doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.054

压电驱动微悬臂梁与基底粗糙面间多次接触分析*

黄健萌　黄　靖
(福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: 基于压电原理,在考虑黏着、微凸体间相互作用、基底弹塑性变形及微悬臂梁弹性恢复等基础上,运用 ABAQUS 动态模拟分析了压电薄膜驱动下微悬臂梁末端与基底粗糙面间的接触。结果表明:每次压电驱动接触过程中均存在数次明显的接触-分离情形,梁与基底在无电压作用后 2 ~ 4 μs 内仍出现黏合,分离期间粗糙表面发生小部分的弹塑性变形,其中最大残余应力值处于接触区域边缘;随着压电驱动次数的增加,基底发生塑性变形区域不断向两边扩展,表面间黏合作用增强,影响系统接触的可靠性。

关键词: 压电薄膜　微悬臂梁　粗糙面　黏合接触
中图分类号: TH117.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)09-0368-05

Multiple-contact Analysis between Microcantilever and Substrate Rough Surface Driven by Piezoelectric

Huang Jianmeng　Huang Jing
(*School of Mechanical Engineering and Automation*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *China*)

Abstract: Based on the piezoelectric principle, in consideration of adhesion, interaction between asperities, elastic-plastic deformation of the substrate, microcantilever elastic recovery and so on, the dynamic characteristics between microcantilever and the substrate rough surface driven by piezoelectric were simulated by using ABAQUS finite element software. The results showed that there were several significant contact-separation cases during the contact process of each piezoelectric driving. When no voltage was applied for 2 ~ 4 μs, bonding between beam and the substrate still appeared. A small portion of the elastic-plastic deformation on the rough surface occurred during separation, and the maximum residual stress appeared at the edge of the contact area. With the increase of piezoelectric driving times, the effect of surface bonding enhanced and the plastic deformation region on the substrate rough surface extended to two sides continuously, which influenced the reliability of the contact system.

Key words: Piezoelectric film　Microcantilever　Rough surface　Bonding contact

引言

相对于宏观机械而言,由尺度效应引起的表面效应使得接触问题成为微机电系统(MEMS)器件中最主要的运动障碍和失效方式[1],从而影响许多微机械构件的工作特性,尤其是安全性和可靠性。其中,微悬臂梁作为典型的可活动微构件,在与基底运动接触过程中由于表面真实形貌和真实接触面积不断发生变化常常导致功能失效,无法满足商业应用的可靠性要求,因此微悬臂梁与基底的接触特性成为国内外学者研究的热点。

Chen 等[2-3]利用原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)的光学系统测量了悬臂梁末端与基底的接触过程,获得接触-分离时的黏着力,还观察到脆性分离和韧性分离两种分离模式,为接触-分离动态特性研究提供了一定的理论基础。Benjamin

收稿日期: 2014-12-10　修回日期: 2015-01-16
*国家自然科学基金资助项目(51205062)和福建省自然科学基金资助项目(2011J01299)
作者简介: 黄健萌,副教授,主要从事摩擦学研究,E-mail: hjmfzu@163.com

等[4]在忽略黏着影响而考虑 Au－Ni 合金微凸体间相互作用的基础上，对微悬臂梁开关结构进行仿真，发现合金中的 Ni 含量影响着接触面积的大小和微开关的综合性能。娄利飞等[5]对一种新型 PZT 压电悬臂梁驱动微开关的机械性能进行研究，探讨了悬臂梁结构参数与运动特性的关系，得出悬臂梁的长度和厚度对开关接触的动力学响应影响较大的结论。朱斌等[6]在非硅表面加工技术的基础上，分析一种新型的悬臂梁微机械开关的动力学特性，发现该微机械开关可以提高导通信号和延长开关接触时间，为改善开关接触性能提供了新思路。美国 Sandia 国家实验室[7]在加工悬臂梁组时发现，由于许多悬臂梁同基座接触黏合在一起而导致悬臂梁失效，同样，Patton 等[8]在不同环境条件下对纯金组成的热开关进行了测试，也发现了这一现象。可见，研究微悬臂梁与基底间的接触分析必须综合考虑黏着、材料特性、微机械实际机构以及表面复杂形貌等因素的影响。

