·新能源汽车充电技术专题·

纯电动汽车动力电池低温充电性能试验研究

盛宏波　夏弋茹　杨振　李丽丽　许艺怀

（中国第一汽车股份有限公司研发总院，长春 130013）

【欢迎引用】盛宏波，夏弋茹，杨振，等．纯电动汽车动力电池低温充电性能试验研究[J]．汽车文摘，2026(3)：18-22.

【Cite this paper】SHENG H B, XIA Y R, YANG Z, et al. Experimental Research on Low Temperature Charging Performance of Power Battery for Battery Electric Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(3): 18-22.

【摘要】为了探究不同环境温度下充电效率与电池加热效率的差异性及其影响因素，提出了低温条件下纯电动汽车（BEV）充电时充电效率与电池加热效率的测试方法，针对不同温度工况下的动力电池充电效率和加热效率展开研究，量化分析了充电效率的衰减规律与加热过程中的能量损失，为优化纯电动汽车的低温充电性能提供了参考。

关键词：纯电动汽车；动力电池；低温充电

中图分类号：U469.72　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240119

Experimental Research on Low Temperature Charging Performance of Power Battery for Battery Electric Vehicles

Sheng Hongbo, Xia Yiru, Yang Zhen, Li Lili, Xu Yihuai

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

【Abstract】To investigate the differences and influencing factors between charging efficiency and battery heating efficiency under varying ambient temperatures, the paper proposes a testing methodology for evaluating charging efficiency and heating efficiency of Battery Electric Vehicle (BEV) under low-temperature conditions. Research is conducted on power battery charging efficiency and heating efficiency across different temperature operating conditions. The study quantitatively analyzes the attenuation patterns of charging efficiency and energy losses during the heating process, thereby providing a reference for optimizing the low temperature charging performance of BEV.

Key words: Battery Electric Vehicle (BEV), Power Battery, Low temperature Charging

0　引言

作为纯电动汽车能源补给的核心技术之一，动力电池充电技术的效率与安全始终是行业与学术界高度关注的研究领域。虽然快充技术已经得到了迅速发展，但是在补能时间方面，纯电动汽车依然难以和传统燃油车匹敌，引发部分用户抱怨。尤其是在低温环境下，锂离子电池会出现容量缩减、内阻变大、充电过程中析锂等问题，甚至可能引发安全事故，限制了纯电动汽车在我国北方地区的推广与应用[1-3]。因此，低温充电问题仍是当前亟待解决的难题。

电池加热是解决低温环境下充电时间增加的重要途径之一。目前，量产的纯电动汽车均配备热管理系统以调节电池温度。主流车企通常采用正温度系数（Positive Temperature Coefficient，PTC）加热技术[4]，其工作原理是利用热敏电阻将电能转化为热能并加热冷却液，冷却液流经换热器和电池液冷板，最终将热量传递至电芯，从而实现电池加热。PTC技术虽能确保电池温度均匀性，但其系统复杂、成本较高且能耗较大[5-6]。Fan[7]等通过仿真软件建立了电池加热与冷却一体化的电池包模型，研究了环境温度-20 ℃条件下，电池入口液体质量流量和电池入口水温对电池加热性能的影响。研究发现电池入口液体质量流量和电池入口目标温度存在限值，在达到限值后，电

池温升速率提升将不再明显。特斯拉公司利用电机电控等高压部件的散热量通过多向换向阀与液暖电池热管理系统高效集成后为电池加热，在提升节能效果的同时，也降低了电池热管理系统的成本[8-9]。

综上所述，低温环境对动力电池的充电功率以及充电效率具有显著影响，并引起充电时间的差异。本文通过低温充电试验探究了不同浸车温度下充电效率与电池加热效率的差异，并对其影响因素进行了分析，旨在为后续提升低温充电性能提供参考。

