

纯电动汽车锂离子电池低温充电方法对温升速率的影响分析

李丽丽 夏弋茹 杨振 何忠青 王勃洋

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

【欢迎引用】李丽丽, 夏弋茹, 杨振, 等. 纯电动汽车锂离子电池低温充电方法对温升速率的影响分析[J]. 汽车文摘, 2024(5): 6-10.

【Cite this paper】LI L L, XIA Y R, YANG Z, et al. Analysis on Influence of Low Temperature Charging Method on Temperature Rise Rate of Lithium-ion Batteries for Pure Electric Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(5): 6-10.

【摘要】为了解决锂离子电池在寒冷环境中充电能力下降导致充电时间大幅增加的问题, 分析了锂离子电池的低温充电方法, 并针对纯电动车用锂离子电池在低温下充电方法的差异对电池温升速率的影响展开研究, 对改善电池低温充电速率和提升纯电动车低温充电能力提出建议。

关键词: 纯电动汽车; 低温; 充电方法; 电池加热; 温升速率

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230015

Analysis on Influence of Low Temperature Charging Method on Temperature Rise Rate of Lithium-ion Batteries for Pure Electric Vehicles

Li Lili, Xia Yiru, Yang Zhen, He Zhongqing, Wang Boyang

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】In order to solve the problem that the lithium-ion batteries' charging capacity decreases in cold environments, this paper analyzes the low temperature charging methods of lithium-ion batteries, and studies the impact of the differences in charging methods of lithium-ion batteries for pure electric vehicles at low temperatures on the battery temperature rise rate, and puts forward suggestions on improving the low temperature charging rate of batteries and the low temperature charging capacity of pure electric vehicles.

Key words: Electric vehicles, Low temperature, Charging method, Battery heating, Temperature rise rate

0 引言

锂离子电池因其具有能量密度高、循环寿命长、无记忆效应等多项优势而被广泛应用于电动汽车领域^[1]。然而, 低温下锂离子电池内阻增大、峰值功率和可用能量下降^[2-3], 并且锂离子电池在低温下充电容易引起负极析锂, 导致电池内短路, 引发安全事故^[4]。我国北方大部分地区冬天的最低温度常在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 部分地区甚至低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5]。因此, 低温下锂离子电池的充电能力下降、充电易析锂等问题严重影响纯电动汽车的充电时间和充电安全, 成为制约纯电动汽车普及的因素之一。

在低温条件下动力电池如何快速、安全充电是

促进纯电汽车在寒冷地区推广应用的关键。目前锂离子电池常温下的充电方法较多, 如恒流恒压充电^[6]、多阶段恒流充电^[7]、脉冲充电^[8]、正弦交流充电^[9]和多目标优化充电^[10-11]等方法。Tippmann等^[12]在不同温度以不同充电倍率和不同充电模式对电池进行充电实验, 发现低温和大倍率充电时电池寿命由于负极析锂导致加速衰退。Yang等^[13]对不同能量密度的电池在不同温度和不同充电倍率下充电时的寿命衰减进行分析, 发现在常温时可接受的电流在低温充电下会导致电池寿命呈加速衰退趋势。为避免电池负极析锂, 在低温下电池可接受的充电电流非常小, 导致低温下充电速度缓慢, 充电时间延长, 加大了电动车用户的里程焦虑。为解决锂离子电池低温

性能差及充电难、易析锂等问题, Song等^[14]采用对流加热的方式分析电池加热需求, 实现以最少的外部能量快速加热电池的目的。Zhu等^[15]构建了电池热学模型来计算电池产热、预测电池温升。上述研究从低温加热的角度入手, 将电池温度升高到适宜温度, 使其性能基本能够完全恢复, 以快速、高效、无析锂的状态充入电能^[16-17]。电池温度升高的速度严重影响着电池的低温充电时间, 本文在对锂离子电池低温充电策略相关文献分析的基础上, 展开低温充电方法的差异对电池温升速率的影响研究, 从而通过提高温升速率来缩短充电时间。

