

微/纳机电系统中的毛细黏附作用

朱豫晋¹, 梁新建², 金磊²

1. 中国人民解放军总装备部综合计划部装备财务局, 北京 100081

2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 毛细作用在所有尺度中都存在,但是在微/纳尺度下尤为重要。随着微/纳机电加工技术的迅速发展及深入研究,微/纳机电器件得到广泛应用。在微/纳机电器件的加工和使用过程中,毛细黏附作用影响其可靠性,进而影响微/纳机电器件的商品化。鉴于毛细黏附问题对微/纳机电器件性能的重要影响,本文综述毛细黏附力对微/纳机电系统器件性能的影响效果,微/纳尺度的毛细黏附力作用规律,以及毛细黏附控制技术。

关键词 微/纳机电系统;毛细黏附;毛细黏附控制技术

中图分类号 TN306

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)02-0099-03

Capillary Stiction Action in the MEMS/NEMS

ZHU Yujin¹, LIANG Xinjian², JIN Lei²

1. *Equipment Finance Bureau, Comprehensive Planning Department, General Armament Department of PLA, Beijing 100081, China*

2. *Mechanical and Electrical College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

Abstract Capillary action exists on all scales, but is particularly important on the micro-nano scale. With the rapid development and in-depth study of the MEMS/NEMS technology, the MEMS/NEMS devices have found wide applications. In the processing and applications of the MEMS/NEMS devices, due to the capillary force, stiction failures may occur in different degrees, which affects their reliability and commercialization. In view of the importance of capillary stiction with respect to the performance of MEMS/NEMS device, this paper analyzes the effects of stiction failures on the MEMS/NEMS device performance, the capillary stiction mechanisms on micro/nano scales, as well as the capillary stiction control technology.

Keywords MEMS/NEMS; capillary stiction; capillary stiction control technology

0 引言

在自然界和日常生活中,毛细现象广泛存在。植物茎内

的导管就是植物体内的极细的毛细管,它能把土壤里的水分吸上来。砖块吸水、毛巾吸汗、海绵吸水、湿头发会成束、粉笔吸墨水都是常见的毛细现象。在这些物体中有许多细小的孔道,起着毛细管的作用。水沿毛细管上升的现象,对农业生产的影响很大。土壤里有很多毛细管,地下的水分经常沿着这些毛细管上升到地面上来。如果要保存地下的水分,应当锄松地面的土壤,破坏土壤表层的毛细管,以减少水分的蒸发。

毛细现象在所有尺度中都存在,但是在微/纳尺度下,结构间的液桥现象尤为重要^[1]。当少量液体被吸附在间距足够小的两个固体表面时,液桥现象就出现了。液桥现象在很多情况下都能发生^[2]。例如,在原子力显微镜(AFM)的球形探针和被测物体表面间存在少量小液滴,就会形成液桥^[3]。扫描力显微镜(SFM)的探针和样本间的水薄膜或其他液体薄膜也会形成液桥^[4]。这些功能强大的工具已用于观察纳米级和原子尺度物体的表面形貌,此时,不可避免地要研究微纳米尺度的液桥问题。

液桥对存在微/纳结构的器件的性能有重要影响。微/纳机电系统(MEMS/NEMS)是微/纳米技术研究的一个重要方向,是继微电子技术之后在微尺度研究领域中的又一次革命^[5]。随着微/纳机电加工技术的迅速发展,微/纳机电器件得到了广泛的应用,微/纳机电系统中的毛细现象以及液桥作用也随之得到关注。微型加速器(或射频微机电系统)在相对湿度较大的条件下,悬臂梁和基板间将形成液桥。同样微型陀螺仪梳齿和基底之间的一些小水滴也将形成液桥。液桥将导致固体表面和液体间的毛细黏附作用。为分开两固体表面,需要一个大于液桥引起的毛细黏附力的外力,毛细黏附力在普通宏观系统是微不足道的、可以忽略不计的,但在微/纳系统中将发挥重大作用,尤其是在纳米级系统,这是由微/纳尺度器件的小体积、大的表面积和体积之比以及相邻表面间

收稿日期: 2008-12-10

作者简介: 朱豫晋,研究方向为微机电技术、非线性结构动力学,电子信箱: zhuyj@163.com; 金磊(通信作者),副研究员,研究方向为微机电技术、冲击动力学,电子信箱: jinlei@bit.edu.cn

