

充电倍率与温度对动力电池性能影响的试验研究

黄宜山, 陈锡清, 陈莹莹, 何盛君, 李 敏

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:本文以电动汽车用能量型磷酸铁锂动力电池为研究对象,在25℃下开展0.3~1.5 C不同倍率充放电测试,分析充电倍率对容量、能量、效率、温升等性能的影响;并在-30~45℃环境温度范围内研究温度对电池性能的影响规律。试验结果表明:充电倍率为1 C时,电池在充电时间、可充入容量及温升控制方面表现最优;温度在20~25℃区间时,电池在容量、能量及一致性方面表现最佳。研究结果可为电动汽车充电策略制定、电池舱热管理设计及磷酸铁锂电池性能评估提供数据参考。

关键词:磷酸铁锂; 充电倍率; 温度; 容量; 能量; 一致性

中图分类号: TM912

文献标志码: A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.05.007

Experimental Study on the Effects of Charging Rate and Temperature on Power Battery Performance

HUANG Yishan, CHEN Xiqing, CHEN Yingying, HE Shengjun, LI Min

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou, 412007, China)

Abstract: This paper examines energy-type lithium iron phosphate power batteries for electric vehicles. It conducts charge-discharge tests at 25℃ at rates ranging from 0.3 C to 1.5 C to analyze the effects of charging rate on capacity, energy, efficiency, temperature rise, and other performance indicators. It also investigates how temperature affects battery performance over an ambient temperature range of -30℃ to 45℃. The results show that, at a charging rate of 1 C, the battery achieves the best overall performance in terms of charging time, chargeable capacity, and temperature rise control; when the battery temperature is in the range of 20℃ to 25℃, the battery performs best in terms of capacity, energy, and consistency. These findings provide reference data for formulating charging strategies, designing battery compartment thermal management, and evaluating the performance of lithium iron phosphate batteries in electric vehicles.

Key words: lithium iron phosphate; charging rate; temperature; capacity; energy; consistency

随着全球能源转型持续推进,电动汽车已成为交通领域可持续发展的重要载体。动力电池作为整车的核心部件,其性能直接关系到整车的续驶安全性与使用寿命^[1]。在众多锂离子电池技术路线中,三元锂电池具有较高的能量密度,而磷酸铁锂电池则具有优异的热稳定性和安全性,后者在对安全性要求较高的商用车领域得到广泛应用^[2-3]。

在实际使用中,充电倍率与环境温度是影响电池性能的关键因素。前者直接影响充电速度:倍率越高单位时间内充入的电量越多,充电时间越短,但电流过大可能导致电池过热、容量衰减,甚至引发热失控^[4];倍率过低则无法满足快速补电需求。后者对电

池性能同样具有显著影响:低温会导致电解液流动性变差、离子电导率显著下降,引发容量骤减与充电困难^[5];高温则加剧副反应,导致活性物质失效与循环寿命缩短^[6]。目前,该领域已取得一定的研究进展。文献[7]通过仿真分析了不同放电倍率下电池包的温升特性;文献[8]评估了商用电池的低温放电能力;文献[9]研究了温度及放电倍率对电池性能的影响;文献[10]对不同充电倍率下的能量效率进行了研究。然而,现有研究多聚焦单一因素,缺乏多因子交互作用下电池关键性能的系统量化评价,尤其缺乏针对客车用大容量磷酸铁锂电池的综合试验分析^[11]。

收稿日期:2025-11-26。

第一作者:黄宜山(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事新能源汽车试验检测工作。E-mail:huangyishan.cy@crrecg.cc。

基于此,本文以能量型磷酸铁锂动力电池为研究对象,开展不同充电倍率(0.3~1.5 C)和温度(-30~45 ℃)条件下的性能测试,通过对容量、能量及一致性等指标开展量化分析,明确最优充电区间与适宜的工作温度,为整车电池舱热管理设计和充电策略优化提供数据支撑。

1 不同充电倍率对电池性能的影响测试

1.1 测试样品与设备

选取国内两家知名厂商生产的磷酸铁锂电池包(25.6 kW·h,100 Ah)作为测试对象,分别标记为样品1和样品2。测试采用电子负载试验台(FTF1-600-800BS)和步入式湿热环境试验箱(THVS5019F),两台设备的主要参数见表1。

表1 设备主要参数

设备名称	参数	数值范围	精度
电子负载试验台	电压	58~800 V	±0.1% Fs
	电流	0~600 A	±0.1% Fs
	功率	0~250 kW	—
步入式湿热环境试验箱	温度	-60~150 ℃	±2 ℃
	升温速率	3 ℃/min	—
	降温速率	2 ℃/min	—

