

基于流固热耦合的中心回转 流道液冷板散热性能研究

余剑武¹, 胡仕港^{1†}, 范光辉², 包有玉¹, 陈亚玲¹

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:为研究不同流道结构设计对液冷板散热性能、均温性能以及能耗的影响,采用计算流体动力学流固热耦合数值计算方法分析了液冷板结构参数对电动汽车某液冷单元散热性能的影响。结果表明:中心流道宽度由6 mm增加至31 mm,导热垫表面最大温差降低19.4%,流阻增加14.6%,当采用流道宽度从中间到两侧递减的设计方式,可以改善其散热均温性能且能耗在可接受范围内。流道深度由5 mm减小至2 mm,表面最大温差降低36.7%,流阻增大了3.3倍,减小流道深度能显著改善散热均温性能,同时会显著增加能耗。添加强化传热结构和在某些工况下改变进出水口位置能改善散热均温性能,同时也会增大流阻和能耗。研究结果可为液冷板的结构设计提供参考,从而改善电池模组的散热性能。

关键词:电池管理系统;液冷板;散热;均温性能;流道

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

Study on Heat Dissipation Performance of Liquid-cooling Plate with Center Revolving Flow Channel Based on Fluid-solid-heat Coupled Simulation

YU Jianwu¹, HU Shigang^{1†}, FAN Guanghui², BAO Youyu¹, CHEN Yaling¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to explore the influence of different flow channel designs on the heat dissipation performance, temperature uniformity and energy consumption of liquid-cooling plates, the Computational Fluid Dynamics(CFD) fluid-solid-heat coupled numerical simulation method is used for investigating the influences of their structural design parameters on the heat dissipation performance of a liquid cooling unit of electric vehicles. The results show that when the width of the central flow channel is increased from 6 mm to 31 mm, the maximum temperature difference on the surface of the thermal conductivity pad is reduced by 19.4%, and the flow resistance is increased by 14.6%, when the width of flow channels is reduced from the middle to both sides, the heat dissipation performance and temperature uniformity can be further improved, and the energy consumption can be controlled within an acceptable range. When the depth of flow channel is decreased from 5 mm to 2 mm, the maximum temperature difference is reduced by 36.7%,

* 收稿日期:2020-10-30

基金项目:湖南省交通科技项目(201834), Hunan Transportation Science and Technology Project(201834);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4205), Natural Science Foundation of Hunan Province(2020JJ4205)

作者简介:余剑武(1968—),男,湖南冷水江人,湖南大学教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail: 804742156@qq.com

but the flow resistance is increased by 3.3 times, reducing the depth of the flow channel can significantly improve the heat dissipation performance and increase the energy consumption. Liquid-cooling plates with enhanced heat transfer structure channel or exchange of inlet and outlet in some cases can improve the heat dissipation and temperature uniformity, and also increase the flow resistance and energy consumption. It is concluded that the structure design of liquid-cooling plates can be supported by this research in order to improve the heat dissipation performance of battery module.

Key words: battery management systems; liquid-cooling plate; heat dissipation; temperature uniformity; flow channels

锂离子电池以其能量密度、功率密度、使用寿命等方面的优势^[1],成为目前车用动力源的研究热点.动力电池在充放电过程中会产生一部分热量,如果这部分热量不能很好的控制,就会对汽车的安全性形成严重威胁^[2-3].

为解决高温问题,从综合冷却角度出发,Song等人^[4]提出一种使用相变材料和液体冷却技术的新型共轭冷却配置,研究表明,与单一相变材料(Phase Change Material,PCM)或液体冷却条件相比,共轭冷却显著降低了电池温度上升速率和稳态温度.施尚等人^[5]设计了一种新型相变材料/风冷综合热管理系统,研究发现综合热管理系统的冷却性能优于纯风冷热管理系统.

从结构角度出发,针对方形电池,主要采用带有内流通道的液冷板与电池表面紧密贴合进行换热,流道形状通常有蛇形、U形、平行一字形等^[6-8].Shang等人^[9]设计的电池液冷系统接触面积可变,采用三因素四水平正交优化有效降低了电池最高温并改善了温度均匀性.胡兴军等人^[10]设计了8种液冷结构,通过改变进口位置、接触面积等对比了它们的冷却效果.闵小滕等人^[11]基于微小通道扁管设计了液冷电池系统,发现多通道和大接触角更有利于电池散热.

从新型冷却剂角度出发,Yang等人^[12]采用新型液态金属作为冷却剂对电池系统进行热管理,采用数学分析对液态金属冷却系统的冷却能力等进行评估,并与水冷系统进行分析对比,发现能耗更低,冷却效果更好.

为解决温度一致性问题,文献[13]分析了管道宽度、管道高度、管数、冷却液流速对液冷电池热管理模型冷却效果的影响,发现就温度均匀性而言,管道数量和冷却剂速度具有相似影响,两者都是主要因素.范光辉等人^[14]研究了放电倍率、汇流排接触面积等对电池模组温度场的影响,结果表明,在高倍率工

况下,汇流排的电热效应不可忽略.千年妃等人^[15]设计了一种在单体间隙中填充铝柱的液冷热管理系统,对比发现变截面边长和高度梯度在温度一致性方面更具优势.

