

电子封装微互连焊点力学行为的尺寸效应*

尹立孟 杨艳 刘亮岐 张新平

(华南理工大学材料科学与工程学院, 广州 510640)

摘要 研究了微互连模拟焊点在不同直径 ($d=200\text{—}575\ \mu\text{m}$) 和长度 ($l=75\text{—}525\ \mu\text{m}$) 匹配条件下准静态微拉伸的力学行为。研究表明, 焊点几何尺度因子 d/l 对焊点内的力学约束及接头强度有重要影响; d/l 增大时导致焊点中力学约束和应力三轴度的提高, 但接头强度并不完全符合 Orowan 近似公式的预测结果, 保持 l 恒定而增加 d 时会出现强度变小的尺寸效应。研究结果还表明, 无论无铅还是含铅钎料, 其焊点拉伸强度与焊点体积 (d^2l) 之间的变化关系符合反比例函数, 即 $\sigma_{\text{F-Joint}} = \frac{1}{Ad^2l} + B$, 焊点的强度随焊点体积的减小而显著增大, 显示了焊点“越小越强”的“体积”尺寸效应。

关键词 电子封装, 微互连焊点, 尺寸效应, 拉伸强度, 约束效应

中图分类号 TG113

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2009)04-0422-06

SIZE EFFECT OF MECHANICAL BEHAVIOR OF MINIATURE SOLDER JOINT INTERCONNECTIONS IN ELECTRONIC PACKAGING

YIN Limeng, YANG Yan, LIU Liangqi, ZHANG Xinping

School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640

Correspondent: ZHANG Xinping, professor; Tel: (020)22236396, E-mail: mexzhang@scut.edu.cn

Supported by New Century Excellent Talents in University (NCET-04-0824)

Manuscript received 2008-04-25, in revised form 2008-11-14

ABSTRACT Mechanical behaviors of miniature solder joint interconnections with different scale matches, diameter (d) in the range of $200\text{—}575\ \mu\text{m}$ and length (l) of $75\text{—}525\ \mu\text{m}$, were investigated by using quasi-static micro-tensile testing. The results show that the joint geometry scaling factor (d/l) plays an important role in influencing the mechanical constraint level and tensile strength of the solder joints. However, with increasing d/l , the tensile strength of the joints does not always increase and not always exhibit a similar trend to that predicted by Orowan approximation equation, but there is an inverse size effect on the solder joint strength. For both lead-free and lead-containing solders, the correlation between the tensile strength and volume of the solder joints largely follows inverse proportion function equation, *i.e.*, $\sigma_{\text{F-Joint}} = \frac{1}{Ad^2l} + B$, where tensile strength of the solder joints increases obviously with the decrease of the solder joint volume and there is a so-called “solder joint volume effect”, that is, the smaller the solder joint volume, the higher the solder joint strength.

KEY WORDS electronic packaging, miniature solder joint interconnection, size effect, tensile strength, constraint effect

随着电子产品不断向小型化、便携化和多功能化方向发展, 电子封装也日益趋向高密度、高精度、细间距和微尺度, 并直接导致了互连焊点的微小化及随之而来的一系列质量控制、耐久性和可靠性问题^[1-3]。经历电子封装再流焊条件下特殊热循环和微区物理冶金反应后形成的微尺度焊点的行为和性能与体钎料材料 (bulk solder material) 已明显不同; 这种由于焊点尺寸变化而出现的行

为和性能的变化即为尺寸效应。材料中尺寸效应问题广泛存在, 对其研究亦有不少。有研究者指出, 材料性能主要取决于特征长度和尺寸参数 (组织微结构) 2 个因素^[4]。有研究^[5]表明, 由于存在尺寸效应, 当电子元器件中互连焊点的体积小于 $10^{-12}\ \text{m}^3$ (大致相当于直径和长度均为 $110\ \mu\text{m}$ 的焊点) 时, 通过体钎料获取的相应数据应用于微互连焊点时将不再可靠。Sn-Ag-Cu 体钎料和微焊点的纳米压痕实验证实了两者力学性能明显不同^[6]。还有一些研究^[7-11]从钎焊冶金反应过程中钎料体积大小和时效时间长短等方面研究了 Sn-Pb 和 Sn-Ag-Cu 钎料与

