锂离子动力电池低温快速加热与恒温控制一体化热管理策略研究*

柴旺　张乔　王梦凡

（辽宁工业大学，锦州 121001）

【摘要】针对锂离子动力电池在低温环境下性能急剧衰减的问题，提出了一种高频脉冲自加热与外部薄膜加热协同并辅以“恒温控制”的复合热管理策略。内部加热采用高频（3 kHz）、高放电倍率（2C）的脉冲电流，以快速提升电池芯部温度，外部采用分布式加热膜（10 W）进行辅助加热，在-10 ℃、-15 ℃、-20 ℃低温环境下进行了测试验证，结果表明：该复合加热策略能够显著提升加热速率，且电池组温度均匀性较好；与无恒温措施的对照组相比，该系统能将电池工作温度维持在高效区间（22~25 ℃），使放电电压提升约0.9 V，总放电能量增加2.5%。

关键词：锂离子电池　脉冲加热　加热膜　恒温控制　热管理策略

中图分类号：TM912.9　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260006

Research on Integrated Thermal Management Strategy for Fast Low-Temperature Heating and Constant Temperature Control of Power Batteries

Chai Wang, Zhang Qiao, Wang Mengfan

(Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

【**Abstract**】To address the issue of lithium-ion power batteries experiencing drastic performance degradation in low-temperature environments, a composite thermal management strategy is proposed that combines high-frequency pulse self-heating with external film heating, supplemented by “constant temperature control”. Internal heating uses high-frequency (3 kHz), high discharge rate (2C) pulse currents to rapidly raise the core temperature of the battery, while external distributed heating films (10 W) provide auxiliary heating. Tests are conducted in low-temperature environments of -10 ℃, -15 ℃, and -20 ℃. The results show that this composite heating strategy can significantly increase the heating rate and ensure good temperature uniformity within the battery pack. Compared to the control group without constant temperature measures, this system can maintain the battery operating temperature within an efficient range (22~25 ℃), increase the discharge voltage by about 0.9 V, and boost total discharge energy by 2.5%.

Key words: Lithium ion battery, Pulse heating, Heating film heating, Temperature control, Thermal management strategy

【引用格式】柴旺，张乔，王梦凡. 锂离子动力电池低温快速加热与恒温控制一体化热管理策略研究[J]. 汽车工程师，2026(9): 23-29.

CHAI W, ZHANG Q, WANG M F. Research on Integrated Thermal Management Strategy for Fast Low-Temperature Heating and Constant Temperature Control of Power Batteries[J]. Automotive Engineer, 2026(9): 23-29.

*基金项目：辽宁省科技计划联合计划面上项目（2024-MSLH-198）；辽宁工业大学大学生创新训练计划项目（S202510154012）。

1 前言

在低温环境下，锂离子电池的电化学性能急剧衰减，制约了电动汽车在寒区的推广应用。为此，开发高效的低温热管理技术至关重要。

目前，针对锂离子电池低温预热的研究主要分为外部加热与内部自加热两种技术路径。其中，外部加热技术因其结构相对简单、控制方便而广泛应用，例如：于远彬等[1]针对增程式电动汽车，研究了基于行车工况的电池组预热策略；肖军等[2]从工程应用角度设计了集成化的电池包热管理系统。内部自加热技术利用电池内阻使电池内部产生焦耳热，理论上具有加热速度快、均温性好的优势。其中，交流电（Alternating Current，AC）加热备受关注：Chen等[3]研究了采用交流电加热时升温速率与电池容量衰减之间的平衡关系；罗玉涛等[4]也较早地开展了电池组交流加热系统研究。此外，脉冲加热也得到了一定探索：曾爽等[5]设计了相关的自加热装置；孙彤辉等[6]针对电动飞机的特殊需求研究了复合加热方法；Wang等[7]提出一种基于微热管阵列（Micro Heat Pipe Array，MHPA）的锂离子电池加热方法；韩京伯[8]提出了一种基于新能源汽车驱动电机逆变器重构的自加热方法。张春秋等[9]总结了集成电机、电控系统、电池与乘员舱的液冷式热管理系统架构发展趋势。特斯拉汽车公司[10-11]提出利用电机、电控系统总成的散热量或压缩机总成的发热量预热电池。李宁、谢贵文等[12]提出利用低温放电产生的内阻热进行内部加热。上述研究展现了内部自加热技术的潜力，但其商业化应用仍面临挑战，如何实现快速、均匀升温、低寿命影响且高效、安全的复合加热，仍是当前研究的难点。

