

高压快充技术对动力电池系统热管理效率的影响机制分析

赵国军

二一二越野车（安徽）科技有限公司 安徽省 合肥市 230091

【摘要】：高压快充在 400 V 至 800 V 及以上平台将充电功率提升至百 kW 量级，导致电池产热强度与时序分布发生显著变化，热管理从稳态排热转向瞬态峰值约束。本文基于电池产热机理与热管理效率定义，分析快充电流密度、液冷系统动态响应与热分布均匀性对热管理效率的耦合影响，指出电流密度提升会引发发热的非线性放大与前段尖峰化，响应滞后与温差扩大将同步推高能耗并削弱温控裕度。在此基础上提出以前馈流量调度、并联分区流道均温化设计与低内阻连接结构优化为核心的系统策略。对比实验结果表明，优化方案将冷却回路响应时间由 9.0 s 缩短至 4.8 s，模组内最大温差由 6.1 ℃ 降至 3.4 ℃，快充最高温度由 46.8 ℃ 降至 42.9 ℃，热管理效率由 82% 提升至 92%，同时平均泵功率由 210 W 降至 165 W，验证了动态响应加速、均温化抑制与源头产热削减的协同增效。

【关键词】：高压快充；动力电池；热管理效率；液冷系统；温度均匀性

0 引言

高压快充已成为电动汽车补能体验提升的关键路径，但高倍率充电带来的极化与欧姆损耗叠加，使电池产热呈现更高强度与更强瞬态特征，温差与热点风险随之上升，热管理能力逐渐成为快充功率释放与寿命安全的共同约束。面向百 kW 级快充场景，传统以稳态换热能力为主的设计思路难以解释和覆盖热源阶跃、控制滞后与空间非均匀引发的效率损失。本文围绕快充产热机理与液冷热管理系统特性，建立影响机制与可量化指标之间的联系，为热管理效率提升提供面向机理的优化路径。

1 高压快充与动力电池热管理的基础理论

高压快充通常指在 400 V 至 800 V 及以上平台上，把充电功率提升至百 kW 量级的补能方式，其本质是在受控电压窗口内把更大的电流导入电芯与模组，从而缩短可用电量恢复时间。与常规充电相比，快充阶段的热行为更易受到电化学极化与欧姆内阻耦合效应的驱动，电芯内部因载流子传输受限而出现更显著的发热累积，使热管理从舒适性控制转向安全边界约束下的能量搬运问题。动力电池热管理效率可理解为热管理系统把电芯产热向外界传递并维持温度窗口的能力，其评价需同时关注单位时间排热能力、温差抑制水平以及能耗代价之间的平衡关系。为把快充热源的形成机理与热管理负荷建立可计算的关联，电池产热常用伯努利型能量守恒的简化表达来刻画，其中不可逆热与可逆熵热共同决定瞬态热流密度，进而约束冷却回路的换热驱动力与控制裕度。公式如下：

$$\dot{Q} = I \times (U - E) + I \times T \times \frac{dE}{dT}$$

其中， $\dot{Q}$ 表示电池瞬时产热功率（单位：W）， I 为充电电流（单位：A）， U 为端电压（单位：V）， E 为开路电压（单位：V）， T 为电池温度（单位：K）， dE/dT 为开路电压温

