

引用格式:陈慧敏,李香龙,刘秀兰,等.大功率充电连接器相变冷却换热特性研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):201-207.

Citation: CHEN Huimin, LI Xianglong, LIU Xiulan, et al. Study of phase change cooling heat transfer characteristics of high power charging connectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 201-207.

# 大功率充电连接器相变冷却换热特性研究

陈慧敏<sup>1</sup>, 李香龙<sup>1</sup>, 刘秀兰<sup>1</sup>, 高曙光<sup>2</sup>, 屈治国<sup>2</sup>, 牛春林<sup>3</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 西安交通大学能源动力与科学学院, 陕西 西安 710049;

3. 佛山市云蝠新能源科技有限公司, 广东 佛山 528311)

**摘要:** 直流大功率快充技术可显著缩短电动汽车充电时间, 缓解充电焦虑, 然而在高电压、大电流下, 充电连接器的温度短时间内急剧上升, 将降低连接器使用寿命且易引发安全问题。为此, 提出一种适用于大功率充电连接器的高效相变冷却技术, 分别对单相和相变冷却性能进行数值建模分析, 研究了冷却液种类、流量、套管厚度等参数对冷却性能的影响规律。结果表明, 充电时长为 5 min, 加载电流为 600 A 时, 采用 40 °C 水单相冷却可将电缆温度降低至 69 °C, 而采用 R134a 两相相变冷却则可将电缆温度降低至 40 °C 以下。电缆温度随两相冷却液流量增加而降低, 随套管厚度增加而增加, 套管厚度相较冷却液流量对电缆温度的影响更为显著。

**关键词:** 电动汽车充电电缆; 大功率快充; 两相冷却; 换热特性

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.020 **中图分类号:** U469.6; TM910 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0201-07

## Study of phase change cooling heat transfer characteristics of high power charging connectors

CHEN Huimin<sup>1</sup>, LI Xianglong<sup>1</sup>, LIU Xiulan<sup>1</sup>, GAO Shuguang<sup>2</sup>, QU Zhiguo<sup>2</sup>, NIU Chunlin<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100045, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Foshan Yunshang New Energy Technology Co., Ltd., Foshan 528311, China)

**Abstract:** Direct current-based high-power charging (DC-HPC) technology can significantly reduce the charging time of electric vehicles and therefore alleviates concerns about charging duration. However, the rapid temperature increase of charging connectors under high voltage and current poses a challenge, impacting their lifespan and safety. This paper proposes a phase change cooling technology for the high-power super-charging connectors. Through a comparative numerical analysis of the single-phase and phase change cooling performance, the influence of coolant type, flow rate and casing thickness on the thermal behavior of the charging cable with active cooling are investigated. The results indicate that the cable temperature can be reduced to 69 °C when using 40 °C water as single-phase coolant at a 5 min charging time and a 600 A loading current. In contrast, the two-phase cooling coolant can further decrease the cable temperature to below 40 °C. The charging cable temperature exhibits a decrease with increasing two-phase coolant flow and an increase with rising coolant sleeve thickness. The coolant sleeve thickness has a more significant effect on cable temperature than the coolant flow rate.

**Key words:** EV charging cable; high-power charging; two-phase cooling; heat transfer characteristics

在“双碳”目标的引领下, 汽车电气化势在必行。纯电动汽车具有零排放、高效率的特点, 因此

被各个国家广泛推广, 并出台了一系列补贴政策。但是当前汽车市场内燃机销量仍然占据主要地位,

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2023-02-16

基金项目: 国网北京市电力公司科技项目 (SGBJDK00NYJS2250202); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (51721004)

通信作者: 屈治国 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事高效传热传质技术、电化学储能技术等研究; E-mail: zgqu@mail.xjtu.edu.cn

这与电动车存在续航时间短、充电时间长、电站覆盖密度不足等局限性有很大关系。为了解决用户的充电焦虑,应开发大功率充电技术,使电动汽车单位充能时间内续航里程接近内燃机<sup>[1-7]</sup>。

