

车用动力电池冷却系统结构设计及散热性能分析

袁歆睿¹, 战楠^{1*}, 张振杰¹, 宋振兴^{2,3}, 张世怡⁴

(1.天津理工大学 a.天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室 b.机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384; 2.天津瑞赛可新材料科技有限公司, 天津 300457; 3.天津朗缪新材料科技有限公司, 天津 300457; 4.天津师范大学, 天津 300387)

摘要: **目的** 解决软包锂离子电池组充放电过程中温差大、能耗高等问题, 使电池组在适宜的温度范围内运行。**方法** 设计扁平热管-液冷复合的电池冷却系统, 通过建立热-流耦合的有限元模型, 对不同冷却液流量、电池放电倍率及热管尺寸下的动力电池冷却过程进行仿真分析。**结果** 在 20 °C 下, 冷却液流速为 0.02 m/s 时, 电池中心最高温度较不使用冷却系统时下降了 17.9 °C。3C 倍率放电时, 扁平热管-液冷复合的电池冷却系统中电池最高温度为 37.3 °C, 较液体冷却降低了 14.2 °C。热管长度为 200 mm 时, 电池中心最高温度降温幅度为 31.5%。**结论** 扁平热管与液冷相结合的冷却系统可有效降低动力电池运行过程中的温度, 提高电池温度的均匀性, 降低电池因某部分过热导致热失控的可能性。

关键词: 锂离子电池; 液冷; 热管; 散热性能

中图分类号: U469.7; TM912

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)07-0305-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.036

Structure Design and Heat Dissipation Performance Analysis of Cooling System for Vehicle Power Battery

YUAN Xinrui¹, ZHAN Nan^{1*}, ZHANG Zhenjie¹, SONG Zhenxing^{2,3}, ZHANG Shiyi⁴

(1. a. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, b. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin RuiSaiKe New Material Technology Co., Ltd., Tianjin 300457, China; 3. Tianjin LangMiu New Material Technology Co., Ltd., Tianjin 300457, China; 4. Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

ABSTRACT: The work aims to address the issues of large temperature differences and high energy consumption during the charging and discharging processes of lithium-ion battery packs, and to ensure that the battery packs operate within an appropriate temperature range. A flat heat pipe-liquid cooling hybrid battery cooling system was designed. Through the establishment of a thermal-fluid coupling finite element model, the cooling process of power batteries under different cooling fluid flow rates, battery discharge rates, and heat pipe dimensions was simulated and analyzed. At an ambient temperature of 20 °C, when the cooling fluid flow rate was 0.02 m/s, the maximum temperature at the center of the battery decreased by 17.9 °C compared to that under no cooling system. During 3C rate discharge, the maximum temperature of the battery in the flat heat pipe-liquid cooling hybrid battery cooling system was 37.3 °C, which was 14.2 °C lower than that of liquid cooling alone. When the heat pipe length was 200 mm, the maximum temperature at the center of the battery decreased by 31.5%. The flat heat pipe-liquid cooling hybrid cooling system effectively reduces the temperature of power batteries during operation, improves the temperature uniformity of the batteries, and reduces the possibility of

thermal runaway caused by overheating in certain parts of the battery.

KEY WORDS: lithium-ion battery; liquid cooling; heat pipe; heat dissipation performance

随着新能源汽车技术的飞速发展,车企致力于找到一种能够支持高里程、快速充电和安全运行的储能设备。动力电池因其高能量密度、高充电倍率和超长寿命脱颖而出,但在车辆行驶过程中,电池组会因充放电产生热量,如果不能及时散热,可能会导致电池热失控,严重时甚至引发爆炸、火灾等重大安全事故^[1]。当下汽车动力电池散热系统的冷却方式主要分为风冷、液冷和相变冷却耦合 3 种^[2]。主动风冷、液冷具有较高的额外耗能,以自然风冷为代表的被动冷却散热效果欠佳,基于相变材料的被动散热方式虽然可以均匀降低温升,但导热性较差。因此,传统的散热方法在解决动力电池的散热问题方面依旧存在局限性,需要寻找新的散热解决方案^[3-5]。

