

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.11.013

# 磷酸铁锂电池碳纳米管膜加热结构设计及验证\*

唐超, 岑志雄, 殷正翰, 王海瑞, 袁培毓, 谢宗蕙

(中山大学深圳航空航天学院, 深圳 518107)

**[摘要]** 针对磷酸铁锂电池低温环境下的性能衰减问题, 设计开发了一种轻质高强、低压安全、高效节能的磷酸铁锂电池抗低温纤维碳纳米管膜加热功能结构并开展了实验验证。采用热压工艺实现了碳纳米管薄膜与复合材料层合结构的一体化成形。实验验证了FCL(fiber carbon-nanotube film laminated composite)加热器良好的温度均匀性、稳定性以及抗热疲劳性能。开展了低温环境下磷酸铁锂电池加热实验, 并与传统的PTC(positive temperature coefficient)加热器进行了对比分析, 结果表明: 相较于传统的PTC加热器, FCL加热器质量减轻了59%, 能量消耗降低了3.5%, 温升效率提高了26%, 功率质量比提升了195%。

**关键词:** 磷酸铁锂电池; 纤维碳纳米管膜复合材料; 抗低温性能; 功能结构

## Design and Validation of a Carbon-Nanotube Film Heating Panel for LiFePO<sub>4</sub> Battery

Tang Chao, Cen Zhixiong, Yin Zhengnan, Wang Hairui, Yuan Peiyu &amp; Xie Zonghong

School of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107

**[Abstract]** For the problem of performance degradation in LiFePO<sub>4</sub> batteries under low-temperature conditions, a lightweight, high-strength, low-voltage, safe, and energy-efficient Fiber Carbon-nanotube film Laminated heating structure for LiFePO<sub>4</sub> battery is designed and developed, and experimental validation is conducted. The thermocompression technology is used to achieve the integrated molding of the Carbon-nanotube film and composite laminated structure. The experiment verifies the uniformity, stability and thermal fatigue resistance of a FCL (Fiber Carbon-nanotube film Laminated composite) heater. Furthermore, heating experiments on LiFePO<sub>4</sub> batteries in low-temperature environments are carried out, which is compared with the traditional Positive Temperature Coefficient (PTC) heater. The results show that compared to the traditional PTC heater, the FCL heater exhibits a 59% reduction in weight, a 3.5% decrease in energy consumption, a 26% improvement in temperature rise efficiency, and a 195% increase in power-to-weight ratio.

**Keywords:** LiFePO<sub>4</sub> battery; fiber carbon-nanotube film laminated composite; low temperature resistance; functional structure

## 前言

为适应汽车行业节能环保的趋势, 电动汽车逐渐成为行业发展的主流<sup>[1]</sup>。磷酸铁锂电池由于其高安全性和长循环寿命的优势在新能源汽车和储能领

域应用广泛<sup>[2]</sup>。但是, 磷酸铁锂电池的性能受环境温度影响显著, 低温下电解质黏度增加, 锂离子扩散速率降低, 导致电池内阻增大, 容量降低, 放电电压下降<sup>[3]</sup>。在-10 °C时, 容量降低10%左右<sup>[4]</sup>, -20 °C时放电容量骤降, 仅为常温环境下比容量的30%左右, 放电电压也降低15%左右<sup>[5]</sup>。而且在低温环境

\* 深圳市科技计划(JCYJ20220530145203007)资助。

原稿收到日期为2024年03月29日, 修改稿收到日期为2024年05月11日。

通信作者: 谢宗蕙, 教授, 博士, E-mail: xiezongh@mail.sysu.edu.cn。

下锂离子电池充电困难,负极表面易析出锂金属<sup>[6]</sup>,锂枝晶的生长容易刺穿电池隔膜,造成电路短接,导致电池安全性降低<sup>[7]</sup>。因此,为保证电动汽车在寒冷地区的性能和安全,须采用动力电池低温加热方法。

常用的动力电池低温加热方法主要分为内部加热法和外部加热法两大类<sup>[8]</sup>。内部加热法是利用电池内阻产热对电池进行加热<sup>[9]</sup>,电池受热均匀,加热速率较快,但是加热过程须对电池进行充电和放电,会导致电池性能衰减,且存在安全隐患<sup>[10-12]</sup>。外部加热法是利用电池模组以外的热源,如空气加热<sup>[13-15]</sup>、液体加热<sup>[16]</sup>以及电热元件加热<sup>[17]</sup>等方法,以热对流或热传导的方式实现电池升温。空气和液体加热方式加热均匀性较高,但是加热路径长,能量消耗高,对电池箱要求也较高,可靠性难以保证<sup>[18]</sup>。与其他外部加热方法相比,电热元件加热通过加热器和电池直接接触,减少了热传递路径,降低了能量损耗。3种不同电热加热元件的对比图如图1所示,常用的电热元件以金属元件和PTC(positive temperature coefficient)发热体为主<sup>[19-21]</sup>(见图1(a)和图1(b)),存在质量增加、损伤容限低、加热效率较低等缺陷,无法满足新一代磷酸铁锂动力电池加热功能结构的需求。而碳纳米管薄膜是一种高导电性和高导热性的纳米发热材料(见图1(c)),可用作加热元件,具备质量轻,热响应迅速,加热均匀稳定,损伤容限高,结构一体化程度和可靠性高等优点<sup>[22-23]</sup>。Kostara等<sup>[24]</sup>利用碳纳米薄膜的热响应迅速的特性,在40 s内从玻璃基板上快速去除3 mm厚的冰层。叶璐等<sup>[25]</sup>将碳纳米管膜用于树脂基复合材料电热固化成形。Janas等<sup>[26]</sup>基于碳纳米管薄膜开发了一种加热组件,经测试该组件加热性能优异,热响应迅速并且节能。