值得注意的是，现有研究多聚焦于“加热”阶段本身，在低温条件下如何以低能耗策略维持电池处于适宜温度区间的系统性研究相对缺乏。鉴于此，本文研究一种融合内部脉冲激励与外部薄膜辅助的复合加热方法，并设计与之协同的恒温控制策略，通过试验验证采用该复合加热方法时电池的升温速率和温度均匀性，并在车辆动态放电工况下评估恒温控制策略在维持电池工作温度、提升放电性能及抑制电池容量衰减方面的作用。

2 复合加热方法及试验准备

2.1 电池的基本参数

18650型电池虽在乘用车领域被逐步替代，但在低速电动汽车、储能、特种车辆及科研验证等细分场景中，其较高的技术成熟度、供应链稳定性和维修灵活性使其仍具有不可替代的优势，故本文仍选用18650型电池作为研究对象，电池的主要技术参数如表1所示。为验证各单体电池的一致性，将电池单体充电至荷电状态（State Of Charge，SOC）达到100%并分别在-10 ℃、-20 ℃、20 ℃环境中静置3 h，以0.2C的电流放电，测试各温度下每个电池单体的放电容量，结果表明，电池的放电容量差异均在±2%范围内，该组电池的一致性较好。

表1 电池主要技术参数

参数	数值
制造商	松下
额定容量/A·h	2.5
标称电压/V	3.7
电池直径/mm	18
电池高度/mm	65
充电截止电压/V	4.2
放电截止电压/V	2.7

2.2 低温加热平台搭建

本文采用复合加热方法对电池进行预热，其中外部加热采用加热膜，内部加热采用脉冲激励方式。恒温阶段则单独依靠外部加热膜保持温度。

加热平台如图1所示，具体搭建方案为：将被测锂离子电池组置于高低温试验箱（GDS-100A）中，将其温度稳定在目标温度环境下；在电池最大侧面紧密贴附聚酰亚胺薄膜型加热膜，如图2所示，外部包覆薄层气凝胶毡作为保温层；在电池极耳、中心及侧面边缘等关键位置布置5个热电偶以监测电池的温度分布情况。硬件核心包括：采用可编程的电驱脉冲加热装置实现内部自加热，并利用基于负温度系数（Negative Temperature Coefficient，NTC）热敏电阻的数据采集系统进行温度监测。

通过上位机实时记录5个通道的温度和电池端电压等数据，具体硬件参数如表2所示。为保障安全，需在电路中设置独立的硬件保护继电器，实时监测电压、电流和温度，越过阈值时立即切断全部电源。温度达到目标温度后停止加热，电池温度超

出设定阈值时，外部加热膜恒温装置启动，在快速加热的同时进一步提升电池的放电性能。



（a）充放电设备



（b）恒温箱



（c）电池模组



（d）温度采集仪器

图1　低温加热平台

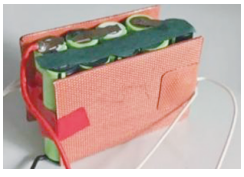


图2　电池组外部加热膜布置

表2　设备参数

设备名称	参数名称	参数值
高低温恒温箱（GDS-100A）	温度范围/℃	-40~80
	相对湿度范围/%	30~95
	温度均匀性/℃	±1.0
	温度波动性/℃	±0.5
	湿度波动度/%	±2.5
双向直流电源	充放电电流范围/A	0~10
	充放电电压范围/V	0~36
	工作方式	稳压稳流状态自动切换
数据采集器	温度范围/℃	-30~110
	温度精度/℃	±0.1
	电压范围/V	-5~5
电池包测试系统（CE-7000系列）	电压/V	0~400
	电流/A	0~100
	功率/kW	40
	测量精度	±0.05%（满量程）