热管作为一种新兴散热方式,具有良好的热传导性和表面均温性,可在不加外力的条件下输送热量,进行降温或升温^[6]。Wu 等^[7]研究发现,将热管与液冷相结合,可以改善由强迫对流导致的电池温度不均匀问题。李文杰等^[8]研究发现,热管散热型动力电池热管理系统虽可在特定工况下将电池温度降至适宜范围内,但其有效温控持续时间会随环境温度升高和放电倍率增大而显著缩短。这表明单一热管散热技术在极高放电率下的散热效果不甚理想。为了应对动力电池在高放电率下的散热需要, Hu 等^[9]采用扁平热管改进了锂离子电池的热管理系统,减少了单独使用液冷板时冷却液流动方向散热不良的问题,增加了电池纵向的热传导,使电池的最大温升和温差减小,提高了电池的散热性能。然而,冷却液参数对液冷系统性能的影响呈现两面性,虽然增大流量和降低进口温度能够显著提升散热能力,但会导致系统能耗增加,同时可能影响电池组的温度均匀性,因此在实际应用中需要寻找最优解^[10]。由此,确定制冷剂流动特性、进口温度及系统温度对电池液体冷却系统的影响机制,建立评估这些参数最优值的方法,以优化电池液体冷却系统的设计,对于提高制冷效率和降低电池能耗具有重要意义。

本文以某软包型锂离子动力电池为研究对象,设计扁平热管-液冷复合的电池冷却系统,采用热-流耦合仿真方法,重点考察冷却液流量、电池放电倍率及热管尺寸 3 个关键参数对动力电池冷却过程的影响。通过设置多组对照实验,分析各参数变化对冷却效果的具体影响,总结其变化规律,为优化电池冷却系统提供数据支撑。

1 动力电池及其冷却系统模型

1.1 动力电池几何模型

1.1.1 基本结构

方形电池以其空间利用率高、结构简单、能量密度

较高、不易被破坏等优点逐渐被广泛使用,本文仿真中研究的电池包为内单体电池总数为 216 块,排列形式为 2s108p 的方形电池包。该电池的基本参数见表 1^[11-12]。

表 1 CTP3.0 三元锂离子电池参数
Tab.1 CTP3.0 ternary lithium-ion battery parameters

属性	参数
额定容量	182.5 A·h
额定电压	3.55 V
正极材料	高镍三元材料
负极材料	硅碳
能量	648.26 W·h
尺寸	39 mm×200 mm×120 mm

考虑到结构的对称性,本文选取 2 排电池作为研究单元,对动力电池包进行热特性仿真。参考新能源汽车动力电池包结构设置进行电池组结构设计,电池组每排放置 6 个单体电池,由铜制导体将其连接,电池组的总长度为 1.62 m,宽度为 0.09 m,每 2 块电池之间间隔 0.005 m,为注入导热胶预留空间。

1.1.2 冷却系统几何模型

将冷却通道放置在电池组下方,通过流动的冷却介质和电池进行热量交换,达到对电池进行冷却的目的。图 1 中蓝色部分为液体冷却所用通道,灰色部分为电池组结构。考虑到电池包的整体结构和尺寸大小,将冷却通道与单体电池等宽设置,尺寸为 1 260 mm×40 mm×38.5 mm,2 排冷却通道中间间隔 10 mm,为后续填充导热胶以及安装热管预留空间。

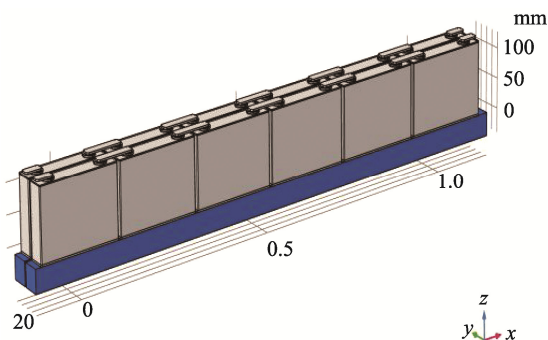


图 1 基于液体冷却的冷却系统

Fig.1 Cooling system based on liquid cooling

考虑热管在电池包实际应用中的位置以及电池包的整体大小,将热管设计为扁平形,外层壳体及多孔结构材料为金属铜,内腔填充材料为液态水,并确定热管尺寸为 160 mm×6 mm×150 mm。参考动力电

池的尺寸, 将蒸发段长度设置为 100 mm, 绝热段长度设置为 20 mm, 冷凝段长度设置为 40 mm。其中, 各材料的属性参数见表 2^[13-14], 热管结构如图 2 所示。

表 2 热管所用材料及其属性

Tab.2 Materials used in heat pipes and their properties

材料	恒压热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
铜	385	8 960	400
液态水 (20 °C)	4 180	996.95	0.599