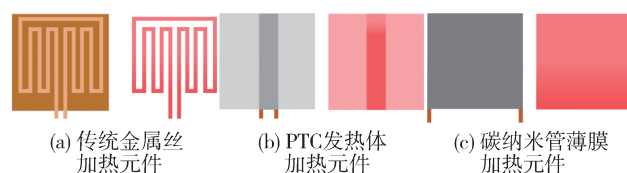


图1 传统金属丝加热元件、PTC发热体加热元件、碳纳米管薄膜加热元件对比

因此,本文将基于碳纳米管薄膜加热元件制备一种轻质高强、低压安全、高效节能的磷酸铁锂电池抗低温纤维碳纳米层合复合材料加热功能结构。基

于该功能结构进行加热是一种解决磷酸铁锂电池在低温环境下性能衰减问题的高效安全的方法。本研究将采用热压工艺制备抗低温加热功能结构;通过实验验证该加热功能结构表面温度的均匀性、稳定性以及抗热疲劳性能;开展低温环境下磷酸铁锂电池加热实验,并与传统的PTC加热器实验结果进行对比分析。

## 1 抗低温加热功能结构的开发

### 1.1 抗低温加热功能结构设计

根据磷酸铁锂电池PTC加热器的使用效果,确定新型电池加热功能结构的设计指标:(1)电池加热功能结构的功率 $\geq 140$  W;(2)使 $-15$  °C状态下的锂离子电池模组(10组电池)升温至 $0$  °C的时间 $\leq 1$  h。依据材料特征,将研制的新型电池加热功能结构命名为磷酸铁锂电池抗低温纤维碳纳米层合复合材料(fiber carbon-nanotube film laminated composite, FCL)加热功能结构(简称FCL加热器)。如图2所示,FCL加热器包含保护层、均热层、绝缘层、加热层以及支撑层。保护层、上绝缘层、下绝缘层为1层玻璃纤维织物/环氧树脂复合材料,具备优异的绝缘性和相容性;支撑层为5层玻璃纤维织物/环氧树脂复合材料,保证功能结构的强度和刚度;均热层为高热导率的碳纳米管导热薄膜,提高热传导效率;加热层为高热转化效率的碳纳米管加热薄膜,确保热响应迅速,加热性能稳定均匀。材料的具体参数如表1所示。

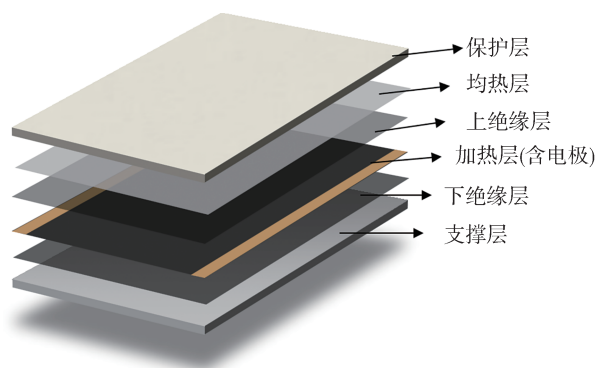


图2 抗低温加热功能结构设计示意图

FCL加热器结构尺寸参考某车载磷酸铁锂电池PTC加热器进行设计,其中,玻璃纤维织物/环氧树脂复合材料大小为 $585$  mm $\times$  $80$  mm,均热层和加热层大小为 $500$  mm $\times$  $72$  mm。加热层设计尺寸如图3所示。

以方阻表征薄膜的阻抗性能,测量方法通常采

表 1 抗低温加热功能结构材料参数

序号	材料	参数
1	玻璃纤维织物/环氧树脂预浸料	拉伸强度:480 MPa 拉伸模量:28 GPa 弯曲强度:480 MPa 弯曲模量:14 MPa 厚度:0.20 mm
2	碳纳米管加热薄膜	加热温度范围:0~200 °C 厚度:0.10 mm
3	碳纳米管导热薄膜	导热系数 $\geq 750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 厚度:0.15 mm

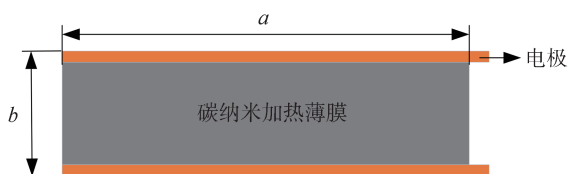


图 3 加热层结构示意图

用等距四探针法,如图4所示,其原理是电流流经两根接触薄膜表面的探针导入材料,另外两根探针采集薄膜表面的电势差,经式(1)计算出电阻率<sup>[27]</sup>。

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{\Delta U_{23}}{I} \cdot d \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为材料的电阻率; $d$ 为薄膜的厚度; $\Delta U_{23}$ 为薄膜表面电势差; $I$ 为电流。