1 低温充电方法对温升速率的影响

1.1 低温充电方法研究现状

低温环境下动力电池可接受的充电电流很小, 如果用常温下的大电流充电会导致负极析锂, 引发电池寿命大幅度衰减, 为此相关领域的学者和工程师提出了低温充电策略。Remmlinger等^[18]基于电化学模型提出了恒流恒负极电势恒压充电策略, 在缩短充电的同时避免了负极析锂。Ge等^[19]建立了低温下电池析锂模型, 并推导了低温下、不同荷电状态可接受的最大电流, 开发了低温充电策略。此外, 如果使用常温充电策略以小电流充电, 将导致充电时间的延长, 并且随着温度的降低充电时间急剧延长, 难以满足快速充电的需求。因此, 为了增大电池可接受的充电电流、缩短充电时间, 一般采用对电池加热的低温充电方式, 即通过升高电池系统温度来增加充电电流, 从而缩短充电时间^[16]。Zhao等^[20]将电池加热到3℃后以常规充电方法对电池充电, 14 min内将电池充到SOC为80%, 重复500次后出现析锂现象。Yang等^[21]将电池加热到20℃后用3.5 C电流在15 min内将电池充到SOC为80%, 重复多次后电池寿命未出现加速衰退。以上文献表明, 提高电池温度是实现电池低温快速充电的有效方案。如何升高电池温度也成为缩短充电时间的重要影响因素, 而电池升温方式的不同直接影响温升速率, 继而影响缩短充电时间。因此, 本文对不同加热方式的低温充电方法对温升速率的影响展开分析。

目前, 汽车制造商在低温充电方法上多采用先加热后充电和边加热边充电的动力电池低温充电方法。其中, 加热方式均采用外部热源的形式。表1总结了3款车型在低温充电时的基本参数信息。其中, 车辆低温充电的测试根据EV-TSET^[22]管理规则中对

低温充电时间测试方法的规定进行实施。

表1 低温充电基本参数信息

车型	环境温度/℃	充电机功率/kW	加热功率/kW	电池容量/Ah	充电方法
A	-10	120	6	216.2	先加热后充电
B	-10	120	2	216.2	先加热后充电
C	-10	120	6	234.0	边加热边充电

1.2 先加热后充电的充电方法

先加热后充电指的是在低温环境下, 充电枪连接车辆后不立即对动力电池执行充电行为, 而是先通过充电桩端对外部热源进行供电继而给电池加热, 加热到一定温度后进入到边加热边充电的模式, 这时充电桩端在给外部热源供电加热电池的同时也给电池充电。由表1可知, 车辆A和车辆B充电方法一致、电池容量相同, 但外部热源的加热功率相差较大。由图1、图2可知, 车辆A和车辆B在整个充电过程中, 电池冷却系统不工作, 因此不考虑低温充电时冷却系统对电池温度的影响。综合上述分析, 对比车辆A和车辆B在外部热源加热功率不同时, 仅加热不充电阶段的温升速率差异。图3、图4所示为车辆A、B在-10℃环境温度下, 外部热源加热功率的分布情况, 平均加热功率分别为6 kW和2 kW。

