

Influence of Flow Channel Structure on Battery Thermal Management Performance

Yang Sun¹, Vladislav Mitin^{1,2}, Jintao Jin¹, Kejun Zhu^{1,*}, Xipo Lu¹

¹School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China

²School of Mechanics and Energy, Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

Email address:

suntong180@126.com (Yang Sun), z18362883220@163.com (Vladislav Mitin), jjt192210006@163.com (Jintao Jin), 18252587481@163.com (Kejun Zhu), Lxpjust@126.com (Xipo Lu)

*Corresponding author

To cite this article:

Yang Sun, Vladislav Mitin, Jintao Jin, Kejun Zhu, Xipo Lu. Influence of Flow Channel Structure on Battery Thermal Management Performance. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 5, 2022, pp. 286-291. doi: 10.11648/j.sd.20221005.12

Received: August 9, 2022; **Accepted:** September 7, 2022; **Published:** September 8, 2022

Abstract: Effective battery thermal management is crucial to the design of high performance and durable batteries for electric vehicles. In order to reduce the flow resistance of the traditional straight linear flow channel, the author proposed a divergent-shaped channel. In this paper, a battery thermal management model was established for the design of divergent flow channel by numerical simulation method. The momentum, mass and energy conservation equations of the coolant and the energy conservation equations of the cold plate and the battery were considered. In this work, the influence of the sub-channel outlet width on pressure drop and temperature difference is investigated. When the sub-channel outlet width increases from 3mm to 6mm, the pressure drop reduced by 41.76%, at the same time the battery temperature differential also decreased by 17%. In addition, it is found that the optimal sub-channel outlet width is 10 mm. In order to improve the performance of the divergent-shaped channel, a partition divergent-shaped channel design is proposed, and the effects of inlet vertical channel width W_{fd} and outlet vertical channel width W_{bd} are studied. Compared with W_{bd} , The effect of W_{fd} was more significant. With the increase of W_{fd} , both pressure drop and temperature difference decrease gradually. The research in this paper will contribute to the development of more efficient and energy saving battery thermal management system.

Keywords: Battery Thermal Management, Liquid Cooling, Structure Design, Divergent-Shaped Channel

流道结构对电池热管理性能的影响

孙洋¹, Vladislav Mitin^{1,2}, 金劲涛¹, 朱科俊^{1*}, 陆西坡¹

¹江苏科技大学能源与动力学院, 镇江, 中国

²莫尔多瓦国立大学机械与能源学院, 萨兰斯克, 俄罗斯

邮箱

suntong180@126.com (孙洋), z18362883220@163.com (Vladislav Mitin), jjt192210006@163.com (金劲涛), 18252587481@163.com (朱科俊), Lxpjust@126.com (陆西坡)

摘要: 有效的电池热管理对电动汽车锂离子电池的性能和耐久性至关重要。为了减小传统直线型流道的流动阻力, 作者提出了扩散型流道。本文采用数值模拟方法, 针对扩散型流道设计, 建立了电池热管理模型。模型考虑了冷却剂的动量、质量和能量守恒方程及冷却板和电池的能量守恒方程。本文进一步分析了子流道出口宽度对压降和温差的影响。发现随子流道出口宽度从3mm增大到6mm时, 压降降低了41.76%。同时, 电池温差减小了17%。此外, 子流道最优出口宽度为10 mm。为了改善扩散型流道性能, 本文又提出了隔断式扩散型流道设计, 研究了入口端竖直流

道宽度 W_{fd} 和出口端竖直流道宽度 W_{bd} 的影响。与 W_{bd} 相比, W_{fd} 的影响较为显著。随着 W_{fd} 的增加,压降和温差均逐渐减小。本文的研究将有助于开发更高效、更节能的电池热管理系统。

关键词: 电池热管理, 液冷, 结构设计, 扩散型流道

1. 引言

近年来,锂离子电池因其比能量密度高、寿命长、自放电率低、电压平台高、无记忆效应等优点而引起研究者的广泛关注[1-3]。锂离子电池在放电过程中,由于各种极化损失产生巨大的热量[4],导致电池温度显著升高,从而引起电池安全隐患,甚至造成爆炸[5]。因此,如何对电池进行有效的热管理是当今的一个研究热点[6]。