液冷散热系统不仅要解决电池系统的高温问题,还要解决温度一致性问题,在保证散热性能的前提下还要考虑系统能耗,目前电池散热技术很难同时兼顾.液冷散热因其换热能力强、体积小,工作效率高,成为当下研发的焦点.因此,本文以中心回转流道液冷板为研究对象,从流道设计、强化传热结构等角度探究液冷板散热、均温、能耗性能的影响规律.

1 工况设计

1.1 液冷单元与流道结构

电动汽车的电池系统由若干个电池模组组成,一般3~6个电池模组配有一个液冷单元,主要包括含有散热结构和流道的液冷板、导热垫及附件.如图1所示,本文设计的液冷板位于电池模组底部,同时对3个VDA(Verband der Automobilindustrie)标准设计的电池模组进行散热.

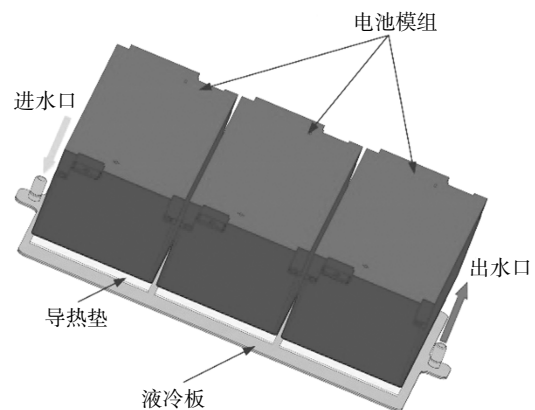


图1 电池液冷单元

Fig.1 Liquid cooling model of battery unit

液冷单元的散热性能主要取决于液冷板的散热结构设计,本文以一个液冷单元为研究对象,设计了如图 2 所示的中心回转流道液冷板并对其散热性能进行分析.

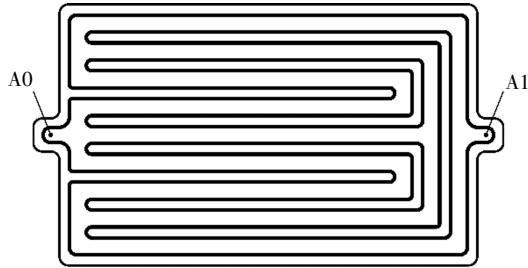


图 2 中心回转流道液冷板

Fig.2 Liquid-cooling plate with center revolving flow channel

1.2 流道参数设计

由图 1 可知,液冷板的总宽度是不变的.如图 3 所示,液冷板的截面共设计有 9 个散热流道,采用关于中心回转流道对称的设计方式,一共设计了 6 种截面的液冷板,分别用 B1~B6 表示,流道宽度的参数设计如表 1 所示,B1~B4 流道宽度从两侧到中心呈等差递减分布,B5 流道宽度是等宽流道,B6 流道宽度呈等差递增分布.

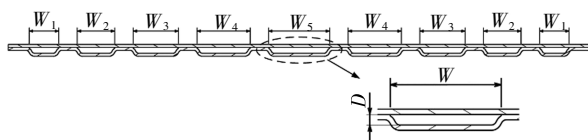


图 3 散热流道尺寸设计参数

Fig.3 Design parameters of flow channel

表 1 散热流道宽度设计

Tab.1 Width parameters of flow channel

| 流道种类 | 宽度 W_1/mm | 宽度 W_2/mm | 宽度 W_3/mm | 宽度 W_4/mm | 宽度 W_5/mm |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| B1 | 34.8 | 27.60 | 20.4 | 13.20 | 6 |
| B2 | 34.0 | 27.25 | 20.5 | 13.75 | 7 |
| B3 | 31.6 | 26.20 | 20.8 | 15.40 | 10 |
| B4 | 27.6 | 24.45 | 21.3 | 18.15 | 15 |
| B5 | 22.0 | 22.00 | 22.0 | 22.00 | 22 |
| B6 | 14.8 | 18.85 | 22.9 | 26.95 | 31 |

流道深度也是流道设计的重要参数之一,为了分析对比方便,本文选取 B5 等宽流道为研究对象,流道深度 D 设计如表 2 所示.

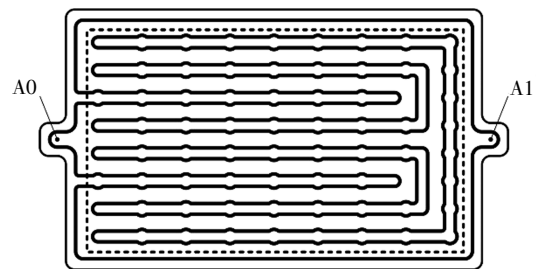
表 2 流道深度设计

Tab.2 Depth parameters of flow channel

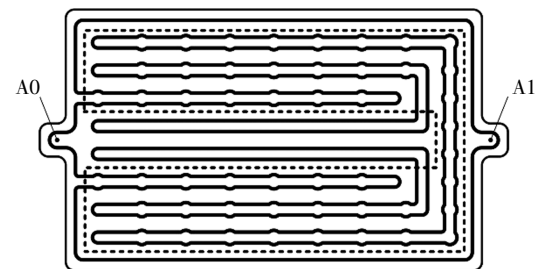
| 流道种类 | 深度 D_1/mm | 深度 D_2/mm | 深度 D_3/mm | 深度 D_4/mm |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| B5 | 2 | 3 | 4 | 5 |

