

磁头无铅微焊点液滴飞溅和失效性分析

肖祥慧¹, 彭敏放¹, 贺建彪², 唐荣军³, 周影良³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 3. 日本 TDK 集团, 广东东莞 523000)

摘要: 磁头无铅微焊点可靠性分析主要包括焊点前期液滴飞溅的防护和后期焊点失效性分析, 在实际生产中, 应用钎料球喷射连接技术时, 钎料液滴飞溅时有发生, 本文融合激光加热和氮气压力技术, 建立了一种新的用于计算磁头内置 DFH 控制元件连接钎料液滴冲击速度的双液滴模型, 同时, 采用正交试验法对比了不同激光加热参数和氮气压力条件下磁头内置 DFH 控制元件连接钎料液滴飞溅的情况, 并进一步融合可控扫描式磁场和偏置两种方法, 研究了磁头微焊点的失效情况. 试验结果表明: 下落前, 激光脉冲能量是决定液滴温度的主要因素; 下落后, 对钎料液滴温度影响最大的是钎料液滴的初始温度. 磁头无铅微焊点失效是焊点液滴飞溅和金属间化合物共同作用的结果.

关键词: 钎料液滴飞溅; 氮气压力; 动态飞行高度 (DFH); 双液滴模型

中图分类号: TM271 + .2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)04-0769-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.04.020

The Droplet Splashing Study and Failure Analysis for the Lead-Free Micro Solders Joint of the Magnetic Head

XIAO Xiang-hui¹, PENG Min-fang¹, HE Jian-biao², TANG Rong-jun³, ZHOU Ying-liang³

(1. Institute of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

3. Japan's TDK Groups, Dongguan, Guangdong 523000, China)

Abstract: The reliability analysis for the magnetic head includes solders joint early drops splash protection and solders joint post failure analysis. In actual production, applying the jetting solder ball bonding (SBB) technology, solder splash have occurred frequently. Combining the laser heating and nitrogen pressure technology, this thesis aimed at building a new double of droplet model for calculating the striking velocity of the solder which is used to connect the Built-DFH in Slider, while different parameters of the laser heating and the nitrogen pressure are compared through the orthogonal test. The controllable scanning magnetic fields and bias are further incorporated and the failure of magnetic solder joint is studied. The results showed that before the solder falls, laser energy is the most important factor affecting the solder splash. After the solder falls, we find that the temperature of the melting ball has no decrease during the fall. The temperature of the impinging melting ball depends on its initial value. The failure of magnetic solder joint is caused by solder droplet splash and intermetallic compounds.

Key words: solder splash; nitrogen pressure; dynamic flying height; double droplet model

1 引言

磁头内置 DFH (Dynamic Flying Height, 即动态飞行高度) 控制元件是一种调节磁头动态飞行高度的装置^[1], 在实际生产中, 应用钎料球喷射连接技术 (Jetting Solder Ball Bonding, JSBB) 将磁头 (slider) 内置 DFH 控制元件焊在飞机仔 (suspension) 上, 焊点起着电路导通和机械连接的作用, 焊点钎料液滴飞溅的控制对于产品的质量和可靠性具有重要意义. 目前, 微电子封装中的互连正向高密度、细间距发展, 互连的钎料接头越来越微小, 因而无铅微钎料的性能, 接头的钎料液滴飞溅控制对于产品寿

命和可靠性影响更加突出. 对传统的 Sn/Pb 焊点的钎料飞溅控制方法已经做了大量的研究. 王晓林、李明宇等^[2]分析了激光喷射钎料球键合工艺的影响因素, 着重分析了激光能量、氮气压力等对润湿铺展的影响; 尹立孟、张新平^[3]研究了电迁移对无铅钎料微焊点脆性蠕变断裂的影响; 黄春跃等^[4]运用正交试验设计法对塑封球栅阵列器件焊点工艺参数与可靠性关系进行了研究. 可是激光重熔条件下无铅焊点的钎料飞溅控制方法少见报道. 本文结合钎料球喷射连接的几何模型, 通过假设简化, 建立了一种新的用于计算磁头内置 DFH 控制元件连接钎料液滴冲击速度的双液滴模型, 计算发现, 激

光重熔条件下,焊嘴高度对钎料液滴在下落过程中的温度几乎无影响,钎料液滴的初始温度对下落后钎料液滴温度的影响才是主要的,这与传统的焊嘴高度影响钎料液滴飞溅存在差异.继续研究磁头焊点可靠性时,采用直接处理焊点失效的 TAAA 数据的方法,对比了外加可控扫描式磁场和外加可控扫描式偏置两种方法验证焊点失效的对称性(Asym),试验结果表明,焊点液滴飞溅会造成焊点空洞,必然影响焊点金属间化合物的生长,从而影响磁头无铅微焊点的可靠性.