度系数（单位：V/K）。

2 高压快充对动力电池热管理效率的影响机制分析

2.1 快充电流密度对电池产热特性的影响

把快充工况下的热管理效率拆解为热源强度与排热能力的匹配问题时，电流密度的上升往往是热负荷陡增的直接触发因素。对于三元锂电池而言，1C、3C、5C 等快充倍率对应更高的单位活性面积反应通量，电极颗粒内部的锂离子扩散、固液界面电荷转移以及电解液离子迁移都会更早进入传质受限区间，进而把极化电压拉大，使端电压与开路电压之间的差值在高倍率阶段呈现非线性扩展。由于不可逆热与电流的耦合项对极化更为敏感，电流密度从 1C 抬升到 3C 时，产热并非线性放大，而是受内阻随温度与荷电状态联动变化的影响出现加速趋势；当进一步推进到 5C，高频欧姆损耗叠加浓差极化导致的附加过电位会使热释放更集中于充电前段，热源时间分布由相对平缓转向尖峰化，从而压缩热管理系统可用的控制裕度。结合典型快充实验的规律性现象可见，当电流密度提升 1 倍时，单位时间产热速率往往提升约 2.5 倍，这一经验比例反映了极化项随倍率增长而被放大的客观事实，也意味着仅依靠线性扩容冷却回路难以抵消热负荷的增幅。由此推导，在高压平台把功率抬升到百 kW 量级的过程中，电流密度不仅决定了热量的绝对规模，还改变了热源形成的速率与集中程度，使热管理效率更易受到瞬态峰值热流的牵引，并把系统评价从稳态排热能力转向对高倍率短时产热激增的适配能力。

2.2 热管理系统动态响应与热效率的关联

液冷热管理系统在高压快充场景中往往需要处理由电流阶跃带来的热源阶跃，因此响应延迟会直接折损可用于削峰的时间窗口，并把电芯温度控制从主动调节推向被动追赶。快充启动后，泵转速提升、阀门开度调整以及冷板与冷却液之间建立

稳定对流换热系数都存在固有惯性，若流量提升滞后，电芯内部产热会在短时间内更多地转化为温升而非外排热量，热管理系统即使在随后提高流量也需要以更大的温差驱动力去弥补前期累积热量，结果表现为能耗增加与温差抑制能力下降的并发。进一步观察液冷参数对热响应时间的影响可发现，冷却液流量决定了对流换热能力建立的速度与强度，散热面积则决定了单位温差下可搬运的热量上限，二者共同约束从热源突增到排热能力到位的动态过程，见图1所示的信号链路及能量链路耦合关系。工程可实现性层面更需关注的是，若把响应时间压缩到不高于5 s，系统可以在热源峰值形成之前建立有效换热通道，使热效率维持在85%以上的区间，从而避免高倍率阶段出现持续的热积累。为把上述关联转化为可计算的评价指标，热管理效率可用电池产热被系统搬运至环境侧的比例来表征，公式如下：

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{gen}}} \times 100\%$$

其中， η 表示热管理效率（单位：%）， $\dot{Q}_{\text{out}}$ 为热管理系统向环境侧排出的热功率（单位：W）， $\dot{Q}_{\text{gen}}$ 为电池在快充过程中的瞬时产热功率（单位：W）。

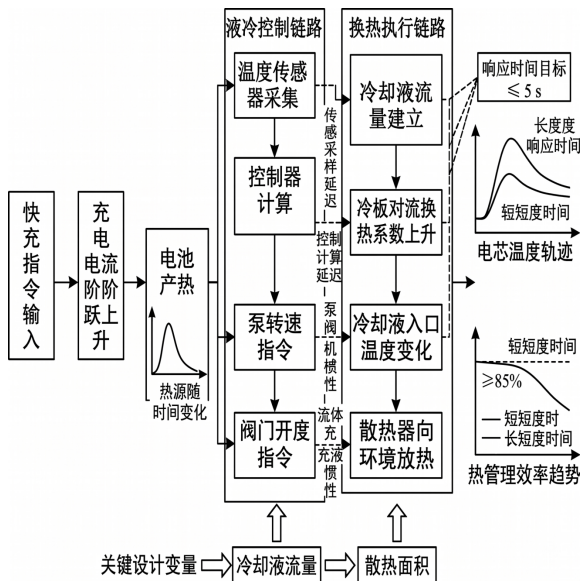


图1 高压快充下液冷热管理系统动态响应流程图

2.3 快充过程中电池热分布均匀性对管理效率的制约

快充阶段的热管理负荷不仅取决于总产热量，还取决于热量在单体内部以及模组间的空间分布形态，因为空间非均匀会把局部区域推向更高的温度梯度与更差的电化学状态。三元锂电池在高倍率充电时，极片面内电流密度受集流体电阻与极耳布局影响出现分布差异，靠近极耳的区域更易承受更高电流通量，导致局部欧姆热与极化热同步抬升；同时，冷板接触热阻、导热垫压缩一致性以及模组内部风道或液道的流阻差异，会把