1.3 流道强化传热结构设计

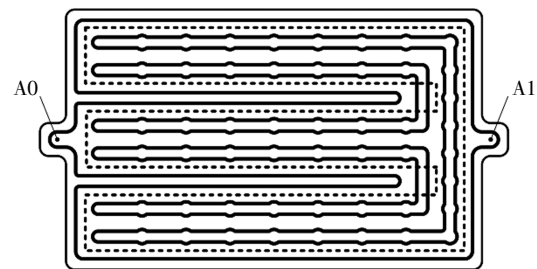
在液冷单元中可以通过提高冷却液流速和流量来提高其散热性能,此外还可以增加强化对流传热结构来提高换热效率.本文选取等宽流道 B5,流道深度 D 为 3 mm 的液冷板为研究对象,设计不同的强化传热结构,研究其对液冷系统散热均温及能耗的影响.强化传热结构的位置如图 4 所示的虚线方框部分,一共有 5 种结构,分别用 S1~S5 表示.



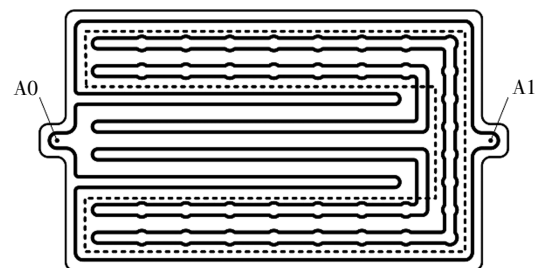
(a)结构 1(S1)



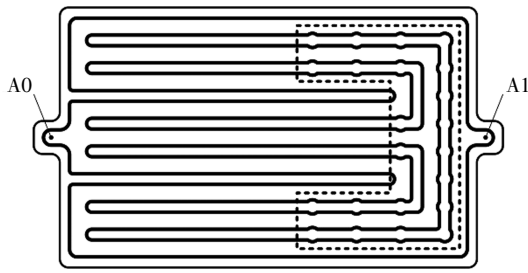
(b)结构 2(S2)



(c)结构 3(S3)



(d)结构 4(S4)



(e)结构 5(S5)

图4 强化传热结构

Fig.4 Structure of enhanced heat transfer

为确定进出水口对同种流道散热性能的影响,在进行计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟分析时,均交换进出水口.冷却液进出口工况如表3所示.

表3 进出水口工况设计

Tab.3 Design of inlet and outlet

| 工况 | 进水口 | 出水口 |
|------|-----|-----|
| 工况 A | A0 | A1 |
| 工况 B | A1 | A0 |

2 数值计算方法

2.1 液体传热控制方程

流-固-热耦合计算,主要解决涉及液体流动换热与结构变形需同时考虑的情况,其关键是流固边界热量的传递.流固边界面上的热量传递过程可表示为:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T_s}{\partial n} \right) = h(T_w - T_f) \quad (1)$$

式中: λ 为液冷板导热系数; $\partial T_s / \partial n$ 表示液冷板在流固交界面法向的温度梯度; h 为冷却液对流换热系数; T_w 为液冷板壁面温度; T_f 为冷却液温度.

基于三维热传导微分方程的固体间的热传导方程为:

$$\lambda \nabla^2 T_s + \Phi = 0 \quad (2)$$

式中: Φ 为内部热源的发热功率.

如果把冷却液看作不可压缩流体,在流-固-热耦合计算中,应遵守质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,其三维流动传热控制方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = f - \frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) \quad (5)$$

式中: \mathbf{v} 为速度矢量; $\rho, f, P, \mu, c_p, T, k$ 分别表示冷却液的密度、体积力、压力、动力黏度、比热容、温度、热导率.

本文采用流固耦合传热模型,利用双向耦合求解,其中流体域采用有限体积法,固体域采用有限元法.

2.2 边界参数设置

本文研究的电池模组包含4个电池单体,采用1并4串的连接方式,电池单体在1C放电倍率下的发热功率经试验测试为27W,因此整个液冷单元以324W作为计算输入.

图5为液冷单元传热的简化模型,将电池模组简化为发热源,用导热垫表面上的箭头表示热流边界代替发热源,假定液冷单元的外表面绝热.本文的CFD计算采用稳态求解,电池产生的热量由导热垫表面传递到液冷板内表面,热量通过液冷板流道内表面与冷却液的对流换热被全部带走.边界参数设置如表4所示,液冷单元主要的物性参数如表5所示,冷却液使用体积比为1:1的乙二醇水溶液,液冷板为3系铝合金,导热垫片采用有机硅复合材料.