液冷式电池热管理系统(BTMS)主要通过冷却板中的冷却剂吸收电池放电过程产生的热量,因此冷却板的流道设计对其性能影响巨大。Xiaoming Xu等提出了一种带有翅片的流道设计,研究了翅片数量、长度、角度、两个翅片之间的距离和偏移距离的影响[7]。结果表明随着翅片数量的增加,电池的平均温差减小。Kai Chen等[8]采用模拟方法研究了I型、Z型和U型冷却板的电池热管理性能,其结果显示,对称式Z型冷却板,其电池的最大温差与能耗分别降低了19%和66%。Xinhai Xu等[9]提出了一种T形分叉结构的新型盖板,该设计可将电池模组的最高温度保持在32.5°C以下,在极端条件下,最高和最低温度之间的差异保持在1.5°C左右。M. Malik等[10]探讨了冷却剂温度对电池冷却效果的影响,冷却液温度为30°C,4C放电的条件下,电池温度仍然可以控制在要求的范围内。Zhonghao Rao等[11]通过设置电池液冷系统冷却泵开启的上限温度和关闭的下限温度,大大的节省了冷却泵的能量损耗。S. Datta等[12]针对微通道冷却板的锂离子电池热管理进行参数优化

研究,发现当冷却板中含有偶数通道时,由于流动阻力的影响,冷却板的压降要高于奇数通道时的压降。Hao Zhu等[13]通过正交实验方法对液冷电池热管理系统冷却效果进行研究,结果表明,管道数对冷却板平均温度的影响最为明显,冷却液流速次之,管道高度的影响最小。

以上研究中,其冷却板中的流道为直线型流道。为了减小直线型流道的流动阻力,作者提出了扩散型流道[14],扩散型流道通过增大子流道出口宽度,一方面降低了冷却剂的速度,进而减小了冷却剂的沿程损失,另一方面提高了冷却剂与冷却板间的换热面积,进而促进了换热,降低了电池温度。然而,在作者之前的文章中没有讨论出口宽度的影响,本文进一步分析了子流道出口宽度对压降和温差的影响。为了提高扩散型流道性能,本文又提出了隔断式扩散型流道设计,并分析了流道结构参数对其性能的影响规律。

2. 模型及验证

2.1. 模型结构

本文选择一个重复单元作为计算域,该单元由两节电池和一块冷却板组成,如图1所示。此外,电池、冷却板和流道的尺寸已在图1和2中给出,模型结构参数入口端竖直流道宽度 W_{fd} 、出口端竖直流道宽度 W_{bd} 、子流道出口宽度 W_{od} 分别为3 mm, 3 mm, 10 mm。冷却板的材料是铝,冷却剂是液态水。表1给出了水、冷却板、电池的物性参数。

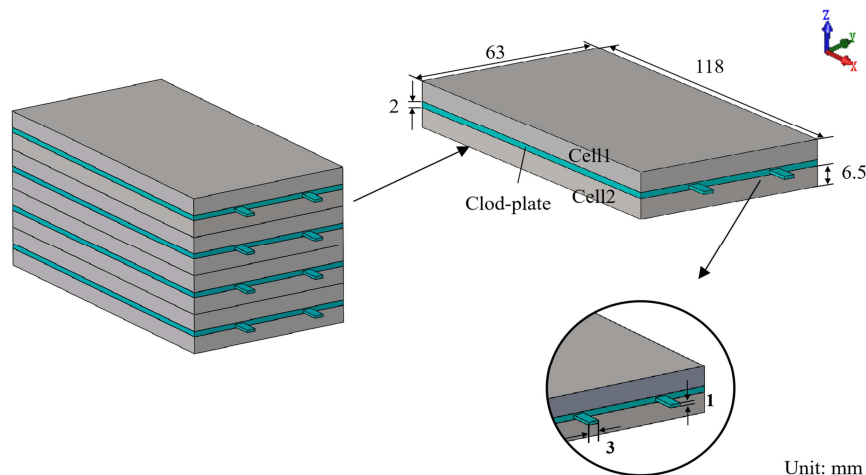


图1 模型结构示意图(单位: mm)。

表1 材料物性参数。

	ρ (kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	ν_w (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
电池	2450	1108	3.9	--
冷却板	2719	871	202.4	--
水	998.2	4182	0.6	0.001003

2.2. 控制方程和边界条件

根据入口流速（0.3629m/s）和流道最大水力直径（1.867mm）计算雷诺数，其小于2300。因此，流体流动为层流，使用方程1来描述冷却剂流动[15, 16]。

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla P}{\rho_w} + \frac{\mu}{\rho_w} \nabla^2 \vec{v} + \vec{g}$$
 (1)