* 新世纪优秀人才计划资助项目 NCET-04-0824

收到初稿日期: 2008-04-25, 收到修改稿日期: 2008-11-14

作者简介: 尹立孟, 男, 1976 年生, 博士生

Cu, Ni 等不同基板材料的界面反应及其导致的一些尺寸效应. 此外, Sn-Ag-Cu 钎料合金蠕变实验表明, 尺寸效应比较复杂, 不同试样得到的应力指数也不相同^[12]. 随着目前全球范围内无铅化电子封装进程的加快, 对无铅钎料 (例如替代传统 Sn-Pb 钎料的主流无铅 Sn-Ag-Cu 系钎料) 及其微互连焊点力学行为的研究也越来越迫切. 尤其是在对含铅钎料和无铅钎料互连焊点的使役行为和性能进行比较研究时, 所采用的试样尺寸与真实焊点相差较大, 难以准确表征其真实情况. 从已有的研究看, 所采用的模拟焊点的最小直径为 300 μm 左右 (焊点长度约为 440 μm)^[13], 而目前实际的焊点尺寸约为 200 μm , 甚至在 100 μm 以下. 本研究采用微互连模拟焊点试样, 对 Sn-Ag-Cu 无铅钎料和 Sn-Pb 共晶钎料焊点直径变化 (最小至 200 μm) 及焊点长度变化 (最小至 75 μm) 时的力学行为和性能演变进行了研究, 以期钎料选择、设计以及焊点设计和性能评价等提供参考.

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料

本实验中原材料为: Sn 粒 (纯度 99.5%)、Pb 粒 (99.5%)、Ag 颗粒 (99.95%) 和无氧 Cu 丝 (99.95%). Sn-37Pb (质量分数, %, 下同) 和 Sn-3.0Ag-0.5Cu 钎料的制备在 150 W 陶瓷坩埚熔炼炉中进行. 钎料熔炼过程中采用 LiCl 和 KCl 熔融共晶盐覆盖保护以防止钎料氧化. 熔炼温度控制在 400 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 重熔精炼 3 次后浇铸成钎料条. 用 Netzsch STA409 综合热分析仪测得 Sn-37Pb 钎料的熔化温度为 184—188 $^{\circ}\text{C}$, Sn-3.0Ag-0.5Cu 钎料的熔化温度为 218—221 $^{\circ}\text{C}$.

1.2 微焊点试样制备

本实验采用常用的“铜引线/钎料/铜引线”三明治结构微互连模拟焊点试样^[14]. 采用的无氧铜引线直径分别为 225, 300, 425, 500 和 600 μm . 钎焊前, 用细砂纸把 2 根待焊铜丝的端面磨平后, 用无水乙醇及丙酮溶液将铜丝端面和待焊钎料微颗粒 (球) 清洗干净, 采用功率为 1.5 kW 的加热板和特定设计的带微尺度“V”型沟槽的铝板夹具在模拟再流焊条件下制备模拟焊点. 采用松香酒精作为 Sn-37Pb 钎料的钎剂, 而采用添加 5% ZnCl_2 的松香酒精作为无铅钎料 Sn-3.0Ag-0.5Cu 钎焊时的钎剂. 钎焊温度控制在高于钎料熔化温度 20—30 $^{\circ}\text{C}$ 的范围, 待钎料熔化填满 2 铜丝间隙后保温 10—20 s 后风冷至室温. 将焊好的模拟焊点样品精细磨平、抛光后的最终直径分别为 200, 275, 400, 475 和 575 μm , 焊点长度为 75, 125, 150, 175, 225, 325, 425 和 525 μm . 图 1 所示为焊点直径和长度分别为 200 和 225 μm 的模拟焊点的扫描电镜 (SEM) 照片.

需要说明的是, 实际焊点往往略呈腰鼓形 (即焊点中间部位稍大), 但研究中为方便起见常采用均匀尺寸的焊点^[13]; 另外, 由于电子封装系统中芯片与基板、元

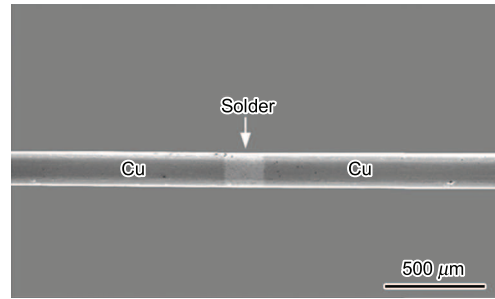


图 1 “铜引线/钎料/铜引线”结构模拟焊点的 SEM 照片

Fig.1 SEM image of Cu line/solder/Cu line structured solder joint (diameter: 200 μm , length: 225 μm)

器件与印刷电路板材料间的热膨胀系数不同, 当环境温度变化时易造成系统结构的热失配, 其中焊点一般承受剪切应力, 而当元器件结构设计不合理及装配不当时也常常承受拉应力作用. 本研究中主要考虑模拟焊点承受拉应力作用的情况. 采用上述模拟焊点试样有如下优点: (1) 模拟焊点包括了 2 个金属间化合物 (IMC) 界面层, 比较接近真实焊点; (2) 样品易于制备与复制; (3) 可以通过改变铜丝直径和铜丝间的钎焊间隙尺寸 (即焊点长度), 使焊点尺寸接近真实微互连的尺寸; (4) 在拉伸实验时, 便于对焊点试样进行加载.

