

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.019

## 大功率电动汽车充电电缆组件水包铜冷却数值研究

董晨, 马彦华, 王可, 张伟, 叶建德

(国网电力科学研究院有限公司, 南京 200116)

**摘要:** 电动汽车在大功率充电时, 充电电缆会承受较大的电流, 同时产生大量的热量, 热量的不断聚集会导致温度逐步上升从而引发安全问题。为解决此问题, 提出了直接接触的“水包铜”的冷却方案, 利用 Comsol Multiphysics 有限元分析软件, 建立了充电电缆组件的三维电—热—流耦合模型, 研究流道间隙, 入口流速以及入口温度对电缆组件温度分布的影响。结果表明: 随着流道间隙的增加, 各部件的温度降低, 流体的平均温度与导体中心温度沿轴向增加, 在轴向距离 0~75 mm 内导体中心温度差异不大; 随着入口流速的增加, 各部件的温度降低, 流体的平均温度与导体中心温度沿轴向增加; 随着入口温度的增加, 各部件的最高温度呈线性增大, 流体平均温度与导体中心温度沿轴向升高且速率相同。

**关键词:** 大功率; 电动汽车充电; 冷却; 电—热—流耦合; 数值模拟

### Numerical Study on Water-in-copper of High Power Electric Vehicle Charging Cable Assemblies

DONG Chen, MA Yanhua, WANG Ke, ZHANG Wei, YE Jiande

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 200116, China)

**Abstract:** In case of high-power charging for electric vehicles, the charging cable carries a high current and, at the same time, generates a significant amount of heat. The continuous accumulation of the heat will lead to the gradual rise of temperature, thus causing safety issues. For solving the problem, a direct contact ‘water copper-in-copper’ cooling scheme is proposed. A three-dimensional electric-thermal-fluid coupling model of the charging cable assemblies is set up by using Comsol Multiphysics finite element analysis software so to study the influence of channel gap, inlet velocity and inlet temperature on the temperature distribution of the cable assemblies. The results show that with the increase of the channel gap, the temperature of each part decreases, the average temperature of the fluid and of the center of conductor increases along the axial direction, and the temperature of the center of the conductor has little difference within the axial distance of 0-75 mm. With the increase of the inlet velocity, the temperature of each part decreases, and the average temperature of the fluid and of the center of the conductor increases along the axial direction. With the increase of the inlet temperature, the maximum temperature of each part increases linearly, and the average temperature of the fluid and the temperature of the center of the conductor increase at the same rate along the axial direction.

**Key words:** high-power; charge of electric vehicles; cooling; electro-thermal-fluid coupling; simulation

### 0 引言

目前, 作为新能源汽车发展主力的电动汽车进入产业高速增长期, 电动汽车在家庭用车、公用车

车、公共出行、专用车辆和运营车辆等领域得到快速推广。但是, 影响电动汽车推广的主要因素是里程焦虑和充电焦虑。动力电池技术的不断突破使得电动汽车续航里程逐渐提高。乘用车由最初的

收稿日期: 2025-10-01; 修回日期: 2025-12-20

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5400-202111166A-0-0-00)。

Project Supported by State Grid Corporation of China Science and Technology Project(5400-202111166A-0-0-00).

150 km 提升到了 400 km, 已基本解决电动汽车的里程焦虑。与此同时, 充电反而成为了主要的技术问题。国内外汽车产业巨头已经实现了电动汽车快速充电, 充电功率高达 350 kW, 但充电时间仍然较长, 大大影响了用户的体验感<sup>[1]</sup>。

在电线电缆行业中, 增加功率加大载流的通常做法是增加电缆的导体截面积。对于充电桩电缆而言, 由于使用过程中会频繁拖拽移动, 通过增加导体截面积来实现大功率大载流, 会造成充电桩电缆过于笨重, 且柔韧性变差, 给用户充电时带来不便, 阻碍电动汽车的推广进程<sup>[2-3]</sup>。另外, 当较大的工作电流流过连接器时, 由于触点的体电阻和接触电阻的影响, 连接器将产生相当大的焦耳热。如果热量不能迅速转移到周围环境中, 将不可避免地带来大幅的温升。过高的温升不仅会降低连接器的性能和可靠性, 还会导致一些车辆故障和事故<sup>[4]</sup>。据统计, 1960 年以来电缆火灾蔓延导致的发电厂、变电站和供电隧道等 62 起重大火灾事故, 电缆过热是导致起火燃烧的主要原因<sup>[5]</sup>。

目前, 解决对大功率充电引起的过高温升的办法一般是采用液体冷却系统, 这样, 使充电电缆横截面直径较小, 并且可以将电缆重量减少 40%<sup>[6]</sup>。充电系统的电缆组件的液冷方式, 工程界进行了广泛的研究。

2021 年 3 月国家电网有限公司和中国电力企业联合会联合发布了电动汽车 ChaoJi 传导充电技术白皮书(非正式版), 将大功率充电技术作为电动汽车发展中的重点新技术进行研发并应用。ChaoJi 充电系统的电缆组件采用液冷方式, 并增加温度监控系统, 最大充电功率可达到 900 kW, 满足大功率充电需求, 缩短充电时间, 使充电像加油一样快捷<sup>[7]</sup>。

孙廷玺<sup>[8]</sup>提出了一种新颖的三芯电缆的自取能方法, 数值计算和试验验证了稳态下电缆线芯温度, 对电缆载流量和热状态进行了全面评估。吴晶晶等<sup>[9]</sup>使用 Comsol 有限元软件计算了  $\pm 500$  kV 高压直流 XLPE 电缆稳态运行时的温度分布, 获得了适合电缆长期运行的载流量, 研究了载流量和环境温度对电缆温度分布的影响, 并进行了实验验证。阳林等<sup>[10]</sup>数值研究了  $\pm 500$  kV 直流电缆负荷循环系统中水的流速对绝缘层温度梯度和导体温度的影响, 通过对直流电缆、循环水及保温水管热流固耦合分析, 对水温和线芯电流进行了修正。朱景林<sup>[11]</sup>介绍了电缆水冷却方式, 并根据实际模型建模计算电缆增容的效果, 经济分析表明, 电缆水冷却技术具有良好的应用前景。王娇娇等<sup>[12]</sup>围绕充电用连接装