图5 简化模型

Fig.5 Simplified model

表4 边界参数设置

Tab.4 Parameter setup of boundary

| 边界参数 | 数值 |
|--------------------------------|---------------|
| 导热垫规格尺寸/(mm×mm×mm) | 296 × 148 × 2 |
| 冷却液进口流量/(L·min ⁻¹) | 1.25 |
| 冷却液进口温度/°C | 25 |
| 冷却液出口压力/Pa | 0 |
| 液冷单元发热功率/W | 324 |
| 导热垫热流密度/(W·m ⁻²) | 2 465.3 |

表5 液冷单元物性参数

Tab.5 Physical properties of liquid cooling unit

| 液冷单元组成 | 热导率 k/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 密度 ρ/(kg·m ⁻³) | 比热容 c/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | 动力黏度 μ/(Pa·s) |
|--------|--|-------------------------------|---|------------------|
| 冷却液 | 0.384 | 1 071.11 | 3 300 | 0.003 39 |
| 模组 | 12.8/12.8/2.6 | 2 350 | 980 | — |
| 导热垫 | 1.5 | 2 250 | 960 | — |
| 液冷板 | 209 | 2 700 | 900 | — |

2.3 CFD 数值计算收敛性与准确性判定

本文涉及多个不同模型工况的计算,经网格无关性检验,流体域网格尺寸为 2 mm,固体域网格尺寸为 5 mm 时,流体域网格数量为 186.67 万,固体域网格数量为 99.03 万,可保证计算精度.流体区域边界层为 3 层.流体区域最大迭代步数为 12 000 步,固体域计算步数为 2 400 步.本文以 $k-\epsilon$ 模型为湍流模型,经验证,所有算例的残差都在 10^{-6} 以下.图 6 为本文所有算例流固交界面换热功率、出口水温升与一维计算(1D)的对比,所有算例的误差均小于 6%,说明了本文数值计算的收敛性和准确性.

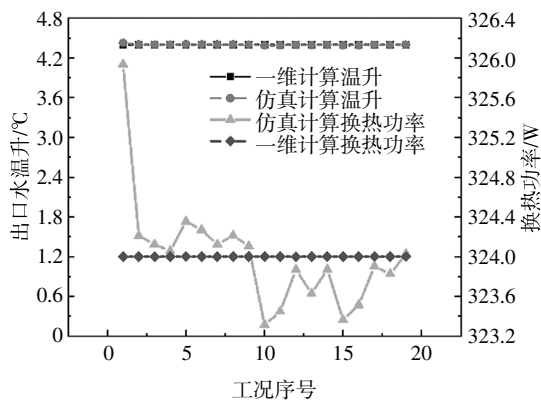


图 6 1D 和 CFD 的计算结果对比

Fig.6 Comparison of calculation results by 1D and CFD

3 结果分析与讨论

3.1 流道宽度对散热性能的影响分析

图 7 为不同流道宽度下导热垫的表面温度的变化.表面平均温度和最大温差均与中心流道 W_5 宽度成反比,B6 与 B1 相比,表面平均温度下降 1.7%,最大温差下降 19.4%.虽然继续增大中心流道宽度,表

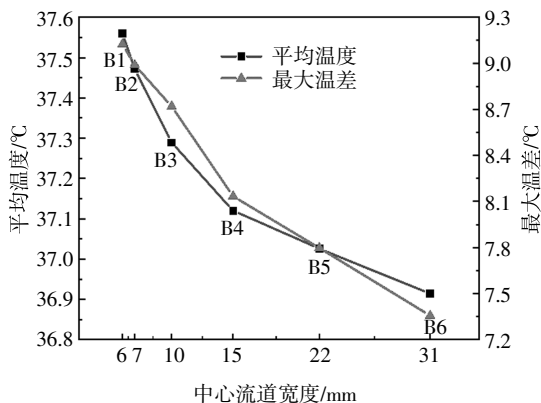


图 7 不同流道宽度下导热垫表面温度的变化

Fig.7 Change of surface temperature of thermal

pad under different flow channel width

面平均温度和最大温差还可能进一步降低,但中心流道 W_5 过宽时,液冷板在液体压力作用下产生变形,出现鼓包现象.

图 8 为流道宽度对冷却液流阻、传热系数、热阻的影响.由图 8 可知,随着中心流道 W_5 宽度的增加,对流传热系数逐渐升高,热阻逐渐下降,液冷单元流阻先降后升,B6 与 B1 相比,流阻增加 14.6%,当 W_5 流道宽度在 6 ~ 15 mm 内,流阻和散热性能会随 W_5 的增加同时得到改善.

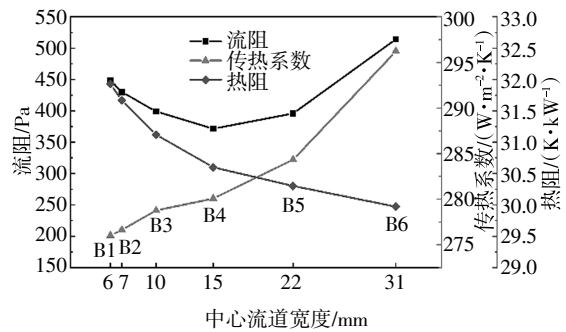
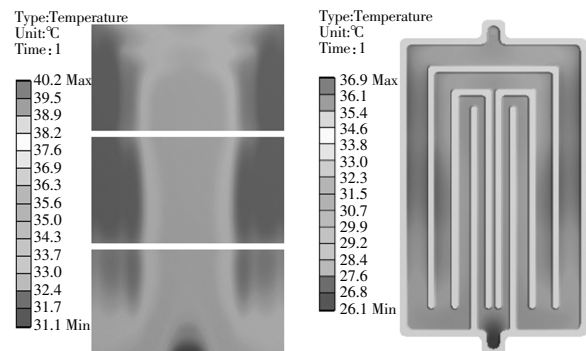