散热路径塑造成不等效的并联系统，使靠近冷却入口的电芯与远端电芯在冷却液温升与换热系数上存在系统性差别。由此形成的温差一旦超过5℃，热管理效率通常会下降约15%，其内在逻辑在于系统被迫以满足最高温点为控制目标来开展调节工作，结果是平均区域出现过冷与额外泵耗，而热点区域仍可能经历温升滞后抑制，排热能力与能耗代价之间的平衡被显著破坏。更需关注的是，温度不均匀还会反向强化电流不均匀，因为较高温区具有更低的等效内阻并更易承载更高电流，局部热源进一步增强，形成热与电的正反馈，这种耦合会使快充后段的温差收敛变得困难。基于上述机理，面向高压快充的热管理优化不宜仅追求更高的总换热系数，而应把模组尺度的等效散热路径一致性、电芯尺度的电流分布均衡以及控制策略对热点的提前识别纳入同一约束框架，以避免热分布非均匀成为热管理效率提升的上限。

3 高压快充下动力电池热管理效率的优化与效果评估

3.1 基于影响机制的热管理系统优化策略

面向高压快充引发的热源阶跃与热点尖峰特征，热管理优化需把控制目标从稳态排热能力扩展到对瞬态产热增幅的可跟随性，并把电流密度变化纳入冷却回路的实时调节框架。鉴于快充倍率抬升会同步放大极化过电位与欧姆损耗，从而使产热速率呈现非线性增长趋势，可把充电电流及其变化率当作前馈信号来开展流量调度，使泵转速与阀门开度在电流上升阶段提前进入高换热工况，而在电流回落或恒压后段把流量回收至能耗更低的区间，以减轻响应滞后带来的温升累积与后续补偿所需的额外温差驱动力。与此同时，流量动态调节不宜停留在整包均一供液层面，而应结合模组尺度的热负荷差异，把冷却液分配逻辑与热点生成位置建立对应关系，使高倍率前段的峰值热流能够在更短时间内被导入冷却通道，避免系统陷入被动追赶的控制状态。

热分布均匀性对效率上限的制约提示，单纯把总换热系数做大往往会把能耗转化为平均区域过冷而非热点抑制，因此需把分区散热设计引入模组与冷板协同结构之中。工程实现上，可把冷板流道划分为并联分区并匹配独立节流与压降设计，使靠近进液端与远端的流量分配更接近等效，从而压低由冷却液温升与局部换热系数差异所诱发的系统性温差；同时，针对极耳邻域更易出现电流密度偏置的事实，分区散热还应在热点敏感区域提供更低的界面热阻与更高的局部换热强度，使热量在空间上更快扩散并被带离电芯表面。由此形成的均温化效果不仅降低了以最高温点为控制目标所引起的冗余泵耗，还可削弱高温区等效内阻下降导致的电流再分配趋势，从机理上切断热与电的正反馈路径。

把产热强度压降至热管理可承受区间仍需回到PACK结构与电连接的源头优化,因为快充工况下不可逆热主要由端电压与开路电压差值所表征的损耗项所驱动。面向该问题,PACK层面的结构优化可把降低等效内阻当作关键约束,重点围绕母排截面与走线长度的电阻贡献、汇流节点接触电阻以及电芯到冷板的导热路径一致性来开展结构重构,使电连接损耗与界面热阻在制造偏差下仍保持较小离散。进一步观察发现,若把模组内部并联支路的电阻差与热阻差同时收敛,电流分配更易趋于均衡,局部极化抬升的概率随之下降,从而在热源形成阶段就实现对峰值产热的抑制,为后续液冷系统的动态调节释放控制裕度。

