

# 高速滑动电接触导轨温度场与热应力的仿真分析

郑杜成<sup>1,2</sup>, 徐 蓉<sup>1,3</sup>, 成文凭<sup>1,3</sup>, 赵伟康<sup>1,2</sup>, 袁伟群<sup>1,3</sup>, 严 萍<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190)

**摘要:**在高速滑动电接触系统中, 导轨温升和热应力对导轨性能及系统的效率和安全具有重要影响。为分析高速滑动电接触导轨温度场和热应力特性, 利用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立了滑块运动条件下的电磁-传热-结构耦合模型, 并考虑了非理想接触条件对导轨温升的影响。仿真结果表明, 热量集中于导轨内表面, 在滑块起始位置处温度最高, 单次滑动电接触过程中导轨温度未达到材料熔点, 导轨内表面很小区域内的最大热应力接近材料的屈服强度。对圆弧型和直角型截面的导轨进行比较, 圆弧型截面导轨的温升和热应力均较小, 性能较好。仿真结果为导轨优化设计提供了理论依据。

**关键词:**滑动电接触; 热应力; 温度场; 非理想接触; 数值模拟

**DOI:** 10.12067/ATEEE1809049      **文章编号:** 1003-3076(2019)11-0033-06      **中图分类号:** TM8

## 1 引言

高速滑动电接触是脉冲大电流作用下的特殊滑动摩擦副, 其中滑块作为电磁能-动能转换的关键部件, 在电磁力作用下沿导轨高速滑动, 并要求与导轨保持良好的电接触性能<sup>[1,2]</sup>。高速滑动电接触系统承受极端的电磁-热-力学载荷的综合作用, 相比电刷和弓网系统等传统的滑动电接触形式更为复杂<sup>[3,4]</sup>。作为兆焦级别的能量系统, 导轨在短时间内产生大量的热, 重复运动状态下导轨热量不断累积, 严重影响材料性能和系统效率及安全。国内外研究人员对高速滑动电接触导轨的温度场进行研究, 得到了一些基本规律<sup>[5-8]</sup>, 但目前对热应力的分析相对较少。

温度场的不均匀分布使导轨产生极大的瞬时热应力, 将对导轨材料和电接触性能造成恶劣影响。唐波等人通过有限元编程计算分析了由电流趋肤效应引起的热应力, 结果表明在导轨表面很小区域内的温度集中引起很大的热应力, 并指出热应力对导轨的危害比滑块更大<sup>[9]</sup>, 但其未考虑非理想接触条件的影响。李小将等利用 ANSYS Workbench 将平

均热流量沿滑块运动位移进行等时间间隔离散, 对温度场和热应力进行了仿真分析<sup>[10]</sup>, 这种方法忽略了电流的趋肤效应, 并且与系统短时间内热流量急剧变化的实际特点相差较大。Sikhanda Satapathy 等对导轨覆盖层的热应力进行计算分析, 表明使用覆盖层可获得更小的热应力, 有利于提高系统的寿命<sup>[11]</sup>。针对上述模型中存在的不足, 本文利用 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元分析软件建立含有运动滑块的三维瞬态仿真模型, 综合考虑电流趋肤效应和接触电阻、滑动摩擦等非理想接触条件对导轨温升的影响, 进而对导轨温度场和热应力进行仿真分析, 并对比不同形状导轨的性能差异。

## 2 仿真计算模型

高速滑动电接触典型装置如图 1 所示, 主要组成部件为导轨和滑块。脉冲大电流从一根导轨端部流入, 另一根导轨端部流回, 导轨传导电流并起导向作用, 在脉冲大电流与其产生的磁场相互作用产生的电磁力作用下, 滑块将沿着导轨加速运动。

### 2.1 建立模型

本文采用的导轨截面为圆弧型, 导轨宽度为

收稿日期: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875546; 51577178)

作者简介: 郑杜成(1993-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术;

