

# 材料磨损系数的测定方法及试验

李颂华<sup>1,2</sup>, 李爽<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 曲秋红<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 为弥补目前磨损系数值均为近似值而非真实值,提出一种能够获得摩擦副真实磨损系数的可靠方法.方法 开展氮化硅圆柱销与块体的磨损试验,获得块体磨损深度及表面形貌;基于有限元数值仿真与 Umeshmotion 子程序相结合实现氮化硅摩擦副磨损过程仿真分析;通过试验磨损形貌及深度与仿真磨损形貌及深度的对比,确定氮化硅材料的真实磨损系数.结果 通过以上方法确定在接触载荷为40 N,干摩擦条件下,氮化硅陶瓷材料的磨损系数为  $1.825 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ ,与磨损系数的估计值( $1.15 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$ )相比,准确率提高了 59%.结论 有限元方法能够考虑摩擦副接触界面各点处的局部压力,重现磨损试验的真实过程,因此采用有限元数值仿真与磨损试验相结合的方法能够有效、可靠地获得材料的真实磨损系数.

**关键词** 磨损系数;氮化硅陶瓷;Umeshmotion 子程序;有限元

中图分类号 TH145.1<sup>+</sup>1

文献标志码 A

## The Method of Measuring the Wear Coefficient of Testing and Materials Research

LI Songhua<sup>1,2</sup>, LI Shuang<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, QU QiuHong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to compensate for the fact that the wear coefficients are approximate values rather than true values, a reliable method is proposed to obtain the true value of wear coefficients of friction pairs. The wear test of silicon nitride cylindrical pins and wear blocks has been carried out to acquire the wear depth and surface topography of the wear block. Based on the combination of finite element numerical simulation and Umeshmotion subroutine, the simulation analysis of the wear process of silicon nitride friction pairs is achieved. By comparing the wear appearance and

收稿日期:2019-09-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703900-03);辽宁省自然科学基金项目(20170540739);沈阳市科技计划项目(RC170216)

作者简介:李颂华(1977—),男,教授,博士,主要从事工程陶瓷高效精密加工、陶瓷轴承、陶瓷电主轴等方面研究.

depth gained from the test with the simulated wear appearance and depth, the true value of the wear coefficient of silicon nitride materials is determined. The wear coefficient of silicon nitride ceramics is  $1.825 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$  under the condition of dry friction and when the contact load is 40 N. Compared with the estimated wear coefficient ( $1.15 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$ ), the accuracy has been improved by 59%. By taking the local pressure at each point of the contact interface of friction pairs into consideration, the finite element method can reappear the real process of the wear test. Therefore, the true value of the wear coefficient of materials can be obtained effectively and reliably by combining the finite element numerical simulation with a wear test.

**Key words:** wear coefficient; silicon nitride ceramic; umeshmotion subroutine; finite element

磨损失效是机械设备与零部件的主要失效形式之一。磨损使得机械零件间的精度降低,达不到配合要求,影响整个机械设备的运行精度,甚至导致系统的振动与噪声。由于机械设备的磨损失效导致的经济损失是巨大的<sup>[1-2]</sup>,磨损问题成为学术界以及工业界研究的热点问题。目前,学者们关于材料的磨损已经开展了大量卓有成效的研究。束成祥等<sup>[3]</sup>研究了反应烧结碳化硅在干摩擦和滴油状态下的摩擦磨损性能,研究结果表明磨损机制主要表现为磨粒磨损和氧化磨损。周松青等<sup>[4]</sup>研究了碳化硅自配副在不同温度下的摩擦磨损特性、磨损图和摩擦化学性能,结果表明摩擦学特性与试验温度、载荷等摩擦环境参数有关,而在高温摩擦条件下,无定形的  $\text{SiO}_2$  平滑薄膜的形成与破坏是影响磨损的主要原因。C. Iliev 等<sup>[5]</sup>研究了氮化硅和碳化硅两种陶瓷的在润滑条件下的摩擦磨损行为,发现氮化硅与水中金属碰撞的摩擦磨损要高于氮化硅自配副;碳化硅在氧化剂溶液润滑下表现出现低摩擦和低磨损率。A. Gangopadhyay 等<sup>[6]</sup>为了将陶瓷材料的摩擦系数降到最低,在陶瓷基质中添加固体润滑剂来达到这个效果,结果表明在氮化硅中添加石墨能明显的降低摩擦系数。

