

## 材料磨损与微电子机械系统中的磨损现象\*

MATERIALS WEAR AND WEAR IN  
MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS邓忠民<sup>1,2</sup> 谢季佳<sup>1</sup> 周承恩<sup>1</sup> 洪友士<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室(LNM), 北京 100080)

(2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

DENG Zhongmin<sup>1,2</sup> XIE Jijia<sup>1</sup> ZHOU Cheng en<sup>1</sup> HONG Youshi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2. School of Space Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要** 磨损是材料和机械失效的主要原因之一。本文介绍了近年来材料磨损性能研究的进展, 磨损的几种破坏机制以及相应的磨损理论模型, 并介绍了 MEMS 中磨损研究的现状。

**关键词** 磨损 微电子机械系统 研究现状

**Abstract** Wear is one of the main reasons of materials failure and mechanical failure. The mechanism of wear is complicated by several factors, such as microstructure change or phase transition of material surface, elastic and plastic mismatch of contact surface, residual stress, working environments and etc. This paper introduces the studies of materials' wear properties in recent years, makes comparisons of several wear mechanisms and gives corresponding wear models. The paper also gives several factors which affect the wear properties of silicon and silicon-based materials in MEMS, such as working environments of MEMS, cohesion force, contact force and surface properties.

**Key words** Wear; Micro-electro-mechanical system; Research progress

Correspondent: DENG Zhongmin, E-mail: dengzm@lnm.imech.ac.cn, Fax: +86-10-82316530

The project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation (No. 19891180), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 19525205) and Fund of Chinese Academy of Science.

Manuscript received 20010706, in revised form 20010809.

## 1 引言

磨损是材料失效的主要原因之一, 其物理机制相当复杂<sup>[1~4]</sup>, 受到诸多因素影响, 如材料表层的微结构变化和相变、接触表面的弹塑性匹配度、材料内残余应力、材料的服役环境等等。图 1 列出了接触副的相互运动特点、损伤形式与磨损损伤机制的关系<sup>[2]</sup>, 磨损研究的复杂性从中可见一斑。同时, 磨损分析又有很强的工程应用背景, 因此, 对于材料磨损损伤特性的分析一直为广大学术界和工程界所重视。材料磨损损伤的基本特点是发生接触、摩擦, 并在材料表面形成累积损伤且产生磨屑。

近年来, 微电子机械系统 (MEMS) 的迅猛发展, 使我们能深入到以前从未涉足的, 利用特征尺度为微米量级的微型转换元件进行传感和致动的领域<sup>[5]</sup>。同时, 对于 MEMS 中微尺度、低粗糙度小载荷的磨损特性研究也成为一个新的课题<sup>[6]</sup>。

以下综述材料磨损损伤的破坏形式和破坏机制,

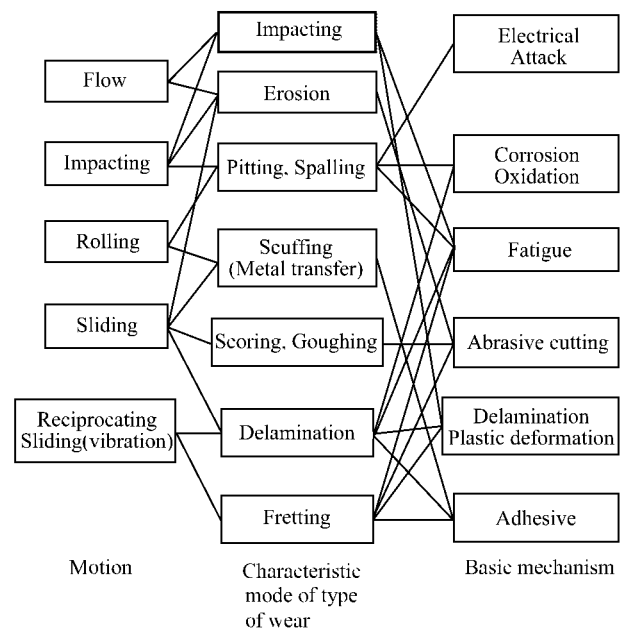


图 1 接触副运动形式、磨损破坏形式与破坏机理的关系

Fig. 1 Relations among contact pair motion, wear mode and mechanism

\* 20010706 收到初稿, 20010809 收到修改稿。本文得到国家自然科学基金重大项目 (19891180)、国家杰出青年科学基金 (19525205) 和中国科学院的资助。