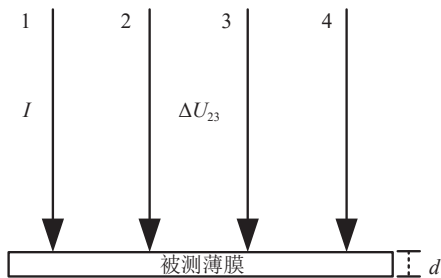


图 4 四探针法测试原理图

由式(2)获取方阻值后可计算获得薄膜的电阻。薄膜的方阻 $R_s$ 和电阻 $R_l$ 为

$$R_s = \frac{\rho}{d} \quad (2)$$

$$R_l = R_s \cdot \frac{a}{b} \quad (3)$$

式中 $a$ 、 $b$ 分别为薄膜的宽度和长度。薄膜的功率 $P$ 为

$$P = \frac{U^2}{R_l} = \frac{U^2}{R_s} \cdot \frac{b}{a} \quad (4)$$

式中 $U$ 为输入电压。由式(4)可知,可以通过调节方

阻、电压值以及调整碳纳米管薄膜尺寸来控制加热区域的功率。

为验证碳纳米管薄膜加热元件电阻率的稳定性,须在FCL加热器成形前,将碳纳米管加热膜封装成加热组件并进行电热性能测试。加热组件包含上、下绝缘层和加热层,依据热压工艺制造加热组件并进行测试。

实验在常温环境下进行。如图5所示,通电加热初始时,加热组件功率为66 W,104 s后温度上升至67 °C,功率为67 W,直至实验结束,功率保持不变。由此可知,碳纳米管薄膜加热元件电阻率比较稳定,受温度影响较小。

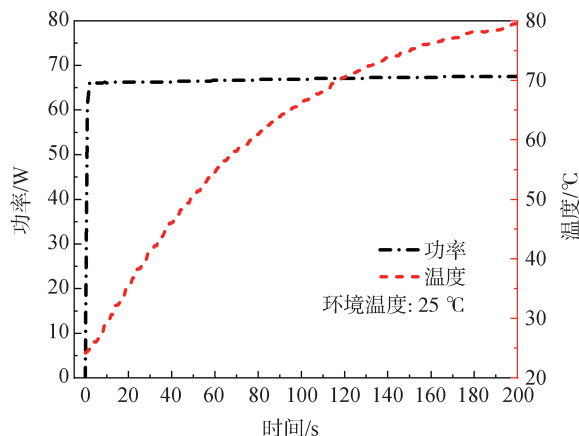


图 5 加热组件功率和表面温度随时间变化曲线图

### 1.2 抗低温加热功能结构制造

采用热压工艺制造FCL加热器。如图6(a)所示,裁剪好合适大小的玻璃纤维织物/环氧树脂预浸

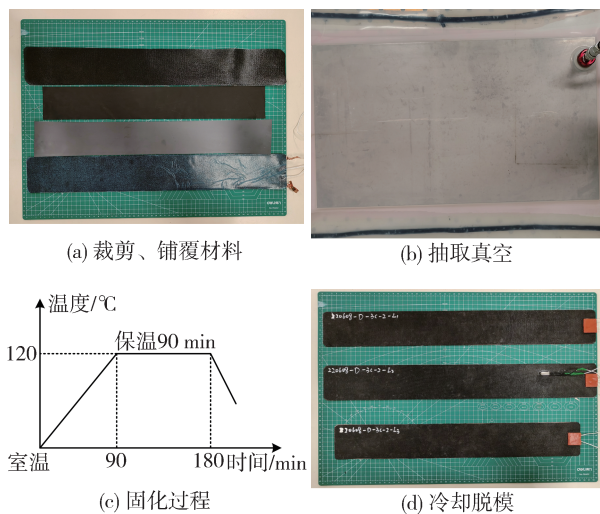


图 6 FCL加热器实物图

料、导热薄膜以及加热薄膜,按照结构设计图依次铺贴平整。采用脱模剂清刷钢板,待钢板表面干燥后,铺设隔离膜、透气毡、脱模布以及铺贴好的加热功能结构。再通过真空袋进行密封后抽取真空,真空压力 $\geq 80$  kPa(参见图6(b))。按照固化工艺曲线(参见图6(c)),在 $120^{\circ}\text{C}$ 温度条件下保温90 min。冷却至 $60^{\circ}\text{C}$ 以下,脱模并检查FCL加热器成形质量(参见图6(d)):厚度为1.4 mm,质量为93.2 g,相对于PTC加热器质量(实测数据:226.9 g)降低了59%。

## 2 纤维碳纳米管复合材料层合加热器性能测试

为验证纤维碳纳米管复合材料层合加热器的温度均匀性、稳定性以及抗疲劳性能,开展常温、低温下FCL加热器温升测试以及加热器热循环测试,对比常温、低温情况下加热器表面温度随时间的变化过程以及热循环过程中加热器内阻的变化过程。

### 2.1 温度均匀性测试

选用的磷酸铁锂动力电池模组额定电压为32 V。因此,测试电压为32 V,环境温度为 $25^{\circ}\text{C}$ ,通电加热至 $95^{\circ}\text{C}$ 后停止加热。在FCL加热器上等间距布置3个热电偶,结合热成像仪记录温度变化情况。