2 实验结果及分析

微拉伸实验在高精度的动态力学分析仪 DMA(Q800, TA-Instruments) 上进行, 仪器的载荷测量精度为 0.0001 N, 实验温度为 35 $^{\circ}\text{C}$, 加载模式为载荷控制, 速率为 1 N/min. 图 2 为 Sn-3.0Ag-0.5Cu 和 Sn-37Pb 钎料制备的不同尺寸匹配焊点的平均拉伸强度实验结果.

2.1 相同直径不同长度焊点的拉伸强度

图 3a 所示为直径保持为 200 μm , 焊点长度变化时 Sn-37Pb 钎料焊点试样的拉伸应力-应变曲线, 图 3b 为 Sn-3.0Ag-0.5Cu 和 Sn-37Pb 钎料焊点试样的拉伸断裂强度随焊点高度变化的结果. 图 3b 中还给出了当焊点直径为 200 μm 时, 按 Orowan 近似公式计算得到的焊点拉伸断裂强度, 其中 Sn-37Pb 和 Sn-3.0Ag-0.5Cu 钎料的拉伸断裂强度分别为 35.4 和 45 MPa^[15,16]. Orowan 近似公式^[5,17,18] 如下所述:

$$\sigma_{\text{F-Joint}} = \sigma_{\text{UTS-Solder}} \times \left(1 + \frac{d}{6l}\right) \quad (1)$$

式中, $\sigma_{\text{F-Joint}}$ 为接头的断裂强度, $\sigma_{\text{UTS-Solder}}$ 为体钎料的极限拉伸强度, d 为焊点直径, l 为焊点长度. 由式 (1) 可知, 当焊点几何尺度因子 d/l 增大时, 焊点强度 $\sigma_{\text{F-Joint}}$ 增加.

从图 2 和图 3 可以看出, 对于所有的焊点, 当直径保持不变而逐渐减小焊点长度时, 焊点断裂强度明显提高, 而断裂应变则不断减小, 这一变化规律与 Orowan 近似公式的预测结果一致. 焊点长度减小导致其强化的主要原因

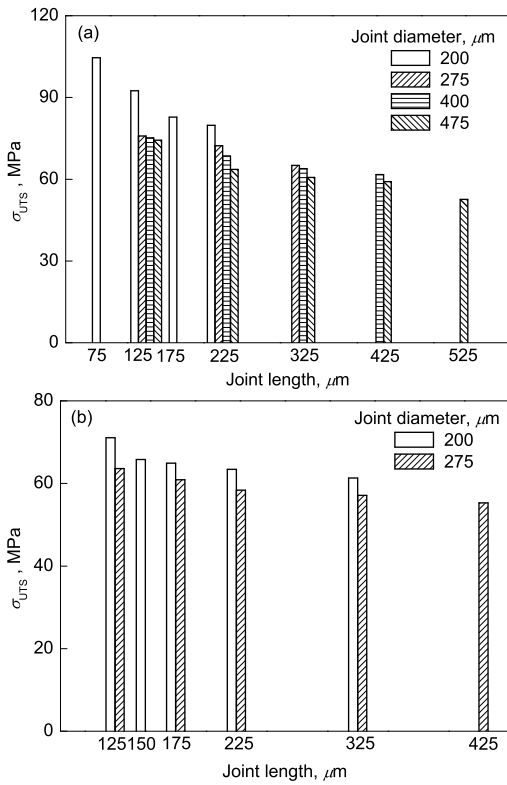


图 2 不同尺寸焊点的平均拉伸强度分布

Fig.2 Distributions of the average tensile strengths of Sn-3.0Ag-0.5Cu (a) and Sn-37Pb (b) solder joints with different sizes