需要指出的是，试验结果仍受到不确定性的影响。温度测量误差主要来源于传感器精度及测点布置，根据温度精度 a_s=0.1 ℃、温度均匀度 a_u=1.0 ℃、温度波动 a_f=0.5 ℃选择矩形分布进行不确定度计算，温度的不确定度为：

$$u_t=\sqrt{\left(\frac{a_s}{\sqrt{3}}\right)^2+\left(\frac{a_u}{\sqrt{3}}\right)^2+\left(\frac{a_f}{\sqrt{3}}\right)^2} \tag{1}$$

计算可得 u_t=0.648 ℃。为了扩展不确定度 u_t，使用2倍标准差来增加置信度：

$$u_T=ku_t=1.296\ ℃ \tag{2}$$

式中：u_T为温度扩展不确定度，k为覆盖因子。

因此，温度的不确定度为±1.296 ℃，考虑测量误差及电池内部温度分布差异，温度不确定度约在±1 ℃~±2 ℃范围内。此外，放电过程中电流控制精度通常为±1%，电流测量值为4 A（2C），且设备精度为±0.05 A，则电流不确定度为±0.037 A。

计算可得温度的不确定度为±1.296 ℃，电流的不确定度为±0.037 A，上述不确定性主要体现在温度变化的绝对数值上，对不同工况下加热效果的变化趋势影响较小。

3　复合加热系统最优参数

3.1　锂电池加热–恒温协同控制策略

首先，将电池组充电至SOC为100%、电压达到约37 V，然后将5个NTC热敏电阻粘贴在电池组表面，用于实时检测电池的温度变化，最后，将电池组置于高低温恒温箱中，分别在-10 ℃、-15 ℃、-20 ℃的温度下静置5 h后，启动复合加热程序。内部加热通过调节不同脉冲电流的频率和幅值实现，外部加热选取不同功率的薄膜加热器，并通过NTC热电偶实时记录温度。以电池的平均温度达到22 ℃作为终止条件进入恒温状态。设定温度控制阈值为22 ℃（启动）和25 ℃（停止），当电池组平均温度低于22 ℃时启动外部加热膜进行补充加热，电池组平均温度达到25 ℃时关闭，恒温控制原理如图3所示。

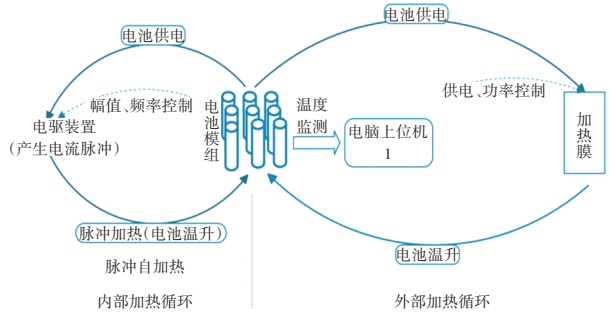


图3　恒温控制原理

3.2　脉冲加热参数优化

3.2.1　不同温度下脉冲电流频率对加热效果的影响

为了研究脉冲电流频率对加热效果的影响，在不

同温度（−10 ℃、−15 ℃、−20 ℃）下以 3 kHz 和 8 kHz 的频率进行单脉冲加热对比试验，结果如图 4 所示。

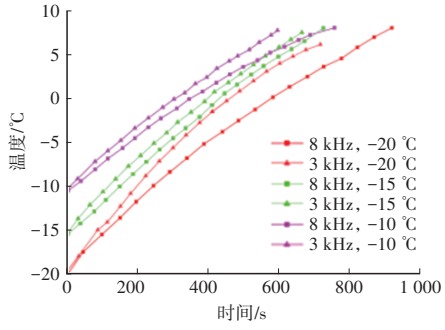
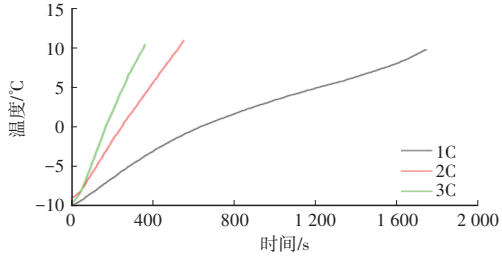