置, 对行业目前所用的直流充电接口以及 Chaoji 结构的接口进行了试验验证和分析, 结果表明在带有冷却系统的情况下, 两种结构的充电连接装置的温升性能均可满足大电流充电的温升性能要求。杜青林等<sup>[13]</sup>介绍了大功率液冷充电枪的工作原理、强制冷却方法、冷却介质的选择、线缆结构的选择以及工作流量、散热功率的设计计算方法以及优化。梁振等<sup>[14]</sup>基于等效电导率的接触电阻理论, 采用有限元方法, 研究了接触电阻过大而导致的压接缺陷对电缆接头温度及应力分布的影响, 并对不同负荷电流和接触系数下电缆温度、应力等进行多元函数拟合, 得到相应的计算方法。李森等<sup>[15]</sup>调研了电缆强制循环冷却技术、相变技术、绝缘层改性材料技术等领域现有技术方案, 提出了使用冷却剂在电缆导体中进行直接强制循环冷却和散热的方法, 从而实现大幅度提高电缆载流量, 减少新能源汽车充电时间的目的。赵学风等<sup>[16]</sup>利用有限元软件对土壤中电缆接头和本体的温度和稳态载流量进行了数值计算, 发现由本体确定的载流量会使接头导体温度高于最大长期允许温度值, 不利于电缆长期稳定运行, 以及水分迁移使接头周围土壤热阻增大, 采用回填沙土可在一定程度上提高中间接头的稳态载流量。李振明<sup>[17]</sup>等提出将室温液态金属作为高载流电缆的导电及冷却介质, 通过电流、温度及流动等三维多物理场耦合数值仿真方法研究了不同工况下液态金属冷却高载流电缆的温度变化规律, 并与电缆传统水冷进行了详细对比; 通过搭建液态金属冷却电缆实验平台, 初步验证了液态金属冷却高载流电缆的可行性。陈帅雨等<sup>[18]</sup>介绍了一种大电流超充的液冷充电桩线缆的结构设计, 分析了大电流超充的线缆温度变化特性。

文中对适用于大功率电动车充电的冷却系统建模, 数值研究了不同工况下冷却液流量、入口温度和冷却管结构等参数对充电电缆内部温度场分布的影响规律, 为大功率电动车充电电缆的设计和工程应用提供可行性参考。

## 1 大功率充电电缆组件计算模型

### 1.1 液冷电缆和充电枪结构参数

为了额定电压 1 kV DC 和额定电流 500 A 的液冷电缆系统在大功率充电时能正常使用, 文中提出“水包铜”的冷却方案, 使冷却液直接带走通电导线所产生的热量。DC+/DC- 分别配置散热冷却通道, 这两根主导体分别与两个带弯角接头的端子压接连接, 主导体内冷却通道端口与弯角接头的冷却槽

入口连接,而冷却槽的出口与缆芯中冷却回流通道相连,这样就形成各自独立的两个冷却回路,再液冷循环系统,达到电缆温度下降的目的。充电电缆组件结构图见图1。根据充电电缆组件所处环境不同,这里将其分为3个组成段:

- 1) 电缆 I 段充电桩接出的电缆段,是充电组件最长的部分,为了便于计算,长度取 200 mm。
- 2) 电缆 II 段与端子连接处的电缆,长度取 108 mm。为了计算方便,将外护套及绝缘层等剥离。
- 3) 端子段端子插针直径 10 mm。

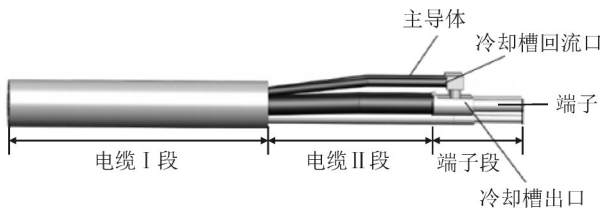


图1 充电电缆组件结构图

Fig. 1 Structure diagram of charging cable assembly

充电系统液冷电缆横截面结构见图2。由于充电通信、充电连接确认等导线内流经的电流远小于主线缆,其生成的热量可忽略,建模时不予考虑。电缆的接地线芯、主线芯、信号线芯、控制线芯都包括导体及包裹于导体外部的绝缘层,液冷电缆填充层内设有两根进液管、两根出液管。外护套与填充

层之间还设置有缓冲带,用于提高导热效果以及抗压能力。线缆部分结构参数以及物性参数见表1、2。

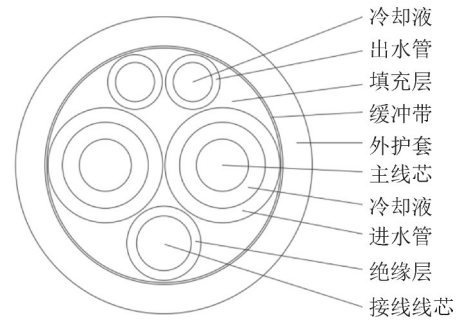


图2 线缆部分截面图

Fig. 2 Section view of the cable

表1 线缆部分结构参数

Table 1 Structural parameters of the cable part

参数	数值
主线芯截面积/mm <sup>2</sup>	35.00
接地线芯截面积/mm <sup>2</sup>	25.00
填充层厚度	—
缓冲带厚度/mm	0.25
出水管厚度/mm	1.00
进水管厚度	根据流道间隙改变
绝缘层厚度/mm	1.25
外护套厚度/mm	3.75

表2 线缆部分物性参数

Table 2 Physical parameters of cable part

结构名称	材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]
主线芯、接地线芯	铜	8 933	390	400.000
填充层	聚丙烯填充绳	900	1 900	0.210
进水管、出水管	聚四氟乙烯	2 200	1 050	0.256
绝缘层	聚氯乙烯热塑性弹性体(TPVC)	1 340	1 200	0.160
缓冲带	聚丙烯	900	1 900	0.210
外护套	聚氯乙烯热塑性弹性体(TPVC)	1 340	1 200	0.160

### 1.2 冷却液选取

冷却液的选取要综合考虑比热、粘度、密度等物性以及环保、绝缘和成本等因素。GB/T 20234.1—2023 规定:充电系统的使用温度为 - 30~50 ℃,所以所选的冷却液需满足在此温度范围。文中选择变压器油作为冷却液,其密度、导热系数、比热容均设置为跟温度  $T$  有关的函数。

