

大载流高速滑动电接触表面瞬态温度分析

张玉燕^{①②*}, 李海龙^{①②}, 王振春^③, 温银堂^③, 战再吉^③

① 燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004;

② 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 秦皇岛 066004;

③ 燕山大学科学技术学院, 秦皇岛 066004

* E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

收稿日期: 2015-03-03; 接受日期: 2015-05-11

国家自然科学基金(批准号: 61403333)资助项目

摘要 高速滑动过程中接触表面瞬态高温会改变接触表面环境, 烧蚀接触表面, 加重摩擦磨损. 本文针对大载流下高速滑动电接触表面瞬态温度场进行测量与分析研究, 结合传热学和有限元基本理论, 对接触表面瞬态温度场进行热分析, 建立温度场计算模型, 研究了不同热源对接触表面温度场的影响. 利用高速滑动电接触试验机, 采用非接触式辐射测温方法, 对大载流高速滑动电接触瞬态温度进行测量, 并将实际测量数据与有限元模拟结果相结合, 验证了仿真模型的正确性, 进一步分析了滑动速度及电流载荷的变化对接触表面温度场的影响. 本文对大载流高速滑动电接触表面温度场的研究结果, 为如何降低接触表面温度、选择合适接触材料以及减小损耗等提供了技术依据.

关键词高速滑动电接触
大载流
瞬态温度

1 引言

高速滑动电接触是一种具有载流作用的特殊摩擦副, 在高速电气化铁路系统、城市轨道交通的电力传输系统、工业使用的发电机和航空航天领域起着至关重要的作用^[1-4].

在高速滑动电接触过程中, 物体一般处于电磁场、温度场、应力场耦合的复杂环境, 滑动电接触元件在电气方面和机械方面相互依赖、相互制约、相互作用^[5]. 滑动电接触过程中, 接触表面会产生不同程度的温升, 特别是在大载流、高速的情况下, 滑动电接触表面温度会迅速升高, 瞬态产生的高温不仅严重影响接触元件的导电性能, 而且对金属合金接触表面产生磨损腐蚀的作用, 导致耐磨损性能下降, 严

重时能引发意外事故^[6-8]. 因此, 直接测量高速滑动电接触表面瞬态温度、进而分析温度对接触表面的影响, 对于研究大载流下高速滑动电接触的物理特性具有非常重要的意义.

在高速滑动过程中, 滑块与接触轨道紧密接触, 滑动接触面通常不外露, 并且载荷电流较大, 使得对滑动接触表面瞬态温度进行直接监测非常困难. 传统的滑动接触表面温度测温一般选用热电偶接触式测量, 但其使用寿命短、响应速度慢、测温实时性差、误差较大, 不适用于接触表面瞬态高温测量系统. 而非接触式辐射测温, 测温范围广、响应速度快、灵敏度高, 且非接触整体测温过程中并不破坏表面瞬态温度的分布, 所以非常适合强电磁场中大载流下高速滑动电接触表面瞬态温度的测量.

引用格式: 张玉燕, 李海龙, 王振春, 等. 大载流高速滑动电接触表面瞬态温度分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 834-842
Zhang Y Y, Li H L, Wang Z C, et al. Analysis of surface transient temperature on large current carrying high-speed sliding electrical contact (in Chinese).
Sci Sin Tech, 2015, 45: 834-842, doi: 10.1360/N092014-00391

近年来,国内外学者针对载流高速摩擦副做了大量的研究工作.戴利民等将有限元计算和实测温升相结合,系统研究了低电流不同热源对滑板接触表面温升的影响^[9];郭凤仪等人^[10]对不同载流条件下的滑动电接触特性进行了分析,对滑动电接触过程中的最小温升进行了计算研究^[11],并以弓网系统摩擦副为研究对象,建立温度场模型,进行了滑动电接触温升模拟^[12];Dong等人^[13]建立了相应的钢铝复合轨/受电靴的温度场模型,对滑动电接触耦合最高温度变化趋势进行了研究;夏胜国等人^[14]对大载流高速滑动电接触进行了试验研究;Senouci等人^[15]和Bryant等人^[16]对滑动电接触过程的热量进行研究;Plesca^[17],Argibay和Sawyer^[18]对大电流密度条件下的滑动电接触表面温度进行重点研究;Morita等人^[19]对不锈钢与钢环两种不同材料电刷的滑动接触特征进行了研究;Nituca^[20]根据电动汽车电源建立了热模型,可根据此模型用来研究不同载流下电接触热行为;Rowe等人^[21]采用原位热测量法对滑动过程中的接触温度进行了测量,此方法适用于低速下滑动电接触.目前多数是关于1000 A以内的研究,关于kA级极端大载流条件下的高速滑动电接触表面温度变化的研究报道则相对很少.

本文以高速滑动电接触试验机为平台,进行了不同载流、不同速度载荷特别是大载流(350 kA以内)下的高速滑动电接触实验,采用非接触式辐射测温,对处于强电磁场环境下的接触表面瞬态温度进行测量研究.结合传热学和有限元基本理论,对高速滑动电接触表面瞬态温度场进行热分析,系统研究分析滑动过程中不同热源(机械摩擦热、接触电阻热和电弧热)对接触表面温度的影响.通过实时温度测量与有限元模拟相结合,深入分析影响滑动接触表面温度变化的主要因素,揭示接触表面温度场及其变化特性.

