

基于 ANSYS 的滑动摩擦热结构耦合分析

王仕仙,徐建生,卢霞

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:利用 ANSYS 有限元软件分析了在摩擦热和力场的耦合作用下,材料摩擦表面滑动接触区的局部温度变化、应力变化等特性。结果表明:在摩擦滑移过程中,磨损表面相当于接受固定热源作用,接触区温度逐渐上升,温度存在起伏波动现象,温度最高点,在接触面中线区域,温度从接触面向四周呈递减趋势,而且温度梯度越来越小;同时,接触应力、摩擦应力也发生变化。滑动过程的热效应问题研究将有助于揭示接触过程中材料表面磨损机理。

关键词:滑动摩擦;ANSYS;热结构耦合

中图分类号:TH 117.1 **文献标识码:**A

0 引言

在载荷作用下,摩擦副表面间因有相对滑动而产生摩擦,摩擦生热致使局部产生很高的温升,有可能形成瞬时过热,一个瞬时高温的热点会导致表面上相应结点材料状态的改变,造成摩擦表面的焊联作用。随后在分离的瞬时,连结点被撕裂。这样,摩擦副表面将产生局部的初期粘着损伤,随着多次损伤的积累,将引发明显的粘着磨损。研究认为,在研究磨损机理中,温度是起重要作用的因素^[1]。

各国的摩擦学工作者十分重视接触表面温度的测试技术,对此进行了大量的工作。但它是一个十分困难的问题,其原因在于:接触表面的最高温度在接触处瞬时形成的闪现温升,接触位置又时刻发生变化,因此,要精确地测出闪温十分困难,目前大量应用的测温方法只能测量表面层的平均温度^[2]。许多学者对接触表面的瞬时温升也提出了简单的数学计算公式^[3],但仍难以准确反映出变化过程 and 变化状态。本文利用 ANSYS 有限元软件分析摩擦副在滑动摩擦过程中,受摩擦热和力场的耦合作用下,接触区域表现出的局部温度变化、应力变化等特性,力图揭示接触过程中材料表面磨损机制。

1 热分析的基本假设及传热方程

建立如图 1 所示环-环滑动摩擦接触模型,图中上试样几何参数为:内径为 20 mm,外径为 26 mm,厚度为 5 mm,材料为 45#钢;下试样几何参数为:内径为 16 mm,外径为 28 mm,厚度为 6 mm,材料为黄铜。上试样受向下载荷 F ,旋转速度为 $n(r/min)$ 。摩擦类型:干摩擦。



图 1 环-环摩擦模型示意图

Fig. 1 Ring-ring friction model

试验过程中,接触面由摩擦产生热,这些热以热流的形式分别进入上试样和下试样。为了使问题易于处理,但不失去其意义,作出以下假设(这里只对下试样进行热分析):

- (1)忽略泄漏所带走的摩擦热。
- (2)忽略因热辐射导致的热损失。
- (3)认为各层材料的参数都是各向同性的。
- (4)与整体摩擦热相比,磨屑带走的热量很

收稿日期:2008-10-22

基金项目:国家自然科学基金 50175083

作者简介:王仕仙(1981-),男,湖北安陆人,助理工程师,硕士研究生,研究方向:摩擦学数值模拟、纳米润滑。

指导老师:徐建生,教授,博士,博士研究生指导老师,研究方向:摩擦学、纳米润滑。

小,可忽略不计。

(5)对流换热产生于试样的四周,换热系数与温度及试样的空间位置无关。

根据以上假设,密封环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

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

式(1)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;

{ T^s }为温度对时间的倒数;

{ Q }为节点热流率向量,包含热生成;

{ T }为节点温度向量。

在具体的传热过程中,材料的性能、边界条件等会随温度发生变化,此类问题为非线性热分析问题。

2 有限元建模分析

2.1 有限元模型及网格划分

由于环-环模型以及边界条件都是轴对称,若按真实三维分析,则过于复杂^[4],建模时采用平面问题求解,取上下试样的 1/2 剖面,按实际尺寸建立模型,该剖面能清楚表达环-环接触的应力分析,温度场分布等情况。上试样和下试样都采用热力耦合的 plane13 单元,接触面采用热-结构耦合场的二维面-面接触单元,设定下试样上表面为接触

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。在接触协调中定义的罚函数应于穿透量相适应,以解决收敛时间和精度的矛盾。接触协调条件采用了在接触平衡迭代中增加接触刚度的罚函数法和增加附加自由度的拉格朗日乘子法相结合的增强拉格朗日法。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化网格,控制网格密度,划分后的模型如图 2 所示。

