磷酸铁制备方法对比

Table 1　Comparison of preparation methods for iron phosphate

合成方法	典型粒径范围	特征形貌	核心优势
共沉淀法	纳米级/微米级（多为1~5 μm）	球形或颗粒状为主，可通过调控实现片状/颗粒复合结构	工艺简单，成本低，适合大规模生产
水热法	纳米级（多为50～500 nm）	片状、空心球等特殊形貌	产物结晶度高，粒径小且均匀，可构筑特殊结构
溶胶–凝胶法	亚微米至纳米级	颗粒状，均匀性较好	纯度高，成分均匀
模板法	粒度可控	可定制多孔、球形等特定结构	可精确复制模板形貌，获得分布极窄的颗粒

2 微反应器在磷酸铁合成中的研究

微反应器由于其通道尺寸为10～1 000 μm，因此又叫“微通道”或“微结构”反应器，其比表面积可达10 000～50 000 m^2/m^3，而常规反应器比表面积一般低于1 000 m^2/m^3 [36]。因此，微反应器凭借优异的传质与传热能力，不仅显著提升能源利用率、减少环境污染，还具备易放大、可控性强、安全性高、可连续按需生产等优点。作为实现工艺强化与绿色化工的重要设备，它正推动化工材料生产向安全、清洁、节能、高效的方向发展，应用前景广阔[37]。

共沉淀法是制备磷酸铁时应用最广泛的生产方式，但传统间歇式反应釜在共沉淀制备磷酸铁过程中普遍存在混合不均匀、局部过饱和、pH波动大等问题，导致产品粒径分布宽、批次一致性差。微反应器作为一种过程强化设备，凭借其亚毫米级通道内的超短混合时间、均匀的浓度场和温度场，尤其适用于对混合与传质速率极为敏感的共沉淀法。它能够实现铁源与磷源溶液在进入反应器的瞬间均匀混合、同步成核，进而精确控制沉淀产物的铁磷比、形貌与粒径。因此，本节将基于共沉淀原理，重点阐述微反应器在连续制备电池级磷酸铁中的具体应用策略与工艺优化结果。

2.1 微反应器原理

微反应器的工作原理：基于微流体技术，通过专门设计的微结构单元对流动的反应流体进行切割与分散，使反应流体在微米级甚至更小的时空维度内实现快速混合与高效热交换（见图1）。微流体技术是一种利用数十至数百微米的微通道实现微量液体精准控制的技术，能有效提升化学反应的本质安全水平，为精细化工产品制备提供技术支撑[38]。

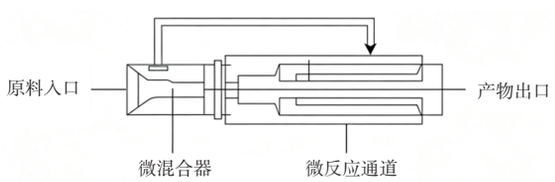

图1 微反应器系统[39]

Fig. 1 Microreactor system

2.2 微反应器分类

微反应器有多种分类方式，按操作模式可分为间歇式微反应器和连续微反应器[40-41]。其中连续式微反应器主要包括层流与分段流两种模式：层流微反应器中，流体在微通道内呈并流状态，混合过程主要依靠分子热运动扩散，混合效率相对较低，需采用低流速保证流体足够的停留时间，以提升混合效果；分段流微反应器则以不溶性液相为分散相，诱导体系形成两相流动，分散液滴或段塞内部的涡流效应可显著强化传质过程，为晶体成核与生长营造均匀的浓度场与温度场。

另外，按反应物的相态可分为液–液微反应器、气–液微反应器和气–液–固三相微反应器等[42]。从混合的方式来看，按照有无外界动力源可分为2类：被动式混合器和主动式混合器[43]。其中，被动式混合器不需要外部能量的加入，混合过程完全通过扩散或对流完成；而主动式混合则要通过外场，如电场、温度场、磁场和超声波等强化作用实现。

