

# 锂离子电池冷板式散热技术研究综述

程正林

(重庆交通大学机电与车辆工程学院,重庆 400074)

【欢迎引用】程正林. 锂离子电池冷板式散热技术研究综述[J]. 汽车文摘, 2024(2): 36-41.

【Cite this paper】CHENG Z L. A Review on Cold Plate Cooling Technology Research for Lithium-ion Batteries[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(2): 36-41.

**【摘要】**锂离子电池在充放电过程中会产生大量热量,若温度过高,可能会导致电池失效或发生安全问题。锂离子电池冷板式散热作为电池冷却系统重要技术之一,对保障电池安全至关重要。首先系统地分析了冷板式液冷设计的相关方法,并对不同方法优缺点进行了对比。当前,锂离子电池热管系统主流冷却方式仍是液体冷却,其具有更高的散热效率,随着电池能量密度的提高,未来电动汽车热管理系统的发展趋势可能朝向混合冷却、系统化设计和智能化管理的方向发展。

**关键词:**电动汽车;动力电池;电池热管理;冷板设计方法

中图分类号:U469.72 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230080

## A Review on Cold Plate Cooling Technology Research for Lithium-ion Batteries

Cheng Zhenglin

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

**【Abstract】** During the charging and discharging process, lithium-ion batteries generate a large amount of heat. If the temperature is too high, it may cause battery failure or safety problems. As one of the most important technologies of battery cooling system, lithiumion battery cold plate cooling technology is significant to ensure battery safety. Firstly, this paper systematically analyzes the relevant methods of cold plate liquid cooling design, and compares the advantages and disadvantages of different methods. The mainstream cooling method for lithium-ion battery thermal management systems is currently liquid cooling, which boasts higher heat dissipation efficiency. With the increase in battery energy density, the future development trend of electric vehicle thermal management systems may move towards hybrid cooling, systematic design, and intelligent management.

**Key words:** Electric vehicle, Power battery, Battery thermal management, Cold plate design method

## 0 引言

新能源汽车的续航问题和安全问题与车载动力电池有着直接关系<sup>[1]</sup>。其中,锂离子电池因其高能量密度和长寿命的优势,成为了电动汽车的主要动力源。锂离子电池的健康状态直接决定了车辆的续航里程,而温度是影响电池性能的主要因素,其最佳工作温度范围为20~40℃<sup>[2]</sup>。锂离子电池在工作中会产生大量热量,如果电池中的热量积累过多,温度过高,将会严重影响其性能和寿命,甚至在温度超过80℃时导致爆炸。此外,电池的能量利用率和电池寿命也受电池内部不均匀温度分布影响<sup>[3]</sup>。研究表明,电池内

部的温差超过5℃会导致10%的功率下降和25%的容量衰退<sup>[4]</sup>。因此,设计高效可靠的电池冷却系统保证锂离子电池在最佳温度范围内工作以及减少电池内部的温度不均匀性至关重要<sup>[5]</sup>。

综上所述,为了使新能源汽车始终保持在安全稳定的工作条件下运行,利用高效的液体冷却将电池温度控制在适宜工作温度范围内非常有必要,目前冷板式液冷因冷却效率高,安全性强,使用寿命长等优势,逐渐成为了液体冷却的主流。因此,本文基于文献挖掘,总结了冷板式液冷技术的发展历程,分析了不同冷板结构设计技术的优劣势,旨在为锂离子电池热管理研究提供参考方向。

## 1 冷板式散热设计分析

电池的冷却方式主要可分为空气冷却、液体冷却、制冷剂直接冷却、相变材料冷却及热管冷却,锂离子电池热管理的分类如图1所示。前3种冷却方式为主动冷却系统,后2种冷却方式为被动冷却系统<sup>[6,7]</sup>。与被动冷却系统相比,主动冷却系统的冷却能力更强,但结构更为复杂<sup>[8]</sup>。