### 1.3 控制方程

当液冷充电电缆加载 500 A 大电流,绝缘液直接接触导体,实现散热,涉及电—热—流的耦合,可由以下控制方程描述。

1) 电场控制方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_i \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (3)$$

式(1)-(3)中:  $\nabla$  为矢量微分算子;  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量, A/m<sup>3</sup>;  $Q_i$  为电流源, A/m<sup>3</sup>;  $\sigma$  为电导率, S/m;  $\mathbf{E}$  为电场强度矢量, V/m;  $U$  为电势, V;  $\mathbf{J}_e$  为外部电流密度, A/m<sup>3</sup>。求解的基本参数为  $\varphi$ , 其他参数以  $\varphi$  为基础求出。

2) 流场控制方程:

$$\nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho_1(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu \left[ \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right\} \quad (5)$$

式(4)、(5)中:  $\rho_1$  为流体材料的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mathbf{v}$  为速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $p$  为压强,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

3) 固体、流体传热控制方程。流体传热控制方程为

$$\rho_1 C_1 \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right] = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \tau : S - \frac{T}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial T} \left[ p \left[ \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) p \right] \nabla \right] + Q_1 \quad (6)$$

式(6)中:  $C_1$  为流体材料常压下的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为材料的温度,  $\text{K}$ ;  $\mathbf{q}$  为传热量通量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\tau$  为黏滞应力张量,  $\text{Pa}$ ;  $S = 0.5[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T]$  为应变率张量,  $1/\text{s}$ ;  $Q_1$  为流体材料中的热源(不含黏滞发热),  $\text{W}/\text{m}^3$ 。固体传热控制方程为

$$\rho_2 C_2 \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_2 \quad (7)$$

式(7)中:  $\rho_2$  为固体材料的密度;  $C_2$  为固体材料常压下的比热容;  $\lambda$  为固体材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $Q_2$  为固体材料中的热源,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

4) 电缆中, 热源为载流在导体中产生的焦耳热, 因为是直流输电不涉及介质损耗, 因此, 电热耦合模块控制方程为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (8)$$

式(8)中:  $\rho$  为材料的密度;  $C$  为材料常压下的比热容;  $Q$  为材料中的热源。

#### 1.4 边界条件及网格划分

流道内流动的边界条件定义如下:

1) 入口, 采用速度入口边界条件, 规定入口速度和入口温度。

$$\begin{cases} v = v_{\text{in}} \\ T = T_{\text{in}} \end{cases} \quad (9)$$

设置冷却液入口流速分别为 0.01、0.02、0.04、0.08  $\text{m}/\text{s}$ , 冷却液入口温度分别为 15、20、25、30  $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 出口, 采用压力出口边界条件, 压力和温度的流向梯度设置为 0, 出口处的设置未知, 通过相邻位置迭代计算得出的。

$$\begin{cases} p = p_{\text{out}} \\ n \cdot \nabla T = 0 \end{cases} \quad (10)$$

3) 壁面, 电缆外壁与外部空气的换热过程, 换热系数取值在 5~25  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$  之间<sup>[19]</sup>。考虑到实际使用情况, 电缆前端直接与空气接触, 换热系数取为 5  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ <sup>[20-24]</sup>, 环境温度取为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。电缆与弯角

接头的压接处设置为绝热条件。在壁面附近形成流体薄层, 流动边界层中流体的速度迅速下降为 0, 即无滑移边界条件。

$$v_w = 0 \quad (11)$$

使用自由四面体进行网格划分, 流动区域剖分较细, 沿流动边界层化为 5 层。

## 2 分析与讨论

大功率充电枪使用时, 绝缘和护套材料的导体最高连续工作温度上限为 90  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.1 流道间隙对温度分布的影响

设定流速为 0.02  $\text{m}/\text{s}$ , 入口温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 分析流道间隙分别为 0.5、1.0、1.5、2.0  $\text{mm}$  时对温度分布的影响见图 3。如图 3 所示, 当流道间隙增大时, 充电电缆组件最高温度下降。当间隙为 0.5  $\text{mm}$  时, 充电电缆组件的最高温度为 134  $^{\circ}\text{C}$ ; 当流道间隙增大为 1  $\text{mm}$ , 充电电缆组件的最高温度为 92.4  $^{\circ}\text{C}$ ; 当间隙为 1.5、2  $\text{mm}$  时, 充电电缆组件的最高温度分别为 80.5、72.5  $^{\circ}\text{C}$ , 随着间隙的增大, 最高温度的降低速率从 31% 降至 11%。

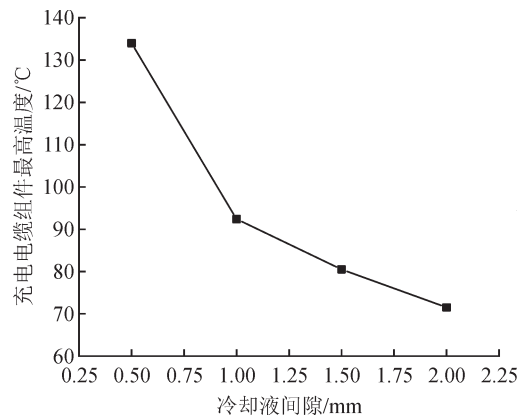


图 3 充电电缆组件最高温度随流道间隙的变化规律  
Fig. 3 Variation of maximum temperature of charging cable assembly versus flow channel gap

不同流道间隙下充电组件温度分布云图见图 4。从图 4 可以看出, 随着流道间隙的增大, 整体的温度呈下降趋势。由表 2 可知, 各材料的导热系数很小, 因此当忽略导热时, 导体产生的焦耳热等于冷却液带走的热量, 满足式(12), 当热源一定时, 随着间隙的增大, 流体的质量流量增大, 冷却液进出口温差减小, 降温效果显著。

$$\begin{cases} I^2 R = C_p q_m \Delta t \\ q_m = \rho v_0 A \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中:  $I$  为电流,  $\text{A}$ ;  $R$  为导体电阻,  $\Omega$ ;  $C_p$  为冷却液的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $q_m$  为冷却液质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;