微反应器的特性决定了它在特定化学和化工领域的应用，有着大反应器无法比拟的优越性，主要表现在以下几个方面[44]：高换热效率和混合效率；高转化率和收率；可直接放大，无放大效应；高度集成化和连续化；精确控制反应时间；安全性高；过程环保绿色化。

2.3 微反应器用于合成磷酸铁

在锂离子电池工业中，$FePO_4$晶体必须具有高的相纯度、小尺寸和可控的粒度分布[45]。由于间歇或半间歇模式下的传质、传热效率较差，所制备的$FePO_4$晶体平均尺寸较大，粒径分布较宽，形貌不均匀，并且在不同批次之间表现出质量波动大。此外，由于多组分共沉淀过程的复杂性，很难从后续的铁盐和磷酸盐的沉淀中获得高纯度的产品。具体来说，由于铁离子易水解，且间歇或半间歇过程中浓度场和温度场不均匀，产生多种产品，如$FePO_4$、$Fe_2(HPO_4)_3$、$Fe_4(P_2O_7)_3$等[46]。为规避上述问题、实现磷酸铁纳米颗粒连续稳定量产并保障产品品质，反应体系需在分子尺度构建均匀的$FePO_4$沉淀环境，为晶体成核与生长提供均一的浓度场和温度场。而微反应器可通过反应物快速高效混合，精准实现这一条件。

Shi等[41]通过在磷酸铁的合成过程中引入振荡运动反应器（OFM），采用染料示踪实验和计算流体动力学（CFD）模拟来研究流体混合机制，并评估反应器中的混合效率。结果表明，“聚焦流”型OFM（FOFM）在混合性能上优于“Y型连接”OFM，这归因于前者在聚焦的入口微通道中增强了预混合。Villermaux-Dushman实验的结果表明，在FOFM中，几乎可以在0.16 ms内实现完全混合。因此，利用FOFM合成了高质量的磷酸铁纳米颗粒，并且可以通过调节流速或反应物浓度来控制粒径，在高产量（180 mL/min）下，生成了高纯度

（n(P)/n(Fe）为0.95～1.04）且粒径分布较窄的超小磷酸铁纳米颗粒。

赵风云等[47]采用微反应器技术对以硫酸铁和磷酸钠为原料制备纳米磷酸铁进行了研究，考察反应物流量、反应物浓度、反应温度对产品形貌及粒径的影响，并利用激光粒度分析仪和扫描电镜对产品进行了表征。实验结果表明，反应温度对磷酸铁粉体的粒径影响很大，且随温度升高产品粒径增大，在常温、硫酸铁溶液浓度为0.10～0.25 mol/L、磷酸钠溶液浓度为0.20～0.50 mol/L、硫酸铁与磷酸钠溶液流量比为4∶5、反应物料在微反应器反应通道内流速超过5 m/s的条件下，可制得形貌不规则、粒度分布较窄的纳米级磷酸铁粉体。

为解决间歇式反应导致的产品质量均一性差的共性难题，马航等[48]公开了一种用微反应器连续合成磷酸铁的方法。该方法实现无机沉淀反应的全连续化，有效避免微反应器内常见的分层、堵塞情况的发生；获得了形貌均一的磷酸铁颗粒（如图2所示），说明该方法反应体系中温度梯度、浓度梯度均一，能有效避免静态死角的产生，提高反应可控精度。彭思博等[49]公开了一种基于微反应器的磷酸铁制备方法。该方法通过预先在微反应器外配制磷酸铁浆料，再进一步将得到的浆料送入微反应器进行反应转晶，通过两步法合成方式，在利用微反应器稳定反应优势的同时，显著改善制备得到的磷酸铁的铁磷比，进而提高磷酸铁锂的体积能量密度，提高产品的整体性能。禹志宏等[50]公开了一种高品质磷酸铁的连续式制备方法。该方法采用连续微动态反应器制备磷酸铁，与传统间隙釜式反应相比，前者粒径更加均匀（D_{50}小）且杂质Mn、S含量相对更低。