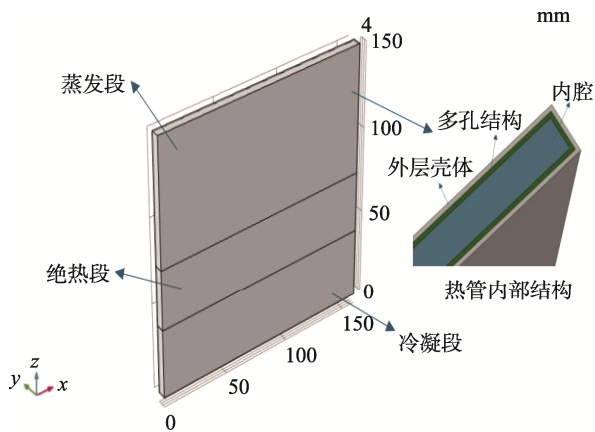


图 2 热管模型
Fig.2 Heat pipe model

将扁平热管放置于 2 块电池单体之间, 使热管的蒸发段紧贴电池中央部分, 电池下方放置冷却通道, 与热管的冷端相邻, 为热管的冷凝段散热^[15-18], 如图 3 所示。

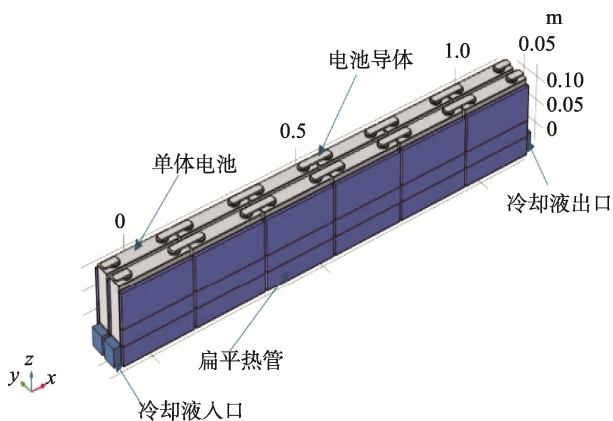


图 3 冷却系统装配图
Fig.3 Cooling system assembly drawing

1.2 热-流耦合建模

锂离子动力电池的工作过程中产生的热量由反应热 (Q_t)、焦耳热 (Q_J)、极化热 (Q_D) 和副反应热 (Q_S) 4 部分组成^[19]:

$$Q=Q_t+Q_J+Q_D+Q_S \tag{1}$$

1) 反应热。锂离子动力电池在充放电过程中,

系统吸收或释放的热量。

$$Q_t = \int i_L T \frac{\delta E_{0cv}}{\delta T} dt \tag{2}$$

式中: i_L 为电池工作电流; T 为电池初始温度; E_{0cv} 为电池充电截止电压。

2) 焦耳热。焦耳热是电流通过导体时因电阻作用而产生的热量。

$$Q_J = \int i_L^2 R_i dt \tag{3}$$

式中: R_i 为电池内阻。

3) 极化热。极化热是电介质在交变电场作用下因分子极化滞后而产生的热量。

$$Q_D = \int i_D^2 R_D dt \tag{4}$$

式中: i_D 为电池充放电电流; R_D 为电池极化内阻。

4) 副反应热。副反应热是指除电极主反应外, 由电解液分解、电极腐蚀等副反应产生的热量, 正常可以忽略不计。

2 热特性仿真分析

2.1 电池组

2.1.1 单体电池

将环境温度设置为 20 °C, 在此基础上对该电池分别进行了 1C、2C、3C 放电倍率下的热分布仿真分析。不同放电倍率下的电池温度曲线图如图 4 所示, 可以看出, 当电池在 3C 放电倍率下, 温升速度最大, 表示在相同环境温度下电池 3C 放电倍率的放热效果最明显。因此, 本文选择以 3C 倍率放电后的电池温度作为评估电池冷却性能分析的基准。这一选择旨在清晰反映冷却系统在不同放电倍率下的冷却系统降温效果, 为优化冷却系统设计提供可靠依据

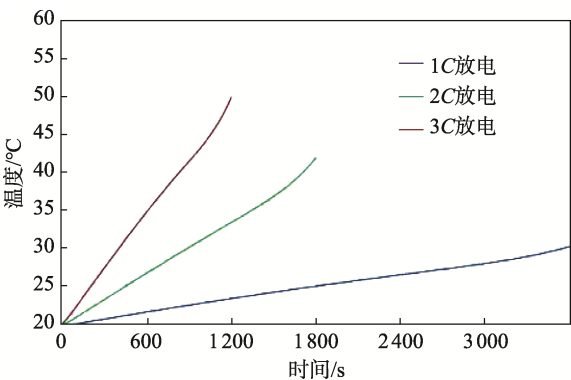


图 4 不同放电倍率下的电池温度
Fig.4 Battery temperature at different discharge rates

2.1.2 电池模组

将环境设置为 20 °C, 对该动力电池模组进行 3C 放电倍率下的放电仿真, 并进行热特性分析。由图 5 可以看出, 电池组在 3C 倍率下完成 1 200 s 放电工作