当前广泛应用的快充充电桩功率多为 50 kW,充满约需 2 h。为减少充电时间,各企业均聚焦于超级快充技术。2017年,保时捷率先推出 350 kW 的快充桩<sup>[8]</sup>;2019年,特斯拉 V3 充电桩采用快充技术使功率达到 250 kW<sup>[9]</sup>;2022年,小鹏汽车推出了 S4 超充桩,支持 800 V 直流充电,单桩最大电流为 670 A,峰值充电功率为 400 kW<sup>[10]</sup>。

大功率充电的本质是更大电流、更高电压。随着电流增大,各个充电器件会产生更多焦耳热,热量积累会导致温度上升,加速电缆绝缘老化。因此,有效的散热技术是提高充电功率的关键之一。电缆降温思路有 2 个:一是基于电阻定律,提高铜线截面积,缩短电缆长度,但有可能降低用户体验;二是采取散热技术。大功率充电往往需要采取主动冷却方式。较为常见的冷却方式有空冷、水冷、油冷等。福特提出了一种充电策略<sup>[11]</sup>,通过调节充电功率来优化电缆温升。保时捷引入了采用液冷的大功率充电设计<sup>[12-13]</sup>,通过对电缆与充电插头端子的电触点进行散热,可有效实现对电缆及插针的温度控制,充电桩电流可达 500 A,充电功率可达 500 kW。特斯拉报道了液冷电缆技术<sup>[14]</sup>,该技术可以提高电缆载流量,减轻充电设备重量。液冷散热方案大多以降低电缆绝缘层温度为目的,保时捷提出了针对铜线的直接式主动散热技术<sup>[15]</sup>,将导体直接置于冷却通道中,大大降低了热阻。但是,单相冷却对流换热系数低,对于高热流密度情况其散热能力不足。当采用两相工质时,只要处于两相状态,则工质温度不变,且在温差较小的情况下依然可以达到极高的吸热强度(临界热流密度可达  $1.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  以上)<sup>[16]</sup>,因此针对大功率充电连接器的热管理问题可以采用更高效的两相冷却方式。

本文以电动汽车大功率充电连接器为研究对象,构建高效的两相冷却系统,对充电电缆在快充过程中的产热特性与系统两相冷却效果进行数值分析。

## 1 物理与数学模型

### 1.1 物理模型

大功率充电连接器部件主要包含枪头与枪线,枪线部分采用“铜包水”的中心冷却方式,充电枪头

内部采用换热块非接触式冷却。图 1 为充电连接器示意图。当制冷液开始循环时,冷却液先后流过包裹着铜线的套管和通过绝缘体与插针连接的换热块,带走热量,再经由另一条套管流出。当采用单相冷却液时,铜导体产生的大部分热量通过套管传递到冷却液中,另一部分则向护套处扩散,通过空气发生自然对流换热。与单相冷却液对流传热相比,两相冷却液的流动沸腾换热过程发生了相变,除对流换热外,气液相变的潜热交换吸收了大量热量。

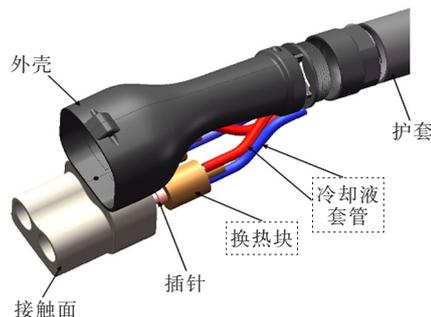


图 1 液冷充电连接器示意图

Figure 1 Diagram of liquid-cooled charging connector

本文研究的大功率充电电缆为多层材料包裹的直流电缆。常见电缆结构中,铠装层、电缆屏蔽等结构较薄,热阻较小,从传热学角度考虑对温度场分布影响较小,为减少计算量,忽略了铠装层、内护套、屏蔽层、通讯线等结构,简化结构如图 2 所示。套管隔绝了冷却通道与导体,起绝缘与运输冷却液作用;导体用于传输电能,由多股铜导线绞合制成;绝缘层的作用是使导线与填充层相隔绝;护套则是起防止侵蚀与提高机械强度的作用。图 2(a)为横截面示意图,图 2(b)展示了电缆的水平剖面,以及各部件尺寸,电缆长度为 5 m。