图 4　不同脉冲电流频率下的加热效果

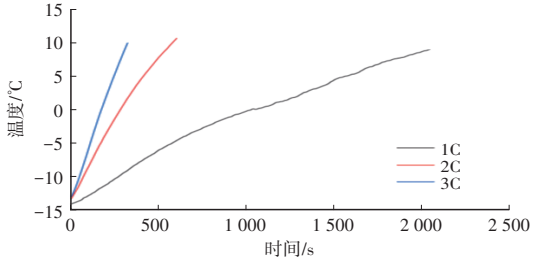
由图 4 可以看出，在脉冲电流幅值恒定的条件下，环境温度、脉冲电流频率越低，电池的温升越快，加热效果越好。为了达到良好的加热效果，选择 3 kHz 的脉冲频率。

3.2.2　不同温度下脉冲电流幅值对加热效果的影响

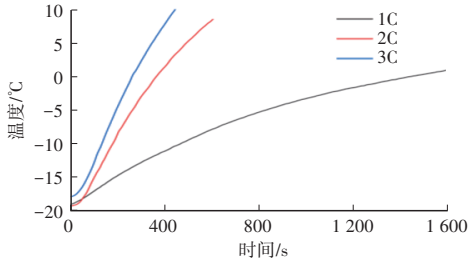
为了研究脉冲电流幅值对加热效果的影响，设置脉冲电流频率为 3 kHz，在不同温度（−10 ℃、−15 ℃、−20 ℃）下以 1C、2C、3C 的脉冲电流幅值加热，试验结果如图 5、表 3 所示。



（a）−10 ℃



（b）−15 ℃



（c）−20 ℃

图 5　不同脉冲电流幅值下的加热效果

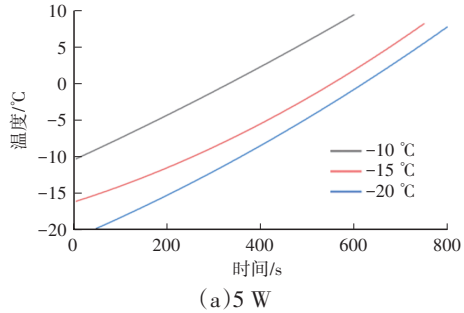
表 3　不同脉冲电流幅值的温升速率

环境温度/℃	温升速率/℃·min⁻¹		
	脉冲电流幅值 1C	脉冲电流幅值 2C	脉冲电流幅值 3C
−10	0.68	2.27	3.39
−15	0.69	2.39	3.64
−20	0.94	2.66	3.88

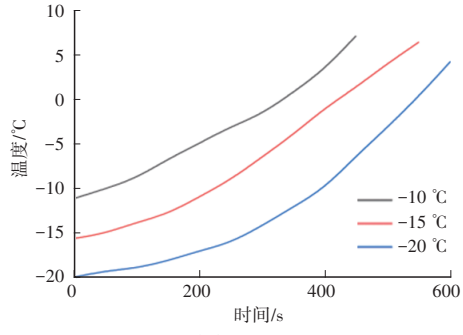
综上，在不同温度下，随着脉冲电流幅值的增大，加热速率不断增大。因此，在保证安全的条件下，选择脉冲电流幅值为 3C。

3.3　加热膜辅助加热参数优化

在电池 SOC 为 100% 的条件下，将电池组分别与功率为 5 W 和 10 W 的加热膜连接，并将电池组及加热设备置于高低温恒温箱中静置 5 h，启动加热膜装置，将电池组温度提升至 10 ℃后停止加热。电池的温度变化情况如图 6、表 4 所示。