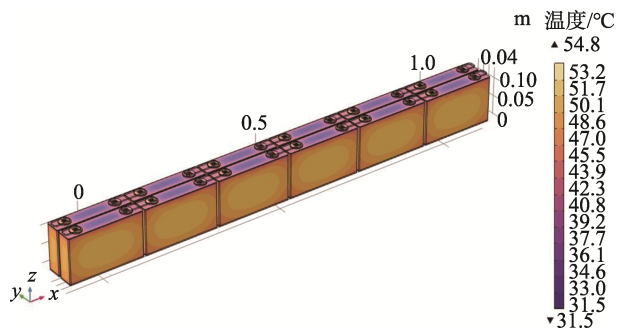


图5 动力电池温度云图

Fig.5 Cloud map of power battery temperature

后,最高温度为 54.8 °C。由于锂离子电池的正常工作温度是 20~40 °C,该放电温度明显超出了电池正常工作温度范围,必须采取制冷措施使电池温度保持在其可以正常工作的温度下。

2.2 电池组液冷系统

为验证冷却通道中冷却水的流速对冷却效果和能耗的影响,选取 0.002、0.02、0.2、2 m/s 等 4 种流速作为初始条件。不同冷却水速度下电池及其表面的温度曲线分别如图 6 和图 7 所示。为便于观察冷却效果,图 6、图 7 所示曲线图截取的电池放电时间为 1 100~1 250 s。可观察到,当冷却水流速大于等于 0.02 m/s 时,电池放电完成后的平均温度差较小,且冷却水流速大于等于 0.02 m/s 时,电池表面温度曲线基本重叠。这表明在 4 种冷却液流速中,流速为 0.02 m/s 时,冷却效果和能耗均达到最优。因此,选取流速为 0.02 m/s 的冷却水作为冷却系统设计的初始条件。

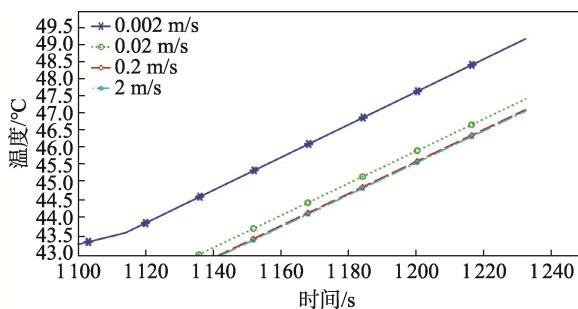


图6 不同冷却水速度下电池温度

Fig.6 Battery temperature at different cooling water flow rates

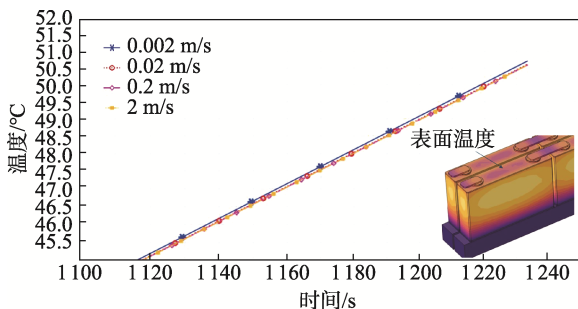


图7 不同冷却水速度下电池表面温度

Fig.7 Battery surface temperature at different cooling water flow rates

为了明确冷却系统对电池不同部位的冷却效果,将电池分为顶部、中心、底部 3 个部分进行分析,底部区域为与液冷管道靠近的下部 3 mm 区域,中心区域为电池电芯及外壳区域,顶部区域为包括电极在内的电池盖区域。由图 8、图 9 可看出,加入冷却系统后,电池底部温度出现了明显的变化,但电池顶部的平均温度变化不大。因此,仅在电池底部加入冷却通道无法达到预期的冷却效果。