对磨损分析模型进行评估,并介绍近年来对 MEMS 中磨损现象的研究。

## 2 材料磨损损伤机制和破坏形式

影响材料磨损损伤的因素非常多,一般将磨损机制分为磨粒损伤、粘着损伤、接触疲劳、氧化腐蚀<sup>[7~10]</sup>等四种机制。各种复杂的磨损损伤现象不外乎是四种基本机制的单独或综合体现。

所谓磨粒损伤,是指由于硬颗粒或硬突起物使材料产生迁移而造成的一种磨损。磨粒损伤为工业中最重要的材料接触损伤形式。分析磨粒损伤中两种材料的破坏形式<sup>[11]</sup>,一种破坏形式是由于材料塑性变形引起的。塑性变形引起犁沟、微观切削而导致材料破坏。另一种材料磨粒损伤破坏形式则是由于断裂机制引起的。

粘着损伤的机制是建立于材料表面虽然名义光滑,细观上却是很粗糙的假设上。假设材料细观表面是由一系列的峰谷组成。由两个这种表面滑动接触时,这些凸点会产生切向力。由于局部应力很高,以致超过材料软表面的屈服强度,结果在局部高应力及滑动引起的切向力共同作用下,两表面结合点产生断裂破坏。因此,粘着损伤涉及到接触尖点的塑性变形,形成冷焊点及金属交换。然而,这些模型不能解释滑动情况下的金属损失。所以伴随粘着磨损的同时,一般都会发生其他机制的损伤。

事实上,按照这个模型,在材料结合处的磨损是常常不可避免的。粘着损伤的破坏形式有微动损伤、胶合、咬卡等。

接触疲劳是指当两个接触物体相对滚动或滑动时,在接触区形成的循环应力超过材料的疲劳强度的情况下,在材料表层将引发裂纹,并逐步扩展,最后形成微观的断裂破坏的损伤过程。

材料表面或表层的局部断裂往往是由剪应力引起的,而剪应力依赖于材料的摩擦系数。裂纹常常在材料的亚表层产生,然而,由于材料微结构中的杂质和空穴的影响,裂纹的扩展常常不沿最大应力方向发展<sup>[12]</sup>。接触疲劳的破坏形式为点蚀和剥层。

氧化腐蚀损伤,是由于化学作用使材料表面发生损伤。腐蚀和氧化反应是其破坏形式。对于氧化腐蚀的研究,Quinn 发展了一个分析模型<sup>[13]</sup>,并取得一定的应用效果<sup>[14]</sup>。

## 3 材料磨损损伤分析模型

磨损分析模型和相应的数学描述能帮助设计者预测材料的抗磨使用寿命。但是,由于材料的磨损损伤是一个非常复杂的系统过程,因此,希望能有一个磨损公式涵盖所有磨损现象几乎是不可能的。针对各种各

样的磨损现象,学者们建立了各式各样的磨损模型,对应的数学公式多达数百种<sup>[1]</sup>。总结这些公式,磨损分析模型可分为三大类:

### 3.1 Archard 公式

Archard<sup>[7]</sup>从力学角度提出的磨损分析模型。其考虑接触的实际面积比名义面积要小得多。磨损损失的材料体积与滑动距离成正比。

$$V = k \frac{F_n}{P_m} d \quad (1)$$

式中  $V, k, F_n$  —— 磨损体积, 磨损系数, 法线载荷  
 $P_m, d$  —— 表面特性(硬度), 滑动距离

式中磨损系数  $k$  对于一种材料来说并不是一个常数,即使在同样材料、同样载荷、相同滑动距离的条件下,磨损量  $W$  也可能因为  $k$  值的不同而不同。影响  $k$  的因素很多,其中接触条件、滑动速度及服役环境影响较大。Archard 公式简单有效,并能提供一点有用的信息,但它完全忽略了金属变形的物理特征及有关材料的变化,并且在数学表达式中使用了一些假设有些过于粗糙,不尽合理。