1 低温充电试验方法与原理

1.1 充电效率

在充电试验中，由于电化学现象导致的能量损耗，以及电池内阻、线路损耗，充电桩输出的电量无法100%转化为化学能存储在电池中，充电过程中存在能量转换效率问题[10]。本文通过能量效率对充电过程中的能量转换及利用进行评价，充电效率η_c计算公式为：

$$\eta_c=W_i/W_o \tag{1}$$

式中：W_i和W_o分别表示动力电池端输入的电量以及充电桩端输出的电量，W_i通过控制器局域网总线（Controller Area Network，CAN）信号读取，W_o通过CAN信号以及充电桩显示屏获取。

1.2 加热效率

电池加热热源来自于PTC，本文定义加热效率为电池平均加热功率与PTC平均工作功率的比值，电池加热效率η_h可表示为：

$$\eta_h=P_b/P_{PTC} \tag{2}$$

式中：P_b为动力电池平均加热功率，P_{PTC}为PTC工作的平均功率。

根据热量计算公式可计算冷却液为电池提供的热量，定义其与时间的比为电池平均加热功率P_b，计算公式为：

$$P_b=cm\Delta T/t \tag{3}$$

式中：c为比热容，m为质量，t为时间，m/t为冷却液质量流量，ΔT为电池冷板入水口和出水口的温差。

1.3 试验方法

本试验参照中汽研发布的EV-TEST管理规则[11]，车辆放电完成后，分别在常温（25 ℃）、-10 ℃、-20 ℃以及-30 ℃环境中浸车14~16 h，开展直流充电试验。为了消除电池荷电状态（State Of Charge，SOC）修正导致的SOC评估误差，本试验选取实际SOC处于10%~80%的区间进行测试。

2 试验结果

根据上文提出的充电测试方法，对试验车辆进行充电测试，充电试验能量流示意及试验数据如图1和表1所示。

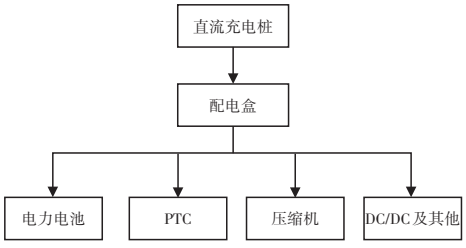


图1 能量流示意

表1 车辆充电试验结果

项目名称	试验参数			
环境温度/℃	25	-10	-20	-30
电池初始温度/℃	22	-9	-15	-26
初始SOC/%	10	10	10	10
终止SOC/%	80	80	80	80
电池端输入电量W_i/kW·h	76.12	76.03	76.21	76.16
充电桩端输出电量W_o/kW·h	77.15	79.57	81.28	84.71
PTC消耗电量占比/%		4.61	5.65	8.31
加热终止温度/℃		15	15	20

3 试验数据分析

3.1 低温充电效率分析

试验车型在不同温度条件下的充电试验结果，如图2所示。充电效率随电池初始温度降低而减小，说明在低温环境下，充电效率将有所衰减，且环境温度越低，充电效率衰减越明显。常温下充电效率为98.66%，而在低温-10 ℃环境下，电池初始温度为-9 ℃时，充电效率为94.98%，较常温充电效率降低了3.68%；随着电池初始温度进一步降低至-15 ℃，充电效率衰减为93.76%，较常温衰减了4.90%；当环境温度为-30 ℃时，电池初始温度为-26 ℃，充电效率进一步衰减至89.91%，相较于常温降低了8.75%。

在充电过程中，影响充电效率的最主要因素是高压部件（如PTC、压缩机）耗能。在低温充电过程中，PTC是主要的能耗源头。环境温度-10 ℃工况下，电池初始温度为-9 ℃，加热停止温度为15 ℃，在整个电池加热的过程中，PTC消耗能量占比4.61%；

在-20 ℃环境温度下，动力电池初始温度为-15 ℃，在电池温度为15 ℃时PTC停止工作，在此过程中PTC消耗能量占比达5.65%；在-30 ℃寒冷环境下，电池充电初始温度为-26 ℃，加热至20 ℃时，PTC停止工作，消耗电能占比8.31%。通过对比可以发现，低温环境下的充电效率相较于常温有所衰减，并且随着电池初始温度的降低，充电效率也会随之降低。如图2所示，在充电过程中，低温充电相较于常温充电最大的差异在于PTC耗能增加，这是低温充电效率低于常温充电的主要原因。低温环境下充电需要PTC为电池升温提供热源，而环境温度越低，初始电池温度越低，需要PTC消耗越多的电量为电池加热到适宜温度，所以导致在电池充入相同电量的情况下，充电效率随电池初始温度的降低而衰减。

