

界面热传导性能对弓网接触温升的影响分析*

闭永雷¹ 吴爱中^{1,2} 宋恩昊¹

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海;

2. 上海市轨道交通振动与噪声控制技术工程研究中心, 201620, 上海)

摘要 [目的] 电动列车弓网接触导致的界面温升容易加剧受电弓滑板材料的磨损, 从而增加轨道交通运营维护成本, 因此开展弓网接触温升研究有重要意义。[方法] 接触电阻导致的焦耳热是接触温升的热源之一, 而接触界面的热传导特性影响接触副温度场分布, 两者均为影响温度场的重要因素。推导了弓网接触电阻和接触热传导的计算模型, 建立滑板-接触线三维有限元模型对温度场进行多场耦合计算, 分析了滑板热导率对接触热导系数及温升的影响。[结果及结论] 分析结果表明, 长时间接触条件下滑板内部存在热量“囤积”现象; 提升滑板材料的热导率可以降低滑板的接触温升, 进而降低滑板材料的热损伤。

关键词 电气列车; 弓网系统; 接触温升; 接触热导; 多场耦合计算

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.023

Impact Analysis of Interface Thermal Conductivity on Pantograph-Catenary Contact Temperature Rise

BI Yonglei¹, WU Aizhong^{1,2}, SONG Enhao¹

(1. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China; 2. Shanghai Engineering Research Centre for Vibration and Noise Control Technologies in Railway Transportation, 201620, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The interface temperature rise caused by PC (pantograph-catenary) contact in electric trains can accelerate the wear of pantograph strips, thereby increasing the maintenance costs of rail transit systems. Therefore, studying the temperature rise in PC contact is of significant importance.

[Method] Joule heating from contact resistance is one of the primary sources of temperature rise in PC contact, while the thermal conductivity characteristics of the contact interface influence the temperature distribution of the contact pair, both factors are critical to the temperature field. First, calculation models for PC contact resistance and thermal conductivity are

derived. Then, a 3D finite element model of the strip and contact wire system is established for multi-physics coupling calculations to analyze the effect of the strip's thermal conductivity rate on the contact thermal conductivity coefficient and temperature rise. [Result & Conclusion] Analysis results show that a heat 'accumulation' phenomenon occurs in the strip under prolonged contact condition; increasing the thermal conductivity of strips can reduce the contact temperature rise, thereby mitigating thermal damage to the strips.

Key words electric train; pantograph-catenary system; contact temperature rise; thermal contact conduction; multi-field coupling calculation

电动列车通过受电弓滑板与接触网的电接触获得电能。弓网接触取流时, 因受电弓升弓产生了一定的机械压力, 使接触线与滑板形成稳定的接触关系, 从而形成良好的导电通道。近年来, 随着客运量增大及运行速度的提升, 弓网接触传输的电流密度有所提高, 因此弓网接触电阻形成的焦耳热也随之升高。过高的接触界面温升会导致材料力学性质劣化, 从而加剧滑板和接触线的磨损, 进而增加设备维护成本, 甚至影响轨道交通运营安全^[1]。

关于弓网接触热来源的研究重点聚焦于接触界面的电接触特性^[2-3], 而对于温升过程中接触界面热传导的讨论比较少见。有学者尝试通过提高滑板的热导率来降低接触温升, 比如文献[4]研究了弓网离线电弧工况下, 滑板的热导率数值与滑板表面和内部的温升情况; 文献[5]研究了静态接触条件下滑板热导率对接触温升的影响, 并结合仿真和试验分析结果给出了滑板材料热导率的建议值。上述研究工作集中在滑板热导率对于两接触体的温升情况。实际上, 在弓网接触中, 滑板热导率的变化不仅影响着滑板的导热性能, 同时影响两接触体间的接触面热传导情况, 并进一步影响接触线、

* 国家自然科学基金项目(11602144)

滑板的温度分布。因此,研究界面热传导属性对弓网接触温升的影响有重要意义。

本文采用有限元方法对弓网静态接触的温升进行研究。首先建立弓网接触热传导模型,考察滑板热导率变化时其与弓网接触热导系数的变化规律;然后建立接触线-滑板接触有限元模型,对弓网接触温升进行数值计算,探索弓网接触热传导性能对弓网温升影响规律。