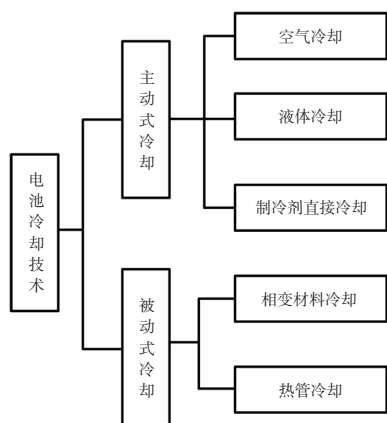


图1 电池冷却技术分类

与空气冷却技术相比,液体冷却拥有更高的换热系数,可以在电池之间插入微通道冷板,从而提供更高的冷却能力<sup>[9]</sup>。目前锂离子电池液冷的方案主要分为2种,一种为电芯级冷却,将冷却流道设计成薄板状或扁带状,直接分布在在电池之间间隙,液冷结构与电池紧密接触,流体直接带走电池热量;另一种为模块级冷却,通过在电池单体之间安装导热材料将电池单体热量导向电池模块表面,主体冷却结构则安装在电池模块表面,通过冷却介质对流冷却导热材料,间接带走电池热量。电芯级冷却效率较高,且在非事故状态下,对相邻电芯之间的热交换具有一定隔离性,但在事故状态下这种复杂且脆弱的冷却结构容易失效。模块级冷却安全性更高,但效率相对于电芯级冷却较低。液冷技术系统较为复杂,且对循环液驱动功率、机械强度、耐振动性及使用寿命都有一定的需求,但优异的冷却效果使其成为目前许多新能源汽车的优选方案。

### 1.1 微通道设计方法

1981年,微通道冷板散热被首次提出,最常见的就是结构简单易于加工的平行直流道或蛇形流道,如图2所示。

Huo等<sup>[10]</sup>设计了一种带直微通道的矩形冷却板,考虑了环境温度、流动方向和进气质量流量对电池温度分布的影响。结果表明,随着质量流量的增加,冷却性能逐渐提高,但提高趋势逐渐变小。Qian等<sup>[11]</sup>采

用了一种基于微通道冷板的液体冷却方法,考虑冷却剂分布不均匀的情况下,进一步研究了小通道冷板的冷却性能。结果表明,小通道冷板热管理系统在电池5 C放电时具有良好的冷却效率。

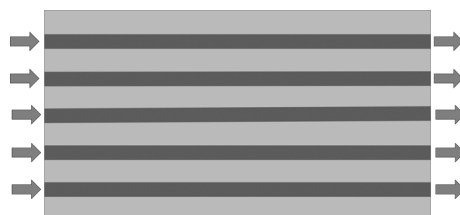


图2 平行直流道结构

随着电动汽车的大力发展,对电池热管理的要求越来越精准。不仅需要降低温度,对温度均匀性等也有严格的要求,普通直流道和蛇形流道早已无法满足需求。在平行流道和蛇形流道的基础上,衍生了很多改进结构。通过研究发现,改变冷却通道结构可以改善冷却系统的散热性能。Zhao等<sup>[12]</sup>采用蛇形通道,通过增加圆柱形电池与冷板的接触面积,在5 C的放电倍率下,电池模块的温差在0.7 °C以下。Sheng等<sup>[13]</sup>设计了一种新型的双蛇形通道冷却板,比较并分析了进、出口布置,通孔数量和通孔直径对冷却能力的影响。优化结果表明,双蛇形通道散热板能有效控制电池温度,具有较好的散热效果。Li等<sup>[14]</sup>提出了一种硅冷板与直铜管和蛇形铜管相结合的冷却矩形电池的方法。除了研究冷却液流量和方向的影响外,还考虑了电池热管理系统(Battery Thermal Management System, BTMS)的能源消耗,结果最大温差为1.78 °C,最高温度为41.92 °C。

