磷酸铁合成及脱水反应的热力学分析①

秦存鹏[1]，时振栓[1]，饶明璐[1]，王冰[1]，任翔[1]，陈若葵[1]，阮丁山[1]，王皓[2,3]
（1.广东邦普循环科技有限公司，广东 佛山 528100；2.宜昌邦普循环科技有限公司，湖北 宜昌 443200；3.宜昌市电池循环与绿色低碳重点实验室，湖北 宜昌 443200）

摘　要：系统评估了铵法、钠法和铁法合成二水磷酸铁（$FePO_4 \cdot 2H_2O$）的热力学特性，揭示了其脱水过程的相变行为，为选择合适工业合成路线提供理论依据。采用 HSC Chemistry 6.0 软件计算 3 种工艺核心反应的焓变（ΔH）、熵变（ΔS）、吉布斯自由能变（ΔG）及反应平衡常数对数（lg$K$），结合热重-差示扫描量热（TD-DSC）实验验证脱水过程热力学数据。结果表明，钠法合成反应的 ΔG 最低、lg$K$ 最高，表明其热力学自发性和反应速率最优，铵法次之，铁法表现最差；TG-DSC 结果显示，二水磷酸铁脱水时在 709.9 ℃发生放热，对应 $FePO_4$ 从 α 石英型结构向 β 石英型结构的晶型转变。钠法兼具高自发性与快速反应特性，是具有热力学优势的工业合成方法。

关键词：磷酸铁；吉布斯自由能变；晶型转变；脱水反应；热力学分析；合成反应
中图分类号：O642　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.024
文章编号：0253-6099(2025)06-0134-06

Thermodynamic Analysis of Iron Phosphate Synthesis and Dehydration Reactions

QIN Cunpeng[1], SHI Zhenshuan[1], RAO Minglu[1], WANG Bing[1], REN Xiang[1], CHEN Ruokui[1], RUAN Dingshan[1], WANG Hao[2,3]
(1. *Guangdong Brunp Recycling Technology Co., Ltd., Foshan* 528100, *Guangdong*, *China*; 2. *Yichang Brunp Recycling Technology Co., Ltd., Yichang* 443200, *Hubei*, *China*; 3. *Yichang Key Laboratory of Battery Cycle and Green Low Carbon Technology*, *Yichang* 443200, *Hubei*, *China*)

Abstract: Iron phosphate dihydrate ($FePO_4 \cdot 2H_2O$) is usually synthesized via three technical routes, including ammonium process, sodium process and iron process. A systematical evaluation of its thermodynamic properties is presented, which can reveal the phase transition behavior of iron phosphate dihydrate during the dehydration process, and provide a theoretical basis for selection of technical route for industrial synthesis. The enthalpy change (ΔH), entropy change (ΔS), Gibbs free energy change(ΔG), and logarithm of the reaction equilibrium constant (lg$K$) of the core reaction of those three processes are calculated by using HSC Chemistry 6.0 software, and the thermodynamic data of dehydration process are verified by performing a thermogravimetry-differential scanning calorimetry (TG-DSC) experiment. The results show that the synthesis by sodium process has the lowest ΔG and the highest lg$K$, indicating its thermodynamic spontaneity and reaction rate are optimum, followed by the ammonium process, while the iron process presents the worst performance. The TG-DSC experiment results show that the dehydration process of iron phosphate dihydrate is exothermic at 709.9 ℃, corresponding to the transformation of $FePO_4$ from α-quartz phase to β-quartz phase. Featuring high spontaneity and rapid reaction, the sodium process is considered as a industrial synthesis with thermodynamic advantage.
Key words: iron phosphate; Gibbs free energy change; crystal phase transformation; dehydration reaction; thermodynamic analysis; synthesis reaction

磷酸铁作为具有多维应用潜力的功能材料，在新型电极材料开发、能源存储及工业废水重金属处理等领域展现出广泛的应用前景[1-2]。尽管其产业化应用领域广泛，但多元化的合成路径导致产物晶体结构、电