文献[9]表明，利用压电材料制成的微执行器与现有的硅基微执行器相比，具有动作准确、响应快、低功耗的优势，硅基微结构与压电材料相结合的悬臂梁成为一种新的研究领域。而对于压电驱动微悬臂梁的研究，解析方程虽然可以获得一些用于指导设计的理论公式，但是由于应力、刚度等参数在梁不同位置有不同的数值，致使得到的结果与实际情况有很大误差。为了解决该计算精度问题，目前通常采用有限元分析方法，通过矩阵计算得到模型中每个单元运动状态的收敛解。因此，本文基于压电原理，在考虑黏着、微凸体之间相互作用、微悬臂梁弹性恢复及基底弹塑性变形等影响因素的基础上，运用 ABAQUS 建立压电驱动微悬臂梁末端与基底粗糙面间接触有限元模型，动态分析重复压电驱动过程中的接触力、实际接触面积等的变化规律。

1　压电原理

压电微悬臂梁采用一层压电薄膜和一层无源的非压电薄膜复合而成的结构，这种微结构具有微型开关的功能：通过向压电薄膜两端的电极提供一定大小的电压，微悬臂梁就会产生一定幅度的纵向变形。利用压电薄膜的逆压电效应，如果在两端施加一个外加电场，压电晶体内部的正负电荷在电场力的作用下会发生极化，此时压电薄膜将产生伸长或收缩，非压电薄膜为限制其横向维度变化从而使微悬臂梁发生上下位移弯曲变形，其变形大小与压电参数、外加电场有关。压电材料的力电耦合行为可由压电本构方程[10]描述为

$$D_m = d_{mi}\sigma_i + e_{in}^T E_n \quad (i=1,2,\cdots,6;m、n=1,2,3) \tag{1}$$

$$\varepsilon_i = S_{ij}^E \sigma_j + d_{mi} E_m \quad (i、j=1,2,\cdots,6;m=1,2,3) \tag{2}$$

式中　e_{in}^T——介电常数　　d_{mi}——压电常数

S_{ij}^E——弹性刚度　　σ_i、σ_j——应力

E_m、E_n——电场强度

数字 1、2、3 分别代表坐标轴 X、Y、Z，数字 4、5、6 分别代表绕 X、Y、Z 轴旋转方向，式(1)反映的是正压电效应，式(2)反映的是逆压电效应，压电材料的电位移 D_m 和应变 ε_i 由它所承受的应力和电场两部分影响叠加而成。

若极化方向沿 Z 轴，则压电材料沿 X、Y 轴是同性的，此时许多参数可以视为零，则压电常数矩阵、介电常数矩阵、弹性刚度矩阵分别为

$$\boldsymbol{d}_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{e}_{in}^T = \begin{bmatrix} e_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & e_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^T \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{S}_{ij}^E = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{12}^E & S_{22}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{31}^E & S_{13}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}^E - S_{12}^E) \end{bmatrix}$$

2　有限元模型

为简化模型计算，假设：梁的厚度远小于梁的长度和宽度，近似认为只有 Z 方向上下电极间的电场；由于压电薄膜上、下电极很薄，对结构分析影响较小，故将其忽略；材料各向同性。

硅具有良好的半导体材料特性，其机械性能优良，密度与铝类似，强度和硬度与铁相当，是 MEMS 中最常用的材料。考虑到 MEMS 器件的实际表面接触性能，模型中的梁末端接触体和基底均采用 Si 材料，其物理特性[11－12]为：密度 $\rho = 2\ 330\ \mathrm{kg/m^3}$，弹性模量 $E = 168\ \mathrm{GPa}$，泊松比 $\nu = 0.28$，屈服应力 $\sigma_Y = 7\ 000\ \mathrm{MPa}$。PZT 薄膜的压电系数和机电耦合系数比

