DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.018
文章编号：1000-128X(2023)01-0138-06

地铁车辆弓网静态电接触的多场耦合模型及温升分析

闭永雷[1]，吴爱中[1,2]，翁　琳[1]

（1.上海工程技术大学 城市轨道交通学院，上海　201620；
2.上海市轨道交通振动与噪声控制技术工程研究中心，上海　201620）

摘　要：当地铁到站或在线路上因故临时停车时，接触网仍需为列车提供电流，此时弓网接触部件因处于静止状态而存在局部过热的情况，严重时可能导致滑板热损伤甚至造成接触线断线事故。因此，地铁停车期间弓网电接触的温升研究具有重要意义。地铁列车弓网接触是热、力、电多物理场耦合的复杂行为，而弓网接触力、滑板热导率和接触线截面形状对弓网电接触有重要影响。本文针对受电弓滑板与接触线静态取流的工况，研究了接触电阻和接触热导的变化规律与建模方法，建立了热-力-电耦合的三维有限元分析模型，分析弓网接触力、滑板材料热传导率以及接触线磨耗对接触温升的影响。结果显示，增大弓网接触力、选用高热导率的滑板材料和改良接触线截面轮廓均可降低弓网接触温升。研究结果对接触线结构优化、滑板材料的选取及保障列车安全运行有重要参考价值。

关键词：地铁车辆；弓网系统；电接触；多场耦合；温升分析；接触电阻
中图分类号：U231　　**文献标识码：**A

Multi-field coupling modeling and temperature rise analysis for the static pantograph-catenary electrical contact of metro trains

BI Yonglei[1], WU Aizhong[1,2], WENG Lin[1]

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

Abstract: Since the catenary still needs to supply current for the trains stopping at stations or stopping temporarily on the track for some reasons, the pantograph-catenary contact part in a stationary state may suffer from overheat, which may lead to a thermal damage of the contact strip and even cause a catenary breakage accident. Therefore, the study on the temperature rise at the pantograph-catenary electrical contact during stopping of metro trains is of great importance. The pantograph-catenary contact is a very complex interaction of multi-physical field coupling including thermal, mechanical and electrical behaviors, and the contact force, thermal conductivity of the contact strip and sectional shape of the contact wire have an important impact on the pantograph-catenary electrical contact. In this study, the change rules of contact resistance and thermal contact conductance, and the modeling approach were explored for the static current condition of the contact strip and contact wire; a three-dimensional finite element model was established for the thermal-mechanical-electrical coupling; the effects of pantograph-catenary contact force, thermal conductivity of the contact strip and wear of contact wire to contact temperature rise was studied. The results show that the pantograph-catenary contact temperature rise can be reduced by increasing the contact force, selecting the strip material with a high thermal conductivity and improving the sectional shape of contact wire. The study results may be used as reference for the structural optimization of contact wire, selection of strip materials and guarantee of trains safe operation.

Keywords: metro vehicle; pantograph-catenary system; electrical contact; multi-field coupling; temperature rise analysis; contact resistance

---

基金项目：国家自然科学基金项目(11602144)
通信作者：吴爱中（1981—），男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事弓网滑动接触方面的研究；E-mail: azwu@sues.edu.cn
引用格式：闭永雷, 吴爱中, 翁琳. 地铁车辆弓网静态电接触的多场耦合模型及温升分析[J]. 机车电传动, 2023(1): 138-143.
Citation: BI Yonglei, WU Aizhong, WENG Lin. Multi-field coupling modeling and temperature rise analysis for the static pantograph-catenary electrical contact of metro trains[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 138-143.