在 Archard 公式的基础上,Zhou<sup>[15]</sup>等结合  $M-B$  分形接触模型<sup>[16]</sup>发展了基于分形参数的磨损公式,用此公式研究材料表面粗糙度对材料表面的接触损伤性能的影响,结果与试验基本吻合。Hornbogen<sup>[10]</sup>针对材料韧度对磨损性能的影响,将 Archard 磨损理论拓展到低韧性区,以塑性应变为判据将磨损分为两个阶段。当界面最大塑性应变  $\epsilon_d$  小于裂纹扩展临界应变  $\epsilon_c$  时称为 I 阶段,此时材料耐磨性与硬度成正比,Archard 磨损理论满足。当界面最大塑性应变  $\epsilon_d$  大于裂纹扩展临界应变  $\epsilon_c$  时称为 II 阶段,此时对应于高的磨损率,并且磨损率取决于材料的断裂韧度。 $\epsilon_c$  的影响因素有载荷、应变率、材料属性和磨粒的切入角。该模型的前提假设是裂纹扩展是磨损的控制因素。

$$W = K_0 \frac{d P}{c H} \quad (2)$$

式中  $W, K_0$  —— 磨损率, 磨损系数  
 $P, H$  —— 外载, 材料硬度

### 3.2 经验公式

许多磨损损伤的数学公式是根据实验数据统计出的经验公式,因此,它们仅对一些特殊情况下有效。这样的公式是大量的,如

$$W = KF^a V^b t^c \quad (3)$$

式中  $a, b, c$  —— 无量纲的经验参数  
 $W, F$  —— 磨损量, 接触载荷  
 $V, t$  —— 速度, 时间  
 $K$  —— 经验参数,其量纲由  $F, V, t$  决定

经验公式的有效性是有限的,常常与一个或数个特殊的实验有关。从磨损图来分析运动参数(位移、粘

着状态、粗糙滑动、部分滑动)与损伤破坏机制的关系也是磨损分析的一个方法<sup>[17]</sup>。

### 3.3 分析模型

利用半经验半解析法发展的磨损公式分析一些材料的磨损损伤现象是比较有效的。由实验数据提供磨损损伤机制的信息、材料使用工况和材料特性,结合合适的磨损损伤机制,对不同类的磨损发展了不同的磨损损伤模型。将这些信息利用计算机储存和分析,当有效的数据存入并分析时,针对材料的使用工况、接触对的几何形状、材料的特性,选择合适的损伤模型进行材料的磨损特性分析<sup>[18]</sup>。基于能量法、疲劳断裂力学和弹塑性理论,分析磨损损伤的模型近年来得到发展<sup>[19~21]</sup>。Halling<sup>[19]</sup>修正了 Archard 的模型,考虑了表面粗糙度对材料弹塑性变形及应力应变关系的影响。磨损模型中也引入了疲劳的临界判据。Don 和 Ringey<sup>[20]</sup>推导了损伤破坏的临界条件,认为剥层和磨屑的厚度可以预测材料的磨损率。

Qiu 和 Plesha<sup>[21]</sup>的基于能量法的磨损分析模型,由于考虑了磨损及磨屑对接触表面的影响,材料的相互滑动过程非常复杂。特殊情况,若在接触对中,一个材料表面硬度比另外一个要高很多,且不考虑磨屑的影响下,磨损公式可以简化为 Archard 公式。分析模型的表达式一般都很复杂,如一个预测冲击磨损寿命的公式

$$= v_s + v_p = \left[ 0 + \left( \frac{2}{1} \right)^{1/2} H \right]^{5/2} \cos^2 \sin^{1/2} + \left[ 0 + \left( \frac{2}{1} \right)^{1/2} H \right]^2 \sin^2 \quad (4)$$

式中  $H$  表示材料硬度,  $\theta$  为冲击角,  $I$  为载荷指数。

## 4 MEMS 中的磨损现象

微电子机械系统(MEMS)具有广阔的应用前景,同时又是科学发展的前沿,可能孕育着重大的科学突破,目前世界上各主要国家都斥巨资予以研究和开发。同宏观机械系统一样, MEMS 中也存在着磨损失效现象,如图 2 为一个微发动机的磨损失效,照片显示基面和齿轮上都有磨屑<sup>[22]</sup>。由于特征尺度的减小,对 MEMS 摩擦磨损的研究离不开一些特殊的仪器,如光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)、电子能量损失谱仪(IEEL)、摩擦力显微镜(FFM)等等。同时,随着器件特征尺度的减小, MEMS 器件的比表面积将增大,材料的磨损成为 MEMS 表面效应的主要影响之一。