冷却剂的质量和能量守恒方程可以写成：

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v}) = 0$$
 (2)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w C_{pw} T_w) + \nabla \cdot (-k_w \nabla T_w + \rho_w C_{pw} T_w \vec{v}) = 0$$
 (3)

冷却板和电池的能量守恒方程分别为式4和式5：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c C_{pc} T_c) + \nabla \cdot (-k_c \nabla T_c) = 0$$
 (4)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b C_{pb} T_b) + \nabla \cdot (-k_b \nabla T_b) = Q$$
 (5)

上式中，下标“w”、“c”、“b”分别表示水、冷却板和电池。 μ , ρ , \vec{g} , T , C_p 和 k 分别为粘度、密度、重力矢量、温度、比热容和导热系数。 \vec{v} 和 P 分别是速度和压力。 Q 是电池的热源。

模型初始温度设定为环境温度298 K。入口质量流量设置为2.5g/s，入口温度设置为298 K。出口压力设置为0 Pa。电池的热源 Q 为240 kw/m³[17]。

为了验证模型网格独立性，建立了6种不同网格数量的模型如表2所示。图3显示了网格数量对压降和温差的影响。很明显，网格5和网格6之间的差异可以忽略不计。为了减少计算时间，故在后续模型中选用网格5。图4给出了模型计算结果与文献[17]数据的比较。模型计算结果与文献[17]数据相符，证明了模型的准确性。

