

文章编号 1004-924X(2015)04-1044-09

多层 UV-LIGA 电铸镍材料的抗冲击性能

周织建*, 聂伟荣, 席占稳, 王晓锋

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏南京, 210094)

摘要:为研究采用 UV-LIGA(Ultraviolet Lithography, Galvanoformung, Abformung)技术制作的多层电铸镍的机械可靠性,对其进行了抗冲击性能分析。利用冲击试验台及信号采集系统测试了 UV-LIGA 多层电铸镍的抗冲击性能。实验分析得到其累积失效概率-加速度峰值曲线近似拟合于韦布尔统计分布,韦布尔系数 $\gamma=7.6$,参考加速度为 21 300 g。当加速度为 12 000~18 000 g 时,可靠性相对较高;当加速度为 12 000~18 000 g 时,累计失效概率增加较快;当加速度大于 24 000 g 时,可靠性下降迅速。利用扫描电子显微镜(SEM)观察了试样,得到其主要的失效形式有分层、断裂、塑性变形以及黏连等。初步分析了失效原因,并提出了相应的优化设计方法,为 UV-LIGA 多层结构的设计提供实验依据。

关键词:UV-LIGA;多层电铸镍;抗冲击性能;微机电系统(MEMS)

中图分类号:TH140.1;TQ153.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.1044

Anti-impact material properties of UV-LIGA multi-layered electroformed nickel

ZHOU Zhi-jian*, NIE Wei-rong, XI Zhan-wen, WANG Xiao-feng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: zhouzhijian2011@163.com

Abstract: To explore the mechanical reliability of multi-layered electroformed nickel prepared by UV-LIGA (Ultraviolet Lithography, Galvanoformung, Abformung) multi-layered manufacturing technology, the anti-impact material properties of the multi-layered electroformed nickel were analyzed. High-speed impact tests for the multi-layered electroformed nickel were completed by adopting an impact testing device and a signal acquisition system. The experimental results show that the cumulative failure probability - peak acceleration curve approximately fits the Weibull statistical distribution, the Weibull coefficient is 7.6 and the reference acceleration is 21 300 g. When the acceleration is 12 000 - 18 000 g, it shows a higher reliability; when that is 12000 - 18 000 g, the cumulative failure probability increases greatly; however the reliability is declines rapidly at acceleration more than 24000 g. A Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to observe the samples and the results show that the delamination, fracture, plastic deformation and adhesion are the main failure modes. Finally, the failure causes were analyzed and corresponding optimization methods were proposed to improve the process of UV-LIGA multi-layered electroformed nickel, which verifies

收稿日期:2014-06-20;修订日期:2014-07-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475245)

that the experiments provide bases for design of a multi layer structure of UV-LIGA.

Key words: Ultraviolet Lithography Galvanoformung Abformung (UV-LIGA); multi-layered electroformed nickel; anti-impact property; Micro-mechanic-electronic System(MEMS)

1 引言

微机电系统(Micro-electro-mechanical Systems, MEMS)是集微传感器、微执行器以及处理电路为一体的微型器件或系统^[1]。随着 MEMS 结构日趋复杂(如多层高深宽比结构),对 MEMS 加工技术的要求越来越高。其中,采用 UV-LIGA 技术制备的电铸镍,具有淀积应力低、耐腐蚀性强、强度较高以及易于制造多层结构等优点,被广泛应用于 MEMS 器件的制造中^[2]。

目前, MEMS 产品在航空航天、汽车、生物、医疗以及军事等领域都得到广泛应用,但基于市场以及安全等需求, MEMS 器件的可靠性面临着严峻的挑战^[3]。针对特殊应用需求与意外冲击,许多学者已对 MEMS 器件进行了抗冲击性能测试以及可靠性分析。Wagner U 等人^[4]研究了多晶硅材料对机械冲击的响应,分析了累积失效概率与冲击加速度幅值之间的对应关系; Tanner D M. 等人^[5-7]报道了冲击响应下的多种失效形式,主要有分层、芯片黏结失效等,并指出冲击各向异性特征; Srikar V T 等人^[8-12]对在冲击载荷下的 MEMS 器件进行了可靠性分析,研究了器件的动力学以从根本上理解失效模式; Stauffer J M 等人^[13-16]设计了止动结构以限制质量块的位移,并采用应力隔离技术与止动结构相结合的方式,或进行合理的封装来获得冲击保护方案; Yoon S W 等人^[17,18]提出了采用非线性弹簧和表面涂层以减少黏结,来提高 MEMS 器件的可靠性。