（a）5 W



（b）10 W

图 6　不同功率加热膜的加热效果

表 4　不同功率加热膜的温升速率

环境温度/℃	温升速率/℃·min⁻¹	
	加热膜功率 5 W	加热膜功率 10 W
−10	1.91	4.20
−15	2.00	3.40
−20	2.20	3.50

综上，在不同温度下，功率为 10 W 的加热膜的温升速率更快，故选取功率为 10 W 的加热膜。

3.4　复合加热最优参数确定

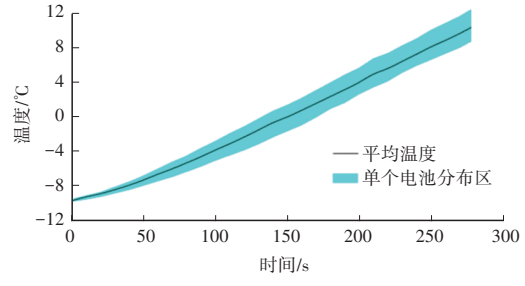
通过上述分析可得，最优加热参数如表 5 所示，采用外部加热膜与内部脉冲加热相结合的方式进行

耦合加热,在不同温度下进行试验,结果如图7所示。

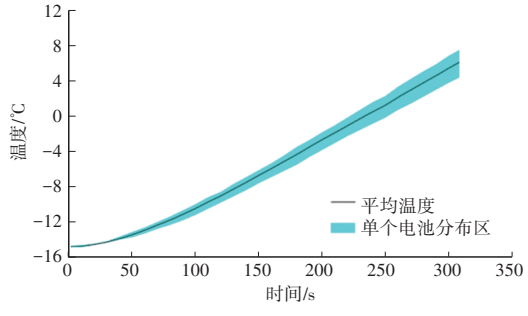
表5　复合加热最优参数

参数	数值
脉冲频率/kHz	3
电流幅值/C	3
加热膜功率/W	10

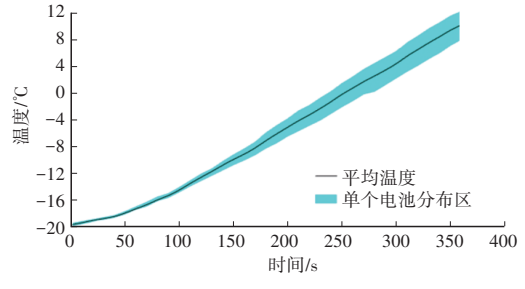
由图7可以看出,在环境温度为-10 ℃、-15 ℃、-20 ℃的条件下,电池温度提高到10 ℃分别需要440 s、510 s、550 s,电池的最大温差约4 ℃,在可接受的范围内,证明该方法能够实现低温环境下的快速预热,且温度分布梯度较小。



(a)-10 ℃



(b)-15 ℃



(c)-20 ℃

图7　不同温度下的复合加热效果

4　恒温系统策略设计

4.1　恒温系统的温度控制范围与工作区间

在-10 ℃、-15 ℃、-20 ℃初始温度下,采用最优参数开展复合加热,待电池组平均温度提高至25 ℃时停止预热。当电池组平均温度低于22 ℃时,开启外部加热膜恒温装置进行加热,直至温度达到25 ℃后关闭该装置,以模拟电动汽车运行过程中的电池恒温控制,因此在停车预热完成后,持续对电池进行2C放电,以模拟电池为电机供电(电机运转)的工况。