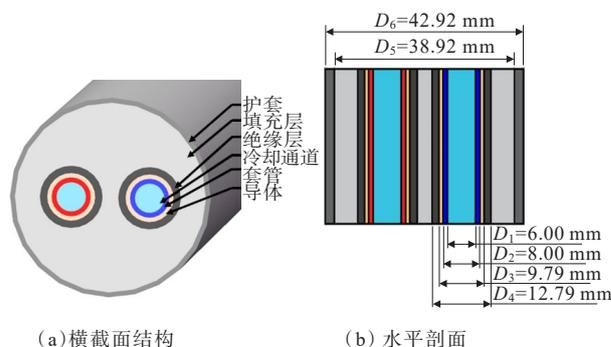


图 2 充电电缆结构

Figure 2 Charging cable structure

线缆的物理参数如表 1 所示。考虑到本文研究范围内固体材料物性变化不大,故假设固体物性为

常物性。

表 1 充电线缆的结构与物理参数

Table 1 Structure and physical parameters of the charging cable

部件名称	材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	比热/ (J/kg·K)	导热系数/ (W/m·K)
套管	聚氯乙烯	1 450	1 005	1.5
铜导体	铜	8 933	486	486
绝缘层	三元乙丙橡胶	870	2 200	0.3
填充层	聚丙烯	910	1 900	0.191
护套	聚氯乙烯	1 450	1 005	1.5

研究过程中对模型作如下假设:流体气液两相均为不可压缩、常物性流体;两相工质物性参数基于饱和温度下参数取定值;流动状态为湍流;流体在壁面无滑移。

## 1.2 数学模型

电缆模型属于长管模型,仿真中采用了 Realizable  $k-\epsilon$  模型,该模型较标准  $k-\epsilon$  模型精度更高,且考虑强流线弯曲、漩涡和旋转现象,故选用此模型。单相流动采用基础的连续性方程、动量方程和能量方程,故不再赘述。通过计算雷诺数来确定湍流模型选用层流模型还是湍流模型。

相变模型采用了 Mixture 模型,将液相设置为主项,气相设置为次项,基本守恒方程如下。

1) 连续性方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中,  $\rho_m$  为混合密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mathbf{v}_m$  为质量平均速度, m/s;  $\dot{m}$  为质量源的质量递质;  $t$  为时间, s。

2) 动量方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} - \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \quad (2)$$

式中,  $n$  为相数;  $\mu_m$  为混合黏度, Pa·s;  $\mathbf{F}$  为体积力矢量, N/m<sup>3</sup>;  $\alpha_k$  和  $\rho_k$  为第  $k$  相的体积分数和密度;  $\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m$ , 为第  $k$  相的漂移速度, m/s;  $\mathbf{g}$  为重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>。

3) 能量方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\rho_k \alpha_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_m \mathbf{v}_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中,  $E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{\mathbf{v}_k^2}{2}$ ;  $k_{eff}$  为有效热传导系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $S_E$  为能量源项。

能量源项  $S_E$  公式为

$$S_E = -h_{lv} \dot{m} \quad (4)$$

式中,  $h_{lv}$  为汽化潜热, J/kg。

气液相变模型采用 Lee 模型, 质量源项公式为

$$\begin{cases} m_{lv} = c_{coeff} \cdot \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}}, & T \geq T_{sat} \\ m_{vl} = c_{coeff} \cdot \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat} - T_v)}{T_{sat}}, & T < T_{sat} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $T_{sat}$  为两相工质饱和温度;  $T_l$ 、 $T_v$  分别为管内液相和气相的平均温度;  $\rho_l$ 、 $\rho_v$  分别为液相和气相的密度;  $\alpha_l$ 、 $\alpha_v$  分别为液相和气相的体积分;  $c_{coeff}$  为传质因子, 取值范围为 0.1~10<sup>7</sup>。参考文献[17], 传质因子越大, 计算准确度越高, 但其过高会引起数值求解发散。结合前期验证, 本文传质因子取 2 000。

## 2 数值方法

### 2.1 网格划分

在 Solidworks 2021 中建立三维充电线缆模型, 再导入 ICFM CFD 软件进行网格划分, 在流道内进行网格加密处理, 设定第一层网格高度为 0.01 mm, 相邻网格增长率设为 1.2, 划分出的网格如图 3 所示。