① **收稿日期**：2025-06-25
作者简介：秦存鹏（1992—），男，山东枣庄人，硕士，工程师，研究方向为锂离子电池正极材料研发及产业化。E-mail：qincunpeng@brunp.com.cn
通信作者：阮丁山（1986—），男，江西九江人，博士，高级工程师，研究方向为锂离子电池正极材料研发及产业化。E-mail：ruandingshan@brunp.com.cn

化学活性等关键性能指标存在显著差异,同时不同工艺在过程能耗及环境影响等方面均有着显著影响[3]。

当前磷酸铁工业化生产主要采用铵法、钠法与铁法三种技术路线[4],各技术路线具有鲜明的工艺特征。铵法工艺[5-7]以硫酸亚铁-磷酸/磷酸一铵体系为基础,通过过氧化氢氧化与氨水调控 pH 值生成二水磷酸铁($FePO_4 \cdot 2H_2O$),该技术凭借成熟稳定的工艺参数和副产品硫酸铵的可资源化特性,在成本控制方面具有竞争优势。钠法工艺[8-9]则是以磷酸和硫酸亚铁为基础,通过加入过氧化氢作为氧化剂,并以氢氧化钠替代氨水调控 pH 值,虽简化了反应过程,但钠盐副产物的处理成本抬升了整体成本。铁法工艺[10]则是利用磷酸与铁粉直接反应生成目标产物,其副产物仅为氢气,环保压力较小,废水产出少,具有环境友好性,但受限于金属铁原料价格波动,相比钠法和铵法工艺无成本优势。

从热力学角度解析不同技术路线差异,可为工艺优化提供理论支撑。反应焓变(ΔH)[11]反映了反应过程中的热效应,有助于评估反应的放热或吸热性质;反应熵变(ΔS)则体现了系统混乱度的变化,对于判断反应的自发性具有重要意义;吉布斯自由能变(ΔG)[12]则综合了焓变和熵变的影响,是判断反应能否自发进行的关键指标。为了满足这一需求,HSC Chemistry 6.0[13-14]作为一款功能强大的热力学模拟软件,其集成的高精度热力学数据库与 Reaction Equations 模块,可系统计算各工艺核心反应在不同温度条件下的 ΔH、ΔS、ΔG 及平衡常数($\lg K$),实现反应路径的量化对比,通过数据分析对比不同技术的能量变化、反应自发性和可行性等方面的差异,进而讨论各方法的优劣。

鉴于铵法、钠法与铁法在工艺经济性、环境兼容性及产物品质方面呈现显著的技术特征与局限性,本文通过模拟合成、脱水全流程热力学过程,预测了不同工艺路线的能量需求,基于热力学参数窗口选择筛选出合适工艺路线。针对二水磷酸铁脱水过程,TG-DSC 与 HSC Chemistry 6.0 协同分析表明,焓变由吸热转变为放热行为与晶体物相转变过程密切关联,这揭示了二水磷酸铁脱水为无水磷酸铁的热力学特性及其自发性。以上研究为设计低能耗、环境友好的磷酸铁合成路径提供了理论框架,其方法论对过渡金属磷酸盐材料的绿色制备具有普适性指导意义。

1　实验

1.1　实验试剂及仪器

实验试剂主要包括还原铁粉(质量分数 99%)、磷酸[分析纯,浓度(质量分数,下同)85%]、双氧水(分析纯,浓度 27.5%)、纯水(电导率不高于 10 μS/cm)。

实验仪器主要包括玻璃反应釜(GYY-10L,郑州锐思奇仪器设备有限公司)、循环水式真空泵[SHZ-D(Ⅲ)型,河南省予华仪器设备有限公司]、多参数分析仪(雷磁 DZS-706-A,上海仪电科学仪器股份有限公司)、台式真空干燥箱(DZF-6030A,上海一恒科学仪器有限公司)、热重-差示扫描量热仪(STA449F3 型,TG-DSC,德国 NETZSCH)。