徐 蓉(1981-), 女, 甘肃籍, 副研究员, 博士, 研究方向为高电压绝缘技术、脉冲功率技术。

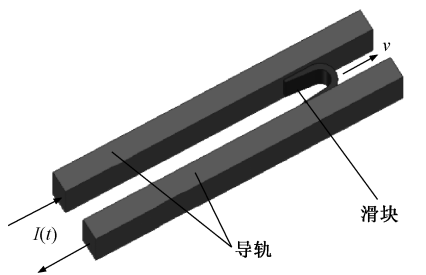


图1 高速滑动电接触装置示意图

Fig.1 Schematic of sliding electrical contact device

30mm,厚度14mm,长为1.5m,材料为铜合金;滑块材料为铝合金,滑块的质量约为22g,具体材料物性参数见表1。其中, $\mu_r$ 为相对磁导率, $\sigma$ 为电导率, $k$ 为热导率, $\rho$ 为材料的密度, $C_p$ 为恒压比热容;只对导轨进行应力分析,故只列出导轨材料的热胀系数 $\alpha$ ,弹性模量 $E$ ,泊松比 $\nu$ ,假定材料为各向同性,且材料物性参数不随温度变化。在装置周围设置空气域以解算电磁场。由于结构对称性只需对其1/4建模,建立的模型如图2所示,为便于显示对长度进行了缩减。本文中滑块的运动通过“移动电导率”的方法实现<sup>[8]</sup>,即在图2中所示的滑块运动区域使用高电导率区域代表金属滑块,低电导率区域为空气域,滑块运动则高电导率区域随之移动。

表1 仿真模型的材料物性参数

Tab.1 Material property parameters

参数	$\mu_r$	$\sigma/$ (S/m)	$k/$ (W/(m·K))	$\rho/$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p/$ (J/(kg·K))
导轨	1	$4.63 \times 10^7$	171	8890	385
滑块	1	$2.43 \times 10^7$	185	2700	897
参数	$\alpha/(1/K)$	$E/Pa$	$\nu$		
导轨	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{11}$	0.35		

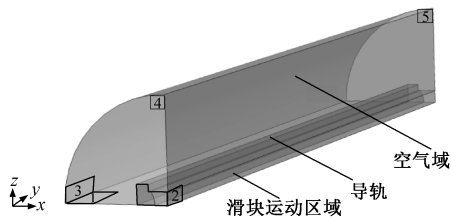


图2 仿真模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulation model

2.2 控制方程

根据准静态条件下的麦克斯韦方程组引入矢量磁位和标量电位可得到式(1)、式(2),结合库仑规范即可对电磁场进行求解;热扩散方程如式(3)所示,其中热源的组成在下面详细介绍;式(4)为滑块

的刚体运动方程;将电磁场与温度场进行耦合,并考虑滑块的运动特性,即可对导轨温度场进行仿真分析。将温度场的计算结果耦合到结构场,并设置适当的约束,对热应力进行仿真计算<sup>[12]</sup>。各向同性材料热应变如式(5)所示。

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu} [\nabla \times \nabla \times \mathbf{A}] + \sigma \nabla \varphi = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \sigma (-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi) = 0 \tag{2}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \tag{3}$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F - f \tag{4}$$

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \tag{5}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_V \tag{6}$$

式中, $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; $\varphi$ 为标量电位; $T$ 为温度; $t$ 为时间项; $Q$ 为热源; $y$ 为滑块的位移; $m$ 为滑块质量; $F$ 为滑块运动的电磁驱动力, $f$ 为摩擦阻力; $\varepsilon_T$ 为热应变; $u$ 为位移; $\mathbf{S}$ 为应力; $\mathbf{F}_V$ 为体积力,本文中该项设为0。

2.3 导轨主要热源

导轨的热源主要由三部分组成:导轨本体焦耳热、导轨-滑块接触电阻的焦耳热、滑动摩擦热。其中后两项考虑滑块-导轨非理想接触条件对温度场的影响。各项热源分别用 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 表示,具体计算方法如下。