距极其微小所决定的。在微尺度条件下,表面力比体积力更为重要。随着器件尺寸的减小,表面张力的影响越来越大,毛细黏附作用能影响像 RF-MEMS、微型传感器、微型陀螺仪、或任何存在微/纳结构的器件的正常运作^[6]。

毛细黏附作用成为微/纳机电系统装配和制造中的主要问题,严重影响微/纳机电器件的性能。鉴于毛细黏附作用对微/纳构件的性能及正常工作具有的重要意义,本文重点综述毛细黏附作用对微/纳机电系统器件性能的影响效果,微/纳尺度的毛细黏附力作用规律,以及毛细黏附控制技术。

1 微/纳机电系统中的毛细黏附作用

湿气对任何电子器件一般都是有害的,对于微/纳机电器件的影响尤其棘手。湿气会引起一个被称为黏附的表面接触现象。由于微机械几何尺寸的微小化使得表面积与体积之比相对增加,表面效应增强。另外,微机械中构件间的间隙很小,表面光滑,因而微构件间的表面作用力影响较大,表面力和其他表面效应对微构件的正常工作有重要影响。来自 Sandia 国家实验室的最新研究报告指出,在构件材料强度满足要求的条件下,微型机械的黏附是造成其失效的主要原因^[7]。

大多数微/纳米系统的设计一般包括如下一些基本单元:微/纳型弹簧、微/纳型悬臂梁、微/纳型薄膜、微/纳型铰链、微/纳型齿轮等。在这些典型结构的制造过程中,最后一道晶圆级步骤是“释放”,它是将所有可以活动的结构打开。典型的操作是刻蚀牺牲层,牺牲层一旦被去除,由永久材料制造的部分就可以按照设计意图自由活动。释放步骤需要完全清洗,以去除刻蚀剂、溶解二氧化硅(或其他牺牲材料)、微量固体残留以及其他任何可能残留的牺牲性副产品。释放过程中,活动部分受毛细力作用而发生毛细黏附是一个非常严重的问题。当毛细黏附力高于微结构的机械恢复力时,黏附就会发生。当液体与相邻表面接触并慢慢蒸发时,来自液态清洗剂的毛细管力可以把几部分拉到一起。这种液体接触现象应归因于拉普拉斯压力差和能产生吸引力的表面张力。在微细加工技术中,当牺牲层被刻蚀、结构释放以后,结构层很容易因表面应力的作用而粘连到基底或相邻结构上,这种现象被称为“释放黏附”。

在工作过程中,微/纳米器件如果封装得不好,在相对湿度较大的条件下由于器件材料的亲水性产生毛细凝聚而形成液滴,这种液滴就会在如微谐振器、微加速度计、微机械陀螺等的梳齿间形成液桥,进而对梳齿的相对运动产生阻力或者黏附力,致使发生失效^[8-9]。这种现象被称为工作黏附。例如微开关电极间的毛细凝聚液桥,弯月曲面的接触角和板面粗糙度会影响吸合电压值^[10]。在微尺度实验中,微/纳桥和微/纳梁又是微尺度材料常数性能检测时常用的试件样品,如果实验中加载端与被检测端的微尺度试件发生毛细黏附,将直接影响检测数据的准确性。

总之,毛细黏附现象对微/纳米器件的成品率、使用寿命、工作可靠性等造成了极大的影响,增加了微/纳米器件的报废率,带来了不必要的损失。

2 微/纳尺度的毛细黏附力作用规律

虽然毛细黏附在所有尺度中都存在,但是在微/纳尺度下尤为重要。当两物体间间距很小时极容易形成液桥。如加工中的残余液体会形成液桥,相对湿度大条件下也会形成液桥,其他很多情况都会导致液桥形成。这种液桥对结构间的相对运动会产生毛细黏附力^[11]。两物体(固体)表面形状的不同,之间的毛细黏附力的作用规律也不相同。球体与球体,球体与平面,平面与平面,或是一般曲面之间都有不同的作用规律。下面以平面与平面间的液桥为例,来说明液桥黏附力的作用规律。