1.2　实验步骤及方法

将 3 335 g 浓度 85%的磷酸与 6 115 g 纯水在配料釜中混合为浓度 30%的稀磷酸溶液;调整配料釜搅拌转速为 350 r/min,投加 600 g 还原铁粉,升温至 80 ℃加热 10 h,过滤得磷酸二氢亚铁溶液,滤液中 Fe/P 物质的量比约 1∶2.7;取 8 L 金属滤液注入反应釜,升温至 80 ℃,滴加 730 g 过氧化氢,滴加时间 60 min,然后升温至 90 ℃陈化 120 min;陈化后浆料洗涤干燥,制得磷酸铁粉末,置于热分析仪中进行热分析。

2　实验结果及讨论

2.1　二水磷酸铁的合成工艺路线及反应原理

二水磷酸铁的合成路线分为铵法、钠法、铁法等,以下根据 3 种路线分别列出相应的合成工艺,并列出核心化学反应式。

2.1.1　铵法工艺

铵法工艺基于亚铁氧化-磷酸盐共沉淀原理。

1)亚铁氧化。以 H_2O_2 为氧化剂,在酸性介质中将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+},反应式如下:

$$2FeSO_4 + H_2O_2 + H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \quad (1)$$

2)磷酸铁沉淀结晶。通过 NH_4OH 调节体系 pH 值至 1.8~2.2,促使 Fe^{3+} 与 PO_4^{3-} 形成无定形磷酸铁沉淀,并经陈化、转晶为二水磷酸铁,反应式如下:

$$Fe_2(SO_4)_3 + 4NH_4OH + 2H_3PO_4 = 2FePO_4 \cdot 2H_2O(s) + 2(NH_4)_2SO_4 + H_2SO_4 \quad (2)$$

3)铵法工艺总反应式可表示为:

$$2FeSO_4 + H_2O_2 + 4NH_4OH + 2H_3PO_4 = 2FePO_4 \cdot 2H_2O(s) + 2H_2O + 2(NH_4)_2SO_4 \quad (3)$$

2.1.2　钠法工艺

钠法工艺采用氢氧化钠替代氨水作为沉淀剂。

1)亚铁氧化。反应过程与铵法相同,化学反应见式(1)。

2)磷酸铁沉淀结晶。通过 NaOH 调节体系 pH 值至 1.8~2.2,促使 Fe^{3+} 与 PO_4^{3-} 形成无定型磷酸铁沉

淀,并经陈化、转晶为二水磷酸铁:

$$Fe_2(SO_4)_3 + 4NaOH + 2H_3PO_4 = 2FePO_4 \cdot 2H_2O(s) + 2Na_2SO_4 + H_2SO_4 \quad (4)$$

3) 钠法工艺总反应式可表示为:

$$2FeSO_4 + H_2O_2 + 4NaOH + 2H_3PO_4 = 2FePO_4 \cdot 2H_2O(s) + 2H_2O + 2Na_2SO_4 \quad (5)$$

2.1.3 铁法工艺

铁法通过金属铁溶解、亚铁氧化实现磷酸铁合成。

1) 金属铁溶解。铁与磷酸反应生成 $Fe(H_2PO_4)_2$ 并释放 H_2:

$$Fe + 2H_3PO_4 = Fe(H_2PO_4)_2 + H_2(g) \quad (6)$$

2) 亚铁氧化沉淀。H_2O_2 将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}:

$$2Fe(H_2PO_4)_2 + H_2O_2 + 2H_2O = 2FePO_4 \cdot 2H_2O(s) + 2H_3PO_4 \quad (7)$$

3) 铁法工艺总反应式可表示为:

$$2Fe + H_2O_2 + 2H_3PO_4 + 2H_2O = 2FePO_4 \cdot 2H_2O(s) + 2H_2(g) \quad (8)$$

2.2 不同工艺路线热力学分析

基于 HSC Chemistry 6.0 热力学软件对铵法、钠法及铁法总反应式进行热力学计算,包括各反应的焓变(ΔH)、吉布斯自由能变(ΔG)、熵变(ΔS)及反应平衡常数对数($\lg K$),以评估其热力学稳定性和反应自发性[11],其中温度相关性曲线数据均通过 HSC Chemistry 6.0 软件内置数据库生成。