为研究采用 UV-LIGA 技术制作的多层电铸镍的机械可靠性,对其进行了抗冲击性能分析。本文利用冲击试验台及相应的测试电路,对多层电铸镍进行冲击实验测试,设计了多层方块以及单层的弹簧,分别对多层电铸镍多层间的黏结性能以及单层的抗冲击性能进行了分析,采用扫描电子显微镜(SEM)观察并对其抗冲击性能进行了探讨分析。

2 实验

2.1 工艺介绍

多层电铸镍结构采用比较成熟的 UV-LIGA 多层工艺制备,需要进行多次涂胶、光刻、溅射及电铸等重复加工步骤。加工工艺步骤如图 1 所示,主要包括:(1)采用超声预处理基板 10 min;(2)旋涂 SU-8 胶(NANOTM SU-8 2075, 600 r/min 的转速旋转 30 s);(3)对光刻胶进行前烘(逐渐升温以减少气泡),然后进行 UV 曝光(120 s, 500 mJ/cm²)以及显影。接着进行后烘使得 SU-8 硬化以防止刻蚀剂的侵蚀。(4)为了提高层间黏附性能,进行等离子处理(140 Pa, 40 W, 10~15 min)以及平面化工艺。第一层镍层(电铸溶液的组成见表 2)在基底上生长约 6 h。(5)除了光刻胶的变化(SU-8 2015),曝光强度(450 mJ/cm²,

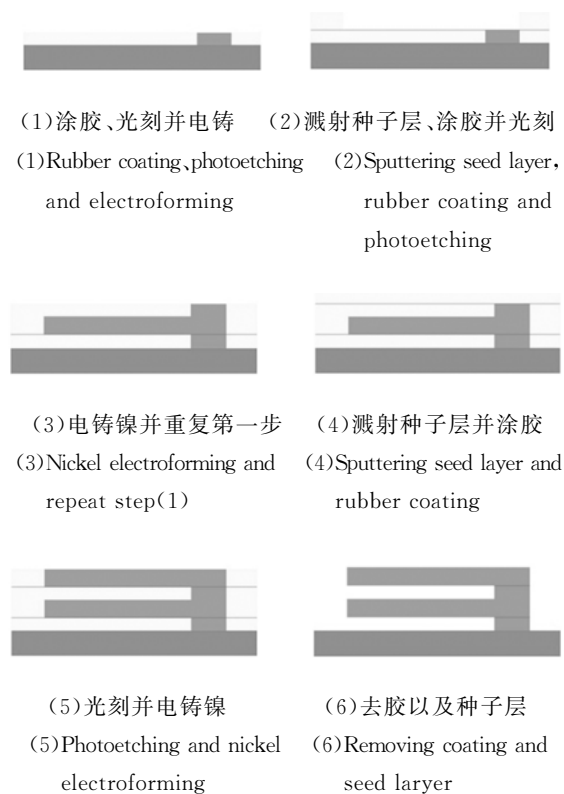


图 1 多层镍的工艺步骤

Fig. 1 Process steps of multilayer nickel

100 s)以及电铸时间(5 h)的区别之外,第二层与第一层的其他工艺基本一致。为了改善层间黏合力,引入增黏剂(Omnicoat)。(6)溅射一层铜(400 nm)作为种子层,根据不同的参数重复第2~4步。其中的一些参数如铜薄膜的厚度 h_c ,SU-8的厚度 h_s ,曝光时间 t ,UV的强度 I 以及电铸时间 t_{ef} 如表1所示。(7)为了减少残余应力以及优化内部晶格,将加工好的器件退火处理。(8)最后,将器件放入煮沸的无机酸中(5%~15%)中去除SU-8胶,最后进行清洗和烘干,完成器件的制作。

表 1 3~6层的相关参数

Tab. 1 Parameters of 3rd-6th layers

层号	h_c/nm	$h_s/\mu\text{m}$	t/s	$I/(\text{mJ} \cdot \text{cm}^2)$	t_{ef}/h
3	400	80	100	450	9
4	400	50	110	400	6
5	0	45	100	250	6
6	400	40	70	250	5

2.2 试样制备

制备样品的电镀液以及工艺条件如表2所示。

表 2 电镀液及工艺条件

Tab. 2 Electroforming solution and process conditions

电铸液	配比/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
氨基磺酸镍	550
氯化镍	10
硼酸	35
十二烷基硫酸钠	0.1~0.15
工艺条件	
电流密度	$10 \sim 20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$
温度	$50 \text{ }^\circ\text{C}$
占空比	2:1
pH值	3.8~3.9

