

动力电池蛇形液冷板热管理仿真研究

何梦伟

洛阳理工学院，河南洛阳，中国

【摘要】针对动力电池充放电温升高、模组温度分布不均问题，设计底部贴合式铝合金蛇形液冷散热结构。以单排方形磷酸铁锂电池模组为对象，采用水-乙二醇冷却液，通过 ANSYS 开展 CFD 仿真，对比不同流速、两种流道的散热表现。结果表明，蛇形流道可延长流体换热路径，有效均衡电池温度场，温控效果优于传统直线流道，可为车用电池冷板结构优化提供参考。

【关键词】动力电池；蛇形液冷；热管理；CFD 仿真；温度均匀性

1.引言

新能源汽车快速普及背景下，大功率充放电会造成动力电池热量堆积，高温与温差超标将加速电池衰减，严重时引发热失控^[1]。现有散热方案中，风冷换热能力有限，相变材料成本偏高，间接液冷板因换热效率高、温控稳定成为乘用车主流方案。液冷板流道形式直接决定换热均匀性，直线流道易出现出口热量聚集；蛇形流道可延长流体换热路径、均衡底部散热^[2]。本文搭建单排磷酸铁锂电池模组，设计蛇形铝合金冷板，通过仿真优选冷却液流速，并与直线流道对比散热效果，为电池热管理轻量化结构设计提供依据^[3]。

2.模型描述

2.1 电池模组的建立

本研究选用方形磷酸铁锂电芯，模组采用单排一字等距布置，电芯底面完整贴合液冷板上表面，布局紧凑，拆装与后期维护便捷。冷板选用高导热铝合金一体成型，内部设置多道往复蛇形流道，流道弯折结构延长冷却液流动路径，增大有效换热面积，进出口对称布置，便于整车冷却管路集成安装^[4]。图 1 为电池模组及 5 流道液冷板（n=2）内部流道示意图。5 节动力电池置于液冷板上，其底部与液冷板连接。该底部液冷板是对称蛇形流道液冷板，各参数取值见表 1。

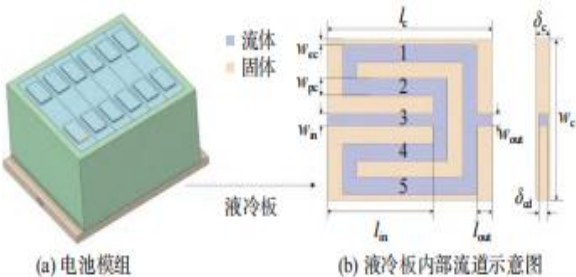


图 1.对称蛇形流道液冷板电池模组示意图

表 1.液冷板中各结构参数

参数	数值
流道宽度	8mm
流道高度	6mm
中心距	10mm
出入口液直径	6mm
冷板材料	铝合金

2.2 数值计算模型

充放电过程中，电池的能量守恒符合方程：

$$\rho_b C_{pb} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} + Q \quad (1)$$

式中：

- ρ_b — 电池的密度，kg/m³；
- C_{pb} — 电池的比热容，J/(kg·K)；
- T_b — 电池温度，K；
- Q — 锂电池产生的热量，J；
- t — 时间，s；

λ_x 、 λ_y 、 λ_z — 电池在 x、y、z 三个方向上的导热系数，W/(m·K)。

冷却液在通道内的流动过程按不可压缩流体受迫流动计算，流动换热的物理过程分别用连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程表示。

连续性方程：

$$\nabla \cdot (\rho_c \vec{v}_c) = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}_c) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}_c \vec{v}_c) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_c \nabla \vec{v}_c) \quad (3)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial (\rho_c C_{pc} T_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c C_{pc} T_c \vec{v}_c) = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) \quad (4)$$

式中：

- ρ_c — 冷却液的密度，kg/m³；
- C_{pc} — 冷却液的比热容，J/(kg·K)；
- $\vec{v}_c$ — 速度矢量，m/s；
- μ_c — 冷却液的动力粘度，Pa·s；

T_c — 冷却液的温度, K;
 k_c — 冷却液的导热系数, W/(m·K);
 P — 冷却液的压力, Pa。

2.3 网格划分

本文通过建立非结构化网格体系对动力电池冷却系统进行建模,在蛇形流道处用局部高精度划分的方法来提高流固耦合环境下的热传递过程仿真准确性和计算效率之间的关系。

本研究取最大网格单元边长为 5 毫米、最小单元边长为 0.5 毫米为初始参数,在多次改进之后得到约 20 万到 30 万个节点的网格体系,这个数量正好满足动力电池领域内液冷散热仿真的高精度需求。

2.4 仿真参数与边界条件

冷却介质为水-乙二醇混合液,物性:密度 1065kg/m³,比热容 3300 J/(kg·K),导热系数 0.39 W/(m·K)。

统一边界:冷却液入口温度 300 K,出口压力 0 Pa,环境初始温度 300 K;设置 0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s 三组流速对比工况,电芯施加均匀体积热源。仿真求解电池固体能量方程、流体连续性、动量与能量守恒方程,设置流固耦合换热边界。