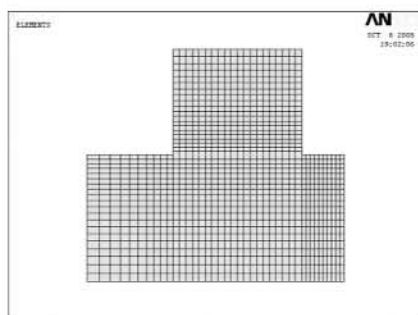


图 2 环-环有限元模型

Fig. 2 Ring-ring finite element model

2.2 材料属性及边界条件

2.2.1 材料属性 上试样采用 45# 钢材料,下试样采用黄铜,它们之间的摩擦系数为 0.1,45# 钢和黄铜均采用双线性等向强化材料本构模型,材料特性随温度变化,表 1 列出了 45# 钢和黄铜在不同温度下的性能^[5-7]。

表 1 铜和 45# 钢的材料性能

Table 1 Material property of copper and 45# steel

性能	温度/K											材料	
	293	366	477	589	700	811	922	1 033	1 144	1 255	1 366		1 477
导热系数	64.8	61.3	55.3	49.9	44.9	39.8	34.9	30.5	28.4	27.7	27.6		45# 钢
/W · m ⁻¹ · K ⁻¹	390	381	370	355	345	335	325	316	310	305	300		铜
弹性模量	206	201	194	186	169	117	55						45# 钢
/MPa	124	105	88	70	55	38	25	16	10	7			铜
屈服强度/MPa	248	238	224	220	172	145	76						45# 钢
					83								铜
切线模量/GPa	20.6	20.1	19.4	18.6	16.9	11.7	5.5						45# 钢
热膨胀系数	10.98	11.5	12.2	13	13.5	14	14.6	14	13.5				45# 钢
×10 ⁻⁶ /K ⁻¹	16.6	16.7	17.1	17.5	17.8	18.2	18.5	18.9	19.3				铜
性能	温度/K											材料	
	293	366	477	589	700	811	922	1005	1033	1047	1072		1477
比热	444	452	511	561	611	662	762	1004	2386	1004	1189	1189	45# 钢
/J · kg ⁻¹ · K ⁻¹	398	406	419	430	441	452	465		477			502	铜
泊松比						0.3							45# 钢
						0.32							铜
密度/						7800							45# 钢
Kg · m ⁻³						8900							铜

2.2.2 摩擦生热热流密度的计算 对于环-环摩擦副来说,其接触面摩擦热可以按下式计算:

$$Q = uFv \quad (2)$$

这里摩擦界面接触平均压力为 $\frac{F}{A}$, 上试样转

动的角速度为 n , 则

$$v = \frac{\pi dn}{1000 \times 60} \quad (3)$$

于是,得到热流密度为

$$q = \frac{\mu F}{A} \cdot \frac{\pi dn}{1000 \times 60} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中: μ 为摩擦系数; F 为轴向正压力; v 为转动线速度; A 为接触面积。

2.2.3 边界条件 下试样下端约束所有的自由度,对上试样上表面施加压力载荷,模型初始温度为室温 $T_0 = 293$ K. 试样接触面的边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = q \quad (5)$$

其余表面边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = a(T - T_0) \Big|_r \quad (6)$$

式(5)、(6)中: k 为材料的导热率; q 为摩擦热流密度; a 为对流换热系数; Γ 为物体边界。

3 接触热阻处理

接触热阻对接触非线性问题影响比较大,因为未考虑热阻条件下相当于两接触面间热导为无穷大,根本没有任何热损失存在,这种情况下得到的计算结果无疑与实际值存在差距. 本文中将考虑接触热阻对模型结果的影响. 在文献[8]中,通过实验和有限元方法验证了几种接触模型的比较,给出了接触热阻的近似计算公式:

$$R_t = \frac{2h_y}{k_1\lambda_1 + k_2\lambda_2 + k_3\lambda_3} \quad (7)$$

式(7)中: h_y 为表面粗糙度;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为接触面材料的传热系数;

k_1, k_2, k_3 为待定系数,由接触面实际情况决定。

4 计算结果与分析

假设上下试样材料温度为 293 K,施加初始温度载荷,同时在上试样上施加 y 方向作用力载荷 $P = 100$ N,转动速度 $n = 200$ r/min. 滑动摩擦过程中,由于摩擦的非线性接触,以及材料性能的非线性,因此施加对流和热流密度载荷需要用较小的时间步和精确的加载历程. 求解计算中采用了修正牛顿-拉普森方法,计算中力的迭代收敛精度为 0.5%,刚度矩阵在每一子步中都进行修正。