2.2.1 ΔH 分析

ΔH 的温度依赖性如图 1 所示。3 种工艺的 ΔH 在计算温度区间内均为负值,表明所有反应均为放热反应[13],说明反应在动力学上是有利的,其中,铵法、钠法合成过程焓变接近,铁法放热程度更低,铁法在热力学上表现得更不利,可能导致反应更慢完成。

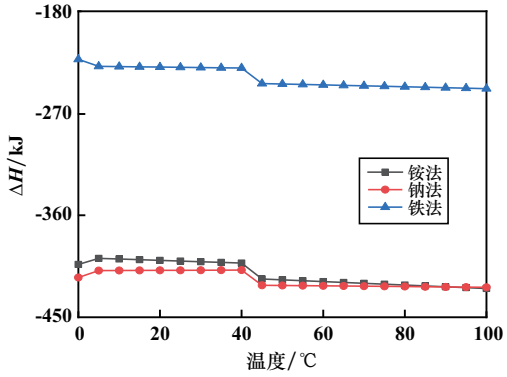


图 1 ΔH 的温度依赖性

Fig. 1 Temperature dependence of ΔH

2.2.2 ΔG 分析及反应自发性

根据 Gibbs 公式,当化学反应中 $\Delta G<0$ 时,化学反应可以正向进行[15]。ΔG 的温度依赖性如图 2 所示。3 种工艺的 ΔG 均为负值,表明在标准条件下反应均具有热力学可行性。钠法、铵法、铁法的 ΔG 依次增大,表明自发反应依次减弱,铁法的 ΔG 最大,表明该反应可能需要更多的能量输入。

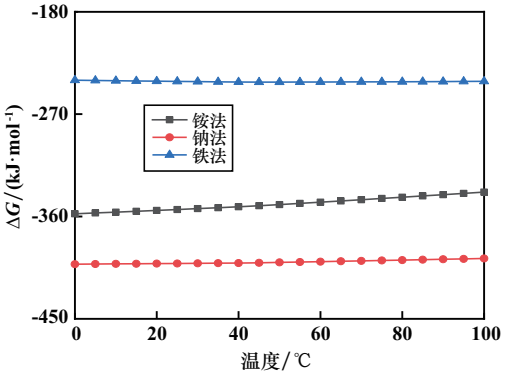


图 2 ΔG 的温度依赖性

Fig. 2 Temperature dependence of ΔG

2.2.3 ΔS 分析及过程有序度

ΔS 的温度依赖性如图 3 所示。铁法工艺的 ΔS 显著高于铵法和钠法,这归因于反应(8)中气态 H_2 的生成显著增加了体系的混乱度。温度升高导致所有反应的 ΔS 均下降,铵法、钠法的 ΔS 较铁法 ΔS 低,反映了生成物的分子排列相对有序。

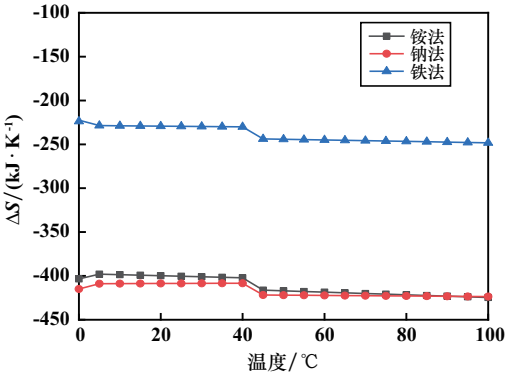


图 3 ΔS 的温度依赖性

Fig. 3 Temperature dependence of ΔS

2.2.4 $\lg K$ 分析及反应进程预测

$\lg K$ 的温度依赖性如图 4 所示。钠法、铵法、铁法的 $\lg K$ 依次减小,其中钠法的 $\lg K$ 显著高于铵法和铁法的 $\lg K$,表明在平衡状态下钠法具有较高的反应速率。

热力学分析表明,钠法具有极优的热力学驱动力(ΔG)与动力学优势($\lg K$),适合需要快速放热与高产率的工业化场景;尽管铵法的 ΔG 和 $\lg K$ 绝对值略低于钠法的相应值,但结合其副产物 $(NH_4)_2SO_4$ 的经济价值,该法在低成本领域具有独特的价值;铁法受限于较高的