从上述研究成果可以看出,目前磨损的研究方法主要以试验为主,且侧重于微观层面,对于磨损系数的研究还比较少。磨损系数对于评估机械零部件的磨损程度,预测机械设备的使用寿命、运行安全性以及可靠性具

有重要意义。R. Claudio 等<sup>[7]</sup>基于 Archard 方程,分析了磨损系数的不确定性,将磨损高度视为一个随机过程,研究了磨损系数的两种不确定模型,并与蒙特卡罗模拟结果进行了对比,表明随机过程方法能够给出更好的结果。L. J. Yang 等<sup>[8]</sup>基于指数瞬态磨损体积方程和 Archard 方程推导出一种新的磨损计算模型,磨损系数的预测值与实验值较为接近,但在其工作中并未考虑接触界面压力的非均匀分布,获得的磨损系数实际为接触界面的近似磨损系数。

总结以上研究成果可知,目前磨损系数的确定方法还比较有限,已有成果中的磨损系数实际为近似值,与真实值可能存在较大差别,而且测量磨损系数的方法较为粗糙,亦或是局限性过大。为了弥补以上不足,笔者提出了一种测定材料磨损系数的可靠方法,并实际应用于确定氮化硅陶瓷材料的磨损系数。采用 Rtec 摩擦磨损试验机开展氮化硅陶瓷材料的摩擦磨损试验,并应用 3D 激光显微镜对磨损形貌及磨损深度进行测量;基于修正的 Archard 模型,开发用于磨损深度计算的 Umeshmotion 用户子程序,提出基于有限元与用户子程序相结合的磨损过程仿真模拟方法;将试验结果与数值仿真结果相比较,确定氮化硅陶瓷的磨损系数。

## 1 销块滑动磨损试验

### 1.1 试验方法

利用 MFT5000 摩擦磨损试验机的往复

模块进行试验,在摩擦磨损试验机自带的软件中对摩擦副的载荷、滑动速度和滑动距离等参数进行设置.摩擦副的摩擦系数、磨损界面接触载荷和位移直接从软件中读取.笔者采用线性往复模块进行干摩擦条件下氮化硅陶瓷的自配副磨损试验,试验装置如图1所示.其中氮化硅块体装夹在线性往复模块的下卡具上,圆柱销装夹在上部的弹性夹头中.氮化硅陶瓷摩擦副销、块体材料均为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;泊松比为0.26;弹性模量为310GPa.销为圆柱, $\Phi 5\times 10\text{ mm}$ ,块体长宽高为 $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ,磨损环境温度为室温,磨损的载荷为40 N,滑动速度为1.2 m/min,试验时间为90 min.试验开始前,对氮化硅圆柱销与块体进行几何尺寸测量、表面粗糙度及表面形貌的测量,然后用无水乙醇在超声清洗机中对工件销和块进行清洗,烘干,试验后重复上述操作,洗掉磨屑.然后利用3D测量激光显微镜对工件块的磨损表面进行观察.

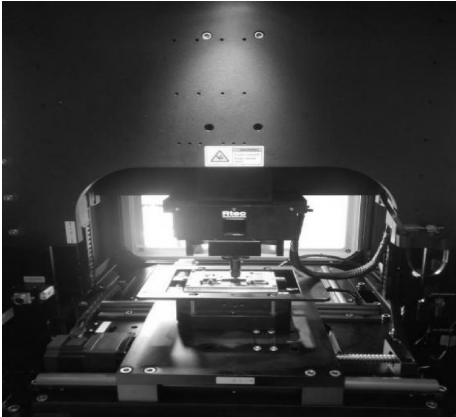


图1 摩擦磨损试验机

Fig. 1 Friction and wear testing machine

1.2 试验结果

1.2.1 摩擦系数

摩擦系数是指两表面间摩擦力与法向力的比值,是无量纲的数值.图2为氮化硅陶瓷摩擦系数在磨损演化过程中的变化规律.从图中可以看出,在圆柱销与块体刚接触时,摩擦系数表现为迅速升高,波动较大,随着试验的进行,摩擦系数增速减慢,这一阶段属于跑

