微胶接装配中胶接区表面结构实验

马维民 Jürgen Hesselbach

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (布伦瑞克工业大学 机床与制造技术研究所, 德国 布伦瑞克 D38106)

郇 极

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 微胶接技术非常适用于微机电系统产品的自动化装配过程. 微胶接装配质量容易受到2个因素的影响,即胶滴体积的不稳定和胶滴的扩散. 为了解决该问题,对微胶接装配中的胶接区表面结构进行了研究. 提出2种表面结构:基本的凹槽结构和胶滴自居中结构,并进行实验. 实验结果表明,凹槽结构对胶滴体积具有一定的"容错性",可以有效克服胶滴体积的不稳定和胶滴的扩散对微胶接装配质量的影响;自居中结构使得胶滴在凹槽内具有"自居中"的特性,可以减轻微装配系统定位误差对装配质量的影响. 这2种表面结构可用于通用微机电系统产品的装配中,以提高微胶接装配的质量.

关 键 词: 微机电系统; 微装配; 微胶接; 表面结构

中图分类号: TG 494

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0361-05

Experiments on surface structure for micro assembly using adhesive bonding

Ma Weimin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Jürgen Hesselbach

(Institute of Machine Tools and Production Technology, TU Braunschweig, Braunschweig D38106, Germany)

Huan Ji

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Micro adhesive bonding technology shows great potential in the assembly of micro-electro-mechanical system (MEMS) products. The quality of micro assembly using adhesive bonding is sensitive to two factors: the fluctuation of the adhesive volumes and the spread of the meniscus. In order to solve this problem, two surface structures on the bonding area were experimentally studied, which were the groove structure and meniscus-self-centering structure. Experiment results show that, the former structure has the ability of "fault-tolerance" to the volume of meniscus, and can overcome the influence of the mentioned factors on the quality of micro adhesive bonding; the latter structure enables meniscus to spread itself to the center of the groove, and thus to weaken the influence of the position error of micro assembly system. The two studied surface structures can be applied into the assembly of general MEMS products.

Key words: micro-electro-mechanical system; micro assembly; micro adhesive bonding; surface structure

收稿日期: 2006-04-18

作者简介: 马维民(1977 -),男,河北邢台人,博士生, weimin. ma@gmail. com.

将不同材料、不同加工工艺制作的微机电系统器件,按模块组合装配成一个完整的、能够执行特定功能的微型系统是当前微机电系统产品制造的发展趋势.除了必要的装配机器和操作手外,连接技术是整个装配过程中的核心部分.微胶接技术由于具有低的连接温度、均匀的应力分布、可方便进行异种材料连接等优点[1],越来越多地应用到微装配中[2-3].

微机电系统产品对微胶接装配质量的要求通常体现在如下方面:①微零件的定位误差在允许的范围内;②胶接剂所引起的结构尺寸变化在允许范围内;③零件的功能区不能被胶接剂污染;④胶接层具有一定的强度.除胶接层强度外,微胶接装配的质量很容易受到 2个因素的影响:胶滴的体积在表面张力作用下波动,以及胶滴在连接时施加的压力作用下向四周扩散.微胶接装配中胶接剂的体积通常在纳升甚至皮升范围内,微小的体积波动都可能造成胶接剂的过量,引起微零件的漂移、倾斜等.而胶滴的扩散容易引起微零件的漂移、功能区被污染等.现有微胶接课题的研究内容主要集中在如何准确、可重复地生成微小的胶滴[4-5].

与目前微胶接课题的研究重点不同,本文研究微零件胶接区的表面结构.提出 2种主要的结构形式:凹槽结构和胶滴自居中结构,并进行实验.实验结果表明,这 2种表面结构可以很好地克服胶滴体积不稳定和胶滴扩散对微胶接装配质量的影响,可用于通用微机电系统产品的装配中.

1 试件和胶接剂

实验中使用的试件来源于一微型步进电机[6],试件尺寸和形状如图 1所示.试件 1和试件 2均采用单晶硅材料制造,表面粗糙度 R_a 分别为 23 nm和 20 nm.试件 1表面设计有胶接区,其尺寸为 900 μm ×900 μm.为方便叙述,图 1中标出主视图和俯视图方向.

选择德国 DELO公司的型号为 KATIOBOND 4557的光敏胶接剂进行实验. KATIOBOND 4557在受到有效波长范围内的光线照射后,组分内的聚合物单体会发生聚合反应,在几秒至几十秒内(可调)固化至初始强度.与普通光敏胶接剂不同, KATIOBOND 4557在接受足够光照后和聚合反应开始前存在一段在几秒到十几秒之间可调的“开放时间”(open time)[7].在“开放时间”内,胶接剂的粘度、密度等物理特性保持不变. KATIOBOND 4557物理化学特性如表 1所示[7].

