

细铜丝超声球焊烧球工艺参数优化及铜球组织分析

田艳红, 杨东升, 王春青

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对封装 $20\mu\text{m}$ 细直径铜丝球键合过程中 FAB 成形工艺参数进行了优化. 结果表明, 烧球参数中的烧球时间和烧球电流是影响铜球尺寸的主要因素. 随着烧球参数的增加, 铜球直径也相应增加. 保护气体流速对 FAB 形球尺寸的影响不明显, 但直接影响到铜球防氧化效果以及成形的质量, 保护气体流速达到一定值之后才能形成表面光滑无氧化的铜球. 形成的铜球主要由几个大尺寸柱状晶粒组成, 同一晶粒内存在两个不同的区域. 分析认为铜球晶粒生长过程分为两个阶段, 初期以树枝状方式生长以及后期以胞状晶的形式进行.

关键词: 烧球时间; 烧球电流; 工艺参数优化

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)01-0041-04



田艳红

0 序 言

引线键合技术是电子封装中实现芯片最基本、最主要的一种互连技术, 丝球焊键合工艺中重要的一个环节就是形球 (free air ball FAB 又称烧球) 过程. 烧球过程中形球的尺寸、形状、表面氧化污染状况以及硬度等直接决定了球键合点的键合质量和可靠性, 因此在丝球焊过程中, 获得球形度好、大小一致的无氧化的光滑铜球是获得性能优良焊点的重要条件之一. 铜球形成的好坏又取决于尾丝形成质量和烧球工艺参数^[1]. 铜丝与楔键合点的连结强度将决定尾丝形成质量^[2]. 文献[2-3]等人研究结果一致表明烧球电流和烧球时间是影响烧球质量的主要因素. 烧球质量受防氧化保护气体的种类和流速的影响显著. 在 95% N_2 / 5% H_2 的保护气氛下能获得表面未氧化的良好 FAB^[4], 获得表面光滑的铜球. 文献[5]研究了烧球电流及烧球时间对铜球键合点硬度的影响后推测铜球键合点显微硬度的差别主要归功于铜球本身的硬度差别. 文中使用试验设计方法对直径为 $20\mu\text{m}$ 铜丝的 FAB 形球工艺参数进行优化设计. 分析烧球时间、烧球电流以及保护气体流量对烧球质量的影响, 并分析铜球的结晶组织从而获得成形良好的铜丝 FAB 形球工艺.

1 烧球参数对 FAB 成形的影响

1.1 FAB 成形不良的因素分析

试验采用两种类型的 $20\mu\text{m}$ 细铜丝, 分别以 A 铜丝和 B 铜丝表示. A 与 B 的成分以及断后伸长率有所不同. A 铜丝 (Cu : 99.99%) 的断后伸长率为 4% ~ 16%, B 铜丝 (Cu : 99.999%) 的断后伸长率为 3% ~ 8%. 两铜丝的断裂载荷范围在 0.05 ~ 0.11 N.

试验中 FAB 成形不良主要表现为铜球偏置 (偏头球) 和尖头现象 (尖头球). 偏头球会在键合过程中形成高尔夫球焊点, 易造成键合点偏离焊盘中心, 使铜球溢出焊盘产生可靠性隐患, 同时高尔夫球焊点的力学性能也偏低. 且易造成芯片弹坑缺陷.

烧球参数设置不当会产生偏头球. 当烧球电流较小或者烧球时间过短, 烧球时铜丝获得的热量偏低, 熔化量较少, 液态球的重力作用不明显, 形成铜球位置的不确定性较大, 多呈偏置状态, 如图 1^a 所示. 随着烧球电流的增加以及烧球时间的延长, 熔化的金属增多, 形球尺寸增大, 重力作用使得液态金属位于铜丝的正下方, 如图 1^b 所示. 为了避免偏头球的出现, 烧球参数不宜过小.