合阶段当试验进行到20 min左右时,进入稳定磨损阶段,摩擦系数在一个较小的范围内波动,摩擦系数的均值约为0.41,这与现有的研究结果较为一致<sup>[9-11]</sup>.

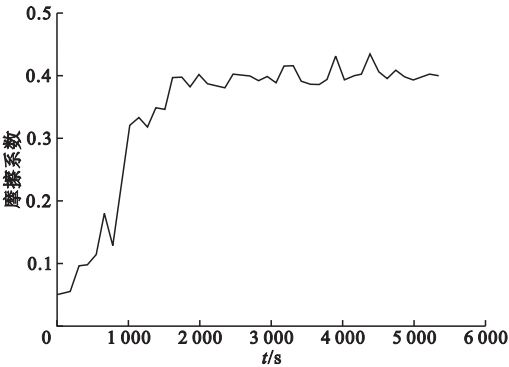


图2 干摩擦载荷40 N摩擦系数变化规律

Fig. 2 Change of friction coefficient of 40 N dry friction load

1.2.2 磨损表面形貌

摩擦磨损试验结束后,氮化硅陶瓷块体表面的磨损区域呈现凹坑形式.笔者利用3D激光显微镜对磨损后的氮化硅陶瓷块体表面形貌进行扫描测量,其中图3为摩擦副的三维图,图4为图3中 $aa'$ 位置处的磨损形貌.磨损表面形貌测量有两个目的:第一,基于不同位置处的磨损深度值,能够估算氮化硅陶瓷摩擦副的磨损系数,为磨损仿真提供合适的磨损系数估计值;第二,通过仿真获得的磨损深度与试验磨损深度的比较,实现有限元仿真获得的磨损形貌与试验磨损形貌的逐步逼近,最终确定氮化硅摩擦副的真实磨损系数.

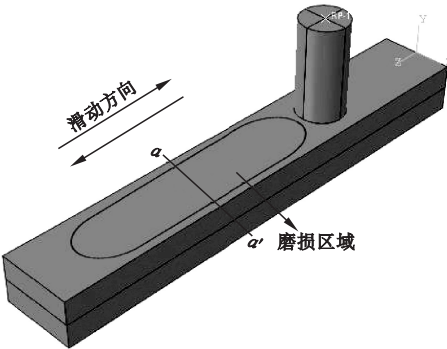


图3 摩擦副三维图

Fig. 3 3D friction pair

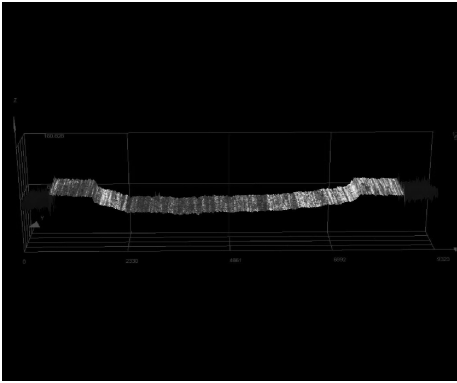


图4 干摩擦载荷 40 N 条件下磨损形貌图

Fig. 4 Wear profile of dry friction load 40 N

1. 2. 3 磨损系数估计值

采用 ARCHARD 模型描述磨损演化<sup>[12]</sup>,其磨损体积为

$$V = kFS. \tag{1}$$

式中: $V$ 为磨损的总体积; $F$ 为接触载荷; $S$ 为磨损的总滑程; $k$ 为磨损系数. 为了获得磨损系数,需要确定磨损体积,由于准确的磨损体积难以计算,可以采用近似的磨损体积估算磨损系数:

$$k = \frac{Wlh_m}{FS}. \tag{2}$$

式中: $W$ 为磨损区域的宽度; $l$ 为磨损区域的长度; $h_m$ 为估计的平均磨损深度,通过 3D 激光显微镜对磨损界面不同位置的磨损深度进行测量,然后取其平均值作为平均磨损深度. 通过式(2)计算得到的磨损系数能够为磨损仿真提供合适的磨损系数估计值. 经过计算,在载荷为 40 N,干摩擦条件下,磨损系数的估计值为  $1.15 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$ .