图3是模型运行到 30 min 时的温度分布图,由于摩擦滑动时的接触位置相对固定,热量积累多,温度比较高. 最高温度为 468.094 K,位置在接触面中线附近处. 试样其它非接触表面与外界环境发生热交换,温度从接触面向四周呈递减趋势,而且温度梯度越来越小,这主要有两方面的原因:一是材料的热导率在起作用,因为导热系数是随着温度的升高而变化的;二是由于试样表面与外

界发生热交换,靠近摩擦面的地方温差越大,热交换强度较高,温度梯度就较大,而远离摩擦面的地方情况恰好相反. 这基本反映了滑动状态下接触区的热效应特征。

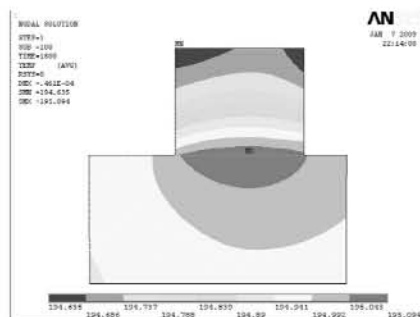


图3 第30 min 时的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution for thirtieth minute

图4是模型运行到 30 min 时的接触应力分布情况,应力最大处在接触面中线处,与静止时的接触. 应力均匀分布不同,其原因是温度的升高造成了试样的膨胀,从而产生热应力。

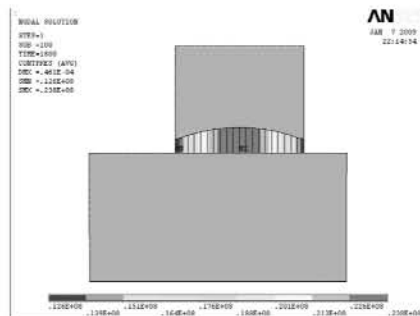


图4 第30 min 时的接触应力分布

Fig. 4 Contact pressure distribution for thirtieth minute

图5反映了接触面径向摩擦应力的分布情况,在接触压应力的作用下,下试样产生一定的变形,接触面的物质沿径向向两边滑移,在径向方向产生了摩擦力,且径向摩擦应力最大点在接触表面的两边边缘区,方向相反,中间部分为零,其原因是:由于试样约束作用,接触面中间的部分没有产生径向滑移趋势,而两边部分的滑移变形(趋势)是最大的,且方向是相反的。

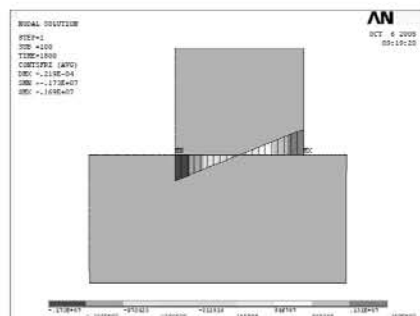


图5 第30 min 时的径向摩擦应力分布

Fig. 5 Friction stress distribution for thirtieth minute

环-环模型摩擦生热后,摩擦表面相当接受固定热源作用。试样表面温度最高点在接触中线处并向外扩展,其温度随时间的变化如图 6 中曲线所示,可以看出最高温度随着摩擦时间的延长而增高。该位置形成瞬时过热的可能性最大,对润滑状态和材料表面的磨损均有影响。

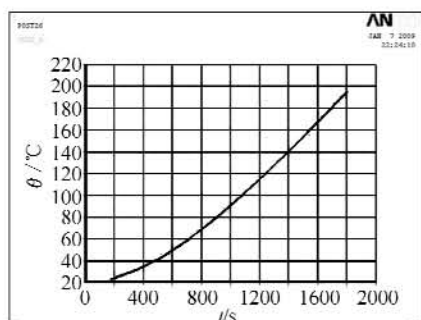


图 6 模型最高温度随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of model maximum temperature with time

在热弹流理论的发展过程中,理论和实验两方面都有着相当重要的作用^[9]。为了验证有限元数值模拟方法计算的正确性,在 Xp 6 销盘摩擦磨损试验机上进行^[10],使用热电偶测得下试样在 $r=14\text{ mm}$ 、 $h=3\text{ mm}$ 处外表面的温度值。从图 7 中可以看出,模拟计算出来的结果与测试结果并不完全重合,主要原因是:一是由于测温热电偶的滞后性造成的;二是模型中所做的假设忽略了一些热量的损失。但数值法模拟出的温度升高趋势与试验测得的温度升高趋势基本相同,最大偏差大约是 1%,由此可以说明所建的数值模型是正确可行的。