其他压电材料大一个数量级，因此本文压电薄膜采用 PZT－5，其材料参数[13]为：密度 $\rho=7\ 500\ \mathrm{kg/m^3}$，介电常数 $e_{11}^T=1\ 100$、$e_{22}^T=1\ 100$、$e_{33}^T=827$，压电常数 $d_{31}=-5.2\ \mathrm{C/m^2}$、$d_{33}=15.1\ \mathrm{C/m^2}$、$d_{15}=12.7\ \mathrm{C/m^2}$，弹性刚度 $S_{11}^E=S_{22}^E=2.64\times10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$、$S_{33}^E=2.3\times10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$、$S_{44}^E=6\times10^{10}\ \mathrm{N/m^2}$、$S_{12}^E=1.42\times10^{11}\mathrm{N/m^2}$、$S_{13}^E=S_{31}^E=1.46\times10^{11}\mathrm{N/m^2}$。整个压电微悬臂梁的实际结构尺寸如表 1，其中两接触实体粗糙表面采用具有仿射性特性的分形函数表征，相关参数[14]为：分形维数 $D=2.4$，表面粗糙度系数 $G=3.36\times10^{-10}$ m。

考虑到弹塑性变形计算及粗糙面间黏着接触的复杂性，为简化计算，对微悬臂梁在 20～50 V 电压范围内施加 10 次压电驱动，每次电压作用时间为 10 μs。整个有限元模型如图 1 所示。

表 1 压电微悬臂梁的实际结构参数

Tab. 1 Actual structure parameters of piezoelectric microcantilever m

模型部件	长度	宽度	厚度
压电薄膜	1.5×10^{-4}	5×10^{-5}	2×10^{-6}
无源的非压电薄膜	1.5×10^{-4}	5×10^{-5}	3×10^{-6}
梁末端粗糙接触实体	8×10^{-6}	8×10^{-6}	3×10^{-6}
基底	8×10^{-6}	8×10^{-6}	3×10^{-6}

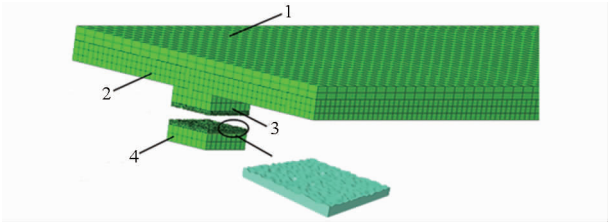

图 1 压电驱动微悬臂梁与基底粗糙面接触有限元模型

Fig. 1 Finite element model of contact between microcantilever and substrate rough surface using piezoelectric driving

1. 压电薄膜 2. 无源的非压电薄膜 3. 梁末端粗糙接触实体 B 4. 基底 A

3 结果分析与讨论

3.1 压电驱动过程中的响应分析

图 2 显示了在第 1 次压电驱动中，基底粗糙面 A 最先接触节点 A3665 的法向位移和其对应的梁末端接触体 B 节点 B1320 的法向位移随时间的变化，由于基底 A 固定不动，节点 A3665 的法向位移可认为是其本身的变形量。图 3 为多次压电驱动过程中微悬臂梁末端与基底粗糙表面间接触力的变化图。从图中可以看出，在第 1 次压电驱动中，由于微悬臂梁的弹性恢复力作用，前 6 μs 短时间内出现了 3 次明显接触-分离现象，接触瞬间冲击力很大，由于实际接触只发生在少数较高微凸体上，实际接触面积极小，使得接触力最大值发生在第 1 次接触中，达到 1 699.51 μN，此时基底最先接触节点 A3665 的变形量随着接触力的增大而迅速增加，最大变形量为 0.046 56 μm；随着压电驱动过程中基底发生弹塑性变形，表面接触微凸体逐渐被压平且向四周扩展，局部接触面积增大，使得表面间接触力变小，基底接触节点变形量幅度也随之减小，但是波动频率却越来越大，这是因为此时表面间黏合作用逐渐增强；在 6.1 μs 后，两粗糙表面局部接触区域发生黏合且持续到无电压作用后 2～4 μs，此过程中基底接触节点变形量随着接触力的变化而变化，由于接触表面受微凸体黏着力的影响，在第一次电压施加结束时（$t=10$ μs），梁与基底并未马上发生分离，故接触节点变形量在 10 μs 后仍然呈现出一小段波动，其最终变形量为 0.017 5 μm，接触区域发生完全塑性变形；由于悬臂梁的弹性恢复作用，使得梁末端接触体 B 节点 B1320 的法向位移发生波动。随着压电驱动次数的增加，每次压电驱动过程中发生接触-分离的次数较第 1 次压电驱动有所减少，表面间黏合作用持续时间则逐渐增大；由于接触时只有少数微凸体发生作用且不连续以及材料出现弹塑性变形，因此每次压电驱动过程中最大接触力的数值在不断变化波动，这一结果与文献[15－16]中对悬臂梁多次接触碰撞研究结果相类似。