目前, MEMS 的微型电机主要是由硅或硅基材料制成,对硅及硅基材料的抗磨损性能的研究对提高微型电机的运行性能有很重要的意义<sup>[23,24]</sup>。综述现有的文献,主要分析四个因素对硅及硅基材料磨损性能的影响。

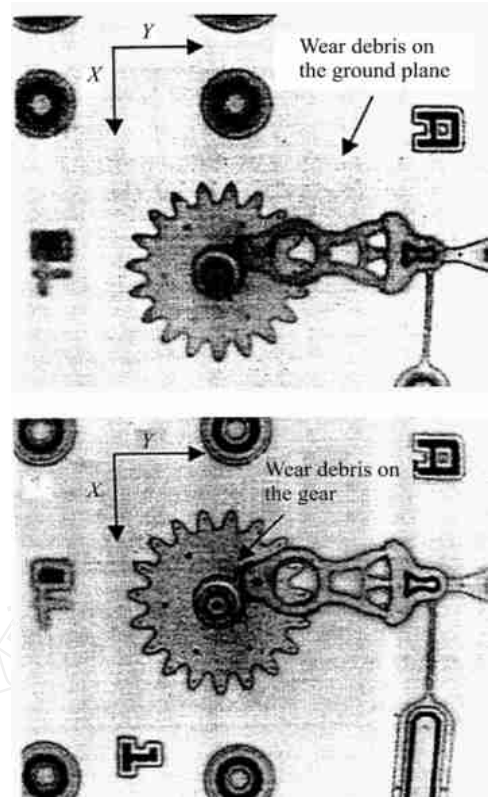


图 2 微发动机磨损失效光学照片

Fig. 2 Optical images of failed microengines by wear

### 4.1 MEMS 服役环境的影响

环境的湿度、氧化状态对材料的磨损性能都有很大影响<sup>[22,25]</sup>。随着湿度的变化,硅及硅基材料的磨屑形状、磨屑量均随之变化。湿度增大,磨屑形状由片形、粗条形变成细针形。在干燥环境下微发动机会产生更多的磨屑。研究表明,环境的氧化性能也能使材料的磨屑增加。

### 4.2 粘着接触力的影响

两物体粘着接触而构成界面,其 Dupr é 粘着能为<sup>[26]</sup>

$$= \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (5)$$

式中  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  为两固体表面自由能,  $\gamma_{12}$  为界面能。再结合经典的接触弹性理论,构成微尺度粘着接触理论<sup>[5]</sup>。以分析磨损时粘着力的大小,从而预测 MEMS 的粘着磨损性能<sup>[27]</sup>。

### 4.3 载荷的影响

MEMS 中的载荷都是微牛顿( $\mu\text{N}$ )量级。对于 MEMS 中载荷对材料磨损性能的研究, Bobhuan<sup>[28~31]</sup>等人作了许多很有价值的工作。他们利用原子力显微镜(AFM),分析了各种载荷下未处理、处理的和覆盖有涂层的硅基 MEMS 器件,在各种环境下的摩擦磨损性能。随着载荷的增加,表面的磨损损伤增大,如图 3 为不同载荷下 Si(111)表面的划痕深度。图 4 则比较了各种硅基 MEMS 器件在不同载荷下的抗磨损性能。

Lee<sup>[32]</sup>等人对 MEMS 在长时间冲击载荷作用下表面磨损破坏机制进行了研究,图 5 为缓冲结构试验件

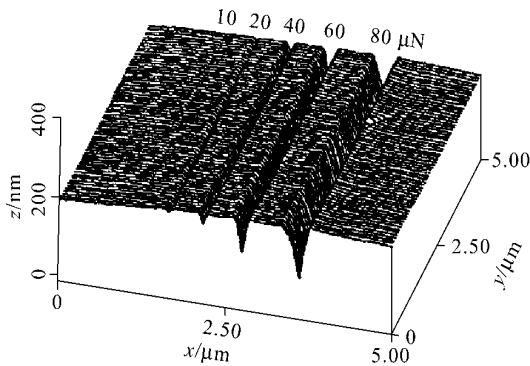


图3 不同载荷下 Si(111) 表面划痕深度  
( $x, y$  轴单位  $\mu\text{m}$ ,  $z$  轴单位  $\text{nm}$ )