(1) 导轨本体焦耳热

电流流经导轨所产生的焦耳热功率密度与电流密度分布和导轨的电导率有关:

$$q_1 = \mathbf{J}^2 / \sigma \tag{7}$$

式中, $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\sigma$ 为导轨材料的电导率。

(2) 接触电阻焦耳热

导轨-滑块之间的接触实际上为不连续的斑点接触,Hsieh等人<sup>[13]</sup>建立了接触表面热通量模型,假设接触区域为连续的接触表面,通过施加边界热源,即可模拟非理想接触的焦耳热效应,热流密度表达式为:

$$q_2 = \rho_c l_c \mathbf{J}^2 \tag{8}$$

式中, $\rho_c$ 为接触电阻等效电阻率; $l_c$ 为接触电阻层的厚度; $\mathbf{J}$ 为电流密度。结合文献资料<sup>[13]</sup>并考虑到重复滑动条件下导轨表面累积的沉积层会使接触电阻增大,这里 $\rho_c l_c$ 取为 $5 \times 10^{-9} \Omega \cdot m^2$ 。

### (3) 摩擦热

滑块沿着导轨加速运动,假设摩擦力做功全部转化为热量而被吸收,其热流密度的表达式为:

$$q_3 = \mu P v \quad (9)$$

式中, $\mu$  为摩擦系数; $P$  为滑块-导轨间的接触压强; $v$  为滑块相对运动速度。高速度、大电流使高速滑动电接触界面的摩擦系数变小<sup>[14]</sup>,而接触界面产生的金属液化层又具有润滑作用<sup>[15]</sup>,根据各文献数据,为简化计算本文将摩擦系数取为 0.1。滑块-导轨间的接触压强,由机械预紧接触压力和电磁接触压力两部分组成,预紧接触压力设为 3000N,电磁接触压力为电磁力的垂直分量,可通过仿真软件计算得到,本文中假设接触压力均匀分布。

### 2.4 定解条件

如图 2 所示,磁场边界 1 处与磁感应强度方向垂直, $n \times H = 0$ ;边界 2 处与磁感应强度相切, $n \times A = 0$ ;空气域的边界 3 可视为无穷远, $n \times A = 0$ ;在边界 4、5 上  $A$  的方向与电流方向一致,可设为  $n \times A = 0$ 。电场的边界条件为:在导轨端面给定时变电压激励,滑块运动区域的对称面设为零电位,即可构成电流通路。 $A$  和  $\varphi$  的初始值均为 0。由于滑块运动时间为毫秒量级,将导轨与空气域视作绝热处理,即施加边界条件  $n \cdot \nabla T = 0$ ,温度  $T$  的初始值设为 20℃。考虑实际装置中绝缘支撑体系的作用,应力场在导轨背面设置固定约束。

## 3 仿真结果及分析

仿真计算得到的电流波形和滑块运动的位移及速度曲线如图 3 所示。驱动电流为脉冲大电流,上升沿约为 0.5ms,峰值约 550kA。滑块在 1.8ms 时从出口滑出,滑出速度约为 1400m/s。

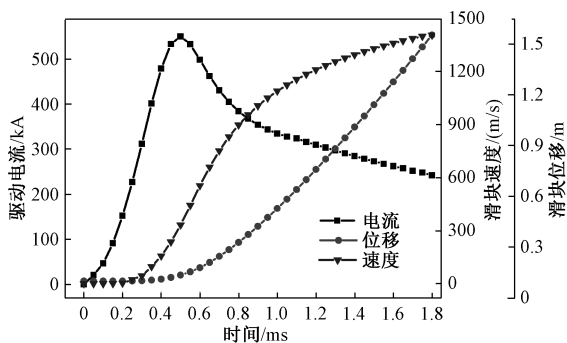


图 3 驱动电流波形及滑块的运动位移和速度曲线

Fig.3 Driving current waveform and motion displacement and velocity curve of slider