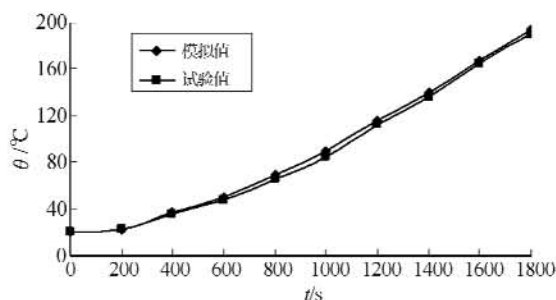


图 7 模拟结果与试验结果的比较

Fig. 7 Comparing of simulation result and experiment result

5 结 语

a. 建立了滑动磨损二维热-结构耦合瞬态轴

对称有限元模型及其相关的边界条件。分析了滑动摩擦过程中摩擦生热的过程,接触区内的瞬时温度分布,接触区的接触应力、摩擦应力的分布特点以及最高温度的变化趋势,为研究揭示接触过程中材料表面损伤机制提供依据。

b. 滑动摩擦过程中的热-结构耦合问题是涉及材料非线性、摩擦接触状态非线性和材料表面变形几何非线性的耦合问题。接触热阻对温度场的影响较大,要建立更准确、更符合实际的模型,必须考虑接触热阻的影响。

c. 在滑动摩擦过程中,接触面相当于接受固定热源作用,接触区温度逐渐上升,最高温度在接触面中线并向外扩展,温度从接触面向四周呈递减趋势,而且温度梯度越来越小。

参考文献:

- [1] Yang Xiaojing, Chen Zichen, Fan Yujing, et al. Heat Analysis of Sliding Abrasive Particle Micro Contact Process by Finite Element Method [J]. Lubricating Engineering, 2007, (8): 1-4.
- [2] 郑林庆. 摩擦学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [3] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 胡显燕, 陈玮, 邓娟, 等. 大尺度接触温度效应分析[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(3): 44-47.
- [5] 朱玉义. 焊工实用技术手册[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [7] Tsai C L, Dai W L, Dickinson D W, et al. Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding [J]. Welding Journal, 1991, 70(12): 339-351.
- [8] 曹骏, 胡佩俊, 应济. 基于接触热阻的主轴热特性有限元分析[J]. 机电工程, 2008, 25(2): 20-22.
- [9] 孙文龙, 马丽然, 李刚, 等. 弹流润滑点接触 Hertz 区温度分布及其变化规律的实验研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(3): 16-19.
- [10] 徐建生, 夏会芳, 周红星, 等. 纳米铜作润滑油添加剂的性能研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(2): 105-107.

Study on the thermal-structural couple field of sliding friction process based on ANSYS

WANG Shi-xian, XU Jian-sheng, LU Xia

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the characters of temperature, contact pressure in contact area under the couple effect of friction heating and force during surface sliding friction process were studied by ANSYS. It is shown that in the surface sliding friction process, the contact surface is similar to get steady heat resource, and the temperature of contact surface rises step by step according to the sliding time; the temperature first rise in the contact surface, then spread to the worksheet where maximum temperature surround the contact surface, and the temperature gradient decrease along the worksheet so that the temperature decrease accordingly. This research on heating analysis of surface sliding friction process will be helpful to expose the mechanism of the surface damage.

Key words: sliding friction; ANSYS; thermal-structural coupling analysis

本文编辑:陈晓革



(上接第 66 页)

The modeling and simulation of red high-definition optical pickup head ACT system based on the GLFF

LIU Xiang-ming, LIU Ming, HE Qin-fang

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The ACT system model of red high definition optical pickup is the basis of servo system design, using GLFF (generalized linear feedforward network) for their modeling and simulation studies, and the control model of the system, control program and test control algorithms can be established before the hardware solutions implemented. In this paper, on the basis of the theoretical modeling, GLFF approximation method is used to establish the actual model, through the experimental comparison to determine their model, and completed the ACT system model of the red high-definition optical head and simulation analysis. It provides the applicable control model for the design of servo system.

Key words: ACT system; generalized linear feedforward network; modeling and simulation

本文编辑:陈晓革