2 磨损过程的有限元仿真

2.1 磨损仿真模型

建立氮化硅圆柱销与块体的三维模型,采用 8 节点实体单元划分圆柱销与块体,整体三维有限元模型如图 5 所示. 依据试验中氮化硅块体的固定方式以及圆柱销体的受载方式,对块体在长度方向的前后两端面和底

面施加固定约束,在圆柱销的上部圆表面上施加均布载荷,沿着块体的长度方向设置圆柱销的滑动速度. 采用库仑摩擦模型表征氮化硅圆柱销与块体之间的摩擦接触,摩擦系数输入试验值 0.41.

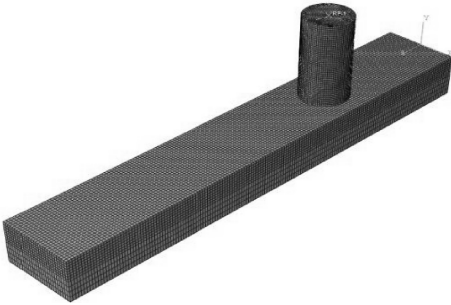


图5 圆柱销和块体摩擦磨损三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of cylindrical pin and block friction and wear

2.2 Archard 模型的修正

氮化硅圆柱销体与块体接触面积上的接触压力分布并非均匀分布,因此在磨损过程中,磨损路径上不同位置处的磨损深度也不相同. 为了准确地计算出磨损过程中磨损表面上任意位置处的磨损深度,需要对 Archard<sup>[13]</sup>模型进行改进使其适用于局部接触条件. Archard 模型的原始表达式为

$$\frac{V}{S} = K \frac{F}{H}. \tag{3}$$

式中: $H$ 为材料的硬度. 其中  $K/H$  即为磨损系数  $k, \text{MPa}^{-1}$ .

为了模拟磨损形貌随着滑动距离、载荷以及材料属性的变化规律,需要建立局部磨损深度与局部接触条件关系. 基于 J. J. Madge<sup>[14]</sup>和 V. Hegadekatte<sup>[15]</sup>等的修正,考虑坐标为  $x$  处的微元接触面积  $dA$ ,承受法向载荷  $dF$ ,发生滑动距离增量  $dS$ ,产生了磨损体积增量  $dV$ ,借鉴 Archard 模型的原始表达,得到微分形式的磨损模型

$$\frac{dV}{dS} = \left( \frac{K}{H} \right) dF. \tag{4}$$

方程两边同时除以  $dA$ ,并且采用  $k$  代替



$K/H$ , 则

$$\frac{dV}{dSdA} = k \frac{dF}{dA} \tag{5}$$

进一步有

$$\frac{dh}{dS} = kp \tag{6}$$

式中:  $dh = dV/dA$  为坐标  $x$  处的磨损深度增量,  $p = dF/dA$  坐标  $x$  处的接触压力. 上式表明某一点处的磨损深度增量  $dh$  与滑动距离增量  $dS$ 、局部的接触压力  $p$  以及材料的磨损系数  $k$  成正比例关系.

2.3 Umeshmotion 子程序的编写及 ALE 自适应网格

将修正后的 Archard 模型写入 ABAQUS 用户子程序 Umeshmotion<sup>[16-17]</sup>. 子程序编写包括定义圆柱销和块体的运动方向; 获取销部件和块部件接触面的节点坐标; 获取销部件和块部件接触界面各节点的接触压力; 获取销部件和块部件的滑动距离; 依据修正后的 Archard 模型计算各节点处的磨损深度等. 在有限元仿真时, 圆柱销与块体的磨损表现为磨损接触表面网格的位置移动, 这将会导致网格失真. 在数值仿真的过程中, 采用 ALE 网格自适应方法<sup>[18-19]</sup>来调整网格畸变.