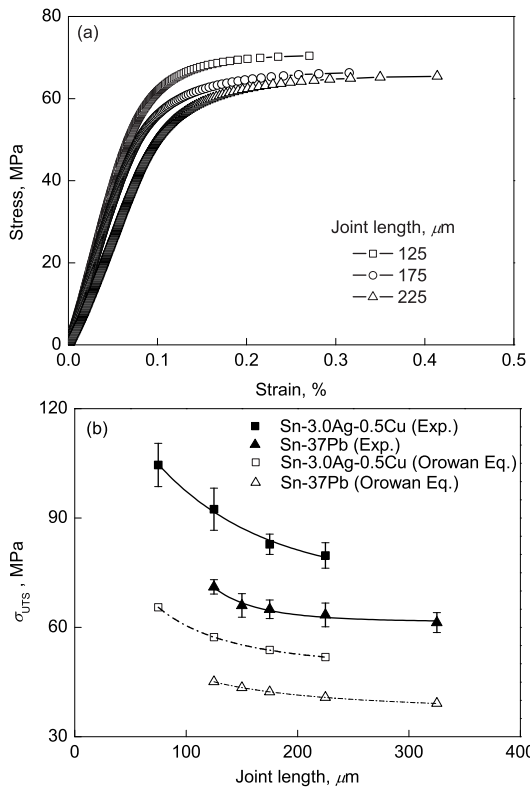


图 3 不同长度焊点的应力 - 应变曲线及拉伸强度随焊点长度变化的关系

Fig.3 Stress-strain curves of Sn-37Pb solder joints (a) and tensile strength vs solder length (b) for 200 μm diameter joints

是接头微区软钎料层内应力三轴度的提高, 钎料屈服变形变得困难; 焊点的最终断裂应变也随之变小, 表明接头的脆性增加了. 图 2 和图 3 中实验所得到的焊点拉伸强度均较大幅度地高出体钎料的强度, 显然, 以往的研究中焊点的实际拉伸强度被明显低估了. 因此, 在微互连焊点尺度不断缩小的情况下, 如果能合理控制焊点内的工艺缺陷 (包括界面 IMC 层厚度), 则可保证焊点的强度远高于所用钎料的强度.

2.2 相同长度不同直径焊点的拉伸强度

图 4a 所示为 Sn-37Pb 钎料焊点长度恒定为 225 μm, 而直径变化时试样的拉伸应力 - 应变曲线, 图 4b 所示为 Sn-3.0Ag-0.5Cu 和 Sn-37Pb 钎料焊点试样的拉伸强度随焊点直径变化的结果以及由 Orowan 近似公式预测的结果.

由图 2 与图 4 可见, 保持焊点长度不变而减小其直径时, 焊点的拉伸断裂强度逐渐提高, 断裂应变不断增大, 这一结论与 Orowan 近似公式预测的趋势相反. 从 Orowan 近似公式的力学模型和物理意义看, 它是基于材料力学的强度理论; 当焊点长度不变而直径减小时, 焊点中低强度钎料所受的拘束水平降低, 钎料被强化的程度降低, 因而焊点的整体强度降低, 符合 Orowan 近似公式的结果. 但是, 本研究的实验数据表明, 当焊点长度恒定而直径减小时, 其断裂强度显著提高. 要解释这一矛盾的结果, 需要

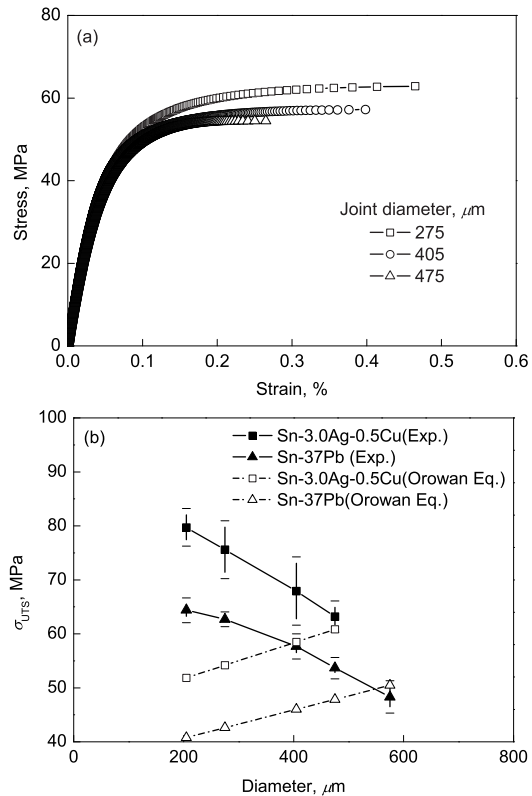


图 4 不同直径焊点的应力 - 应变曲线及拉伸强度随焊点直径变化的关系

Fig.4 Stress-strain curves of Sn-37Pb solder joints (a) and tensile strength vs joint diameter (b) for joints with 225 μm solder length

从不同长度焊点对外加拉伸载荷的力学响应、界面应力、界面结构和显微组织等方面进行深入研究。

首先,对所有实验样品(每种规格焊点的样品数为 5—20 个)的断口进行观察和统计分析发现,焊点试样尺寸匹配不同(l 恒定而 d 变化时)时最终断裂所出现位置不同。对于 Sn-37Pb 钎料焊点,当几何尺度因子 $d/l < 1.2$ 时,试样的断裂部位大部分出现在焊点中部;当 $d/l=1.2$ 时,断裂在界面出现的概率约为 50%;而当 $d/l > 1.2$ 时,断裂则大部分位于界面位置或与界面约成 45° 角度(当起始裂纹出现在对角两侧界面的情况下发生)。统计结果表明,对于 Sn-3.0Ag-0.5Cu 钎料焊点,当 $d/l > 2.1—2.7$ 时,大部分焊点呈现界面断裂特征,且焊点直径越小断裂出现在界面的临界尺寸 d/l 越大,这可能与小直径接头中焊接缺陷的数量相对较少有关。