表2 六种网格模型。

模型编号	1	2	3	4	5	6
网格数量	608940	2464131	2933855	3873303	4229052	6637020

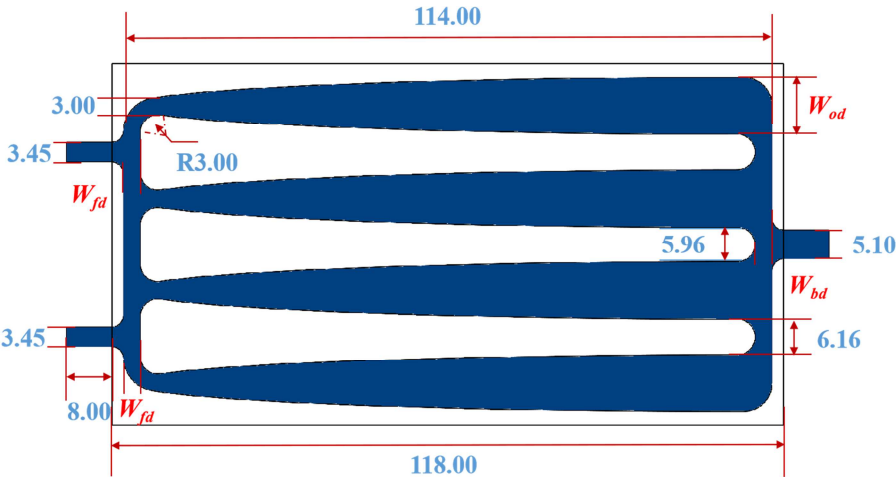


图2 流道结构尺寸示意图（单位：mm）。

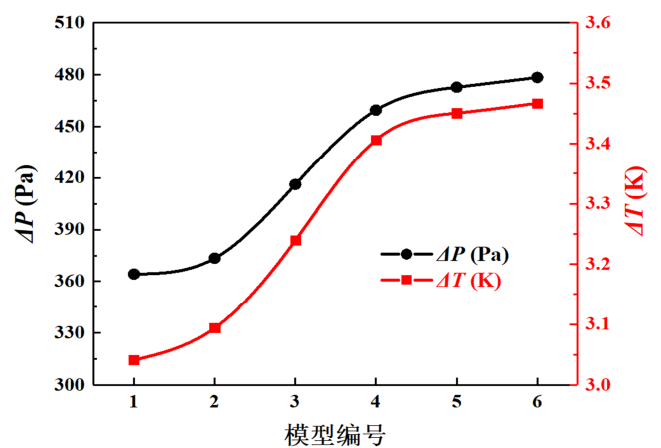


图3 网格无关性验证。

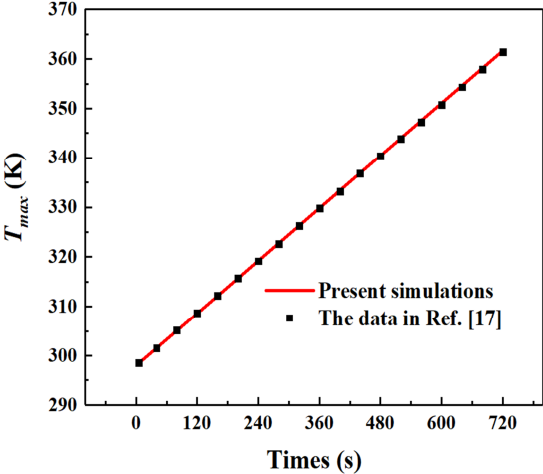


图4 模型计算结果与文献数据的比较。

3. 结果分析

3.1. W_{od} 的影响

由图2可知,子流道入口宽度为3 mm。当子流道出口宽度 W_{od} 也为3 mm时为直线型流道,当子流道出口宽度 W_{od} 大于3 mm时为扩散型流道。从图5a可以看出,直线型流道压降为1063.41Pa,而扩散型流道压降仅为619.27Pa,减小了41.76%;这是由于子流道出口宽度的增大,降低了冷却剂的速度,进而降低了冷却剂的沿程损失。因此扩散型流道设计有利于降低压降,减小电池热管理能耗。从图5b可以看出,扩散型流道高温区的温度明显低于直线型流道高温区的温度。此外,扩散型流道电池温差也只有直线型流道电池温差

的83.0%。其原因为子流道出口宽度的增大,提高了冷却剂与冷却板间的换热面积,进而促进了换热,降低了电池温度。

图6给出了子流道出口宽度 W_{od} 对压降和温差的影响。电池温差随 W_{od} 的增加先快速减小,然后缓慢升高,存在一个最小值,该值对应的 $W_{od}=10\text{mm}$ 为最优子流道出口宽度。一方面,子流道出口宽度 W_{od} 的增大,提高了冷却剂与冷却板间的换热面积,促进了换热。然而另一方面,子流道出口宽度 W_{od} 的增大,降低了冷却剂的流速,进而降低了冷却剂与冷却板间对流换热系数。因而存在一个最优的子流道出口宽度。当子流道出口宽度 W_{od} 从3 mm增加到6 mm,压降从1063.41Pa下降到619.27Pa,下降了41.76%,

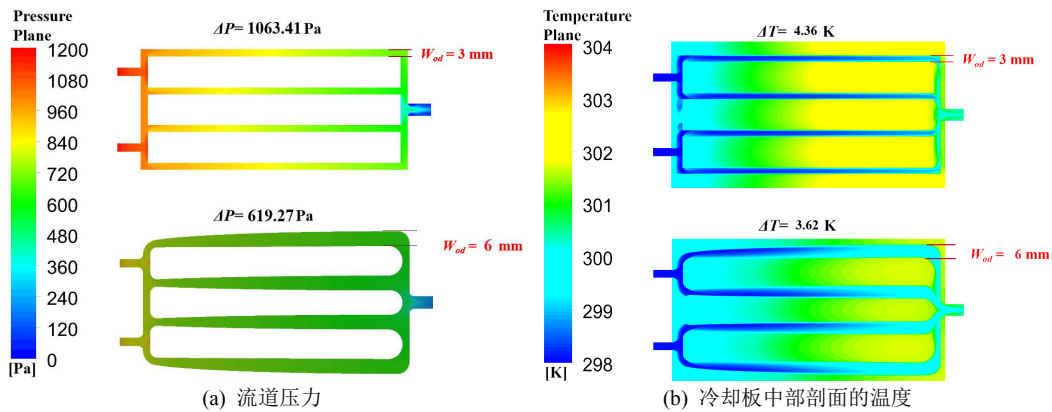


图5 两种流道结构对比图(左端为冷却剂入口,右端为冷却剂出口)。

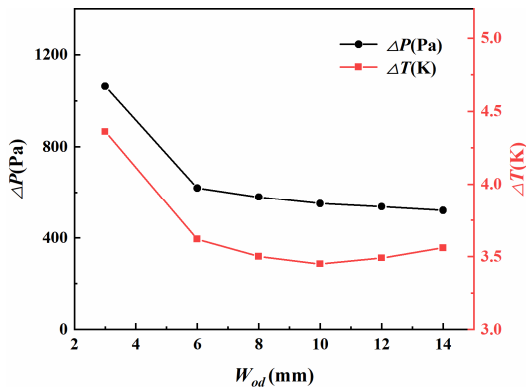


图6 W_{od} 对压降与温差的影响。

而从6mm 增加到12mm,只下降了15.89%。这主要由于沿程损失与速度的平方成正比。当子流道出口宽度 W_{od} 比较小时,速度比较大,沿程损失对速度较敏感,反之则相反。