3 结果分析

3.1 磨损形貌仿真结果与磨损参数演变规律

图 6 给出了通过有限元仿真得到的氮化硅块体磨损表面的形貌图, 总体上呈现中间深边缘浅的凹坑形式. 氮化硅块体磨损形貌的演变规律可以通过磨损接触界面压力分布特点以及磨损的滑动距离两个方面来解释: 在磨损的开始阶段, 整个接触界面各点处的位移较为接近, 整个接触界面较为平坦, 但氮化硅圆柱销与块体接触界面压力并非均匀分布, 边界位置(位置标识见图 7)的接触压力大于中心位置的接触压力(见图 8); 由于氮化硅圆柱销接触界面上各点滑动距离相同,

上述的接触压力分布将导致氮化硅圆柱销边界位置的磨损深度大于中间位置的磨损深度, 形成图 9 所示中间凸起的磨损表面, 这将引起氮化硅圆柱销与块体接触中心处的接触压力逐渐增加, 氮化硅块体接触中心的弹性位移也会增大, 氮化硅块体接触表面呈现浅凹坑形; 随着磨损的持续进行, 氮化硅块体接触中心位置处的较高接触压力(参见图 8 在 45 min 时的压力分布结果)以及显著大于边界处的滑动距离, 引起块体磨损路径方向中心线上各点处的磨损深度随着磨损时间的增加显著增大, 且磨损深度的增加速度明显大于边界位置处磨损深度的增加速度. 最终, 较为明显的中间深两边浅的磨损形貌在块体表面形成.

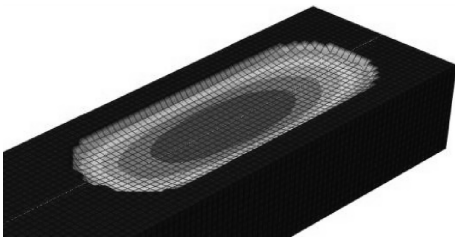


图 6 氮化硅块体磨损形貌仿真结果  
Fig. 6 Cylindrical pin and block simulation wear profile

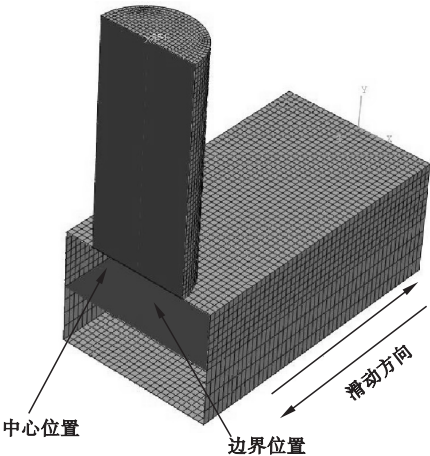


图 7 圆柱销的中心位置与边界位置  
Fig. 7 Center position and boundary position of the cylindrical pin

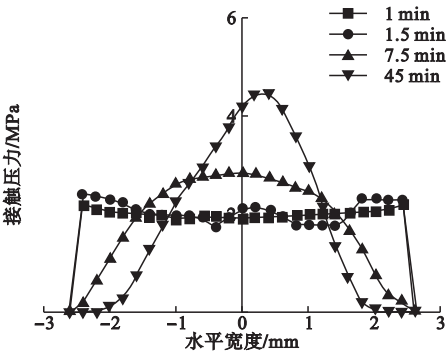


图8 圆柱销不同位置接触压力分布图

Fig.8 Contact pressure distribution at different positions of the cylindrical pin