2 接触表面温升来源

在大载流高速滑动过程中,接触表面温度的上升是由滑块与滑轨接触表面载流摩擦释放的热引起的.接触表面的热由三部分构成,即高速滑动时产生的机械摩擦热、接触电阻产生的焦耳热、接触瞬间中断时电流产生的电弧热.电流、电弧以及热的产生改变了滑动电接触的温度场变化,在大电流载荷下,导

致了接触表面瞬态温度升高.如(1)式所示:

$$Q = Q_f + Q_r + Q_w, \quad (1)$$

式中, Q_f 为机械摩擦热; Q_r 为接触电阻热; Q_w 为电弧热.

Q 所对应的总热流密度 q 主要来自机械摩擦热引起的热流密度 q_f ,接触电阻热引起的热流密度 q_r ,以及电弧热产生的热流密度 q_w ,如(2)式所示:

$$q = q_f + q_r + q_w. \quad (2)$$

2.1 机械摩擦热

在载荷作用下,滑动接触元件表面间因有相对滑动而产生了相对滑动摩擦,高速滑动摩擦过程中所做的功大部分转换成了热,这种相对滑动以及能量转换使得整体接触表面产生了温升.对实验机中滑块与滑轨接触形成的面—面摩擦副来说,由摩擦产生的热流密度 q_f 由下(3)式计算:

$$q_f = uFv, \quad (3)$$

式中, u 为摩擦系数; F 为接触压力; v 为相对滑动速度.

2.2 接触电阻热

表面光滑的滑块与滑轨接触部分在微观上其接触表面总是凹凸不平的.在高速滑动接触过程中,电流通过元件的接触内表面时,将集中流过那些极小的导电斑点.由于接触电阻的存在,大载流下接触电阻产生焦耳热,使得表面温度变化.电流通过导电斑点产生收缩效应引起的收缩电阻与表面膜电阻之和为整个高速滑动电接触的静态接触电阻^[22]

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} + R_f = \frac{\rho_1}{4n\alpha} + \frac{\rho_2}{4n\alpha} + \frac{\sigma}{\pi\alpha^2}, \quad (4)$$

式中, R_c 为接触电阻; R_{c1} 和 R_{c2} 为两接触面的收缩电阻; R_f 为膜电阻; n 为导电斑点个数; α 为导电斑点半径; ρ_1 和 ρ_2 为两接触材料电阻率; σ 为单位面积表面膜系数.

滑块与滑轨接触表面斑点通常是在表面膜层被机械破坏后才能形成.在大载流高速滑动过程中,随着滑动次数的增加,表面膜逐渐被滑动破坏.因此,在绝大多数情况下,膜层对总接触电阻的影响很小,表面膜电阻可以忽略不计.此时,接触电阻只有收缩电阻部分.即

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} = \frac{\rho_1}{4n\alpha} + \frac{\rho_2}{4n\alpha} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4n\alpha}. \quad (5)$$

实际接触面积在一定尺寸范围内, 流经该面的电流在接触点处收缩. 实际电接触面积

$$S = \frac{F}{n\xi H}, \quad (6)$$

式中, S 为单一接触点面积; F 为接触压力; n 为导电斑点个数; ξ 为修正系数; H 为接触硬度.

接触电阻热流密度 q_r 为

$$q_r = \frac{I^2 R_c}{nS} = \frac{I^2 (\rho_1 + \rho_2) \xi H}{4n\alpha F}. \quad (7)$$

2.3 电弧热

在滑块与滑轨高速滑动接触过程中, 瞬时接触斑点会发生脱离, 如果电流超过 0.25~1 A, 加在两接触面之间的电压超过 12~20 V, 则在滑块与滑轨接触表面间隙产生电弧^[23], 若加载电流电压更大, 则可能会使间隙气体电离, 产生高温高导电弧, 瞬间产生电弧热, 导致滑动电接触表面瞬态温度升高, 烧蚀材料, 造成接触不良.

电弧能量传导给接触表面, 接触表面在电弧作用下的热过程遵守热力学基本规律, 在电弧的加热作用下, 接触表面的瞬态温度随着距离与时间的变化可以归结为常热流快速加热半无限大物体的强瞬态热传导问题, 其中电弧热的热流密度 q_w 如(8)式所示^[24]:

$$q_w = q|_{x=0} + \tau_0 \frac{\partial q}{\partial \tau}|_{x=0}, \quad (8)$$

式中, τ 为时间; x 为距离.

3 瞬态温度场 ANSYS 仿真

为具体分析以上三种热源对高速滑动电接触表面瞬态温度场的影响, 进行了仿真研究. 使用 ANSYS 有限元软件建立了瞬态下的仿真模型, 选择特定的参数, 分别模拟在高速滑动过程中三种热源

的瞬态温度场分布情况.

为使问题易于处理, 对接触表面温升计算做如下假设.