随后,一些研究人员开发了先进的优化算法来优化冷却通道。以减小流动阻力,提高换热能力。Jarrett等<sup>[15]</sup>以降低压降、平均温度和温差为目标,对蛇形流道冷却板进行了参数优化,首次为微通道冷却板的优化设计提供了一种数值方法。此外,Tan等<sup>[16]</sup>提出了一种基于界面增强广义有限元方法的优化方法,考虑了多目标函数对嵌入在电池冷却板中的二维微通道网络进行优化,研究了不同约束条件对最优设计的影响。Li等<sup>[17]</sup>进一步采用多目标优化方法设计了一种高效的微通道冷却板,研究表明,该冷板能够在冷却性能和功耗之间实现良好的权衡,功耗较其他冷板大幅度降低。

然而,车用锂离子电池在充放电过程中会产生巨大的热量,微通道散热设计多数来源于经验设计,缺乏设计理论,并且微通道冷板性能与流道形状密不可分,极大的制约了设计的灵活度,无法高效及时将热量散发出去,对冷板性能的提升是有限的。

## 1.2 分形设计方法

随着汽车行业的快速发展,电动汽车的快充技术越来越重要,因此对电池的散热要求也越来越高,促使新的散热设计方法不断涌现。近些年,分形流道已经在实际工程中应用,进一步提高了电池的冷却性能,分形通道结构如图3所示。

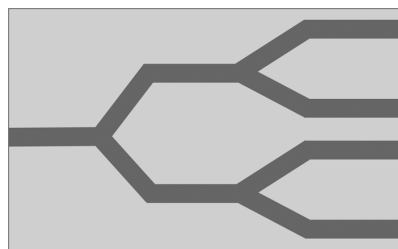


图3 分形通道结构

分形流道结构参数对流道性能有显著影响。Bejan等<sup>[18]</sup>首次研究了树形分形通道的散热性能,发现树形分形冷板有很低的压降,同时也可以提供较好的温度均匀性。Yu等<sup>[19]</sup>研究了分形树状流道在不同长宽比下水力特性和热工特性,并与直形微通道进行了比较,发现以较高的泵功率为代价,分形树形微通道的换热系数远高于直线微通道。徐国强等<sup>[20]</sup>研究了分叉角度、分形级数对电池性能的影响。发现分叉角度为 $60^\circ$ ,分形流道级数为3时,电池温度均匀性更好,冷板综合性能最佳。

为进一步增强分形流道性能,随后对多层分形流道及具有肋片或者孔洞的分形冷板进行研究。Xu等<sup>[21]</sup>发现在一定的流动条件下,多层微通道的单位热阻、压降和努塞尔数由层数决定,并且随着分形流道层数增加,换热器热阻持续降低。结果表明,分形多层微通道结构对换热性能和流体流动性有显著影响。Yan等<sup>[22]</sup>提出了一种新颖的Y形分形网络截断双层散热器,对其进行了仿真研究。结果表明与分形双层流道相比,用较低的泵功率可以将入口附近的温度均匀性提高 $24\%\sim 30\%$ 。Fan等<sup>[23]</sup>提出了一种新型双层分形树枝状通道冷板,该冷板有传热层通道和收集层通道。以压降、表面标准差和最高温度为目标,采用NSGA-II算法进行多目标优化。优化后,冷板的综合散热性能大幅度提升。Xie等<sup>[24]</sup>受换热器中常用挡板的启发,引入具有不同数量和模式的分流器到液冷板的流道中,研究了内部结构与温度控制性能之间的关系。结果表明,在一定范围内增加分流器数量可以有效降低温度和温差。此外,尽管能量消耗相对较高,但具有 $20\sim 30$ 个分流器的双面模式展示了电池模块最佳的冷却效果。

## 1.3 仿生设计方法

仿生学作为一种跨学科的新兴领域,被越来越多地应用于工程技术中。仿生冷板作为一种仿生技术的典型代表,在热管理领域发挥着重要的作用。目前研究人员已经设计出了许多不同形状和尺寸的仿生冷板,例如仿生莲叶、仿生鲨鱼皮、仿生蜘蛛网等,如图4所示。它具有较高的散热效率,可以大大提高电子设备的性能和寿命。其次,具有较小的流体阻力和噪声,可以使散热系统更加稳定和安静。