3.结果与讨论

3.1 冷却液流速仿真结果分析

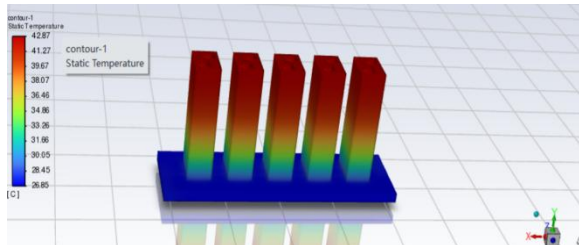


图 2.流速为 0.2m/s 下温度分布图

0.2 m/s 低流速如图 2 所示,流体换热不足,冷板出口形成明显热点,电池最高温度 42.27 °C,超出安全工作区间,散热不达标。

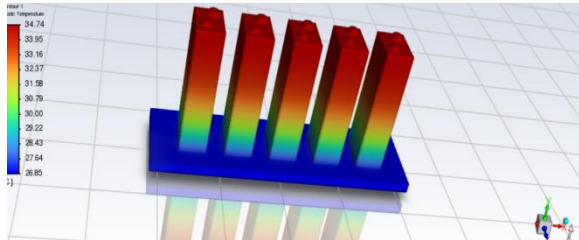


图 3.流速为 0.4m/s 温度分布图

0.4 m/s 中流速如图 3 所示,对流换热强度大幅提升,电池温度区间 26.85~34.74 °C,无集中高温区域,温度梯度平缓,处于电芯适宜工作范围。

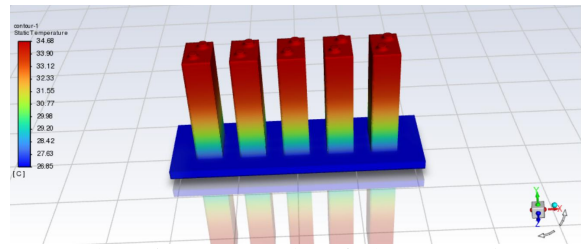


图 4.流速为 0.6 m/s 时动力电池包温度云图

0.6 m/s 高流速如图 4 所示,电池最高温仅小幅降至 34.68 °C,降温效果趋于饱和;同时流体沿程阻力显著上升,水泵能耗增加,经济性较差。

流速变化规律:0.2~0.4 m/s 区间提升流速降温效果显著;流速超过 0.4 m/s 后散热收益微弱、能耗持续上涨,0.4 m/s 为本系统最优冷却液流速。

3.2 不同流道结构对比分析

采用对比实验的方法,对两种流道结构的电池散热能力进行对比分析,主要是从动力电池的最高工作温度以及温差的变化情况两方面展开对比(见表 2)。

表 2.温差对比

流道结构	最高温度/°C	温差/°C
直线流道	37.20	10.20
蛇形流道	34.74	7.89

由表 2 可知,相比传统的直线型流道布置,采用蛇形流道布置可以明显降低动力电池模组的峰值运行温度,减小电池包内各个区域之间的温差。结果证明蛇形流道设计在改善动力电池系统热管理均匀性上比其他设计有明显的技术优势。

这是由于蛇形流道结构设计所造成的,在液冷板中,流动的液体会绕过很多的路径,增大了流道长度,加大了强制对流传热的性能,进而提高了传递效率。

3.3 蛇形液冷板结构优势分析

根据前面仿真实验结果可以看出,蛇形液冷板结构在动力电池热管理上有着很好的应用前景。其技术优势主要表现在以下几个方面:

- 1) 蛇形流道能够增加冷却液流动路径,提高液冷板换热面积;
- 2) 冷却液能够更加均匀地覆盖动力电池底部区域,提高温度均匀性;
- 3) 能够有效降低动力电池最高温度,减少局部热点现象;
- 4) 提高动力电池运行稳定性及安全性;
- 5) 结构相对简单,便于加工制造与工程应用。

蛇形液冷板具有很好的散热效果以及良好的温度场均匀度,被证明是动力电池热管理的重要应用技术之一^[5]。

4.结语

1) 本文设计单排磷酸铁锂电池配套蛇形铝合金液冷散热系统,通过 CFD 仿真明确冷却液流速对电池温升存在边际递减效应,流速过高会造成能耗浪费;

2) 同等工况下蛇形流道相较传统直线流道均温、降温性能更突出,能够有效解决冷板末端热量堆积问题;

3) 该蛇形液冷结构构造简单、加工便捷,可将电池稳定维持在安全适宜工作区间,能够为中小型纯电动汽车电池包热管理结构设计提供仿真参考。

参考文献

- [1] 朱浩冉,盛国超,陈梦,等. 车用锂离子电池散热系统设计与结构优化[J].机械制造与自动化,2026,55
- [2] 常博,朱睿,王晶,等. 锂电池储能液冷热管理技术开发研究[J].东方电气评论,2026,40 (2):81-88
- [3] 章正哲,张恒运,张健胜,等. 方形电池模组对称蛇形流道液冷板热特性研究[J].上海工程技术大学学报,2025,39 (4):471-476.
- [4] 朱俭卓,戴海燕,贺致博,等. 锂离子电池蛇形液冷板热性能分析[J].汽车零部件,2025, (12):3-6.
- [5] 陈瑶,詹森,黄文姣,等. 锂离子电池液冷散热通道拓扑优化设计研究[J].汽车工程学报,2025,15 (4):567-577.