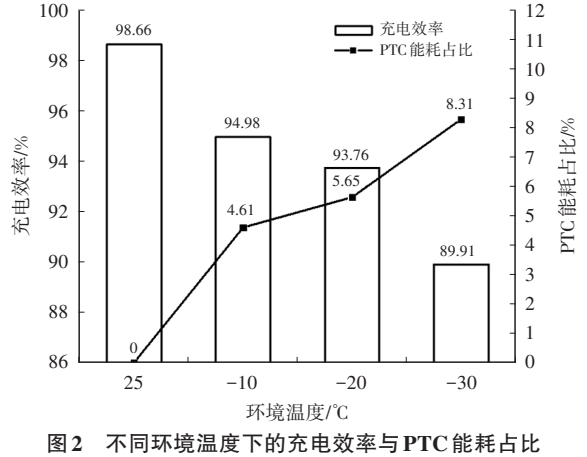


图2　不同环境温度下的充电效率与PTC能耗占比

3.2　低温加热效率分析

为了进一步探究PTC的能量利用率，根据式(2)和式(3)对PTC加热效率进行了计算，结果如图3所示。在-10 ℃环境下，电池加热效率为76.13%；在-20 ℃环境下充电时，电池加热效率为77.38%；而在-30 ℃环境下，电池加热效率为77.79%。图3表明，在低温环境下充电的电池加热效率并不高，在电池加热过程中存在着20%以上的能量损失。

在PTC液暖的加热方案中，PTC将消耗的电能转化为热能，再通过热传导的方式加热冷却液，被加热的冷却液流经电池冷板实现电池加热。该过程可以分为4个阶段：PTC耗能、PTC制热、冷却液加热以及电池端加热。在此过程中，造成能量损失的原因可能有3种：(1)PTC的能量转化效率不高，在将电能转化为热能的过程中有部分能量损失，通常PTC电加热效率约为95%时，存在约5%的能量损失[12]；(2)PTC释放热量与冷却液热交换时，可能损失一部分能量；(3)冷却液被PTC加热之后与流入电池冷板之前，管路流通的过程中也可能产生能量损失。因此，为了进一步探究电池加热过程中能量损失的原因，计算了上述4个阶段的平均功率与能量损失，结果如图4所示。在-10 ℃、-20 ℃与-30 ℃环境充电过程中，可以明显看出冷却液加热阶段的能量损失最多，在热源PTC与冷却液进行热交换时，存在一定能量损失，导致热交换效率不高。因此，PTC释放热量与冷却液热交换时损失的能量是电池加热过程中能量损失的主要来源。

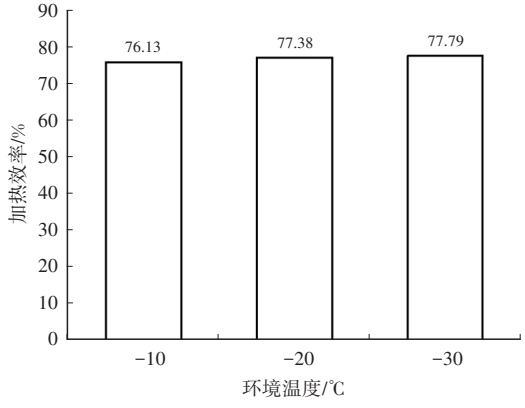
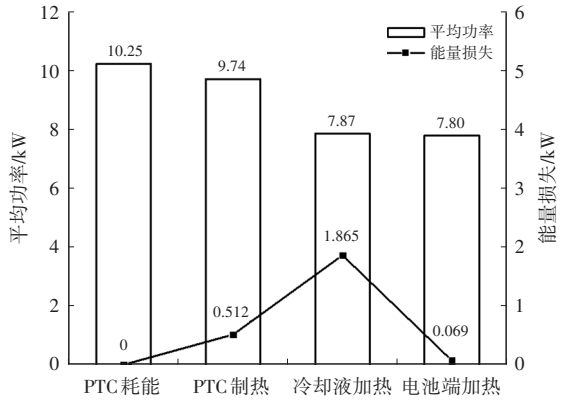