采用氨基磺酸镍电镀液制备的电镀镍具有沉积速度快及残余应力小等优点^[19],有利于减少分层以及翘曲等失效形式;氯化镍作为阳极活化剂,可提高电镀溶液的导电性能;硼酸起到缓冲电镀液pH值的作用;十二烷基硫酸钠作为表面活性剂有效减少了镀层针孔现象,同时改善了电镀镍的韧性,提高了镀层质量。制备的多层电铸镍如图2所示。

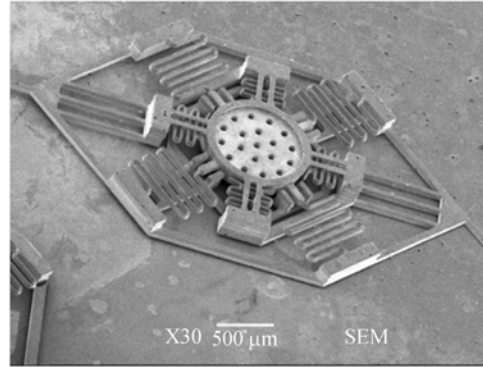


图 2 多层电铸镍 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of multi-layered electroformed nickel

如图2所示,结构由6层镍组成。由于化学腐蚀,在煮胶之后的结构尺寸小于设计尺寸。同理,结构间隙也会相应的增加。通过测试可知,设计与样机之间的误差达到2%~18.67%。为了测试多层电铸镍结构的机械可靠性,需对多层镍结构进行抗冲击性能及失效形式分析。

2.3 抗冲击性能测试

环境分析时可使用加速度-时间曲线模拟冲击,但在实验以及应用环境中,冲击的形式较为复杂。文献[8]指出冲击脉冲可采用半正弦加速度-时间曲线进行近似模拟,如图3所示,A代表冲击加速度幅值,T为冲击加速度脉宽。