1) 只考虑接触表面产生对流换热, 换热系数保持恒定; 2) 封闭系统中, 忽略热量外泄及辐射导致的热量损失, 忽略涡流导致的热量损失; 3) 忽略滑动过程中产生的磨屑带走极少热量; 4) 接触面机械摩擦产生热、接触电阻产生的热以及电弧热全部被接触表面吸收; 5) 在瞬态求解中, 忽略短时间内温度升高对滑动过程摩擦因数和接触电阻带来的变化; 6) 界面间的接触完全为固—固弹塑性接触, 即允许滑块温度持续升高, 不考虑超过熔点后, 滑块软化及熔化产生的熔层对滑动接触界面的影响.

根据以上 6 点假设, 可以把高速滑动电接触模型的传热问题简化为二维问题, 根据能量守恒原理, 瞬态热平衡公式如(9)式所示:

$$C\dot{T} + KT = Q, \quad (9)$$

式中, C 为比热矩阵; \dot{T} 为温度对时间的导数; K 为传导矩阵; T 为节点温度向量; Q 为节点热流率向量.

滑动边界条件为整个滑轨约束所有的自由度, 在滑块上表面施加接触压力载荷, 并保证接触表面边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}|_r = q_f + q_r + q_w, \quad (10)$$

其他表面边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}|_r = \alpha(T - T_0)|_r, \quad (11)$$

式中, k 导热率; Γ 物体边界; α 对流换热系数.

高速滑动电接触试验机实验条件下各项物理参数如表 1 所示. 在进行分析模拟之前, 建立高速滑动电接触试验机的二维模型, 选择合适的单元类型并对二维模型进行网格划分, 并设置相应实验载荷, 然后对模型进行下一步的研究分析.

3.1 机械摩擦热模拟仿真

定义工况条件为干摩擦, 设置参数, 带入上述边

表 1 试验机滑轨与滑块材料性能参数

实验参数	硬度 (N/m ²)	密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/(m·°C))	比热容 (J/(kg·°C))	弹性模量 (Pa)	泊松比	热膨胀系数 (°C ⁻¹)	电阻率 κ (Ω m)	摩擦系数 μ
滑轨	81.7×10 ⁷	8.9×10 ³	401	398	124×10 ⁶	0.32	16.6×10 ⁻⁶	0.18×10 ⁻⁷	0.19
滑块	57.1×10 ⁷	2.7×10 ³	237	902	70×10 ⁹	0.3	23×10 ⁻⁶	0.29×10 ⁻⁷	0.19

界条件, 当 $v=1000\text{ m/s}$ 时, 得到的机械摩擦温度分布云图, 如图 1 所示.

由图 1 可知, 在纯机械摩擦模拟条件下, 随着滑动进行, 滑块与滑轨接触面最高温度出现在滑块尾部, 其机械摩擦热最高温度为 171.7°C , 其温度值从接触面向四周呈递减趋势. 当滑动位移一定, 在恒定压力载荷下, 改变滑动速度, 进行多次模拟仿真, 可以得到对应的机械摩擦热温度分布云图. 图 2 所示为不同速度下的机械摩擦热最高温度曲线图. 由图 2 可见, 随着滑动速度的改变, 纯机械摩擦最高温度基本保持不变. 由(3)式可知, 摩擦产生的热流密度与滑动速度相关, 滑动速度越高, 滑块与滑轨接触时间越少, 对应的总热量 Q_f 值基本不变. 因此可认为滑动速度的改变对滑动相同距离下机械摩擦所产生的总热量 Q_f 的影响很小, 使机械摩擦热最高温度基本保持不变.

