

薄膜表面的摩擦磨损机理研究

苏佳佳¹, 陈景浒²

(1 广东工程职业技术学院, 广东 广州 510095; 2. 广州钢铁集团技术中心, 广东 广州 510380)

摘要:分析基本的摩擦学机理,通过尺度效应阐述了金刚石和 DLC 涂层的影响,说明尺度效应的重要性;讨论了在微米级接触问题中参数对薄膜表面摩擦磨损的影响。利用 abaqus 有限元分析软件,对模型模拟计算变形、应力和应变,为表面断裂分析建立一个基本原理。

关键词:涂层; 材料特性; 滑动接触; 数值模拟

中图分类号: TB115

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2012)16-0130-04

Study on Friction and Wear Mechanisms for Coated Surface

SU Jiajia¹, CHEN Jinghu²

(1. Guangdong Polytechnic College, Guangzhou 510095, China; 2. Technology Center of Guangzhou Steel Group Co., Ltd., Guangzhou 510380, China)

Abstract: The basic tribological mechanisms were analyzed and the importance of scale effects was illustrated by a discussion on scale effects for diamond and DLC coating. Meanwhile, the parameters influencing friction and wear of the coated surfaces were discussed in micro-level contacts. With the use of finite element analysis software (Abaqus), a principle for surface fracture analysis was established by modeling the deformation, stress and strain.

Key words: coating; materials behavior; sliding contact; numerical simulation

20 世纪 80 年代, 硬质陶瓷薄膜(TiN、TiC、Al₂O₃)作为刀具的表层在制造业广泛使用,使磨损率降低了 1~2 数量级或者更多。20 世纪 90 年代,人们研究了低摩擦薄膜(金刚石、类金刚石 DLC 等),并且其中的一些已经商用。在那些要求表面具有低摩擦磨损特性的机械零部件中,低摩擦薄膜广泛应用。进入 21 世纪初,很多研发工作集中在采用可控的方法改善薄膜的表面结构,包括开发不同的多元纳米结构薄膜、多层膜、成分膜、掺杂膜以及纳米复合薄膜等^[1]。

本文主要介绍了针对摩擦学表面特性进行建模和模拟的方法。讨论在微米级接触问题中参数对于薄膜表面摩擦磨损的影响,最后阐述如何通过 abaqus 有限元软件模拟计算变形、应力和应变,为表面断裂分析建立一个基本原理。

1 基本摩擦磨损机理

基本的摩擦机理为粘着、摩擦和犁沟,如图 1 所示。根据外形可以分成划痕、刮伤、凹坑、表面切割、

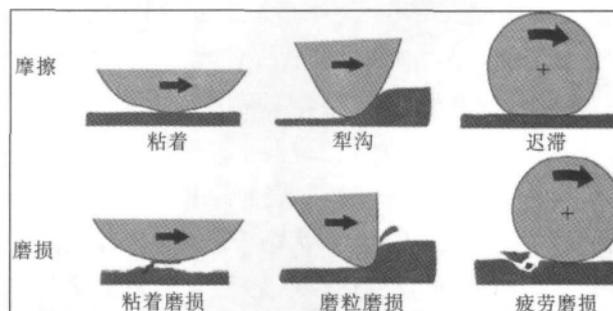


图 1 粘着、犁削和迟滞有关的基本摩擦磨损机理
Fig.1 Contact mechanisms of basic friction and wear mechanism

剥落、表面侵蚀和咬合^[2-3]。随着对基本磨损过程研究的深入,目前广泛认可的分类方法将磨损分为粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损以及摩擦化学磨损^[4-5]。

疲劳磨损可以分为两阶段:第一阶段发生材料改性而不发生材料转移。在连续载荷的作用下,接近表面的材料特性被慢慢改变;第二个阶段是指磨损或材料转移阶段,当转移的材料不能承受载荷时开始进入第二阶段,裂纹形成、扩展,直至材料最后从表面脱离,形成磨屑。

金刚石涂层的摩擦机理,粗糙表面主要是微凸体间相互影响,对于比较粗糙的 DLC 涂层表面,主要是表面的石墨化和转移层的组织强化^[6]。表面石墨化对于光滑表面至关重要,物理光滑表面的超润

收稿日期:2011-12-06

作者简介:苏佳佳(1978-),女,广东揭阳人,讲师,博士研究生;

电话:13312868330;E-mail:sugarsujiaja@163.com

滑特性可以通过悬空键的氢化解释。对于主要的表面参数进行分析是建立表面模型的基础, 这些参数包括表面、薄膜、薄膜 / 基体之间的界面以及基体的弹性、塑性以及断裂行为。