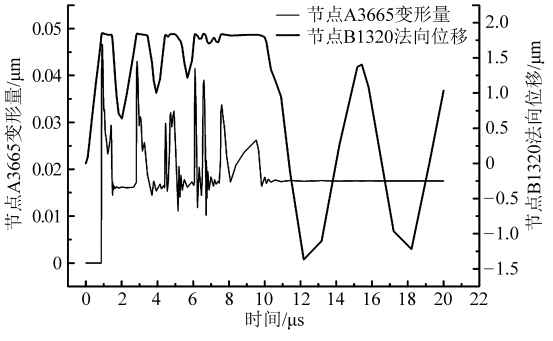

图 2 最先接触两节点的位移随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of displacement of the first contact between two nodes

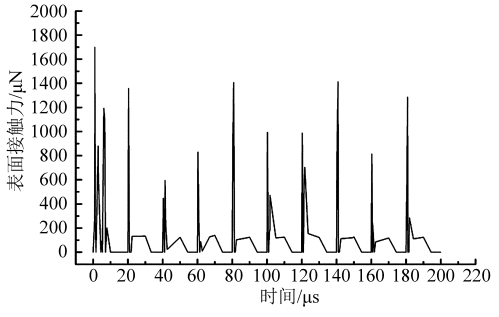

图 3 粗糙表面间接触力随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of contact force between two rough surfaces

3.2　接触-黏合-分离过程中基底粗糙面 vonMises 等效应力分布

图 4 显示了在压电驱动下最初的一次接触-黏合-分离过程中基底粗糙表面的 vonMises 等效应力分布情况。从图中可以看出：初始阶段接触发生在个别较高微凸体之间，接触面积很小，应力值瞬间增大，最大 vonMises 等效应力值为 12 846.955 MPa，超出硅的屈服极限，材料发生塑性变形；随着微凸体顶端被压平，进入接触的微凸体数量增多，接触区域增大且表面开始黏合，但由于实际接触面积很小，应力值仍然不断增大；分离后发生塑性变形区域不可恢复，存在残余应力且最大应力值处于接触区域的边缘处，也就是所谓的分离点，表明两粗糙表面间的分离过程是从边缘处逐渐向接触区域内部不断扩展的过程[17]。

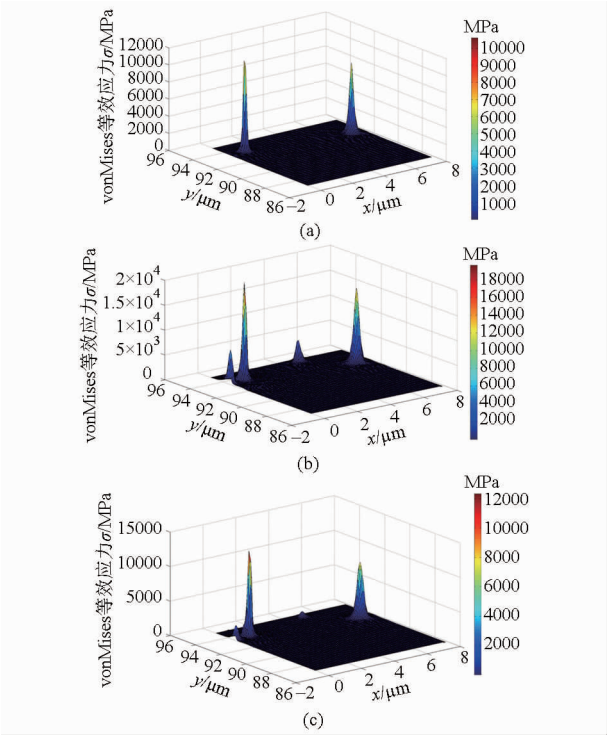

图 4　接触-黏合-分离过程中基底粗糙表面的 vonMises 等效应力分布

Fig. 4　vonMises equivalent stress distribution of substrate rough surface during process of contact - bonding - separation