ΔG 和较低的 lg$K$,在热力学和动力学方面不占优势,但其零废水排放特征适用于环保优先的特定生产体系。

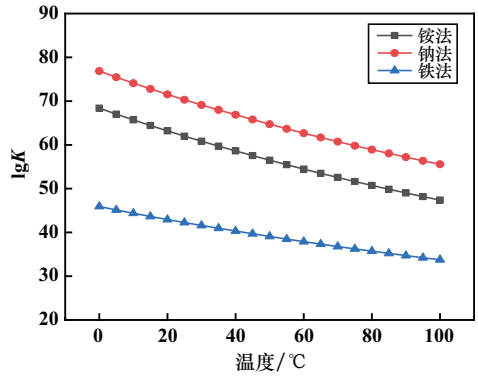


图 4　lg$K$ 的温度依赖性

Fig.4　Temperature dependence of lg$K$

2.3　二水磷酸铁脱水过程热力学与实验验证

2.3.1　脱水反应热力学参数温度依赖性

二水磷酸铁($FePO_4 \cdot 2H_2O$)在高温下向无水磷酸铁($FePO_4$)的转化是一个热力学驱动的物相转变过程,其核心反应可表述为:

$$FePO_4 \cdot 2H_2O \xlongequal{} FePO_4 + 2H_2O(g) \quad (9)$$

利用 HSC Chemistry 6.0 软件,计算了反应(9)的 ΔH、ΔG、ΔS 及 lg$K$ 值,进而分析其随温度的变化规律,并结合热重分析(TG)和差示扫描量热法(DSC)结果,深入探讨其热力学特性及其相互关系。图 5 为脱水反应 ΔH 和 ΔS 的温度依赖性。脱水过程中,温度低于 709.9 ℃时,$\Delta H > 0$,表明此阶段脱水需吸收热量;温度高于 709.9 ℃时,$\Delta H < 0$,表明高温下可能伴随晶格重构放热,709.9 ℃为关键相变温度。ΔS 曲线在整个温区均保持正值,这与气态 H_2O 生成导致的体系无序度升高直接相关;随着温度升高,ΔS 降低,主要原因是结晶水脱除温度较低,高温时已无法产生气态 H_2O,紊乱程度降低。

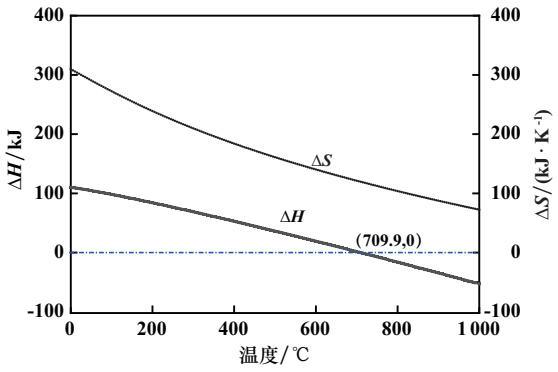


图 5　脱水反应 ΔH 和 ΔS 的温度依赖性

Fig.5　Temperature dependence of ΔH and ΔS for dehydration process

图 6 为脱水过程 ΔG、lg$K$ 与温度的关系图。87.5 ℃时,脱水反应的 $\Delta G = 0$,lg$K = 0$。随着温度升高,ΔG 线性降低,lg$K$ 缓慢升高。温度低于87.5 ℃时,$\Delta G > 0$,lg$K < 0$,脱水反应无法正向进行;温度高于 87.5 ℃时,$\Delta G < 0$,lg$K > 0$,脱水反应自发趋势增强,进一步验证了高温对反应进程具有促进作用。