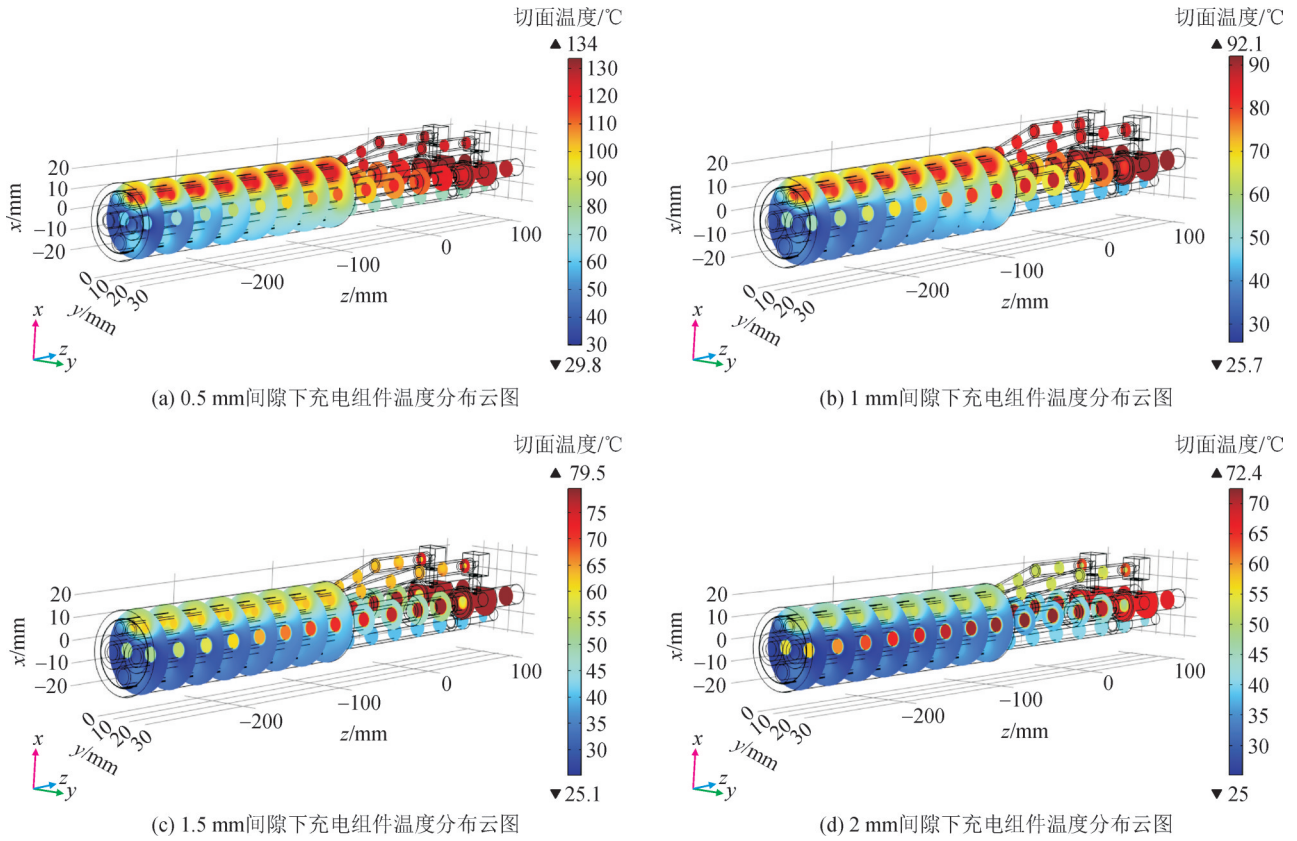


图4 不同流道间隙下充电组件温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution of charging assembly under different channel gaps

$\rho$ 为冷却液密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v_0$ 为冷却液入口流速,  $\text{m/s}$ ;  $A$ 为流道截面积,  $\text{m}^2$ 。

流体平均温度和导体中心温度沿轴向的变化规律见图5、6。随着间隙的增大,冷却液温度沿轴向增幅降低,导体温度沿轴向增幅也在下降,但在0~2 mm内各间隙下导体中心温度差异很小,这是因为随着间隙的减小,冷却液带走的热量更少,使得换热更差,但随着间隙减小边界层逐渐变薄,换热能力也会上升,两者的制约作用下,使得差异较小。不同流道间隙下充电电缆组件各个结构的最高温度见图7,由图7可以很明显的看出,随着流道间隙的增加,各部件的最高温度减小。

### 2.2 入口速度对温度分布的影响

设定流道间隙为1 mm,入口温度为25 °C,分析入口速度分别为0.01、0.02、0.04、0.08  $\text{m/s}$ 时对温度分布的影响见图8。如图8所示,当入口速度增大时,充电电缆组件最高温度下降。当流速为0.01  $\text{m/s}$ 时,充电电缆组件最高温度达到148 °C;当流速到0.02  $\text{m/s}$ ,充电电缆组件最高温度为92.4 °C;继续增大入口流速,流速为0.04、0.08  $\text{m/s}$ 时,充电电缆组件最高温度分别为65.8、50.2 °C。

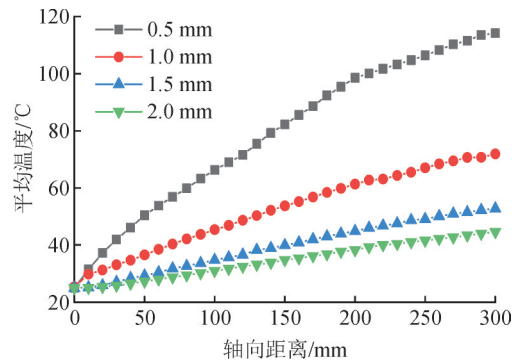


图5 不同流道间隙下流体平均温度沿轴向变化规律

Fig. 5 Variation of the average temperature of the fluid in the axial direction under different flow channel gaps