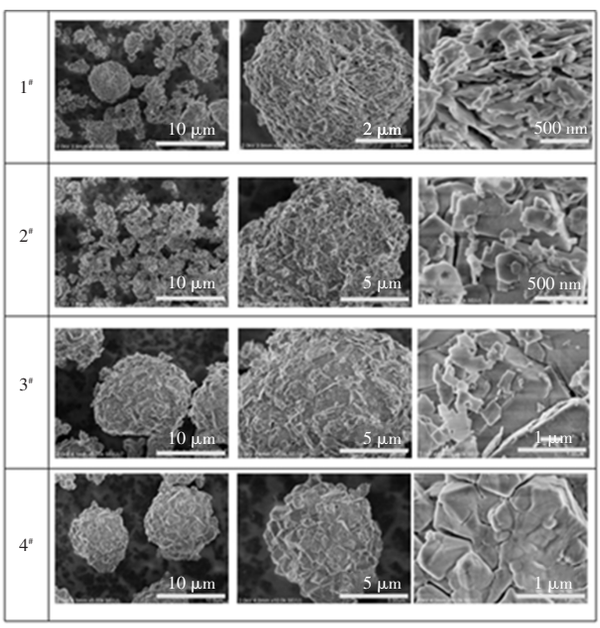

图2　微反应器连续合成法所得磷酸铁SEM[48]

Fig. 2　SEM of continuous synthesis of iron phosphate in microreactors

3　总结与展望

磷酸铁作为磷酸铁锂电池的核心前驱体，其合成工艺直接影响最终正极材料的性能，而磷酸铁锂因在使用寿命和安全性上的显著优势，已成为新能源材料领域的研究热点。本文重点聚焦磷酸铁的合成方法现状，系统综述了当前磷酸铁的主流制备技术，并重点分析了共沉淀法在微反应器中的应用研究进展，明确微反应器技术在磷酸铁合成中的独特潜力。

目前，磷酸铁锂已实现商业化量产并广泛应用于新能源汽车行业，基本满足行业基础需求，但受限于磷酸铁及磷酸铁锂本身电导率低、容量小的固有缺陷，其在大容量不间断电源（UPS）、储能电池、电动工具及高性能电动汽车等领域的应用仍受到限制。对于大容量、高功率锂离子电池，正极材料的生产成本、高低温适配性能及安全稳定性是关键制约因素。因此，优化磷酸铁合成工艺、提升材料电化学性能、降低生产成本，是该领域的核心研究方向。

微反应器凭借高效传质、精准控温、反应条件可控等优势，为磷酸铁合成提供了一条高效、绿色、可控的新路径，能够有效弥补传统间歇式反应器传质不均、反应条件波动大、产物粒径分布宽等不足。未来，微反应器在磷酸铁合成中的应用潜力将重点聚焦于通道结构优化，具体可通过设计异形微通道增大比表面积、减小流动阻力，优化通道尺寸与长径比以提升传质效率；同时结合多级串联工艺设计，实现磷酸铁合成各反应步骤的连续化、精准化控制，集成智能在线监测技术实时调控反应温度、反应物浓度等关键参数，进而突破传统间歇工艺的瓶颈，实现高性能磷酸铁及磷酸铁锂材料的低成本、大规模、高质量制造，为其在高功率、大容量储能领域的推广应用奠定基础。

［参考文献］

［1］　吴昊繁，孙田田.“双碳”目标下新能源汽车行业绿色行为研究［J］.现代工业经济和信息化，2023，13(7)：163-165.
Wu Haofan，Sun Tiantian. Research on Green Behaviors of New Energy Vehicle Industry under the “Dual Carbon” Target［J］.

Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13 (7): 163-165.

[2] 董勤, 于放. 碳中和背景下新能源汽车产业发展研究 [J]. 中国集体经济, 2022 (18): 15-17.

[3] 王君妍. 锂电池产业的发展现状研究 [J]. 经济视野, 2019 (8): 163-165.

[4] Zhao Wei, Choi W, Yoon W S. Nanostructured Electrode Materials for Rechargeable Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Electrochemical Science and Technology, 2020, 11(3): 195-219.