### 3.1 导轨温度场

仿真计算得到的 0.6ms 和 1.75ms 时刻导轨温度分布如图 4 所示。滑块不断向前运动,导轨高温区域不断向着出口方向延伸,导轨高温区域主要集中在内表面,并且最高温度始终出现在滑块起始位置附近,在滑块与导轨接触界面的边沿温度最高,0.6ms 时刻导轨温度最高为 200.2℃,1.75ms 时刻导轨温度最大值为 138.5℃,均未达到材料的熔点或软化温度。另外轨道内表面上边沿温度较高,0.6ms 时刻约为 70℃;导轨内部温度较低,中心区域接近室温。

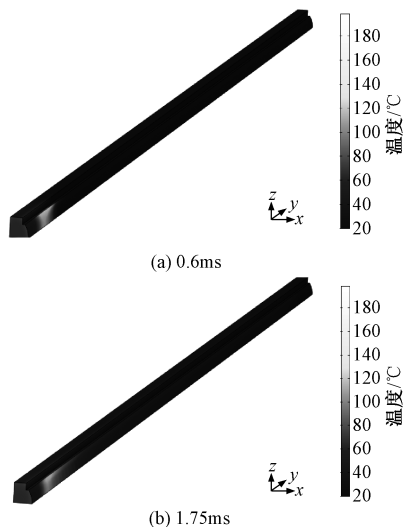


图 4 不同时刻导轨温度分布图

Fig.4 Rail temperature distribution

在单次电流驱动过程中,滑块沿着导轨向前加速运动,随着时间的增加导轨尾部的电流逐渐由内表面扩散至内部,但在导轨与滑块接触区域附近,电流尚未完全扩散,导致该处电流密度较大,相应地焦耳热效应更为显著。导轨不同位置处受热时长不同,滑块起始位置附近加热时间较长,温升严重。由于电磁场的邻近效应和脉冲电流的趋肤效应导致电流密度在导轨内表面集中,又因内表面同时存在高速滑动摩擦热作用,使其温升更为严重。另外在实际运动过程中,运动起始阶段滑块与导轨的接触状态较差,接触电阻很大<sup>[3]</sup>,会加剧滑块起始位置处热量集中的现象。

图 5 为距导轨尾部 0.09m 处横截面的温度分布云图,导轨内表面的温度明显高于导轨内部,并且在运动过程中,呈现温度由内表面向导轨内部扩散的趋势,导轨的高温仅出现在距内表面约 1~2mm 的范围内。以导轨圆弧面中心线位置为例,0.6ms



时刻在接触界面上温度为 134.6℃,距离接触界面以下 0.2mm、0.5mm、1mm 深度的位置处,温度分别为 113.7℃、85.8℃、48.7℃,随着与导轨内表面距离的增加,导轨温度迅速减小。导轨温度场这种时间和空间梯度极大的特点会使热应力以热冲击的形式表现出来。

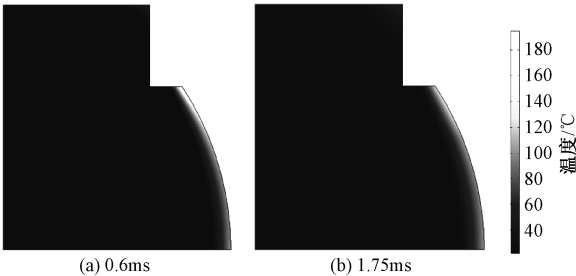


图 5 不同时刻导轨横截面温度分布

Fig.5 Rail cross-section temperature distribution

3.2 导轨热应力

金属导轨内部的温度分布不均匀,各质点之间相互制约,加之结构上存在外在约束,使其不能完全自由胀缩而产生热应力。0.6ms 导轨热应力分布如图 6 所示,其分布特点与温度分布类似,在滑块起始位置附近区域出现了高热应力集中的区域,最大热应力出现在导轨与滑块接触界面的边缘,最大值为 378MPa,之后随着导轨内表面温度的降低,最大热应力值随之减小,滑块运动至装置出口时,导轨最大热应力值为 252MPa。图 6 右图为 0.6ms 滑块起始位置处导轨截面热应力分布示意图,其中深色区域热应力数值超过 200MPa,仅集中在接触界面边缘很小的区域内。