1.2 测试条件与方法

测试在步入式湿热环境试验箱内进行,环境温度控制在25 ℃±2 ℃。依据GB/T 31467—2023^[12],结合行业实践,选取0.3、0.5、0.75、1、1.2、1.5 C作为充电倍率。所有测试均采用该标准规定的1 C放电倍率,确保测试条件一致;每次测试前均进行标准循环,以统一电池的初始状态。本试验采用0%~100%全SOC区间进行充放电测试,涵盖了整车实际使用中常用的20%~80% SOC范围,研究结论对整车充电策略优化具有直接指导意义。

1.3 测试步骤

测试采用电池测试设备及其配套软件进行:使用Program editor软件编写测试工况,通过Visual CN软件控制并采集数据,记录内容包括电池电压、电流、容量、能量、充放电时间及温度等。不同充电倍率测试步骤见表2,充电截止电压为3.65 V,放电截止电压为2.5 V。能量效率按照公式(1)计算。

$$\eta = E_1 / E_2 \times 100\%$$
 (1)

式中:η为能量效率;E₁为放电能量;E₂为充电能量。

表2 不同充电倍率测试步骤

序号	测试步骤 ^[12]	测试温度/℃
1	环境适应	25±2
2	标准充电	25±2
3	标准放电	25±2
4	不同充电倍率充电	25±2
5	环境适应	25±2
6	1 C 放电	25±2

2 不同温度对电池性能的影响测试

2.1 测试样品与设备

选取同一厂家同型号的2个磷酸铁锂电池包(单个25.6 kW·h,277 Ah)作为测试样品,测试设备与1.1节相同。

2.2 测试条件与方法

环境温度对磷酸铁锂电池的性能具有较大影响,因此测试在步入式湿热环境试验箱中进行。

1) 充电方法及环境温度:试验环境温度设定为25 ℃,先以0.5 C恒流充电至截止电压,静置10 min后,再以0.05 C恒流补电至相同截止电压。

2) 放电方法及环境温度:按照1 C倍率恒流放电,温度范围为-30~45 ℃,以5 ℃为间隔设置测试点。每次放电测试后,按上述充电方法使电池恢复至满电状态。

2.3 测试步骤

不同温度测试步骤见表3。数据采集参见1.3节,能量效率按式(1)计算。

表3 不同温度测试步骤

序号	测试步骤 ^[12]	测试温度/℃
1	环境适应	25±2
2	标准充电	25±2
3	标准循环	25±2
4	环境适应	不同温度点
5	标准放电	不同温度点

3 试验数据与分析

3.1 不同充电倍率下电池性能测试数据

样品1与样品2在不同充电倍率下的测试结果见表4和表5。其中,全过程充放电时间综合反映了电池系统在完整充放电循环中的时间成本,直接影响

电动汽车的充电等待效率与运营调度效率,是评价充电策略实用性的重要参考指标。

表 4 样品 1 试验数据

充电倍率/ C	充电容量/ Ah	放电容量/ Ah	充电能量/ (kW·h)	放电能量/ (kW·h)	能量效率/ %	充电时间/ min	放电时间/ min	全过程充放电时间/ min
0.30	95.4	94.9	25.4	24.1	94.7	172.3	57.0	229.3
0.50	94.9	94.7	25.5	24.0	94.4	114.0	56.8	170.8
0.75	94.7	94.4	25.6	24.0	93.9	75.8	56.7	132.5
1.00	94.2	94.4	25.6	24.0	94.0	56.5	56.7	113.3
1.20	90.7	90.9	24.8	23.2	93.4	45.2	54.3	99.5
1.50	90.3	89.9	24.8	22.9	92.3	36.0	54.0	90.0

表 5 样品 2 试验数据

充电倍率/ C	充电容量/ Ah	放电容量/ Ah	充电能量/ (kW·h)	放电能量/ (kW·h)	能量效率/ %	充电时间/ min	放电时间/ min	全过程充放电时间/ min
0.30	94.9	94.2	26.5	24.1	95.6	177.9	58.7	236.6
0.50	94.6	93.8	26.5	24.0	95.4	116.2	58.1	174.4
0.75	94.6	94.5	26.2	24.9	95.3	78.2	57.9	136.1
1.00	93.9	93.7	26.6	25.1	94.3	55.6	56.4	112.0
1.20	91.1	90.6	25.2	23.6	93.5	48.2	52.6	100.8
1.50	90.0	88.4	25.4	23.6	92.6	32.0	51.2	83.3