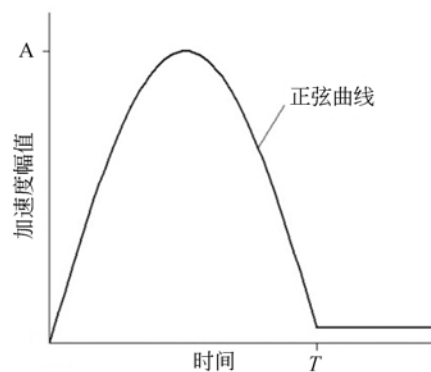


图 3 半正弦加速度脉冲

Fig. 3 Half-sine acceleration pulse

由于冲击试验台抖动、气压的不稳定以及撞击时的反弹现象等因素,使得加速度-时间曲线相对于半正弦脉冲整个曲线具有一定的抖动,滤掉高频振动后的加速度-曲线如图4所示。

考虑到MEMS器件的小体积,弹性能量损

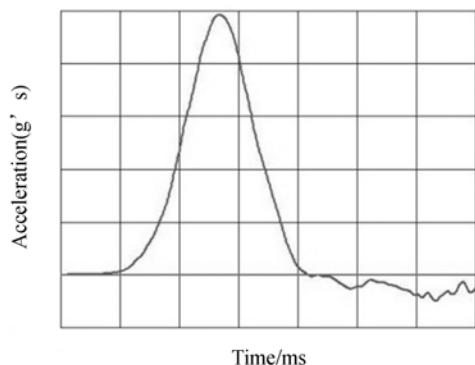


图 4 实验冲击曲线

Fig. 4 Experimental shock curve

耗以及尺寸效应等影响,实验前须合理将样品固定于冲击台上,安装如图 5 所示。

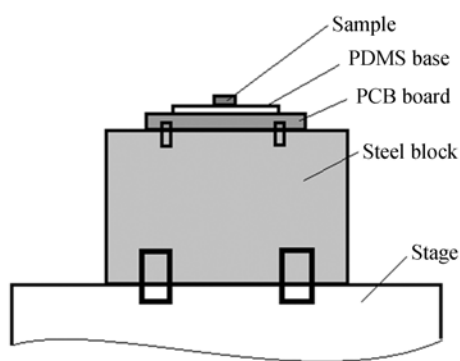


图 5 样品安装示意图

Fig. 5 Sample installation schematic

通过几道刚性连接工序将样品固定于冲击台上。在 UV-LIGA 加工得到样品之后,将其用聚酰亚胺胶固定于 PDMS 基底上,然后将 PDMS 基底固定于 PCB 板(PCB 板上装有相应的电路)上,紧接着将 PCB 板用螺栓固定于定制的钢块上,最后将钢块安装在冲击台上。采用刚性连接以保证尽量减小样品加速度和冲击台的加速度之间的误差。UV-LIGA 多层电铸镍材料的抗冲击性能测试采用了 AVEX SM 105 加速冲击台(冲击加速度量程:3~30 000 g;脉冲持续时间为 0.012~100 ms),并配合 Lansmont 振动冲击记录仪捕捉和分析瞬态加速度数据信号,实时记录冲击加速度-时间曲线,测试系统如图 6 所示。

UV-LIGA 制作的多层电铸镍结构如图 2 所示,将其固定于 AVEX SM 105 冲击台上,调节冲击台的垫片数目、气压及高度以获得所需冲击载荷,利用 Lansmont 记录仪记录冲击载荷。此多

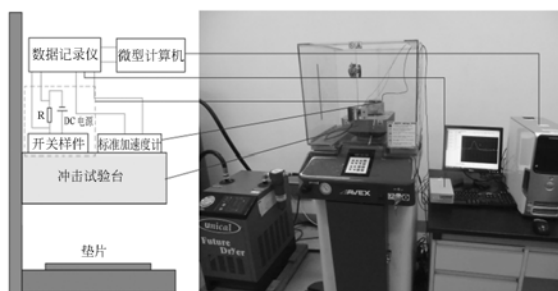


图 6 冲击测试系统

Fig. 6 Shock test system

层镍结构为惯性瞬态开关,闭合后为脉冲曲线。当曲线发生突变时,采用 JSM-6380LV 扫描电子显微镜(SEM)观察试样,记录失效形式。

3 结果与分析

3.1 实验结果

为了增加结果的可行度,采用 10 个多层电铸镍结构样品进行冲击试验,逐渐增加冲击加速度,记录出现失效形式相应的加速度值。测试结果如表 3 所示。

表 3 冲击测试结果

Tab. 3 Shock test results

编号	失效形式	失效时冲击加速度/g
1	断裂、分层	23 145.1
2	分层	20 314.3
3	粘连、塑性变形	23 015.4
4	断裂	21 635.9
5	断裂	17 668.3
6	塑性变形、断裂	18 741.3
7	断裂	22 645.4
8	塑性变形、翘曲	12 563.7
9	断裂、分层	25 301.6
10	分层	16 263.1

从实验数据可以看出,出现断裂失效的几率高于其他失效概率,分层与塑性变形次之,黏连和翘曲的概率较小,且由于制造的误差与缺陷,同一种失效形式失效时的加速度也存在差异。实验中的失效形式主要取决于加速度峰值大小以及偏离方向的冲击,当加速度不断增加时,便可忽略低加速度峰值时带来的影响,此时可排除因疲劳造成的失效。

3.2 可靠性分析

多层电铸镍的可靠性受电镀液成分比例、几何结构、工艺流程、外界激励等影响。实验主要研究了多层电铸镍对机械冲击的响应。根据分析可知,累积失效概率-加速度峰值曲线近似拟合于韦布尔可靠性分布函数。由文献[20]可知,对于每一个编号($j=1,2\cdots 10$)相对失效累积频率为:

$$P_{f,j} = \sum_{i=1}^j \frac{k_i}{n}, \quad (1)$$

式中: n 为测试总次数, k_i 为对应每个编号的失效频率。采用最小二乘法拟合累积失效概率-加速度曲线可得:

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{a}{a_0}\right)^\gamma\right], \quad (2)$$