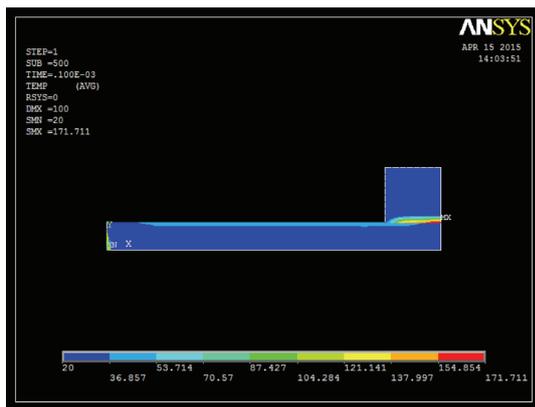


图 1 机械摩擦热最高温度分布云图

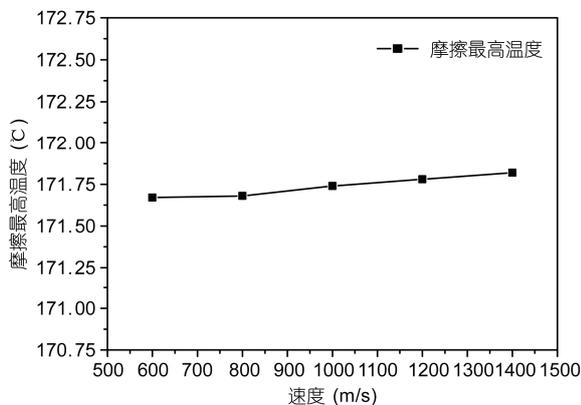


图 2 不同速度时机械摩擦热最高温度曲线图

3.2 接触电阻热模拟仿真

在接触电阻热的模拟过程中, 接触电阻热以热流密度的形式加载到模型上. 图 3(a)给出的是当 $v=1000\text{ m/s}$, $I=800\text{ A}$ 时接触电阻热温度分布云图, 最高温度为 186.8°C . 图 3(b)给出的是当 $v=1000\text{ m/s}$, $I=300\text{ kA}$ 时得到的接触电阻热温度分布云图, 最高温度为 326°C . 由图 3(b)可见, 在加载大载流以后模拟最高温度开始出现明显的上升. 随着滑块在滑轨的高速滑动, 接触电阻热接触区的温度值从电接触点向四周呈递减趋势, 且温度梯度越来越小.

图 4(a)显示的是在位移一定、恒定压力载荷条件下, 不同速度、电流在 $400\sim 1200\text{ A}$ 接触电阻热最高温度对比曲线图, 图 4(b)显示的是电流在 $100\sim 300\text{ kA}$ 接触电阻热最高温度对比曲线图.

由图 4(a)和(b)可知, 在位移一定、恒定压力载荷以及滑动速度 v 不变的条件下, 接触电阻热最高温度随电流 I 的增大而升高, 随相对滑动速度 v 的增大而降低. 由 2.2 节可知, 在位移一定、恒定压力载荷条

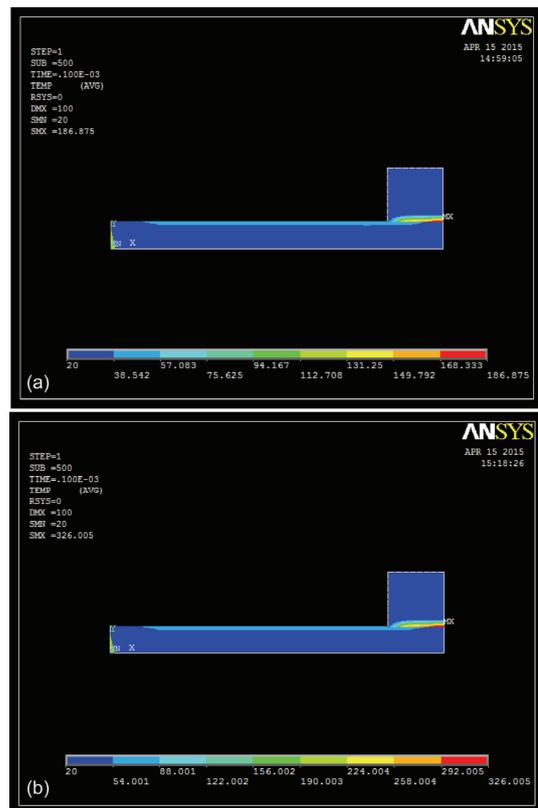


图 3 接触电阻热最高温度分布云图

(a) $I=800\text{ A}$; (b) $I=300\text{ kA}$

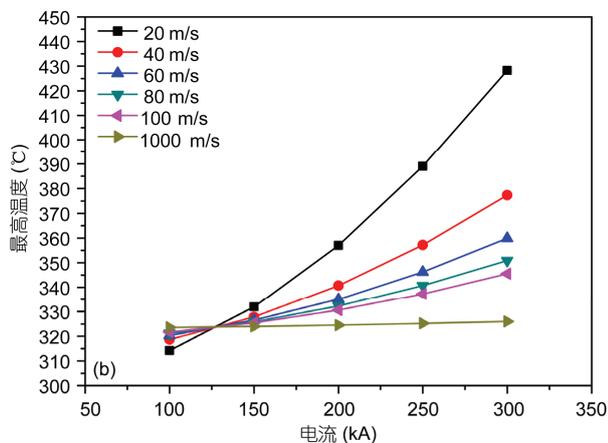
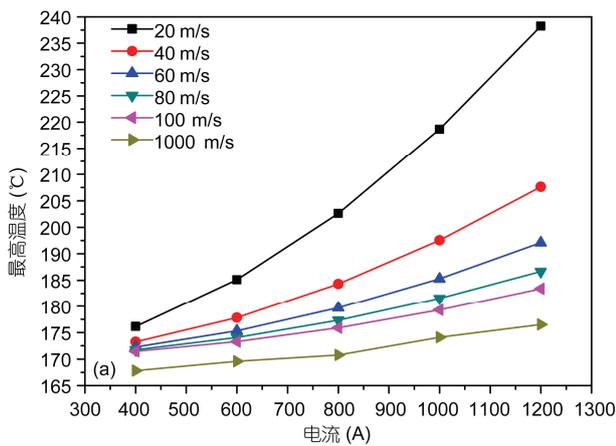


图4 接触电阻热最高温度对比曲线图
(a) $I=400\sim 1200$ A; (b) $I=100\sim 300$ kA

件下, 接触电阻不变, 接触电阻产生的热量随着电流 I 的增大而增大, 导致接触电阻热最高温度升高; 随着滑动速度 v 增大, 滑块在滑轨的滑动时间减少, 接触电阻产生热量减少, 导致接触电阻热最高温度降低; 随着输入电流 I 的增大, 在 $100\sim 300$ kA 大载流范围内接触电阻热最高温度明显比 $400\sim 1200$ A 内高出很多。