0　引言

地铁车辆是由电力牵引的动车组列车，车辆运行所需电能需通过受电弓滑板与接触网导线（接触线）接触获得。滑板与导线电接触时，电场、应力场、温度场三者之间相互影响，包含了多物理场耦合的复杂行为。一方面，弓网之间的接触力影响滑板与接触线的接触电阻，从而影响焦耳热行为；另一方面，温升效应也将影响接触材料的性质，进而改变接触副的力学和电学行为。地铁在线路上因故临时停车或到站时，由于接触部件处于静止状态而存在局部过热的情况，严重时可导致接触线断线事故[1]。因此，针对静止取流工况开展弓网接触温度场分析，对于滑板材料研发、设备维护以及保障列车安全运行等有重要参考意义。

国内外研究人员对列车弓网接触的温升行为进行了广泛的研究。文献[2]采用数值方法对弓网滑动接触温升问题进行了分析，研究了不同材料、不同接触力和不同电流下的滑板生热行为；文献[3]建立了滑动接触的热分析模型，通过模型分析了电流、滑动速度、接触力等不同参数的稳态热行为，但模型中均没有讨论接触热传导情况；文献[4]通过试验分析了焦耳热、电弧热和摩擦热对滑板温升的比重，发现焦耳热对滑板温升贡献最高；文献[5]利用有限元软件对恒定接触力、恒定电流和恒定相对滑动速度下的滑板温度场进行了仿真分析；文献[6]在不同接触压力下，研究相对滑动速度和电流对碳滑板温升的影响。上述分析仅考虑了力–电耦合的情况，没有研究温度对接触电阻的反馈作用。

在以往的弓网热–电耦合模型或热–力耦合模型中，因缺乏热–力–电实时耦合的综合考虑，模型结果与实际情况存在一定差距。为此，本文基于三维有限元模型提出了热–力–电多物理场耦合分析方法，对弓网静止取流工况进行数值分析，研究弓网接触力、材料热导率、接触线磨损程度等对弓网接触区温度场分布的影响规律和联系。

1　弓网电接触参数分析

弓网电接触取流时，接触电阻、接触热导和对流换热均会影响弓网电接触温升。其中，接触电阻引起的焦耳热是弓网温升的热量来源，通过温度可影响材料性能，而弓网接触热导和对流换热行为则影响弓网的散热过程，最终影响温度场的分布。因此，在对弓网静态电接触进行多场耦合温升研究之前，需要先对弓网接触的接触电阻、界面热传导等问题进行分析。

1.1　接触电阻

图 1 为列车弓网接触电阻简化模型。

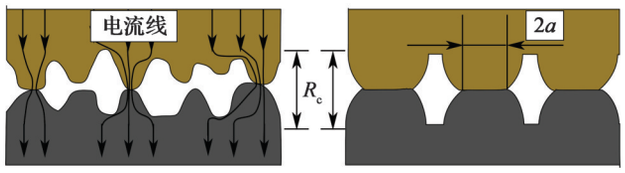


图 1　弓网接触电阻简化模型

Fig. 1　Simplified model of pantograph-catenary contact resistance

由图 1 可知，从微观上看，接触线和滑板之间由有限个小区域相互接触形成导电斑点，电流流经这些区域时会产生收缩效应，进而形成收缩电阻。简化后的收缩电阻形状近似圆形，其接触点半径为[7]

$$a=\sqrt{\frac{F}{n\pi H}} \tag{1}$$

式中：a 为接触点半径；F 为接触力；n 为接触点的个数（$15\leqslant n\leqslant 20$）[7]；$H$ 为接触副中较软材料的硬度。

一个接触点处总的接触电阻 R_i 可表示为[7-8]

$$R_i=R_w+R_s=\frac{\rho_w}{4a}+\frac{\rho_s}{4a} \tag{2}$$

式中：R_w、R_s 分别为接触线和滑板上单个斑点的收缩电阻；ρ_w 为接触线的电阻率；ρ_s 为碳滑板的电阻率。

当温度改变时，电阻率也随之改变，其变化关系为[9]

$$\rho(T)=\rho_0(1+\alpha\cdot\Delta T) \tag{3}$$

式中：$\rho(T)$ 为温度 T 时的电阻率；ρ_0 为初始温度下的电阻率；α 为电阻温度系数；ΔT 为温升。

故单个导电斑点处其接触电阻随温度变化的公式为

$$R_i=\frac{\rho_w(1+\alpha_1\cdot\Delta T)+\rho_s(1+\alpha_2\cdot\Delta T)}{4a} \tag{4}$$