图3　低温环境下的电池加热效率

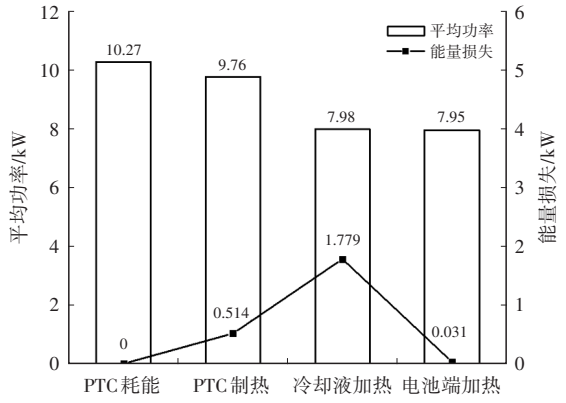
3.3　低温加热效率的时域分析

为了进一步探究电池加热效率分布情况，寻找电池加热的高效区间，进而为提升电池加热效率提供参考，本文分别对-10 ℃、-20 ℃以及-30 ℃环境的PTC工作功率以及加热效率的时间分布进行计算。

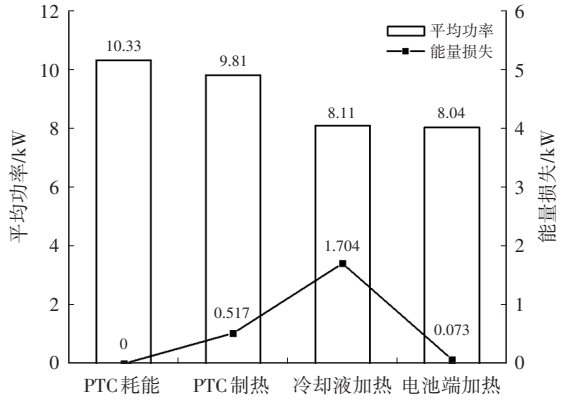
如图5所示，在电池加热的初始阶段，PTC工作功率最高，随着电池加热过程，电池温度逐渐上升，PTC工作功率随电池温度上升而减小；当电池最小单体温度升至10 ℃时，PTC工作功率突降为8.5 kW，并保持至加热结束。如图5所示，电池加热效率几乎不受加热时间影响，保持在77%左右。由于电池加热效率由电池加热功率和PTC工作功率之比计算得出，且加热效率几乎保持恒定，说明PTC工作功率的设置与电池加热功率相关。而电池加热功率通过电池冷板液体入口、液体出口的温差计算得出，因此，本文进一步探究了PTC工作功率与电池冷板入口、出口温差的关系，结果如图6所示。图6表明，在3种环境温度下，随着加热时间的增加，PTC工作功率与电池冷板入、出水口温差均逐渐减小，且二者之间存在一定的函数关系，即PTC工作功率取决于电池冷板入、出水口温差。