[5] 卢宇. 锂离子电池正极材料磷酸铁锂的制备与改性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
Lu Yu. Preparation and Optimization of Lithium iron phosphate [D].Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[6] 江雄. 锂离子电池正极材料的改性制备与性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Jiang Xiong. Preparation and Properties of Modified Cathode Materials for Lithium-Ion Battery [D].Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[7] 崔宇, 刘文江. 新能源汽车锂离子动力电池技术发展现状及前景分析 [J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(2): 41-48.
Cui Yu, Liu Wenjiang. Development and Promises of Li-ion Power Battery Technology for New Energy Vehicles [J].Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42 (2): 41-48.

[8] 姚停, 徐婷, 宋磊, 等. 磷酸铁形貌对磷酸铁锂倍率性能的影响 [J]. 电池, 2020, 50(1): 54-57.
Yao Ting, Xu Ting, Song Lei, et al. Effects of morphology of ferric phosphate on rate capability of lithium iron phosphate [J]. Battery, 2020, 50 (1): 54-57.

[9] 马志鸣, 肖仁贵, 廖霞, 等. 片层纳米结构磷酸铁制备及对磷酸铁锂电性能的影响 [J]. 材料导报, 2018, 32(10): 3325-3331.
Ma Zhiming, Xiao Rengui, Liao Xia, et al. Preparation of the Lameller Nanostructure Iron Phosphate and Its Effect on the Electrochemical Performance of Lithium Iron Phosphate [J]. Materials Reports, 2018, 32 (10): 3325-3331.

[10] 任相宇, 刘少葵, 刘勇奇, 等. 磷酸铁前驱体制备方法研究进展 [J]. 矿冶工程, 2022, 42(3): 92-95.
Ren Xiangyu, Liu Shaokui, Liu Yongqi, et al. Technical Progress in Preparation of Iron Phosphate Precursor [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42 (3): 92-95.

[11] Yang Shoufeng, Song Yanning, Zavalij P Y, et al. Reactivity, stability and electrochemical behavior of lithium iron phosphates [J]. Electrochemistry Communications, 2002, 4(3): 239-244.

[12] 章洪涛. 球形磷酸铁前驱体的制备过程研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
Zhang Hongtao. Study on Preparation Process of Spherical Iron Phosphate Precursor [D].Tianjin: Tianjin University, 2019.

[13] 伍丽萍. 基于常温醇水体系的均相沉淀法制备超细(纳米) $FePO_4$ [D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
Wu Liping. Based on the Normal-temperature Alcohol-water System to Prepare (Ultrafine) Nano $FePO_4$: by Homogeneous Precipitation Method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.

[14] 李超, 刘述平, 冯雪茹. 磷酸铁锂前驱体磷酸铁的研究进展 [J]. 广州化工, 2017, 45(24): 17-19.
Li Chao, Liu Shuping, Feng Xueru. Research Progress on Ferric Phosphate in Precursor of Lithium Iron Phosphate [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45 (24): 17-19.

[15] 郑典模, 潘鹤政, 伍丽萍, 等. 超细磷酸铁的制备及其电化学性能研究 [J]. 电源技术, 2015, 39(1): 58-61.
Zheng Dianmo, Pan Hezheng, Wu Liping, et al. Study on preparation and electrochemical of ultrafine $FePO_4$ [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39 (1): 58-61.

[16] Zhang Tongbao, Xin Dawei, Lu Yangcheng, et al. Direct Precipitation for a Continuous Synthesis of Nanoiron Phosphate with High Purity [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(16): 6723-6729.

[17] Guo Ju, Yu Mei, Wu Fuyong. Preparation of high purity iron phosphate based on the advanced liquid-phase precipitation method and its enhanced properties [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2020, 287: 121346.

[18] Palacios E, Leret P, Fernández J F, et al. Synthesis of amorphous acid iron phosphate nanoparticles [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(10): 1-7.

[19] 张建利. 沉淀法制备磷酸铁锂的研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
Zhang Jianli. Study of Lithium Iron Phosphate Prepared by Aqueous Precipitation [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011.

[20] 叶焕英. 纳米片磷酸铁和磷酸铁锂的制备与表征 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
Ye Huanying. Preparation and Characterization of $FePO_4$ and $LiFePO_4$ Nanosheets [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.