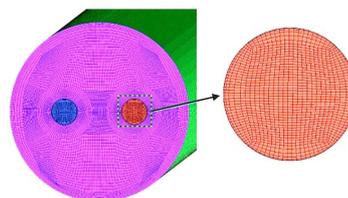


图 3 网格示意图

Figure 3 Grid partitioning diagram

### 2.2 边界条件与初始条件

本文设定的边界条件如表 2 所示。工质入口为速度入口, 入口温度为饱和温度, 流速设定为 0.5 m/s (当采用两相工质时设置入口干度为 0); 出口边界设置为压力出口边界; 流道壁面设置为无滑移标准壁面, 采用流固耦合; 设置铜导体为体热源; 设备表面的自然气流温度为 40 °C, 自然对流冷却的壁面对流换热系数为 5 W/(m<sup>2</sup>·K); 线缆进出口截面设置为绝热。线缆固体部分初始温度设置为 40 °C。

本文采用的工质为 R134a, 查表知 0.5 MPa 下饱和温度  $T_{sat}$  为 288.88 K, 汽化潜热为 185.97 kJ/kg。

表2 边界条件

Table 2 Boundary conditions

对象	边界条件
入口	速度入口, $v=0.5$ m/s
出口	压力出口, $P=0$ Pa
壁面	绝热壁面
电缆进出口截面	自然对流冷却的壁面

此外,导体发热量也可基于欧姆定律公式求得,即

$$W_0 = I^2(R_b + R_j) = I^2 \rho \frac{l}{s} \quad (6)$$

式中,  $R_b$ 、 $R_j$  分别为导体的体电阻与接触电阻, 本文不考虑接触电阻; 40 °C 时铜导体的电阻率  $\rho$  为  $1.92 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ; 电流  $I$  设定为 600 A, 导体截面为  $25 \text{ mm}^2$ ;  $l$  为导体长度, m;  $s$  为导体截面积,  $m^2$ 。

在完成边界条件与初始条件的定义后, 只需要设置求解方法、松弛因子与瞬态求解步长。求解器设置为 Simple 算法, 体积分数选择 Quick 算法, 动量与能量方程设置为二阶迎风格式, 收敛残差为默认设置。在计算初始时, 采用 Fluent 默认的亚松弛因子, 之后可适当降低个别松弛因子, 以提高对应物理量稳定性。时间步长设置为 0.001 s。

### 3 结果与分析

冷却液应当具备导热性强、低冰点、抗腐蚀、不燃、不爆等特点。此外, 单相与两相工质换热效果也有很大区别。以下探究一些常见冷却液对超充线缆的冷却效果。

一些常用单相制冷剂在 40 °C 下的物理参数<sup>[17]</sup>如表 3 所示。相较 R22、R290、R32、R410A 等常见两相制冷剂, R134a 有环保、安全等特点, 故选取其作为本文两相制冷剂。

表 4 所示为 0.5 MPa 下 R134a 的物性参数, 图 4 为环境温度为 40 °C 时, 自然对流冷却与通入不同类型单相冷却液对接入 600 A 电流的充电线缆最高温度影响的对比。当不采用主动冷却方式时, 导体直径为 10 mm 的充电线缆温度在 5 min 内剧增至约 250 °C, 这会带来巨大的安全隐患, 因此需要采取强制对流冷却。充电线缆被冷却时, 充电线缆温度在 5 min 内显现出先快速上升后逐渐平缓至稳态的趋势。当 40 °C 的单相冷却液通入时, 充电线缆均可被冷却至 120 °C 以下。其中冷却性能最好的是水, 其次是 50% 乙二醇溶液与硅油, 最差的是导热油

320#, 最高温度相差约 50.6 °C (本文中默认冷却液流速为 0.5 m/s)。

表3 常见单相制冷剂 40 °C 时物性

Table 3 Physical properties of common single-phase coolants at 40 °C

工质	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	比热/ ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )	热导率/ ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )	动力黏度/ ( $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ )
水	992.21	4 200	0.610	656
50% 乙二醇水溶液	1 063.66	3 358	0.430	2 260
导热油#320	853.00	2 407	0.466	4 350
硅油	960.00	1 500	0.150	4 800