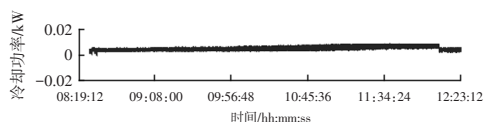


图1 车辆A电池冷却系统功率变化

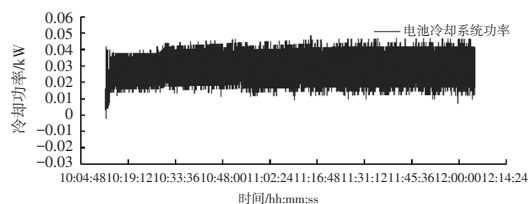


图2 车辆B电池冷却系统功率变化

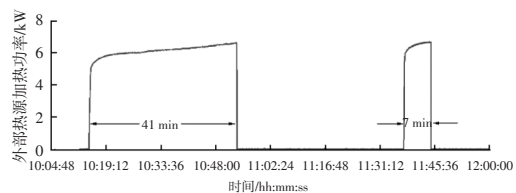


图3 车辆A外部热源加热功率变化

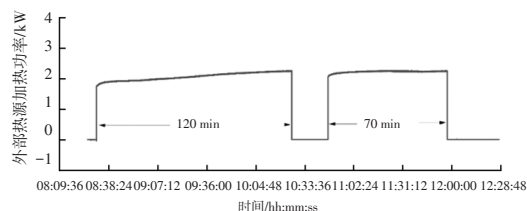
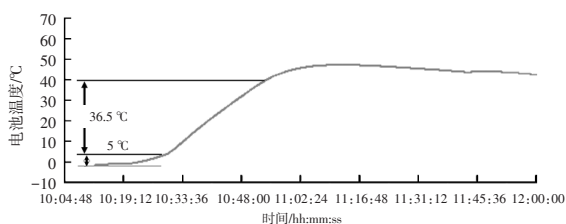
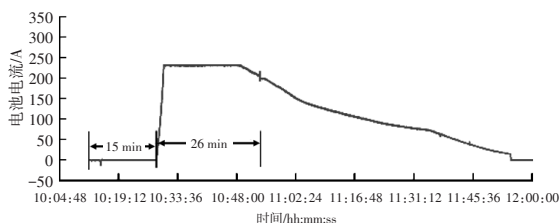


图4 车辆B外部热源加热功率变化

由图5a的电池温度曲线可知,车辆A在充电开始前15 min外部热源给电池加热,电池温度由-1.5℃上升至3.5℃,温升速率为0.33℃/min。由图6a的电池温度曲线可知,车辆B在充电开始前30 min电池仅加热不充电,电池温度由-1.5℃上升至1.5℃,温升速率为0.1℃/min,车辆A的温升速率是车辆B的3.3倍。因此,在电池仅加热不充电阶段,外部热源的加热功率直接影响电池的温升速率,且影响较大。

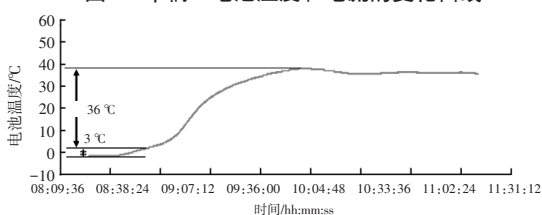


(a) 电池温度变化

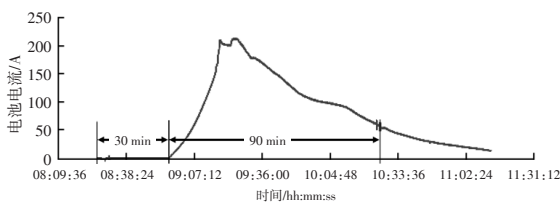


(b) 电池电流变化

图5 车辆A电池温度和电流的变化曲线



(a) 电池温度变化

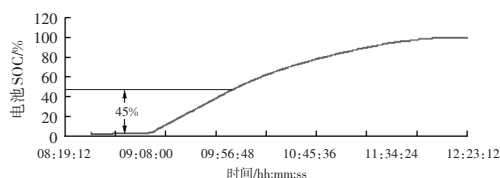


(b) 电池电流变化

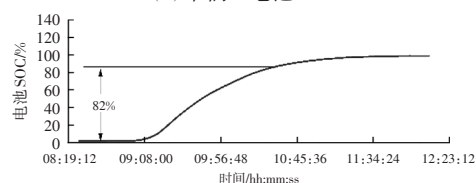
图6 车辆B电池温度和电流的变化曲线

车辆A和车辆B分别经过15 min和30 min的仅加热不充电阶段后,使电池包温度达到合适温度,随后低温充电进入边加热边充电模式,车辆A和车辆B的外部热源在该模式分别工作26 min和90 min。期间,车辆A的电池温度上升了36.5℃,温升速率为1.4℃/min;车辆B的电池温度上升了36℃,温升速率为0.4℃/min,对比仅加热不充电阶段的温升速率,当前充电模式下的温升速率是其4~5倍。在边加热边充电阶段,车辆A、B的电池SOC变化如图7所示。车辆A的电池SOC由3%上升至48%,平均充电功率约为