式中：α_1、α_2 分别为接触线和滑板的电阻温度系数。

假设弓网接触副共有 n 个导电斑点，且各导电斑点的电阻相等，其总接触电阻可近似为

$$R_c=\frac{\rho_w(1+\alpha_1\cdot\Delta T)+\rho_s(1+\alpha_2\cdot\Delta T)}{4na} \tag{5}$$

当导电斑点数 n=15 时，根据表 1[10] 中的滑板及接触线性能参数可以计算在不同接触压力下随温度变化的电阻值，如图 2 所示。由图 2 可知，弓网的接触电阻随接触力的增大而减小，随接触温度的上升也减小。

表 1　滑板及接触线性能参数

Table 1　Performance parameters of contact wire and carbon strip

名称	电阻率/(Ω·m)	电阻温度系数/(K^{-1})	硬度/($N\cdot mm^{-2}$)
纯碳滑板	35×10^{-6}	−0.001 90	530
铜接触线	1.8×10^{-8}	0.003 65	–

1.2　接触热导

弓网接触副中，温度较高的一方通过接触将热量传递至另一方，其接触面因非完全接触而存在接触热阻，接触热阻和接触热导系数呈倒数关系，两个物体间的热传导系数 h_c 可以表示为[11]

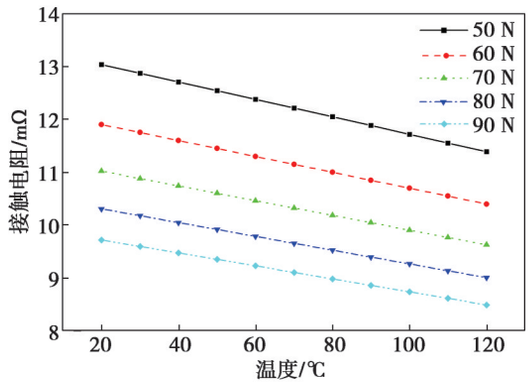


图2 理论接触电阻值随温度和接触力的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of theoretical contact resistance value with temperature and contact force

$$h_c = 1.25k\frac{m}{\sigma}\left(\frac{p}{H}\right)^{0.95} \tag{6}$$

式中：p为接触压强；k为等效接触热导率；m为等效平均粗糙面斜率；σ为等效方均根表面粗糙度。

其中：

$$k = \frac{2k_1k_2}{k_1+k_2} \tag{7}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1{}^2+\sigma_2{}^2} \tag{8}$$

$$m = \sqrt{m_1{}^2+m_2{}^2} \tag{9}$$

式中：k_1, k_2, σ_1, σ_2, m_1, m_2分别为接触线和滑板的热导率、表面平均粗糙度、粗糙峰斜率。

基于大量试验研究，得出粗糙度和粗糙峰斜率的关联式为[12]

$$m_i = 0.076\left(\sigma_i\times10^6\right)^{0.52} \tag{10}$$

选取接触线和滑板的热导率k_1、k_2分别为390 W/(m·K)和3 W/(m·K)，表面平均粗糙度σ_1、σ_2分别为3.2 μm和1.6 μm[13]，结合式(6)~式(10)可得弓网接触的热导系数表达式为

$$h_c = 0.001818\times p^{0.95} \tag{11}$$

1.3 对流换热

对流换热是接触线和滑板散热方式之一，为简化分析，假设弓网接触副周围流体为理想干空气，将接触线视作一根直径为D的圆柱体，则对流换热系数可表示为[14]

$$h_{conv} = \frac{N_u\cdot\lambda_{air}}{L} \tag{12}$$

式中：h_{conv}为平均对流换热系数；N_u为平均努塞尔数；λ_{air}为空气的热导率；L为定型尺寸，对于接触线，L为它的直径，而对于滑板，L为它的长与高之和的一半。