2 焊点液滴模型的建立

2.1 焊点液滴几何模型

理论上已经证明,原子核的密度很大且是不可压缩的常数,原子核的结合能与核子数成正比,表征接近常数,这表明核子与邻近的几个核子才发生相互作用,核子间的相互作用力具有饱和性,这与宏观的液滴十分相似.据此理论,N 玻尔等人在 30 年代中期提出液滴模型,该模型把原子核看成一个不可压缩的带电液滴,依据牛顿经典力学运动规律,对原子核进行动力学分析,在分析过程中,适当加入量子效应引起的修正,增加新的自由度,主要是将自旋取向不同看成不同流体,将质子、中子也分别看成两类流体,并引入粘滞性、可压缩性等性质.根据上述液滴模型可推算出高准确度的原子核质量半径经验公式.该理论的优点是能够比较充分的说明原子核的表面振动,并能成功的说明原子核裂变的机制;其不足是不能说明原子核性质的周期性变化这一现象.现有焊点技术的模型十分难以建立,工业生产上一般采用经验型单液滴直观模型,该模型可以很好的解决液滴初始速度问题,但是由于直观

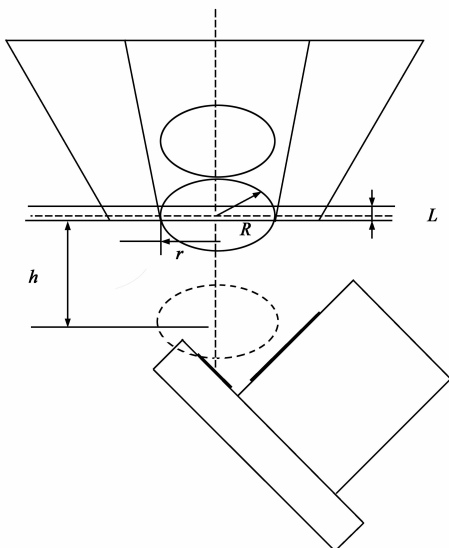


图1 喷射钎料球的几何示意图

模型抽象化过于严重,特别是液滴后冲击速度的改变,使得模型存在一定的局限性,基于此,本文提出了双液滴模型,弥补了单液滴直观模型忽略冲击速度的不足,可以很好的解决焊点液滴下落速度的估算问题,特别的,由于双液滴模型的提出使得磁头无铅微焊点的可靠性研究更加接近现场^[5-7].本文设计的焊球喷射连接双液滴几何模型如图 1 所示.其中 R 为钎料液滴半径; r 为焊嘴出口半径; h 为钎料液滴下落高度; L 为钎料液滴与焊嘴内部接触长度.

2.2 模型中参数的确定及几点假设

采用 Sn3.0Ag0.5Cu(wt%) 钎料,此种钎料具有优良的机械、电气性能,是目前使用最广泛的无铅焊料之一.熔融合金的表面张力 σ 约为 0.42N/m,密度 ρ 约为 7.4g/cm³,比热 c 约为 220J/kg·K,热传导率 k 约为 73W/m·K.

为简化模型,做出以下假设:(1)由于液滴本身体积很小,液化时体积变化也很小,故假设钎料球熔化成液滴时其体积无变化;(2)内部设计资料表明,第二滴钎料液滴的喷落高度低于 2.0×10^5 nm,并且焊点液滴十分小,故假设第二滴钎料液滴下落速度忽略重力作用的影响;(3)由于钎料球很小,各方受力也很小,基本保持平衡,故假设钎料液滴在喷出焊嘴下落到焊盘上,整个过程都保持球形;(4)由于焊嘴是近似圆形,钎料球与焊嘴接触时间很短,故假设钎料液滴与焊嘴呈圆柱面接触;(5)钎料液滴的表面张力恒定且处处相等,并且比热恒定,热传导率恒定且各向同性.

2.3 焊点液滴冲击速度的计算

对于第一滴液滴,根据能量守恒定律,可以得到

$$mg(h - R) + \Delta P \cdot \Delta V - W = \frac{1}{2} mv_1^2 \quad (1)$$

对于第二滴液滴,由于忽略了重力的影响(即液滴质量很小,可以默认为液滴质量相等,没有发生变化),可以得到

$$\Delta P \cdot \Delta V - W = \frac{1}{2} mv_2^2 \quad (2)$$

$\Delta P \Delta V$ 是氮气膨胀做的功, ΔV 是氮气膨胀的体积,也就是钎料球在焊嘴内的部分, W 是克服摩擦阻力做的功,可以为 $\sigma \cdot A$, A 为钎料液滴与焊嘴接触的圆柱面面积,两个液滴碰撞瞬间,由于作用时间十分短,必遵守动量守恒定律,即:

$$mv_1 + mv_2 = 2mv_x \quad (3)$$

$$v_x = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (4)$$

根据公式可以得到

$$\Delta V = \pi \cdot \left(\frac{h^3}{6} + \frac{h \cdot a^2}{2} \right) \quad (5)$$

$$a = R + \sqrt{R^2 - r^2} \quad (6)$$

$$A = 2\pi r \cdot L \quad (7)$$

$$L = 2\sqrt{R^2 - r^2} \quad (8)$$

根据上述推导可以计算出液滴冲击速度,表1为钎料液滴冲击速度的计算结果.可以看出,单液滴冲击模型的速度明显比双液滴模型速度的计算结果小.