其次,对焊点长度为 $225\ \mu\text{m}$ 的试样进行中止加载实验,即把试样加载至刚过屈服点后立即卸载;然后,将中止加载的试样与拉断的试样在扫描电镜(JEOL, JSM-5200)下进行观察分析,结果如图 5 所示。可以看出,不同直径的焊点呈现完全不同的断裂模式。小直径($200\ \mu\text{m}$)焊点中止加载试样中,焊点钎料部分直径缩小,未发现任何裂纹存在,如图 5a 所示;该类型试样完全拉断后,断裂部位出现在焊点中间位置,断口外观呈锥状,如图 5b 所示。而大直径($575\ \mu\text{m}$)焊点试样中止加载后,焊点钎料部分直径也缩小,但在界面处出现了裂纹,如图 5c 所示;该类型的试样完全断裂后,其最终断裂位置出现在钎料与铜引线界面或与界面约成 45° 角度的钎料中,而且断裂模式明显不同于小直径焊点试样,如图 5d 和 e 所示。

此外,不同直径焊点的强度差别及断裂模式迥异还与焊点(钎料)和铜引线(基材)在拉伸载荷作用下的力学响应不同有关。在拉伸变形的初始阶段,由于铜引线

料的弹性模量和 Poisson 比不同(铜的弹性模量较大而 Poisson 比较小,钎料则相反),当铜引线尚处于弹性变形阶段时,焊点中钎料部分已经发生屈服及塑性变形,导致焊点内原有的单向(轴)应力状态发生变化,并在钎料与母材的界面处出现界面应力 σ_r ,如图 6 所示。界面应力的大小取决于焊点几何尺度因子 d/l , d/l 值越大则界面应力越高^[19],有研究^[17]指出界面应力的最大值可达钎料拉伸强度的 $1/2$,即 $\sigma_{r\max} = \frac{\sigma_{UTS}}{2}$ 。此外,由于焊点试样在拉伸加载时塑性变形只在焊点中间较软的钎料部分出现,该变形过程与带缺口的圆柱形拉伸试样近似,其中较软的钎料部分近似为圆柱试样中的微小缺口。根据 Bridgman 理论^[20]分析,焊点内的应力三轴度极值可以由下式估算:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{\text{eff}}} = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{d_{\min}}{2R}\right) \quad (2)$$

其中, σ_m 是焊点中的平均应力, σ_{eff} 是焊点中的等效应力, d_{\min} 是焊点中截面积最小处的直径, R 是焊点收缩变形后外圆弧的半径(见图 6b)。当焊点长度 l 保持不变而直径 d 减小时,焊点内的应力三轴度水平降低,界面应力水平也随之降低,即当 $d_2 < d_1$ 时,界面应力 $\sigma_{r2} < \sigma_{r1}$,如图 6c 所示。

对锡基钎料(无论是否含 Pb)和铜基材的钎焊过程而言,在起始阶段,熔融钎料中的 Sn 和固态 Cu 基材在界面立即发生反应生成 Cu_6Sn_5 ,该 IMC 随后长大并聚集形成连续的金属间化合物层;由于 Cu 的扩散率很快,它可以通过 IMC 层与熔融钎料中的 Sn 反应形成新的 IMC 使其层厚增加;若高温停留时间较长,在 Cu_6Sn_5 层和基材 Cu 之间还可能出现更脆的 Cu_3Sn 层^[7]。从理论上讲,当保持焊点长度 l 不变时,尽管不同直径焊点的钎料体积($V = \frac{\pi d^2 l}{4}$)与两侧 Cu 基板面积($S = \frac{\pi d^2}{4}$)不

