

一种用于动力电池热管理的均温液冷板

李隆键, 李维平, 崔文智

(重庆大学 能源与动力工程学院, 重庆 400030)

摘要: 动力电池热管理的目标不仅是保证电池模组在合适的温度范围内工作, 而且要尽量保证模组内部温度均匀。液冷板是电池模组主动液体冷却系统的一个重要组成部分, 此前对电池热管理的研究大多集中在液冷板流道结构及冷板排布方式对电池模组温度分布的影响, 而忽略了冷却液的沿程温升对模组温度均匀性的影响。根据间壁式传热原理, 提出采用液冷侧非线性强化传热的方式, 以实现热源侧壁面温度均匀分布的均温液冷板结构。以某一动力电池模组液冷散热要求为例, 构建了非线性传热强化液冷均温板模型, 并进行了相应的数值模拟。结果表明, 提出的均温液冷板能有效实现动力电池模组均温性要求。

关键词: 动力电池; 热管理; 强化传热; 均温液冷板; 数值模拟

中图分类号: TB657 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2019.06.04

A Novel Liquid Cold Plate with Temperature Uniformity for Thermal Management of Power Battery Module

LI Longjian, LI Weiping, CUI Wenzhi

(College of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The aims of power battery thermal management include controlling the battery temperature not only within the proper range but also with the relative uniformity. The liquid cold plate is an important component of the active liquid cooling system of the battery. Previous studies on battery thermal management mostly focused on the effects of the flowing channel structure and layout of the cold plate on temperature distribution of the battery module. However, the effect of coolant temperature rise along the flowing direction on the battery temperature uniformity is neglected. Based on the fundamental principles of the recuperative heat transfer, the nonlinear heat transfer enhancement method in the coolant channel was employed with a view of controlling the temperature uniformity. A liquid cold plate structure with the nonlinear heat transfer enhancement was proposed to satisfy the cooling requirements of a battery module, and the numerical simulation of heat transfer performance was carried out. The results show that the proposed liquid cold plate can effectively achieve the temperature uniformity.

Keywords: power battery; thermal management; heat transfer enhancement; temperature uniformity cooling plate; numerical simulation

收稿日期: 2019-05-31 改稿日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0104502)

参考文献引用格式:

李隆键, 李维平, 崔文智. 一种用于动力电池热管理的均温液冷板 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(6): 413-416.

LI Longjian, LI Weiping, CUI Wenzhi. A Novel Liquid Cold Plate with Temperature Uniformity for Thermal Management of Power Battery Module [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(6): 413-416. (in Chinese)



随着动力电池能量密度的增大,风冷已难于满足电池热管理要求。液冷板由于其结构紧凑,能够将液体与电池分离,从而增强了电池系统的安全性,近年来已成为主动液体冷却系统的一个重要组成部分^[1]。在汽车电池组液冷板的设计中,不同的应用场合可能需要不同的通道设计和几何形状,目前对液冷板的研究大多基于矩形通道几何形状^[2-4],以及液冷板布置和流量等参数对电池模组温度分布的影响^[5-6],而忽略了冷却液沿程温度变化对模组温度均匀性的影响。

众所周知,随着电池与液冷板之间的传热,冷却液温度沿程是逐渐升高的,为满足动力电池热管理要求,一方面要采用足够大的冷却液流量,以便将电池生热带出,保证电池在合适的温度范围内工作。另一方面,通过设计复杂的冷却液流道结构,以保证电池模组温度的均匀性。流量增大不利于热管理系统的轻量化设计要求,复杂的流道设计增加了系统的制造成本和运行功耗。

本文提出了一种沿程非线性强化传热的液冷板结构,从理论上分析了保证液冷板加热侧均温性的可行性以及各个设计参数对非线性强化传热过程的影响关系,为液冷均温板设计提供理论指导。此外,针对某一电池模组液冷散热要求,设计了一种均温液冷板,并运用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对其流动传热过程进行了数值模拟,以验证均温液冷板的可行性。