下面设计实验来求磁头无铅焊点钎料液滴的实际速度,由上文可知,飞溅液滴下降的速度非常快,焊嘴的下方没有试样,如果采用传统的测速方法很难得到有效的结果,本文采用连续拍照的方法计算焊点液滴飞溅后下降的速度,在试验中,设定每隔 1ms 拍摄一张

照片,很明显,由于液滴的质量很小,下落过程中仅仅看作是自由落体运动有一定的误差,这也是磁盘内部保持真空的一个原因,但是连续拍照(SEM)的时间间隔十分小,求得的速度值应该和实际值相差极小.图2为高速摄像机拍摄到的钎料液滴从焊嘴中喷出的照片.

表1 钎料液滴的冲击速度的计算结果

h (mm)	R (nm)	r (nm)	P (mbar)	v (单液滴) (m/s)	v (双液滴) (m/s)
0.163	4.5×10^4	4.4×10^4	35	2.14	2.67
0.163	6.0×10^4	5.9×10^4	35	2.22	2.76

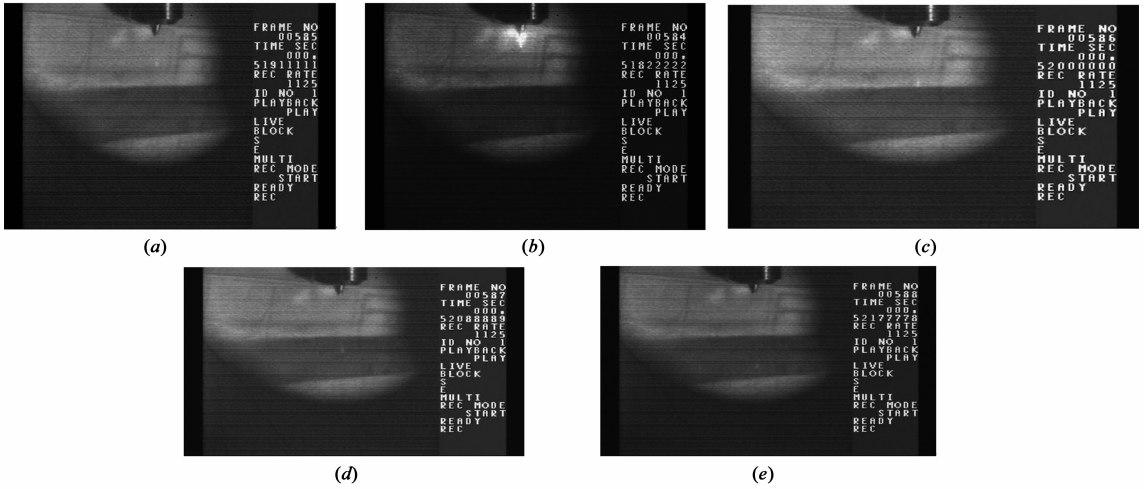


图2 喷射钎料液滴的高速摄影照片

根据拍摄的照片可以计算出:当钎料球直径 9.0×10^4 nm,氮气压力为 45mbar,即 ΔP 约为 35mbar时,钎料液滴的平均速度约为 2.981m/s ($\bar{v} = \frac{h}{t}$,其中, h 为下落高度, t 为下落的时间,图中 Rec rate 是高速摄像机的每秒记录帧数,单位为 1125 张/s).综合计算结果分析不难得出,双液滴模型的速度计算值与实际速度值更加接近.