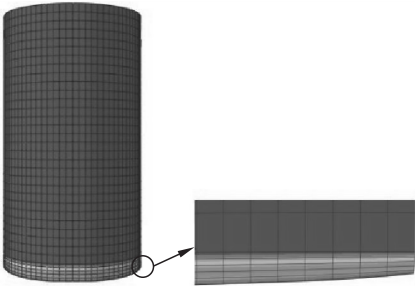


图9 圆柱销的磨损形貌

Fig.9 Wear profile of a cylindrical pin

3.2 磨损系数确定

图2中氮化硅块体aa'位置磨损深度的有限元仿真结果与试验结果的对比如图10所示。

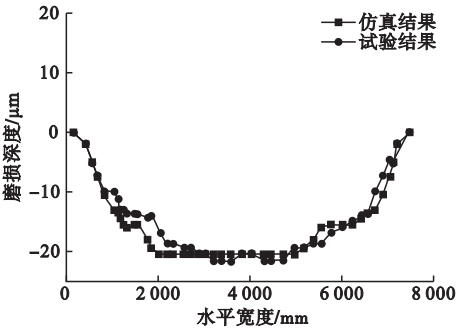


图10 仿真与试验磨损深度对比图

Fig.10 Comparison of simulated and experimental wear depth

从图中可以看出仿真结果与试验结果非常吻合,表明通过调整磨损系数,采用有限元方法能够准确重现试验过程,因此采用试验与数值仿真相结合的方法确定材料的真实磨

损系数是可行的,也是可靠的.最终确定氮化硅陶瓷在接触载荷为40 N,干摩擦条件下的磨损系数为 $1.825 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ ,比估计值( $1.15 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$ )高出59%,二者差距较大,表明采用磨损系数的估计值预测陶瓷产品的磨损量会产生较大的偏差。

笔者在获得磨损系数时采用的手段是磨损试验与有限元模拟.有限元模拟时使用的磨损模型是可靠的.另一方面,笔者借助有限元法的较强适用性,通过调整磨损系数实现有限元仿真与磨损试验结果的逐步逼近来获得试验条件下摩擦副的磨损系数,此过程是完全可行的,且无论试验条件如何,有限元的逐步逼近都是可以实现的,因此可以用于不同试验条件下的磨损系数的获得.磨损系数的调节量还受磨损试验条件(比如磨损副接触界面面积的改变)的影响,不具备磨损系数调整量的通用模型,因此没有给出磨损系数调整量的正向模型。

4 结 论

(1)在干摩擦条件下,氮化硅陶瓷材料的摩擦系数随着磨损过程的进行先升高,后平稳,且稳定磨损阶段摩擦系数的波动范围较小。

(2)圆柱销的表面边缘部分磨损严重,块体表面呈现中间深两端浅的形式,这与磨损界面的压力分布与磨损的滑动距离密切相关。

(3)将磨损试验与有限元仿真相结合,确定氮化硅陶瓷材料在接触载荷为40 N,干摩擦条件下的磨损系数为 $1.825 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$ .该方法准确可靠,对于润滑条件同样适用,也为不同材料摩擦副磨损系数的确定提供了参考。

(4)获得的陶瓷材料磨损系数与估算方法确定的磨损系数差距显著,表明采用磨损系数的估计值预测陶瓷产品的磨损量能够导致较大的误差,获得磨损系数的精确值极其必要,能够为陶瓷产品精度寿命评价奠定

基础.