1 弓网界面热接触属性分析

1.1 弓网接触热导

微观上看,固体表面并非绝对光滑。弓网接触取流时,接触线与滑板之间的真实接触通常发生在表面微凸体区域,这些真实接触区域是电流和热流的传递通道。

按照接触力学理论,两个粗糙表面接触可以等效为一个粗糙表面与一个光滑刚性面的接触。其中,硬度较大的接触体可等效视作具有光滑表面的刚性体^[6],如图 1 所示。

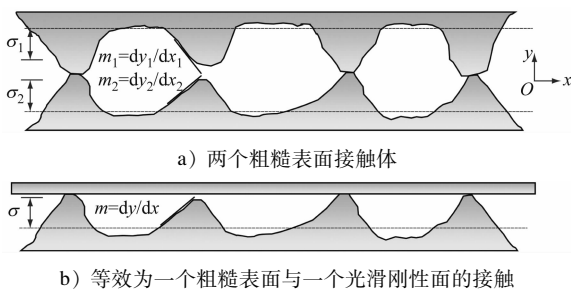


图 1 粗糙表面接触的等效示意图

Fig. 1 Diagram of rouge surface contact equivalence

等效后的均方根表面粗糙度和平均表面斜度为:

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \\ m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

σ ——等效均方根表面粗糙度(见图 1b));
 σ_1, σ_2 ——分别为滑板和接触线平均表面粗糙

度(见图 1a));

m ——等效平均表面斜度(见图 1b));

m_1, m_2 ——分别为滑板和接触线平均表面斜度(见图 1a))。

平均粗糙度和平均表面斜度存在下述关系^[7]:

$$m_i = 0.076(\sigma_i 10^6)^{0.52}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

式中 σ_i 单位为 μm 。

考虑等效均方根表面粗糙度和等效平均表面斜度以后,物体接触时的接触热导系数可表示为^[8]:

$$h_c = 2.5 \frac{mk_1k_2}{\sigma(k_1 + k_2)} \left(\frac{p}{H} \right)^{0.95} \quad (3)$$

式中:

h_c ——接触热导系数,单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

k_1, k_2 ——分别为滑板和接触线热导率,单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

p ——接触压强,单位 N/m^2 ;

H ——滑板硬度,单位 N/mm^2 。

考虑了如表 1 列出的接触线和滑板的材料属性,并通过计算得到接触热导系数随滑板热导率和接触力变化的情况。为了让图中的数据更易阅读,通过接触力与接触压强的换算,给出了接触热导系数与接触力的关系,如图 2 所示。随着滑板热导率和压强的增大,接触界面上的接触热导系数增大,表明两接触体间发生热交换的能力越强。

1.2 弓网接触电阻

弓网接触取流时,两个粗糙表面之间接触会产生接触电阻。接触电阻可通过式(4)进行计算^[9]:

$$R_c = \frac{\rho_w + \rho_s}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{nF}} \quad (4)$$

式中:

R_c ——接触电阻,单位 Ω ;

ρ_s, ρ_w ——分别为滑板和接触线的电阻率,单位 $\Omega \cdot \text{m}$;

F ——弓网接触力,单位 N ;

n ——导电斑点数目。

表 1 接触线、滑板材料属性^[10-11]

Tab. 1 Material properties of contact wire and strip^[10-11]

部件名称	体积质量/ (kg/m^3)	杨氏模量/ GPa	泊松比	比热容/ ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	热导率/ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	热膨胀系 数/ K^{-1}	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻温度 系数/ K^{-1}	硬度/ (N/mm^2)	粗糙度/ μm
滑板	1 670	36.5	0.425	769	3 ~ 28	3.5×10^{-6}	35×10^{-6}	-0.001 9	530	1.6
接触线	8 900	110.0	0.320	384	390	1.66×10^{-5}	1.8×10^{-8}	0.003 65		3.2

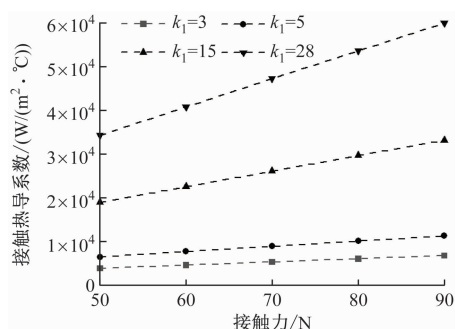


图2 弓网接触热导系数与接触力的关系

Fig. 2 Relationship between pantograph-catenary contact thermal conductivity coefficient and contact force