2 摩擦学中的尺度问题

研究不同尺度上的摩擦学现象是非常重要的, 当较硬的球在沉积了一层薄膜的盘上滑过时, 在宏观尺度上发生的典型接触状态如图 2 所示。如果能把这些参数分类, 了解它们之间的相互作用, 就可很好地预测和控制摩擦磨损^[7-8]。根据图 2 所示, 不同接触条件下主要控制参数有薄膜 / 基体之间的硬度关系(硬-软, 软-硬)、薄膜厚度、表面粗糙度以及接触面间的磨屑。采用典型的 PVD 和 CVD 方法制备的薄膜在接触过程中, 薄膜厚度、表面粗糙度以及磨屑的尺寸都在几微米范围内。



图 2 影响摩擦的主要参数
Fig.2 Main-parameters of influencing friction

当有些与摩擦磨损相关的现象发生在不同尺度上时, 整体的研究变得更加复杂^[9]。在有些情况下, 由于分子或原子的相互作用, 剪切发生在纳米尺度上; 另一方面, 由于微凸体间的碰撞而产生微米级的裂纹^[10]。但是, 为了防止接触而采用弹、塑性流体动压润滑时, 通常在宏观尺度上计算压力和润滑膜的厚度^[11]。观察力和振动时只考虑零部件, 而预测效率和寿命时则要从整体机械来研究。摩擦学的长度尺度代表了区分和理解摩擦学现象相关特性的不同方法, 如图 3 所示。

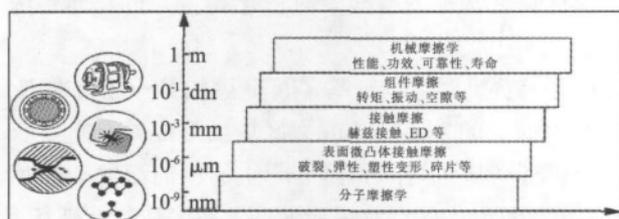


图 3 不同种类的摩擦学过程
Fig.3 The tribological process of different types

3 表面应力、应变模拟

有限元技术(FEM)为研究具有力学性能的摩擦学模型提供了很好的工具, 这些力学行为包括在宏观和微观尺度上, 摩擦接触中的变形, 应力和应变。随着计算能力的提高以及软件的开发, 已经成为在纳米尺度上建立摩擦学模型的重要手段。

3.1 模拟接触条件

实验参数: 滑动距离 10mm, 滑动开始前的初始压下位移为 0.001mm, 接触稳定后, 压下位移为 0.1mm, 滑动 10mm, 模型中不涉及滑动速度, 模型与时间无关。

滑动头: 球形探头半径为 20mm, 探头材料为金刚石, 杨氏模量 1140GPa, 硬度 80GPa, 泊松比 0.07, 表面粗糙度为理想光滑表面。

薄膜: 厚度 2μm, 薄膜材料 TiN, 薄膜沉积方法为物理气相沉积, 杨氏模量 300GPa, 硬度 25GPa, 泊松比为 0.22, 表面粗糙度为理想光滑表面。

键层: 厚度 500nm, 硬瓷层的杨氏模量为 500GPa, 泊松比 0.22。

基体: 几何形状为理想的光滑平面, 基体材料为高速钢, 杨氏模量 200GPa, 硬度 7.5GPa, 泊松 0.29, 根据临界弯曲强度估计屈服强度为 4100MPa, 加工硬化系数为 20。

摩擦: 摩擦系数值是通过测量与上面材料相同的样本得到的。模拟计算时摩擦系数为常量 0.08, 该值没有考虑摩擦中犁削分量的影响。

3.2 有限元方法建立接触模型

有限元网格尺寸和薄膜的厚度在一个数量级上, 如图 4 所示。接触部分的垂直力假设为椭圆分布, 从图的左边向右边摩擦时, 把该断面作为平面应

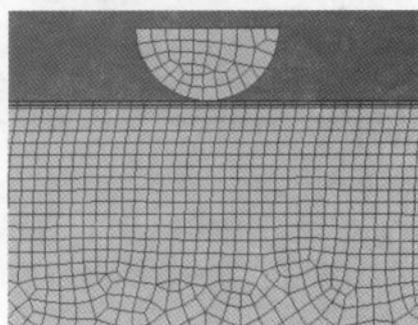


图 4 有限元模型
Fig.4 Finite element model

变问题来分析。另外,假设所分析的对象—板及滑块在接触处完全贴合,接触区有较大的应力集中,局部采用密集网格,接触部分的单元划分最小为 2 μm。

对接触点进行建模是通过描述主动表面和被动表面两个接触区域,用有限滑动类型来描述接触过程。接触为光滑平面间的“硬接触”,采用与速度无关的库仑摩擦模型分析相关的表面间相互作用,模型中包括了由于基体的塑性变形产生的表面硬化效应。