在-10 ℃、-15 ℃的环境下,电池的温度变化情况如图8所示,温度并未下降,不需要进行恒温操作。

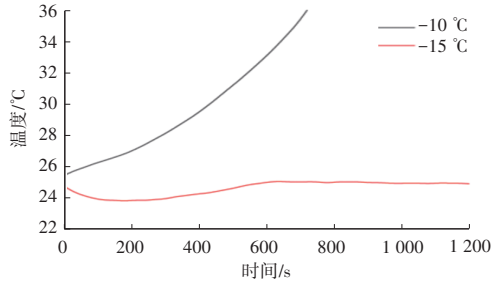


图8　环境温度为-10 ℃、-15 ℃时2C放电温升试验结果

由图8可以看出:在环境温度为-10 ℃的条件下,电池以恒流放电,电池的产热量大于散热量,因此不需要恒温操作;在环境温度为-15 ℃时,放电20 min后电池产热量与散热量基本持平,温度趋于稳定,无需启用恒温装置。

在恒温研究中,电池包的热量主要由电池组自身产热和外部加热膜提供,并通过恒温层外表面进行散热。单体电池的内阻会随温度变化,但在恒温研究中,电池组的温度基本保持在24 ℃左右,故可将单体电池内阻R视为定值,设R=1.95 mΩ。

耦合电池包在环境温度为-20 ℃、2C放电工况下热量变化可表示为:

$$Q=nI^2\cdot R-hA(T_w-T_f) \tag{3}$$

式中:Q为耦合电池包的总产热率,n为单体电池数量,h为恒温层外表面的换热系数,A为恒温层外表面的面积,T_w为恒温层外表面的温度,T_f为恒温层外表面附近流体的温度。

根据式(3)计算可知,在环境温度为-20 ℃时,Q为负值,表明电池包在2C放电工况下,自身产热速率低于散热速率,电池包表面温度持续降低,因此需要启动恒温操作。

4.2　恒温系统参数设计

将集成恒温层与分布式加热膜的测试模组置于-20 ℃的高低温恒温箱内,静置至模组内外温度均衡。通过电池测试系统为模组施加恒定的2C放电电流(模拟车辆持续行驶负载),并开启预设的间歇式主动恒温程序,当模组平均温度传感器监测值低于22 ℃时,外部加热膜自动启动并以恒定功率10 W工作,直至平均温度回升至25 ℃,此时系统自动关闭,形成"监

测-加热-停止”的闭环恒温循环，如图9所示。

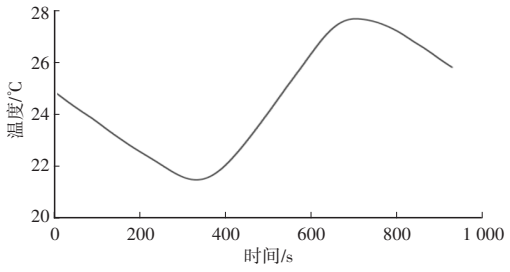


图9　-20 ℃环境下电池组温度曲线

由图9可以看出：当温度低于22 ℃时，恒温装置启动，但温度并不会立即上升；当温度降至20 ℃并达到平衡后，温度开始回升；当温度高于25 ℃时，加热膜自身的余热使电池温度继续上升，直到电池温度达到27 ℃后逐渐下降。

4.3　恒温控制对电池能量的影响

将配置恒温装置和未配置恒温装置的电池组进行对比，分别计算电池组的能耗数据，总放电能量和加热膜放热量分别为：

$$E_{\text{disc}}=\int_{t_1}^{t_2}U(t)\cdot I(t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$Q_{\text{PTC}}=P_{\text{PTC}}\Delta t/\eta \tag{5}$$

式中：U为电池组总电压，I为电池组总电流，t为加热时间，P_{PTC}为加热膜功率，Δt为加热时间，η为加热膜电热转换率。

配置恒温装置和未配置恒温装置的电池组能耗数据如表6所示。

表6　配置恒温装置与未配置恒温装置时电池组能耗数据对比

参数	配置恒温装置	未配置恒温装置	说明
放电电流	2C(5 A)	2C(5 A)	
放电时间/min	25	25	模拟25 min行驶
平均放电电压/V	35.5±0.1	34.6±0.1	配置恒温装置的电池组电压较高
总放电能量/W·h	73.958±0.21	72.083±0.20	
加热膜总能耗/W·h	1.36±0.11		恒温状态下加热膜间歇工作8 min
温度/℃	24.5±0.5	10±0.5	