[21] Song Yanning, Zavalij P Y, Suzuki M, et al. New Iron (III) Phosphate Phases: Crystal Structure and Electrochemical and Magnetic Properties [J]. Inorganic Chemistry, 2002, 41(22): 5778-5786.

[22] 赵曼, 肖仁贵, 廖霞, 等. 水热法以磷铁制备电池级磷酸铁的研究 [J]. 材料导报, 2017, 31(10): 25-31.
Zhao Man, Xiao Rengui, Liao Xia, et al. Hydrothermal Preparation of Battery-grade Iron Phosphate from Ferro-phosphorus [J]. Materials Reports, 2017, 31 (10): 25-31.

[23] Yin Yanjing, Wu Ping, Zhang Hui, et al. Enhanced cathode performances of amorphous $FePO_4$ hollow nanospheres with tunable shell thickness in lithium ion batteries [J]. Electrochemistry Communications, 2012, 18: 1-3.

[24] Danks A E, Hall S R, Schnepp Z. The evolution of 'sol-gel' chemistry as a technique for materials synthesis [J]. Materials Horizons, 2016, 3(2): 91-112.

[25] Kahoul A, Hammouche A. Electrochemical performances of $FePO_4$-positive active mass prepared through a new sol-gel method [J]. Ionics, 2010, 16(2): 105-109.

[26] 卢英君, 徐彦宾, 杨汝栋, 等. 新法合成二次锂电池电极材料 $FePO_4$(英) [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007 (4): 144-146.
Lu Yingjun, Xu Yanbin, Yang Rudong, et al. A versatile method for preparing $FePO_4$ as a promising electrode material for rechargeable lithium batteries [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2007 (4): 144-146.

[27] Croce F, D'epifanio A, Reale P, et al. Ruthenium oxide-added quartz iron phosphate as a new intercalation electrode in

rechargeable lithium cells [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2003, 150(5): A576-A581.

[28] 鲁劲华. 电池级磷酸铁的制备与改性研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.
Lu Jinhua. Preparation and Modification of Battery-Grade Iron Phosphate [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.

[29] 赵曼. 水热法以磷铁制备电池级磷酸铁及改性研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2017.
Zhao Man. Research on the preparation and modification of battery-grade iron phosphate from ferro-phosphorus by hydrothermal method[D].Guiyang: Guizhou University,2017.

[30] Yang Dan, Lu Ziyang, Rui Xianhong, et al. Synthesis of Two-Dimensional Transition-Metal Phosphates with Highly Ordered Mesoporous Structures for Lithium-Ion Battery Applications [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53(35):9352-9355.

[31] Zhou Weijian, He Wen, Zhang Xudong, et al. Biosynthesis of iron phosphate nanopowders[J]. Powder Technology, 2009, 194(1-2): 106-108.

[32] 马航, 查坐统, 王君婷, 等. 锂离子电池前驱体磷酸铁合成方法研究现状及展望[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(3):19-22,52.
Ma Hang, Zha Zuotong, Wang Junting, et al. Research status and phosphate of synthesis method of iron phosphate as lithium battery precursor [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38 (3):19-22,52.

[33] 唐涛, 孙少先, 应皆荣. 空气和氧气氧化沉淀法制备$FePO_4 \cdot 2H_2O$及$LiFePO_4$[J]. 电源技术, 2020, 44(1):17-20.
Tang Tao, Sun Shaoxian, Ying Jierong. Preparation of $FePO_4 \cdot 2H_2O$ via air and oxygen oxidizing precipitation and downstream product $LiFePO_4$ [J].Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44 (1): 17-20.

[34] 彭昕. 微波结晶法制备电池级磷酸铁研究 [D]. 贵阳:贵州大学, 2015.
Peng Xin. Study on Preparation of Battery-grade Iron Phosphate by Microwave Crystallization Method [D]. Guiyang: Guizhou University,2015.

[35] 张世明. 新型锂离子电池正极材料研究与探索 [D]. 上海:上海电力学院, 2013.
Zhang Shiming. Research and Exploration on New Cathode Materials for Lithium Ion Batteries [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power,2013.