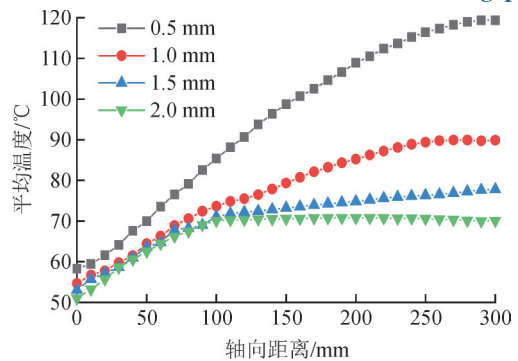


图6 不同流道间隙下导体中心温度沿轴向变化规律

Fig. 6 Variation of the temperature of the conductor center in the axial direction under different flow channel gaps

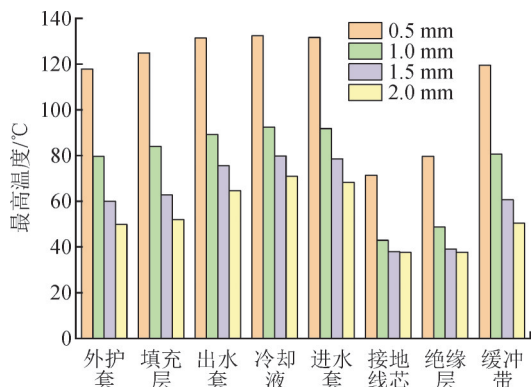


图7 不同流道间隙下充电组件各结构最大温度

Fig. 7 Maximum temperature of each structure of the charging assembly under different channel gaps

不同入口流速下充电组件温度分布云图见图9。

由图9可知随着入口流速的增大, 充电电缆组件的温度呈下降趋势且随着入口流速的增长进出口温差的降低速率变缓。不同入口速度下流体平均温度沿轴向变化规律见图10。由图10可以看出, 沿着冷却液流动方向, 冷却液温度不断上升且流速越小升温越快。不同入口速度下导体中心温度沿轴向变化规律见图11。由图11可以看出, 沿着轴向导体温度不断上升, 入口处导体温度在0.01、0.02 m/s下差异较大, 这是因为流速慢导致换热较差, 铜导体的热量被带走的速度慢。不同入口速度下充电电

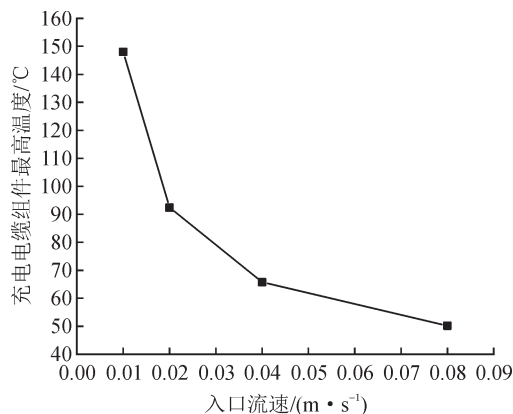


图8 充电电缆组件最高温度随入口速度的变化规律

Fig. 8 Variation of maximum temperature of charging cable assembly versus inlet velocity of cooling media

缆组件各个结构的最高温度见图12。由图12可以看出, 随着入口速度的增加, 各部件的最高温度减小, 且0.01~0.02 m/s下降最快。

### 2.3 入口温度对温度分布的影响

设定流道间隙为1 mm, 入口速度为0.02 m/s, 分析入口温度分别为15、20、25、30 °C对温度分布的影响见图13。如图13所示, 当入口温度增大时, 充电电缆组件最高温度上升, 入口温度为15、20 °C, 最高温度为84.3、88.6 °C, 随着温度的增加, 最高温度呈线性增加。不同入口温度下充电组件温度分布云图见图14。

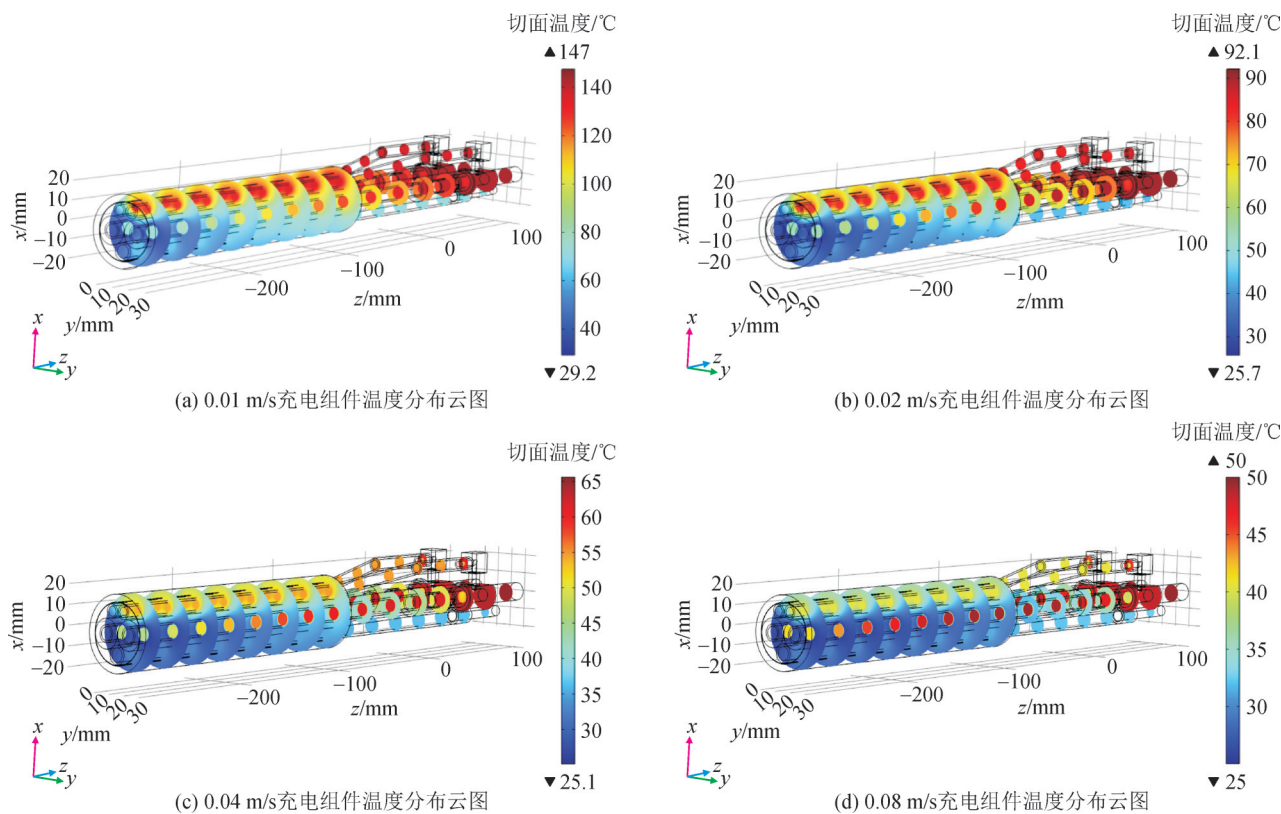


图9 不同入口流速下充电组件温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution of charging assembly under different inlet velocity of cooling media