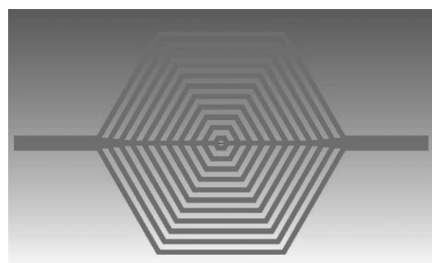


图4 仿生蜘蛛网结构

Li等<sup>[25]</sup>基于鲨鱼皮仿生学理论,提出了4种新型通道结构,对热工性能和熵产进行分析,发现不同几何形状的通道将主流推向侧壁,分流通道的顺序收缩和扩张区域加强了流体交换,传热性能显著增强。Liang等<sup>[26]</sup>根据墨鱼的运动,运用仿生学设计了一种新型的中心锥形波浪形胶带插入物,通过数值模拟,发现最佳Nusselt数可以提高 $5.23\sim 8.99$ 倍,最佳性能评价标准可以提高到2.62。Wu等<sup>[27]</sup>对河网、昆虫翅脉、蜂巢、蜘蛛网和平行渠道网等结构进行了数值分析,发现蛛网状微通道散热器具有最好的综合散热性能。Sheng等<sup>[28]</sup>开发了一种蜂窝状液体冷却通道系统,通过数值计算和实验相结合的方法,研究了仿生蜂窝状液体冷却结构对圆柱形电池冷却的影响。结果表明,蜂窝冷却系统可以很好地控制圆柱形电池组的最高放电温度。Dong等<sup>[29]</sup>中提出了一种适用于圆柱形锂离子电池的双螺旋液体冷却结构。通过数值模拟,研究了冷却液质量流量、螺旋槽间距和流动直径对冷却性能的影响。Wang等<sup>[30]</sup>研究了一种内部有仿生蜘蛛网通道的冷板,分析了槽数、液冷板的宽度和角度对电池温度的影响,结果表明,通道宽度对冷板冷却性能的影响最大,通道角度的影响最小。为了获得低压降和高换热系数,Liu等<sup>[31]</sup>提出了一种带有仿生叶脉分支通道的液体冷板,与初始叶脉通道和传统的平行直通渠道相比,该结构的最高温度分别降低 $0.23\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1.12\text{ }^\circ\text{C}$ ,相应的最大温差分别降低 $0.28\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1.64\text{ }^\circ\text{C}$ ,平均压降分别降低 $65.56\%$ 和 $8.77\%$ 。

目前,仿生冷板的研究重点主要集中在结构设计、材料选择和性能优化方面。研究人员通过改变仿生冷板的形状、尺寸和表面结构等因素,进一步提高了其散热效率。此外,一些新型材料的引入也为仿生冷板的发展提供了更广阔的空间。

#### 1.4 拓扑优化设计方法

在液冷板的设计中,拓扑优化方法可以通过在设计过程中自动优化结构内部的材料分布,以实现最佳散热性能。在流体动力学和传热学中,拓扑优化方法已经得到了广泛的应用。例如,在船舶、航空航天、汽车和机械等领域,拓扑优化方法可以用于优化流体动力学和热传导的性能<sup>[32]</sup>。在散热结构设计中,拓扑优化方法可以用于优化热流分布,改善热传导性能,从而提高散热效率,拓扑优化通道结构如图5所示。