本文的模型涉及到热场、电场、力场的多场耦合问题,接触电阻和温度具有较强的耦合关系,因此,为使仿真结果与实际更接近,需要得到随温度变化的接触电阻。引入电阻温度系数,式(4)可表示为:

$$R_c = \frac{\rho_s(1 + \alpha_1 \Delta T) + \rho_w(1 + \alpha_2 \Delta T)}{4} \sqrt{\frac{\pi H}{nF}} \quad (5)$$

式中:

ΔT ——滑板和接触线的温差,单位 $^{\circ}\text{C}$;

α_1, α_2 ——滑板和接触线的电阻温度系数。

2 弓网接触多场耦合分析

2.1 弓网接触的多场耦合机制

电动列车弓网接触取流是一个复杂的多物理场耦合问题,包括了温度场、力场以及电场的交互作用。其中,温度效应在多物理场耦合中是至关重要的,因为温度同时影响材料的力学和电学性能。比如,由电阻产生的焦耳热构成温度场的同时,又通过电阻温度系数和热膨胀系数分别影响电场和应力场,而改变机械压力可通过影响接触界面的接触热导系数和接触电阻来影响弓网的电场分布和温度场分布。因此,要进行弓网接触温升分析,模型中需要同时存在温度、力以及电势自由度。

2.2 弓网接触有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件进行有限元建模及求解。根据我国铁道行业标准 T/BT 2809《电气化铁路用铜及铜合金接触线》,接触线模型的直径为 12.9 mm,为了减少单元总数,其长度控制在 2.0 m。另根据标准 TJ/CL 328《动车组碳滑板暂行技术条件》,滑板模型的宽、高分别为 36 mm、22 mm,长度控制为 400 mm,接触线和滑板模型如图 3 所示。模型的网格单元选用 Q3D8 单元,该单元类型

同时具有电势、位移、温度自由度,满足弓网载流时存在的热-力-电耦合方程分析求解。模型中,接触线和滑板之间设置为相互接触作用,其属性主要包括前面提及的接触热导系数以及接触电阻。模型的压力载荷均匀施加于滑板底面,电流载荷施加于接触线一端的端面,并于滑板底部设置零电势边界。此时,电流从接触线端面经两者接触界面流向滑板底部零电势面,电流流经接触面时将生成电阻热,并分配于两接触面。

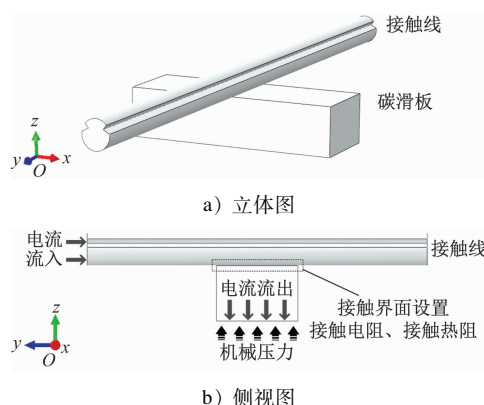


图3 接触线-滑板电接触模型

Fig. 3 Model of contact wire and strip electric contact

2.3 模型校核

采用 ABAQUS/Standard 求解器对弓网静止载流工况的温升情况进行多场耦合分析,典型工况下弓网接触的温度分布结果如图 4 所示。

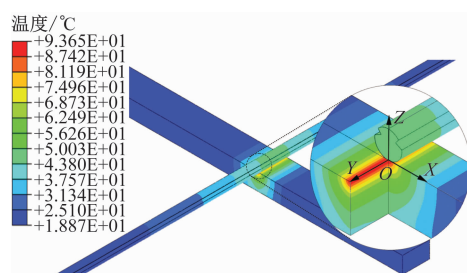


图4 接触线与滑板电接触的温升云图

Fig. 4 Temperature rise nephogram of contact wire and strip electric contact

为了验证模型的有效性,将具有相同载荷工况(100 A, 60 N)的温升模拟结果与文献[12]中的实测结果进行比对,如表 2 所示。文献[12]中试验设备为弓网载流试验台,试验方法是在室温为 18.8 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下施加电流后使用热像仪在弓网接触区域附近采集温度数据。从表 2 可以看出,除了个别数据点与模拟结果有些偏离,其余数据点与本文模拟

结果的误差均小于 5%,且温升过程的趋势一致,因此本文模型的模拟结果具有较好的准确度。

表 2 模拟结果与试验结果^[12]对比

Tab. 2 Comparison between simulation results and test results^[14]