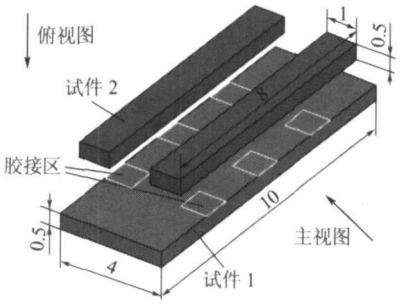


图 1 试件 (单位:mm)

表 1 KATIOBOND 4557物理化学特性

物理化学特性	数值
类型	光敏胶接剂
单体	环氧树脂
光照波长 /nm	400～500
最低光照能量 (25℃)	光强 60 mW /cm^2, 5 s
开放时间 (最低光照能量条件) /s	17
粘度 (25℃) /(mPa·s)	3 500
表面张力 (25℃) /(mN·m^{-1})	40
与试件表面标称接触角 (实验测定) /(°)	28.9

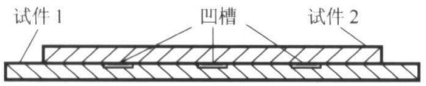
采用如下步骤进行微胶接装配实验:①在试件 1表面点胶;②对胶滴进行光照;③将试件 2与试件 1连接,待胶接层达到初始强度后,在 25℃的普通室内环境下放置 24 h,达到最终强度.

2 胶接区表面结构

2.1 凹槽结构

凹槽是本文提出的最基本的表面结构.采用化学蚀刻方法在试件 1胶接区加工出凹槽结构.图 2a所示为主视图方向的凹槽分布图.图 2b为凹槽和连接前胶滴的形状示意图.由于单晶硅蚀刻时的各向异性,凹槽槽壁与竖直方向成 54.7°夹角.凹槽槽底为正方形形状,根据试件和胶滴所形成的球缺的尺寸,确定凹槽的长、宽(均指槽底)和深各为 0.9 mm, 0.9 mm, 20 μm.经测量,蚀刻面平均表面粗糙度 R_a 为 31 nm,胶滴在蚀刻面的接触角与在试件表面测量出的标称接触角几乎相等.胶滴点在凹槽中央,并与凹槽底面形成接触角为 θ的球缺,其高度超过凹槽槽深,以保证与试件 2有足够的接触面积.连接后,胶滴润湿试件 2表面,并被压回槽内,如图 2c所示.由于凹槽的存在,胶接层的厚度不会引起试件 2的高度增加.只要保证胶滴在凹槽底面和试件 2表面的润湿面的最外缘不接触凹槽槽壁,胶滴就不会溢出凹槽.

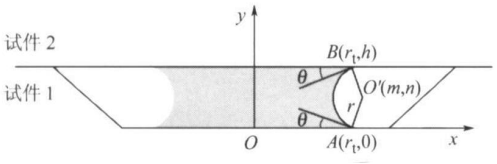
当胶滴体积 V_t、胶滴与试件标称接触角 θ和凹槽槽深 h一定时,胶滴的润湿半径 r_t 可以按下面方法计算.



a　凹槽分布图



b　凹槽和连接前胶滴形状



c　凹槽和连接后胶滴形状 (放大)

图 2　表面有凹槽的试件胶接过程 (主视图方向)

按照图 2c所示选择坐标系,$A(r_t,0)$,$B(r_t,h)$两点为胶滴在凹槽底面和试件 2表面润湿面的外缘. 由于胶滴体积微小,这里忽略重力影响. 此时,AB在表面张力作用下形成一半径为 r的圆弧,圆心在 $O'(m,n)$点,该圆弧方程为

$$(x-m)^2+(y-n)^2=r^2 \tag{1}$$

将 A点、B点坐标和 B点切线与水平夹角 θ 的关系代入式 (1),可以得出

$$\left.\begin{aligned} m &= h\tan\theta/2 + r_t \\ n &= h/2 \\ r &= h/(2\cos\theta) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

胶滴是一中心线在 y轴的旋转体,其体积 V_t 可以根据定积分计算. 式 (1)变形为

$$x=g(y)=m-\sqrt{r^2-(y-n)^2} \tag{3}$$

$$V_t=\pi\int_0^{2n}g^2(y)\,\mathrm{d}y=$$

$$\pi\int_0^{2n}\left[m^2+r^2-(y-n)^2-2m\sqrt{r^2-(y-n)^2}\right]\mathrm{d}y=$$

$$\pi\left[\frac{2n(3m^2+3r^2-n^2)}{3}-mr^2(\pi-2\theta+\sin 2\theta)\right] \tag{4}$$

将式 (2)代入式 (4)中,可以得出胶滴体积 V_t 与其润湿半径 r_t之间的关系. 图 3所示为槽深 20μm的、底面为正方形的凹槽的容积与可容纳的 KATIOBOND 4557的体积上限对应图,体积上限值对应胶滴接触凹槽槽壁时胶滴的体积.