微/纳平行板间的液桥如图 1 所示。毛细黏附力主要源于液体的表面张力。在微/纳机电系统中,当间距较小的两固体平板之间存有液桥时,两板之间就存在毛细黏附力(图 2),毛细黏附力的大小与其作用距离的关系为

$$F(l) = -\frac{\sigma(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)b}{l}$$

式中, σ 为液体的表面张力, θ_1 为液体与上板的接触角, θ_2 为与底板的接触角, b 为板的宽度, l 为板间距。从毛细黏附力的表达式可以看出,毛细黏附力的大小与其作用距离的一次方成反比,即 $F \propto \frac{1}{l}$ 。



图 1 微平行板间形成液桥

Fig. 1 The liquid-bridge between two micro parallel plates

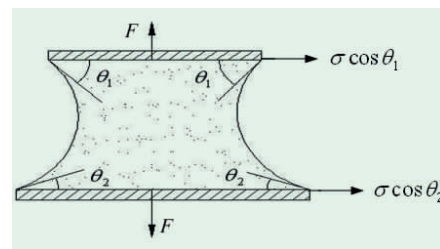


图 2 平行板与液桥间的作用力

Fig. 2 The capillary stiction force between the parallel plates and the liquid-bridge

从图 3 可以看出,在各个作用力中,毛细黏附力随作用距离(即作用行程)的变化最为缓慢,且作用力值与其他表面力相比较,在微米和纳米尺度都表现得非常明显。毛细黏附力是影响微/纳器件性能的主要原因。

3 毛细黏附的控制技术

目前,毛细黏附问题仍然是微/纳机电器件研究中一个尚未克服的大问题^[11]。对黏附问题的研究属于基础研究领域,需要弄清影响黏附的因素。如何有效控制微/纳器件中的黏附现

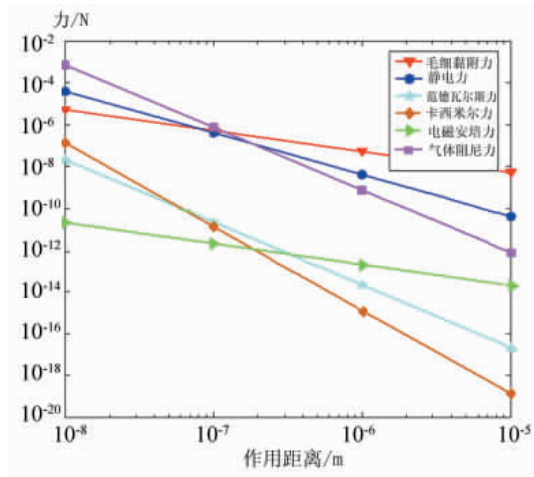


图3 各作用力的作用行程关系曲线

Fig. 3 Comparison of forces between material bodies with variable interaction distances

象成为微/纳器件加工制造中一个不容忽视的问题。毛细黏附力在众表面力中对黏附作用的影响最大,因此,必须研究毛细黏附的控制技术。

为了减小毛细黏附,微/纳结构的硬度、表面形貌、表面化学特性都必须作相应改变。黏附可用下列两大类方法来防止或减轻。其一是在制造过程中采用防止微/纳结构与基质物理接触的方法,如通过冷冻干燥、临界点干燥、干蚀刻工艺等。这类方法有一个不利之处,就是在加工完成之后,微/纳结构仍有可能由于大的加速度或静电力的作用而产生接触。其二则是建立在减小毛细黏附的基础上,使得表面能减小的方法,如材料使用疏水表面或进行表面处理,或使实际接触面积减少的方法,如使用凸起块、增加表面粗糙度等。这些方法可持久地降低毛细黏附力^[12]。

控制毛细黏附最有效的方法是在微/纳器件表面提供一个非亲水表面以避免“液体桥”的出现,消除毛细引力的作用,其方法主要是通过干法刻蚀、使用非水清洗剂和采用超临界二氧化碳干燥等。在干燥步骤中,超临界干燥是一个减小毛细管力的非常普通的方法。微/纳器件在液态二氧化碳中干燥,通过调节压力和温度使之达到超临界点。在干燥过程中不形成弯月面,表面也不会被拉到一起。也可以对各部分进行化学处理,以使器件表面即使在接触时也不发生粘连。通过成功的表面处理,能够得到一种疏水性的表面,通常它们的表面能较低,因此可以避免由于弯月面形成所带来的表面张力的影响。

