

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2010.01.012

钢铝复合轨/受电靴摩擦热与接触电阻热耦合的温度场有限元模拟研究*

蒋慧平 董霖

(西华大学机械工程与自动化学院 四川成都 610039)

摘要: 基于 ANSYS 有限元软件建立钢铝复合轨/受电靴在接触电阻热和摩擦热耦合作用下的温度场模型, 给出了 2 种热量耦合的方法, 计算了模型的温度场, 研究了模型在不同电流、速度和位移条件下的耦合最高温度变化。结果显示: 在相同位移和法向压力条件下, 耦合的最高温度随电流的增大而增大, 随速度的增大而减小; 在电流、速度和压力相同的条件下, 耦合最高温度随位移的增大成线性增大趋势。

关键词: 摩擦热; 电阻热; 温度场; 有限元; ANSYS

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2010) 1-045-4

FE Simulation Research of Temperature Field Couple under Contact Resistor-Friction Thermal between Aluminum-Stainless Steel Composite Conductor Rail and Collector Shoe

Jiang Huiping Dong Lin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China)

Abstract: Temperature field model for aluminum-stainless steel composite conductor rail/collector shoe under the coupling of contact resistor-friction thermal was established by ANSYS finite element software. The method of coupling the two kinds of thermal was given, the temperature field was calculated, and the maximum coupled temperature changing under different electric current, velocity and displacement of the model was studied. The results show that under the constant displacement and normal force, the maximum coupled temperature increases with the increasing of the electric current, and decreases with the increasing of the velocity; under the constant electric current, velocity and normal force, the maximum coupled temperature increases linearly with the increasing of displacement.

Keywords: friction thermal; resistor thermal; temperature field; finite element; ANSYS

载流摩擦磨损是指处于电场中的摩擦副, 在电流通过条件下的摩擦学行为。在载荷作用下, 摩擦副表面间因有相对滑动而产生了摩擦, 摩擦的过程中所做的功有大部分转换成了热^[1], 摩擦副表面这种重复的相对滑动及能量转换使得整体表面产生了温升^[2]。载流条件下的摩擦副由于电流的作用产生了接触电阻热甚至电弧热, 微凸体间的不断相互作用使得真实接触面间的局部产生较高的温升, 特别是这些热量的耦合作用使得摩擦副温度升高更为剧烈, 高温可能导致摩擦副微凸体的材料状态改变, 目前对于这方面的研究报道相对较少, 特别是载流摩擦磨损中电弧热和接触

电阻热的数值分析方面的研究就更少。本文作者针对用于地铁受流的钢铝复合导电轨/受电靴摩擦副, 建立载流工况条件下的滑动摩擦模型, 利用 ANSYS 有限元软件模拟载流摩擦副的表面滑动接触过程, 揭示在摩擦热和接触电阻热的耦合作用下接触区表现出的温度变化特性, 对影响摩擦副温度变化的主要因素进行研究。

1 热分析的基本假设及传热方程

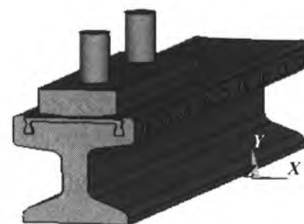


图1 导电轨与受电靴模型

Fig 1 Conductor rail and collector model

* 基金项目: 四川省教育厅自然科学基金项目 (07ZB084); 西华大学人才培养与引进科研项目 (R0920203)。

收稿日期: 2009-07-30

作者简介: 蒋慧平 (1982—), 女, 硕士研究生。

通讯作者: 董霖 (1973—), 男, 副教授, 工学博士, E-mail: donglin@mail.xhu.edu.cn.

基于钢铝复合轨/受电靴摩擦副工程实际模型,建立如图 1 所示载流滑动摩擦接触模型^[3],试样通过电极接入电流 I ,并同时受法向载荷 F_n ,相对滑动速度为 v_s ,工况条件为干摩擦。

实验过程中,接触面由摩擦和接触电阻共同产生热,这些热以热流密度的形式分别进入上试样(受电靴)和中、下试样(钢铝复合轨)。为了使问题易于处理,但不失去其意义,作出以下假设:

- (1) 忽略热量外泄及辐射导致的热量损失;
- (2) 忽略涡流导致的功率损失;
- (3) 各层材料的参数都是各向同性的;
- (4) 忽略磨屑带走的很少的热量;
- (5) 试样只考虑接触面外面产生对流换热,换热系数保持恒定;
- (6) 试样材料的密度和导热系数随温度的变化比较小,可以忽略不计;
- (7) 接触点界面摩擦力做功转换的热能及接触电阻产生的热全部被摩擦偶件吸收。