3.2 充电倍率对电池性能的影响分析

3.2.1 充电容量与时间的变化

样品 1 与样品 2 的充电容量与充电时间在不同充电倍率下的变化曲线分别如图 1 和图 2 所示。

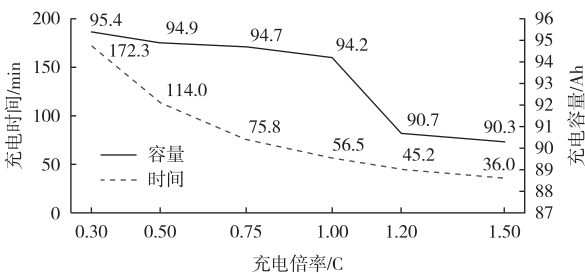


图 1 样品 1 充电容量与充电时间变化曲线

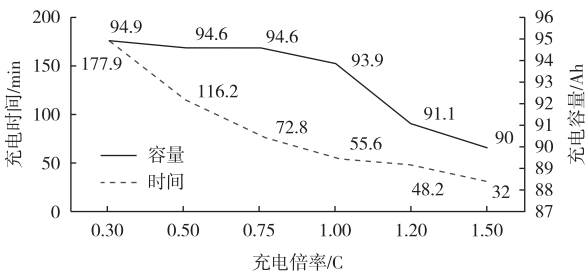


图 2 样品 2 充电容量与充电时间变化曲线

由图 1 和图 2 可知：

1) 随着充电倍率的增大,充电容量逐渐减小。

0.3~1 C 区间内容量变化平缓。1~1.2 C 出现显著下降。

2) 充电时间随倍率增大而缩短,二者近似成反比关系。1.5 C 时充电时间最短,较 0.3 C 时缩短约 79.1% (样品 1) 和 82.0% (样品 2)。

3.2.2 能量效率的变化

能量效率随充电倍率的变化曲线如图 3 所示。由图可知,能量效率随充电倍率增大而降低,0.3~0.75 C 下降缓慢,1~1.5 C 下降幅度增大。

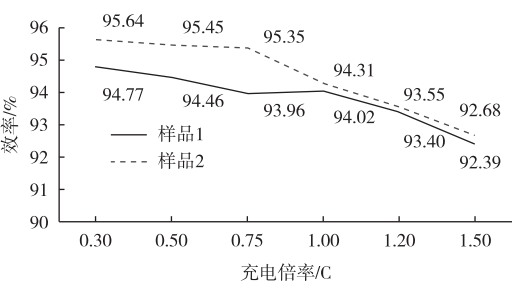


图 3 能量效率变化曲线

3.2.3 电池温度变化分析

样品 1 与样品 2 上各有 2 个测温点,分别布置在各自电池模组的中心位置与边缘位置,其在不同充电倍率下的温度变化曲线分别如图 4 和图 5 所示。

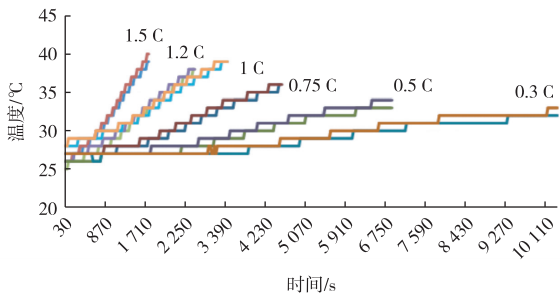


图 4 样品 1 电池温度变化曲线

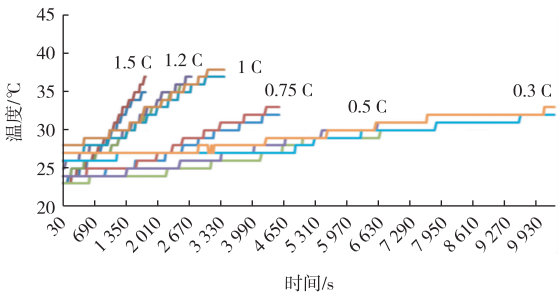


图 5 样品 2 电池温度变化曲线

由图 4 和图 5 可知：

- 1) 充电倍率越大,温升速率越大,1.5 C 倍率下温升速率最大。
- 2) 所有测试中,电池最高温度未超过 40 ℃,两测点温差控制在 2 ℃ 以内,满足电池组工作温度要求 (最高温度≤55 ℃,温差≤5 ℃)^[12]。