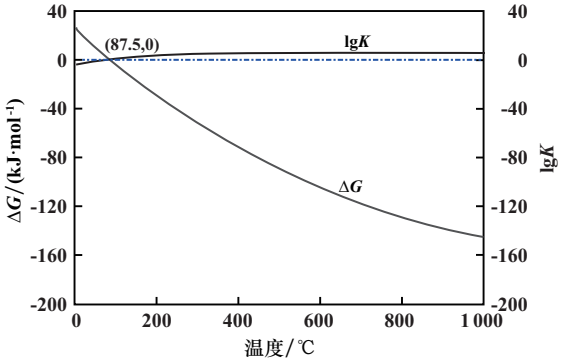


图 6　脱水反应 ΔG 和 lg$K$ 的温度依赖性

Fig.6　Temperature dependence of ΔG and lg$K$ for dehydration process

2.3.2　热力学-实验数据关联性分析

采用 STA449F3 型热重-差示扫描量热仪(TG-DSC)(氮气气氛,升温速率 5 ℃/min)对铁法工艺合成的 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 进行热力学分析表征。图 7 为 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 的 TG-DSC 曲线。由图 7 可知,从室温至 800 ℃共经历了 3 个阶段:① 100~200 ℃时 TG 曲线出现快速失重(对应图 6 中 ΔG 和 lg$K$ 变化),对应 DSC 曲线的吸热峰(对应图 5 中 $\Delta H > 0$),与反应(9)低温吸热性高度吻合,失重比例约为 20.75%,与 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 结晶水比例接近[16];② 200~700 ℃期间没有明显质量损失,且未出现吸热峰与放热峰,可以认为已完全失水,发生了 $FePO_4 \cdot 2H_2O$ 晶型转变为 α 石英型的 $FePO_4$;③ DSC 曲线在 704.3 ℃出现明显放热峰,其间无质量损失,对应磷酸铁晶型从α石英

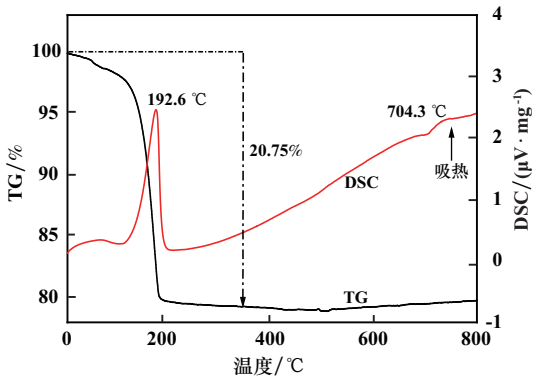


图 7　$FePO_4 \cdot 2H_2O$ 的 TG-DSC 曲线

Fig.7　TG-DSC curves of $FePO_4 \cdot 2H_2O$

型结构转变为β石英型结构的过程[17-19],与热力学模型中焓变转变温度709.9 ℃接近。

综合理论计算与实验表征结果,发现二者呈现显著的热力学-实验协同效应。

1) 能量响应一致性:理论计算的焓变正负转变温度(709.9 ℃)与DSC放热峰温度(704.3 ℃)相对偏差仅0.8%,验证了热力学模型的温度预测精度;

2) 熵增机制解析:脱水过程ΔS持续正值与TG失重20.75%共同证实了结晶水以气态形式脱除导致体系熵增效应,高温区ΔS衰减反映了气态H_2O脱除后体系逐渐平衡,表面体系在完成α→β相变释放能量后趋向热力学稳定态。

上述协同性分析表明,$FePO_4 \cdot 2H_2O$脱水过程遵循"吸热驱动相变→熵增主导自发→放热稳定晶型"的三阶段演化规律。基于HSC构建的热力学预测模型可精准界定工业焙烧工艺的临界温度窗口,为降低煅烧能耗及调控$FePO_4$相变提供优化路径。

3 结论

1) 采用HSC Chemistry 6.0对不同工艺路线合成磷酸铁热力学进行分析,结果表明,所有合成路线在热力学上均可行。

2) 3种工艺的反应ΔG排序为钠法<铵法<铁法,3种工艺的lg$K$排序为钠法>铵法>铁法,表明钠法具有高自发性和快速反应特性,是更具热力学优势的合成方法。

3) $FePO_4 \cdot 2H_2O$脱水过程遵循"吸热驱动相变→熵增主导自发→放热稳定晶型"的三阶段演化规律。温度高于87.5 ℃时,$\Delta G<0$,lg$K>0$,脱水反应可以正向进行;709.9 ℃为由吸热反应转变为放热反应的关键温度,对应磷酸铁由α石英型结构转变为β石英型结构的晶型转变过程。研究成果可为工业脱水提供精准控温依据。

参考文献(References):

[1] 冯志昊. 低成本磷酸铁前驱体及磷酸铁锂正极材料的制备及性能研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
FENG Zhihao. Preparation and performance research of low-cost iron phosphate precursor and lithium iron phosphate cathode material[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.