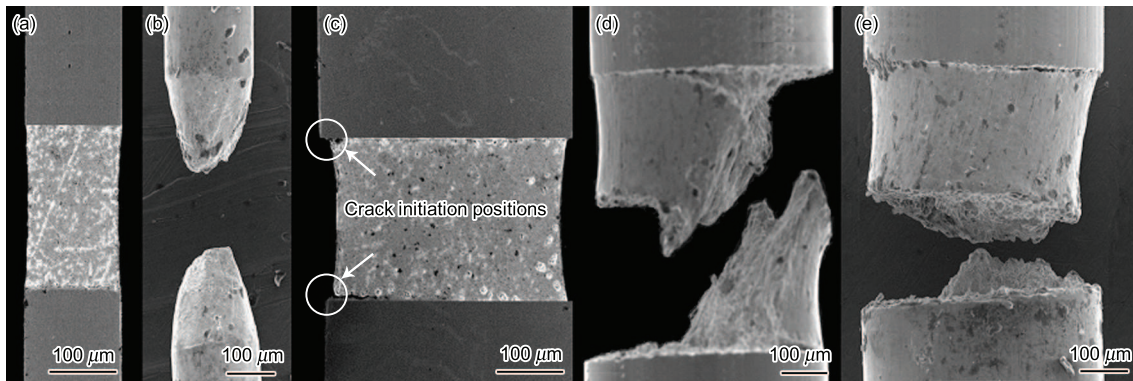


图 5 不同直径 Sn-37Pb 钎料焊点屈服后中止加载和完全拉断试样的形貌

Fig. 5 Morphologies of Sn-37Pb solder joints with length of $225\ \mu\text{m}$ and different diameters after yield and rupture
 (a) longitudinal cross-section of the joint with $200\ \mu\text{m}$ diameter after yield
 (b) morphology of the joint with $200\ \mu\text{m}$ diameter after rupture
 (c) longitudinal cross-section of the joint with $575\ \mu\text{m}$ diameter after yield, circles showing the crack initiation positions
 (d) and (e) morphologies of the joints with $575\ \mu\text{m}$ diameter after rupture

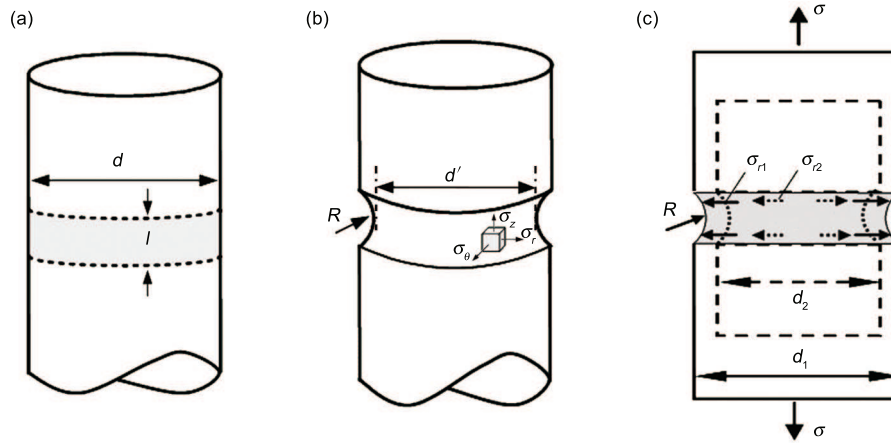


图 6 焊点拉伸变形后产生的三向应力与界面应力

Fig.6 Solder joint model, triaxial stress state and interface stresses in solder joints after deformation

- (a) geometry of solder joint
 (b) triaxial stress state in a plastically deformed solder joint
 (c) interface stresses in plastically deformed solder joint

同,但是体积与面积 ($2S$) 的比值均为 $l/2$, 为此可以认为不同直径的 IMC 层厚基本一致。

综上所述,在焊点长度相同时,由于小直径焊点的尺度因子 d/l 值较小,力学约束程度低,在拉伸加载过程中焊点界面应力较小,而焊点中部约束水平最低并首先产生变形,随后以典型的微孔长大聚合机制引发断裂过程,因而断裂最终出现在焊点中部(图 5b)。对直径较大的焊点, d/l 值较大时接头中较高的约束水平导致界面应力较大,而 IMC 层厚与小直径焊点接近,并且界面存在的焊接缺陷(如空洞和夹杂等)相对小直径焊点更多,因此在拉伸加载过程中,较小的载荷即能导致裂纹首先出现在钎料与 IMC 层界面(如图 7 所示),而裂纹一旦形成将迅速扩展直至断裂。实验结果表明,当 d/l 超过其临界尺寸时,断裂位置大多出现在界面位置,此时基于材料力学中强度理论的估算焊点强度的 Orowan 近似公式将不再适用。

2.3 焊点拉伸强度的“体积”尺寸效应

从上面实验结果可以看出,基于焊点几何尺度因子 d/l 的 Orowan 近似公式不能描述所有情况下的焊点拉伸强度;尤其是焊点长度恒定时直径增大或几何尺度因子相同而焊点直径不同的情况,实验结果与 Orowan 近似公式预测结果不符。本研究在对大量的具有不同尺寸匹配焊点的拉伸断裂强度数据进行分析计算和归纳后发现,焊点拉伸强度与焊点体积之间具有如图 8 所示的变化趋势。