3.3 不同温度下电池性能测试数据

不同温度下的电池性能测试数据见表 6。

表 6 电池系统试验数据

放电温度/ ℃	充电容量/ Ah	放电容量/ Ah	充电能量/ (kW·h)	放电能量/ (kW·h)
-30	253.72	0.11	56.742	0.019
-25	254.94	253.45	57.057	48.608
-20	259.69	254.7	58.04	49.334
-15	261.31	259.68	58.408	50.639
-10	261.86	261.37	58.554	51.547
-5	264.79	262.65	59.172	52.271
0	268.56	267.86	60.02	53.588
5	270.33	263.75	60.485	53.438
10	269.88	267.88	60.297	54.579
15	272.75	269.61	60.889	55.239
20	270.2	270.53	60.355	55.699
25	265.68	269.74	59.002	55.736
30	258.65	258.72	0.405	53.833
35	259.33	259.91	57.917	54.21

表 6(续)

放电温度/ ℃	充电容量/ Ah	放电容量/ Ah	充电能量/ (kW·h)	放电能量/ (kW·h)
40	259.95	259.97	58.069	54.333
45	260.29	170.81	58.174	35.989

3.4 温度对电池性能的影响分析

3.4.1 放电容量与能量的变化

放电容量与能量的变化趋势如图 6 所示。

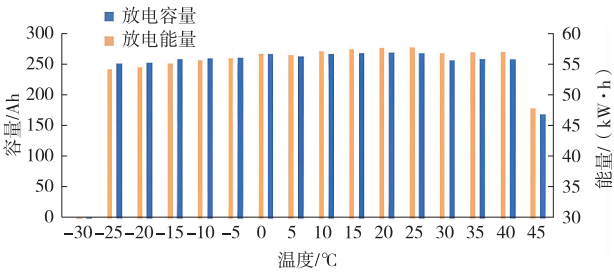


图 6 放电容量和能量变化趋势

分析表明：

- 1) -30 ℃ 时电池无法正常放电,电解液凝固导致离子传导受阻。
- 2) 45 ℃ 时电池仅放出约一半容量。高温加剧内部副反应,易使电池达到一级报警温度。此时化学平衡遭到破坏,正极发生副反应,其中部分反应不可逆,可能导致电池永久性损坏。
- 3) 20~25 ℃ 区间内的容量和能量均较高,为电池最优工作温度范围。
- 4) 30 ℃ 时容量与能量出现突变,可能与电池内部反应机制变化有关。闻文等^[13]通过模拟研究也发现了类似现象,并指出 SEI 膜生长对电池性能有重要影响。

3.4.2 温度与电压一致性的影响

综合考虑表 6 中各温度点下电池的性能表现,选取 40 ℃ (高温)、25 ℃ (常温)、-5 ℃ (低温临界) 及 -25 ℃ (低温) 4 个典型温度点,以分析电池系统在不同温度下的温差与压差一致性,相应变化曲线如图 7~10 所示。