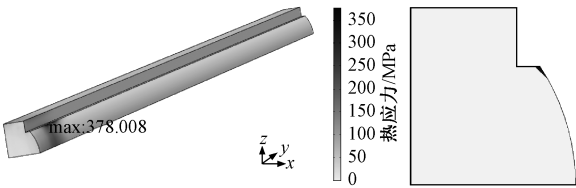


图 6 0.6ms 导轨热应力分布

Fig.6 Rail thermal stress distribution

所选用的铜合金材料室温下的屈服强度高于 400MPa,而随着温度升高材料的屈服强度会有所降低。单次滑动电接触过程中,导轨内表面出现瞬态高温;而在重复运行条件下导轨热量不断累积,若热量不能及时消散,导轨温度上升,会致使材料性能下降,导轨局部小区域内出现瞬时热应力超过材料屈服强度的情况。高频重复滑动条件下,导轨内表面

重复性地受热应力作用,局部区域产生循环应变,可能会引起导轨局部材料的热疲劳。热应力与电磁力、摩擦力等不同载荷综合作用将会最终造成导轨表面的损伤。图 7 为重复试验后滑块起始部位的导轨样品截面照片,试验条件与仿真参数基本一致,其中标明了导轨出现明显损伤的部位。在滑块与导轨接触区域的两侧边沿部位出现明显的“犁沟”状损伤<sup>[16]</sup>(实际试验中滑块的宽度小于导轨的弧面,即接触区域小于导轨弧面宽度),仿真中最高温度和热应力集中区域均出现在导轨与滑块接触区域的外边沿,仿真得到的基本规律与试验现象一致。这一方面证明了温度场和热应力仿真的合理性,又从另一方面说明了导轨上的瞬时高温和极大的瞬时热应力是造成导轨内表面损伤的重要原因。

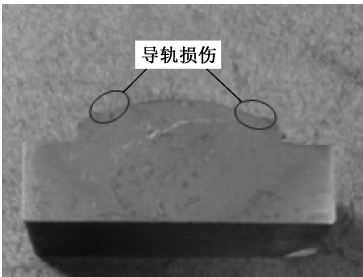


图 7 试验后导轨截面照片

Fig.7 Picture of rail section after tests

3.3 不同截面形状导轨对比

目前试验中除了最普通的矩形导轨外,常使用 T 型、弧形等不同形状结构的导轨。这里将导轨截面形状改为直角型,其他条件均不变,对比分析直角型和圆弧型截面导轨的温度场和热应力性能差异。

不同截面形状导轨的温度和热应力分布规律一致,其最大值均出现在内表面滑块起始位置处。图 8、图 9 分别为导轨最大温度和导轨热应力最大值随时间的变化曲线。圆弧型截面导轨的温度和热应力均小于直角型导轨,圆弧型导轨最高温度为 200.2℃,直角型导轨最高温度则为 395.7℃;圆弧型导轨最大热应力为 378.0MPa,直角型导轨最大热应力则为 527.9MPa。并且圆弧型的温度及应力分布更为均匀,直角型导轨的热应力极大值集中在内表面边沿的很小区域,这将对导轨造成更为严重的损伤。分析其原因主要是导轨结构差异引起电流密度分布不同。图 10 为脉冲电流上升阶段截面电流密度分布,直角型截面导轨在尖角处电流密度集中,由于焦耳热功率与电流密度的平方相关,由接触电阻焦耳热产生的瞬时高温更加严重,其尖角温度明