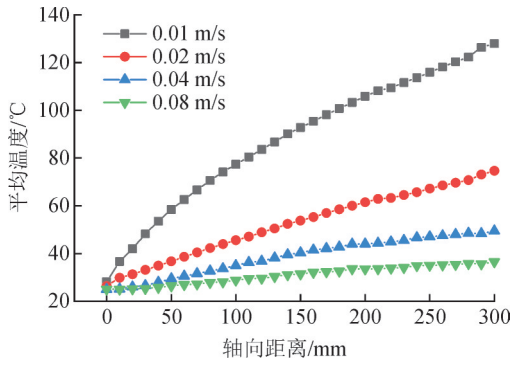


图10 不同入口速度下流体平均温度沿轴向变化规律

Fig. 10 The average temperature of the fluid variation of in the axial direction under different inlet velocity

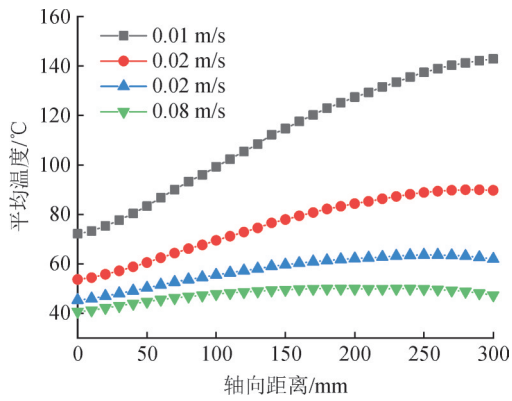


图11 不同入口速度下导体中心温度沿轴向变化规律

Fig. 11 The average temperature of the fluid variation of in the axial direction under different inlet velocity

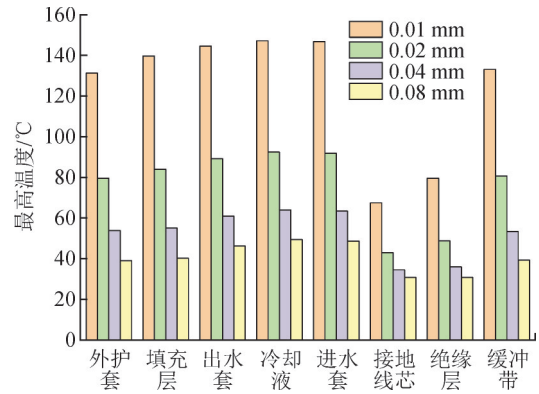


图12 不同入口速度下充电组件各结构最大温度

Fig. 12 The maximum temperature of each structure of the charging component under inlet velocity

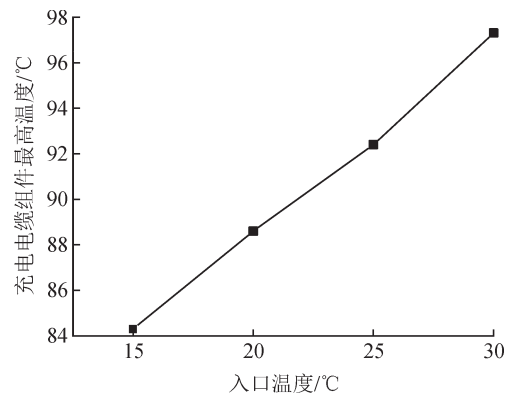
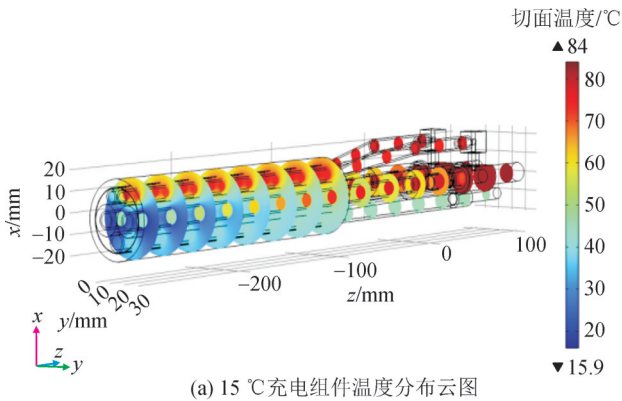
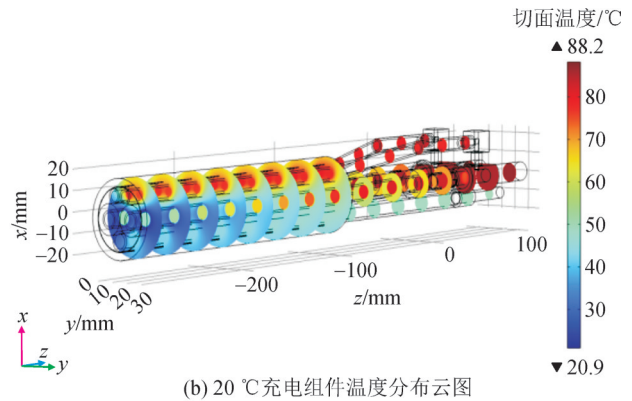


图13 充电电缆组件最高温度随入口温度的变化规律

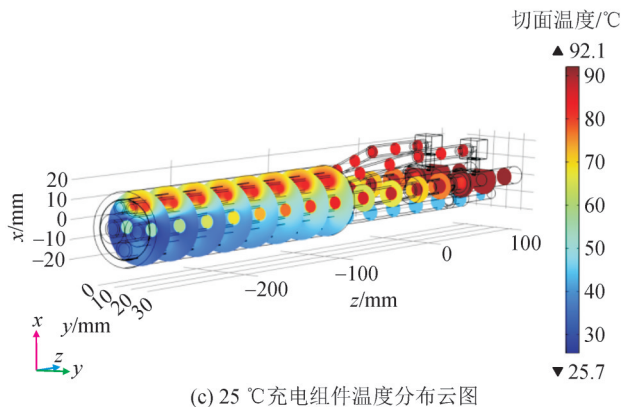
Fig. 13 Variation of maximum temperature of charging cable assembly with inlet temperature