根据以上假设,钢铝复合轨/受电靴模型的传热问题简化为二维问题,根据能量守恒原理,瞬态传热可以用公式表达为^[4]:

$$[C]\{T^{\dot{}}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵,包含导热系数、对流系数以及辐射率和形状系数; $[C]$ 为比热容矩阵,包含系统内能的增加; $\{T^{\dot{}}\}$ 为温度对时间的导数; $\{Q\}$ 为节点热流率向量,包含热生成; $\{T\}$ 为节点温度向量。

2 有限元建模分析

2.1 有限元模型及网络划分

为了便于分析建模时采用平面问题求解,取上中下试样的剖面,按实际尺寸建立模型如图 2 所示,图中上试样几何参数:长 270 mm,宽 27 mm,材料为浸金属碳;中间试样:长 540 mm,宽 6 mm,材料为 1Cr18Ni9 不锈钢;下试样:长 540 mm,宽 100 mm,材料为铝,中间试样和下试样固联(表示钢铝复合轨模型)。该剖面能清楚表达钢铝复合轨/受电靴接触的温度场分布和应力分布等情况。上中下试样都采用 ANSYS 中的热力耦合 Plane13 单元^[5],接触面采用热-结构耦合场的二维面-面接触单元,设定中间试样上表面为接触面,采用接触单元 CONTACT172,上试样下表面为目标面,采用接触单元 CONTACT169。为使模型的计算收敛于精确解,对靠近接触面的特定区域细分网格,控制网格密度,划分后的模型如图 2 所示。

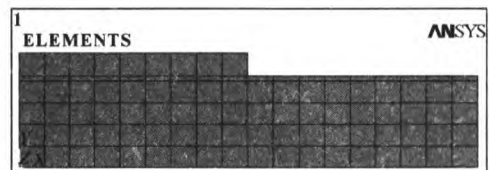


图 2 网格划分图

Fig 2 Meshing figure

2.2 材料属性及边界条件

2.2.1 材料属性

上试样和中试样之间的摩擦因数为 0.20,浸金属碳和不锈钢及铝采用双线性等向强化材料本构模型,表 1 列出了 3 种材料的性能^[6-7]。

表 1 3 种材料的性能

Table 1 Properties of three kinds of materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ ($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	电阻率/ ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)
浸金属	2 400	469	28	12.6	0.425	3.5	10
不锈钢	7 930	502	12.1	190	0.3	16	0.73
铝	2 700	902	238	70	0.3	23	0.029

2.2.2 摩擦热热流密度的计算

在滑动过程中,摩擦热是以热流密度的形式进入接触摩擦副的,对于面-面摩擦副来说,两个物体由于摩擦产生的总热流率 q_f (J/s) 由下式计算^[8]:

$$q_f = FHTG\tau v \quad (2)$$

式中: $FHTG$ 为摩擦生热的能量转换因子(默认为 1); τ 为等效摩擦应力; v 为两物体的相对滑动速率

(在本试验中与滑动速度 v_s 的大小相等)。

2.2.3 接触电阻热的计算

接触电阻的物理本质就是电流通过导电斑点产生收缩效应引起的金属电阻增量(即收缩电阻)与表面膜电阻之和。在本实验中两接触元件的材料不同,又有表面膜存在,则接触电阻由 3 个分量组成^[9-10]:

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} + R_f = \frac{\rho_1}{4\alpha} + \frac{\rho_2}{4\alpha} + \frac{\sigma}{\pi\alpha^2} \quad (3)$$

式中: R_c 为接触电阻 (Ω); R_{c1} 、 R_{c2} 分别为两接触面的收缩电阻 (Ω); R_f 为膜电阻 (Ω); α 为实际接触面的半径; ρ_1 、 ρ_2 分别为 2 种接触材料的电阻率; σ 为单位面积的表面膜系数。

在实验过程中, 忽略两摩擦副间的表面膜电阻,

则 $R_c = R_{c1} + R_{c2} = \frac{\rho_1}{4\alpha} + \frac{\rho_2}{4\alpha}$, 计算出接触电阻总热流密度 q_r (W/m^2) 的公式为:

$$q_r = \frac{I^2 R_c}{A_c} \quad (4)$$

式中: I 为实验电流; A_c 为总的电接触面积。

2.2.4 总的电接触面积计算

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。下面的公式用于实际计算电接触面积的公式如下^[10]:

$$A_1 = \frac{p}{n\xi H} \quad (5)$$

式中: p 为接触压力; A_1 为单一接触点的面积, m^2 ; n 为“ A_1 ”接触点的数目; ξ 为弹性变形的修正系数; H 为 Meyer 硬度。

假设实际单个电接触点的面积为圆形, 并取 ξ 为 1, 则可以计算出单个接触点的半径 α , 由公式 (3) 和公式 (4) 计算出 q_r 。

2.2.5 边界条件

下试样约束所有的自由度, 上试样上表面施加压力载荷, 模型初始温度为室温 $T_0 = 20^\circ C$, 试样接触面的边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = q_f + q_r \quad (6)$$