3 氮气压力和加热参数的正交试验

正交试验设计(Orthogonal Experimental Design)法是一种研究多水平、多因素的设计方法.它可以解决一些遗传算法不能解决的最小欺骗问题,特别的,由于正交试验设计法仅挑选有代表性的点即满足“均衡分散、整齐可比”正交性原理的点进行试验,这使得实验次数大大减少,从而大大加速运算过程^[8~11].正交试验一般包括:(1)设计正交表;(2)设计实验方案和分析方法,主要有方差分析法和极差分析法,本文采用方差分析法.该试验选用直径 9.0×10^4 nm 的 $\text{Sn}_{3.0}\text{Ag}_{0.5}\text{Cu}$ (wt%) 的钎料球,同样采用相互垂直的焊盘,其 UBM 结构如图3所

示.垂直焊盘的 Ta/NiFe/Au 的厚度分别为 1.0×10^5 nm, 3.0×10^4 nm, 8.0×10^4 nm,尺寸为 $9.0 \times 8.0 \times 10^4$ nm²;水平焊盘的 Cu/Au 的厚度分别为 1.50×10^2 nm, 2.0×10^3 nm,尺寸为 $1.05 \times 8.0 \times 10^3$ nm².详细的试验参数数据如表2所示.

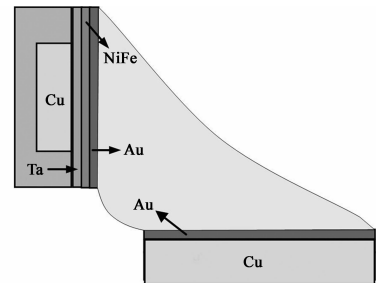


图3 焊点两侧UBM结构剖面图

根据表2的数据建立正交表3进行计算,最终获得方差分析表4.

其中, S_T 表示总离差的平方和, x_n 表示每次的试验结果.

$$S_T = \sum_{n=1}^n (x_n - \bar{x})^2 = \sum_{n=1}^n x_n^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{n=1}^n x_n \right)^2$$

$$= U_T - P,$$

$$U_T = \sum_{n=1}^n x_n^2, P = \frac{1}{n} \left(\sum_{n=1}^n x_n \right)^2$$

表 2 试验参数设置及结果

	氮气压力 (mbar)	激光脉冲 能量(mj)	脉冲时间 (ms)	飞溅率 (%)
1	50	13	2	32.5
2	50	16	3	42.5
3	50	19	4	57.5
4	60	13	3	15.5
5	60	16	4	55.0
6	60	19	2	70.0
7	70	13	4	15.5
8	70	16	2	70.5
9	70	19	3	45.0
10	70	19	2	70.0
11	50	13	4	12.5

表 3 正交表

	A	B	C		
	氮气压力 (mbar)	激光脉冲 能量(mj)	脉冲时间 (ms)		飞溅率 (%)
1	50(1)	13(1)	2(1)	1	32.5
2	50(1)	16(2)	3(2)	2	42.5
3	50(1)	19(3)	4(3)	3	57.5
4	60(2)	13(1)	3(2)	3	15.5
5	60(2)	16(2)	4(3)	1	55.0
6	60(2)	19(3)	2(1)	2	70.0
7	70(3)	13(1)	4(3)	2	15.5
8	70(3)	16(2)	2(1)	3	70.5
9	70(3)	19(3)	3(2)	1	45.0
k1	1.325	0.675	1.8	1.425	$T = 4.25$ $P = 2.0694$ $U_T = 2.37625$ $S_T = 0.37625$
k2	1.525	1.75	1.1	1.35	
k3	1.4	1.825	1.35	1.475	
K1	1.755625	0.455625	3.24	2.030625	
K2	2.325625	3.0625	1.21	1.8225	
K3	1.96	3.330625	1.8225	2.175625	
Q	2.01375	2.282917	2.090833	2.009583	
S	0.006806	0.275972	0.083889	0.002639	

表 4 方差分析表

方方差来源	自由度	离差平方和	均方	F 比	临界值 F_{α}	显著性
氮气压力	2	0.006806	0.00340	2.58	$F_{0.05}(2,6) = 5.14$	
激光脉冲能量	2	0.275972	0.13798	104.58		** ** *
激光脉冲时间	2	0.083889	0.04194	31.79	$F_{0.01}(2,6) = 10.92$	*
误差	2	0.002639	0.00132			
总总量	8	0.37625				

由表 3 可知, S_T 值小表示各次实验结果的差异小; 氮气压力的离差平方和只有 6.806×10^{-3} , 说明氮气压力对钎料液滴飞溅无明显作用; 激光脉冲时间的离差平方和为 8.3889×10^{-2} , 比氮气压力的值大了一个数量级, 但是其对焊点钎料液滴飞溅的影响仍不明显; 激光脉冲能量的离差平方和为 2.75972×10^{-1} , 表示激光脉冲时间对焊点钎料液滴飞溅的影响比氮气压力的要大, 并且比脉冲时间要大一个数量级, 也就是说激光脉冲能量对焊点钎料液滴飞溅的影响非常明显。