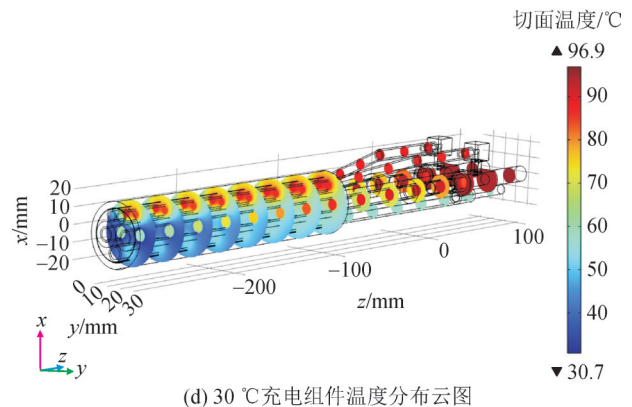
(a) 15 °C 充电组件温度分布云图



(b) 20 °C 充电组件温度分布云图



(c) 25 °C 充电组件温度分布云图



(d) 30 °C 充电组件温度分布云图

图14 不同入口温度下充电组件温度分布云图

Fig. 14 Temperature distribution of charging assembly under different inlet temperature

不同入口温度下流体平均温度沿轴向变化规律见图15,不同入口温度下导体中心温度沿轴向变化规律见图16。由图14-16可以看出,随着入口温度均匀增加,流体平均温度以及导体中心温度都以相同的增长率增加。不同入口温度下充电组件各结构最大温度见图17,图17显示各部件最高温度也呈线性增加。

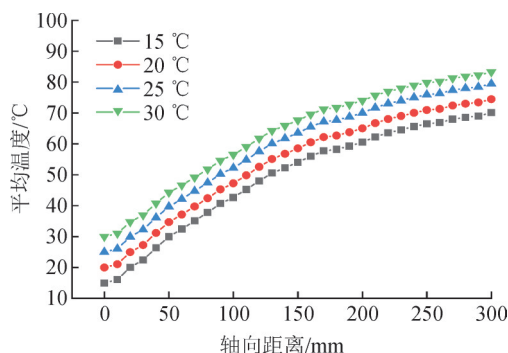


图15 不同入口温度下流体平均温度沿轴向变化规律

Fig. 15 Variation of the average temperature of the fluid in the axial direction under different inlet temperature

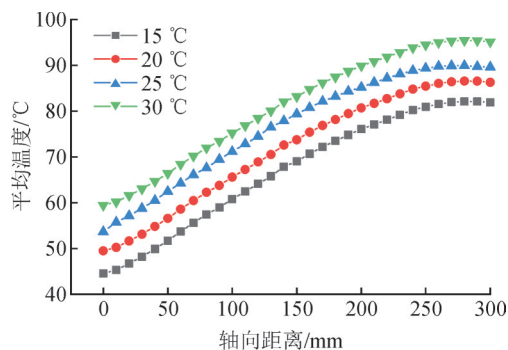


图16 不同入口温度下导体中心温度沿轴向变化规律

Fig. 16 The average temperature of the fluid varies in the axial direction under different inlet temperature

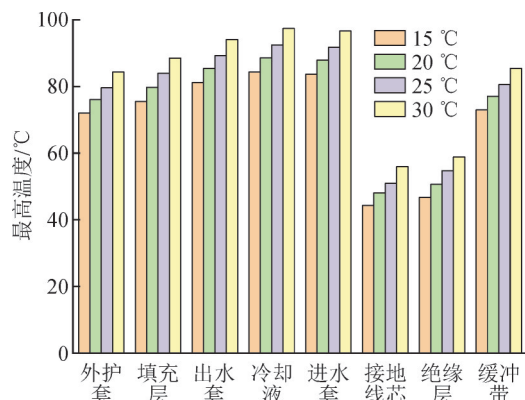


图17 不同入口温度下充电组件各结构最大温度

Fig. 17 The maximum temperature of each structure of the charging component under inlet temperature

### 3 结论

文中针对大功率电动汽车充电电缆组件进行

研究,提出了直接接触的“水包铜”的冷却方案,采用三维电-热-流多物理场耦合方法,研究了4种流道间隙、4种入口速度以及4种入口温度对充电电缆组件热性能的影响,得出以下结论:

1)充电电缆连续工作下最高温度随流道间隙和入口流速的增大而减小,随入口温度的增大而降低且不同情况下的最高温度都出现在端子处,其它部件最高温度的排序为:冷却液>进水套>出水套>填充层>外护套>绝缘层>接地线芯。

2)当入口流速与入口温度一定时,随着流道间隙的增大,使得流体的质量流量增大,当间隙从0.5 mm增大至2 mm,最高温度的降低速率从31%降至11%,整个充电电缆组件的最高温度呈对数降低,流体平均温度与导体中心温度沿轴向升高且间隙越大升高的速率越慢。

3)当流道间隙与入口温度一定时,随着入口流速的增大,流体平均温度与导体中心温度沿轴向升高且流速越大增幅越小。

4)入口流速与流道间隙一定时,随着入口温度的增大,使得整个组件的最高温度呈线性增长且充电电缆组件温度场分布一致,流体平均温度与导体中心温度沿轴向升高且速率相同。

### 参考文献:

- [1] 任金玲,崔久德,赵凯斌,等.一种大功率冷却型直流充电桩电缆的研制[J].电线电缆,2020(3):18-20.  
REN Jinling, CUI Jiude, ZHAO Kaibin, et al. Development of a high-power cooled DC charging pile cable[J]. Electric Wire & Cable, 2020(3):18-20.
- [2] 李杨,李川,黄忻,等.我国发展电动汽车大功率充电技术前景研究与分析[J].电工电气,2018(5):1-6.  
LI Yang, LI Chuan, HUANG Xin, et al. Future research and analysis of high power electric vehicle power charging technology in China[J]. Electrotechnics Electric, 2018(5):1-6.
- [3] DIMITRIOS I, DOUKAS, ANDREAS I, et al. Thermal modeling of a bipolar high-temperature superconducting DC transmission cable [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 5400608.
- [4] 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.
- [5] 雷芳菲,褚继峰,刘洋,等.基于半导体气体传感阵列的电缆过热故障诊断方法[J].电工技术学报,2023,38(13):3651-3664.  
LEI Fangfei, CHU Jifeng, LIU Yang, et al. Fault diagnosis of cable overheating based on semiconductor gas sensing array[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13):3651-