表4 R134a 的物性参数

Table 4 Physical properties of R134a

状态	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	比热/ ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )	热导率/ ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )	动力黏度/ ( $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	表面张 力/ ( $\text{N}/\text{m}$ )	汽化潜热/ ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	沸点(0.5 MPa)/ °C
液态	1 240.800	1 389.40	0.085 1	218.65	0.007 8	185.97	15.73
气态	24.317	976.12	0.012 9	11.32			

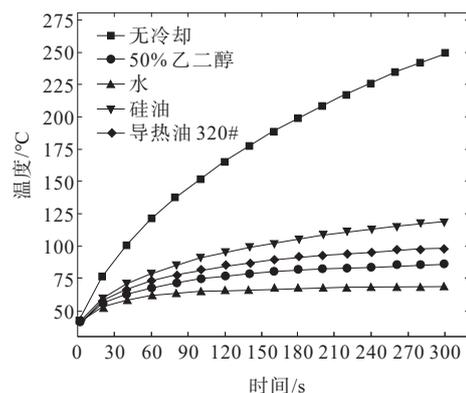


图4 入口温度 40 °C 时不同种类冷却液效果对比

Figure 4 Comparison of the effects of different coolants at an inlet temperature of 40 °C

环境温度为 40 °C、流体入口温度为 15.73 °C (即 R134a 饱和温度) 时不同冷却液对充电线缆最高温度的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 在该入口温度下冷却液的种类对冷却性能影响较大。采用硅油为冷却液时电缆最高温度可达 106.6 °C, 其次的导热油 320#、乙二醇溶液、水分别为 80.0、66.6、47.9 °C, 采用两相制冷剂 R134a 时最高温度则约为 40 °C, 且仅在最初的 40 s 内有略微温升。硅油作为冷却剂, 入口温度为 15.73 °C 和 40 °C 时, 导热性能均最差。这是由于硅油导热系数较小, 运动黏度较大, 在管内流动状态为层流, 因此对流换热系数较小; 硅油的比热也更小, 吸热能力更差, 故电缆温升

较其他制冷液更快<sup>[18-19]</sup>。降低入口温度后单相制冷液冷却效果有了显著提升,但是低于环境温度的入口温度需要添加额外设备,相比直接采用相变冷却降低了效率。此外,区别于单相冷却液温度随流动距离升高,相变制冷剂的液相一直保持在相变温度,因此导体沿程温升低于单相制冷剂。

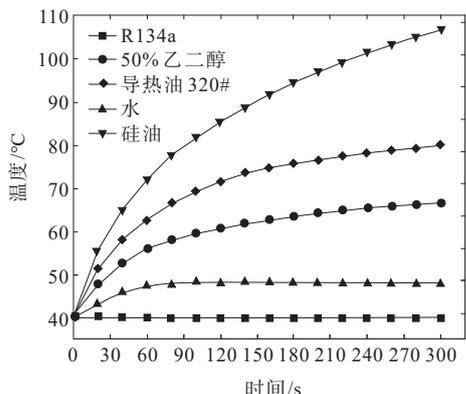


图 5 入口温度 15.73 °C 时不同种类冷却液效果对比

Figure 5 Comparison of the effects of different coolants at an inlet temperature of 15.73 °C

当采用 R134a 作工质时,不同时间的出口截面气相分布如图 6 所示。可以看出,在近壁面处气相分布出现明显的分层现象,且上层含气率高于下层;随时间增加,气相不断在光滑管上部积累。从传热学角度出发,更多气相将带来更大热阻,造成局部吸热能力下降,进而导致套管壁面温度分布不均。因此可以考虑采用强化换热手段优化流道结构,从而使得气液两相更加均匀,如采用微肋管等,但同时也应当考虑实际生产的成本与难度。