[2] 唐涛. 结晶态磷酸铁的一步法合成、表征及应用研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
TANG Tao. Study on one step preparation, characterization and application of crystalline iron phosphates[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

[3] 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 Bimonthly, 2020,50(1):54-57.

[4] 刘亚飞. 储能与动力电池用橄榄石型正极材料的开发及产业化进展[J]. 矿冶, 2024,33(5):637-653.
LIU Yafei. Development and industrialization progress of olivine-type LIB cathode materials for energy storage systems and electric vehicles[J]. Mining and Metallurgy, 2024,33(5):637-653.

[5] 刘彩,程先明,冯文平,等. 电池级磷酸铁的合成工艺优化及其性能研究[J]. 盐科学与化工, 2024,53(2):17-22.
LIU Cai, CHENG Xianming, FENG Wenping, et al. Study on process optimization and performance of the synthesis of battery-grade iron phosphate[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2024, 53(2):17-22.

[6] 严鹏,谢刚,张春明,等. 非晶态磷酸铁的沉淀反应机理及性能[J]. 电池, 2015,45(5):241-243.
YAN Peng, XIE Gang, ZHANG Chunming, et al. Precipitation reaction mechanism and performance of amorphous ferric phosphate[J]. Battery Bimonthly, 2015,45(5):241-243.

[7] 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.

[8] 盛国臣,余欣鑫,管庆永,等. 高性能电池级磷酸铁制备工艺过程控制研究[J]. 化工矿物与加工, 2025,54(2):25-34.
SHENG Guochen, YU Xinxin, GUAN Qingyong, et al. Research on process control of high-performance battery-grade iron phosphate preparation[J]. Industrial Minerals & Processing, 2025,54(2):25-34.

[9] 赵雨婷,周自圆,刘志启,等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及同步回收$FePO_4$研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):96-99.
ZHAO Yuting, ZHOU Ziyuan, LIU Zhiqi, et al. Simultaneous removal of impurities and recovery of $FePO_4$ from acid leaching solution of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):96-99.

[10] 闫银贤,马航,万邦隆,等. 铁法磷酸铁的工业化制备及其电化学应用[J]. 云南化工, 2024,51(2):80-83.
YAN Yinxian, MA Hang, WAN Banglong, et al. Industrial preparation and electrochemical application of iron phosphate by pure iron method[J]. Yunnan Chemical Technology, 2024,51(2):80-83.

[11] 娄文博,张盈,张洋,等. 高温煅烧脱除磷酸铁中硫的研究[J]. 过程工程学报, 2022,22(2):268-275.
LOU Wenbo, ZHANG Ying, ZHANG Yang, et al. Study on sulfur removal from ferric phosphate by high-temperature calcination[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022,22(2):268-275.

[12] 吴文亚,魏博,李光辉,等. 腐蚀气体与铁基化合物反应的热力学分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021,38(2):168-173.
WU Wenya, WEI Bo, LI Guanghui, et al. Thermodynamic analysis of the reaction of the corrosive atmosphere with iron-based compounds[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition

in Chinese and English), 2021,38(2):168-173.

[13] 田海锋,廖建康,查飞,等. 丙烷与二氧化碳耦合制丙烯的热力学模拟研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2019,55(2):94-99.
TIAN Haifeng, LIAO Jiankang, ZHA Fei, et al. Thermodynamic simulation of propane coupling with carbon dioxide to propylene[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2019, 55(2):94-99.

[14] 郑光亚,陈正杰,辜芳,等. 不同气氛下硫酸铝高温分解热力学分析[J]. 化学研究, 2019,30(3):248-253.
ZHENG Guangya, CHEN Zhengjie, GU Fang, et al. Thermodynamic analysis of high temperature decomposition of aluminum sulfate in different atmospheres[J]. Chemical Research, 2019,30(3):248-253.