FCL加热器表面热成像图及温升曲线如图7和图8所示。初始通电加热至 $30^{\circ}\text{C}$ 后,加热器底部出现极值点,随温度上升至 $50^{\circ}\text{C}$ 后,温度逐渐分布均匀,最大温差维持在 $3^{\circ}\text{C}$ 左右。 $60^{\circ}\text{C}$ 以后,以中心位置形成极值区域,并逐步向四周扩散,最终占据FCL加热器表面面积五分之四区域。由图8可知,3条曲线在升温过程中基本重合,达到最高温度时,中心温

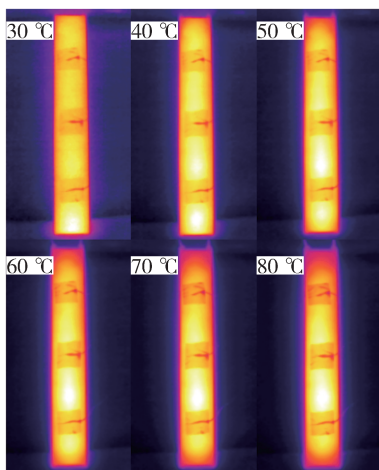


图7 FCL加热器表面热成像图

度稍微高于两侧温度,最大温差为 $4^{\circ}\text{C}$ 左右,与热成像仪记录现象相符。由此可知:FCL加热器升温过程中加热区域最大温差不超过 $5^{\circ}\text{C}$ ,具有良好的加热温度均匀性。

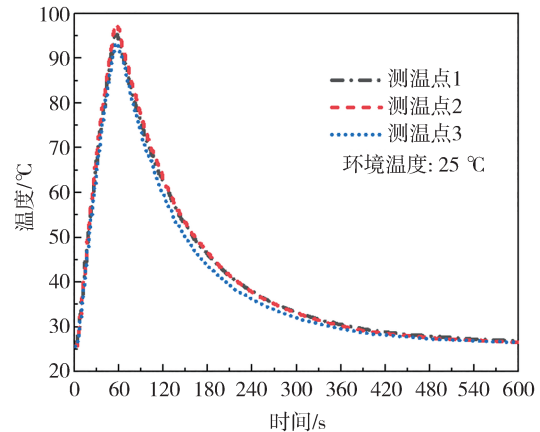


图8 常温环境下FCL加热器温升曲线

### 2.2 稳定性测试

图9为常温环境和低温环境下FCL加热器典型温升曲线图。观察可知,在常温空载情况下,20 s从 $25.9^{\circ}\text{C}$ 升温至 $56.5^{\circ}\text{C}$ ,40 s从 $25.9^{\circ}\text{C}$ 升温至 $82.8^{\circ}\text{C}$ ,区间分别为 $30.6$ 和 $56.9^{\circ}\text{C}$ 。低温空载情况下,20 s从 $-17.0^{\circ}\text{C}$ 升温至 $15.1^{\circ}\text{C}$ ,40 s从 $-17.0^{\circ}\text{C}$ 升温至 $42.9^{\circ}\text{C}$ ,80 s从 $-17.0^{\circ}\text{C}$ 升温至 $80.3^{\circ}\text{C}$ ,区间分别为 $32.1$ 、 $59.9$ 和 $97.3^{\circ}\text{C}$ 。比较常温环境和低温环境下FCL加热器的温升区间,温差为 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,在常温和低温环境下加热器的升温速率分别为 $1.5$ 和 $1.6^{\circ}\text{C/s}$ 。因此,FCL加热器加热性能稳定,受环境温度影响较小。

### 2.3 抗热疲劳性能测试

为考核长时间高低温循环载荷条件下FCL加热

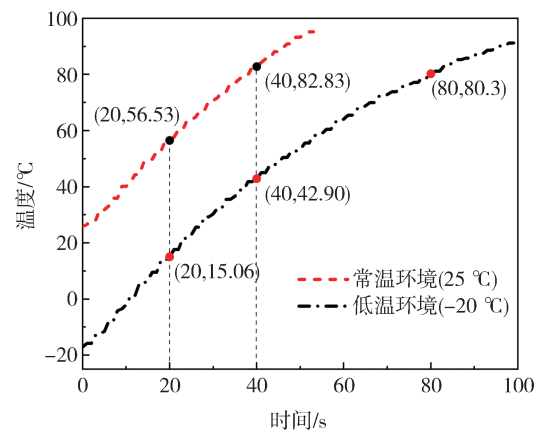


图9 常温环境和低温环境FCL加热器典型温升曲线

器的工作性能,开展FCL加热器热循环测试。图10为加热器热循环温度曲线,循环的最高温度 $T_{\max}$ 为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低温度 $T_{\min}$ 为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测试环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。开启加热器达到 $T_{\max}$ 后降温至 $T_{\min}$ ,为1次温度循环,累计进行1800次温度循环。并分别在实验前及实验进行至第10、20、50、100、200、300、500、1000、1500和1800次循环时测量试件内阻,并对FCL加热器外观进行检查,拍照记录试件状态,确认试件未出现分层、开裂以及起泡等现象后继续进行测试,直到完成1800次温度循环测试。