传统上用于军事、航空、医学和其他领域的气密封装经常需要高的可靠性,并在制造时控制水蒸气的体积分数不超过 $5\,000 \times 10^{-6}$ 。在器件预期寿命期间,为了阻止大量湿气进入,封装的漏气率限定在 $1.0133 \times 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{mL/s}$ 。但是要微/纳器件制造一个具有如此低水蒸气含量,并在其寿命期间保持这个水蒸气含量的气密封装是困难的。水蒸气进入封装内部有几种原因:密封泄漏,密封过程中产生的水,黏结剂甚至封装放出的湿气。因此要保证最好的长期可靠性需要采用吸

附剂。在器件封装内放置吸附剂也是一种减弱毛细黏附力影响的有效方法,最重要的液体或蒸汽吸附剂的吸附目标是水,这类吸附剂一般称为吸湿剂。一些吸湿剂还能吸收封装内的氮、二氧化硫和其他有害物质。但是,除湿剂是高可靠 MEMS 器件应用的最重要吸附剂类型。除湿剂内含有高效干燥剂,它们一般分布在透气的聚合物基体内。干燥剂通常是能与一个或几个水分子结合形成氢氧化物的无机化合物。干燥剂对水分子的化学吸引使封装腔内变干。值得注意的是,某些陶瓷封装也能吸水,所以封装外壳也是有效的吸附剂。

4 结论

微/纳机电系统中的毛细黏附作用很重要且几乎不可避免。在微/纳机电系统被广泛应用之前,毛细黏附作用的研究一直处于停滞状态,目前毛细黏附作用研究刚刚起步且相关研究成果报道有限。微/纳机电系统中的毛细黏附作用、作用规律及控制办法也尚未完全被认识清楚,还需进一步研究以加深理解,以打破微/纳机电系统商品化瓶颈,进而推动其在航天、汽车工业、电子消费品等不同领域的应用。

参考文献 (References)

- [1] 高世桥, 刘海鹏. 微机电系统力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Gao Shiqiao, Liu Haipeng. MEMS mechanics [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2008.
- [2] 高世桥, 曲大成. 微机电系统(MEMS)技术的研究与应用[J]. 科技导报, 2004, (22)4: 17-21.
Gao Shiqiao, Qu Dacheng. Science & Technology Review, 2004, 22(4): 17-21.
- [3] He M, Blum A S, Aston D E, et al. Critical phenomena of water bridges in nanoasperity contacts[J]. Chem Phys, 2001, 114(3): 1355-1360.
- [4] Jang Joonkyung, Schatz G C, Ratner M A. Capillary force in atomic force microscopy[J]. Chem Phys, 2004, 120(3): 1157-1160.
- [5] Stifter T, Marti O, Bhushan B. Theoretical investigation of the distance dependence of capillary and van der Waals forces in scanning force microscopy[J]. Phys Rev, B, 2000, 62(20): 67-73.
- [6] Fan H, Gao Y X. Elastic solution for liquid-bridging-induced microscale contact[J]. Appl Phys, 2001, 90(12): 4-10.
- [7] 刘凤丽, 郝永平. 静电驱动微机械梳状陀螺仪中典型结构的可靠性研究[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(1): 72-75.
Liu Fengli, Hao Yongping. Journal of Detection & Control, 2007, 29(1): 72-75.
- [8] 张文明, 孟光. MEMS 可靠性与失效分析 [J]. 机械强度, 2005, 27(6): 855-859.
Zhang Wenming, Meng Guang. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(6): 855-859.
- [9] An Ping, He Yandong, Jin Yufeng, et al. A reliability investigation of MEMS transducers with comb structures [C]//2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP 2008). 1-6.
- [10] Palasantzas G. Contact angle influence on the pull-in voltage of microswitches in the presence of capillary and quantum vacuum effects [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101: 1-5.
- [11] Raccurt O, Tardif F, Arnaud F, et al. Influence of liquid surface tension on stiction of SOI MEMS [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14: 1083-1090.
- [12] Chao S H. Reliability of vacuum packaged MEMS gyroscopes[J]. Microelectronics Reliability, 2005, 45: 361-369.

(责任编辑 齐志红)