由表 4 可知, 激光脉冲能量的 F 比的值为 1.0458 $\times 10^2$, 约为临界值 $F_{0.01}(2,6)$ 的 10 倍。

图 4 是氮气压力、激光脉冲能量和激光脉冲时间对钎料液滴飞溅的影响趋势图, 可以看出: 随着氮气压力的升高, 钎料液滴飞溅率变化不大, 即氮气压力对钎料液滴飞溅的几乎没有明显影响; 随着激光脉冲时间的延长, 钎料液滴飞溅率先迅速减小, 再有所增加; 随着激光脉冲能量的加大, 钎料液滴飞溅率先迅速增加, 再缓慢增加。

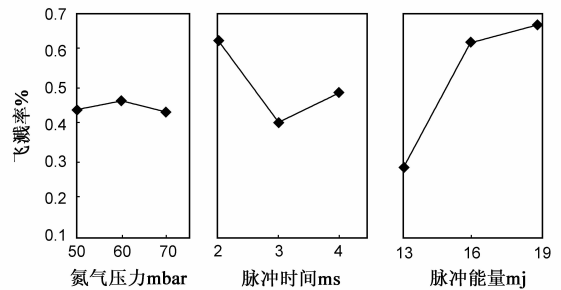


图 4 各因素对钎料液滴飞溅影响的两极控制图

在焊接过程中, 氮气有密封保护和提供焊点钎料液滴喷出焊嘴动力两个作用, 氮气压力越高, 焊点钎料液滴喷出的速度就越快, 其撞击焊盘后的不稳定扰动就越大. 焊点液滴在整个下落过程中, 温度基本不会发生变化, 激光脉冲能量越高, 焊点液滴的表面张力和粘度就会越小, 飞溅出的焊点液滴数就越多, 飞溅率相应地就越大. 不难发现, 焊点液滴的不稳定扰动是由喷射速度决定的, 而喷射的初始速度大小由氮气压力决定, 同时也受液滴的表面张力和粘度影响. 液滴的表面张力和粘度是由液滴的温度决定的, 上面的分析可得出, 液滴的温度取决于激光脉冲能量, 脉冲能量越大, 液滴的初始温度就会越高, 也就是说, 激光脉冲能量大小是焊点钎料液滴飞溅发生几率大小的决定因素^[12,13].

4 焊点失效性分析

工业上, 焊点失效性分析一般利用原子力显微镜, 采用直接分析焊点失效的金属间化合物状态变化的方法, 过程比较复杂, 并且经常收不到较好效果. 本文采

用直接处理焊点失效的 TAAA 数据的方法,用外加可控扫描式磁场和外加可控扫描式偏置两种方法验证焊点失效的对称性(Asym).设置磁性动态测试(DET)和磁性静态测试(QST)两个实验,采用的试样还是之前试验的同一组产品,试验结果如图 5 和 6 所示.

可以看出,37/81 的失效磁头产品可以被 DET 对称性分布测试发现,而 QST 对称性分布只鉴别了其中的 2/81,也就是说,普通的静态测试根本不可能筛选出对称性失效的产品.外加可控扫描式磁场时,设定磁场范围为 30、40、50、60、100、150 和 200,当设定 30~60 时,步长为 10Oe;100~200 时,步长为 50Oe.并且规定 $\Delta Asym = Max Asym - Min Asym$,当偏置小于 20% 时,认为方法失效,图 7 是试样对称性和磁场强度的横向转移曲线,可以看出,失效时的电阻都比较大,磁性动态测试时的失效率明显低于静态测试的失效率,此时,定义磁性动态测试对称性变化量 = 第二次对称性的值 - 第一次对称性的值 ($-10% > Spec > 10%$),并且可以肯定的是,外加可控扫描式磁场时,故障产品能够被筛选出来的几率达到 90% 以上.

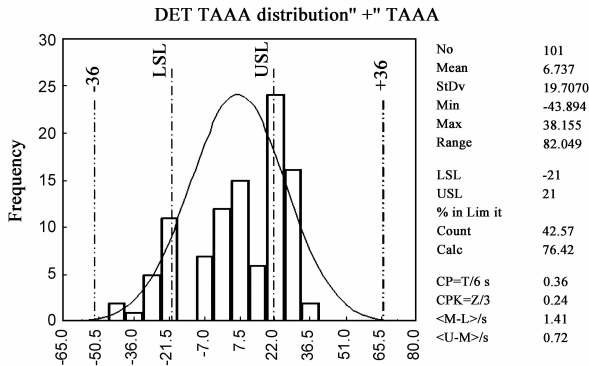


图5 DET对称性分布

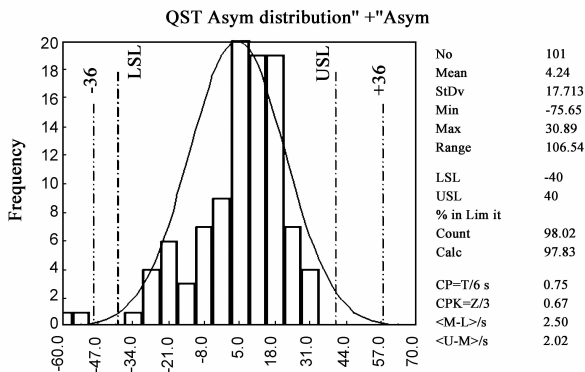


图6 QST对称性分布

外加可控扫描式偏置时,设定电流偏置范围为: -4mA到 4mA,增长步长为 0.5mA;对称性变化量 = 最大对称性值 - 最小对称性值 (Specification < 20%). 外加偏置时的对称性转移曲线如图 8 所示.