图 8 流道宽度对冷却液流阻、传热系数、热阻的影响

Fig.8 Influence of flow channel width on coolant flow resistance, heat transfer coefficient and thermal resistance

图 9 为不同中心流道宽度下的温度分布云图.当 W_5 宽度为 6 mm 时,液冷板中心区域为低温区,两侧为高温区.这是由于中间区域冷却液温度低,且中间区域流道窄、流速高,进一步提升了中心区域的散热能力,但是从液冷板全局来看,其均温性效果不太理想.

当 W_5 宽度增加到 31 mm 时,低温区域位于进水口附近,液冷板中部为高温区.此时,液冷板中间流道宽度大,流速低,对流换热能力弱,入口处的低温冷却液则从传热温差角度增大了换热量,以此达到散热均衡.最后冷却液从液冷板两侧流出,两侧冷却液温度高,但是两侧流速高带来的强对流换热使得该区域散热相对均衡.



(a) $W_5 = 6$ mm 导热垫表面

(b) $W_5 = 6$ mm 流固交界面

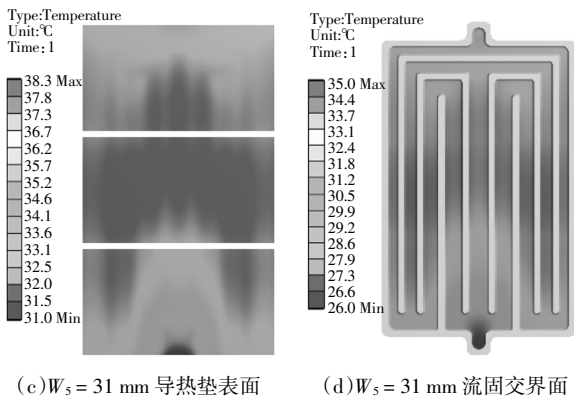


图9 不同流道宽度的温度场

Fig.9 Temperature field under different flow channel width

3.2 流道深度对散热性能的影响分析

图 10 为不同流道深度下导热垫表面温度变化。表面平均温度和最大温差与流道深度成正比。流道深度为 2 mm 时与 5 mm 时相比,导热垫表面平均温度下降了 36.7%,最大温差降低了 9.4%。在冷却液进口流量不变的情况下,流道深度小意味着冷却液流速高,有利于散热。

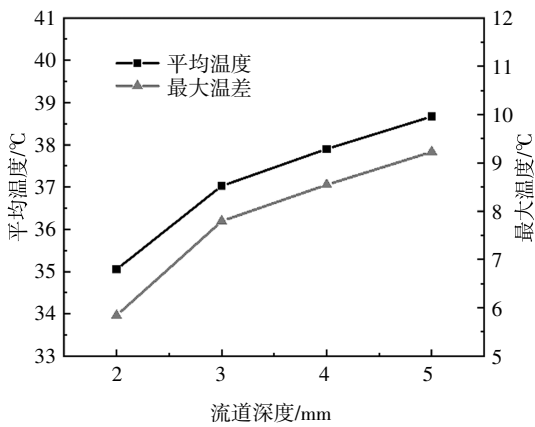


图 10 不同流道深度下导热垫表面温度的变化

Fig.10 Change of surface temperature of thermal pad under different flow channel depth

图 11 为流道深度对冷却液流阻、传热系数、热阻的影响。由图 11 可知,以流道深度为 5 mm 时的散热性能为基准,2 mm 流道深度的热阻减小了 32.1%,对流传热系数增加了 91.7%,流阻增加了 3.3 倍。随着流道深度的减少,尽管系统散热性能得到改善,但导致了能耗显著增加。

图 12 是流道深度分别为 2 mm、5 mm 时的温度分布云图。当 D 为 2 mm 时,液冷板两侧为高温区,中心区域为低温区。这是因为刚进入液冷板的冷却

液温度较低,加之流道深度越小,流速越高,对流换热能力越强,导致液冷板中部温度比两侧低。当 D 为 5 mm 时,液冷板中游两侧为高温区,中间流道部分为低温区。

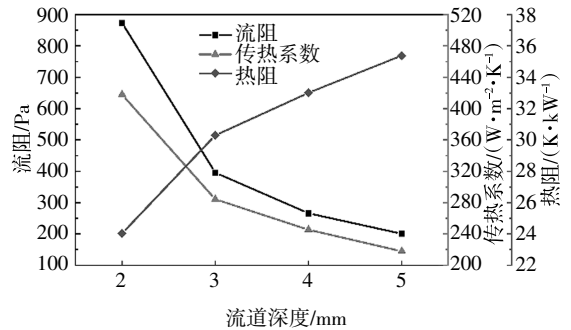


图 11 流道深度对冷却液流阻、传热系数、热阻的影响

Fig.11 Influence of flow channel depth on coolant flow resistance, heat transfer coefficient and thermal resistance