试验结果表明，在环境温度为-20 ℃、2C恒流放电25 min的工况下，基于加热膜的恒温控制系统可将电池模组的平均工作温度保持在22~27 ℃区间，放电电压较未配置恒温装置的对照组提升0.9 V±0.2 V，总放电能量增加1.8 W·h±0.4 W·h(提升约2.5%)。尽管恒温系统自身消耗1.36 W·h±0.11 W·h能量，但其确保了电池在极端低温环境下的稳定高性能输出，避免了因电压过低提前终止放电。进一步分析表明，该系统的能效与运行时长高度相关。在更长的持续放电场景下(如>1 h)，预期可实现整车能量的正向净收益。因此，该恒温系统可有效提升电动汽车在严寒环境下的综合性能与可靠性。

4.4　恒温控制对电池容量衰减的影响

为了研究恒温控制对电池健康状态(State Of Health，SOH)的影响，在脉冲频率为3 kHz、电流幅值为2C的恒定参数下，进行60个循环的加热试验。试验共分为3组：一组配置恒温装置并将温度控制为25 ℃，另外两组未配置恒温装置，环境温度分别设置为10 ℃和-10 ℃，试验结果如图10所示。

由图10可以看出：采用恒温控制的电池在平均温度为25 ℃的环境下，经过40个循环的加热后电池容量损失约4.2%，在经过60个循环的加热后电池容量损失约9.6%；未配置恒温装置的电池组在平均温度为10 ℃的环境下，经过40个循环的加热后电池容量损失约6.8%，在经过60个循环的加热后电池容量损失约12.7%；在未配置预热和恒温、环境温度为-20 ℃的条件下，经过40个循环的加热后，电池容量损失约8.8%，经过60个循环的加热后，电池容量损失约18.0%。上述结果表明，配置恒温装置时，在60个循环的加热后，电池容量提高约3.1%，证明恒温控制能够减少电池的容量衰减，从而提高电池的使用寿命。

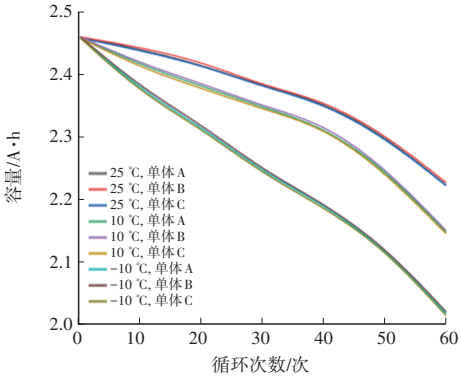


图10　电池容量变化

5　结束语

本文提出了一种外部采用加热膜加热、内部采用脉冲加热的锂离子动力电池复合加热策略，并分析了不同温度下脉冲频率、电流幅值、外部加热膜功率对加热效果的影响，结果表明，脉冲电流频率为3 kHz、电流幅值为3C、外部加热膜功率为10 W时，电池加热速率较快且温度分布相对均

匀。据此提出一种低能耗、基于外部加热膜的恒温控制系统,可有效提升电池放电能量,延长电池使用寿命。

参 考 文 献

[1] 于远彬, 李新用, 闵海涛, 等. 增程式电动车动力电池组低温行车预热策略[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 209-219.
YU Y B, LI X Y, MIN H T, et al. Preheating Strategy of Extended-Range Electric Vehicle Power Battery Packs for Low-Temperature Driving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 209-219.

[2] 肖军, 张明, 刘志强, 等. 车用电池热管理系统试验台架研制与试验研究[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(20): 13-16.
XIAO J, ZHANG M, LIU Z Q, et al. Research on the Test Bench for the Battery Thermal Management System of Electric Vehicle[J]. Automobile Applied Technology, 2020, 45(20): 13-16.