图 4所示为试件采用凹槽结构装配后,将胶接面剪切破坏的照片. 胶滴体积为 6 nL. 经测量,胶接层在试件表面的平均直径为 640μm,而由上述方法计算出的理论胶接层直径为 627μm. 考虑

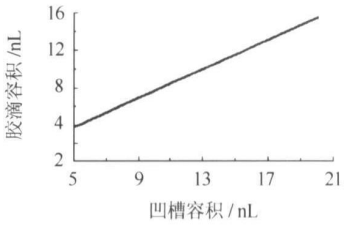


图 3　凹槽容积与胶滴体积

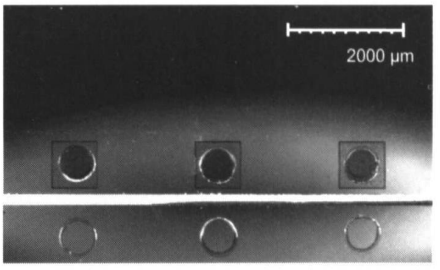


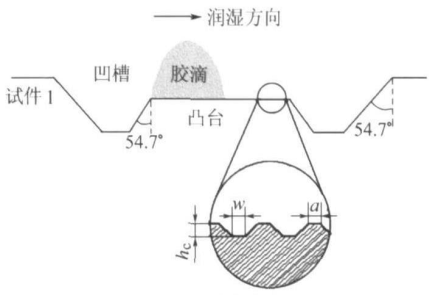
图 4　凹槽胶接效果

胶接层在实际情况时并非是一理想的圆形,则实际测量与理论计算的结果基本相符合. 从图 4中也可以看出,胶滴完好地保留在凹槽之中. 胶滴的扩散以及由此带来的试件倾斜、增高等现象都得到有效的避免,提高了装配精度.

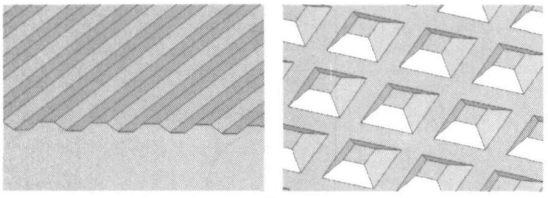
2.2　胶滴自居中结构

在实际微胶接装配中,由于微装配系统 (包括点胶系统)存在定位误差,胶滴很难完美点在凹槽中心. 当胶滴偏离凹槽中心时,即使胶滴的体积在图 3所示的范围内,它也有可能在连接后出现溢出凹槽的现象. 如果可以控制胶滴的润湿方向,使其偏离凹槽中心时只能向凹槽中心方向扩散,这样就可以减轻由于装配误差导致的胶滴溢出凹槽的现象. 本节所介绍的胶滴自居中结构,目的就是增加点胶后胶滴自动趋于凹槽中心的功能.

自居中结构如图 5a所示. 凹槽中心有一凸台,凸台俯视为正方形形状. 由于蚀刻的各向异性而造成的凹槽槽壁和凸台侧壁与竖直方向的夹角依然为 54.7°,胶滴位于凸台上. 当胶滴点在凸台边缘附近时,由于表面张力的作用不会流下凸台,而只能润湿凸台中心方向的表面,也就是胶滴被“拉”向凸台中心. 凹槽容积与胶滴体积的关系可以按照与 2.1节中类似的方法计算,这里不再重复. 需要注意的是,胶滴只位于凸台上,由于表面张力的作用,胶滴在凸台边缘可以具有比其标称接触角更大的表观接触角. 为了提高胶滴被“拉”回凸台中心的速度,实验中还在凸台的表面蚀刻出不同形状和尺寸的沟渠,如图 5b中的单向渠和图 5c中的正交渠. 沟渠的横截面如图 5a所示,