(a)环境温度-10 ℃

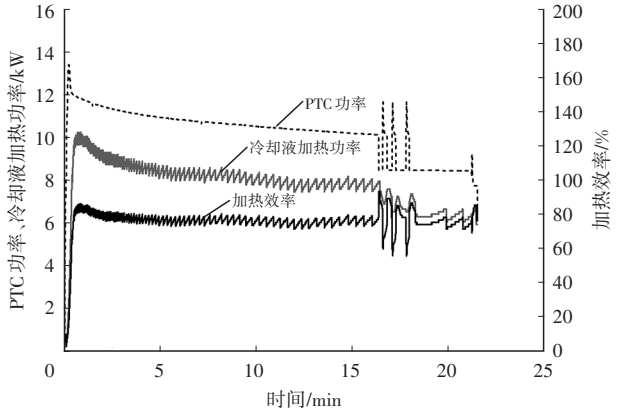


(b)环境温度-20 ℃

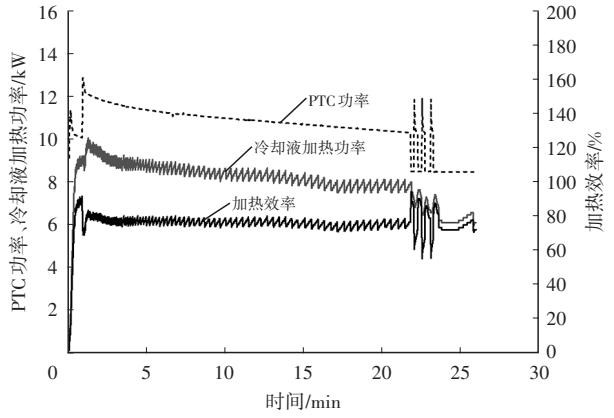


(c)环境温度-30 ℃

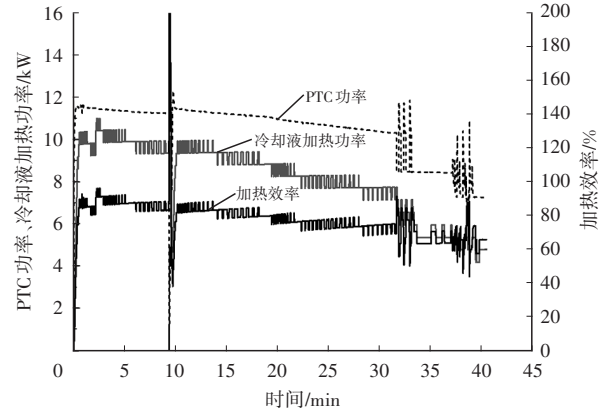
图4　低温加热过程的平均功率与能量损失



(a)环境温度-10 ℃

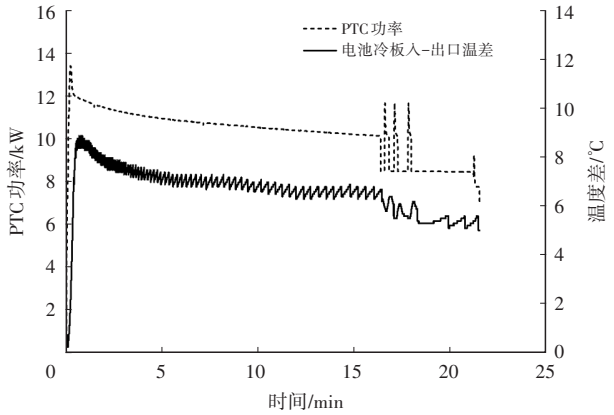


(b)环境温度-20 ℃

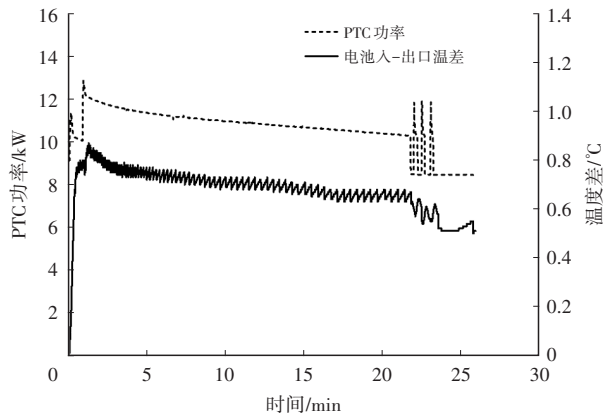


(c)环境温度-30 ℃

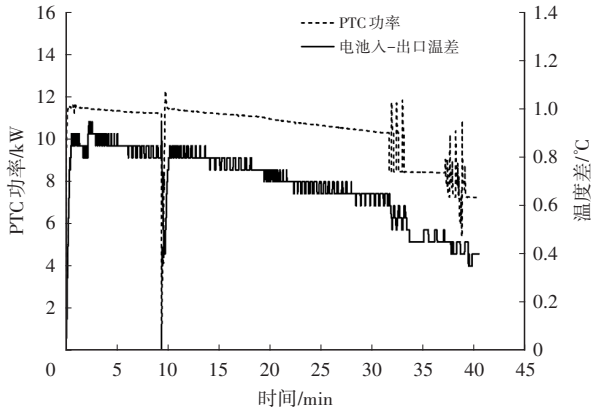
图5　低温环境下电池加热效率的时间分布



(a)环境温度-10 ℃



(b)环境温度-20 ℃



（c）环境温度-30 ℃

图6　低温环境下电池PTC功率与电池入、出水口温差时间分布

3.4　试验数据分析总结

基于上述对动力电池低温充电性能试验数据的分析，得出以下规律：

（1）充电效率随环境温度降低而降低，主要归因于PTC加热能耗占比随温度降低而升高，成为制约充电的主导因素。

（2）电池加热过程中存在显著热损耗，加热效率区间为76%~78%，部分能量未能有效作用于电池加热。

（3）PTC与冷却液的热交换环节是能耗主要来源，其热效换效率对整体加热性能起决定作用。

（4）PTC工作功率与电池冷却板进出口温差呈现显著相关性，功率随温差减小而降低，反映出加热系统具备一定的自适应调节能力。

4　结束语

本文通过试验明确了动力电池低温充电效率随环境温度降低而显著下降的规律，其主要原因在于PTC加热能耗增加。研究进一步发现，电池加热过程中的能量损失主要来源于PTC与冷却液之间的热交换环节，且PTC工作功率与电池冷板进出口温差之间存在潜在的函数关系。本研究深化了对液暖系统能耗机理的认识，为前人研究提供了具体的数据支持与机理补充。后续研究可围绕不同加热技术路线的能效对比、基于上述函数关系的自适应加热策略开发以及电池冷板结构优化等方面展开，以协同提升低温充电性能与系统能效。

参　考　文　献

[1] 邢俊亚，许心一，彭杨茗，等. 脉冲电流加热电池技术在整车上的应用[C]// 2023中国汽车工程学会年会论文集（2）. 北京：机械工业出版社，2023：404-409.

[2] 王文伟，孙逢春. 全气候新能源汽车关键技术及展望[J]. 中国工程科学，2019，21(3)：47-55.