3.3 电弧热模拟仿真

图5给出的是 $v=1000$ m/s, $I=300$ kA 时得到的电弧热温度分布云图, 最高温度为 1200°C 。由图看出, 随着滑动过程的进行, 在短时间内, 滑块与滑轨接触中断, 接触表面温度由于电弧影响迅速升高, 温度主要集中在接触表面, 并向深层次进行热传递。图6显示的是电流 I 在 $100\sim 300$ kA 不同速度下电弧热最高温度对比曲线图。由图得, 随着滑动速度 v 增大,

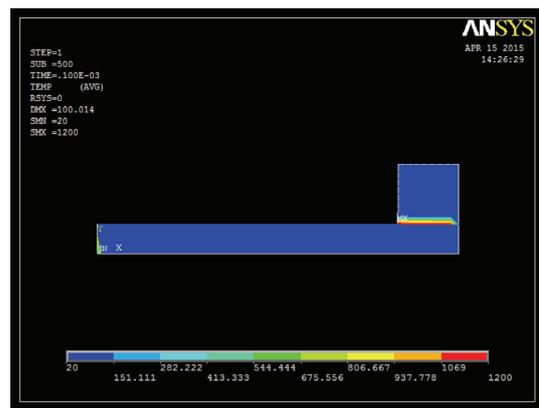


图5 电弧热最高温度分布云图

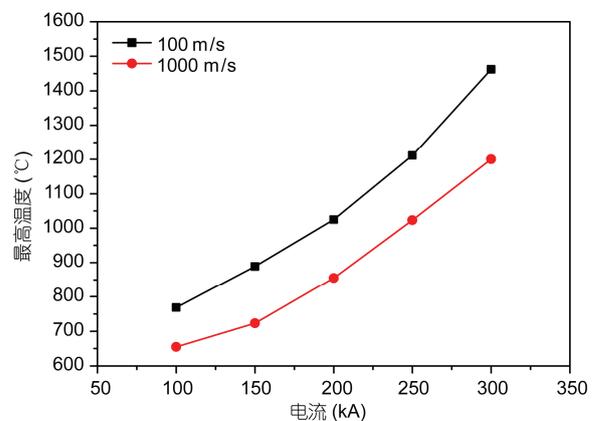


图6 电弧热最高温度对比曲线图

最高温度降低; 随着大电流载荷 I 的增加, 接触中断时产生电弧热造成温度不断升高。由此可见, 与机械摩擦热、接触电阻热带来的接触表面温升变化相比, 电弧产生的瞬间的热量是很大的, 如果没有及时散失, 电弧侵蚀过程中的热流输入会导致接触表面材料温度升高, 严重烧蚀表面材料, 损坏滑块以及滑轨。

通过上述关于机械摩擦热、接触电阻热以及电弧热的 ANSYS 有限元模拟仿真, 由分布云图得出在大载流高速的情况下, 摩擦热对表面温升影响较小, 接触电阻热及电弧热是造成接触表面温升变化的关键热源, 且所占比例较大, 产生时间短, 容易导致瞬间产生高温; 由对比曲线图得到在相同滑动速度条件下, 表面瞬态最高温度随着电流 I 的增大而增大; 在相同载流的条件下, 最高温度随滑动速度 v 的增大而降低。

4 温度测量实验结果及分析

4.1 温度测量实验平台

图7为高速滑动电接触试验机结构示意图, 此试验机滑动部位主要由滑块与滑轨构成. 滑轨长 2 m, 滑块 20 mm×17 mm×16 mm. 工作时, 对整个试验机加载瞬态脉冲电流, 滑块在滑轨上滑动, 为高速滑动电接触运动形式. 该试验机能够实现滑块与滑轨之间的最大滑动速度 v 为 2.5 km/s; 加载电流 I 最大可达 350 kA. 同时通过整体非接触式辐射测温模块实现对整个滑动电接触过程实时检测, 在试验机不同位置同时固定安装 3 路光学测温探头, 组成多路测温系统. 在实验过程中可以实现对高速滑动电接触表面瞬态温度参数的实时在线测量、储存, 以便后期数据处理.

4.2 测温系统结构

以实验室的大载流高速滑动电接触试验机为平台, 采用基于红外辐射原理的温度测量系统, 对大载流高速滑动电接触表面瞬态温度进行测量与分析.