a 胶滴自居中结构

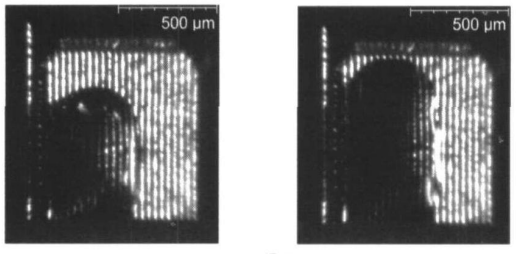


b 凸台表面的单向渠 c 凸台表面的正交渠

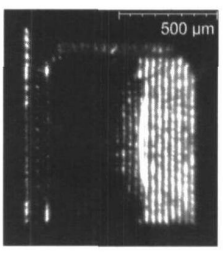
图 5 自居中结构

h, w和 a分别代表沟渠的深、底宽和渠间距,同一凸台上所有渠的尺寸相同.

对上面 2种沟渠形式的胶滴自居中结构进行了实验,并使用 CCD摄像头在不同方位对胶滴的运动照像,每次照像的时间间隔为 0.5 s图 6记录了胶滴在单向渠凸台表面的润湿过程. 凹槽边长 900μm,深 40μm;凸台边长 750μm,高 25μm;沟渠深 5μm,底宽 5μm,顶宽 20μm,渠间距 20μm. 胶滴中心初始位置位于凸台左下方,距凸台水平和垂直边缘各为 1/4边长处. 点胶后,胶滴一方面向凸台中心方向扩散,润湿凸台表面,一方面也在狭窄的沟渠中受表面张力作用驱动沿沟渠前进[8]. 由于凸台表面沟渠的单向性,胶滴在平行于沟渠的方向迅速前进,直至到达凸台边缘. 而在垂直于沟渠的方向上,胶滴只有微小前进,并呈现出较大的表观接触角. 胶滴扩散初期的速率明显大于后期.



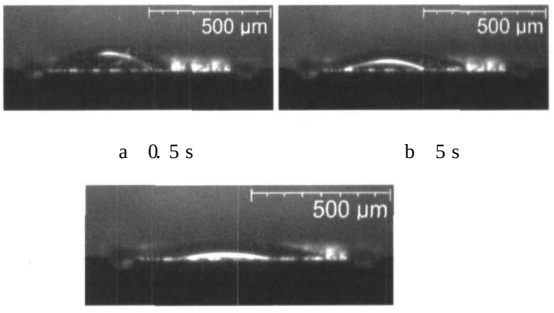
a 0.5 s b 5 s



c 10 s

图 6 单向渠自居中实验

图 7记录了胶滴在正交渠凸台表面的润湿过程,此时摄像头位于主视图方向. 与图 4封闭的凹槽不同,图 7中的凹槽与试件长边相邻的一侧为开口. 凹槽边长 900μm,深 40μm;凸台边长 750μm,高 25μm;沟渠深 5μm,底宽 36μm,顶宽 50μm,渠间距 20μm. 胶滴中心初始位置与单向渠实验相同. 由于在 2个方向上都有沟渠,所以胶滴能够各向同性地润湿凸台表面. 经过约 9 s时间后,胶滴中心与凸台中心接近重合,此时,胶滴的表观接触角约为 12°左右.



a 0.5 s b 5 s

c 9 s

图 7 正交渠自居中实验

根据 Wenzel方程[9],胶滴在正交渠凸台表面上的表观接触角 θ_r 与其所测量出的标称接触角 θ 的关系可以用式 (5) 描述:

$$\cos\theta_r = r_\varepsilon \cos\theta \tag{5}$$

其中, r_ε 为表面粗糙度因子,等于胶滴所润湿的实际面积与其在光滑平面上的投影面积之比. 对于图 5a所示的结构, r_ε 可按下面公式计算[10]:

$$r_\varepsilon = 1 + \frac{4ah_c}{(a + w + h\tan 54.7°)^2} \tag{6}$$

根据式 (5)和式 (6)可以推出,胶滴在正交渠凸台表面上的表观接触角约为 15°,而由实验得出的平均表观接触角在 12°左右. 这可能是由于胶滴在沟渠中受表面张力作用进一步向前润湿的缘故. 由于胶滴的表观接触角明显小于标称接触角,胶滴可以更好地润湿凸台表面,从而提高其“自居中”性.

3 结束语

本文设计了 2种胶接区表面结构形式:凹槽结构和自居中结构. 对凹槽结构进行胶接实验,结果表明,它在一定程度上可以提高微胶接装配的

精度,但当胶滴的位置出现较大偏差时,凹槽无法发挥其应有功能;对胶滴在自居中结构上的运动进行实验,结果表明,它可以使胶滴沿着指定的居中方向运动.下一步的研究将采用不同粘度和固化方式的胶接剂进行实验,以研究表面结构对胶接剂的依赖性.