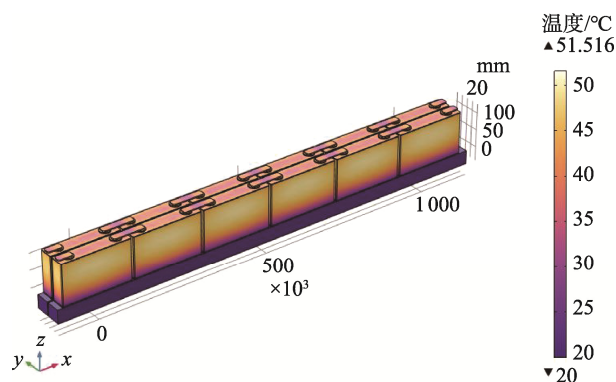


图8 单冷却通道电池温度云图

Fig.8 Cloud map of single cooling channel battery temperature

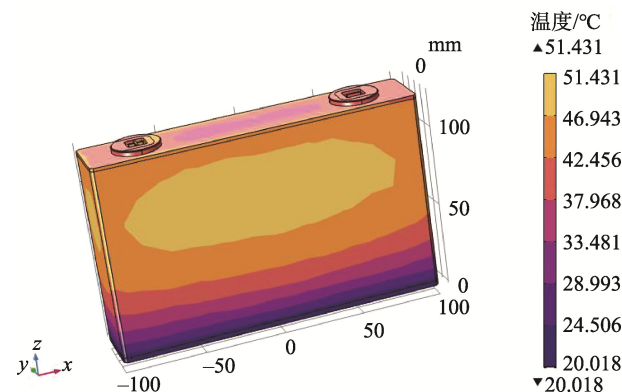


图9 单体电池温度云图

Fig.9 Cloud map of cell temperature

2.3 电池组热管复合热特性仿真分析

在考虑热管等冷却装置的位置时,会首先以电池中心散热效果为主,确保电池在放电时不会因为电池中心过热而引发电池热失控,从而引发安全事故。将热管长度 (l_{re}) 作为单一变量,分析加入该长度热管的冷却系统散热效果,选择散热效率最高的方案进行分析,其中平均温度为各区域数据 20 个点的平均值。

无冷却、液体冷却以及 120、160、200 mm 热管冷却的效果对比见表 3。当热管长度为 200 mm 时,对比无冷却时,顶部、中心、底部平均温度分别下降了 20.3%、44.4%、58.5%,而基于液体冷却的散热装置对比无冷却时,顶部、中心、底部平均温度分别下降了 0.2%、17.6%、55.2%。将 2 种方案的冷却效果

进行对比可发现,在同条件下,基于热管冷却的散热系统的散热效果明显优于仅在电池下方放置液体冷却装置,且电池中心温度出现明显下降,提高了电池温度的均匀性。不同尺寸基于热管散热的电池温度云图如图 10 所示。

由图 10 可观察到,电池的最高温度随热管长度的增加而下降。出于对电池整体温度均匀性的考虑,应选取热管长度为 200 mm,以保证电池在运行过程中不会出现某处温度过高的情况。热管长度为 200 mm 时,电池各部分温度分布如图 11 所示。

表 3 冷却效果对比 (平均温度)
Tab.3 Comparison between cooling effect (average temperature)

冷却方式	顶部		中心		底部	
	平均温度/℃	降温幅度/%	平均温度/℃	降温幅度/%	平均温度/℃	降温幅度/%
无冷却	40.8	—	54.1	—	50.9	—
液冷	40.7	0.2	44.6	17.6	22.8	55.2
120 mm 热管	35.9	12.1	33.7	37.7	21.4	57.9
160 mm 热管	33.5	17.9	31.1	42.5	21.3	58.2
200 mm 热管	32.5	20.3	30.1	44.4	21.1	58.5