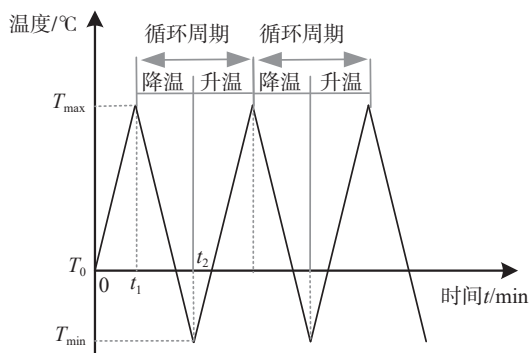


图10 温度循环曲线

FCL加热器热循环测试结果如图11所示。结果显示:经相应的实验次数后,FCL加热器未出现分层、开裂以及起泡等现象;试件初始内阻值为 $4.95\text{ }\Omega$ ,对应输入电压 $32\text{ V}$ 时功率为 $206.9\text{ W}$ ,经300次循环,内阻值逐步递增至 $5.31\text{ }\Omega$ ,经1000次循环后,内阻值为 $5.94\text{ }\Omega$ ,相对初始值增加了 $20.0\%$ ,加热功率衰减了 $16.7\%$ 。经1800次循环,内阻值为 $6.08\text{ }\Omega$ ,相对1000次循环,内阻值增加了 $2.4\%$ ,功率下降 $2\%$ 。由此可知,FCL加热器具备良好的抗热疲劳性能。

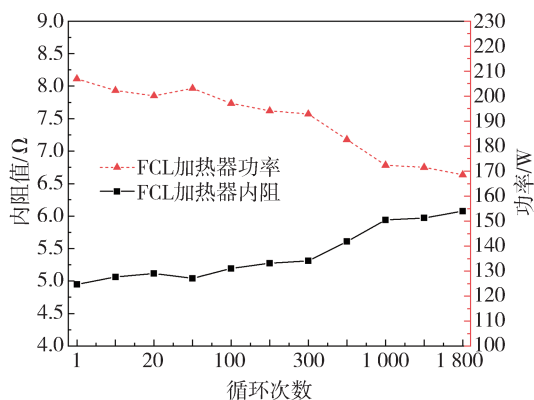


图11 FCL加热器热循环测试

### 3 低温环境下磷酸铁锂电池抗低温加热效果验证实验

#### 3.1 实验装置

磷酸铁锂电池加热实验台主要由低温环境箱、磷酸铁锂电池模组、加热器、电源系统、功率测量系统及温度测量系统组成。如图12所示,加热实验在低温环境箱内进行,通过压缩机制冷调节环境温度。实验选用的磷酸铁锂电池为 $93\text{ V}$ 、 $150\text{ A}\cdot\text{h}$ 某车动力电池系统总成中的电池模组(见图13(a)),总计10组电池,每组电池额定电压为 $3.2\text{ V}$ 。为模拟电池在电池舱中的环境,在电池四周贴上一层保温海绵。加热器放置在磷酸铁锂电池模组的底部,对电池进行加热。其中,FCL加热器外侧加入 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -KSD9700温控开关,实现脉冲式加热,有效保证磷酸铁锂电池和加热器的安全,并降低能量消耗。电源系统采用稳压直流电源CSYJ400-18,最大输出电压为 $400\text{ V}$ ,最大输出电流为 $18\text{ A}$ 。温度测量系统采用自研的温度测量仪,如图13(b)所示,主要是通过热电偶采集电池各个位置的温度,总共布置了18个热电偶,加热器外侧、电池左侧、内部、右侧、顶部以及底部分别等间距放置3个热电偶。功率测量系统采用炬为的DT24功率计,串联在电路中测量输出电压和输出电源,测量功率范围为 $0\sim 11.4\text{ kW}$ ,测量电流范围为 $0\sim 30\text{ A}$ 。

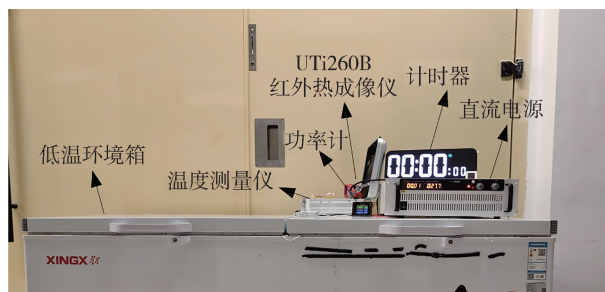


图12 磷酸铁锂电池加热实验台

#### 3.2 低温环境下磷酸铁锂电池加热实验与分析

磷酸铁锂电池加热实验在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境箱中进行。通过给FCL加热器施加 $32\text{ V}$ 的电压,开始加热实验,记录实验过程中加热器能量消耗情况及磷酸铁锂电池模组温度变化情况。

FCL加热器功率变化曲线如图14所示,FCL加热器的瞬时功率为 $206\text{ W}$ ,平均功率为 $170.6\text{ W}$ 。FCL加热器内外侧及电池温度变化如图15所示,

