**磷酸铁锂电池特性**

# 目录

[目录 2](#_Toc444847190)

[1 背景 3](#_Toc444847191)

[2 组成、结构与工作原理 3](#_Toc444847192)

[3 特性曲线 4](#_Toc444847193)

[3.1充放电曲线 4](#_Toc444847194)

[3.2倍率特性 5](#_Toc444847195)

[3.3温度特性 7](#_Toc444847196)

[3.4开路电压特性 8](#_Toc444847197)

[3.5循环特性 9](#_Toc444847198)

[4总结 10](#_Toc444847199)

**1 背景**

磷酸铁锂电池具有安全性好、比能量和比功率高、循环寿命长等特点，在后备电源、大型储能及电动汽车中应用广泛。本文以电动汽车退运电池为研究对象，通过性能测试实验获取数据，然后归纳总结该电池特性，从而获得该类电池较全面的性能评价，作为对该电池梯次利用于大型储能系统的数据支持。

**2 组成、结构与工作原理**

磷酸铁锂电池一般由正极、负极、隔膜、电解液、外壳及其他附属配件组成。正极活性材料为橄榄石型的磷酸亚铁锂(LiFePO4)，多经过包覆碳、掺杂等改性才能使用。负极活性材料为天然石墨、人造石墨等石墨类材料，以及硬碳、软碳等碳材料，也需要适当处理才能使用。隔膜为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)中的一种或两种材料，常以单层或多层复合成膜使用，也有在膜表面增加无机陶瓷膜增强处理的方式，在一定程度上提高电池安全性。电解液是以链状或环状碳酸酯为溶剂的锂盐溶液，其中还添加了特殊添加剂。外壳是容纳电池其他组成部分的容器，多为高强度、耐腐蚀的不锈钢、铝合金、特种塑料等材质，也有用铝塑复合膜作为外壳的电池，实际使用时还需要增加高强度外壳加以保护。此外，电池中还有增加正负极导电性的导电剂，固定活性材料的粘结剂，起到支撑粉体材料和收集电流的集流体铜箔、铝箔，连接电池内外及导电的连接片、极耳、极柱等附属配件。

从外形上分类，磷酸铁锂电池有圆柱型、棱柱型、方形、不规则形状等类型，是根据使用要求差异而出现的。一种典型的LiFePO4电池的内部结构如图1所示。左边是橄榄石结构的LiFePO4作为电池的正极，由铝箔与电池正极柱连接，中间是聚合物隔膜，它把正极与负极隔开，但锂离子Li+可以通过而电子e-不能通过，右边是电池负极，由铜箔与电池的负极柱连接。电池的上下端之间是电池的电解质，电池由金属外壳密闭封装。

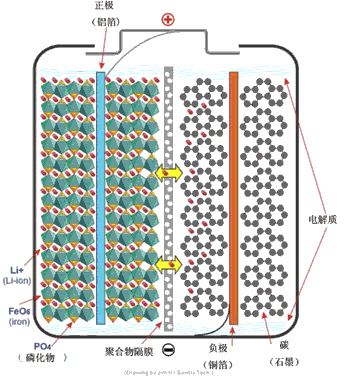
****

图1 LiFePO4电池内部结构示意图

LiFePO4电池在充电时，正极中的锂离子Li+通过聚合物隔膜向负极迁移；在放电过程中，负极中的锂离子Li+通过隔膜向正极迁移。锂离子电池就是因锂离子在充放电时来回迁移而命名的。

磷酸铁锂电池充放电时，发生的化学反应是可逆的，总反应如下：

放电FePO4+LiC6→C6+LiFePO4；

充电C6+LiFePO4→FePO4+LiC6；

磷酸铁锂材料中的结构变化示意图如图2所示，充电时材料中的锂离子逐步脱嵌，放电时锂离子嵌入骨架结构，充放电前后材料骨架结构变化很小。

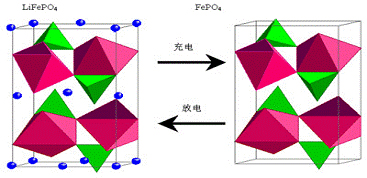
****

图2 LiFePO4材料充放电过程中微观结构变化示意图

**3 特性曲线**

磷酸铁锂-石墨体系电池电压平台一般为3.15V～3.45V，研究磷酸铁锂电池一般从充放电曲线、倍率特性、温度特性、开路电压特性、循环特性等不同角度来考虑，以下是相关的特性曲线。

3.1充放电曲线

从电池标准充放电曲线可以了解电池最基本的输入/输出电压、电量等特性，可以初步判断电池能否满足负载的需求。

根据该电池产品规格书说明，该电池额定容量为60Ah，标称电压为3.2V，最大充电电流为1C，最大放电电流为2C，充放电电压范围为2.5V～3.65V，工作温度范围为-20℃～55℃。因此以1/3C电流对电池进行室温下的标准充放电，所得充放电曲线如图3所示。



图3 电池标准充放电曲线

从图3可知电池1/3C电流下所得电池充电容量为54Ah，放电容量为53.3Ah，充放电库伦效率为98.70%，充电电压平台为3.35V～3.45V，放电电压平台为3.26 V～3.16V。

3.2倍率特性

电池的倍率特性是指不同输入/输出电流下电池的电压、电量变化特征，主要用于判断电池能否满足负载功率需求，是首先要考察的电池特性。

将电池分别以0.15C、0.3C、0.4C、0. 5C、0.8C、1.0C不同倍率进行充电，所得充电曲线如图4所示。图4中随着充电倍率增大，电池充电电压平台逐步升高，说明电池内阻导致了充电电压出现极化。