对图 8a 所示 Sn-3.0Ag-0.5Cu 无铅钎料焊点强度的实验数据进行拟合处理,获得的反比例函数变化关系为

$$\sigma_{F-Joint} = \frac{1}{8V} + 59 \quad (3a)$$

式 (3a) 可近似写成

$$\sigma_{F-Joint} = \frac{1}{6d^2l} + 59 \quad (3b)$$

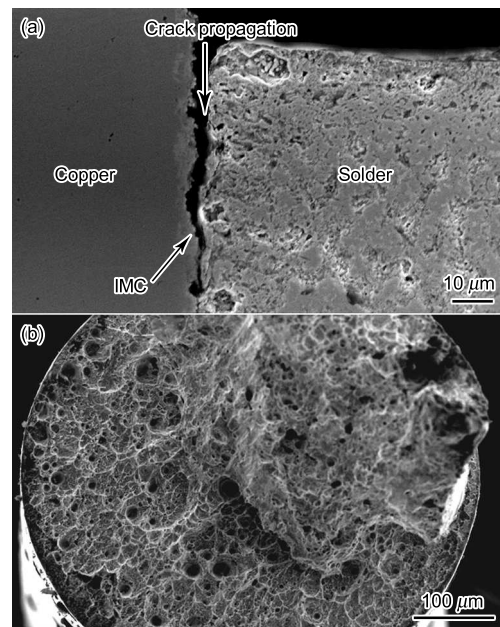


图 7 较大直径 ($575 \mu\text{m}$) Sn-37Pb 焊点中裂纹出现在钎料/IMC 界面

Fig.7 Crack initiation and growth along the solder/IMC interface of the joint with diameter of $575 \mu\text{m}$
 (a) SEM image of longitudinal cross-section
 (b) SEM image of the fractured joint interface

同样,对图 8b 所示 Sn-37Pb 钎料焊点强度的实验数据进行拟合处理,得到其反比例函数变化关系为

$$\sigma_{F-Joint} = \frac{1}{14V} + 54 \quad (4a)$$

式 (4a) 可近似写成

$$\sigma_{F-Joint} = \frac{1}{11d^2l} + 54 \quad (4b)$$

可以看出,焊点体积越小则其拉伸断裂强度越高。可考虑 d 和 l 的极限变化情况对上两式做进一步考核。例

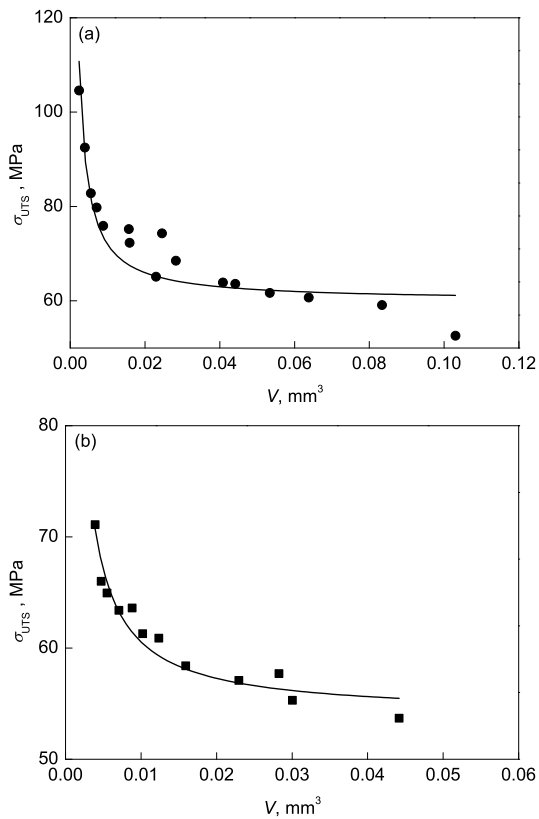


图 8 不同钎料的焊点拉伸强度与其体积的关系

Fig.8 Relationships of tensile strength and solder joint volume of Sn-3.0Ag-0.5Cu (a) and Sn-37Pb (b)

如, 当 d 恒定而 l 趋近很小值时 (相当于 $l \rightarrow 0$, 即整个试样变为铜丝线), 其强度相对于体钎料而言应趋近于“很大值”, 这与本文实验结果具有一致性, 实验测定表明, 直径为 $200 \mu\text{m}$ 铜线的强度超过 600 MPa , 是钎料强度 10 倍以上; 而当 l 很大 ($l \rightarrow \infty$) 时, 即整个试样由钎料构成, $\sigma_{\text{F-Joint}}$ 趋向一恒定值 (对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 无铅钎料该值为 59 MPa , 而对 Sn-37Pb 钎料该值为 54 MPa)。此外, 当保持 l 恒定, d 减小时 (无需考虑极限情况, 因为 d 为 0 或趋向于 0 时, 钎焊接头无法形成), 接头强度 $\sigma_{\text{F-Joint}}$ 提高; 而当 $d \rightarrow \infty$ 时 (相当于 2 张平行放置的巨大平板的钎焊), 从理论计算上看接头强度应该很高, 但由于此极限情况下钎焊过程难以实现, 该假设不具有物理意义及工程价值。