式中: γ 为韦布尔模数, a_0 为参考加速度。拟合时采用 $\gamma=7.6$, $a_0=21\ 300\text{g}$,如图 7 所示。

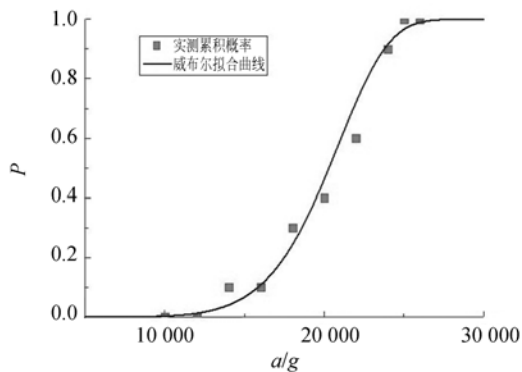


图 7 失效概率-加速度峰值曲线

Fig. 7 Failure probability - peak acceleration curves

数据表明,冲击载荷在 12 000~18 000 g 时,多层电铸镍的累积失效概率增加缓慢,在此范围内,可靠性相对较高;当冲击载荷在 18 000~24 000 g 时,累积失效概率增加较快,可靠性下降迅速;冲击载荷在大于 24 000 g 时,累积失效概率增加缓慢直至全部失效。该数据也强调了使用一定量的样品进行加速试验的必要性,为多层电铸镍结构提供了较大的安全余量,以应对应用中受到的各种可能的冲击载荷。

3.3 机械失效分析

理解 MEMS 器件在使用中失效的物理机制(如断裂、塑性变形、黏连等)、材料的特性以及工艺过程有利于后期设计的改进,提高器件的可靠性。其中,MEMS 多层结构相对于单层结构更易出现机械失效,如分层、翘曲等。针对层间的抗冲

击性能分析,设计了长方体块多层结构用于测试,而针对单层内部的抗冲击性能的分析,设计了单层微弹簧进行测试。在实验之前,对结构进行了有限元分析以了解应力分布。相应的计算结果如图 8 和图 9 所示。

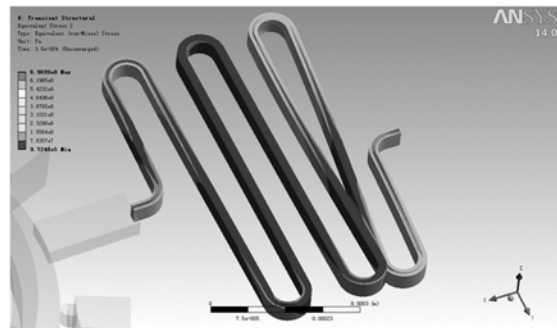


图 8 弹簧的应力分析

Fig. 8 Stress analysis of spring

如图 8 所示,在特定的加速度脉冲($20\ 000\text{g}-200\ \mu\text{s}$)下,最大应力出现在弹簧的拐弯处为 696.99 MPa。此应力环境下,镍会发生损坏,仿真结果与实验结果吻合较好。

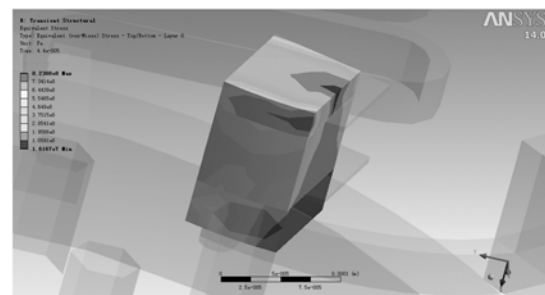


图 9 多层止挡块的应力分析

Fig. 9 Stress analysis of multi-layered stop

如图 9 所示,在相同的冲击加速度($20\ 000\text{g}-200\ \mu\text{s}$)下,最大应力出现在层间结合面为 644.39 MPa。此外,结构的强度还与加工工艺联系紧密。实验中多层电铸镍结构因其实验周期短,且主要取决于所施加的冲击载荷(即最大主应力)大小,可排除冲击疲劳、磨损以及氧化的影响,并结合实验结果,主要讨论器件的分层、断裂、塑性变形及黏连 4 种机械失效模式。

(1) 分层

分层是指多层结构中层与层之间的黏附键断裂,导致层与层之间剥离的现象。MEMS 器件分层失效严重降低了器件的可靠性,是一种破坏性

失效模式。实验中出现的分层现象如图 10 所示。

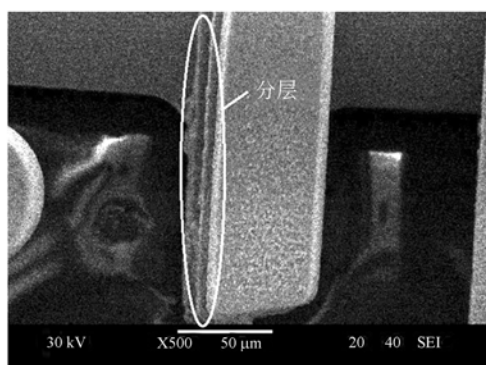


图 10 分层失效

Fig. 10 Delamination failure

产生分层的因素较多,主要有:

(a)采用 UV-LIGA 工艺加工时,层与层之间会溅射一层种子层,镍与种子层的热膨胀系数不同,导致层间内应力过大;或者加工时层与层之间产生气孔,导致层与层之间的键合力减小,出现分层现象;

(b)UV-LIGA 多层电铸镍材料的物理性质失配、晶格失配与替位、间隙杂质以及工艺的限制,使得层间存有残余应力,在应力释放的过程中会出现翘曲,导致层间易于剥离;

(c)受加工工艺的影响,pH 值、前处理和后处理、电流密度、温度、镀层厚度以及工艺参数等会影响层与层之间的结合强度^[21];

(d)受外界环境应力的影响,环境温度、湿度等会使得界面裂纹疲劳扩展,导致层间黏附键断裂,最终形成层与层之间的剥离。

(2)断裂

断裂是在受到外部冲击载荷时产生的内部应力超过材料的屈服强度而产生的一种失效模式^[22]。MEMS 器件的断裂,危害性较大,会降低器件的可靠性。实验中出现的断裂失效如图 11 所示。

出现断裂失效的因素主要有:

(a) UV-LIGA 工艺加工过程中,内部会出现初始裂纹,且微裂纹的形核、生长以及聚集易于宏观尺寸,导致应力集中,在受到一定的冲击载荷时,应力会扩展迅速,导致断裂失效;

(b)电铸镍未经过充分的自然老化,加工时产生的内应力没有及时充分的释放,线宽较小处易于产生结构损伤,发生断裂失效;

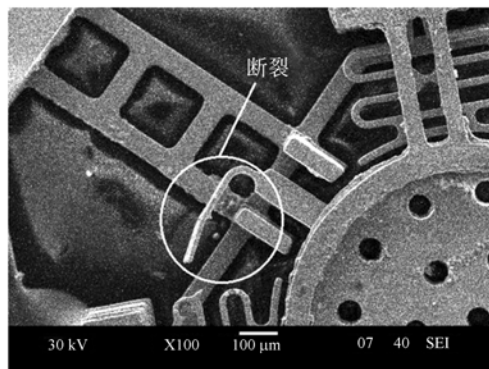


图 11 断裂失效

Fig. 11 Fracture failure

(c)UV-LIGA 电铸镍是由大量微小晶粒组成的聚合物^[21],表现出较强的各向异性,在特定的晶面上拥有较小的弹性模量。在此晶向上进行加载时,极易出现试样的断裂。

(3)塑性变形

塑性变形是指施加的外力撤除后,物体不能回复原状。由于存在位错,晶体在受到外界应力时原子易于沿着位错线移动,降低晶体的变形抗力。实验中电铸镍塑性变形失效如图 12 所示。

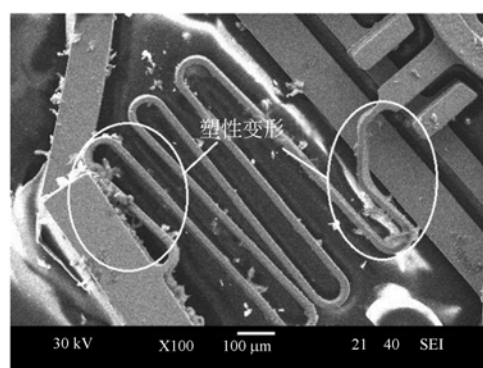


图 12 塑性变形失效

Fig. 12 Plastic deformation failure

出现塑性变形失效的因素主要有:

(a)UV-LIGA 电铸镍位错、空洞等缺陷的密度较高,材料内的位错运动活跃,原子排列产生滑移与孪晶,最终发生塑性变形;

(b)实验加载的冲击载荷幅值过大,导致外加应力较大并超过弹性极限,出现塑性变形,导致器件失效。

(4)黏连

黏连是指在特定的环境下发生的动、定片的黏结接触,使结构丧失可动性的一种失效模式。

黏连可能会造成短路,降低器件的工作可靠性。实验中多层电铸镍黏连失效如图 13 所示。

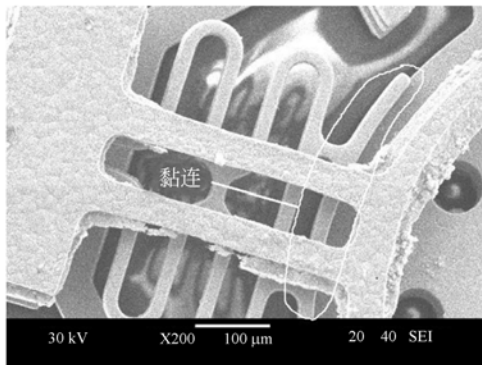


图 13 黏连失效

Fig. 13 Adhesion failure

出现黏连失效的主要因素有:

(a)在 UV-LIGA 工艺最后释放时,由于结构中残余应力以及应力梯度的存在,使得电铸镍层产生翘曲,或者是动、定片之间未充分释放,将两层电铸镍黏连在一起;

(b)尺寸效应的出现,表面作用力如表面张力、范德瓦耳斯力、毛细液桥力等起主要作用,表面能较大,出现黏连;

(c)受电镀层表面粗糙度的影响,造成镍的亲水性增强,导致固液界面的接触角减小,此时在动、定片之间形成液桥,产生较大的液桥力,进而产生黏连效应^[23]。

3.4 讨论

为提高 UV-LIGA 多层电铸镍的机械可靠性,并结合实验中出现的失效模式,提出相应的改进措施以提高材料抗冲击性能。

针对分层失效,提出以下优化方法:(1)设计时,适当增大层间的接触面积以增大结合力并尽量减少层数;(2)加工时,改变工艺顺序,尽量避免使用种子层,使得镍与镍直接接触,避免因不同材料的膨胀系数不同导致层间应力过大的现象,也可采用“铸冒”法^[22],增加层与层之间的结合面积以提高结合强度;(3)改进 UV-LIGA 工艺,优化合适的溶液 pH 值、电流密度、温度以及工艺参数

等以提高层间结合强度;(4)采用退火等热处理工艺,减少层间的残余应力,避免翘曲现象。

针对断裂失效,提出以下改进方法:(1)设计时,采用止动结构^[5]以限制可动部件的偏转,通过限制运动,使应力低于断裂应力,从而避免断裂;(2)采用 UV-LIGA 加工时,通过控制十二烷基硫酸钠来控制镀层的针孔数目,减少材料内部裂纹的形核以减少应力集中;(3)对所加工的多层电铸镍结构进行自然老化以较大程度地释放残余应力;(4)根据电铸镍的各向异性特性,设计时将弹性模量较大的晶面作为材料受力面,充分利用材料特性。

针对塑性变形,改进方法如下:(1)加工时,改变材料的成分和工艺参数,减少材料内部位错、空洞等缺陷,采用可溶原子钉扎位错,阻碍位错运动^[3];(2)采用退火和淬火改变晶粒的大小,采用加工硬化工艺实现对蠕变抗力的微调。

针对黏连失效,有以下改进措施:(1)在多层镍结构表面涂敷一层足够薄的防黏连涂层,以极大地降低材料的表面能,降低黏连的可能性但不会影响器件的力学性能;(2)控制表面粗糙度、湿度,减小范德瓦耳斯力,进而减小表面作用能;(3)优化牺牲层释放工艺或直接采用干法刻蚀,避免因表面张力如液桥力等导致的黏连现象。

4 结 论

本文利用冲击试验台和信号采集系统,测试了 UV-LIGA 多层电铸镍的抗冲击性能。实验分析得到其累积失效概率-加速度峰值曲线近似拟合于韦布尔统计分布。韦布尔系数为 7.6,参考加速度为 21 300 g。当加速度在 12 000~18 000 g 时,可靠性相对较高;当加速度在 18 000~24 000 g 时,累计失效概率增加较快;当加速度大于 24 000 g 时,可靠性下降迅速。通过扫描电镜 (SEM) 观察,可知失效形式主要有分层、断裂、塑性变形以及黏连,并提出优化设计方法,本文的研究为 UV-LIGA 多层结构的设计提供实验依据。

参考文献:

[1] 张向军. 微机电系统机械学[M]. 北京:清华大学出

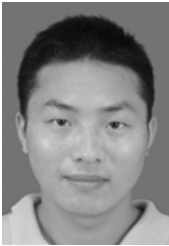
版社, 2012.