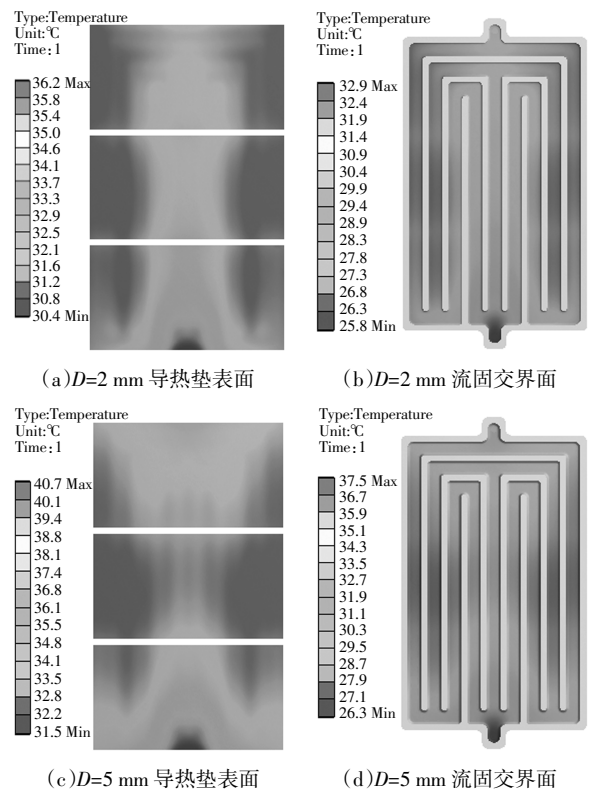


图 12 不同流道深度的温度场

Fig.12 Temperature field under different flow channel depth

3.3 强化传热结构对散热性能的影响分析

图 13 为 5 种添加强化传热结构设计方案 (S1~S5) 与不添加强化传热结构设计方案 (B5) 导热垫表面温度对比。与 B5 相比,S1~S5 导热垫表面的平均温度与最大温差均有明显下降,其中 S1 的最大温差

下降 15.4%,平均温度下降 12.5%,可以看出其改善效果最显著. S2、S3、S4 的散热均温性能改善明显,但略逊于 S1;S5 则会引起散热均温性能明显下降.由此可见,在两侧布置强化传热结构的液冷板的散热性能及温度一致性得到了明显的改善.

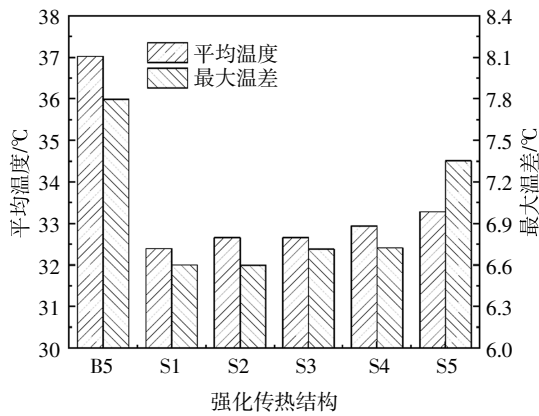


图 13 强化传热结构对导热垫表面温度的影响

Fig.13 Influence of enhanced heat transfer structure on surface temperature of thermal conductivity pad

图 14 为不同强化传热结构对冷却液流阻、传热系数、热阻的影响. 与 B5 相比,S1~S5 液冷单元的对流传热系数显著增加,热阻略微降低,且流阻增加幅度小. S1 的改变最为明显,流动阻力增加 11.9%,对流传热系数增加 25.9%,热阻下降 47%.

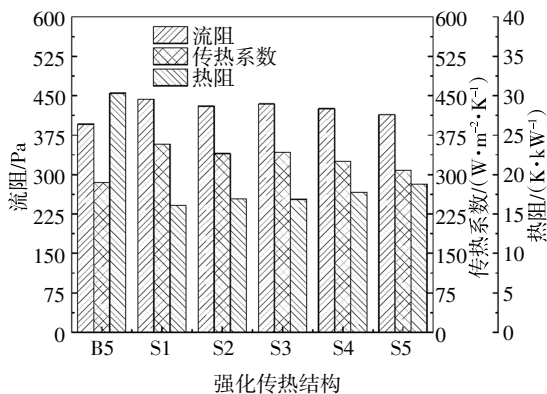


图 14 强化传热结构对冷却液流阻、传热系数、热阻的影响

Fig.14 Influence of enhanced heat transfer structure on coolant flow resistance, heat transfer coefficient and thermal resistance

3.4 交换进出水口对散热性能的影响分析

图 15 为 S1~S5 交换进出水口后导热垫表面温度的变化对比,可以看出交换进出水口对导热垫表面平均温度影响较小,但对最大温差影响较为明显.

图 16 为交换进出水口对冷却液流阻、传热系数的影响;图 17 为交换进出水口对冷却液热阻的影响.