显高于弧形截面导轨,相应的热应力也更大。因此从温升和热应力来看,圆弧型截面导轨比直角型截面导轨性能更好。

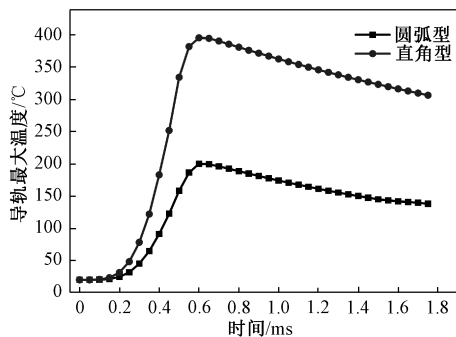


图8 不同截面形状导轨最大温度变化

Fig.8 Rail temperature with different cross-section shapes

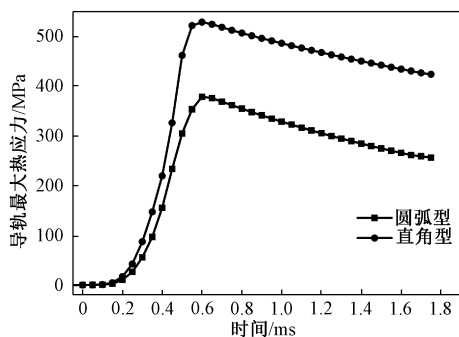


图9 不同截面形状导轨最大热应力变化

Fig.9 Rail thermal stress with different cross-section shapes

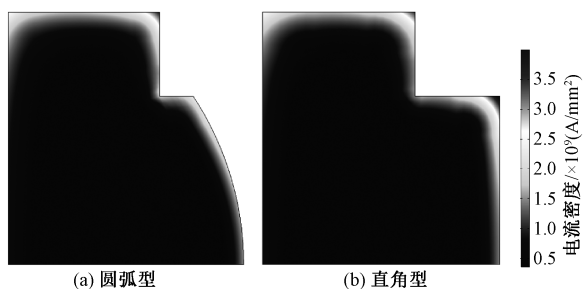


图10 不同截面形状导轨电流密度分布

Fig.10 Current density distribution of rails with different cross-section shapes

## 4 结论

本文利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了含有运动滑块的高速滑动电接触系统仿真模型,主要得到以下结论:

(1) 导轨最大温度出现在滑块起始位置,并且内表面温度远高于导轨内部,单次运动条件下最高

温度未达到材料的熔点。

(2) 导轨接触界面上滑块起始位置附近出现高热应力集中区域,单次运动条件下导轨局部最大热应力值接近材料的屈服强度。

(3) 圆弧型截面导轨的温升和热应力均小于直角型截面导轨,性能更好。

本文的仿真分析对导轨优化设计具有一定的指导意义;另外通过对热应力的分析可以说明,在设计导轨热管理方案时,除考虑高效降低导轨温度外,还应使导轨温度分布尽量均匀,以减少导轨局部热应力过大造成的损伤。