上述不同工况下电缆轴向 0.4 m 处固体截面的温度云图如图 7 所示,依次为无冷却、40 °C 水冷却、15.73 °C 水冷却与采用 R134a 冷却的工况。选用该轴向位置是因为考虑到在这一位置冷却液入口效应已消失,冷却液侧对流换热系数不再有明显变化。整体来看,随着工质吸热能力增强,电缆固体部分温度越低,温度梯度越集中于冷却通道附近。在本文讨论的工况中,不论是否采取强制冷却,5 min 内电缆表皮基本能保持在 40 °C 左右。工质吸热能力也对固体区热量流向有影响。无冷却时热量由导体向护套传输,再由空气通过自然对流带走;采取 40 °C 水冷却时,热量分别向冷却液与空气传输;采取 15.73 °C 的水或 R134a 时,热量主要流向冷却液,原本与环境温度一致的护套、填充层与绝缘层甚至出现温度下降的现象。虽然铜导体是热源,但是它具有

良好的导热性能,因此当热量被冷却液带走时,铜导体也可以起传导绝缘层、填充层等热量的作用。

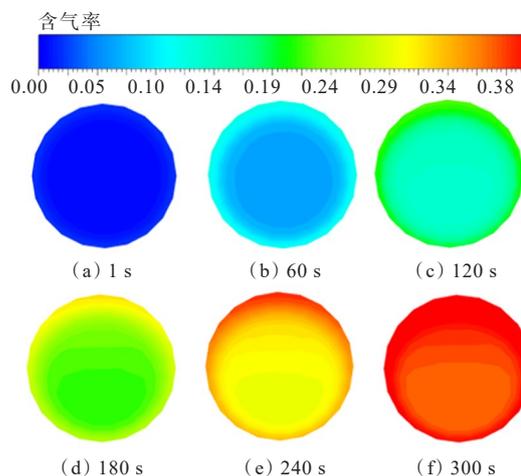


图 6 出口截面气相分布

Figure 6 Gas phase distribution at outlet section

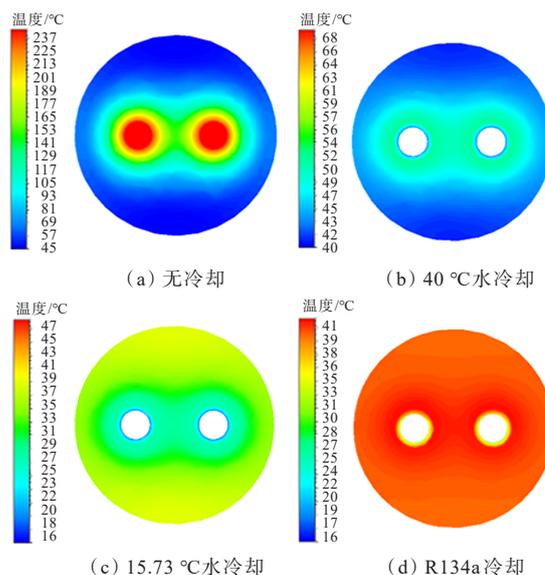


图 7 入口轴向 0.4 m 处温度云图(不同冷却液)

Figure 7 Temperature contour maps at axial position 0.4 m (different coolants)

冷却液的流速对换热效果有明显影响。流速越大,换热系数越大,但是同时会增大压力降和泵功,因此应当探究适宜的流速范围。环境温度是 40 °C、制冷剂为 R134a 时,采用不同入口流速对充电电缆最高温度的影响如图 8 所示。由图 8 可知,提高流速时两相制冷剂的冷却效果并没有明显提升,当流速为 3.0 m/s 时,线缆被冷却至 30.65 °C 以下。而理想的电缆温度为 50 °C 以下,因此出于制冷效果与节能的考量不宜采用。而 0.5 m/s 的流速对于常见的循环泵来说属于正常工作范围,因此可以采用。