接触线和滑板的平均努塞尔数N_{uw}、N_{us}可分别表示为[14]：

$$N_{uw} = \left\{0.6+0.387\times R_L{}^{1/6}\times\left(\left[1+\left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}\right)^{-1}\right\}^2 \tag{13}$$

$$N_{us} = \begin{cases}0.54R_L^{0.25} & 2\times10^4 < R_L < 8\times10^6\\ 0.15R_L^{1/3} & 8\times10^6 < R_L < 1\times10^{11}\end{cases} \tag{14}$$

式中：Pr为普朗特数；R_L为瑞利数。

Pr与R_L二者关系为：

$$R_L = \frac{g\alpha\Delta t\cdot L^3}{v^2}Pr \tag{15}$$

式中：g为重力加速度；Δt为物体与气体的温差；v为气体的动力粘度；α为体积膨胀系数。

上述参数值均可在传热学手册中查找，根据式(12)~式(15)可估算出接触线和滑板在不同温度下的平均对流换热系数，结果如图3所示。由图3可知，接触线与滑板的自然对流换热系数随接触温度的上升而增大。

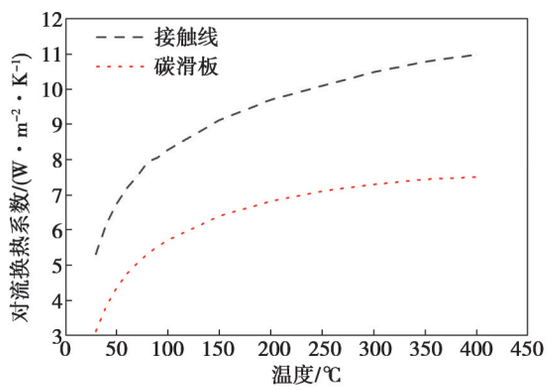


图3 自然对流换热系数理论值

Fig. 3 Theoretical value of heat-transfer coefficientin free convection

2 热–力–电耦合的弓网接触建模

2.1 有限元模型

为分析地铁车辆停站期间的弓网热–力–电耦合接触问题，采用有限元软件ABAQUS对弓网接触的热–力–电耦合行为进行多场耦合建模和数值分析。根据标准TB/T 2809建立直径为12.9 mm、截面积为120 mm²、长度为2 m的接触线模型，同时建立了磨损的接触线模型以便后续分析和讨论。为减少模型总单元数量，根据标准TJ/CL 328建立22 mm×36 mm×384 mm的滑板模型。网格划分后的模型如图4所示，整个模型的单元总数为286 912，最小单元尺寸为0.3 mm×0.3 mm×0.3 mm，模

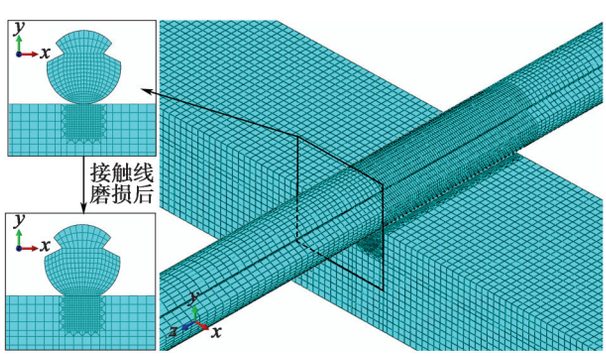


图4 弓网接触有限元模型

Fig. 4 Finite element model of pantograph-catenary contact

型的单元类型为Q3D8。这种热−力−电耦合块体单元包括了位移、温度和电势的自由度，满足分析需求。

有限元模型的部分边界如下：对滑板底部施加零电势边界和均匀分布的接触力，电流载荷施加于接触线端面，此时电流会经弓网接触区域流入滑板底部；在弓网接触界面定义接触电阻、接触热导系数，并在接触线和滑板表面设置对流换热系数。

表2[10, 16]为弓网接触模型中的材料参数，其密度、杨氏模量、比热容、泊松比、热膨胀系数参数均为各向同性，且在较小温升范围内不随温度变化[15]。同时，假设接触界面产生的焦耳热一半传递至接触线，另一半传递至滑板；热量仅以传导、对流方式进行传递和散逸。