有氧环境下铜极易氧化, 烧球过程中保护气体防氧化效果较差时, 液态铜球表面发生氧化, 导致表面张力急剧下降, 重力作用突显, 容易导致尖头球的形成. 在保护气体流速较小时, 对铜球的保护不利, 生成的尖头球比例大, 如图 2^a 所示, 尖头球的表面粗糙, 氧化较严重. 另外当烧球参数过大时, 也容易

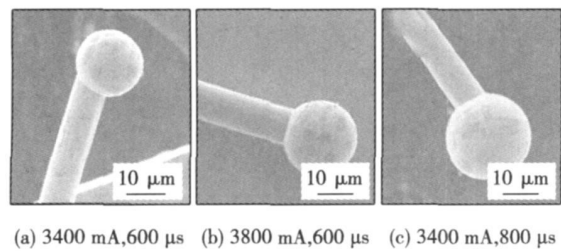


图 1 烧球参数偏小导致偏头球

Fig. 1 Small EFO parameters lead to golf ball

产生尖头球,如图 2 b所示.当电流过大或者时间过长时,金属的熔化量过多,液态球的表面张力作用较重力作用弱,不足以维持规则的球体形态而突出形成尖头状.当电流和时间都很大时,则会形成如图 2 c所示的超大铜球,液态铜球的表面张力已经不能维持较好的圆度而下坠,形球过大会导致键合过程中铜球溢出而引发短路.

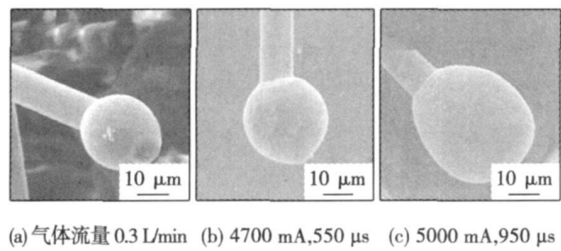


图 2 烧球参数不当导致 FAB 成形不良

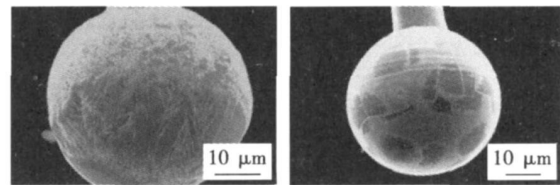
Fig. 2 Inappropriate parameters lead to bad FAB formation

1.2 保护气体流量的影响

为了研究保护气体流速对铜丝 FAB形球的影响,试验选择了 A铜丝在固定烧球电流 4 500 mA和烧球时间 650 μs下,在 0~0.9 L/min范围内逐步调节保护气体流速进行烧球,分析不同流速下形球的质量.

试验发现,尽管保护气体流速不同,由于烧球电流和烧球时间一定,因而获得的铜球的大小一致,基本保持在 40 μm左右.这与之前的结论一致,铜球的尺寸主要由烧球电流和烧球时间决定,保护气体流速并没有影响到铜球尺寸.在没有保护气体(0 L/min)进行防氧化保护的情况下,获得的铜球表面非常粗糙,氧化严重.施加保护气体之后,即使流速很小(0.1 L/min)时铜球表面的氧化程度较无保护气体时减轻许多,如图 3所示.说明保护气体的采用对形球质量的提高显得非常重要.从已被氧化的 FAB中能够清晰的看出铜球表面晶粒分布信息,由于晶界的缺陷较晶粒内部多,晶界能较高,更易发生

氧化,所以氧化后的铜球表面晶界能突显出来.

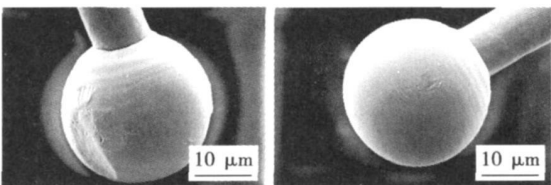


(a) 无保护气体 (b) 气体流量 0.1 L/min

图 3 有无保护气体下的铜球

Fig. 3 Ball in shield gas and no shield gas

随着保护气体流速的增加,铜球表面的粗糙区域和晶界突出部位以及程度逐渐减少,说明铜球的氧化程度逐渐减轻,当保护气体的流速达到 0.6 L/min以上时,对铜球的防氧化效果良好,如图 4所示.可以看出,在保护气体的流速分别为 0.6 0.7 和 0.9 L/min时,由于还原性气体 H₂的含量增加,还原作用突显,形成的铜球表面光滑,晶界氧化现象很轻微,获得的铜球质量较为理想.所以对于 A铜丝,要获得表面未氧化的成形良好的铜球,烧球时保护气体流速应达到 0.6 L/min以上.