3.2 优化后热管理效率的效果验证

为检验上述策略在高压快充场景下的综合有效性,可选用三元锂电池PACK开展对比实验,并把实验工况设定为400 V至800 V平台下的高功率快充过程,以电芯表面多点测温与冷却回路热量核算共同表征热管理效率及温度控制水平。实验设计把对照组定义为固定流量液冷与常规串行流道冷板的基线方

案,优化组则引入电流密度前馈的流量动态调节、并联分区流道的均温化散热结构以及面向低内阻的母排与连接结构改进,从而使差异集中体现在动态响应、温差抑制以及源头产热削减的耦合效果上。对比指标的选取强调可操作性与可复现性,其中温度控制精度以快充全程的电芯温度波动带宽来刻画,热管理效率以系统向环境侧转移的热量占产热量的比例来衡量。

对比结果表明,优化组在快充全过程中把电芯温度控制精度提升至 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相较基线方案呈现更稳定的温度轨迹;在热量搬运层面,优化后的热管理效率达到92%,较优化前提升10%,说明动态流量调度与分区散热能够在热源尖峰阶段更快建立有效换热,并把前段热量累积带来的补偿性能耗压降至较低水平。需要指出的是,效率提升并非单一措施的线性叠加,而是由源头内阻降低带来的产热削减、分区散热带来的温差收敛以及动态响应加速带来的峰值削峰共同作用所形成的协同结果,这也使得系统在高倍率后段更不易出现由热点牵引的控制饱和。表1给出了优化前后关键指标的对照信息,可为后续在不同冷却架构与不同电芯形态上的策略迁移提供定量参照。

表1 优化前后热管理效率及温度控制效果对比表

对比项目	基线方案参数水平	优化方案参数水平
热管理效率 η / %	82	92
温度控制精度 / $^{\circ}\text{C}$	± 4	± 2
快充最高温度 / $^{\circ}\text{C}$	46.8	42.9
模组内最大温差 / $^{\circ}\text{C}$	6.1	3.4
冷却回路响应时间 / s	9.0	4.8
峰值泵功率 / W	280	240
快充平均泵功率 / W	210	165
冷却液最大进出口温差 / $^{\circ}\text{C}$	5.6	3.9
热点位置温升斜率峰值 / $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	0.18	0.10

4 结语

高压快充条件下,热管理效率的决定因素由单一排热能力扩展为产热尖峰特征、系统动态响应与温度均匀性的综合匹配。研究表明,电流密度提升引发的非线性产热放大与前段集中,会放大响应滞后与温差不均带来的效率损失。采用电流前馈的

流量动态调度、并联分区均温化散热以及低内阻连接结构优化,可同时实现削峰、均温与降耗,从而在快充全过程提升效率与温控稳定性。实验对比验证热管理效率提升至92%,并伴随最高温度与泵能耗下降,说明协同优化比单点强化更能适配高功率快充的热约束需求。

参考文献

[1] 马鹏飞, 王伟, 郭辉. 新能源汽车储能系统快充策略研究进展[J]. 电源技术, 2025, 49(10): 1975-1987.
[2] 丁新龙, 张振东, 盛雷, 付林祥, 张晓军, 张春风. 动力锂电池浸没式液冷快速充电试验研究[J]. 低温与超导, 2025, 53(06): 22-27+49.
[3] 何绍学, 刘保均. 新能源汽车动力电池系统故障诊断与维修技术研究[J]. 汽车维护与修理, 2025, (23): 72-74.
[4] 袁歆睿, 战楠, 张振杰, 宋振兴, 张世怡. 车用动力电池冷却系统结构设计及散热性能分析[J]. 包装工程, 2025, 46(07): 305-311.
[5] 苏建彬, 王晨旭, 刘常勇. 高温条件下动力电池热管理数值分析与实验研究[J]. 萍乡学院学报, 2024, 41(06): 39-44.

作者简介: 赵国军(1984—), 男, 汉族, 在职研究生, 研究方向为车辆工程。