表2　材料参数

Table 2　Material parameters

名称	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	热膨胀系数/(K^{-1})
纯碳滑板	1 670	36.5	0.425	769	3.50×10^{-6}
铜接触线	8 900	110	0.320	384	1.66×10^{-5}

2.2　模型的验证

为了验证有限元模型的准确性，首先通过ABAQUS软件完成本文模型的数值计算[17]，并将数值计算结果与其他文献的试验结果进行比对。文献[18]通过弓网载流试验台进行了弓网静态接触温升试验，并采用红外热成像仪对全局温度采集，得到接触体系的温度分布情况。对此，将本文计算的滑板最高温度与文献[18]测试结果进行对比。因文献未注明弓网接触压力的数值，因此，在载流电流相同的工况下，用多组接触力下的仿真结果与之对比，如图5所示。由图5可知，除个别数据点与仿真曲线有些偏离，其余数据点的分布趋势与本文仿真结果曲线的变化趋势一致，结果表明文中提出的有限元模型具有较好的准确度。

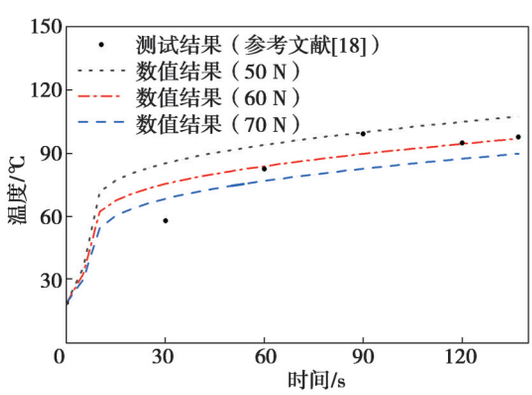


图5　数值计算结果与试验结果对比

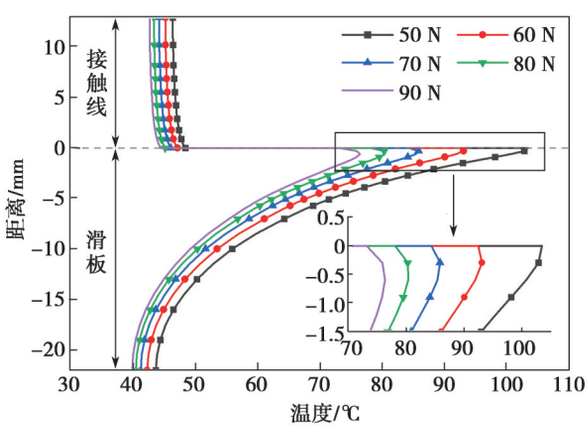
Fig. 5　Comparison between numerical calculation results and experiment results

3　弓网静态电接触温升分析

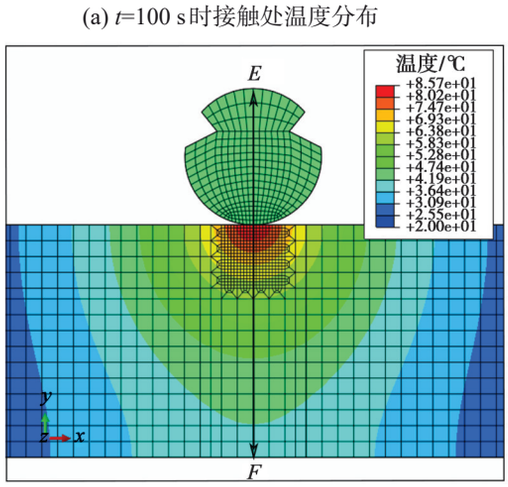
弓网静态电接触取流时，滑板热导率、接触力和接触线磨损程度是影响弓网接触温升的重要因素。本文对弓网静态电接触模型进行多场耦合分析，获取滑板及接触线的温度分布数据，重点比较了接触力、滑板热导率及接触线磨损程度对弓网静态电接触温升的影响。其中，滑板热导率对接触温升影响有助于优选滑板材料，而接触力和接触面积的变化有利于优化和调整弓网接触状态，进而达到降低弓网电接触温升的目的。