综合上述分析可以得出如下结论:外加磁场和外加偏置都是筛选磁头失效产品的有效方法,尽管他们有各自的适用范围,具体来说我们应该综合在一起运用;一般出现拐点的地方,外加磁场需要约 7 次 QST,而外加偏置时只需要 2~3 次.

继续采用上述方法对焊点失效进行分析,我们知道,扩散或者与 Sn 发生反应,必将导致金属间化合物 AuSn_x 的生成和金迁移的发生.通常,金属间化合物的生长速度十分缓慢,但在高温情况下,扩散速率会大大地加快.在 -50℃~5℃ 的情况下,对返回裂纹样品在高温静态磁场连续拍照(SEM);然后外加温度为 5℃~55℃ 时,对该组样品做持续可靠性试验,主要采用外加可控磁场和外加可控偏置的方法,试验发现在焊点基底会产生裂纹,并且这些裂纹是不连续的,裂纹的产生是焊点可靠性问题,由于并没有断裂,其可靠性问题不会立即表现出来,这就是所说的早期故障.目前还没有磁头生产机构有普适性的方法避免或者降低其发生的概率,并且也没有统一的方法检验该种早期故障^[14,15],具体如图 9 所示.

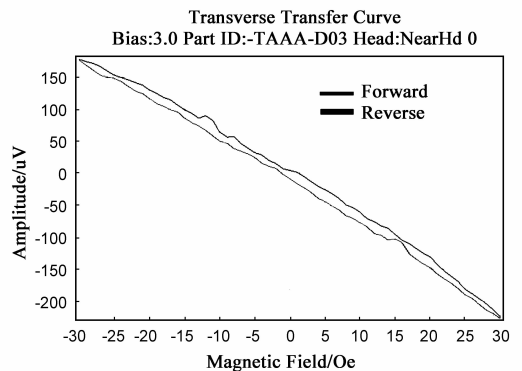


图7 外加磁场时的对称性转移曲线示意图

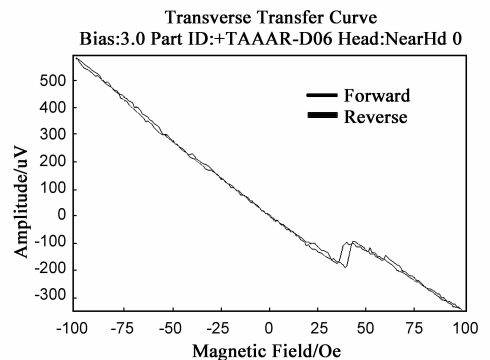


图8 外加偏置时的对称性转移曲线示意图

继续对该组样品进行 X 射线拍照,在外加磁场和外加偏置的共同作用下,继续对焊点底部虚焊点进行分析,如图 10 所示,可以发现,对于 Sn, Pb, Cu 和表面饱和和硅油厚度,其峰值停留在 28, 73, 147m/z, 在焊点基

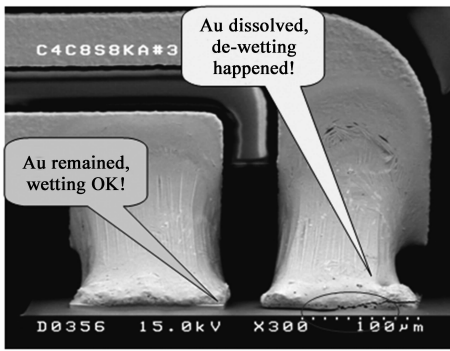


图9 样品持续实验后出现裂纹示意

底,我们会发现有明显气泡产生,这在另一方面佐证了焊点金属元素扩散和金属化合物形成,使得元素间形成了间隙,进入空气就形成了气泡,随着气泡的溢出,使得焊点焊位处出现形状各异空洞,这必将导致焊点焊接不完全,也就是我们生产上常说的虚焊。