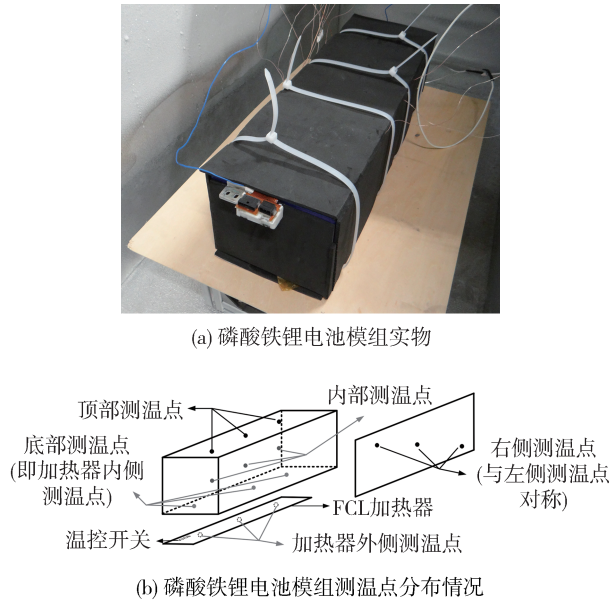


图13 磷酸铁锂电池模组

FCL加热器启动4 min后,加热器外侧温度达到70℃时温控开关自动打开,当温度降低至55℃后温控开关自动闭合,循环往复直至电池温度升到0℃,实验结束。由于FCL加热器内侧靠近电池,外侧接触空气,存在一定温度差。电池左侧温度和电池右侧温度升温曲线斜率一致,升温速率均为0.23℃/min,可见电池整体的升温是均匀的。电池顶部温度由-15升温至0℃需58 min。电池内部温度由-15升温至0℃需45 min,消耗能量128.2 W·h,约占电池模组能量的2.67%。

因此,当FCL加热器平均功率为170.6 W时,满足-20℃环境下的电池模组(10组电池单体)从-15升温至0℃的时间≤1 h的设计要求。

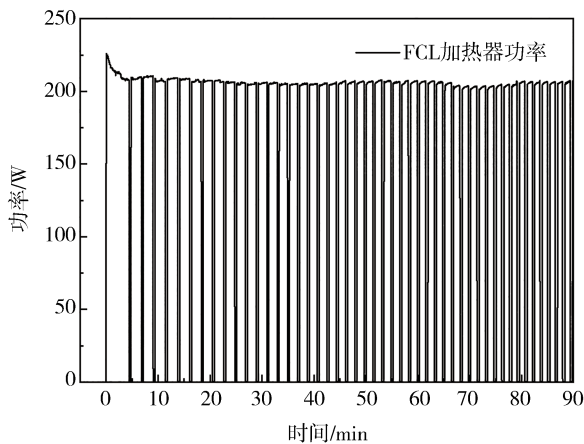


图14 FCL加热器功率变化曲线图

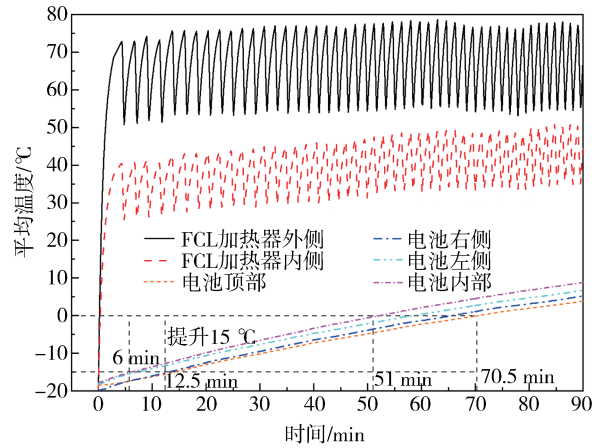
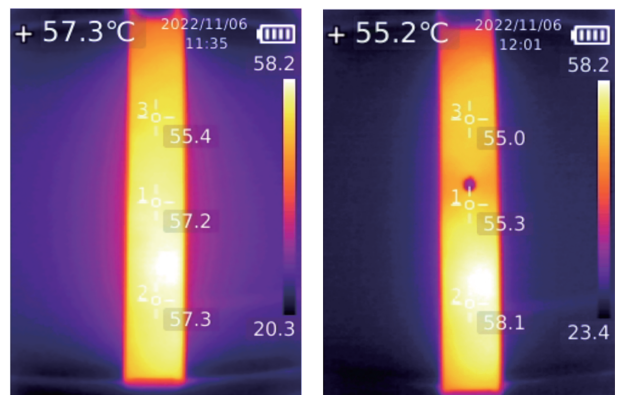


图15 低温环境下FCL加热器和电池温升曲线图

### 3.3 与传统车载锂离子电池加热器的对比与分析

在相同电压输入的情况下,FCL加热器损伤前后对比热成像图如图16所示。由图16(a)可知,FCL加热器未损伤时,加热器表面温度分布比较均匀,最大温差为1.8℃。人工制备通孔损伤后,如图16(b)所示,加热器温度布局发生改变,靠近通孔损伤处温度比未损伤前降低约1.9℃,加热器表面温度分布比较均匀,最大温差为3.1℃。经过加热器损伤前后热成像图对比可知,FCL加热器损伤容忍度高,加热元件受损后对加热器温度均匀性和稳定性影响不大。而电阻丝加热器和PTC加热器的加热元件受损会导致电路断路,影响加热器的正常使用。