(a) 保护气体为 0.6 L/min (b) 保护气体为 0.9 L/min

图 4 铜球表面光滑成形良好

Fig. 4 Cu FAB formation quality is smooth and good

2 铜丝 FAB成形工艺参数优化

影响 FAB质量的主要工艺参数包括烧球电流、烧球时间和保护气体流速.为了分析烧球参数对铜丝 FAB过程的影响,采用 MP软件对烧球电流、烧球时间和保护气体流速进行了试验设计 (design of experiment DOE),以 FAB的直径以及成形质量作为 DOE的目标值,分别对 A B两种铜丝进行了工艺参数优化.

表 1 为经试验分析优化而得出是试验参数设计.试验含烧球电流、烧球时间和保护气体流速 3个影响因素,烧球电流和烧球时间分 5个水平,保护气体流速分 3个水平.

表 1 FAB试验参数设计
Table 1 Design of test parameters

因素	烧球电流 I/A	烧球时间 t/ μ s	保护气体流速 $v/(L \cdot min^{-1})$
水平 1	3 000	500	0.3
水平 2	3 500	625	0.6
水平 3	4 000	750	0.9
水平 4	4 500	875	—
水平 5	5 000	1 000	—

试验结果发现不同的工艺参数条件下可以获得直径相近的铜球, 分别对烧球电流、烧球时间和保护气体流速等参数对铜球直径的影响进行了分析, 发现两种铜丝进行的分析结果相似. 下面就以 A 铜丝为例进行说明.

图 5 为保护气体流速为 0.9 L/min 时, 烧球电流对铜球直径的影响. 图 6 为保护气体流速 0.6 L/min 时烧球时间对铜球直径的影响.

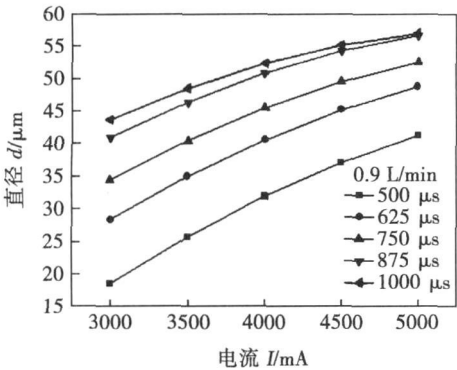


图 5 不同时间下烧球电流对 A 铜球形球直径的影响
Fig. 5 Different impact on diameter of FAB different burning current causes

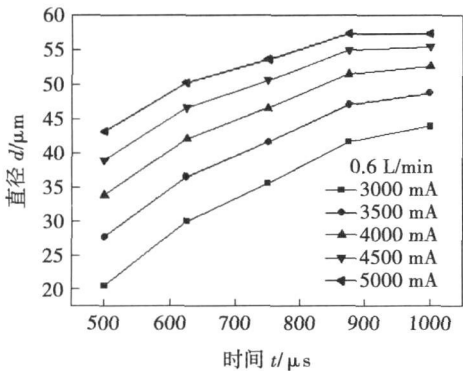


图 6 不同电流下烧球时间对 A 铜球形球直径的影响
Fig. 6 Different impact on diameter of FAB different burning time causes

加而增长, 增长的速率呈逐渐减小的趋势. 同样, 铜球的直径都随着烧球时间的延长而增加, 增加的速率随时间延长而逐渐减慢. 即相比电流较小、时间较短的情况, 在烧球电流较大和烧球时间较长时铜球直径的变化速率放缓. 而当烧球电流和烧球时间都较大时, 铜丝的直径趋于稳定值, 说明当烧球电流和烧球时间足够大时, 铜丝所获得的能量趋于稳定, 铜丝的熔化量变化较小.