整个测温系统结构框图如图8所示. 主要由光学系统, 光电检测, I/V 转换, 信号放大, A/D 转换, 数据显示六部分组成. 高速滑动电接触实验过程中, 接触表面温度的热辐射能量由已固定好的纤细光学探头进行快速收集, 为避免强电磁场环境对信号的影响,

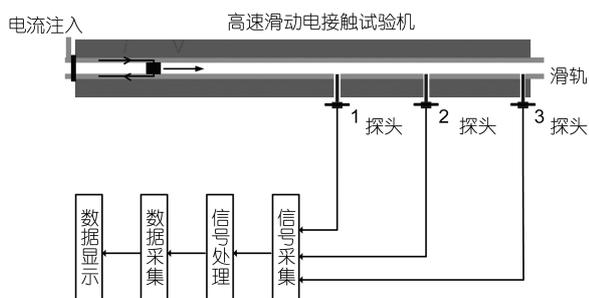


图7 高速滑动电接触表面瞬态温度测量整体原理图

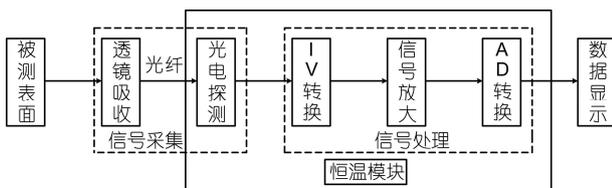


图8 测温系统结构图

经过光纤传输到远离试验机的光电探测器上, 光电探测器把所收集到的光信号转换为微弱的电信号, 之后对电信号进行信号调理, 在转换过程中一直处于恒温加热模块中以保证整个信号采集与处理过程的灵敏度与精确度. 对调理以后的信号进行采集并进行相关处理, 最终测量显示出接触表面的瞬态温度.

4.3 不同载流条件下温度测量结果

图9(a)、(b)分别给出了脉冲电流峰值在 100, 200 kA 时三个不同测量位置 1.2, 1.5, 1.8 m 处的温度变化曲线. 从图中可以看出, 在同一输入电流下, 滑块在滑轨上滑动的距离越远, 其接触面上的温度越高, 由于滑块相对滑轨做高速运动, 滑动距离的远近直接反应了滑块与滑轨表面接触时间的长短. 同一输入电流下, 即由大载流带来的影响一样的, 但由于滑动距离不断增加, 其热量不断增加, 带来的表面接触温度是增大的. 而所测位置 1、位置 2、位置 3 处的温度最高值在同一输入电流下会依次增加, 但增幅并不明显, 这主要由于滑块处于高速滑动, 温升不明显.

4.4 不同位置下温度测量结果

图10为加载不同瞬态电流时同一测量位置探头3处温度变化曲线. 由图可以看出, 随着加载瞬态电流的增大, 探头3位置处的温度会随之增高, 温度上升到最大值的时间明显缩短. 通过之前 ANSYS 有限元模拟得知, 在大载流情况下, 滑块在高速滑动的过程中与滑轨的接触面之间极易产生电弧, 电弧产生的热量使得滑块表面温度很高, 而由机械摩擦产生的摩擦热以及接触电阻本身产生的焦耳热与之相比就显得很小. 因此, 瞬态电流峰值的大小所造成的温度差异并不明显. 但电流的增大促使滑块运动速度增加, 滑块滑过同一位置的时间也会随之减小. 由此可见, 大载流下电弧不可避免的存在. 随着滑块在滑轨高速滑动, 瞬态电流的峰值大小对接触面温升产生的影响变得很弱, 同时也更容易引发电弧现象.

图11为 1000 m/s 时同一位置探头3处实际测量温度与有限元模拟温度对比曲线. 由图得, 在相同压力载荷、1000 m/s 速度条件下, 探头3位置处机械摩擦与接触电阻耦合仿真热在 425°C 左右, 而由于电弧热的存在, 接触表面整体模拟温度随着大电流载荷