采用上述经验公式 (3) 和 (4) 可以定量地描述焊点拉伸强度与焊点体积之间的关系。

3 结论

(1) 微尺度互连钎料焊点由于受到两侧基材的约束, 其拉伸断裂强度明显高于体钎料及 Orowan 近似公式预测的强度, 以往估算的焊点强度过低。

(2) 焊点尺度因子 (d/l) 增大将导致接头中力学约束和应力三轴度提高, 但并不总是使接头强化, 会出现与 Orowan 近似公式预测相反的强度尺寸效应。

(3) 焊点直径保持不变而逐渐减小焊点长度时, 焊点

几何尺度因子 d/l 增大, 焊点断裂强度明显提高, 这一变化规律与 Orowan 近似公式的预测趋势较一致, 焊点的最终断裂部位出现在焊点中间位置, 断口外观呈锥状。

(4) 焊点长度不变而直径增大时, 焊点几何尺度因子 d/l 提高, 但其拉伸强度反而随之降低, 焊点强度变化规律与 Orowan 近似公式的预测趋势相反; 焊点断裂模式与焊点几何尺度因子及钎料种类有关, d/l 值较大时焊点易出现界面断裂。

(5) 无论对于无铅 Sn-Ag-Cu 钎料还是 Sn-37Pb 钎料, 焊点强度与焊点体积之间的变化关系符合反比例函数, 即随着焊点体积的减小, 焊点的拉伸强度增大, 显示出“越小越强”的“体积”尺寸效应。

参考文献

- [1] Zhang X P, Yin L M, Yu C B. *Chin J Mater Res*, 2008; 22: 1
(张新平, 尹立孟, 于传宝. 材料研究学报, 2008; 22: 1)
- [2] Yin L M, Zhang X P. *Acta Electron Sin*, 2008; 36: 1610
(尹立孟, 张新平. 电子学报, 2008; 36: 1610)
- [3] Huang Z H, Conway P P, Jung E, Thomson R C, Liu C Q, Loeher T, Minkus M. *J Electron Mater*, 2006; 36: 1761
- [4] Arzt E. *Acta Mater*, 1998; 46: 5611
- [5] Zimprich P, Betzwar-Kotas A, Khatibi G, Weiss B, Ipser H. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2008; 19: 383
- [6] Wang F J, Qian Y Y, Ma X. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 775
(王凤江, 钱乙余, 马 鑫. 金属学报, 2005; 41: 775)
- [7] Islam M N, Sharif A, Chan Y C. *J Electron Mater*, 2005; 34: 143
- [8] Chen H T, Wang C Q, Yan C, Huang Y, Tian Y H. *J Electron Mater*, 2007; 36: 33
- [9] Sharif A, Chan Y C, Islam R A. *Mater Sci Eng*, 2004; B106: 120
- [10] Wong C K, Pang J H L, Tew J W, Lok B K, Lu H J, Ng F L, Sun Y F. *Microelectron Relia*, 2008; 48: 611
- [11] Ho C E, Lin Y W, Yang S C, Kao C R, Jiang D S. *J Electron Mater*, 2006; 35: 1017
- [12] Wiese S, Roellig M, Mueller M, Bennemann S, Petzold M, Wolter K J. *Proc 57th Electronic Components and Technology Conf*, May 29—June 1, 2007, Reno, Nevada, USA, 2007: 548
- [13] Ren F, Nah J W, Suh J O, Tu K N, Xiong B S, Xu L H, Pang J H L. *Inter Symp Adv Pack Mater: Process, Properties and Interfaces*, 2005; 16-18: 66
- [14] Ren F, Nah J W, Tu K N, Xiong B S, Xu L H, Pang J H L. *Appl Phys Lett*, 2006; 89: 1
- [15] Plumbridge W J. *J Mater Sci*, 1996; 31: 2501
- [16] Kim K S, Huh S H, Suganuma K. *Microelectron Relia*, 2003; 43: 259
- [17] Saxton H J, West A J, Barrett C R. *Metall Trans*, 1971; 2: 999
- [18] West A J, Saxton H J, Tetelman A S, Barrett C R. *Metall Trans*, 1971; 2: 1009
- [19] Courtney T H. *Mechanical Behavior of Materials*, New York: McGraw Hill, 1990: 201
- [20] Bridgman P W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. Cambridge: Harvard University Press, 1964: 9