79.7 kW/h。车辆B的电池SOC由3%上升至85%,平均充电功率约为50 kW/h,车辆A的平均充电功率是车辆B的1.6倍。综合上述分析,低温快充时电池温升速率与充电电流密切相关。电池温升速率越大,平均充电功率增加,电池充电能力越强。



(a) 车辆A电池SOC



(b) 车辆B电池SOC

图7 车辆A、B电池SOC变化曲线

图5b中,车辆A的稳定充电电流约为231 A,此后充电电流逐渐下降至充电结束,电池系统最高温度上升至45.5℃,随着充电电流的减小,电池温度也在逐渐下降,此时为了维持一定的充电电流,外部热源启动以6 kW的功率对电池进行约7 min的持续加热,如图1所示。图6b中,车辆B的峰值充电电流约为210 A,维持较短时间后逐渐减小,电池系统温度也随之减小,从而启动外部热源对电池进行70 min加热,如图4所示。此时,电池充电电流大小与电池温度相互制约,需要外部热源加热电池使电池温度升高,从而抑制由于温度下降导致充电电流减小。

1.3 边加热边充电的充电方法

边加热边充电指外部热源给电池加热的同时充电桩给电池充电,在电池管理系统检测到电池温度低于一定数值并且收到充电指令,则进入边加热边充电的充电模式。表1中,车辆C的低温充电过程中电池相关参数变化对该充电模式下的温升速率差异进行分析。车辆C在低温充电过程中,外部热源和电池冷却系统功率变化如图8和图9所示,在边加热边充电的模式下,外部热源约以6 kW的加热功率对电池进行加热,持续28 min;期间,电池冷却系统不工作,对电池温度无影响,如图9所示。