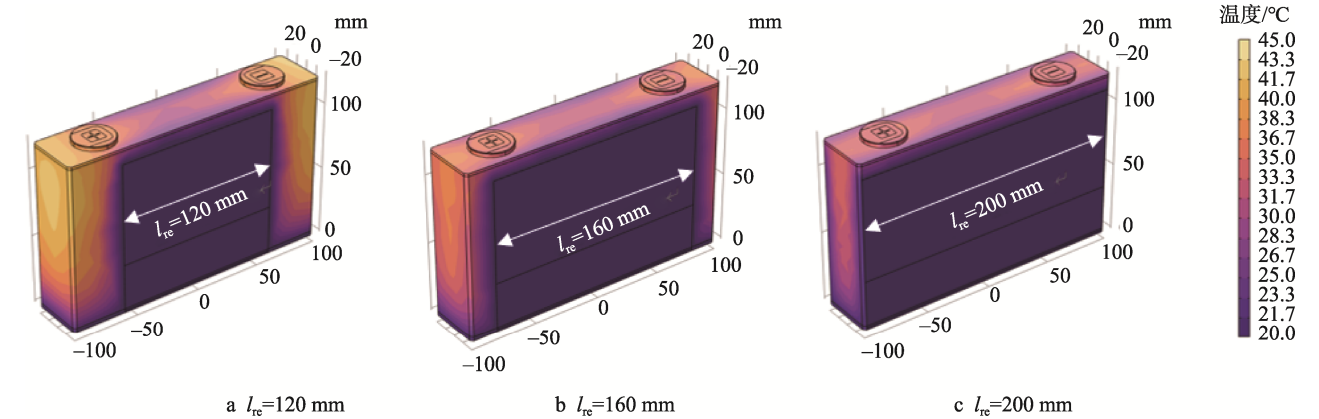


图 10 不同热管长度下电池组局部温度云图
Fig.10 Local temperature cloud maps of battery packs under different heat pipe length

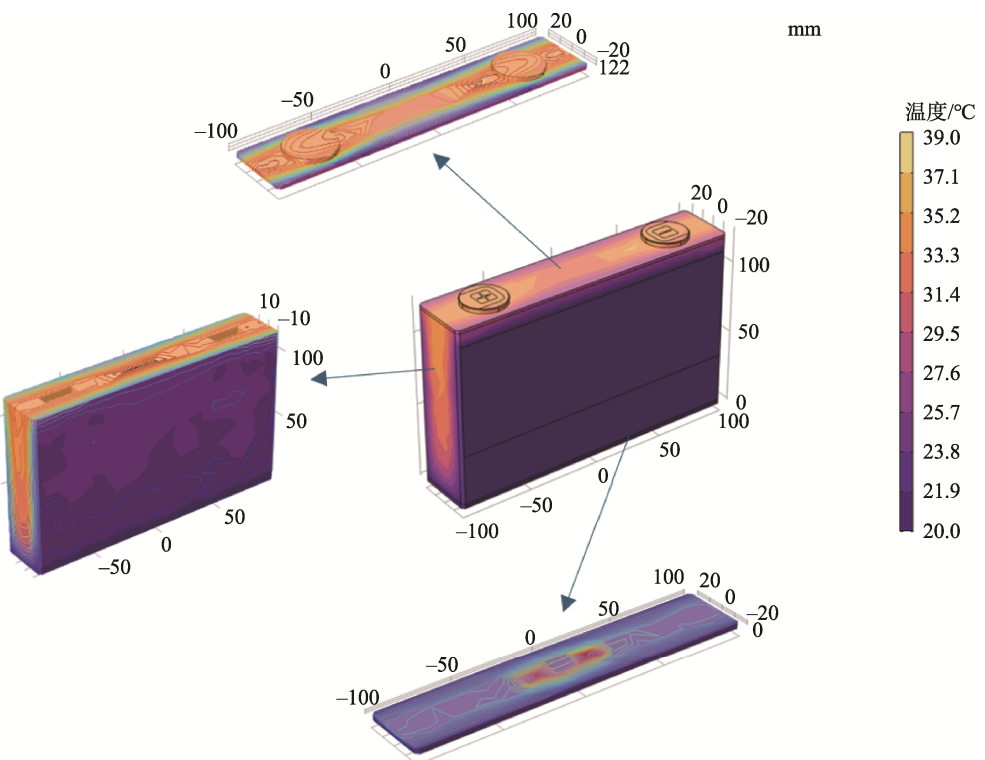


图 11 $l_{re}=200\text{ mm}$ 时电池各部分温度分布
Fig.11 Temperature distribution of each part of the battery when $l_{re}=200\text{ mm}$

在 3C 放电倍率下,工作结束后的电池中心部位的平均温度在 30.1 °C 左右,如图 12、图 13 所示。对比同等条件下无冷却系统降温的电池单体温度场,可以明显看出,电池与热管接触部分与其他表面有明显的温差,且电池的整体温度有明显下降。