1 基本原理

动力电池液冷板本质上可视为一间壁式换热器,如图1所示,厚度为 t 的壁面上电池组件所需的散热热流密度为 q_w ,冷却流道宽度为 b ,高度为 l ,冷却液质量流量为 m (kg/s),比热容为 C_p [J/(kg·K)]。则沿流向 x 方向任意 dx 微元段上应遵循以下能量平衡关系式:

$$mC_p \cdot dT_f = K(T_w - T_f)b \cdot dx = q_w b \cdot dx \quad (1)$$

式中: K 为加热壁面与冷却流体之间的传热系数, W/(K·m²); T_w 为壁面温度,℃; T_f 为流体温度,℃。由式(1)可知,如果加热壁面热流 q_w 为常数, $q_w = C$,则有:

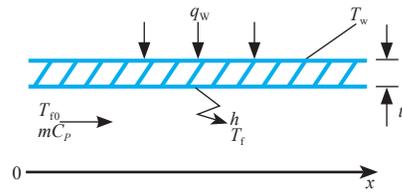


图1 间壁式传热示意图

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{b \cdot q_w}{mC_p} = \frac{b \cdot K}{mC_p}(T_w - T_f) = C' \quad (2)$$

式(2)表明,如果加热壁面热流 q_w 恒定,则流体温度 T_f 与壁面温度 T_w 沿流动方向线性变化,且两者之间温差 $T_w - T_f$ 恒定。对式(1)从 $0 \sim x$ 积分,经变换得到式(3):

$$K = \frac{q_w}{T_w - T_{f(x)}} = \frac{q_w}{T_w - T_{f(0)} - C'x} \quad (3)$$

式中: $C' = \frac{b \cdot q_w}{mC_p}$,其物理意义为给定结构和运行参数下单位长度上冷却液沿程温升。对于动力电池热管理或电力电子设备散热来说,假定理想情况下电池发热均匀,即 q_w 为常值,热管理的目标是尽量使 T_w 为定值。动力电池热管理系统热设计时,加热壁面温度 T_w 为给定流道几何尺寸、冷却液流量和电池发热功率情况下期望保持的恒定壁面温度。如果实现加热壁面与冷却液之间传热系数 K 按照式(3)表示的沿程非线性变化,则可实现与动量电池接触的加热壁面温度恒定。

2 应用实例

针对某电池模组液冷要求设计了一种可切换热强度液冷板。一个电池模组液冷板尺寸为 $150 \text{ mm}^2 \times 350 \text{ mm}^2$ 。原有热管理参数:实测液冷板散热功率约为 4000 W/m^2 ,冷却液(50%水和50%乙二醇的混合物)原设计流量为 2.5 L/min 。本文采用的流量为 1.25 L/min ,入口温度约为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。加热壁面预期温度 $T_w = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。基于以上结构和运行参数,根据式(3)计算得到加热壁与冷却液之间的传热系数 K 的变化曲线,如图2所示。

采用在液冷流道内布置圆柱状扩展表面的方法逼近式(3)所要求的 K 值变化规律,如图3所示。柱状扩展表面起强化传热的作用。实现传热系数 K

值沿程非线性变化的具体方法是：首先从流道入口开始，分段进行基于流量和液冷板流通界面尺寸的热设计计算，初步确定各段扰流圆柱的个数和布置方式。

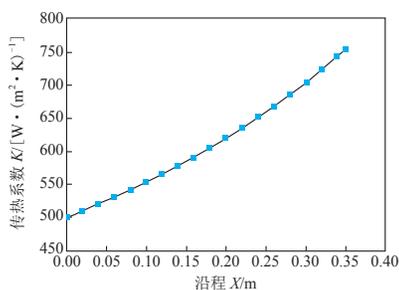


图2 传热系数沿程变化曲线

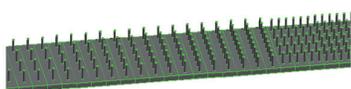


图3 均温板液冷流道结构

经初步设计以后，采用 CFD 方法对液冷板的传热过程进行了数值模拟计算。经若干次试算和局部调整，最终实现了液冷板加热壁面的温度均匀，整个液冷板加热壁上最大温差不超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过数值计算得到的动力电池液冷板加热壁与冷却液温度沿程变化曲线，如图 4 所示。