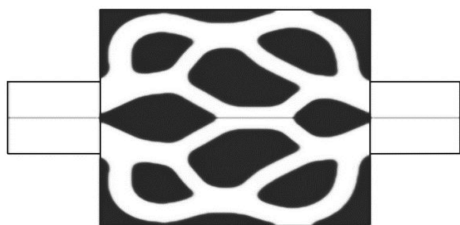


图5 拓扑优化通道结构

Joo等<sup>[33]</sup>使用拓扑优化方法对自然对流中的散热器进行了热学优化。考虑翅片的局部形状和热边界层的发展对热传递系数的影响,提出了一种形状相关的对流模型,试验结果表明,通过拓扑优化,热阻降低了13%、质量减轻了48%,可以提供热性能更好、质量更轻的散热器设计方案。Zhang等<sup>[34]</sup>采用拓扑优化方法对二维纳米流体冷却微通道散热器的结构进行优化,以实现最大化传热。通过数值模拟发现,温度相关性对优化结果有显著影响,压力差或热发生系数的增加会产生更多分支流道。

随后部分研究开展了多目标的电池冷板拓扑优化,Li等<sup>[35]</sup>通过多目标优化问题来权衡流体功率耗散最小化和热交换最大。然后在单一均匀和多个非均匀热源条件下生成具有清晰拓扑信息的新型冷却通道。结果表明,优化后的冷却通道相比传统的平行通道可以实现更低的热阻和更高的努塞尔数,这意味着在最小化泵送功率的情况下,优化后的通道可以散发更多的热能。Chen等<sup>[36]</sup>采用拓扑优化方法设计了多目标的冷板,并与传统的矩形通道冷板和蛇形通道冷板进行比较,拓扑冷板与以上两种冷板相比,最高温度降低了0.27%和1.08%,温差降低了19.50%和41.88%,同时,流阻较低、传热系数高。Guo等<sup>[37]</sup>通过

双目标优化函数得到了不同类型的冷板通道模型,研究了冷板类型、通道深度和质量流量对锂离子电池的影响,并评估了其冷却性能。与直通通道相比,拓扑优化通道的冷却性能提高了61.82%。

目前部分学者也开始对拓扑优化方法进行改进,Zhou等<sup>[38]</sup>提出了一种基于拓扑优化的轮廓提取方法,旨在针对高雷诺数下设计热流体拓扑优化时计算成本较高、数值稳定性较差的问题,结果表明,该方法生成的散热器由于消除了高雷诺数下停滞区域的影响,与壁面的流体交互更好,速度分布更加均匀。Picelli等<sup>[39]</sup>基于二元结构拓扑优化方法和几何修剪程序提出了一种新方法,该方法自动生成显式流体边界,解决了目前伪密度方法调整材料插值参数的问题。

总之,相比于其他冷板结构设计,拓扑优化方法是一种非常有前途的工程设计方法,可以更加全面地考虑材料的分布和空间结构,为液冷板等散热结构的设计提供更加全面和优秀的设计方案。

## 2 不同设计方法对比分析

综上所述,不同的设计方法具有各自的优缺点,如表1所示。

表1 4种散热设计方法对比

设计方法	优点	缺点
微通道方法	结构简单,加工成本较低	温度均匀性差,缺乏设计理论
分形方法	温度均匀性控制较好,温差小	设计成本大,功耗较高
仿生方法	换热效率较高,流体阻力和噪声较小	结构复杂,设计局限性较大
拓扑优化方法	设计自由度高,综合散热性能好	计算成本较高

从表1中可以看出,利用微通道方法设计的冷板结构较简单,易于加工制造,缺点就是根据经验设计,缺乏设计理论,其冷板性能与流道形状密不可分。此外,平行微通道冷板进出口较多,也容易造成冷却剂的泄露风险。随着对产品性能的要求越来越高,简单的平行微流道已经不能满足散热要求。随后,发现分形方法设计的分形微通道可以较高的泵功率为代价,使换热系数远高于直线微通道,电池温度均匀性更好,冷板温差较小,不足之处就是泵功率较高,能耗较大。为了追求更低的功耗,仿生设计被用于高能元件的散热中,通过仿生设计方法制造的冷板结构具有较高的散热效率,较小的流体阻力和噪声,可以使散热系统更加稳定和安静,可以大幅提高电子设备的性能和寿命。