FAB是铜丝在与打火杆之间的高电压放电条件下端部受热迅速熔化, 在重力和表面张力作用下极短时间内在铜丝下端凝固而形成. 一般认为, FAB的直径主要取决于电火花放电所输入的能量和金属热传导、对流耗散以及金属表面辐射综合作用下参与铜丝熔化的那部分能量. 在一定的放电时间(烧球时间)下, 放电电流(烧球电流)越大, 铜球获得的能量越多, 则铜丝端部的熔化量越多, 凝固之后的铜球的直径越大. 同理, 在一定的放电电流(烧球电流)下, 放电的时间(烧球时间)越长, 铜丝获得的能量越多因而熔化量越多, 最后获得的铜球直径越大. 所以烧球电流和烧球时间对铜球直径有直接的显著影响.

试验发现, N₂/H₂ 混合保护气体对铜球尺寸有一定的影响, 随着保护气体流速的增大, 铜球的直径略有减小, 这是由于气体对流耗散的热量随着气体流速的增加而增加所致, 但这种影响并不明显.

3 铜球组织分析

烧球过程中铜丝将在数毫秒内经历熔化、成球、重结晶的过程. 铜球冷却凝固过程中热量主要以热传导方式散发出去, 凝固过程从铜球与铜丝的结合处开始并向铜球底部方向延伸, 受热流方向的影响, 柱状晶粒也从热影响区向铜球底部方向生长. 与铜球相连的铜丝热影响区内经历发生重结晶, 晶粒尺寸增大.

从平行于铜丝的轴向剖面来看, 成形良好的铜球由几个粗大的柱状晶组成, 柱状晶生长的方向与铜丝轴线方向大致平行, 如图 7^a所示. 由于铜丝热传导散热的原因, 铜球在丝球结合处率先凝固结晶, 多个晶粒同时生长, 而丝球结合处较窄, 所以单个晶粒尺寸在靠近丝球结合处较小. 随着凝固过程向铜球中心推进, 由于铜球尺寸变大, 晶粒具有了更多的空间长大, 故晶粒的尺寸也变大, 于是晶粒的晶界形成了以丝球结合处为起点的呈放射状分布. 图 7^b为图 7^a中 Ⅱ区放大图像, 从中可看出相邻晶粒具有不同的晶粒指向, 即不同的晶粒生长时的取向存在

从图中可见, 铜球的直径都随着烧球电流的增

差异.

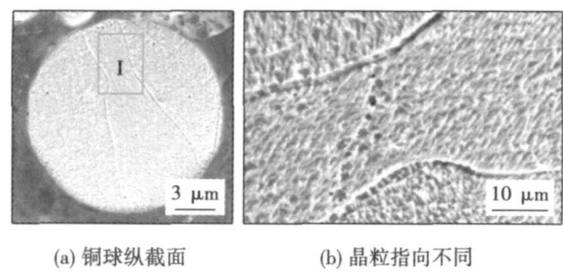


图 7 铜球内部晶粒分布
Fig 7 Crystallite distribution in copper ball

图 8 为铜球内部组织 SEM 图像. 该铜球大致分为 I, II, III 三个区域, 其中 II 为铜丝与铜球的结合区域, 烧球时未熔化, 保持原来的晶粒分布; III 和 IV 都是铜球内部晶粒, 晶粒的晶界类似于过烧后重新凝固的形态, 实际是由于晶界区域缺陷密度以及杂质浓度较高, 率先被腐蚀所致. 由同一晶粒中心与晶界腐蚀的形态不同可以看出, 铜球内部晶粒的生长过程分为两个阶段, 初期以树枝状方式生长, 后期以胞状晶的形式进行. 铜丝烧球时一个局部快速熔化并快速冷却的过程, 铜球内部温度将随着时间和空间位置变化而剧烈变化. 当铜球开始冷却凝固时, 由于固液界面处的温度梯度较大, 晶粒形核或者依附丝球结合处未熔化的金属结晶, 由于铜丝散热快, 导致固液线前端的液态金属过冷度较大, 晶体以树枝状方式长大, 在生长过程中, 由于树枝状骨架周围液相富集溶质, 使结晶温度降低, 过冷度降低, 同时由于结晶放出的潜热抵消一部分散热, 进一步降低过冷度, 从而使分枝生长减慢并最终停止, 而延一次晶轴以胞状形式继续生长, 直至结晶完成. 从而