4 表面模拟的载荷条件、应力和应变

摩擦磨损主要受到两方面影响,一是在表面或表面变形层产生的剪切力,另外是由于在表面或表面变形层出现的弹、塑性变形以及断裂行为。

滑动头使表面发生弹性变形和塑性变形,图 5 是表面发生弹、塑性变形的三维示意图。初始阶段,形成一个小球形压痕,材料的塑性流动将压痕周围的材料向前推成圆环形。随着滑动头向前移动,形成了一个越来越深的沟槽。在滑动头的下面同时发生弹性变形和塑性变形,而在探针滑过的表面,主要发生塑性变形。另外,在探针的前面也会出现圆环形材料堆积。随着法向载荷增加,当金刚石探针不断

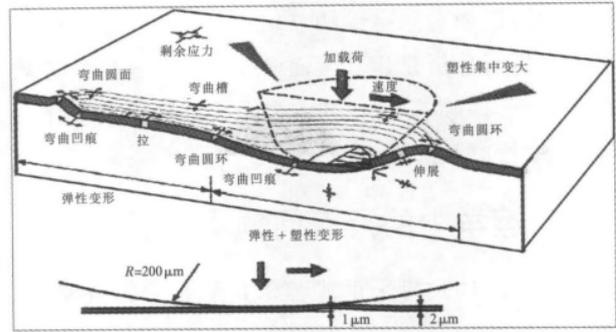


图 5 薄膜表面变形三维示意图
Fig.5 Sketch of coated surface deformation result of four loading effects

向表面靠近时,在改变的区域由于应力集中形成非常复杂的动态应力区域。

4.1 具有硬质结合层的钢基 TiN 薄膜的第一应力准则

典型的应力分布模拟结果如图 6 所示。这是一幅应力分布云图。观察方向和图 6 中所示的方向相同。

平稳的应力过渡区表明在金刚石探头的下方存在压缩应力,接触区域周围拉伸应力见图 6(a)。探头下方最大压缩应力约为 7200 MPa,并且压缩应力延伸到表面下约 40 μm,见图 6(b)。同样可以看到在加载滑动头的下方结合层范围内出现一层较薄的高拉伸应力,见图 6(a)。滑动头下的拉伸应

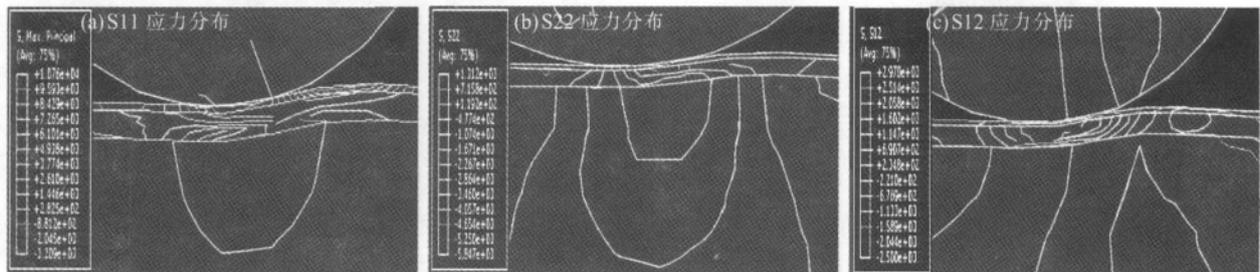


图 6 应力分布模拟结果(MPa)
Fig.6 Stress distribution simulation results (MPa)



图 7 滑动 5mm 时的塑性变形(μm)
Fig.7 Plastic deformation of slide for 5 mm (μm)

力约为 8200MPa。最大值出现在接触区域后方一段距离,即沟槽边缘位置。此时大约为 9400MPa。在划痕实验中,通常这里都是最早出现裂纹的地方。在接触区的后面,沟槽区的表面上出现尾状的高残余应力区,约为 4200MPa。

4.2 具有硬质结合层的钢基 TiN 薄膜中的应变

与图 6 中接触条件相同的应变分布如图 7 所示。加载滑动头下方由于弹性和塑性变形产生大的应变,这个区域深入表面下约 10 μm。接触区后面的尾状区域在沟槽下有残余应变存在,并再延伸到沟槽表面下方。

4.3 带有界面裂纹的钢基 TiN 薄膜的第一应力准则

表面上的裂纹对于应力区域的形成具有重要影响。薄膜 / 基体间的界面上产生的侧向裂纹非常值得关注,因为这些裂纹说明薄膜 / 基体粘着被破坏。这些侧向裂纹的扩展导致较大的薄片的脱落或是薄膜剥离表面。图 8 显示了应力类型以及界面上一个