3.1　接触力对接触体温度的影响

为了研究弓网接触的温升规律，在不同接触力作用下对滑板和接触线的热−力−电耦合温度场进行数值分析，设置电流为100 A，接触时间为100 s，接触力分别为50~90 N，结果如图6所示。图6(a)为接触区域中心线[图6(b)的路径*EF*]上所有节点在不同接触力下的温度，图6(b)为70 N接触力时接触线和滑板节点温度的分布云图。由图6可知，随着接触力的增大，接触线、滑板的最高温度均降低，但接触线接触区温度显著小于滑板温度，且接触线内部整体温度分布比较均匀，同时，接触线的最高温度仍位于接触线表面。相反，在滑板内部则呈现出明显的温度梯度，另外随着接触力的增大，滑板的最高温度不在滑板表面，而是位于滑板接触区域下方的某一点，且接触力越大，最高温度位置距离滑板表面越深。进一步分析表明，



(a) *t*=100 s时接触处温度分布



(b) *F*=70 N，*t*=100 s温度云图

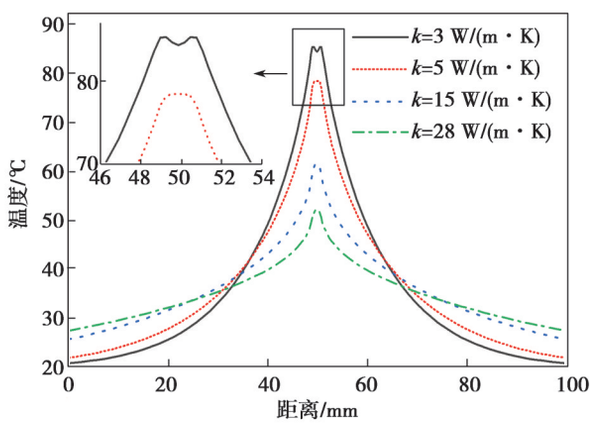
图6　弓网接触处温度分布情况

Fig. 6　Temperature distribution of photograph-catenary contact

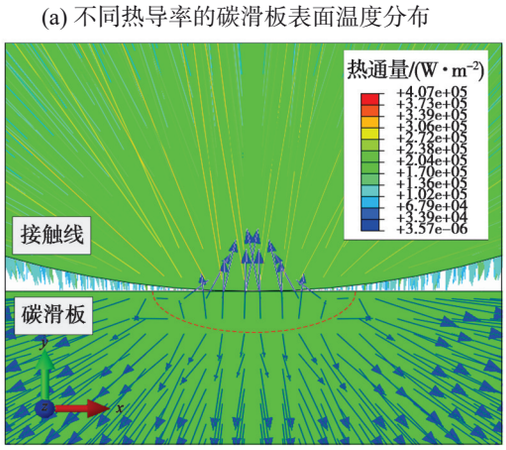
造成该现象的原因是滑板和接触线具有不同的热传导性能：滑板材料的热导率远低于接触线材料，因此向滑板内部的热传导相对较慢，同时在接触区域附近堆积了大量焦耳热，于是该堆积热量会经过接触面传递至接触线。随着接触力的增大，接触面积也将增大，通过接触面积传导的热量就越多，导致接近接触区域这部分的温度比距离滑板表面某一深度区域的温度低。

3.2 滑板热导率的影响

为进一步研究滑板热导率对碳滑板温度分布的影响，不改变其他参数设置，调整滑板材料的热导率数值，分别设定 k 为 3 W/(m·K)、5 W/(m·K)、15 W/(m·K)和 28 W/(m·K)，观察其接触温升情况。取滑板表面接触区域宽度为 100 mm 的直线作为路径，该路径上各节点的温度如图 7(a)所示。



(a) 不同热导率的碳滑板表面温度分布



(b) k=3 W/(m·K)时热流矢量图

图 7 热导率与碳滑板温度分布关系

Fig. 7 Relationship between thermal conductivity and temperature distribution of carbon contact strip