Fig. 3 Surface profiles of Si(111) scratched at various loads  
( $x$  and  $y$  axes in  $\mu\text{m}$  and  $z$  axis is  $\text{nm}$ )

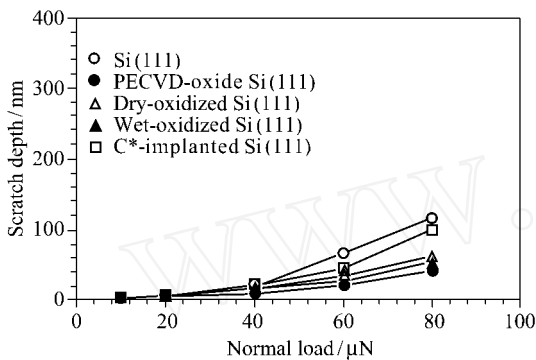


图4 各种 Si(111) 在刻划十周后, 载荷与表面刻划深度的关系

Fig. 4 Scratch depth as a function of load after ten cycle for virgin, treated, and coated Si(111) surface

在冲击实验前后放大的 SEM 图象对比, 结果表明, 冲击磨损材料表面破坏机制为疲劳破坏。总结实验结果, 预测 MEMS 冲击磨损的寿命, 可用经验公式<sup>[33]</sup>

$$P^3 N = \text{常数} \quad (6)$$

式中  $N$  为载荷  $P$  作用下 MEMS 破坏的循环次数, 常数的上限为  $4.2 \times 10^9$  周  $\text{GPa}^3$ 。

#### 4.4 材料表面改性的影响

材料表面改性可能提高材料的抗磨损性能, 采用化学气相沉积 W 涂层、脉冲激光沉积涂层等表面改性技术来提高硅及硅基材料<sup>[28~31, 34~38]</sup> 的磨损特性, 已获得很好的结果。图 4 显示, 化学气相沉积氧化物涂层的硅基材料抗磨损性能最好。

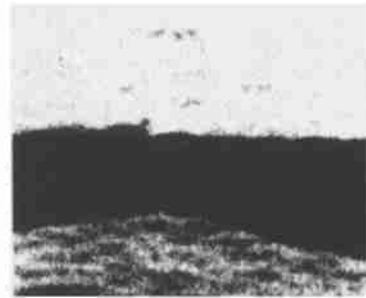
目前已有许多科技工作者在研究 MEMS 摩擦磨损特性, 对 MEMS 的磨损机理的研究及预测模型的建立, 工作还很少被涉及, 需要更多人的参与。

## 5 结束语

综上所述, 虽然对材料的摩擦磨损特性的研究已经做了许多工作。但是, 由于磨损现象本身存在的复杂性, 随着新材料、新工艺、新情况的不断出现, 对磨损的研究仍将是研究工作的一个难点与热点, MEMS 这种微尺度的摩擦磨损研究目前正成为磨损分析的一个



(a) 冲击前  
(a) Before impact



(b) 12 小时冲击磨损后 SEM 照片  
(b) SEM graph after 12 hours of continuous impact

图5 试验件冲击实验前后放大的 SEM 照片  
Fig. 5 Closeup SEM graph of an impact wear tester before and after impact