## 参考文献

- [1] 朱忠猛,蒋晗.第21届材料磨损国际会议的总结评述[J].摩擦学学报,2017,37(4):558-564.  
(ZHU Zhongmeng,JIANG Han. Summary of the 21st international conference on material wear and wear[J]. Tribology, 2017, 37(4): 558-564.)
- [2] 徐琴,王星,路宁安.基于ANSYS的磨煤机辊套的摩擦磨损失效分析[J].材料研究与应用,2016,10(4):264-267.  
(XU Qin,WANG Xing,LU Ning'an. Failure analysis of friction and wear of coal mill roller based on ANSYS[J]. Materials research and application, 2016, 10(4): 264-267.)
- [3] 束成祥,李晓阳,余晓琴,等.反应烧结碳化硅陶瓷材料的摩擦磨损性能[J].理化检验(物理分册),2013,49(9):589-592.  
(SHU Chengxiang,LI Xiaoyang,YU Xiaoqin, et al. Friction and wear properties of reaction-sintered silicon carbide ceramic materials[J]. Physical and chemical testing (physical section), 2013, 49(9): 589-592.)
- [4] 周松青,肖汉宁.碳化硅陶瓷摩擦化学磨损机理及磨损图的研究[J].硅酸盐学报,2002,30(5):641-644.  
(ZHOU Songqing,XIAO Hanning. Study on friction chemical wear mechanism and wear diagram of silicon carbide ceramics[J]. Journal of silicate, 2002, 30(5): 641-644.)
- [5] ILIEV C. On the wear behaviour of silicon nitride sliding against metals in water[J]. Industrial lubrication & tribology, 2010, 62(1): 32-36.
- [6] GANGOPADHYAY A, JAHANMIR S. Friction and wear characteristics of silicon nitride-graphite and alumina-graphite composites[J]. A S L E transactions, 1991, 34(2): 257-265.
- [7] CLAUDIO R, AVILA D S, PINTAUDE G. Uncertainty analysis on the wear coefficient of archard model[J]. Tribology international, 2008, 41(6): 473-481.
- [8] YANG L J. Wear coefficient equation for aluminium-based matrix composites against steel disc[J]. Wear, 2003, 255(1): 579-592.
- [9] 孟凡英,郭绍义,刘曾岭,等.氮化硅基陶瓷的摩擦磨损特性研究[J].浙江理工大学学报, 2008, 25(1): 79-82.  
(MENG Fanying, GUO Shaoyi, LIU Zengling, et al. Friction wear characteristics of silicon nitride based ceramics[J]. Journal of Zhejiang sci-tech university, 2008, 25(1): 79-82.)
- [10] 田晓,贾克军,祝彦,等.陶瓷材料磨损机制及磨损程度评价方法综述[J].润滑与密封, 2012, 37(1): 105-109.  
(TIAN Xiao, JIA Kejun, ZHU Yan, et al. Summary of evaluation methods and the wear mechanism wear ceramic material[J]. Lubrication engineering, 2012, 37(1): 105-109.)
- [11] 姚小飞,谢发勤,韩勇,等.温度对TC4钛合金磨损性能和摩擦系数的影响[J].稀有金属材料与工程,2012,41(8):1463-1466.  
(YAO Xiaofei,XIE Faqin,HAN Yong, et al. Effects of temperature on wear properties and friction coefficient of TC4 alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(8): 1463-1466.)
- [12] MCCOLL I R, DING J, LEEN S B. Finite element simulation and experimental validation of fretting wear[J]. Wear, 2004, 256(11): 1114-1127.
- [13] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of applied physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [14] MADGE J J, LEEN S B, MCCOLL I R, et al. Contact-evolution based prediction of fretting fatigue life: effect of slip amplitude[J]. Wear, 2007, 262(9): 1159-1170.
- [15] HEGADEKATTE V, HUBER N, KRAFT O. Finite element based simulation of dry sliding wear[J]. Modelling & simulation in materials science & engineering, 2005, 13(1): 57.
- [16] BAE J W, LEE C Y, CHAI Y S. Three dimensional fretting wear analysis by finite element substructure method[J]. International journal of precision engineering & manufacturing, 2009, 10(4): 63-69.
- [17] 刘娜.碳/碳复合材料表面烧蚀的多尺度数值模拟[D].北京:北京工业大学,2014.  
(LIU Na. Multiscale modeling of surface ablation on carbon/carbon composites[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.)
- [18] WANG Y, PASILIAO C L. Modeling ablation of laminated composites: A novel manual mesh moving finite element analysis procedure with ABAQUS[J]. International journal of heat & mass transfer, 2018, 116: 306-313.
- [19] 张伟伟.基于非结构自适应网格技术的高超声速流动数值模拟[J].工程力学, 2012, 29(3): 226-229.  
(ZHANG Weiwei. Numerical simulation of hypersonic flow based on unstructured adaptive grid technology[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(3): 226-229.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)