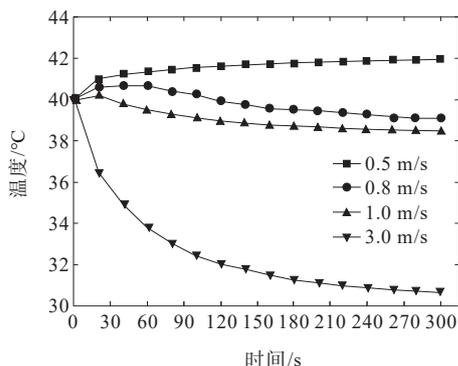


图8 不同流速冷却效果对比

Figure 8 Comparison of cooling effects at different flow rates

本文选用的工质R134a为导电介质,需在工质与导体间添加一定厚度绝缘层。参考GB/T 13527.1—92规定,聚氯乙烯软管内径6 mm时,公称壁厚1 mm,使用压力0.25 MPa。本文工质的饱和压力为0.5 MPa,考虑强度、磨损率和渗透问题,需讨论套管厚度对导体换热效果影响。环境温度40 °C时充电电缆套管厚度变化对冷却效果的影响如图9所示。绝缘材料往往也有较好的绝热性能,因此套管厚度对电缆最高温度的影响是显著的。当采用的套管厚度为1、2、3 mm时,电缆最高温度分别达到了39.99、44.55、49.37 °C。套管厚度为3 mm时,温度已经接近50 °C,且接近稳态时温度出现先略微上升后下降的趋势,说明套管处较大的热阻减慢了导体的温度响应。

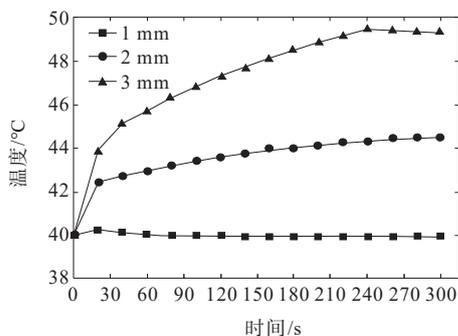


图9 不同套管厚度冷却效果对比

Figure 9 Comparison of cooling effects of different coolant sleeve thicknesses

不同工况下电缆轴向截面温度云图如图10所示,分别为套管厚度1 mm,流速为0.8、1.0、2.0 m/s时,以及流速0.5 m/s,厚度为1、2、3 mm时的工况。总体来说,上述工况下护套温度均低于50 °C。当厚度为1 mm时,流速越大,电缆固体部分温度越低,甚至出现温度梯度由中心指向护套的现象。这表

明高流速下电缆存在从环境吸热的情况,采取合理的工质流速十分重要。当套管厚度增加时,套管与冷却液间热阻显著增大,因此部分热量通过热传导向空气中散出,又由于填充层热扩散率也较低,因而出现了局部高温情况。

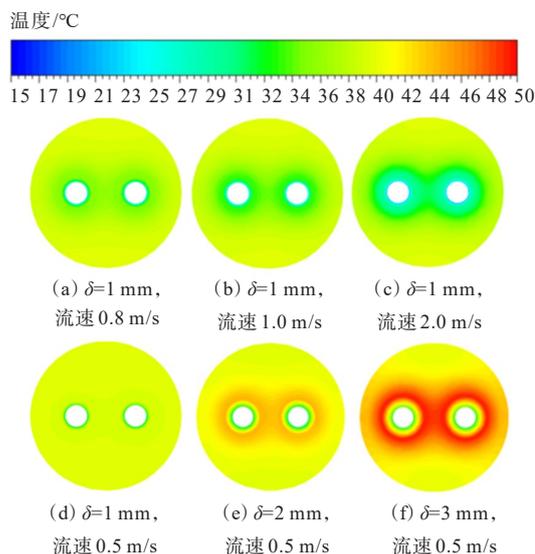


图10 轴向温度云图(不同流速与套管)

Figure 10 Temperature contour maps at axial direction (different flow rates and coolant sleeve thicknesses)

## 4 结语

本文以大功率充电连接器为研究对象,通过数值模拟研究了冷却液种类、相变冷却液流速以及套管厚度对电缆温度特性的影响。通过相变换热控温实现了在小的导体截面积(25 mm<sup>2</sup>)下提升载流能力(600 A)的目标,主要结论如下。

1) 当环境温度为40 °C,加载电流为600 A时,采用10 mm直径导体的电缆5 min内温度可达250 °C,仅靠自然对流无法实现长时间运转。

2) 采用单相冷却液强制对流冷却超充线缆时,当入口温度为40 °C,电缆可被冷却至120 °C以下;当入口温度为15.73 °C,采用R134a冷却液可将超充线缆温度控制在40 °C以下;采用单相冷却液可将最低温度控制到47.9 °C,但需要添加额外制冷设备。