（a）接触　（b）黏合　（c）分离

可见，压电驱动微悬臂梁与基底的接触是一个不断发生接触-黏合-分离的过程，随着发生次数的增加，分离后基底粗糙面出现塑性变形的区域不断向两边延伸，这必然影响到下一次接触黏合时的微凸体数量和接触区域面积大小，从而粗糙表面间的接触力和 vonMise 等效应力值在不断发生变化，影响着 MEMS 器件中微机械构件的接触特性。

3.3　粗糙表面间的接触面积变化

对于微观粗糙表面，其真实接触面积是由不连续的较高微凸体互相接触的某些离散点组成，与名义接触面积相比要小很多。在两粗糙表面不断接触的过程中，真实接触面积的变化影响着接触力和应力应变的分布，因此接触面积在摩擦学研究中一直占有比较重要的地位。图 5a、5b 分别为第 1 次压电驱动和 10 次压电重复驱动过程中两粗糙表面间的无量纲接触面积随时间的变化，其中 A 为实际接触面积，A_0 为名义接触面积。可以看出，在整个重复压电驱动过程中，实际接触面积只占名义接触面积的极小部分，且不断波动。从图 5a 可以看出，前 6 μs 内无量纲接触面积数值出现 3 次明显起伏波动，与前面接触力的响应分析中得到的结论相一致；随后粗糙表面间微小的接触区域开始黏合，此时无量纲接触面积出现最大值（0.001 87），但由于悬臂梁的弹性恢复，使得二接触体发生分离，实际接触面积迅速减少。从图 5b 中可以看出，在重复压电驱动中，无量纲接触面积的变化趋势与响应分析中接触力的变化相类似，最大数值都是出现在压电驱动过程初期，且变化波动在这时最频繁，表明接触面积与接触力有着密切联系；在压电驱动次数不断增加的过程中，由于粗糙表面间接触微凸体的随机性以及相互作用区域不断发生变化，使得接触面积大小在刚开始接触时瞬间增大，随电压变化，其数值与接触

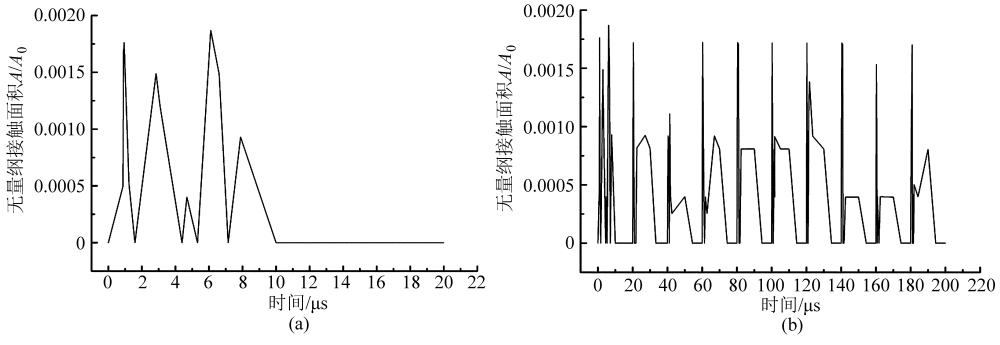

图 5　两粗糙表面间的无量纲接触面积变化曲线

Fig. 5　Curves of dimensionless contact area between two rough surfaces

（a）第 1 次压电驱动　（b）重复压电驱动

力一样,在粗糙接触表面接触-黏合-分离过程中不断变化,从变化持续时间可知表面间黏合作用随压电驱动次数增加而有所增强,这必然影响系统的接触可靠性。

4 结论

(1)压电驱动微悬臂梁与基底粗糙面接触实际上是一个复杂且存在多次弹塑性接触-黏合-分离的过程,在每次压电驱动过程中,梁与基底间出现数次明显的接触-分离情形,其在无电压作用后 2 ~ 4 μs 内仍发生黏合。