工况 B 与工况 A 相比,S1~S5 的流动阻力均有一定程度下降,对传热系数几乎无变化,热阻略微降低,且 S4 在交换进出水口前后导热垫表面最大温差变化显著.

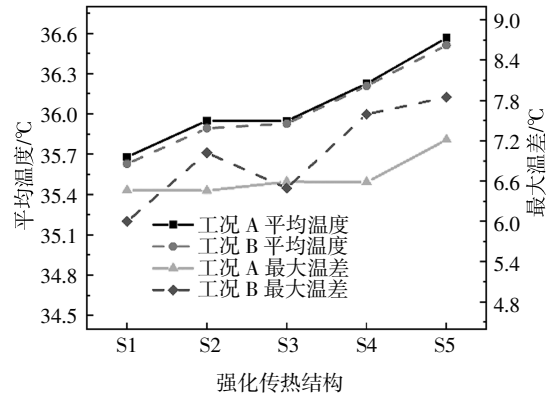


图 15 交换进出水口对导热垫表面温度的影响

Fig.15 Influence of exchanging inlet and outlet on surface temperature of thermal conductivity pad

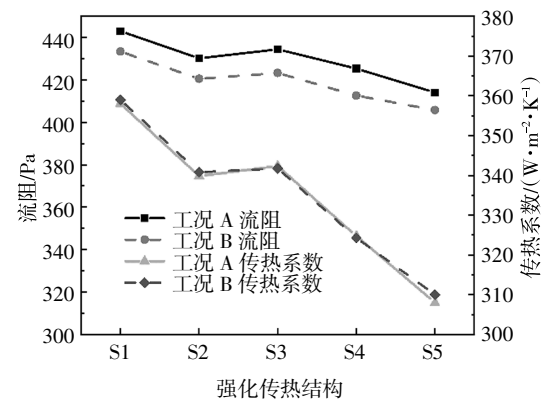


图 16 交换进出水口对冷却液流阻、传热系数的影响

Fig.16 Influence of exchanging inlet and outlet on coolant flow resistance and heat transfer coefficient

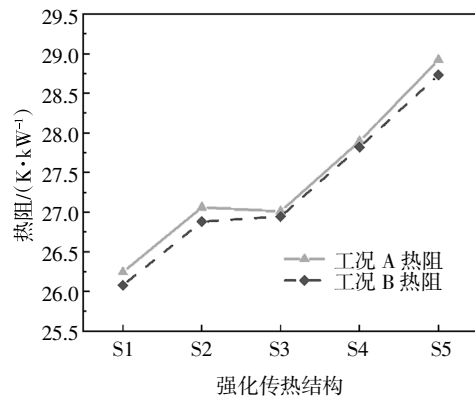
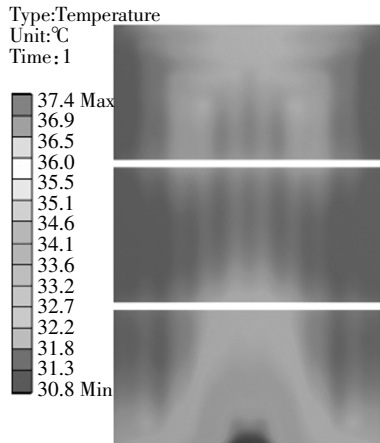


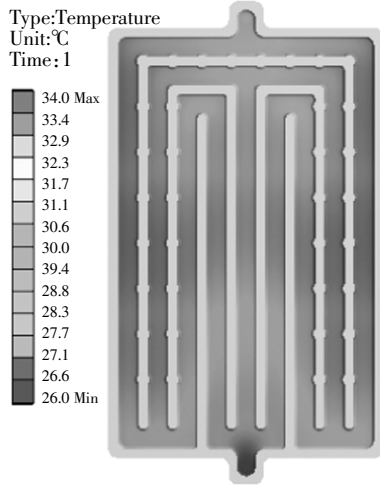
图 17 交换进出水口对冷却液热阻的影响

Fig.17 Influence of exchanging inlet and outlet on coolant thermal resistance

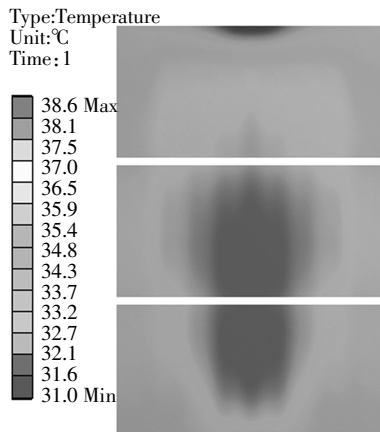
图 18 为 S4 液冷板交换进出水口后导热垫表面、液冷板流固交界面的温度对比. 工况 B 与工况 A 相比, 在液冷板中心靠近出口位置的局部区域出现了高温区, 这是由于该区域为冷却液流路径最后一段, 冷却液温度高, 致使液冷单元温度一致性较差. 在实际应用中, 针对进出口不对称的液冷板, 进出水口位置也是重点考察对象之一.