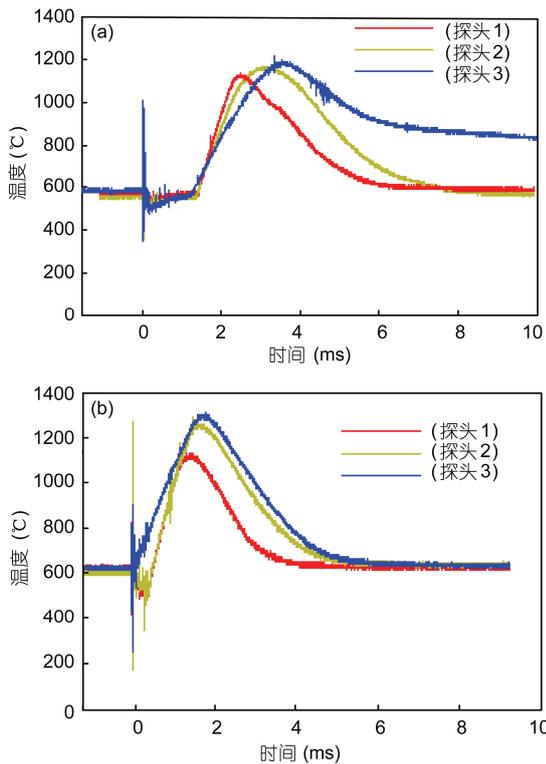


图 9 不同位置测量温度曲线图
(a) $I=100$ kA; (b) $I=200$ kA

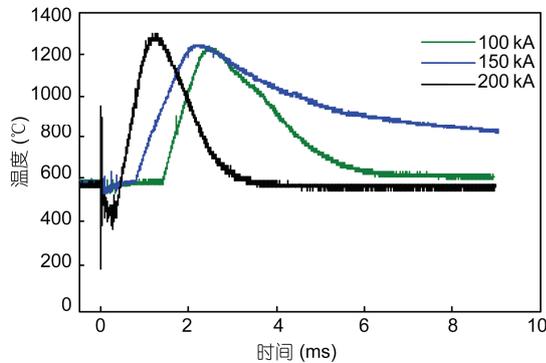


图 10 探头 3 位置处的测量温度曲线图

的增加而增加. 随着 kA 级别大载流的不断增大、滑块在滑轨的不断滑动, 探头 3 处实际表面瞬态最高测量温度随着电流的增大而增大, 因为在载荷和速度保持恒定下, 随着 kA 级别载流的增大, 机械摩擦热基本不变, 但是焦耳热以及电弧热不断增大, 导致高速滑动过程中接触表面瞬态温度随着载流的增大而增大. 当电流在 100~300 kA 时, 温度值相对集中在 1250°C 左右. 在相同实验条件下得到的仿真模拟温

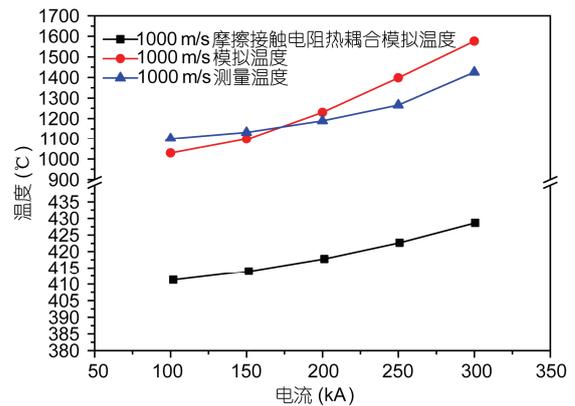


图 11 探头 3 最高温度变化趋势对比曲线图

度值与实验实时测量温度值最大误差为 8%, 结果基本一致.

4.5 实验数据分析

针对 KA 级别大电流载荷下高速滑动电接触表面瞬态温度进行测量研究, 其接触表面瞬态温度不仅与载荷电流有关, 而且与运行速度相关. 图 12 为不同电流、速度载荷下实际温度测量数据图. 由图 12 可知, 相同滑动速度条件下, 表面瞬态最高温度随着电流的增大而增大; 在相同载流的条件下, 最高温度随滑动速度的增大而降低.

通过测量温度实验数据统计与分析, 并与之前的 ANSYS 模拟相结合, 得知在大载流高速滑动条件下, 摩擦热对表面温升影响较小, 接触电阻热与电弧热是造成滑动电接触表面温升的主要影响因素. 在高速滑动过程中, 大载流通过接触面产生的热量加热导电斑点, 导致导电斑点温度迅速上升并被融化

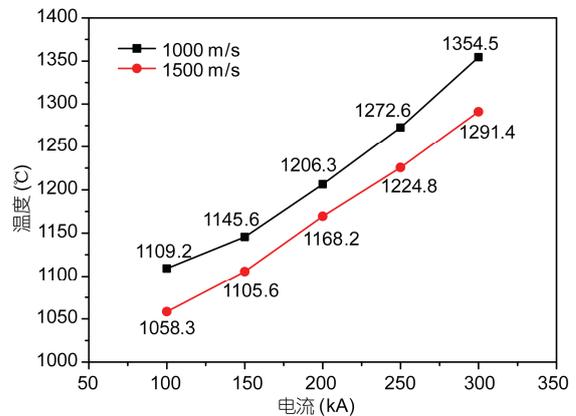


图 12 不同载荷下实际温度测量数据图

或气化而形成电火花, 电火花时间极短, 但会在瞬间产生电弧热, 电弧不可避免的出现对接触表面温升影响较之机械摩擦热与接触电阻热相比, 对滑动电接触表面温度变化影响最大。

将模拟热分析结果和实际测量温度相比较, 可见相同条件下分别获得的温度数值偏差较小且温度变化规律一致, 表明了本文所建立的温度分析模型的正确和有效性。理论分析和实测结果相结合, 得出了以下结论: 机械摩擦热在影响大载流条件下的高速滑动电接触表面温度场的主要热源中所占比例较低, 接触电阻热以及电弧热所占比例较高。且与接触电阻热相比, 电弧热是温度变化最大影响因素。在相同载流的条件下, 表面瞬态最高温度随滑动速度的增大而降低; 在相同速度下, 最高温度随着电流的增大而增大。

5 总结

本文针对 350 kA 内大载流高速滑动电接触进行了相关实验研究。建立了高速滑动电接触表面温度场有限元模型, 模拟了滑动电接触表面温度变化过程。基于红外辐射原理的非接触测温, 对大载流高速滑动电接触表面瞬态温度进行实时测量, 仿真结果和实验结果的一致性表明了本文对高速滑动电接触热源的分析及所建立的模型正确性。研究结果表明在大载流条件下, 电弧热在实验过程中的瞬态性、高温性对接触表面温升影响较大。本文为进一步研究如何减小高速滑动电接触过程中电弧的影响、降低接触表面温度, 选择合适表面接触材料以及减小损耗等提供了有力的参考。