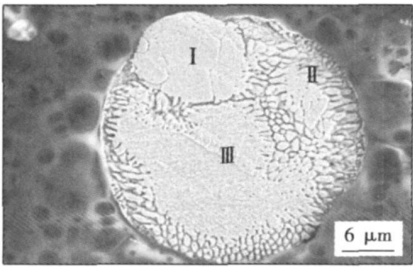


图 8 铜球内部晶粒包晶
Fig 8 Perfects in grains of copper ball

使晶粒形核并初期生长的区域形成杂质浓度很低且较致密较耐腐蚀, 而后期生长的区域杂质浓度较高耐腐蚀性差, 而胞状晶的取向也就是晶粒的指向.

4 结 论

(1) 烧球时铜球的直径主要由烧球电流和烧球时间决定, 随着电流和时间的增加, 铜球直径增大. 保护气流速对直径影响甚微, 但直接影响到铜球的成形质量.

(2) 当烧球能量不足, 即烧球时间较短或者电流较小时产生偏头球趋势较大. 当防氧化效果不好以及烧球参数过大时, 容易产生尖头球.

(3) 保护气体流速对铜球成形的影响主要表现在防氧化方面. 随着保护气体流速的增大, 铜球表面的氧化程度逐渐减小. 当保护气体流速达到 0.6 L/min 时, 能获得表面光滑成形良好的铜球.

(4) 铜球内部晶粒的生长过程分为两个阶段, 初期以树枝状方式生长以及后期以胞状晶的形式进行. 凝固初期由于固液界面前方的液相过冷度大, 晶体以树枝状方式长大, 随着周围液相中溶质的富集以及结晶潜热的释放, 过冷度减小, 枝晶停止生长, 但以胞状晶的方式进行长大.

参考文献:

[1] Qin J, Cohen IM, Ayyaswamy P S. Ball size and HAZ as functions of EFO parameters for gold bonding wire [J]. Advances in Electronic Packaging, 1997, 19(1): 391—398

[2] Chen J L, Lin Y C. A new approach in free air ball formation process parameters analysis [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2000, 23(2): 116—122

[3] Tan J, Toh B H, Ho H M. Modelling of free air ball for copper wire bonding [C] // Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, 2004, 711—717.

[4] Ellis T W, Levine L, Wiczen R, et al. Copper ball bonding: an evolving process technology [C] // In: Proceedings of SEMICON Conference, Singapore, 2000, 44—48

[5] Zhong Z W, Ho H M, Tan Y C, et al. Study of factors affecting the hardness of ball bonds in copper wire bonding [J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84: 368—384.

作者简介: 田艳红, 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 主要从事微电子封装与组装中的先进互连技术及无铅钎料与无铅焊研究. 发表论文 50 余篇. Email: tianyh@hit.edu.cn

ing distance is 1 mm and then decrease with the further increasing of defocusing distance. With the decreasing of welding speed, weld width, weld depth and weld cross sectional area would increase, while heat transfer efficiency would decrease.

Key words: laser/TIG hybrid welding; weld geometry; welding parameters; stainless steel

Microstructures and corrosion Properties of submerged arc welded joint for X80 Pipeline steel ZHOU Xianjiang¹, LI Huirong, HUA Xiaozhen², YE Zhiqiao² (1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Materials Science and Engineering School, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China). P 37—40, 80

Abstract: The X80 Pipeline steel was welded using the submerged arc welding procedure. The microstructure of the welded joint was observed by scanning electron microscope (SEM), the corrosion behavior of the welded joint of X80 Pipeline steel was investigated by method of potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results show that the welded joint has good pitting corrosion resistance generally. However, in solution of 0.5 mol/L NaHCO_3 + 0.02 mol/L NaCl , the base metal of X80 Pipeline steel showed the best resistance to pitting corrosion because of the differences in microstructure. Though it can keep the same level as the base metal at first, the pitting corrosion resistance of weld metal will get worse after longtime immersion. The pitting corrosion resistance of heat affected zone was always the worst and had a large gap with the base metal and weld metal.