由图 7(a)可知，当热导率为 3 W/(m·K)时，滑板表面最高温度位于接触区域中心附近的两点；当热导率分别为 5 W/(m·K)、15 W/(m·K)和 28 W/(m·K)时，滑板表面最高温度位于接触区域的中心，而且热导率越高温度分布越均匀，同时最高温度的数值也越低。这是由于低热导率材料的热量在一定时间内无法快速散发导致热量集中，同时有效散热面积聚集在热量集中处；而高热导率材料可把热量较均匀分布在材料各处，使滑板表面最高温度低于热量集中的情况，同时增大了有效散热面积，并采用对流换热的方式通过空气将热量传递至外界环境。图 7(b)为弓网接触截面的热流矢量图，虽然接触线和滑板初始分配的热量相等，但由于接触线散热快、温升慢，而滑板散热慢、温升快，因此分配到滑板的热量有一部分又经接触区域流入接触线。在图 7(b)中，标注了具有不同热流方向的区域分界线(虚线)，其虚线附近的热流呈相反方向流动，一部分热流沿内法线方向向接触线传递，另一部分则朝反方向传递；因此图 7(b)中的虚线附近应为滑板的最高温度位置。

3.3 接触线磨损程度的影响

材料磨损是架空线与滑板滑动接触产生的一种常见现象，接触线材料的磨损使接触线与滑板的接触属性发生变化，进而影响接触温升情况。为了研究接触线磨损程度与滑板温升的关系，在建模阶段分别建立了接触线磨损厚度为其半径的 5%、10%、20%的有限元模型，保持其他参数设置不变，在电流 100 A、接触力 70 N、接触时间 30 min 的工况下进行仿真，所得的温升结果如图 8 所示。

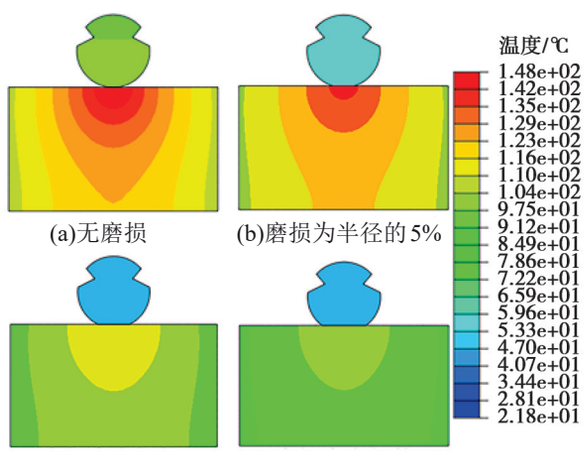


图 8 接触线磨损程度与温度分布关系

Fig. 8 Rrelationship between wear level of contact wire and temperature distribution

由图 8 可知，随着接触线磨损程度的增大，滑板和接触线的平均温度均降低。这是由于接触线磨损厚度越大，滑板与接触线的接触面积变大，线接触变为面接触，导致接触电阻变小，产生的焦耳热变小。对于滑板而言，有效接触的换热面积变大，则流入接触线的热量变多，因此滑板的温度也越低，而接触线可借助高热导率的优势将热量迅速传递至低温度处。根据分析结果，由此可对接触线的形状参数进行优化：即构造一种具有磨耗型轮廓的导线接触面来减小接触温升，从而优化弓网接触性能。

4　结语

本文在分析接触电阻、热导系数和对流换热系数的基础上，建立了弓网接触的热−力−电耦合有限元模型，研究了地铁进站或临时停靠时弓网在静止取流工况下的多场耦合温升特性，主要结论如下：①静态电接触下，接触电阻随接触力的增大而减小，随接触温度的上升而减小；接触力增大会导致接触热导系数增大。②滑板与接触线静态电接触的温升与接触力负相关，因此地铁车辆停车后可适当增加接触力，以减小其静态接触温升。③接触力和滑板材料的热导率影响滑板内部最高温度的分布位置，高热导率滑板的最高温度位于接触表面，有利于散热，并降低弓网接触温升。④接触线的磨损使接触线与滑板的接触面积增大后，降低了弓网接触温升，后续将对接触线的截面形态深入研究，设计一种磨耗型接触线，以减少弓网静态接触产生的热量。