新的分支。

## References

- Meng H C, Ludema K C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*, 1995, 181-183: 443 ~ 457.
- Ko P I. Wear of power plant components due to impact and sliding. *Applied Mechanics Reviews*, 1997, 50(7-9): 387 ~ 411.
- McCee, Margaret A, Howie, Donald W. Implant retrieval studies of the wear and loosening of prosthetic joints: a review. *Wear*, 2000, 241(2): 158 ~ 165.
- Kato, Koji. Wear in relation to friction—a review. *Wear*, 2000, 241(2): 151 ~ 157.
- Zhao Y P, Wang L S, Sun K H. Tabor number adhesion parameter and elastic theory of micro-scale adhesive contact. *Advances in Mechanics*, 2000, 30(4): 529 ~ 537 (In Chinese) (赵亚溥, 王立森, 孙克豪. Tabor 数粘着数和微尺度粘着弹性接触理论. *力学进展*, 2000, 30(4): 529 ~ 537).
- Wen S Z. *Nano-tribology*. Beijing: Tsinghua University Press, 1998 (In Chinese) (温诗铸. *纳米摩擦学*. 北京: 清华大学出版社, 1998).
- Archard J F. Contact and rubbing of flat surface. *J. Appl. Phys.*, 1953, 24: 981 ~ 988.
- Deuis R L, Subramanian C, Yellup J M. Abrasive wear of aluminium composites—a review. *Wear*, 1996, 201: 132 ~ 144.
- Liu J J. *Mechanism of material wear and wear-resistance*. Beijing: Tsinghua University Press, 1993 (In Chinese) (刘家浚. *材料磨损原理及其耐磨性*. 北京: 清华大学出版社, 1993).
- Nam P Suh, Translated by Chen G G. *Friction and wear of solid materials*. Beijing: National Defense Technology Press, 1992 (In Chinese) (Nam P Suh 著, 陈贵耕译. *固体材料的摩擦与磨损*. 北京: 国防工业出版社, 1992).
- Moore M A. *Abrasive wear. Fundamentals of Friction and Wear of Materials*, Papers Presented at the 1980 ASM Materials Science Seminar. 1981

- Sponsored by: ASM, Mater Sci Div, Semin Comm, Metals Park, Ohio, USA; Metall Soc of AIME, Warrendale, Pa, USA ASM, 73 ~ 118.
- 12 Godez S, Ren Z. Modeling of crack growth under cyclic contact loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1998, 30: 159 ~ 173.
  - 13 Quinn T F J. Review of oxidation wear —Part . *Tribology Int.*, 1983, 16(6) : 306 ~ 315.
  - 14 Quinn T F J. Oxidation wear modeling —Part : The general theory of oxidation wear. *Wear*, 1994, 175(1-2) : 110 ~ 115.
  - 15 Zhou G Y, Lew M C, Blackmore D. Fractal geometry model for wear prediction. *Wear*, 1993, 170: 1 ~ 14.
  - 16 Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *Journal of Tribology*, 1991, 113: 1 ~ 11.
  - 17 Lim S C, Ashby M F. Wear-mechanism maps. *Acta. Metall.*, 1987, 35(1) : 1 ~ 24.
  - 18 Peng, Rirk T B. Computer image analysis of wear particles in three-dimension for machine condition monitoring. *Wear*, 1998, 223(1-2) : 157 ~ 166.
  - 19 Halling J. Toward a mechanical wear equation. *Journal of Tribology*, 1983, 105: 212 ~ 220.
  - 20 Jarlen D, Rigney D A. Prediction of debris flake thickness. *Wear*, 1985, 105: 63 ~ 72.
  - 21 Qiu X, Plesha M E. Theory of dry wear based on energy. *Journal of Tribology*, 1991, 113(3) : 442 ~ 451.
  - 22 Jeremy A W, Thomas J H, Ann N C, et al. Failure analysis of worn surface micromachined microengines, SPIE, 1999, 3880-0277-786X/99: 30 ~ 39.
  - 23 Beerschwinger U, Albrecht T, Mathieson D, Reuben R L, Yang S J, Taghizadeh M. Wear at microscopic scales and light loads for MEMS applications. *Wear*, 1995, 181-183(1) : 426 ~ 435.
  - 24 Beerschwinger U, Mathieson D, Reuben R L, Yang S J. Study of wear on MEMS contact morphologies. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 1994, 4(3) : 95 ~ 105.
  - 25 Tanner D M, Walraven J A, Irwin L W, et al. The effect of humidity on the reliability of a surface, micromachined, microengine. *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, San Diego, CA, 1999. 180 ~ 197.
  - 26 Maugis D. Adhesion of sphere: The JKR-DMT transition using a Dugdale model. *J. Colloid Interface Sci*, 1992, 150(1) : 243 ~ 269.
  - 27 Zhao Y P, Yu T X. Failure modes of MEMS and microscale adhesive contact theory. *Int. J. Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2000, 1: 361 ~ 371.
  - 28 Bhushan B, Eminent O. Nanotribology and nanomechanics of MEMS devices. 0-7803-2985-6/1996, IEEE. 91 ~ 98.
  - 29 Bhushan B. Tribology on the macroscale to nano scale of microelectromechanical system materials: A review, *Journal of Engineering Tribology*, 2001, 215(1) : 1 ~ 18.
  - 30 Bhushan B, Israelachvili J N, Landman U. Nanotribology: Friction, wear and lubrication at the atomic scale. *Nature*, 1995, 374: 607 ~ 616.
  - 31 Sundararajan S, Bhushan B. Micro/nanotribological studies of polysilicon and SiC films for MEMS applications, *Wear* 1998, 217(2) : 251 ~ 261.
  - 32 Lee A P, Pisano A P, Lin L. Normal and tangential impact in micro electromechanical structures. Ch2957-9/91/0000-021, IEEE. 21 ~ 26.
  - 33 Palmgren A. Ball and roller engineering, 3rd edition, SKF Industries Corp Philadelphia, 1959.
  - 34 Mani S S, Fleming J G, Walraven J A, Sniegowski J J, de Boer M P, Irwin L W, Tanner D M, LaVan D A, Dugger M T, Jakubczak J, Miller W M. Effect of W coating on microengine performance *Proceedings-Reliability Physics (Symposium)*, 2000, San Jose, California, Sponsored by: IEEE, 146 ~ 151.
  - 35 Pelt J S, Ramsey M E, Magana R Jr, Poindexter E Jr. de Boer M P, LaVan D A, Dugger M T, Smith J H, Durbin S M. Pulsed laser deposited coatings for stiction and wear reduction in MEMS devices. *Proceedings of SPIE —The International Society for Optical Engineering* 3874, 1999. 76 ~ 84.
  - 36 Cagin Tahir, Che Jianwei, Gardos Michael N. Fijany Amir, Goddard William A. Simulation and experiments on friction and wear of diamond: A material for MEMS and NEMS application. Author Affiliation: California Inst. of Technology, Nanotechnology, 1998, 10(3) : 278 ~ 284.
  - 37 Rajan N, Zorman C A, Mehregany M, DeAnna R, Harvey R J. Effect of MEMS —compatible thin film hard coatings on the erosion resistance of silicon micromachined atomizers. *Surface & Coatings Technology* 1998, 108-109(1-3) : 391 ~ 397.
  - 38 Bhushan B KBharat, Chevallier Jacques. Modification of tribological properties of silicon by boron ion implantation Gupta. S. T. L. E. *Tribology Transactions*, 1994, 37(3) : 601 ~ 607.