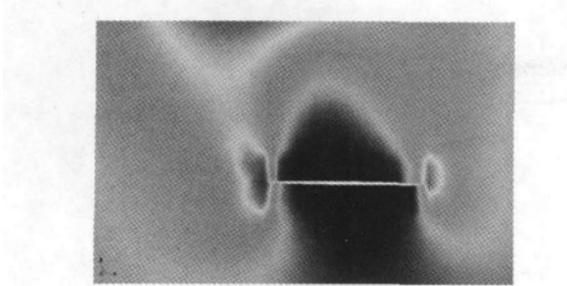


图8 侧向裂纹应力图
Fig.8 Stress drawing of lateral crack

短程侧向裂纹端头产生的高应力。

5 结语

基本的摩擦磨损机理可简化成:由粘着、犁削和迟滞引起的摩擦以及由粘着、磨粒和疲劳与材料断裂混合产生的磨损。摩擦化学、表面物理效应以及表面疲劳被认为仅是表面材料改性的机理,因为这些现象发生在材料断裂之前。

参考文献:

[1] 张绪寿,余来贵,陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展 [J]. 摩擦学学报,2000,20(2):156-160.

[2] Suh N P. Overview of the delamination theory of wear [J]. Wear,1977,44(1):278-287.
 [3] Robert Isaac Jaffe, Benjamin A. Fundamental Aspects of Structure Alloy Design [M]. New York:Plenum,1977:565.
 [4] Karmakar S, Rao U R, Sethuramiah A. An approach towards fatigue wear modeling [J]. Wear,1996,198(1-2):242-250.
 [5] Challen J M, Oxley P L B, Hockenull B S. Prediction of archard's wear coefficient for metallic sliding friction assuming a low cycle fatigue wear mechanism [J]. Wear,1986,111(3):275-288.
 [6] 张天成,姜晓霞,李诗卓. 钝化膜在腐蚀磨损过程中的作用 [J]. 腐蚀科学与防护技术,1998,5(9):259-262.
 [7] 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. 196-255;305-318.
 [8] 刘英杰,成克强. 磨损失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1991. 2-21.
 [9] 赫罗绍夫 M M,巴比契夫 M A. 金属的磨损[M]. 北京:机械工业出版社,1966.
 [10] 松原清,李明怀,庄志译. 摩擦学—摩擦、润滑及磨损的科学技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.
 [11] Avien B W E, Giddard J, Wilman H. An experimental study of friction and wear during sliding abrasion [J]. Wear, 1968,12:35-53. ㉔

(上接第 129 页)

3 结论

(1) 随激光功率的增大,金相组织呈现出残余奥氏体减少、马氏体增多的现象,表面的硬度呈先升高后降低的趋势,但是没有骤降的现象。

(2) 随激光功率的增大,耐磨性能有显著的改变,功率值为 600~800 W 时,磨损率随着功率的增加而增加,当功率等于 800W 时,磨损率达到最大值。

参考文献:

[1] 李养良,罗红梅,王利,等. 45 钢多道搭接激光熔覆层的组织与性能[J]. 热加工工艺,2009,38(4):69-70.
 [2] 邱星武,李刚,任鑫,等. 45 钢激光相变硬化组织及性能研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术,2008,20(6):413-415.

[3] Muniz G, Conde A, Fernandez B J. Tratamiento termico con laser de cuchillas de acero para uso agricola (Laser heat treatment of steel cutting blades for agricultural uses) [J]. Revista de Metalurgia(Madrid),2003,39(6):443-451.
 [4] Majumadari J Dutta, Nath A K, Kumar B Ravi. Studies on residual stress developed in laser surface irradiated 0.6% carbon steel [J]. Lasers in Engineering,2004,14(3-4):133-151.
 [5] Labudovic M, Hu D, Kovacevic R. Three-dimensional finite element modeling of laser surface modification [J]. Proc. Instrn. Mech. Engrs.,2000,214B(7):683-692.
 [6] Wu W, Liang N G, Gan C H, et al. Numerical investigation on laser transformation hardening with different temporal pulse shapes[J]. Surface and Coatings Technology,2005,(1):1-9.
 [7] 赫庆坤,李同道,王勇,等. 抽油杆接箍直纹激光淬火的磨损性能研究[J]. 金属热处理,2008,33(7):73-75.
 [8] 吴钢,宋光明,黄婉娟. 激光淬火工艺参数对层深及硬度影响敏感性研究[J]. 激光技术,2007,31(2):163-165. ㉔