低温充电条件下,车辆C电池荷电状态的变化如图10所示,整个充电过程电池荷电状态从0%上升至100%,外部热源工作期间电池荷电状态增加40%,平

均充电功率约为 69.4 kW/h, 根据图 12 中标注的两阶段电池温度变化, 荷电状态变化分别为 10% 和 17%。

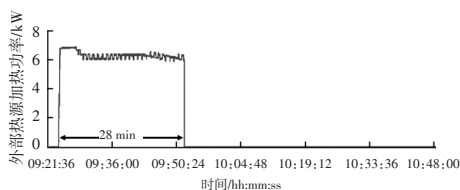


图 8 车辆 C 外部热源加热功率变化

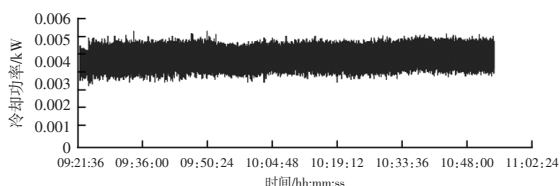


图 9 车辆 C 电池冷却系统功率变化

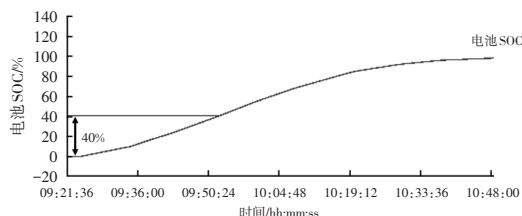


图 10 车辆 C 电池 SOC 变化曲线

车辆 C 充电电流和电池电压的变化趋势如图 11 所示。电池电压由 323 V 升高至 391 V, 基本稳定在电池系统额定电压, 无明显变化; 充电电流约 28 min 后达到最大充电电流 219 A。对外部热源工作过程中充电电流和电池温度的变化展开分析, 观察图 11 中电流的变化曲线, 在达到峰值充电电流前选取 2 段稳定充电电流曲线, 同时分析图 12 中电池温度变化。从图 11 电流的变化曲线可知, 在开始充电阶段, 初始充电电流约 111 A, 持续时间为 10 min, 对应图 12 中电池温度由 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温升速率为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; 在第二段稳定电流区间, 约以 200 A 的充电电流对电池充电, 同样持续 10 min, 电池温度由 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温升速率为 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。从电池温升速率和充电倍率上比较, 充电电流的大小直接影响电池充电时的温升速率, 从而影响充电倍率, 稳定充电电流越大, 电池温升速率越大, 充电倍率越高, 相同时间下充入的电量越多。

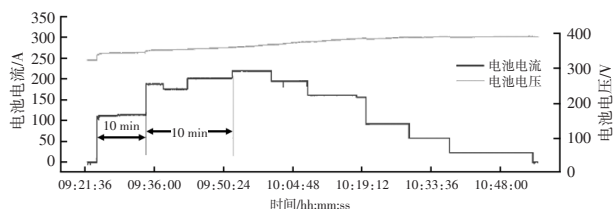


图 11 车辆 C 电池电压和电流变化

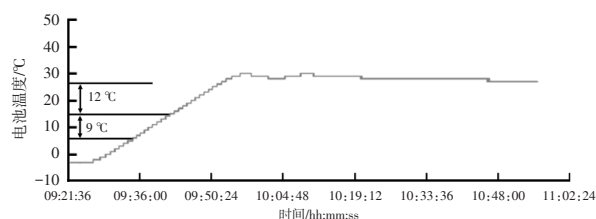


图 12 车辆 C 电池温度变化

2 结束语

受锂离子电池的电化学性质影响, 其在低温条件下充电能力下降, 根本原因是为了防止低温条件下大电流充电电池负极析锂, 从而降低充电电流导致充电能力下降。为解决这一问题, 大多数采取提升电池温度以增大低温条件下充电电流的方法。本文选取 3 种车型、2 种低温充电方法对纯电动车用锂离子动力电池低温充电时电池温升速率的影响因素展开分析。

在不同车型、低温充电方法相同、不同加热功率的条件下分析仅加热不充电阶段电池的温升速率, 结果表明外部热源加热功率越大, 电池温度升高越快、温升速率越大。对比同一车型在仅加热不充电阶段和边加热边充电阶段温升速率和平均充电速率的差异, 说明电流的加入对提升低温下电池温度有较好的效果, 电池温度的增加使得电池充电表现更好、平均充电速率更大, 充电更快。此外, 通过对仅采用边加热边充电方法的车辆电池充电电流及温度变化进行分析, 得到充电电流的大小与电池温度具有一定相关性, 从而影响温升速率的大小及充电倍率, 最终直接关系到低温下动力电池的充电时间。

综合上述分析, 外部热源的加热功率、充电模式及稳定充电电流的大小均为影响锂离子电池温升速率的重要因素, 通过增加外部热源功率、优化低温充电模式和增加初始充电电流大小来提高电池温升速率。本文仅在现有数据上对温升速率的影响因素进行了基于数据驱动定性分析, 后续可在有大量试验数据的基础上对自变量与因变量开展定量分析以及各自变量间的相关性分析。

参考文献

- [1] 王苏杭, 李建林, 李雅欣, 等. 锂离子电池系统低温充电策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1537-1542.
- [2] ZHE L, WANG Y, BIE X, et al. Low Temperature Properties of the $\text{Li}[\text{Li}0.2\text{Co}0.4\text{Mn}0.4]\text{O}_2$ Cathode Material for Li-Ion Batteries[J]. Electrochemistry Communications, 2011, 13(19): 1016-1019.