#### 作者简介

邓忠民,男,1968年11月生,江西波阳人,汉族。北京航空航天大学宇航学院副教授,博士。研究方向为材料力学性能、结构力学。通讯地址:北京航空航天大学宇航学院(100083),Tel:010-82316611,Fax:010-82316530,E-mail:dengzm@lmm.imech.ac.cn

DENG Zhongmin, male, born in 1968, Boyang county of Jiangxi Province, Associate Professor of School of Space Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Ph. D., Research Area: mechanical property of materials, structural mechanics.

谢季佳,男,1973年生,湖南衡阳人,汉族。中国科学院力学研究所 LNM 室,助研,在职博士生。研究方向为材料力学性能、纳米材料和结构。通讯地址:中科院力学所 LNM 室(100080),Tel:010-62545533-2105, Fax:010-62561284, E-mail: xiejj@lmm.imech.ac.cn

周承恩,男,1972年生,内蒙古人,汉族。中科院力学所 LNM 室讲师,在职博士生。研究方向为固体力学、材料的疲劳。通讯地址:中科院力学所 LNM 室(100080),Tel:010-62545533-2105, Fax:010-62561284, E-mail: zce@lmm.imech.ac.cn

洪友士,男,1951年7月生,福建省厦门市人,汉族。中国科学院力学研究所所长,研究员,博士生导师。研究方向为材料力学性能与内部结构。通讯地址:北京中关村中科院力学研究所(100080),Tel:010-62613730, Fax:010-62561284, E-mail: hongys@imech.ac.cn