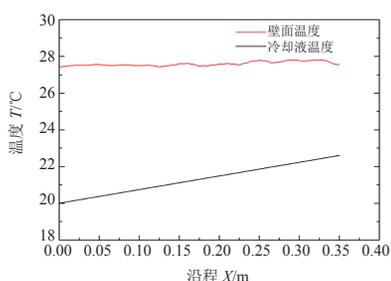


图4 液冷板加热壁与冷却液温度沿程变化曲线

由图 4 可知，沿长度方向冷却液温升至 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。而液冷流道内通过沿程分段强化传热，加热壁面温升得到有效抑制，整个长度方向温度波动不超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该工况下液冷流道阻力为 43.8 Pa 。这说明本文提出的非线性强化传热的方式实现均温液冷板的理论和方法是可行的。

该均温板同样可应用于高热流密度下的电力电子设备散热。假定电力电子器件（如 IGBT）的散热流密度为 $q_w = 40\ 000\text{ W/m}^2$ ，冷却液进口温度 $T_{f0} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，期望加热壁面温度 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷却液流量为 2.0 L/min 。通过数值模拟得到 IGBT 的液冷板加热壁与冷却液温度沿程变化曲线，如图 5 所示。

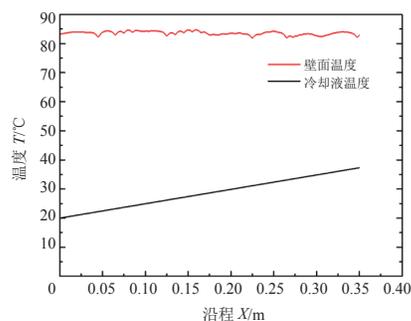


图5 液冷板加热壁与冷却液温度沿程变化曲线

由模拟计算结果可知，该均温液冷板用于电力电子功率器件散热时，在较低冷却液流量下，冷却液温升 $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，整个加热壁面温度波幅小于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，液冷流道阻力为 71.3 Pa 。

3 影响因素分析

在均温液冷板热设计中，影响传热 K 的因素较多。由式 (3) 可知，影响 K 值沿程变化的有壁面加热热流 q_w 、冷却液流量 m 、进口温度 T_{f0} 、冷却液物性参数等。当然，有些参数被组合为一个参数，譬如 $C' = (b \cdot q_w) / (m \cdot C_p)$ 。本文主要讨论加热壁温 T_w 与冷却液进口温度 T_{f0} 差 $\Delta T = T_w - T_{f0}$ ，以及参数 C' 对传热系数 K 沿程变化规律的影响。

3.1 加热壁温度的影响

在给定液冷板结构和运行参数，以及冷却液进口温度的情况下，期望维持的加热壁面温度 T_w 影响均温液冷板 K 值的设计。基于上节动力电池均温液冷板的应用实例，考察进口冷却液温度不变、不同加热壁面温度，即不同壁温和冷却液进口温差 ΔT 所需要的传热系数 K 沿程变化规律，如图 6 所示。

由图 6 可知，加热壁面与冷却液进口温差越小，所需传热系数越大，且 K 值沿流动方向的非线性越

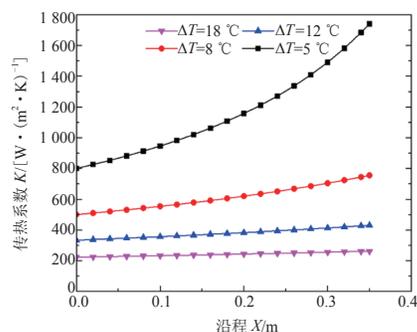


图6 不同温差下的传热系数沿程变化曲线

强烈,即沿流动方向的传热系数所需强化比越高。当然,对于采用圆柱装扩展表面方法强化传热方式,其所能达到的进出口间的传热系数比除了受圆柱直径的影响外,还受到液冷流道高度的限制。