[36] 张经纬, 周弋惟, 陈卓, 等. 微反应器内的有机合成前沿进展[J].化工学报, 2022, 73(8):3472-3482.
Zhang Jingwei, Zhou Yiwei, Chen Zhuo, et al. Advances in frontiers of organic synthesis in microreactor [J]. CIESC Journal, 2022, 73(8):3472-3482.

[37] 冯斐斐, 王晓丹. 气液微反应器研究及展望[J]. 当代化工, 2017, 46(5):944-948.
Feng Feifei, Wang Xiaodan. Research and Prospect of Gas-Liquid Micro-reactors [J]. Contemporary Chemical Industry, 2017,46 (5):944-948.

[38] 刘冠颖, 方玉诚, 郭辉进, 等. 微反应器发展概况[J]. 当代化工, 2010, 39(3):315-318.
Liu Guanying, Fang Yucheng, Guo Huijin, et al. Development Overview of Microreactors [J].Contemporary Chemical Industry, 2010,39 (3):315-318.

[39] 朱海.微通道反应器内负载型纳米材料合成的研究及应用[D]. 杭州:浙江大学,2022.
Zhu Hai. Research and application of synthesis of supported nanomaterials in microchannel reactors [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2022.

[40] Kimin P, Bumjin G, Alan Jiwan Y, et al. Mixed-Valence iron phosphate as an effective catalytic host for the High-Rate Lithium-Sulfur battery [J]. Chemical Engineering Journal, 2022,435:134814.

[41] Shi Zuchun , Wei Shixiao , Xie Tingliang ,et al. High-throughput synthesis of high-purity and ultra-small iron phosphate nanoparticles by controlled mixing in a chaotic microreactor [J]. Chemical Engineering Science, 2023, 280:14.

[42] 韦广梅, 曾尚红. 微反应器的发展现状[J]. 世界科技研究与发展, 2005 (5):51-56.
Wei Guangmei, Zeng Shanghong. Reviews on Development of Microreactors [J].World Sci-Tech R&D,2005 (5):51-56.

[43] 王瑞金. 微通道中流体扩散和混合机理及其微混合器的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
Wang Ruijin. Research on the Mechanism of Diffusion and Mixing in the Micro-channel Flow and Micro-mixer [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2005.

[44] 张恭孝, 王者辉. 微反应器技术及其研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(2):52-56.
Zhang Gongxiao, Wang Zhehui. Research progress in microreactor technology [J].Modern Chemical Industry,2015,35 (2):52-56.

[45] 陈胜文, 李洪, 刘利, 等. 磷酸铁的制备工艺及应用展望[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(11):37-39.
Chen Shengwen, Li Hong, Liu Li, et al.Preparation Technology and Application Prospect of Iron Phosphate [J].Chemical Fiber & Textile Technology,2021,50 (11):37-39.

[46] Cao Zhihe, Ma Baozhong, Wang Chengyan, et al. Thermodynamic analysis and application for preparing $FePO_4$ from nitric acid pressure leach laterite residue by selective leaching in phosphoric acid and induced precipitation [J]. Hydrometallurgy, 2022, 212: 105896.

[47] 赵风云, 王建英, 高卿, 等. 微反应器技术制备纳米磷酸铁的研究与表征[J].无机盐工业, 2012, 44(3):22-24.
Zhao Fengyun, Wang Jianying, Gao Qing, et al. Preparation and characterization of nano-sized ferric phosphate with microreactor [J]. Inorganic Chemicals Industry,2012,44 (3):22-24.

[48] 马航, 贺豫娟, 刘波, 等. 一种用微反应器连续合成磷酸铁的方法:202310411622.2[P].2023-07-18.

[49] 彭思博, 张钰珊, 刘志成, 等. 一种基于微反应器的磷酸铁制备方法:202410299939.6[P]. 2024-07-02.

[50] 禹志宏, 许坤, 吕静, 等. 一种高品质磷酸铁的连续式制备方法:202311456457.9[P]. 2024-03-01.