- [3] WANG T, WU X, XU S, et al. Performance of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Under Low Temperature Condition and Economy Analysis of Battery Pre-Heating[J]. Journal of Power Sources, 2018, 401(10): 245-254.
- [4] ZHU G, WEN K, LV W, et al. Materials Insights Into Low-temperature Performance of Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 300(12): 29-40.
- [5] 高庆九, 周小艳. 中国冬季最低气温观测与再分析资料的比较[J]. 气象科学, 2017, 37(7): 8.
- [6] SHENG S Z. The Effect of the Charging Protocol on the Cycle Life of A Li-Ion Battery[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2): 1385-1391.
- [7] JIANG J, LIU Q, ZHANG C, et al. Evaluation of Acceptable Charging Current of Power Li-Ion Batteries Based on Polarization Characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6844-6851.
- [8] LI J, MURPHY E, WINNICK J, et al. The Effects of Pulse Charging on Cycling Characteristics of Commercial Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2001, 102(1-2): 302-309.
- [9] CHEN L R, WU S L, SHIEH D T, et al. Sinusoidal-Ripple-Current Charging Strategy and Optimal Charging Frequency Study for Li-Ion Batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 88-97.
- [10] ZHANG C, JIANG J, GAO Y, et al. Charging Optimization in Lithium-Ion Batteries Based on Temperature Rise and Charge Time[J]. Applied Energy, 2016, 194(5): 569-577.
- [11] OUYANG Q, CHEN J, ZHENG J, et al. Optimal Multi-Objective Charging for Lithium-Ion Battery Packs: A Hierarchical Control Approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 4243-4253.
- [12] TIPPMANN S, WALPER D, BALBOA L, et al. Low-Temperature Charging of Lithium-Ion Cells Part I: Electrochemical Modeling and Experimental Investigation of Degradation Behavior[J]. Journal of Power Sources, 2014, 252(4): 305-316.
- [13] YANG X G, WANG C Y. Understanding the Trilemma of Fast Charging, Energy Density and Cycle Life of Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 402(10): 489-498.
- [14] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. The Optimization of a Hybrid Energy Storage System at Subzero Temperatures: Energy Management Strategy Design and Battery Heating Requirement Analysis[J]. Applied Energy, 2015, 159(12): 576-588.
- [15] ZHU J, SUN Z, WEI X, et al. An Alternating Current Heating Method for Lithium-Ion Batteries From Subzero Temperatures[J]. International journal of energy research, 2016, 40(13): 1869-1883.
- [16] 阮海军. 低温环境下锂离子电池优化加热及充电方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [17] PENG X, CHEN S, GARG A, et al. A Review of The Estimation and Heating Methods for Lithium-Ion Batteries Pack at the Cold Environment[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(3):645-662.
- [18] REMMLINGER J, TIPPMANN S, BUCHHOLZ M, et al. Low-Temperature Charging of Lithium-Ion Cells Part II: Model Reduction and Application[J]. Journal of Power Sources, 2014, 254(5):268-276.
- [19] GE H, AOKI T, IKEDA N, et al. Investigating Lithium Plating in Lithium-Ion Batteries at Low Temperatures Using Electrochemical Model with NMR Assisted Parameterization[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(6): 1050-1060.
- [20] ZHAO X W, ZHANG G Y, YANG L, et al. A New Charging Mode of Li-Ion Batteries with Lifepo4/c Composites Under Low Temperature[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 104(2): 561-567.
- [21] YANG X G, LIU T, GAO Y, et al. Asymmetric Temperature Modulation for Extreme Fast Charging of Lithium-Ion Batteries[J/OL]. Joule. (2019-12-18)[2024-04-04]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Asymmetric-Temperature-Modulation-for-Extreme-Fast-Charging-Liu/e525f23f644fcd25eeb716abab8b9633f7dc02e>.
- [22] 电车汇. 中汽中心 2019 版 EV-TEST 电动汽车测评规则发布[J]. 汽车实用技术, 2019(8):1.

(责任编辑 明慧)

【作者简介】

李丽丽(1995—),女,中国第一汽车股份有限公司研发总院,硕士,助理工程师,研究方向为新能源汽车整车开发系统集成。

E-mail: lili9@faw.com.cn