致谢　本研究获得联邦德国下萨克森州政府"Nachwuchswissen-schaftler/innen aus außereuropäischen Ländern nach Niedersachsen"奖学金资助,谨此致谢.

参考文献 (References)

[1] 李子东. 胶粘剂应用技术手册 [M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1994
Li Zidong. Handbook of adhesive application technology[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1994 (in Chinese)

[2] Dilthey U, Brandenburg A, Möller M. Kleben von mikrokomponenten[J]. F & M: Feinwerk-technik, Mikro-technik, Mikroelektronik, 1999, 107(4): 78 - 80

[3] Bauer A, Kolbe W, Kölbel J, et al. Micro-application of non-filled adhesives for precision assembly in microsystems manufacturing[J]. Journal of Electronics Manufacturing, 1996, 6(3): 209 - 217

[4] Dilthey U, Brandenburg A, Möller M, et al. Fügen von kleinstbauteilen[J]. Schweißen & Schneiden, 2000, 52(7): 419 - 424

[5] Zäh M F, Schilp M, Jacob D. Kapsel und tropfen: fluidauftrag für mikrosysteme[J]. Werkstattstechnik, 2002, 92(9): 428 - 431

[6] SFB 516. Konstruktion und fertigung aktiver mikrosysteme[EB/OL]. http://www.sfb516.tu-bs.de

[7] DELO. Strahlungshärtung-grundlagen photoinitiiert härtender klebstoffe [M]. DELO Industrieklebstoffe GmbH & Co, 2005

[8] Wang H J, Tsai H C, Chen H K, et al. Capillarity of rectangular micro grooves and their application to heat pipes[J]. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2005, 8(3): 249 - 255

[9] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988 - 994

[10] Yoshimitsu Z, Nakajima A, Watanabe T, et al. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets[J]. Langmuir, 2002, 18(15): 5818 - 5822

(责任编辑:文丽芳)

(上接第 356页)

参考文献 (References)

[1] 甘茂治. 维修性设计与验证 [M]. 北京:国防工业出版社, 1995
Gan Maozhi. Design and validate for maintainability [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995 (in Chinese)

[2] 谭中富, 曾鸣, 张福伟. 关于设备视情维修最优策略的探讨 [J]. 现代电力, 1997, 14(3): 38 - 42
Tan Zhongfu, Zeng Ming, Zhang Fuwei. On the optimal policy for maintenance based on state of equipment [J]. Modern Electricity, 1997, 14(3): 38 - 42 (in Chinese)

[3] GJB368.4-1987, 装备维修性通用规范 维修性的分配和预计 [S]
GJB368.4-87, General specifications for materiel maintainability maintainability allocation and prediction [S] (in Chinese)

[4] 华 兴. 排队论与随机服务系统 [M]. 上海:翻译出版公司, 1987
Hua Xing. Queueing theory and stochastic service system [M]. Shanghai: Translation and Publishing Corporation, 1987 (in Chinese)

[5] 曹晋华, 程侃. 服务台可修的 M/G/1排队系统分析 [J]. 应用数学学报, 1982, 5(2): 113 - 127
Cao Jinhua, Cheng Can. Analysis of M/G/1 queueing system with repairable service station [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1982, 5(2): 113 - 127 (in Chinese)

[6] 唐应辉, 赵玮. 可修排队系统可靠性指标的分解特性 [J]. 运筹学学报, 2004, 8(4): 73 - 83
Tang Yinghui, Zhao Wei. The decomposition properties of reliability indices in repairable queueing systems [J]. Operations Research Transactions, 2004, 8(4): 73 - 83 (in Chinese)

[7] 刘玉明. 维修性的定量设计 [J]. 舰船电子工程, 2003, 22(5): 73 - 79
Liu Yuming. Quantificational design for maintainability [J]. Ship Electronic Engineering, 2003, 22(5): 73 - 79 (in Chinese)

[8] Zhu Yijun. M/G1/1 models with negative arrivals to be served [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2003, 16(4): 57 - 62

[9] Dieulle L, Bérenguer C, Grall A, et al. Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 10(2): 451 - 461

[10] Dongyan Chen, Kishor S Trivedi. Optimization for condition-based maintenance with semi-Markov decision process [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 10(1): 25 - 29

[11] de Smidt-Destombes Karin S, van der Heijden Matthieu C, van Harten Aart. On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 3(3): 287 - 300

(责任编辑:娄　嘉)