参考文献

- 郭凤仪, 陈忠华. 电接触理论及其应用技术. 北京: 中国电力出版社, 2008
- Senouci A, Zaidi H, Frene J, et al. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel. *Appl Surf Sci*, 1999, 144: 287–291
- Bouchoucha A, Chekroud S, Paulmier D. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper–stainless steel. *Appl Surf Sci*, 2004, 223: 330–342
- Zaidi H, Chin K J, Frene J. Analysis of surface and subsurface of sliding electrical contact steel/steel in magnetic field. *Surf Coat Tech*, 2001, 148: 241–250
- 赵燕霞, 刘敬超, 孙乐民, 等. 载流摩擦磨损中电弧侵蚀的研究现状及趋势. *润滑与密封*, 2010, 35: 111–113
- 董光能, 李建, 谢友柏, 等. 具有正温度系数特性的导电低密度聚乙烯基复合材料的摩擦磨损性能. *摩擦学学报*, 2001, 21: 63–66
- Park Y W, Narayanan T S N S, Lee K Y. Effect of temperature on the fretting corrosion of tin plated copper alloy contacts. *Wear*, 2007, 262: 320–330
- Ding T, Chen G X, Bu J, et al. Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph–catenary systems. *Wear*, 2011, 271: 1629–1636
- 戴利民, 林吉忠, 刘越, 等. 受电弓滑板受流摩擦中体温升的模拟计算分析. *铁道学报*, 2002, 24: 56–61
- 郭凤仪, 马同立, 陈忠华, 等. 不同载流条件下滑动电接触特性. *电工技术学报*, 2009, 24: 18–23
- 回立川, 陈忠华, 郭凤仪. 滑动电接触中最小温升的计算研究. *计算机工程与应用*, 2013, 49: 232–235
- 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. *高压电器*, 2012, 48: 1–5
- Dong L, Zhu Y Q, Wang H S, et al. The effect of normal force on the coupled temperature field of metal impregnation carbon/stainless steel under the friction and wear with electric current. *Procedia Eng*, 2011, 16: 414–417
- 夏胜国, 朱卫东, 何俊佳. 大电流高速滑动电接触实验电源系统研制. *高压电技术*, 2007, 7: 14–17
- Senouci A, Frene J, Zaidi H. Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact. *Wear*, 1999, 229: 949–953
- Bryant M D, Wang J P, Lin J W. Thermal mounding in high speed dry sliders: Experiment, theory and comparison. *Wear*, 1995, 181: 668–677
- Plesca A. Thermal analysis of sliding electrical contacts with mechanical friction in steady state conditions. *Int J Therm Sci*, 2014, 84: 125–133
- Argibay N, Sawyer W G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density. *Wear*, 2012, 274: 229–237
- Morita N, Mori M, Ueno T, et al. Comparison of brush sliding contact characteristics between structure steel ring & stainless steel ring for large AC motors. In: *Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, IEEE, 2008. 98–102

- 20 Nituca C. Thermal analysis of electrical contacts from pantograph-catenary system for power supply of electric vehicles. *Electr Pow Syst Res*, 2013, 96: 211–217
- 21 Rowe K G, Bennett A I, Krick B A, et al. In situ thermal measurements of sliding contacts. *Tribol Int*, 2013, 62: 208–214
- 22 Nagasawa H, Kato K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current. *Wear*, 1998, 216: 179–183
- 23 吴积钦. 弓网系统电弧的产生及其影响. *电气化铁道*, 2008, 30: 27–29
- 24 吴积钦, 钱清泉. 弓网系统电弧侵蚀接触线时的特分析. *铁道学报*, 2008, 30: 31–34

Analysis of surface transient temperature on large current carrying high-speed sliding electrical contact

ZHANG YuYan^{1,2}, LI HaiLong^{1,2}, WANG ZhenChun³, WEN YinTang³ & ZHAN ZaiJi³

¹ *Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*

² *Key Lab of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;*

³ *Institute of Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

The transient temperature of electrical contact surface during high-speed sliding can result in the ablation of the contact surface and the aggravation of its friction and wear through changing the contact surface's environment. Based on correlation measurement and the academic analysis of the transient temperature field of high-speed sliding electrical contact surface under high current, a model for the calculation of transient temperature field is established, by the thermal analysis of transient temperature field of contact surface with the heat transfer and finite element analysis software ANSYS as theoretical foundation. The influence on the transient temperature field of contact surface under different heat sources is studied. The experimental data on the transient temperature of high speed sliding electrical contact surface under high current were obtained with non-contact radiation temperature measurement. The transient temperature field distributing state was simulated by the finite element methods software ANSYS, comparisons between experimental data and simulation results were made to verify correctness of the simulation model of transient temperature field. The further analysis of simulation results shows that the speed and the changes of electric current have impact on the transient temperature field of the contact surface. In this paper, the study on the transient temperature of high speed sliding electrical contact surface under high current is expected to provide the theoretical and technique foundation for reducing the temperature of contact surface, and selecting the appropriate material as contact surface to decrease the material wear and tear.

high-speed sliding electrical contact, high current, the transient temperature

doi: 10.1360/N092014-00391