[15] 潘斌. Cu_2ZnSnX_4(X=S,Se)薄膜的纳米颗粒法制备及反应机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
PAN Bin. Fabrication of Cu_2ZnSnX_4(X=S,Se) thin films from nanoparticles and investigation on its reaction mechanism[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

[16] 高丽霞,戴子林,吴海鹰,等. 铁矾渣酸浸液磷酸除铁副产磷酸铁性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(7):81-85.
GAO Lixia, DAI Zilin, WU Haiying, et al. Study onperformance of iron phosphate produced by iron removal with phosphoric acid from acid leaching solution of jarosite slag[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2020(7):81-85.

[17] 张宝,李新海,朱炳权,等. 沉淀-碳热还原联合法制备橄榄石磷酸铁锂[J]. 中国有色金属学报, 2006(8):1445-1449.
ZHANG Bao, LI Xinhai, ZHU Bingquan, et al. Synthesis of lithium ironphospho-olivines by aqueous precipitation and carbothermal reduction[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006(8): 1445-1449.

[18] 武玉玲,蒲薇华,任建国,等. 纳米 $FePO_4$ 的合成及其正极材料 $LiFePO_4$/C 的电化学性能研究[J]. 无机材料学报,2012,27(4):422-426.
WU Yuling, PU Weihua, REN Jianguo, et al. Synthesis of nano $FePO_4$ and electrochemical characterization of composite cathode material $LiFePO_4$/C[J]. Journal of Inorganic Materials, 2012,27(4): 422-426.

[19] 袁静楠. 不同晶型磷酸铁的制备及与磷酸亚铁锂间的相互转换关系[D]. 郑州:郑州大学, 2012.
YUAN Jingnan. Study on preparation of different crystalsyst $FePO_4$ and mutual transformation relationship $FePO_4$ and $LiFePO_4$[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.

引用本文:秦存鹏,时振栓,饶明璐,等. 磷酸铁合成及脱水反应的热力学分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):134-139.
QIN Cunpeng, SHI Zhenshuan, RAO Minglu, et al. Thermodynamic analysis of iron phosphate synthesis and dehydration reactions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):134-139.

(上接第 133 页)

[2] 董再蒸,温国栋,袁帅,等. 红土镍矿酸浸渣综合利用进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5):14-23.
DONG Zaizheng, WEN Guodong, YUAN Shuai, et al. Progress in comprehensive utilization of acid leaching residue of laterite nickel ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(5): 14-23.

[3] 罗良飞,李宗蔚,钟志刚,等. 红土镍矿浸渣选铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):47-49.
LUO Liangfei, LI Zongwei, ZHONG Zhigang, et al. Experimental study on iron recovery from leaching residue of lateritic nickel ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):47-49.

[4] 王寨寨,李博,魏永刚. 红土镍矿处理工艺研究现状[J]. 矿产综合利用, 2022(5):95-101.
WANG Zhaizhai, LI Bo, WEI Yonggang. Research status of laterite nickel ore processing technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5):95-101.

[5] 刘凯华,李淑梅,李辉,等. 镍红土矿酸浸渣生物质磁化焙烧-磁选回收铁精矿试验研究[J]. 有色冶金节能, 2016,32(2):14-17.
LIU Kaihua, LI Shumei, LI Hui, et al. Recovery of iron concentrate from acid leaching residue of nickel laterite by biomass magnetic roasting-magnetic separation[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2016,32(2):14-17.

[6] CAO Z H, MA B Z, ZHOU J S, et al. The study for reduction roasting of laterite residue in the presence of CaF_2[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,168:1-9.

[7] ZHOU J S, CAO Z H, MA B Z, et al. Effective separation and recovery of iron and chromium from laterite residue in the presence of calcium chloride[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 166:638-648.

引用本文:杨旭,罗良飞,李宗蔚,等. 红土镍矿酸浸渣矿相转化工艺对比及机理分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):130-133.
YANG Xu, LUO Liangfei, LI Zongwei, et al. Comparison and mechanism analysis of mineral phase transformation process for acid leaching residue of lateritic nickel ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6): 130-133.