3) 采用R134a对充电线缆进行冷却,流速在0.8、1.0、3.0 m/s下的冷却效果相较流速0.5 m/s时没有明显优势,如考虑降低功耗,推荐使用0.5 m/s的流速。

4) 套管厚度对电缆温度影响明显,与1 mm厚度相比,3 mm厚度下电缆最高温度升高了9.38 °C,但仍在50 °C范围内。

## 参考文献:

- [1] 吴小汉,张谦,粟尧嘉,等.基于区块链的私有充电桩共享平台交易策略[J].发电技术,2022,43(3):439-451.  
WU Xiaohan, ZHANG Qian, SU Yaojia, et al. Sharing platform trading strategy of private charging pile based on blockchain[J]. Power Generation Technology, 2022, 43 (3):439-451.
- [2] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.  
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5):164-171.
- [3] 姚志力,江斌开,龚春阳,等.计及电动汽车充电负荷特性的区域多能源站规划设计[J].电网技术,2022,46(9):3304-3318.  
YAO Zhili, JIANG Binkai, GONG Chunyang, et al. Planning and design of regional multi-energy stations considering electric vehicle charging load characteristics [J]. Power System Technology, 2022, 46(9):3304-3318.
- [4] 尚姗姗,刘敦楠,李晓宇,等.基于实物期权的电动汽车充电站投资决策评估研究[J].智慧电力,2022,50(9):67-73+89.  
SHANG Shanshan, LIU Dunnan, LI Xiaoyu, et al. Investment decision evaluation of electric vehicle charging station based on real option[J]. Smart Power, 2022, 50(9):67-73+89.
- [5] 郭磊,王克文,文福拴,等.电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):56-70.  
GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):56-70.
- [6] MARK K. Fast charging comparison: Audi etron, Mercedes EQC, Jagua I-PACE[EB/OL]. [2018-01-26]. <https://insideevs.com/news/342441/fast-charging-comparison-audi-e-tron-mercedes-eqc-jaguar-i-pace/>.
- [7] Holland M. Tesla Supercharger V3 vs. Taycan charging: 75D retirement suggests battle prep[EB/OL]. [2019-01-14]. <https://cleantechnica.com/2019/01/14/tesla-supercharger-v3-vs-taycan-charging-75d-retirement-suggests-battle-prep/>.
- [8] 小鹏汽车.大家最关心的小鹏G9 800 V超快充7个问题,小鹏来解答[EB/OL]. [2022-08-22][https://www.xiaopeng.com/news/company\\_news/4430.html](https://www.xiaopeng.com/news/company_news/4430.html).
- [9] LOPEZ J, BASOUKEAS N G. Charge cycle strategy for vehicles using smaller cross section cable: US9656560 [P]. 2017-05-23.
- [10] NAGEL T, REMISCH D. Charging station having a charging cable: US20170028862 [P]. 2017-02-02.
- [11] REMISCH D, STAUDACHER S, STEPPER M, et al. Charging cable assembly: DE102017105985A1 [P]. 2018-09-27.
- [12] WOO Y S, VAN DYKE C H, MARDALL J, et al. Cooling of charging cable: US9701210 [P]. 2017-07-11.
- [13] REMISCH D. Electric line arrangement: US10029575 (B2) [P]. 2018-07-24.
- [14] 余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.  
YU Jianzu. Thermal design and analysis techniques of electronic equipment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [15] 张彼德, 陈颖倩, 李孟洁, 等. 含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 106-114.  
ZHANG Bide, CHEN Yingqian, LI Mengjie, et al. Research on an operational optimization method of multi-energy complementary micro energy grid with heat pump and phase change energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 106-114.
- [16] 姚玉斌, 张悦, 王爱芳. 含中性点参数的三相变压器建模及其在潮流计算中的应用[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 46-52.  
YAO Yubin, ZHANG Yue, WANG Aifang. Modeling of three-phase transformer with neutral parameters and its application in power flow calculation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 46-52.
- [17] 吴凡. 余杭区塘栖镇10 kV线路改造电缆选型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
WU Fan. Study on 10 kV cable selection of line remodeling in Yuhang tangxi town [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [18] 柯俊. 大功率充电连接器冷却系统换热特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
KE Jun. Research on heat transfer characteristics of cooling system of high power charging connector [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.