项目	温度/℃					
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	137 s
试验结果	18.8	57.8	82.5	99.2	94.8	97.7
模拟结果	18.8	37.8	78.7	85.7	91.1	93.6
两者误差/%	0	-34.6	-4.6	-13.6	-3.9	-4.2

3 结果与讨论

3.1 接触区域的热流密度与温度分布

图 5 给出了接触力为 70 N,电流为 100 A 条件下计算得到的热流密度及温度分布结果。图 5 中左侧部分为热流密度矢量,箭头方向为热量流动的方向,而右侧为温度分布图。从图 5 可以看到,接触线处的热流密度矢量方向由接触面指向内部,说明接触线的接触界面处的温度最高;而滑板不同,其热流密度矢量的起始位置不在表面,而是位于接触区域下方;同时,滑板的最高温度点位于接触体内部,接触表面的温度不是最高。分析得知,由于设置了接触热导系数,同时接触界面处滑板的温度高于接触线,导致滑板部分热量通过界面传递给接触线,所以影响到滑板温度场的分布。

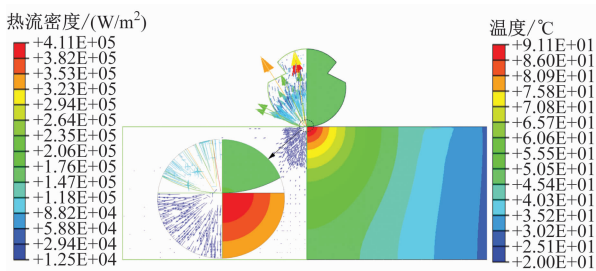


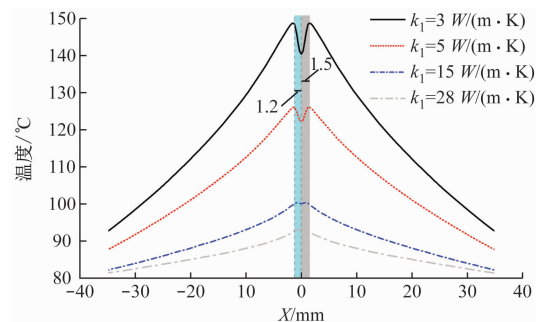
图 5 接触副的热流密度和温度分布

Fig. 5 Heat flux density and temperature distribution at the contact pair

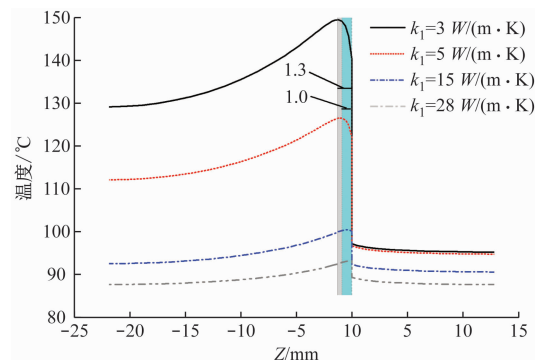
3.2 不同接触力和热导率条件下的稳态温升

为了探索滑板和接触线在长时间接触条件下的温升情况,进行了接触温升稳态分析。设置 k_1 分别为 3、5、15、28 W/(m·K),计算得到的结果在图 6 中给出。图 6 a)和 6 b)分别为图 4 中 X 轴和 Z 轴路径处的温度分布情况。在图 6 a)中,当 $k_1 = 3$ W/(m·K)和 $k_1 = 5$ W/(m·K)时,最高温度区域并

非处于接触中心处,而是与接触中心的距离分别为 1.5 mm 和 1.2 mm;当 $k_1 = 15$ 和 28 W/(m·K)时,温度最高点基本位于接触中心。在图 6 b)中,当 $k_1 = 3$ W/(m·K)和 5 W/(m·K)时,滑板的最高温升点位于滑板内部,最高温升点与滑板表面的距离分别为 1.3 mm 和 1.0 mm;随着 k_1 值由 3 W/(m·K)增大至 28 W/(m·K),碳滑板最高温度变化了 60℃左右,而接触线的温度变化不超过 10℃。由此可见,增大滑板材料的热导率,能够降低滑板的接触温升,进而降低滑板材料的热损伤,但不能显著降低接触线材料的温升。