其余表面边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = \alpha(T - T_0) \Big|_r \quad (7)$$

式中: k 为材料的导热率; q_f 为摩擦热热流密度; q_r 为接触电阻热热流密度; α 为对流换热系数; r 为物体边界。

3 计算结果与分析

在给出的初始温度条件下, 在受电靴模型上表面施加 150 N 法向压力载荷; 受电靴的滑动速度为 20 ~ 110 km/h; 在上中下导体上分别通电流 150 ~ 600 A。在实验过程对比纯机械摩擦和耦合条件下试样的温度分布, 以下定义随时间变化的压力函数的命令流^[8]:

```
* DIM,pre, TABLE,2,1,1,time
* SET,PRE(1,0,1),0
* SET,PRE(1,1,1),1.9e5
* SET,PRE(2,0,1),10
```

```
* SET,PRE(2,1,1),1.9e5
```

图 3 显示的是当 $F_n = 150$ N, $v_s = 50$ km/h 时纯机械摩擦温度的变化, 可知摩擦热最高温度为 $20.417^\circ C$, 最高温升为 $0.417^\circ C$ 。

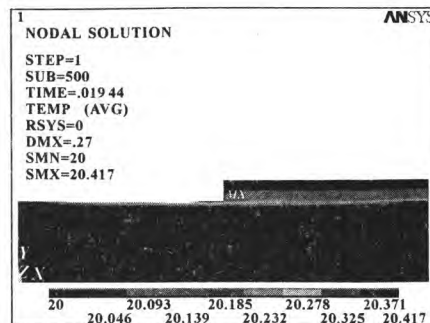


图 3 纯机械摩擦温度分布 ($^\circ C$) ($F_n = 150$ N, $v_s = 50$ km/h)

Fig 3 Temperature distribution of friction
($F_n = 150$ N, $v_s = 50$ km/h)

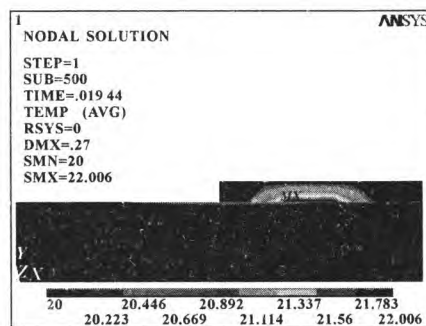


图 4 耦合温度分布 ($^\circ C$) ($I = 300$ A, $F_n = 150$ N, $v_s = 50$ km/h)

Fig 4 Coupled temperature distribution ($I = 300$ A, $F_n = 150$ N, $v_s = 50$ km/h)

图 4 示出了通上 300 A 电流后机械摩擦热和接触电阻热耦合后的温度分布, 以下是定义随时间变化的接触电阻热流密度函数的命令流:

```
* DIM,aa, TABLE,2,1,1,time
* SET,AA(1,0,1),0
* SET,AA(1,1,1),5.144e6 ! 5.144e6 为 I = 300 A、F_n = 150 N 时的接触电阻热流密度
* SET,AA(2,0,1),10
* SET,AA(2,1,1),5.144e6
```

从图 4 可知, 耦合后的最高温升为 $2.006^\circ C$ 。对比图 3 和图 4, 可见耦合后最高温升比纯机械摩擦的最高温升大, 原因是载流摩擦过程中接触电阻热与机械摩擦热共同作用导致较大的耦合最高温升。纯机械摩擦模拟条件下接触区的温度值从接触面向四周呈递

减趋势,耦合模拟下电接触点位置温度值从导电斑点向四周呈递减趋势,且两者的温度梯度均越来越小。

图 5 示出了耦合后的最高温度随电流的变化关系。可见,在位移和压力不变的条件下,耦合的最高温度随电流的增大而增大;随速度的增大而减小。原因是在摩擦因数、位移和压力不变的条件下,滑动摩擦做功不变,转换成的摩擦热相同;电流越大,接触电阻产生的热越多,耦合引起的最高温升越大;速度越大,作用时间越短,接触电阻作用的时间越短,产生的热越少,耦合的最高温升越小。