(a) 无损FCL加热器热成像图 (b) 含通孔损伤FCL加热器热成像图

图16 FCL加热器损伤前后对比热成像图

施加额定电压93 V给PTC加热器,在-20℃环境下对磷酸铁锂电池模组进行加热。由图17可知,PTC加热器启动5 min后,功率逐渐趋于稳定,平均功率为140.5 W。FCL加热器与PTC加热器的加热

效果对比情况如图18所示,在低温( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )环境下,将电池内部温度从 $-15$ 提升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,FCL加热器需 $45\text{ min}$ ,消耗能量 $128.2\text{ W}\cdot\text{h}$ ,PTC加热器需 $58\text{ min}$ ,消耗能量 $134.5\text{ W}\cdot\text{h}$ 。FCL加热器内侧最高温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,PTC加热器内侧最高温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

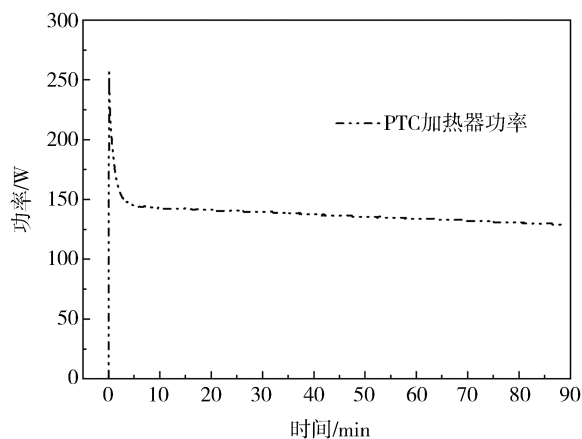


图17 PTC加热器功率变化曲线图

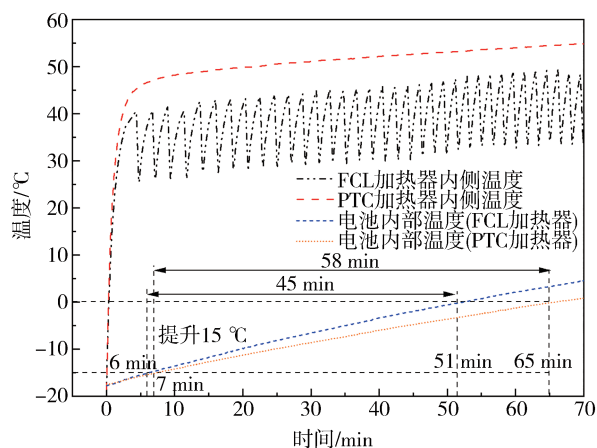


图18 PTC加热器和FCL加热器加热效果对比图

由表2可知,相对于PTC加热器,FCL加热器功率提升 $21.4\%$ ,能量消耗降低 $3.5\%$ ,温升效率提升 $26.0\%$ ,质量减轻 $59.0\%$ ,功率质量比提升了 $195.0\%$ 。

表2 PTC加热器与FCL加热器指标对比

对比内容	PTC加热器	FCL加热器	变化比例/%
供电电压/V	93	32	-65.6
平均功率/W	140.5	170.6	24.4
消耗能量/( $\text{W}\cdot\text{h}$ )	153.8	148.5	-3.5
温升效率/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ )	16.1	20.3	26.0
质量/g	226.9	93.2	-59.0
功率质量比/( $\text{W}\cdot\text{g}^{-1}$ )	0.62	1.83	195.0

## 4 结论

(1)采用热压工艺实现了碳纳米加热薄膜和复合材料结构的一体化成形。厚度为 $1.4\text{ mm}$ ,质量为 $93.2\text{ g}$ ,与传统PTC加热器相比,FCL加热器质量降低了 $59\%$ 。

(2)由常温环境下FCL加热器表面温度分布均匀,拥有良好的电加热性能,升温速率为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;相同功率低温环境下FCL加热器的升温速率为 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,加热性能稳定;经过高低温热循环载荷试验,验证了加热器有良好的抗热疲劳性能。

(3)与传统的磷酸铁锂电池加热功能结构相比,纤维碳纳米层合加热功能结构元件受损后能正常使用且可以保持加热温度的均匀性和稳定性。FCL加热器加热 $45\text{ min}$ 可以将磷酸铁锂电池模组从 $-15$ 提升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,总计消耗能量为 $128.2\text{ W}\cdot\text{h}$ ,约占电池模组容量的 $2.67\%$ 。与传统的磷酸铁锂电池PTC加热器相比,FCL加热器供电电压降低 $65.6\%$ ,功率提升 $21.4\%$ ,能量消耗降低 $3.5\%$ ,温升效率提高 $26.0\%$ ,功率质量比提升 $195.0\%$ 。

(4)本文针对磷酸铁锂电池抗低温纤维碳纳米层合复合材料加热功能结构的验证实验中未考虑电池充放电实验。因此,在后续工作中,将开展磷酸铁锂电池加热前和加热后的充放电实验,对比测试结果,研究FCL加热器加热效果对磷酸铁锂电池充放电性能的影响。