Key words: X80 Pipeline steel; welded joint; microstructure; corrosion resistance

Optimization on Parameters of electronic flame off process of ball bonds with fine diameter copper wire TIAN Yanhong, YANG Dongsheng, WANG Chunqing (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). P 41—44

Abstract: The parameters of ERO (electronic flame off) process of ball bonds with fine diameter 20 μm copper wire during copper wire bonding were optimized. The results showed that ERO current and time had more effects on ball forming condition in different parameters process. As the ERO parameters increased, the diameter of FAB (free air ball) became larger. The flow of shield gas, whose impact on FAB size was not obvious, played an important role on preventing FAB oxidation and Cu FAB formation quality. Shield gas flow would reach a certain value in order to form a smooth surface without oxidation copper ball. The Cu FAB is composed by a few big columnar grains. There are two different regions in the same grain. The copper ball grain growth process is divided into two periods: the initial with dendrite growth, as well as the late approach to cellular crystal form.

Key words: ERO time; ERO current; parameter optimization

Welding characteristics of laser penetration welding brazed Mg/steel dissimilar alloys MIAO Yugang, HAN Duanfeng

YAO Jingzheng, WANG Qing (College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China). P 45—48

Abstract: The experiments of laser penetration welding brazed formagnesium alloy and steel were carried out with AZ31 magnesium alloy and Q235 steel as base metals, achieving a hybrid joint of welding and brazing. The microstructure and mechanical properties of butt joints were investigated by optical microscopy, scanning electron microscope and tensile testing. At the upper part of the joint, there is little melting or dissolving of steel due to high interface temperature. At the lower part of the joint, there is no indication of melted steel, the molten magnesium alloy as filler metal to form a successful joint of Mg/Fe dissimilar alloys by wetting and spreading. In particular, at 0.6 mm laser offset, the average tensile strength could reach a maximum of 182 MPa, about 81% that of AZ31 Mg alloy. The fluctuation of tensile strength was the lowest in all laser offsets.

Key words: laser penetration brazing; dissimilar alloys; microstructure; mechanical property

Effect of heat input of root layer on thermal circle of 10CM910 steel LI Haijiao, CHEN Furong, HU Yanhua, XIE Ruijun (College of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China). P 49—51

Abstract: With welding heat cycle system, the temperature signal of root layer at welded joint of 10CM910 heat resistant steel was collected under the two different welding input. Through comparing curve and parameters of welding thermal cycle under the condition of two different heat input, the effect of heat input on thermal cycle of root layer for 10CM910 heat resistant steel was discussed together with observation of microstructure and hardness testing. The results showed that heat input of 10CM910 heat resistant steel had great impact on thermal cycle; the parameters of thermal cycle such as peak temperature and $t_{8/5}$ are low under low heat input, the microstructure at room temperature was finer and hardness values was higher; the higher the higher heat input, the microstructure at room temperature was coarser and hardness values was lower.

Key words: heat input; welding thermal circle; 10CM910 heat resistant steel; weld metal

Simulation of welding shape process in P-GMAW based on neural network models YAN Zhong, ZHANG Guangjun, WU Lirong, SONG Yongjun (1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). P 52—56

Abstract: As one of efficient and good adaptability welding methods, pulsed gas metal arc welding (P-GMAW) has been applied in industrial production widely. In this paper, the modeling and simulation methods in P-GMAW shape process of low carbon steel were studied. Firstly, a series of BP neural network dynamic models were established for P-GMAW shape process; then stable state and dynamic simulations were implemented with