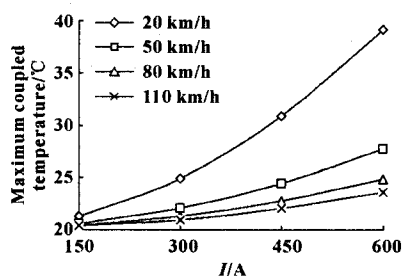


图 5 耦合最高温度随电流的变化关系 ($F_n = 150 \text{ N}$)

Fig 5 Variation of maximum coupled temperature with current ($F_n = 150 \text{ N}$)

图 6 表示电流为 300 A、法向压力为 150 N、滑动速度为 50 km/h 时,位移分别为 270 ~ 1 080 mm 时,耦合的最高温度随位移的变化关系,可见耦合的最高温度随位移的增大成线性增大趋势,原因是电流、法向压力和速度相同的条件下,由于摩擦力做功和接触电阻产生的热都随位移增大线性增大,导致耦合后的最高温升随位移增大线性增大。

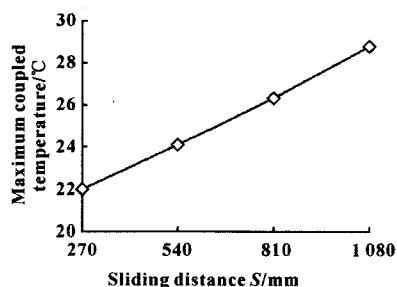


图 6 耦合最高温度随位移的变化关系
($I = 300 \text{ A}$, $F_n = 150 \text{ N}$, $v_s = 50 \text{ km/h}$)

Fig 6 Variation of maximum coupled temperature with displacement ($I = 300 \text{ A}$, $F_n = 150 \text{ N}$, $v_s = 50 \text{ km/h}$)

4 结论

(1) 对比钢铝复合轨/受电靴分别在纯机械摩擦

与载流摩擦条件下的温度分布图,纯机械摩擦模拟条件下接触区的温度值从接触面向四周呈递减趋势,耦合模拟下电接触点最高温度值从导电斑点向四周呈递减趋势,且两者的温度梯度均越来越小。

(2) 载流摩擦磨损中的机械摩擦热与接触电阻热的耦合过程中,相同压力条件下,耦合后的温度变化会受到电流、速度、位移等因素的影响,通过实验选取不同的电流、速度参数及不同的位移,揭示耦合温度变化规律如下:在位移和压力相同的条件下,耦合最高温度随着电流的增大而增大,随着速度的增大而减小。

(3) 在相同电流、压力和速度条件下,耦合的最高温度随位移的增大成线性增大趋势。

参考文献

- [1] 邵荷生,曲敬信,许小棣,等. 摩擦与磨损[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992.
- [2] 徐建生,王仕仙,卢霞,等. 滑动摩擦热-结构耦合的有限元分析[J]. 润滑与密封,2009,34(3):24-31.
Xu Jiansheng, Wang Shixian, Lu Xia, et al. Finite element analysis of thermal-structural couple field of sliding friction[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(3): 24-31.
- [3] 董霖,李丰学,陈光雄,等. 有无电流工况下钢铝复合轨/受电靴的摩擦磨损特性[J]. 润滑与密封,2006,31(6):36-38.
Dong Lin, Li Fengxue, Chen Guangxiong, et al. Friction and wear of steel aluminum composite conductor rail/collector shoe with and without direct current[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(6): 36-38.
- [4] 张朝晖. Ansys8.0 热分析教程与实例解析[M]. 北京:中国铁道出版,2005.
- [5] 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[J]. 铁道学报,2002,24(5):56-61.
Dai Limin, Lin Jizhong, Liu Yue, et al. Calculation and study on strip cubage temperature of pantograph pan in sliding electric contact abrasion[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(5): 56-61.
- [6] 顾祥熙,冯勇祥. 浸金属碳石墨材料的历史及其现状[J]. 电碳,1989(3):1-11.
Gu Xiangxi, Feng Yongxiang. The history and current situation of metal impregnation carbon material[J]. Electrical & Carbon, 1989(3): 1-11.
- [7] 张国智,胡仁喜,陈继刚,等. Ansys10.0 热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [8] H 霍夫特 H G 施耐德. 电接触[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [9] Holm R. Electric Contact Theory and Application[M]. Berlin: Springer, 1967.
- [10] Barber J P. Contact Current Carrying Limits[C]. Electrical Contacts. Proc 35th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 1989.