综上,基于碳纳米管薄膜加热元件的FCL加热器实现了对磷酸铁锂电池快速且均匀的加热,提升了电池在低温环境下的内部温度,从而增强电池的充放电能力,可替代传统的PTC加热器。在未来应用中FCL加热器还将面对市场接受度与现有技术兼容性等一系列挑战。

## 参考文献

- [1] LIU K, SHI H, LIU B, et al. Research on new energy vehicle market penetration rate based on nested multinomial logit model [J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(4): 249.
- [2] KIM J, OH J, LEE H. Review on battery thermal management system for electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 192-212.
- [3] 孙含笑. 储能用磷酸铁锂电池产热分析及其热管理[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.  
SUN H X. Thermal analysis and thermal management of lithium iron phosphate battery for energy storage [D]. Qinhuangdao: Yan-

- shan University, 2023.
- [4] PETZL M, KASPER M, DANZER M A. Lithium plating in a commercial lithium-ion battery—a low-temperature aging study [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 275: 799–807.
- [5] SENYSHYN A, MÜHLBAUER M J, DOLOTKO O, et al. Low-temperature performance of Li-ion batteries: the behavior of lithiated graphite [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 282: 235–240.
- [6] FOROOZAN T, SHARIFI-ASL S, SHAHBAZIAN-YASSAR R. Mechanistic understanding of Li dendrites growth by in-situ/operando imaging techniques [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 461: 228135.
- [7] XIONG R, PAN Y, SHEN W, et al. Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: recent advances and perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 131: 110048.
- [8] LIN C, KONG W, TIAN Y, et al. Heating lithium-ion batteries at low temperatures for onboard applications: recent progress, challenges and prospects [J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5 (1): 3–17.
- [9] KALOGIANNIS T, JAGUEMONT J, OMAR N, et al. A comparison of internal and external preheat methods for NMC batteries [J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2019, 10(2): 18.
- [10] TIAN Y, LIN C, LI H, et al. Detecting undesired lithium plating on anodes for lithium-ion batteries—a review on the in-situ methods [J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117386.
- [11] XIONG R, LI Z, YANG R, et al. Fast self-heating battery with anti-aging awareness for freezing climates application [J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119762.
- [12] CAI F, CHANG H, YANG Z, et al. A rapid self-heating strategy of lithium-ion battery at low temperatures based on bidirectional pulse current without external power [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 549: 232138.
- [13] JI Y, WANG C Y. Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures [J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 107: 664–674.
- [14] WANG T, TSENG K J, ZHAO J. Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90: 521–529.
- [15] LIU Y, ZHANG J. Design a J-type air-based battery thermal management system through surrogate-based optimization [J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113426.
- [16] KANG H S, SIM S, SHIN Y H. A numerical study on the lightweight design of PTC heater for an electric vehicle heating system [J]. *Energies*, 2018, 11(5): 1276.
- [17] 谢宗蕪, 袁培毓, 唐超, 等. 一种加热器及其制备方法和应用: CN 202211250513.9 [P]. 2022–11–11.
- XIE Z H, YUAN P Y, TANG C, et al. A heating element and a method of manufacturing and applications: CN 202211250513.9 [P]. 2022–11–11.
- [18] JAGUEMONT J, BOULON L, DUBÉ Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures [J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 99–114.
- [19] LEI Z, ZHANG C, LI J, et al. Preheating method of lithium-ion batteries in an electric vehicle [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2015, 3(2): 289–296.
- [20] 李军求, 吴朴恩, 张承宁. 电动汽车动力电池热管理技术的研究与实现 [J]. *汽车工程*, 2016, 38(1): 22–27, 35.
- LI J Q, WU P E, ZHANG C N. Study and implementation of thermal management technology for the power batteries of electric vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(1): 22–27, 35.
- [21] ZHANG J, SUN F, WANG Z. Heating character of a LiMn2O4 battery pack at low temperature based on PTC and metallic resistance material [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2131–2138.
- [22] 唐超, 谢文俊, 袁培毓, 等. 翼面前缘共形电热除冰功能结构开发与验证 [J]. *航空学报*, 2023, 44(12): 427872–427872.
- TANG C, XIE W J, YUAN P Y, et al. Development and verification of a conformal electrothermal deicing functional structure for the leading edge of the airfoil [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(12): 427872–427872.
- [23] VERTUCCIO L, DE SANTIS F, PANTANI R, et al. Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162: 600–610.
- [24] KOSTARAS C, PAVLOU C, KOUTROUMANIS N, et al. Rapid resistive heating in graphene/carbon nanotube hybrid films for De-icing applications [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6 (7): 5155–5167.
- [25] 叶璐, 邹齐, 张代军, 等. 碳纳米管膜用于碳纤维增强树脂基复合材料的电热固化技术 [J]. *科技导报*, 2023, 41 (9): 51–57.
- YE L, ZHOU Q, ZHANG D J, et al. Carbon fiber reinforced resin matrix composite curing by carbon nanotube film resistance heating [J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41 (9): 51–57.
- [26] JANAS D, KOZIOL K K. Rapid electrothermal response of high-temperature carbon nanotube film heaters [J]. *Carbon*, 2013, 59: 457–463.
- [27] 王一楠. 基于虚拟仪器的自动化薄膜电阻率测量系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- WANG Y L. Investigation of virtual instrumentation-based automatic thin film resistivity measurement system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.