3.2. 隔断式扩散型流道设计

为了进一步提高扩散型流道的性能,本文又提出了隔断式扩散型流道设计,如图7所示。其主要改进为,取消了中间两子流道间的竖直流道。 W_{od} 为10mm时,与扩散型流道相比,隔断式扩散型流道的压降下降了14.45Pa,温差从3.45K下降到3.38K,而与单入口扩散型流道[14]相比,隔断式扩散型流道的压降下降了55.8%,温差下降了0.54K,如图8所示。因此不论在压降还是温差方面,隔断式扩散型流道都有所改进。

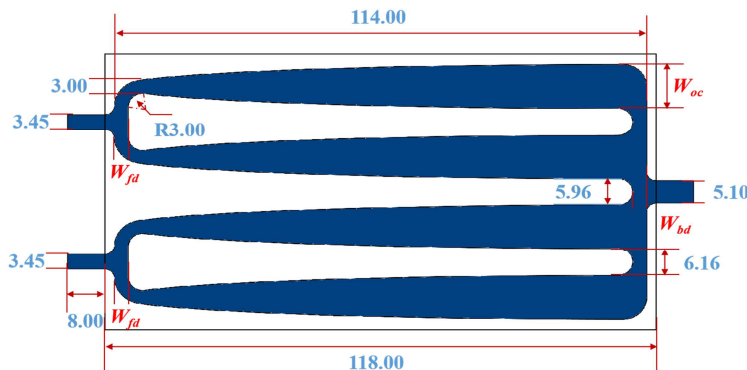


图7 隔断式扩散型流道结构示意图(单位: mm)。

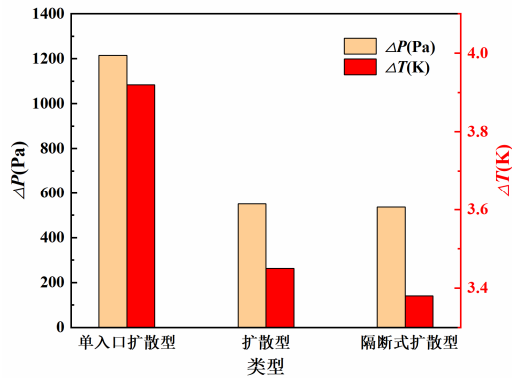


图8 三种设计对压降与温差的影响。

3.3. W_{fd} 与 W_{bd} 的影响

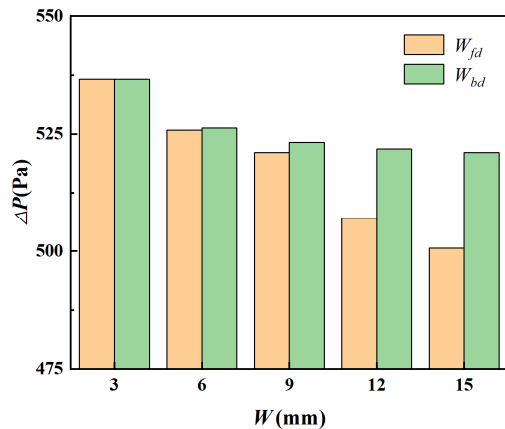
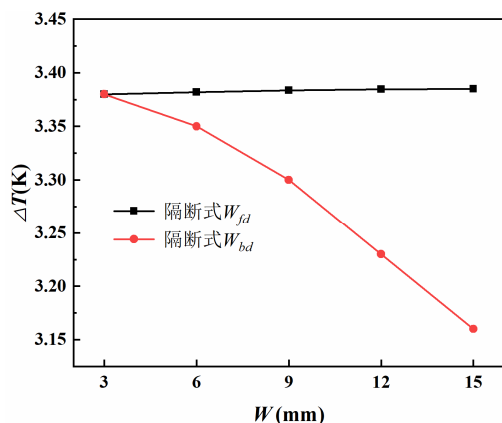
图9 W_{fd} 与 W_{bd} 对隔断式扩散型流道压降的影响。