a) 滑板表面 X 轴处的温升



b) 接触线、滑板 Z 轴处的温升

图 6 稳态温升

Fig. 6 Steady-state temperature rise

图 7 为稳态时不同热导率条件下滑板的最高温

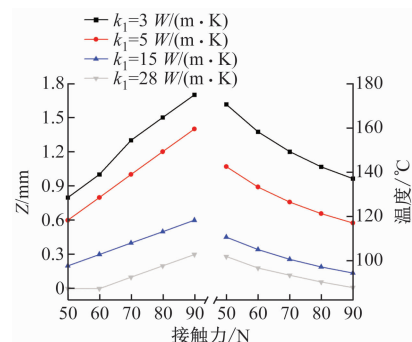


图 7 滑板最高温度及其位置

Fig. 7 Maximum temperature and position of the strip

度位置距接触面的距离和滑板的最高温度。在相同接触力下,低热导率滑板的最高温度越高,且最高温度的位置距表面越深。这表明低热导率滑板的内部可能存在热量的“囤积”现象。分析发现,随着接触力的增大,最高温度有所减小,但最高温度的位置距滑板表面越深。

4 结语

1) 受电弓滑板与接触线界面的接触热导系数随接触力及滑板热导率的增大而增大。

2) 提高滑板材料的热导率可以降低滑板的接触温升,进而降低滑板材料的热损伤,但并不能显著降低接触线的接触温升。

3) 滑板温升最高的位置与滑板热导率 k_1 有关,当 k_1 值为 $3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,滑板内部出现热量“囤积”现象,即滑板内部某一位置的温度要比接触面的温度高;随着滑板热导率的增大,滑板最高温度位置距离滑板表面越近。

4) 滑板最高温度随着接触力的增大而减小,但随着接触力增大,最高温度的位置距滑板表面越深。

参考文献

- [1] 吴广宁,周悦,雷栋,等. 弓网电接触研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3495.
WU Guangning, ZHOU Yue, LEI Dong, et al. Research advances in electric contact between pantograph and catenary[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3495.
- [2] 朱宁俊,李春茂,吴广宁,等. 弓网系统接触电阻特性的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1185.
ZHU Ningjun, LI Chunmao, WU Guangning, et al. Investigation on characteristics of the contact resistance of pantograph-catenary system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(5): 1185.
- [3] WU G, WEI W, GAO G, et al. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph-catenary system[J]. Journal of Modern Transportation, 2016, 24(2): 132.
- [4] 韩伟锋,高国强,刘贤沛,等. 弓网电弧磁流体动力学模型[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 21.
HAN Weifeng, GAO Guoqiang, LIU Xianpei, et al. MHD model of pantograph-catenary arc[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 21.
- [5] MANKA A, HEKA A, WIEK J. The influence of pantograph carbon-metal composite slider thermal properties on the railroad wire temperature[J]. Energies, 2021, 14(23): 7490.
- [6] 邓二平. 压接型 IGBT 器件内部电-热-力多物理场耦合模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
DENG Erping. Modeling the electro-thermo-mechanical multi-physics coupling model for press pack IGBTs[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [7] LAMBERT M A, Fletcher L S. Thermal contact conductance of spherical rough metals[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(4): 684.
- [8] YOYANOVICH M. New contact and gap correlations for conforming rough surfaces[C]. AIAA 16th thermophysics conference, US California PaloAlto: AIAA, 1981: 83-95.
- [9] 吴积钦. 受电弓接触网系统电接触特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
WU Jiqin. Study on the characteristics of electric contact between pantograph and overhead contact line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [10] YANG H, WANG K, LIU Y, et al. The formation of the delamination wear of the pure carbon strip and its influence on the friction and wear properties of the pantograph and catenary system[J]. Wear, 2020, 454: 203343.
- [11] 董霖,李传喜,陈光雄,等. 弓网载流摩擦耦合温度场的仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3): 102.
DONG Lin, LI Chuanxi, CHEN Guangxiong, et al. Simulation study on coupling temperature field under pantograph-catenary friction with electric current[J]. China Railway Science, 2014, 35(3): 102.
- [12] 刘吉,张卫华,周宁,等. 受电弓滑板载流温度静态特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 10.
LIU Ji, ZHANG Weihua, ZHOU Ning, et al. Research on temperature and static characteristics of pantograph slider[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(4): 10.

· 收稿日期:2022-12-05 修回日期:2023-01-27 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-05 Revised:2023-01-27 Published:2025-03-10
· 第一作者:闭永雷,研究生,1078887107@qq.com
通信作者:吴爱中,副教授,azwu@sues.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821