ZHANG X J. MEMS mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

- [2] KELLY J J, GOODS S H, TALIN A A, *et al.*. Electrodeposition of Ni from low-temperature sulfamate electrolytes I. Electrochemistry and film stress[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006, 153(5): 318-324.
- [3] HARTZELL A L, SILVA M G, SHEA H R. MEMS 可靠性[M]. 恩云飞等译. 北京:电子工业出版社, 2012.
- HARTZELL A L, SILVA M G, SHEA H. R. MEMS Reliability[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2012.
- [4] WAGNER U, MULLER-FIEDLER R, BAGDAHN J, *et al.*. Wagner U, Muller-Fiedler R, Bagdahn J, et al. Mechanical reliability of epipoly MEMS structures under shock load[C]. *12th International Conference on Transducer, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2003, 1: 175-178.
- [5] TANNER D M, WALRAVEN J A, HELGESEN K, *et al.*. MEMS reliability in shock environments [C]. *38th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2000: 129-138.
- [6] LIU J K, QI X L, JIA J, *et al.*. Study on the Reliability Problem of MEMS Fuse Mechanism[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 628: 72-77.
- [7] RAFIEE K, FENG Q, COIT D W. Reliability modeling for dependent competing failure processes with changing degradation rate [J]. *IIE Transactions*, 2014, 46(5): 483-496.
- [8] SRIKAR V T, SENTURIA S D. The reliability of Microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(3): 206-214.
- [9] JIANG T, ZHOU J, FENG F. Study on designs of stoppers for MEMS devices in shock environment [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 184: 510-515.
- [10] WU J H, STEYN J L. Reliability studies on MEMS shutters and displays[C]. *International Society for Optics and Photonics SPIE MOEMS-MEMS*, 2013: 1-7.
- [11] FANG X W, HUANG Q A, TANG J. Modeling of MEMS reliability in shock environments[C]. *7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology*, 2004, 2: 860-863.
- [12] SUNDARAM S, TORMEN M, TIMOTIJEVIC B, *et al.*. Vibration and shock reliability of MEMS: modeling and experimental validation[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(4): 1-13.
- [13] STAUFFER J M, DUTOIT B, ARBAB B. Standard MEMS sensor technologies for harsh environment[C]. *The Institution of Engineering and Technology Seminar on MEMS Sensors and Actuators*, 2006: 91-96.
- [14] KIM J W, PARK H W, CHOI M K, *et al.*. Drop impact reliability of MEMS inertial sensors with membrane suspensions for mobile phones [C]. *IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2012: 344-349.
- [15] LIU H, QIAN Y, WANG N, *et al.*. Study of the wideband behavior of an in-plane electromagnetic MEMS energy harvester [C]. *IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2013: 829-832.
- [16] HARTZELL A, WOODILLA D. Reliability methodology for prediction of micromachined accelerometer stiction [C]. *37th Annual IEEE Reliability Physics Symposium Proceedings*, 1999: 202-205.
- [17] YOON S W, YAZDI N, PERKINS N C, *et al.*. Novel integrated shock protection for MEMS[C]. *The IEEE 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005, 1: 396-400.
- [18] BROWN T G. Harsh military environments and Microelectromechanical (MEMS) devices [C]. *Proceedings of IEEE Sensors*, 2003, 2: 753-760.
- [19] 毛胜平, 汪红, 刘瑞, 等. UV-LIGA 镍薄膜材料的力学性能测试与分析[J]. *功能材料*, 2010, 41

- (2): 354-357.
- MAO S, WANG H, LIU R, *et al.*. Measurement and analysis of mechanical properties of UV-LIGA Ni thin film [J]. *Journal of Functional Materials*, 2010, 41(2):354-357.
- [20] GREEK S, ERICSON F, JOHANNANSSON S, *et al.*. Mechanical characterization of thick polysilicon films: Young's modulus and fracture strength evaluated with microstructures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1999, 9(3): 245.
- [21] 李永辉. 金属微器件制作及微电铸层结合强度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- LI Y H. *Fabrication of metal micro devices and the study on bond strength of micro electroforming layers* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012
- [22] 吝海锋, 吕苗, 杨拥军, 等. MEMS 电容式加速度计可靠性研究[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(z1): 124-126.
- LIN H F, IV M, YANG Y J, *et al.*. Reliability Considerations and Experiments of MEMS Capacitive Accelerometers [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16:124-126.
- [23] HURST K M, ANSARI N, ROBERTS C B, *et al.*. Silica-Encapsulated Nano particle Films as Surface Modifications for MEMS [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(5): 1065-1067.

作者简介:



周织建(1989—),男,安徽黄山人,博士研究生,主要从事 MEMS 惯性器件的设计与工艺研究。E-mail: zhouzhi-jian2011@163.com

导师简介:



王晓锋(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,博士生导师,2002年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事机电系统的受控力学以及力学在武器中的应用方面的研究。E-mail: xfwang@mail.njust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)