图9展示了入口端竖直流道宽度 W_{fd} 与出口端竖直流道宽度 W_{bd} 对压降的影响。随着 W_{fd} 的增加，压降逐渐减小。当 W_{fd} 从3 mm增加到15 mm，压降从536.59 Pa降到500.64 Pa，下降了6.69%。这是由于 W_{fd} 的增加有利于缓解入口区域冷却剂与竖直子流道壁的碰撞强度，进而减小了压力损失。但与 W_{fd} 相比， W_{bd} 对压降的影响却很小。原因是子流道出口处宽度较大，冷却剂速度较小，所以出口区域冷却剂与竖直子流道壁的碰撞强度较小。

图10 W_{fd} 与 W_{bd} 对温差的影响。

如图10所示， W_{fd} 的增加，有利于改善电池的温度均匀性。当 $W_{fd}=15$ mm时，电池温差只有3.16 K，比 $W_{fd}=3$ mm时降低了6.50%。入口区域由于冷却剂温度比较低，导致入口区域电池温度较低。 W_{fd} 增大提高了冷却剂与冷却板间的换热面积，有利于提高入口区域换热能力。然而， W_{bd} 对温差的影响可以忽略，其原因为出口区域的冷却剂温度较高，对电池的降温效果有限。

4. 结论

本文得到的主要结论如下：

1. 电池温差随子流道出口宽度 W_{od} 的增加先快速减小，然后缓慢升高，最优子流道出口宽度 W_{od} 为10 mm；
2. 当子流道出口宽度 W_{od} 比较小时，速度比较大，沿程损失对速度较敏感，反之则相反；
3. 基于扩散型流道设计，提出的隔断式扩散型流道不论在压降还是温差方面均有所提高；
4. 随着入口端竖直流道宽度 W_{fd} 的增加，压降和温差均逐渐减小。

致谢

作者感谢国家自然科学基金(21701083)和镇江市船舶动力设备性能重点实验室(SS2018006)的经费资助。

参考文献

- [1] Y Chen, Y Wang, X Shen, et al. Cyanide-metal framework derived CoMoO₄/Co₃O₄ hollow porous octahedrons as advanced anodes for high performance lithium ion batteries, J. Mater. Chem. A. 6 (2018) 1048–1056.
- [2] Tete P R, Gupta M M, Joshi S S. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35 (1): 102255-102317.
- [3] Jiang W, Zhao J, Rao Z. Heat transfer performance enhancement of liquid cold plate based on mini V-shaped rib for battery thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189 (1): 116729-116738.
- [4] H Wu, J Xiao, X Zeng, X. Li, et al. A high performance direct carbon solid oxide fuel cell – a green pathway for browncoal utilization, Appl. Energy 248 (2019) 679–687.
- [5] Lai Y, Wu W, Chen K, et al. A compact and lightweight liquid-cooled thermal management solution for cylindrical lithium-ion power battery pack [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118581.
- [6] Jiang K, Liao G, E J, et al. Thermal management technology of power lithium-ion batteries based on the phase transition of materials: A review [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101816.

- [7] Xu X, Tong G, Li R. Numerical study and optimizing on cold plate splitter for lithium battery thermal management system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114787.
- [8] Chen K, Chen Y, Song M, et al. Multi-parameter structure design of parallel mini-channel cold plate for battery thermal management[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44 (6): 4321-4334.
- [9] Xu X, Li W, Xu B, et al. Numerical study on a water cooling system for prismatic LiFePO₄ batteries at abused operating conditions [J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 404-412.
- [10] Malik M, Dincer I, Rosen M A, et al. Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 472-481.
- [11] Du X, Qian Z, Chen Z, et al. Experimental investigation on mini-channel cooling-based thermal management for Li-ion battery module under different cooling schemes [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42 (8): 2781-2788.
- [12] Monika K, Chakraborty C, Roy S, et al. Parametric investigation to optimize the thermal management of pouch type lithium-ion batteries with mini-channel cold plates [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120568.
- [13] E J, Han D, Qiu A, et al. Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 508-520.
- [14] Kong W, Zhu K, Lu X, et al. Enhancement of lithium-ion battery thermal management with the divergent-shaped channel cold plate [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42 (1): 103027-103036.
- [15] Sciacovelli A, Colella F, Verda V. Melting of PCM in a thermal energy storage unit: Numerical investigation and effect of nanoparticle enhancement [J]. *International Journal of Energy Research*, 2013, 37 (13): 1610-1623.
- [16] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A. A novel phase change based cooling system for prismatic lithium ion batteries [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 86 (1): 203-217.
- [17] Rao Z, Wang Q, Huang C. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system [J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 659-669.