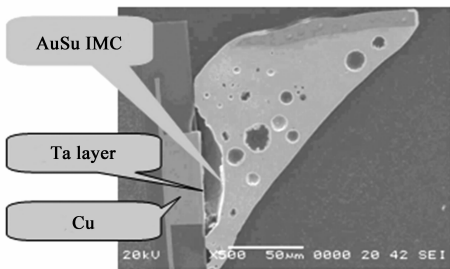


图10 样品X射线拍照实验后产生气泡示意图

仔细观察上图还可以发现,由于 Ta/Ni 层的润铺阻隔作用,在 Sn 层没有发现铜的残留,但是在边缘部位出现了 AuSn 金属间化合物.这是因为,当金层较少,或消耗殆尽时,Sn 就会和金产生 AuSn 化合物.表 5 中 Sn_x 其实是 AuSn_x, Sn₂ 代表 AuSn₂, Sn₄ 代表 AuSn₄,它们在 SEM 下可以呈现不同的金相,用 EDX (Energy Dispersive X-ray Detector, 能量弥散 X 射线探测器) 可以判定是 AuSn₂ 或 AuSn₄. 在 Au/Ta/Cu 层有明显的润铺现象发生,这是由于薄 Au 层很容易扩散,必然使得 Au/Ta 元素在相邻区域相遇甚至相互润铺,但是这种润铺是受限的.进一步分析可以知道,焊点失效很多情况是由于焊点液滴飞溅的早期故障引起的.对 Au、Sn 化合情况做一个比较,根据 SEM 结果考察焊点的浸润百分比 (wetting (%)),根据磨削后的统计接果考察 SBB 无气泡率 (SBB (%)),从而得出最佳 SBB 优化条件以及最好的化合情况(上文提到的 Sn_x),如下表 5 所示.

我们可以看到:如果温度或者能量高,Au 就会发生比较完全的扩散,此时焊点的润铺效果也会较好.如果温度或者能量不够,SBB 屈服效果就不明显,所有的样品失效,也没有需要的润铺数据,仅仅显示出温度,这

就失去了实验的意义.考虑焊点边缘和球焊焊点的润铺趋肤情况,表 5 中第 5 组比较适合^[16-18].

表 5 焊点优化结果条件表

Sn ₂	Group 1	Group 2	Group 3
Voltage (V)	270	270	260
Time (ms)	3.5	4.1	6.1
Energy (mJ)	36 - 41	41 - 45	51 - 55
wetting (%)	96	87	79
SBB (%)	66.7	85.7	93.7
Sn ₄	Group 4	Group 5	Group 6
Voltage (V)	260	260	260
Time (ms)	5.1	4.5	4.1
Energy (mJ)	42 - 48	38 - 45	39 - 41
wetting (%)	100	100	100
SBB (%)	97.1	94.3	88.2

5 结论

本文建立了双液滴模型,计算出了熔融条件下,钎料液滴的冲击速度,采用正交试验法对比了不同激光加热参数和氮气压力下钎料液滴飞溅的情况,并融合外加可控扫描式磁场和偏置,对焊点失效时的对称性进行了分析,并得出如下结论:(1)温度是影响钎料液滴表面张力和粘度的主要因素,钎料液滴的表面张力和粘度是影响钎料液滴飞溅的最直接原因,故影响液滴温度变化的因素都能影响钎料液滴飞溅发生几率^[19].钎料液滴的初始温度对其下落后影响是主要的.这与传统的焊嘴高度影响下落钎料液滴温度存在差异.(2)激光脉冲时间的变化对钎料液滴飞溅发生有一定影响;氮气压力的变化对钎料液滴飞溅的发生几乎没有影响.随着激光脉冲能量的加大,钎料液滴飞溅率先迅速增加,再缓慢增加;随着激光脉冲时间的延长,钎料液滴飞溅率先迅速减小,再缓慢增加^[20].(3)金属间化合物的生长是焊点焊接良好的标志,同时金属间化合物的生长液会引起焊点的可靠性问题,焊点的失效其主要因素是焊点早期的液滴飞溅和焊点后期的温度引起的金属间化合物的生长共同作用的结果^[21].

参考文献

- [1] A P Newbery, T Rayment, P S Grant. A particle image velocimetry investigation of in-flight and deposition behavior of steel droplets during electric arc spray forming [J]. Materials Science and Engineering, 2004, 383(A): 137 - 145.
- [2] 王晓林,李明宇,王青春.激光喷射钎料球键合工艺的影响因素分析[J].焊接,2010,12(12):38 - 42.
- [3] 尹立孟,张新平.电迁移致无铅钎料微互连焊点的脆性蠕变断裂行为[J].电子学报,2009,37(2):253 - 257.
Yin Li-meng, Zhang Xin-ping. Electromigration induced brittle creep fracture behavior of lead-free solder micro-interconnec-