但是,其结构复杂,设计局限使其发展空间受到了限制。随着新能源汽车不断向高能量密度和高集成度的方向发展,较为传统的冷板设计方法逐渐被淘汰,拓扑优化方法被广泛应用于流体传热的结构设计中。其设计灵活度高,可以根据需求明确设计目标,更加合理考虑材料的分布。此外,拓扑优化冷板可以实现压降与换热效率之间的权衡,综合散热性能更好。

### 3 结束语

本文综述了不同的冷板散热设计方法,并对分析目前锂离子电池冷板设计方法的差异,对未来热管理系统的发展作出了展望,主要结论阐述如下。

目前,电池系统主流的冷却方式仍是液体冷却,其具备相对成熟的技术,但受到密封性差和冷却介质的限制。因此,需要探索更高传热效率的冷却介质,以推动液冷系统的创新。此外,随着锂离子电池不断向高能量密度和高放电倍率的方向发展,比如以液冷-相变材料、风冷-相变材料等混合冷却也将是未来热管理系统的发展趋势之一。

基于变密度的拓扑优化方法设计冷板结构,较于传统流道结构设计更容易确定设计目标,明确初始设计方案,并且有清晰的数学优化方向,因此可以大幅缩短设计周期,设计结果更为优化。另一方面,随着智能制造技术的快速发展,可以用较低的成本快速制造出复杂结构,能够让拓扑优化设计结果更快的转化为产品,将是未来电池冷板设计的最佳方案之一。

#### 参 考 文 献

- [1] SPITTHOFF L, SHEARING P R, BURHEIM O S. Temperature, ageing and thermal management of lithium-ion batteries[J]. *Energies*, 2021, 14(5): 1248.
- [2] 胡远志, 赖贞行, 刘西, 等. 车用锂离子电池冷却技术研究进展[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(5): 60-69.
- [3] CAI H, XU C, LIAO Y, et al. Mass maldistribution research of different internal flowing channels in the cooling plate applied to electric vehicle batteries[J]. *Applied sciences*, 2019, 9(4): 636.
- [4] FENG X, ZHENG S, REN D, et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database[J]. *Applied Energy*, 2019, 246: 53-64.
- [5] OUYANG D, CHEN M, HUANG Q, et al. A review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2483.
- [6] KIM J, OH J, LEE H. Review on battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Applied thermal engineering*, 2019, 149: 192-212.
- [7] JAGUEMONT J, VAN M J. A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101551.
- [8] 金露, 谢鹏, 赵彦琦, 等. 基于相变材料的电动汽车电池热管理研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21113-21126.
- [9] 刘念, 张世义. 车用锂离子电池散热技术综述[J]. *汽车文摘*, 2023(2): 15-19.
- [10] HUO Y, RAO Z, LIU X, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 387-395.
- [11] QIAN Z, LI Y, RAO Z. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 622-631.
- [12] ZHAO C, SOUSA A C M, JIANG F. Minimization of thermal non-uniformity in lithium-ion battery pack cooled by channeled liquid flow[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2019, 129: 660-670.
- [13] SHENG L, SU L, ZHANG H, et al. Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management utilizing a serpentine-channel liquid cooling plate exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 658-668.
- [14] LI X, ZHOU D, ZHANG G, et al. Experimental investigation of the thermal performance of silicon cold plate for battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155: 331-340.
- [15] JARRETT A, KIM I Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23): 10359-10368.
- [16] TAN M H Y, NAJAFI A R, PETY S J, et al. Multi-objective design of microvascular panels for battery cooling applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 135: 145-157.
- [17] LI W, PENG X, XIAO M, et al. Multi-objective design optimization for mini-channel cooling battery thermal management system in an electric vehicle[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(8): 3668-3680.
- [18] BEJAN A, ERRERA M R. Deterministic tree networks for fluid flow: geometry for minimal flow resistance between a volume and one point[J]. *Fractals*, 1997, 5(4): 685-695.