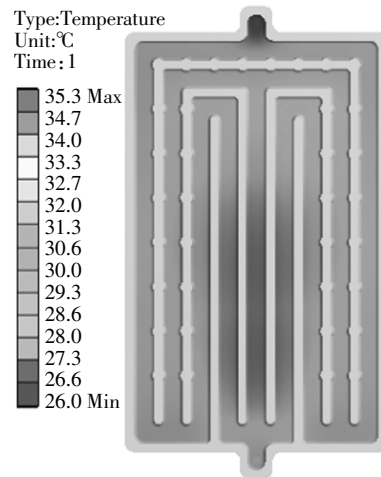
(a) 工况 A 导热垫表面



(b) 工况 A 流固交界面



(c) 工况 B 导热垫表面



(d) 工况 B 流固交界面

图 18 结构 4(S4) 交换进出水口温度场

Fig.18 Temperature field of structure S4 before and after exchanging inlet and outlet

4 结论

本文从流道设计参数、强化传热结构几个方面针对中心回转流道液冷板的散热性能进行了分析, 得出如下结论:

1) 针对中心回转流道, 中间流道宽两侧流道窄的设计方案可以获得较好的散热性能及均温性能. 流道深度越小, 越有利于液冷单元散热均温性能的提升, 流道深度过小, 会增加制造工艺难度, 引起流动阻力和系统能耗的大幅增加.

2) 添加强化传热结构能改变冷却液的流动状态, 进而大幅改善液冷单元的散热性能及均温性能. 在局部高温区域添加强化传热结构可以在改善液冷单元的散热均温性能的同时不引起流阻的显著增加, 实现液冷单元散热、均温、能耗的兼顾.

3) 交换进出水口虽然对散热性能影响较小, 但在液冷单元均温性能方面有很大影响. 在设计液冷单元时, 需要考虑进出水口位置对其散热均温性能及系统能耗的影响.

参考文献

- [1] 闫金定. 锂离子电池发展现状及其前景分析 [J]. 航空学报, 2014, 35 (10): 2767—2775.
YAN J D. Current status and development analysis of lithium-ion batteries [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35

- (10):2767—2775. (In Chinese)
- [2] 陈泽宇,熊瑞,孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报,2019,55(24):93—104.
CHEN Z Y,XIONG R,SUN F C. Research status and analysis for battery safety accidents in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering,2019,55(24):93—104. (In Chinese)
- [3] 朱晓庆,王震坡,HSIN W,等. 锂离子动力电池热失控与安全风险管理研究综述[J]. 机械工程学报,2020,56(14):91—118.
ZHU X Q,WANG Z P,HSIN W,*et al.* Review of thermal runaway and safety management for lithium-ion traction batteries in electric vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering,2020,56(14):91—118. (In Chinese)
- [4] SONG L M,ZHANG H Y,YANG C. Thermal analysis of conjugated cooling configurations using phase change material and liquid cooling techniques for a battery module[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,133:827—841.
- [5] 施尚,余建祖,谢永奇,等. 锂电池相变材料/风冷综合热管理系统温升特性 [J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(6):1278—1286.
SHI S,YU J Z,XIE Y Q,*et al.* Temperature rise characteristic of lithium battery integrated thermal management system combining phase change materials with air cooling [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2017,43(6):1278—1286. (In Chinese)
- [6] ZHAO C R,SOUSA A C M,JIANG F M. 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.
- [7] JARRETT A,KIM I Y. Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates[J]. Journal of Power Sources,2014,245:644—655.
- [8] JIN L W,LEE P S,KONG X X,*et al.* Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management [J]. Applied Energy,2014,113:1786—1794.
- [9] SHANG Z Z,QI H Z,LIU X T,*et al.* Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,130:33—41.
- [10] 胡兴军,惠政,郭鹏,等. 锂离子电池组间接接触液冷散热结构研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(2):44—50.
HU X J,HUI Z,GUO P,*et al.* Research on the indirect contact liquid cooling heat dissipation structure of lithium-ion battery pack [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2019,46(2):44—50. (In Chinese)
- [11] 闵小滕,唐志国,高钦,等. 基于微小通道波形扁管的圆柱电池液冷模组散热特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(3):463—469.
MIN X T,TANG Z G,GAO Q,*et al.* Heat dissipation characteristic of liquid cooling cylindrical battery module based on mini-channel wavy tube [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2019,53(3):463—469. (In Chinese)
- [12] YANG X H,TAN S C,LIU J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal [J]. Energy Conversion and Management,2016,117:577—585.
- [13] E J Q,HAN D 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] 范光辉,余剑武,罗红,等. 汇流排对电池模组温度与电流均衡性的影响分析和实验研究 [J]. 汽车工程,2019,41(2):140—146.
FAN G H,YU J W,LUO H,*et al.* Analysis and experimental study on the influence of bus-bar on the temperature and current equalization of battery module [J]. Automotive Engineering,2019,41(2):140—146. (In Chinese)
- [15] 千年妃,孙长乐,刘东旭,等. 变接触面液冷系统的电池模组温度一致性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(6):34—42.
GAN N F,SUN C L,LIU D X,*et al.* Study on temperature consistency of battery module for liquid cooling system with variable contact surface [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(6):34—42. (In Chinese)