(2)实际接触面积只占名义接触面积的极小部分,数值变化趋势和接触力的变化趋势一致,在每次的压电驱动初期发生波动次数最多,最大值均出现在第 1 次压电驱动中;随着压电驱动次数的增加,基底粗糙面发生塑性变形区域不断向两边扩展,两表面分离后,局部接触区域的最大残余应力值处于接触区域的边缘处,而且两粗糙接触表面间局部黏合作用增强,这将影响 MEMS 器件接触的可靠性。

参 考 文 献

1 Zhang X J, Dong Y K, Meng Y G, et al. Investigation on the surface adhesion work and its effect on micro friction[J]. Key Engineering Materials, 2006, 315 - 316: 784 - 787.

2 Chen L, Lee H, Guo Z J, et al. Contact resistance study of noble metals and alloy films using a scanning probe microscope test station[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(7): 074910.

3 Chen L, McGruer N E, Adams G G, et al. Separation modes in microcontacts identified by the rate dependence of the pull-off force[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(5): 053503.

4 Benjamin E G, Angus I K, Douglas L I. Effects of alloying and local order in AuNi contacts for Ohmic radio frequency micro electro mechanical systems switches via multi-scale simulation[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(20): 203510.

5 娄利飞,杨银堂,李跃进,等. 硅基 PZT 压电驱动微开关的设计和优化[J]. 压电与声光,2005,27(4):445 - 448.
Lou Lifei, Yang Yintang, Li Yuejin, et al. Design and optimization of micro-switch actuated by PZT piezoelectric cantilever based on Si[J]. Piezoelectric and Acoustooptics, 2005, 27(4): 445 - 448. (in Chinese)

6 朱斌,杨卓青,陈文国,等. 一种新型三维多方向敏感的非硅微机械惯性开关[J]. 振动与冲击,2013,32(5):104 - 107.
Zhu Bin, Yang Zhuoqing, Chen Wenguo, et al. Novel multidirectional-sensitive MEMS inertial switch manufactured based on non-silicon surface micromachining technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 104 - 107. (in Chinese)

7 Redmond J M, Reedy J R E D, Heinstein M W, et al. Microscale modeling and simulating[R]. Sandia Report, SAND 2001 - 3675, 2001.

8 Patton S T, Eapen K C, Zabinski J S, et al. Lubrication of MEMS RF switch contacts using self-assembled monolayers[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102: 024903 - 1 - 024903 - 5.

9 Flynn M, Cross L E. Thin ferroelectrics films micromotor[J]. Microelectromechanical System, 1992, 1(1): 44 - 51.

10 张福学. 现代压电学[M]. 北京:科学出版社,2001.

11 Stephen A Campbell. 微电子制造科学原理与工程技术[M]. 曾莹,严利人,王纪民,等,译. 北京:电子工业出版社,2003.

12 Vodenitcharova T, Zhang L C. A new constitutive model for the phase transformations in mono-crystalline silicon[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41: 5411 - 5424.

13 缪建,朱若谷. 基于 ANSYS 的压电微悬臂双梁的有限元分析[J]. 压电与声光,2011,33(4):557 - 560.
Miao Jian, Zhu Ruogu. The finite element analysis of twin piezoelectric micro cantilever based on ANSYS[J]. Piezoelectric and Acoustooptics, 2011, 33(4): 557 - 560. (in Chinese)

14 Prasanta S, Niloy G. Finite element contact analysis of fractal surfaces[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40: 4245 - 4252.

15 刘中华,尹晓春. 自由梁对简支梁的多次弹塑性撞击[J]. 机械工程学报,2010,46(10):47 - 53.
Liu Zhonghua, Yin Xiaochun. Multiple elastic-plastic impacts between free-free beam and simply supported beam[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 47 - 53. (in Chinese)

16 Gao Huikai, Huang Jianmeng. Analysis of plastic strain between substrate and micro-cantilever under different deformation characteristics[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 477 - 478: 21 - 24.

17 Du Y, Adams G G, McGruer N E, et al. A parameter study of separation modes in adhering microcontacts[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 044902.