- 3664.
- [6] 张施令,彭宗仁,刘鹏,等. 电热耦合模型应用于高压干式直流套管径向温度和电场分布计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 191-200.  
ZHANG Shiling, PENG Zongren, LIU Peng, et al. Electro-thermal coupling model for computation of radial temperature and electric field of resin impregnated paper high voltage direct current bushing [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 191-200.
- [7] 电动汽车ChaoJi传导充电技术白皮书[Z]. 北京: 国家电网有限公司, 中国电力企业联合会, 2020-06-19.  
White paper on ChaoJi conductive charging technology for electric vehicles[Z]. Beijing: State Grid Corporation of China, China Electricity Council, 2020-06-19.
- [8] 孙廷玺. 三芯电缆自取能方法及其在热状态监测中的应用研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 215-220.  
SUN Tingxi. Research on self energy harvesting and its application in thermal condition monitoring of three-core power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 215-220.
- [9] 吴晶晶,陈丽安,严有祥,等.  $\pm 500$  kV高压直流XLPE电缆温度分布及其影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 113-119.  
WU Jingjing, CHEN Li'an, YAN Youxiang, et al. Study on temperature distribution of  $\pm 500$  kV HVDC XLPE cable and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 113-119.
- [10] 阳林,邱伟豪,陈云,等.  $\pm 500$  kV直流电缆负荷循环系统温度控制仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 155-161.  
YANG Lin, QIU Weihao, CHEN Yun, et al. Simulation study on temperature controlling of  $\pm 500$  kV HVDC cable load cycle system [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 155-161.
- [11] 朱景林. 采用水冷方式提高电缆容量的探讨[J]. 上海电力, 2010, 23(3): 245-247.  
ZHU Jinglin. Discussion on adopting cable water cooling method to improve cable capacity[J]. Shanghai Electric Power, 2010, 23(3): 245-247.
- [12] 王娇娇,柴宏根,李晓,等. 大功率充电用连接装置温升性能分析与研究[J]. 汽车电器, 2020(11): 5-8.  
WANG Jiaojiao, CHAI Honggen, LI Xiao, et al. Research and analysis on temperature rise performance of connecting device for high power charging[J]. Auto Electric Parts, 2020(11): 5-8.
- [13] 杜青林,张强. 大功率液冷充电枪的设计[J]. 科学技术创新, 2021(7): 186-187.  
DU Qinglin, ZHANG Qiang. Design of high power liquid cooling charging gun[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2021(7): 186-187.
- [14] 梁振,彭杰,胡军. 基于接触电阻模型的电缆接头复合材料界面温度及应力分布仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 147-155.  
LIANG Zhen, PENG Jie, HU Jun, et al. Simulation study on interface temperature and stress distribution of cable joints based on contact resistance model[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 147-155.
- [15] 李森,唐波,马婷婷,等. 新能源汽车低压充电电缆增强散热研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 62-69.  
LI Sen, TANG Bo, MA Tingting, et al. Review of research on the enhanced heat dissipation of low voltage charging cables for new energy vehicles[J]. Journal of Changzhou University(Natural Science Edition), 2020, 32(1): 62-69.
- [16] 赵学风,郝一帆,黄国强,等. 基于有限元仿真的土壤直埋电缆中间接头稳态载流量计算[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 64-70.  
ZHAO Xuefeng, HAO Yifan, HUANG Guoqiang, et al. Calculation on steady-state current carrying capacity of intermediate joint of directburied cable based on the finite element simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 64-70.
- [17] 李振明,刘伟,张恒,等. 液态金属冷却电缆仿真及实验研究[J]. 电线电缆, 2019(2): 1-6.  
LI Zhenming, LIU Wei, ZHANG Heng, et al. Simulation and experimental study of liquid metal cooling of cable with large current[J]. Electric Wire & Cable, 2019(2): 1-6.
- [18] 陈帅雨,海旭强. 一种大电流超充的液冷充电桩线缆[J]. 电线电缆, 2023(3): 33-35.  
CHEN Shuaiyu, HAI Xuqiang. A liquid-cooling charging pile cable with high current and overcharge[J]. Electric Wire & Cable, 2023(3): 33-35.
- [19] 姚雷阳. 功率连接器设计关键影响因素研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.  
YAO Leiyang. Research on the key influence factors of power connector design[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2018.
- [20] 李庆刚,杨广志,李涛. 水平圆管在大空间内自然对流换热的实验与数值分析[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(2): 43-46.  
LI Qinggang, YANG Guangzhi, LI Tao. Experiment on heat exchange with natural convection over horizontal circular pipe in large space and its numeric analysis[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(2): 43-46.
- [21] 沈雅钧. 导热系数与自然对流换热系数的综合测定[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2000, 19(1): 84-86.  
SHEN Yajun. The comprehensive measurement for heat conduction coefficient and free convection coefficient[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science), 2000, 19(1): 84-86.
- [22] 朱进容. 水平圆管自然对流换热的剪切干涉测温数值和实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
ZHU Jinrong. Numerical and experimental study of shearing interferometric temperature measurement for natural convection heat transfer about horizontal cylinders[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [23] CHURCHILL S W, CHURCHILL R U. A comprehensive correlating equation for heat and component transfer by free convection[J]. AIChE Journal, 1975, 21(3): 604-606.
- [24] KUEHN T H, GOLDSTEIN R J. Correlating equations for natural convection heat transfer between horizontal circular cylinders[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(10): 1127-1134.
- 董晨(1981—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电动汽车充电设施研发及检测工作(通信作者)(E-mail: dongchen3@sgepri.sgcc.com.cn)。