[3] CHEN S L, YANG N X, ZHANG X W, et al. Low-Temperature Heating Method for Lithium-Ion Batteries Using Alternating Current: Balancing Temperature Rise Rate and Capacity Degradation[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 281.

[4] 罗玉涛, 郎春艳, 罗卜尔思. 低温环境下锂离子电池组加热系统研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 100-106.
LUO Y T, LANG C Y, LUO B E S. Investigation into Heating System of Lithium-Ion Battery Pack in Low-Temperature Environment[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 100-106.

[5] 曾爽, 陈平, 陈海洋, 等. 电动汽车动力电池自加热装置设计[J]. 电源技术, 2019, 43(1): 88-90.
ZENG S, CHEN P, CHEN H Y, et al. Self-Heating System of lithium-Ion Battery for Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(1): 88-90.

[6] 孙彤辉, 何建, 张逸群. 电动飞机锂离子电池低温复合加热方法研究[J]. 新型工业化, 2022, 12(2): 247-249+252.
SUN T H, HE J, ZHANG Y Q. Research on Composite Low-Temperature Heating Method for Lithium-Ion Batteries in Electric Aircraft[J]. The Journal of New Industrialization, 2022, 12(2): 247-249+252.

[7] WANG L C, ZHAO Y H, QUAN Z H, et al. Investigation of Thermal Management of Lithium-Ion Battery Based on Micro Heat Pipe Array[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39.

[8] 韩京伯, 朱翀, 李佳, 等. 基于电驱逆变器重构的车用动力锂电池自加热策略[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 179-187.
HAN J B, ZHU C, LI J, et al. Self-Heating Strategy for Automotive Lithium-Ion Batteries Based on Traction Motor and Inverter Reconfiguration[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 179-187.

[9] 张春秋, 徐振鹏. 纯电动车热管理系统构建研究[J]. 汽车文摘, 2020(3): 31-36.
ZHANG C Q, XU Z P. Research on the Construction of Thermal Management System for Pure Electric Vehicle[J]. Automotive Digest, 2020(3): 31-36.

[10] LEI S R, XIN S, LIU S X. Separate and Integrated Thermal Management Solutions for Electric Vehicles: A Review[J]. Journal of Power Sources, 2022, 550.

[11] ZHU T, MIN H T, YU Y B, et al. An Optimized Energy Management Strategy for Preheating Vehicle-Mounted Li-Ion Batteries at Subzero Temperatures[J]. Energies, 2017, 10(2).

[12] 李宁, 谢贵文, 李波, 等. 锂电池内部低温加热方法的研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 43-48.
LI N, XIE G W, LI B, et al. Research on Low Temperature Heating Method of Lithium Battery[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 43-48.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2026年3月25日。

(上接第22页)

Solid Electrolyte Particle Size Distribution in Sulfide-Based Solid-State Battery Composites[J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(41).

[44] PENG L F, YU C, ZHANG Z Q, et al. Tuning Solid Interfaces via Varying Electrolyte Distributions Enables High-Performance Solid-State Batteries[J]. Energy & Environmental Materials, 2023, 6(2): 114-121.

[45] HOOD Z D, MANE A U, SUNDAR A, et al. Multifunctional Coatings on Sulfide-Based Solid Electrolyte Powders with Enhanced Processability, Stability, and Performance for Solid-State Batteries[J]. Advanced Materials, 2023, 35(21).

[46] 张正, 杜泽谱, 侯敏, 等. 真空烧结优化氧化物固态电解质的性能研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(11): 1927-1934.
ZHANG Z, DU Z P, HOU M, et al. Study on Performance Improvement of Oxide Solid Electrolytes by Vacuum Sintering[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(11): 1927-1934.

[47] QIAN X T, LÜ Y X, ZHOU S Y, et al. Enhancing Long Stability of Solid-State Batteries Through High-Energy Ball Milling-Induced Decomposition of Sulfide-Based Electrolyte to Sulfur[J]. Advanced materials, 2024, 36(48).

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2026年7月7日。