参考文献：

[1] 董建明. 受电弓与接触网系统电接触特性初探[J]. 工程建设与设计, 2018(2): 111-112.
DONG Jianming. Primary study on electrical contact characteristics of pantograph and catenary system[J]. Construction & Design for Project, 2018(2): 111-112.

[2] NITUCA C. Thermal analysis of electrical contacts from pantograph-catenary system for power supply of electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96: 211-217.

[3] PLESCA A. Thermal analysis of sliding electrical contacts with mechanical friction in steady state conditions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 84: 125-133.

[4] 周悦, 魏文赋, 高国强, 等. 弓网电接触系统滑板温升特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(6): 74-80.
ZHOU Yue, WEI Wenfu, GAO Guoqiang, et al. Characteristics of temperature rise of pantograph strip in electric contact system between pantograph and catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 74-80.

[5] 陈惠娟, 许志红. 受电弓三维温度场仿真分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 227-232.
CHEN Huijuan, XU Zhihong. 3D temperature field simulation and analysis of pantograph[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2011, 39(2): 227-232.

[6] 陈忠华, 康立乾, 李本君, 等. 弓网系统受流摩擦下滑板温度分析与计算[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 1-5.
CHEN Zhonghua, KANG Liqian, LI Benjun, et al. Analysis and calculation on the slide plate's temperature of the pantograph and catenary system under current-receiving condition [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 1-5.

[7] 吴积钦, 钱清泉. 受电弓与接触网系统电接触特性[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 106-109.
WU Jiqin, QIAN Qingquan. Characteristics of the electrical contact between pantograph and overhead contact line[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 106-109.

[8] 吴积钦. 弓网系统电弧的产生及其影响[J]. 电气化铁道, 2008(2): 27-29.
WU Jiqin. Occurrence of arc in pantograph and overhead contact system and its interference[J]. Electric Railway, 2008(2): 27-29.

[9] GAO Shibin, WANG Ying, LIU Zhigang, et al. Thermal distribution modeling and experimental verification of contact wire considering the lifting or dropping pantograph in electrified railway[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(2): 256-265.

[10] 赵施林. 兰新高速铁路弓网系统动态接触电阻模型研究[J]. 电气化铁道, 2017, 28(5): 46-52.
ZHAO Shilin. Researches on dynamic contact resistance modeling for pantograph-catenary system of Lanzhou-Xinjiang high speed railway[J]. Electric Railway, 2017, 28 (5): 46-52.

[11] YOVANOVICH M M. New contact and gap correlations for conforming rough surfaces[C]//AIAA. 16th Thermophysics Conference. Palo Alto: AIAA, 1981.

[12] LAMBERT M A, FLETCHE L S. Thermal contact conductance of spherical rough metals[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(4): 684-690.

[13] YANG Hongjuan, WANG Kai, LIU Yanhua, 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, 454/455: 203343.

[14] 王厚华. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 177-185.
WANG Houhua. Heat transfer[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006: 177-185.

[15] 郭凤仪, 高洪鑫, 刘帅, 等. 载流滑动摩擦副温度场瞬态特性仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1715-1723.
GUO Fengyi, GAO Hongxin, LIU Shuai, et al. Simulation of transient temperature field of current-carrying sliding friction pair[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1715-1723.

[16] 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): 102-106.
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): 102-106.

[17] ABAQUS Inc. Abaqus/CAE User's Guide[Z]. [S. l.]: ABAQUS Inc., 2016.

[18] 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): 10-13.
LIU Ji, ZHANG Weihua, ZHOU Ning, et al. Research on temperature and static characteristics of pantograph slider [J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(4): 10-13.

收稿日期：2022-07-26
修回日期：2022-12-12