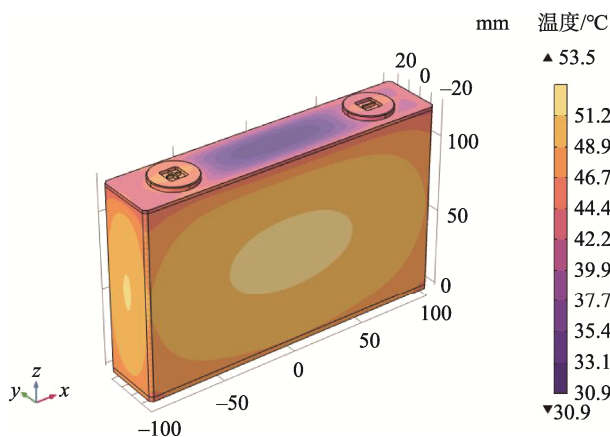


图 12 无降温的电池温度云图
Fig.12 Cloud map of battery temperature without cooling

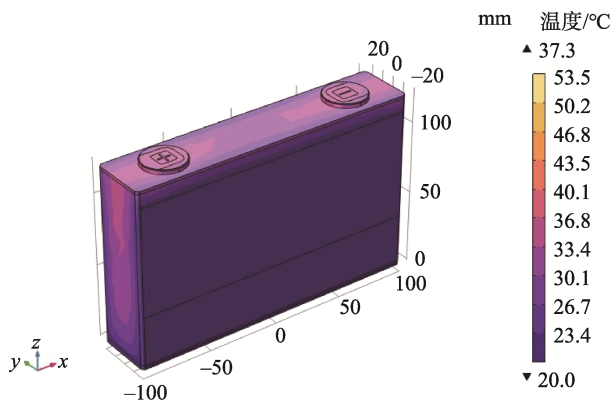


图 13 热管降温的电池温度云图
Fig.13 Cloud map of battery temperature under no heat pipe cooling

液体冷却、热管冷却 2 种冷却方式下的电池组温度对比曲线如图 14 所示。当热管长度为 200 mm 时,放电完成的电池组平均温度约为 29 °C,相较于基于液冷的电池温度降低了 34.1%,有效降低了动力电池在运行过程中的温度,使电池温度分布更加均匀,降低了电池因某部分过热而导致热失控的可能性。这种基于热管散热的冷却系统设置不仅降低了电池的平均运行温度,也考虑到了电池因内部化学反应而导致的电池中心温度过高的解决方案,在一定程度上避免了因电池过热而导致的热失控,降低了因电池过热导致安全事故发生的可能性,有效延长了电池的寿命。

本文选择以常见液体水作为电池冷却系统中的冷却液,但实际应用中还可选择油冷却液或混合冷却液。水冷却液适合普通乘用车和较为常见的电池系统,具备高效散热、成本低等优势,但存在腐蚀性和结冰风险。油冷却液适合高性能电池或需要长时间稳

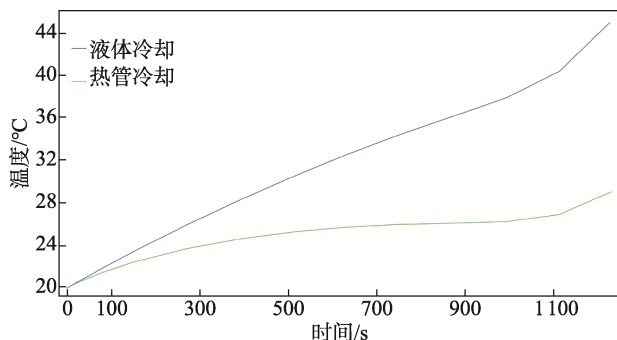


图 14 不同冷却方式电池组温度对比曲线
Fig.14 Comparison curve of battery pack temperatures under different cooling methods

定运行的系统,散热效果较差,但稳定性好,腐蚀性小。混合冷却液结合了水冷和油冷的优点,能够在不同环境下调节使用,但维护成本较高。冷却液不仅需要满足冷却性能需求,还应满足冷却回路中所有浸润材料的相容性和长期可靠性,并同时考虑冷却系统及冷却液本身维护的便利性、使用预期寿命及液体的成本等综合因素。

3 结论

1) 液体冷却系统中冷却液的流速对电池冷却效果有较为明显的影响,随着冷却液流速增加,电池底部温度逐渐下降。流速为 0.02 m/s 时,温度变化较明显,之后温度变化趋于平稳。

2) 热管的加入使冷却效果有显著改善。当电池在 3C 倍率放电、热管长度为 200 mm 的情况下,使用热管的冷却系统电池中心平均温度相比液体冷却系统下降了 30.3%。

3) 出于冷却效果考虑,最优方案为热管尺寸 200 mm×6 mm×150 mm,冷却液流速 0.02 m/s,电池放电完成温度为 37.3 °C,电池整体温度较为均匀,符合电池的正常工作情况。

参考文献:

- [1] 黄珂睿,鲁锐华,余庆华,等. 动力电池低温热管理系统评价技术研究[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(3): 479-490.
HUANG K R, LU R H, YU Q H, et al. Research on Evaluation Techniques for Low-Temperature Thermal Management Systems in Power Batteries[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(3): 479-490.
- [2] 刘岩,肖纯,沈国鑫,等. 车用锂离子电池组液冷散热系统设计与优化[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 307-314.
LIU Y, XIAO C, SHEN G X, et al. Design and Optimization of Liquid Cooling System for Lithium-Ion Battery Packs in Vehicles[J]. Packaging Engineering, 2024,

- 45(1): 307-314.
- [3] 张光磊, 钟颖强. 电动汽车锂离子动力电池热特性与散热分析[J]. 汽车测试报告, 2023(18): 143-145.
ZHANG G L, ZHONG Y Q. Thermal Characteristics and Heat Dissipation Analysis of Lithium-Ion Power Battery for Electric Vehicle[J]. Car Test Report, 2023(18): 143-145.
- [4] 万长东, 任慧中, 鲁春艳, 等. 锂离子动力电池包液冷散热分析与优化[J]. 机床与液压, 2021, 49(4): 160-163.
WAN C D, REN H Z, LU C Y, et al. Analysis and Optimization of Liquid Cooling Heat Dissipation for Lithium-Ion Power Battery Pack[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(4): 160-163.
- [5] 张计军, 葛家琪, 潘汉平, 等. 新能源汽车动力电池散热技术综述[J]. 时代汽车, 2023(24): 122-124.
ZHANG J J, GE J Q, PAN H P, et al. Review of Heat Dissipation Technology of New Energy Vehicle Power Battery[J]. Auto Time, 2023(24): 122-124.
- [6] 周东波, 杨亮, 刘道平, 等. 热管强化动力电池散热技术研究进展[J]. 化学工程, 2022, 50(10): 25-29.
ZHOU D B, YANG L, LIU D P, et al. Research Progress of Heat Pipe Enhanced Power Battery Heat Dissipation Technology[J]. Chemical Engineering (China), 2022, 50(10): 25-29.
- [7] WU M S, LIU K H, WANG Y Y, et al. Heat Dissipation Design for Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 160-166.
- [8] 李文杰. 中南地区用热管散热型动力电池热管理系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
LI W J. Research on Thermal Management System of Heat Pipe Cooling Power Battery in Central and Southern China[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [9] HU H, XU X M, LI R Z, et al. Study the Heat Dissipation Performance of Lithium-Ion Battery Liquid Cooling System Based on Flat Heat Pipe[J]. Fire and Materials, 2022, 46(1): 168-180.
- [10] 高梓豪. 热管散热式动力电池模组设计及热场分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
GAO Z H. Design and Thermal Field Analysis of Heat Pipe Heat Dissipation Power Battery Module[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [11] CHEN S C, WANG Y Y, WAN C C. Thermal Analysis of Spirally Wound Lithium Batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(4): A637.
- [12] GOMADAM P M, WHITE R E, WEIDNER J W. Modeling Heat Conduction in Spiral Geometries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2003, 150(10): A1339.
- [13] SHISHIDO I, OISHI I, OHTANI S. Capillary Limit in Heat Pipes[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1984, 17(2): 179-186.
- [14] KRETZSCHMAR H J, WAGNER W. International Steam Tables[M]. Heidelberg: Springer, 2019: 7-150.
- [15] 付波, 段会强, 金积德. 一种基于风冷系统的新型汽车动力电池散热模组设计[J]. 电子器件, 2023, 46(3): 731-738.
FU B, DUAN H Q, JIN J D. Design of a New Automotive Power Battery Cooling Module Based on Air-Cooling System[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(3): 731-738.
- [16] 文钟毅. 基于热管冷却的电池热管理系统设计及优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
WEN Z Y. Design and Optimization of Battery Thermal Management System Based on Heat Pipe Cooling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [17] 李仁政. 基于平板热管的电动汽车动力电池液冷式热管理系统散热性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
LI R Z. Study on Heat Dissipation Performance of Liquid-Cooled Thermal Management System for Electric Vehicle Power Battery Based on Flat Heat Pipe[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [18] 丹聃, 姚程宁, 张扬军, 等. 基于热管技术的动力电池热管理系统研究现状及展望[J]. 科学通报, 2019, 64(7): 682-693.
DAN D, YAO C N, ZHANG Y J, et al. Research Progress and Future Prospects of Battery Thermal Management System Based on Heat Pipe Technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(7): 682-693.
- [19] 李相杰. 基于平板热管的汽车动力电池热管理系统设计与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
LI X J. Design and Optimization of Thermal Management System for Automotive Power Battery Based on Flat Heat Pipe[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.