图4 电池倍率充电曲线

不同倍率电池充电容量数据见表1，只有充电倍率达到1.0C容量略有下降，其他倍率下电池充电容量差别不明显，充电至3.65V前的恒流充电阶段充电容量高，与图4曲线特性一致。

表1 电池倍率充电数据

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 充电倍率 | 0.15C | 0.3C | 0.4C | 0.5C | 0.8C | 1.0C |
| 总容量(Ah) | 53.8 | 54 | 55.5 | 55.8 | 54.2 | 52.8 |
| 充电至3.65V容量(Ah) | 53.5 | 53.3 | 55.5 | 55.4 | 53.5 | 51.8 |
| 恒流充电效率(以0.3C为基准，%) | 100.38 | 100.00 | 104.13 | 103.94 | 100.38 | 97.19 |

电池分别以0.15C、0.3C、0.4C、0. 5C、0.8C、1.0C不同倍率进行放电，所得放电曲线如图5所示。电池放电平台随放电倍率增大依次下降，与充电曲线趋势相反，也说明了电池内阻造成的电压极化特性。



图5 电池倍率放电曲线

不同倍率电池充电容量数据见表2，放电容量遵循随着放电倍率增大逐渐减小的趋势，放电效率保持在100%左右。其中0.15C、0.3C容量较低，可能因测量系统误差和磷酸铁锂电池特性引起。

表2 电池倍率放电数据

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 放电倍率 | 0.15C | 0.3C | 0.4C | 0.5C | 0.8C | 1.0C |
| 容量(Ah) | 54.1 | 53.3 | 55.9 | 55.4 | 54.3 | 51.9 |
| 放电效率(以0.3C为基准，%) | 101.50 | 100.00 | 104.88 | 103.94 | 103.88 | 97.37 |

综合倍率充放电数据，说明该电池在低于1.0C倍率的电流下，输入/输出能量较高，输入/输出功率稳定。

3.3温度特性

考查电池的温度特性是为了判定电池输入/输出是否满足不同工作环境下负载能量需求，也是评测电池特性必不可少的组成部分。

根据常见储能环境，选取15℃、25℃、35℃和45℃四个温度点考察电池温度特性，充放电电流按照0.5C进行测试，其他遵循标准充放电条件。四种温度下的充电曲线见图6，充电数据见表3。



图6不同温度下电池充电曲线

从图6可以看出，充电环境温度升高，充电电压平台下降，说明电池极化减小。表3的充电数据表明，电池在15℃至45℃温度范围内充电容量差别较小，充电效率较高。

表3 不同温度下电池充电数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 温度 | 15℃ | 25℃ | 35℃ | 45℃ |
| 充电容量(Ah) | 54.4 | 55.5 | 55.6 | 55.5 |
| 充电效率(以25℃为基准，%) | 98.02 | 100.0 | 100.18 | 100.0 |

四个温度环境下电池的放电特性见图7，放电数据见表4。



图7不同温度下电池放电曲线

从图7可以看出，环境温度升高，放电电压平台上升，说明电池极化减小。表4的放电数据说明，电池在15℃至45℃温度范围内放电容量差别较小，容量保持率较高。

表4 不同温度下电池放电数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 温度 | 15℃ | 25℃ | 35℃ | 45℃ |
| 放电容量(Ah) | 54.4 | 55.4 | 55.4 | 55.4 |
| 容量保持率(以25℃为基准，%) | 98.19 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

综合以上数据可得，环境温度能影响电池输入/输出能量，升高温度并不能显著增强电池能量输入/输出能力。

3.4开路电压特性

电池开路电压与电池电动势强相关，因此与电池荷电状态(State of Charge，SOC)有密切关系。诊断电池SOC有必要研究电池开路电压特性。

将电池以递增10%SOC的步长，进行0～100%SOC范围内的充放电测试，间隔时间5小时以上获得电池不同SOC下的开路电压，变化曲线如图8所示。图8中电池的充放电开路电压随SOC变化趋势中出现了明显的平台区，即SOC在10%～90%范围内开路电压变化平缓，为开路电压法估算SOC增加了困难。相同SOC下充电开路电压高于放电开路电压，说明实验方法所得开路电压还存在一定误差，在实际估算SOC时该曲线需要经过加权平均处理。



图8不同SOC下电池开路电压变化曲线

3.5循环特性

电池循环特性反应了电池寿命，既是电池用户关心的问题，也是电池管理系统(BMS)重点研究的领域。电池寿命终结一般以电池额定容量衰减到80%为准，用电池健康状态(State of Health，SOH)作为电池老化程度的度量指标，可定义为当前状态下电池完全放电容量与电池初始容量的比值。

实际电池寿命测试常用加速的电池循环测试来得到，测试条件为室温下1C倍率充放电测试，电压范围为2.5V～3.65V，充电电流截止到0.03C，测试曲线如图9所示。从图9可见，测试电池初始容量从58.9Ah经过2789次循环衰减到47.1Ah，SOH达到79.97%，电池寿命终结。电池测试过程中放电容量随循环次数变化呈现出线性特征，拟合系数及拟合度见表5。

表5 电池循环寿命曲线拟合数据表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 拟合项 | 斜率k | 截距b | 拟合度R2 |
| 系数数据 | -0.004 | 58.32 | 0.992 |



图9室温下电池1C倍率循环放电容量变化曲线

**4总结**

磷酸铁锂电池作为应该广泛的能量储存电池，在10%～90%的SOC范围内具有约3.2V的电压平台，所测试电池在1C以内有较优的充放电倍率特性，温度范围在15℃～45℃输入/输出能量稳定，常温1C循环至2789次寿命终结，容量衰减呈现出线性变化趋势。由此可见，磷酸铁锂电池整体性能稳定，可以作为良好的直流电源使用。