3.2 参数 C' 的影响

C' 是一个与加热壁面热流、冷却液流量和物性有关的组合参数,其物理意义是沿冷却液流动方向单位长度的温升。不同参数 C' 所要求的传热系数 K 值沿程变化曲线如图 7 所示。

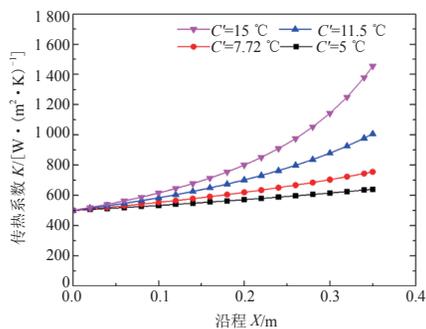


图 7 不同参数 C' 下传热系数沿程变化曲线

由图 7 可知,沿流动方向单位长度冷却液温升 C' 越大,所要求的传热系数 K 沿程非线性变化越强烈,进出口传热系数比越大。由 $C' = (b \cdot q_w) / (m \cdot C_p)$ 定义可见,影响其大小的变量主要是加热热流密度 q_w 和冷却液流量 m 。如果 C' 较大,导致 K 沿程非线性强化的难度加大,可以通过适当增大流量的方法降低 C' 的值。

4 结论

(1) 本文提出采用液冷流道非线性传热强化的均温液冷板,并从理论上推导了给定液冷板结构参数和运行参数时实现加热壁面温度均匀的条件。

(2) 基于某电池模组散热参数,采用柱状扩展表面分段强化传热方式设计了一种均温板流道结构,并采用 CFD 方法对其流动传热过程进行了数值分析。结果表明,其具有较好的加热壁面均温性能,证明本文提出的均温液冷板是可行的。

(3) 讨论了设计参数对非线性传热系数沿程变化的影响规律,为均温液冷板设计提供理论指导。

参考文献 (References)

- [1] 霍宇涛, 饶中浩, 刘新健, 等. 基于液体介质的电动汽车动力电池热管理研究进展 [J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 135-140.
HUO Yutao, RAO Zhonghao, LIU Xinjian, et al. Research Development of Battery Thermal Management System Based on Liquid Medium [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(2): 135-140. (in Chinese)
- [2] FISHER T S, TORRANCE K E. Optimal Shapes of Fully Embedded Channels for Conjugate Cooling [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2001, 24(4): 555-562.
- [3] FISHER T S, TORRANCE K E. Constrained Optimal Duct Shapes for Conjugate Laminar Forced Convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(1): 113-126.
- [4] JARRETT A, KIM Y I. Design Optimization of Electric Vehicle Battery Cooling Plates for Thermal Performance [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 10359-10368.
- [5] RAO Zhonghao, ZHEN Qian, KUANG Yong, et al. Thermal Performance of Liquid Cooling Based Thermal Management System for Cylindrical Lithium-Ion Battery Module with Variable Contact Surface [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1514-1522.
- [6] SHANG Zhuangzhuang, QI Hongzhong, LIU Xintian, et al. Transfer, 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.
- [7] 李友荣, 吴双应. 传热学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. LI Yourong, WU Shuangying. Heat Transfer [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

作者简介



李隆键 (1966-), 男, 重庆市人。教授, 博士生导师, 主要研究方向为传热传质极其强化、计算流体力学、新能源技术及装置、冶金过程中的关键热物理问题及节能、电力电子设备散热、汽车热管理和动力电池热管理等。

Tel: 023-65111867

E-mail: longjian@cqu.edu.cn