- [19] YU X, ZHANG C, TENG J, et al. A study on the hydraulic and thermal characteristics in fractal tree-like microchannels by numerical and experimental methods[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(25-26): 7499-7507.
- [20] 徐国强, 王梦, 吴宏, 等. Y形构形微通道流动换热特性的数值分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(3): 313-317.
- [21] XU S, LI Y, HU X, et al. Characteristics of heat transfer and fluid flow in a fractal multilayer silicon microchannel [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 71: 86-95.
- [22] YAN Y, YAN H, FENG S, et al. Thermal-hydraulic performances and synergy effect between heat and flow distribution in a truncated doubled-layered heat sink with Y-shaped fractal network[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 142: 118337.
- [23] FAN Y, WANG Z, FU T. Multi-objective optimization design of lithium-ion battery liquid cooling plate with double-layered dendritic channels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 199: 117541.
- [24] XIE J, LIU X, ZHANG G, et al. A novel strategy to optimize the liquid cooling plates for battery thermal management by precisely tailoring the internal structure of the flow channels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 184: 107877.
- [25] LI P, GUO D, HUANG X. Heat transfer enhancement, entropy generation and temperature uniformity analyses of shark-skin bionic modified microchannel heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118846.
- [26] LIANG Y, LIU P, ZHENG N, et al. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of laminar flow in a tube with center-tapered wavy-tape insert[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 557-567.
- [27] WU L, LU T, CHEN J, et al. A study of bionic micro-channel topology for chip cooling[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(5): 1153-1159.
- [28] SHENG L, ZHANG H, SU L, et al. Effect analysis on thermal profile management of a cylindrical lithium-ion battery utilizing a cellular liquid cooling jacket[J]. *Energy*, 2021, 220: 119725.
- [29] DONG F, CHENG Z, ZHU J, et al. Investigation and optimization on cooling performance of a novel double helix structure for cylindrical lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 189: 116758.
- [30] WANG J, LIU X, LIU F, et al. Numerical optimization of the cooling effect of the bionic spider-web channel cold plate on a pouch lithium-ion battery[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26: 101124.
- [31] LIU F, CHEN Y, QIN W, et al. Optimal design of liquid cooling structure with bionic leaf vein branch channel for power battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119283.
- [32] TAJZOWSKI P, ELACHOWSKI B, LOGO J. Topology optimization of elastoplastic structures under reliability constraints: A first order approach[J]. *Computers and Structures*, 2021, 243: 106406.
- [33] JOO Y, LEE I, KIM S J. Efficient three-dimensional topology optimization of heat sinks in natural convection using the shape-dependent convection model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 32-40.
- [34] ZHANG B, ZHU J, GAO L. Topology optimization design of nanofluid-cooled microchannel heat sink with temperature-dependent fluid properties[J]. *Applied thermal engineering*, 2020, 176: 115354.
- [35] LI H, DING X, MENG F, et al. Optimal design and thermal modelling for liquid-cooled heat sink based on multi-objective topology optimization: An experimental and numerical study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 144: 118638.
- [36] CHEN F, WANG J, YANG X. Topology optimization design and numerical analysis on cold plates for lithium-ion battery thermal management[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122087.
- [37] GUO C, LIU H, GUO Q, et al. Investigations on a novel cold plate achieved by topology optimization for lithium-ion batteries[J]. *Energy*, 2022, 261: 125097.
- [38] ZHOU J, LU M, ZHAO Q, et al. Thermal design of microchannel heat sinks using a contour extraction based on topology optimization (CEBTO) method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 189: 122703.
- [39] PICELLI R, MOSCATELLI E, Yamabe P V M, et al. Topology optimization of turbulent fluid flow via the TOBS method and a geometry trimming procedure[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(1): 34.

(责任编辑 明慧)

#### 【作者简介】

程正林(1996—),男,重庆交通大学,硕士研究生,研究方向为电池冷板散热结构及优化设计。

E-mail: czlin699@163.com