- tions[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37 (2): 253 - 257. (in Chinese)
- [4] 黄春跃, 周德检, 吴兆华. 基于正交试验设计法的塑封球栅阵列器件焊点工艺参数与可靠性关系研究[J]. 电子学报, 2005, 33 (5): 788 - 792.
Huang Chun-yue, Zhou De-jian, Wu Zhao-hua. Study on the relationships between solder joint process parameters and reliability of plastic ball grid array component based on the orthogonal experiment design [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33 (5): 788 - 792. (in Chinese)
- [5] 百度百科. 液滴模型[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/link?url=EjKvrxg87mHmLW0DGr9H6Q5bNQAjzY14o-b2j-TPBy3dw-3W-EdIRuU22c0DISJgzUmnNVyVTLDJ WPC83JBfFW1q>.
- [6] Lai ZhongMin, Xue SongBai, Han XiangPeng, et al. Study on microstructure and property of brazed joint of AgCuZn-X (Ga, Sn, In, Ni) brazing alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(3): 0397 - 0400.
- [7] 肖祥慧, 彭敏放, 黎福海, 等. 磁头内置 DFH 控制元件可靠性的有限元分析[J]. 电子学报, 2012, 40 (10): 2140 - 2144.
Xiao Xiang-hui, Peng Min-fang, Li Fu-hai, et al. The finite element analysis for reliability of built-DFH in magnetic head[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10): 2140 - 2144. (in Chinese)
- [8] Gao Yan-fang, et al. Electrochemical corrosion of Sn-0.75Cu solder joints in NaCl solution[J]. Transactions on Nonferrous Met Soc China, 2012, 22(4): 977 - 982.
- [9] N Nikolopoulos, et al. Normal impingement of a droplet onto a wall film: A numerical investigation[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26(1): 119 - 132.
- [10] Xiao Feng, Liu Lanxiao, et al. Measurement and analysis molten nickel-cobalt alloy surface tension [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37 (2): 255 - 258.
- [11] Purvis, R-Smith F T. Droplet impact on water layers: Post-impact analysis and computations[J]. Philosophical Transactions on Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2005, 363 (1830): 1209 - 1221.
- [12] Yingzhi Chu, Wenlai Ma, et al. Crater forming process by liquid drop impacting liquid multi-layer target[J]. Physics and Chemistry of Liquids, 2004, 42(2): 135 - 146.
- [13] V Roisman, Romain Rioboo, Cameron Tropea, Iliia. Normal impact of a liquid drop on a dry surface: Model for spreading and receding[J]. Proceedings of the Royal Society of London -A, 2002, 458 (2022): 1411 - 1430.
- [14] Heng Xie, Seiichi Koshizuka, Yoshiaki Oka. Simulation of drop deposition process in annular mist flow using three-dimensional particle method[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235 (16): 1687 - 1697.
- [15] 吴敏, 刘政军. 磁场对 Sn-9Zn 钎料组织、显微硬度及电化学腐蚀的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 485 - 489.
Wu Min, Liu Zheng-jun. Effects of magnetic fields on microstructure, microhardness and electrochemical corrosion of Sn-9Zn solder[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 485 - 489. (in Chinese)
- [16] C Weiss. The liquid deposition fraction of sprays impinging vertical walls and flowing films[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(1): 115 - 140.
- [17] N Nikolopoulos, et al. Normal impingement of a droplet onto a wall film: A numerical investigation[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26(1): 119 - 132.
- [18] Saeid Shakeri, Sanjeev Chandra. Splashing of molten tin droplet on a rough steel surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(23): 4561 - 4575.
- [19] R Ghafouri-Azar, J Mostaghimi, S Chandra. Numerical study of impact and solidification of a droplet over a deposited frozen splat [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2004, 18(2): 133 - 138.
- [20] 潘晓勇, 龙旦凤, 杨继平. 废旧电路板钎料吹扫去除试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 192 - 198.
- [21] Marianne Francois, Wei Shyy. Computations of dynamics with the immersed boundary method, part 2: Drop impact and heat transfer [J]. Numerical Heat Transfer, 2003, 44(2): 119 - 143.

作者简介



肖祥慧 男, 1983 年 9 月出生, 湖南邵阳人. 湖南大学电气与信息工程学院电气工程专业博士研究生、讲师. 主要从事接地网故障诊断, 智能电网、电磁场理论及其应用, 智能信息处理等方面的研究工作.

E-mail: xiaoen3@126.com



彭敏放 女, 1964 年 3 月生, 湖南湘乡人, 1991 年、2006 年分别在湖南大学获得工学硕士和工学博士学位, 现为湖南大学电气与信息工程学院教授、博士生导师, 湖南省新世纪 121 人才工程人选, 主要从事电路测试与诊断、智能信息处理、电力系统故障分析及其设备状态监测、电磁场理论及其应用等方面的研究工作.

E-mail: pengminfang@hnu.edu.cn