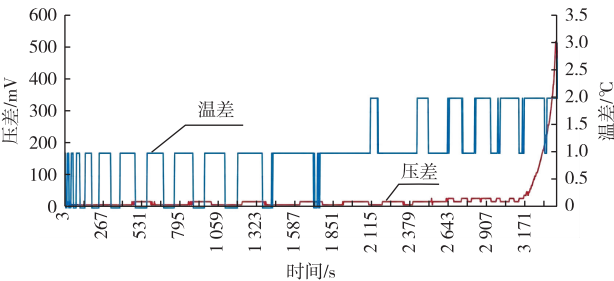


图 7 40 ℃ 下温差与压差一致性变化曲线

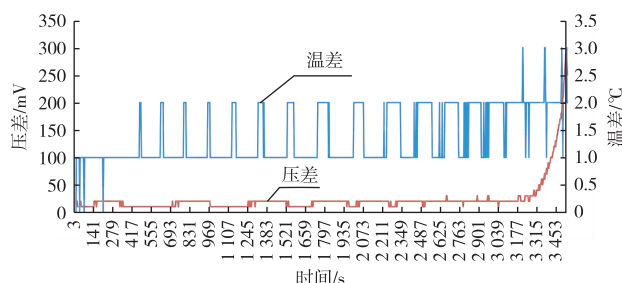


图8 25 °C下温差与压差一致性变化曲线

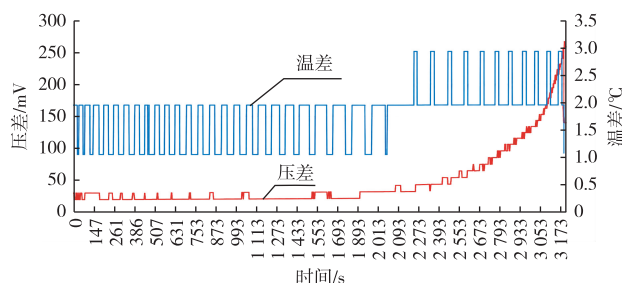


图9 -5 °C下温差与压差一致性变化曲线

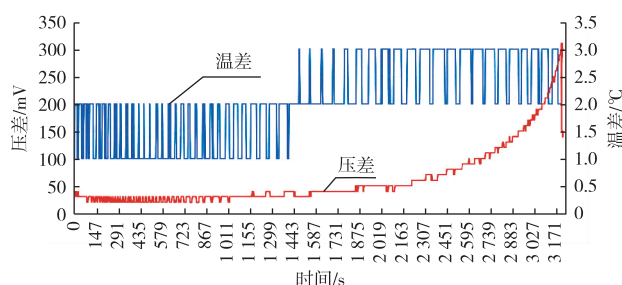


图10 -25 °C下温差与压差一致性变化曲线

对比上述各温度点的测试结果可知:在温差方面,25 °C时温差波动最小,-25 °C时温差波动最大,表明低温环境对电池组温度均匀性的影响更为显著。在压差方面,25 °C时压差波动范围最小,且放电末段压差上升幅度有限,一致性表现最优;-5 °C、-25 °C和40 °C时,压差在放电末段明显增大。这表明低温与高温均对电池组均衡性产生不利影响。

综合温差与压差两个维度分析,在10~30 °C温度区间内,电池组的温差与压差一致性均为最佳,温度过低或过高均会导致一致性明显下降。

4 结论

本文通过试验揭示了充电倍率与温度对磷酸铁锂电池性能的非线性影响规律,主要结论如下:

1) 充电倍率对电池性能的影响存在明显拐点。低于1 C时性能稳定,超过1 C后可逆容量快速下降,1 C是本试验条件下极化损耗与充电效率的最佳平衡点。该规律在两家厂商的电池样品中均得到验证,

具有一定的普遍性。

2) 温度对电池性能的影响呈现低温抑制、常温最优、高温衰减的整体趋势。-30 °C时电解液凝固导致离子传导受阻。20~25 °C区间内容量、能量和效率都达到峰值,为最优工作温度区间。45 °C时高温副反应导致SEI膜反复破裂和再生,造成不可逆容量损失,性能衰减。

综上,磷酸铁锂电池系统在1 C及20~25 °C条件下综合性能最优。后续需扩大样本范围,探究极端温度下的衰减机理,并开展长期循环试验,以建立更全面的电池全生命周期性能演化模型。

参考文献:

- [1] 薛媛媛,陈清晨. 新能源汽车电池类型现状及发展趋势研究[J]. 时代汽车,2023(19):106-108.
- [2] Wang Kejie. Study on low temperature performance of li ion battery[J]. Open Access Library Journal,2017,4(11):1-12.
- [3] 陈宏珍. 电动汽车用锂离子动力电池组热管理数值研究[D]. 天津:天津大学,2014:32-38.
- [4] 刘超. 纯电动客车配置不同功率液体 PTC 加热器对动力电池温度性能的影响[J]. 时代汽车,2025(12):32-33.
- [5] 郎春艳. 低温环境下锂离子电池组热管理系统研究[D]. 广州:华南理工大学,2017:15-20.
- [6] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of Power Sources,2002,110(2):377-382.
- [7] 陈冲,徐婧雨,汪先锋,等. 电动客车动力电池包散热性能仿真分析[J]. 客车技术与研究,2025,47(2):23-26.
- [8] Fan Jiang. On the discharge capability of commercial 18650 Li-ion cell at low temperatures [J]. Journal of Power Sources,2003,117(1-2):170-178.
- [9] 姜翠娜,李红,罗玉涛,等. 温度及放电倍率对电池性能影响的实验研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(9):2496-2502.
- [10] 任科臣,孙学武,卢高庆. 锂离子电池不同充电倍率下的能量效率研究[J]. 电子世界,2014(16):325-326.
- [11] 秦明俊,朱鹏,于立军,等. 镍氢电池温度场及其结构影响的数值分析[J]. 机械工程学报,2009,45(1):277-281.
- [12] GB/T 31467—2023 电动汽车用锂离子动力电池包和系统电性能试验方法[S].
- [13] 闻文,王慧艳,周静红,等. 石墨负极颗粒对锂离子电池容量衰减及 SEI 膜生长影响的模拟研究[J]. 化工学报,2024,75(1):366-376.