[3] 李平，安富强，张剑波，等. 电动汽车用锂离子电池的温度敏感性研究综述[J]. 汽车安全与节能学报，2014，5(3)：224-237.

[4] 廉玉波，凌和平，陈晨，等. 热泵直热型纯电动汽车低温性能试验研究[C]// 2022中国汽车工程学会年会论文集（2）. 北京：机械工业出版社，2022：369-374.

[5] 肖军. 新能源汽车低温电池热管理方法研究[J]. 汽车文摘，2020(10)：34-40.

[6] 张天时. 液流循环电池成组传热强化及其整车集成热管理研究[D]. 长春：吉林大学，2016.

[7] FAN R J, ZHANG C Z, WANG Y, et al. Numerical Study on the Effects of Battery Heating in Cold Climate[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 26(12): 100969.

[8] MANCINI N, MARDALL J S M, KOPITZ J, et al. Optimal Source Electric Vehicle Heat Pump with Extreme Temperature Heating Capability and Efficient Thermal Preconditioning:US20190070924A1[P]. 2019-03-07.

[9] RAWLINSON P D, SAMPSON N J, KALAYJIAN N R, et al. Thermal Management System for Use with an Integrated MotorAssembly:US20120153718A1[P]. 2012-12-25.

[10] 许桢贤，谭淳洲，罗玲. 动力电池充放电效率测试方法及特性研究[J]. 汽车实用技术，2019(16)：7-9+24.

[11] 中国汽车技术研究中心有限公司. EV-TEST（电动汽车测评）管理规则（2019版）[EB/OL]. 2019(2026-2-10). http://www. 21cnev. com/userfiles/file/20171225/25215318526c522e457955.pdf.

[12] 吕然. 新能源汽车热管理系统能量梯级管理策略研究[D]. 长春：吉林大学，2023.

（责任编辑　**梵玲**）