## 参考文献 (References):

- [1] Fair H D. The past, present and future of electro-magnetic launch technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43 (5): 1112-1116.
- [2] 李军, 严萍, 袁伟群 (Li Jun, Yan Ping, Yuan Weiqun). 电磁轨道炮发射技术的发展与现状 (Electromagnetic gun technology and its development) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (4): 1052-1064.
- [3] 袁瑞敏, 袁伟群, 徐伟东, 等 (Yuan Ruimin, Yuan Weiqun, Xu Weidong, et al.). 电磁发射中枢轨接触电阻特性研究 (Research on contact resistance between armature and rails in electromagnetic launch) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 45-50.
- [4] 赵伟康, 徐蓉, 袁伟群, 等 (Zhao Weikang, Xu Rong, Yuan Weiqun, et al.). 电磁轨道发射装置绝缘问题的研究进展 (Research progress on insulation problems in electromagnetic rail launcher) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 63-72.
- [5] Harold V, Sikhanda S. Thermal characteristics of a laboratory electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (1): 1106-1112.
- [6] Motes D, Keena J, Womack K, et al. Thermal analysis of high-energy railgun tests [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40 (1): 124-130.
- [7] 林庆华, 栗保明 (Lin Qinghua, Li Baoming). 电磁轨道炮瞬态温度场的数值模拟 (Numerical simulation of transient temperature field in the electromagnetic railgun) [J]. 工程热物理学报 (Journal of Engineering Thermophysics), 2017, 38 (1): 149-154.
- [8] Lin Lingshu, Yuan Weiqun, Zhao Ying, et al. Thermal analysis on electromagnetic launcher under transient condi-

- tions [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45 (7): 1476-1481.
- [9] Tang Bo, Lin Qinghua, Li Baoming. Research on thermal stress by current skin effect in a railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45 (7): 1689-1694.
- [10] 李小将, 万敏, 王志恒, 等 (Li Xiaojiang, Wan Min, Wang Zhiheng, et al.). 电磁轨道炮轨道温度场与热应力数值仿真 (Numerical simulation of temperature field and thermal stress in electromagnetic railgun) [J]. 火力与指挥控制 (Fire Control & Command Control), 2017, 42 (2): 154-158.
- [11] Sikhand S, Chadee P. Thermal stress in EML rail conductor overlays [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1): 269-274.
- [12] 丁勇 (Ding Yong). 弹性与塑性力学引论 (Introduction to elasticity and plasticity mechanics) [M]. 北京: 中国水利水电出版社 (Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press), 2016.
- [13] Hsieh K T, Satapathy S, Hsieh M T. Effects of pressure dependent contact resistivity on contact interfacial conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 313-318.
- [14] 李鹤, 雷彬, 吕庆敖, 等 (Li He, Lei Bin, Lv Qing'ao, et al.). 电磁轨道炮电枢接触界面温度场仿真研究 (Simulation of temperature distribution on contact surface of armature for electromagnetic railgun) [J]. 润滑与密封 (Lubrication Engineering), 2012, 27 (11): 22-26, 38.
- [15] Stefani F, Parker J V. Experiments to measure gouging threshold velocity for various metals against copper [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35 (1): 312-316.
- [16] 王志增 (Wang Zhizeng). 瞬态情况下枢轨多物理场特性研究 (Study of multi-physics characteristics for rail and armature under transient conditions) [D]. 北京: 中国科学院大学 (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences), 2016.

## Simulation analysis of temperature field and thermal stress of rail in high speed sliding electrical contact system

ZHENG Du-cheng<sup>1,2</sup>, XU Rong<sup>1,3</sup>, CHENG Wen-ping<sup>1,3</sup>, ZHAO Wei-kang<sup>1,2</sup>,  
YUAN Wei-qun<sup>1,3</sup>, Yan Ping<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In high speed sliding electrical contact system, rail temperature rise and thermal stress have a major impact on rail performance and system efficiency and safety. In order to analyze the temperature field and thermal stress characteristics of the rail, the electromagnetic-heat transfer-structure coupling model under slider motion is established by using COMSOL Multiphysics finite element analysis software, and the influence of non-ideal contact conditions on the temperature of the rail is considered. The simulation results show that the temperature of the rail is the highest at the starting position of the slider, and the temperature rise of the inner surface of the rail is serious. During the sliding process, the temperature of the rail does not reach the melting point of the material, but the maximum thermal stress is close to the yield strength of the material. Comparing the rail of convex type and the flat type, the temperature rise and the thermal stress of the convex type are small and its performance is good. The simulation results provide a theoretical basis for the optimization design of the rail.

**Key words:** sliding electrical contact; thermal stress; temperature field; non ideal contact; numerical simulation