

真空汽相焊冷却速率对多层板焊点质量的影响

吴彬勇 李婧 邱静萍 李少聪 张绍东

(上海航天电子有限公司, 上海 201821)

文 摘 为解决多层印制板真空汽相焊由于焊后冷却不足导致的焊点纹路问题,本文确定多层板焊点纹路出现的根本原因,对焊后冷却区进行改造,进而研究不同焊接工艺对焊点表面形貌、内部组织形貌及焊点力学性能的影响。实验结果表明,快冷下焊点形成的界面金属化合物(IMC)更薄,焊点组织也更加均匀,即Pb在Sn中的分布更弥散。快冷下形成的IMC层晶粒直径在1 μm左右,剪切强度为17.26 MPa,较慢冷提高了43%,达到细晶强化的目的。此外,由于冷却速度过慢导致的焊点表面纹路缺陷也得到明显改善。

关键词 冷却速率,多层板,焊点纹路,真空汽相焊

中图分类号:TN305.94

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.06.014

Effect of Cooling Rate of Vacuum Vapor Phase Welding on Solder Joint Quality of Multilayer Printed Circuit Board

WU Binyong LI Jing QIU Jingping LI Shaocong ZHANG Shaodong

(Shanghai Aerospace Electronics Co. Ltd., Shanghai 201821)

Abstract In order to address the issue of solder joint lines resulted from inadequate post-welding cooling in vacuum vapor phase welding of multi-layer printed boards, this study identified the underlying cause of solder joint lines in multi-layer boards and enhanced the post-welding cooling zone, enabling disclosure of the effects of different welding processes on surface morphology, internal structure morphology, and mechanical properties of solder joints. Experimental findings demonstrated that fast cooling led to thinner interfacial metal compound (IMC) within solder joints and a more uniform distribution of Pb in Sn. The grain diameter of IMC layer formed under fast cooling was approximately 1 μm, while shear strength reached 17.26 MPa—an increase by 43% compared to slow cooling rate—thus achieving fine crystal strengthening objectives. Furthermore, significant improvements have been observed in surface quality by fast cooling reducing solder joint lines.

Key words Cooling rate, Multilayer PCB, Solder joint grain, Vacuum vapor phase welding

0 引言

伴随航天电子产品高集成度和小型化的趋势以及表面组装技术的进步,印刷板(PCB, printed circuit board)单位面积集成的电子元器件越来越多,这使得多层厚铜印制板的需求逐年提高^[1]。一方面,高速电路设计高密度的要求使PCB的层数越来越多。PCB的设计层数由10层以内逐步向20层转变,其内部分布有信号层、地层和电源层,层间通过导通孔(PTH, plated through hole)进行互连^[2]。另一方面,高端通信设备测量精度及数据处理能力的提高导致其工作

电流大幅增加,使得多层PCB多采用厚铜设计,以满足大电流传导和散热的需求^[3]。

跳扩频技术在空间电磁环境和国家间军事对抗日益严峻的背景下产生,其基带单板多为多层PCB,能实现抗干扰功能和更高的测距精度^[4]。多层PCB虽然带来了集成度的大幅提高,但是给制造和装联工艺带来了极大的挑战。对于电子装联,由于多层PCB上的器件复杂多样,焊接温度要求差异大,使得焊接工艺的制定难度高。在焊接过程中,既要考虑到塑封器件的耐温强度,又要兼顾大尺寸器件和无

收稿日期:2022-07-09

第一作者简介:吴彬勇,1995年出生,硕士,主要从事电子装联工艺研究。E-mail:byongwu@163.com

铅器件高焊接温度的要求。此外,多层PCB大量的布线层及大尺寸器件导致其热容极大,在焊接时吸收大量的热量会导致焊接温度不足,引发虚焊,故多层板的焊接温度一般设置较高。

真空汽相焊由于较好的温度均匀性被广泛应用在复杂单板的焊接过程中^[5],但实际生产中多层印制板在经过常规真空汽相焊接后,焊点大概率出现纹路。目前针对焊点纹路的研究缺乏,可查阅到的参考极少。本文通过分析论证,确定多层板焊点纹路出现的根本原因;根据原因对真空汽相焊设备进行改造,研究不同焊接工艺对焊点表面形貌及内部组织形貌的影响,并对焊点进行力学测试;通过焊接设备的改造和焊接工艺的设计研究解决了多层板焊接难、焊点易出现纹路缺陷的问题。

1 问题提出及要因确定

1.1 问题提出

本厂生产的单板为20层基带板,厚度为2.8 mm;单板A面主要为表贴阻容等普通器件;B面有3D-plus的球栅阵列(BGA)封装器件2个、柱栅阵列(CCGA)封装器件5个。经分析,A面均为普通元器件,采用再流焊焊接方式即可;B面BGA、CCGA较多,为保证热量均匀,焊接可靠,决定采用真空汽相焊进行焊接。B面焊接时,为使CCGA中间焊盘峰值温度达到 $(220\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 并兼顾3D-plus器件的耐温 215°C 的要求,决定在3D-plus器件上方罩隔热工装。通过改变汽相焊参数,对多层板B面焊接温度曲线进行测定,真空汽相焊具体参数设置见表1。热电偶测得各器件温度曲线基本符合有铅焊接内控值,决定作为最终的焊接工艺。

多层板用上述制定的工艺方案进行焊接,A面11温区回流焊接后经检查焊点质量良好。在B面真

表1 真空汽相焊参数设置

Tab. 1 Vacuum vapor phase welding parameter setting

阶段	抽真空 /10 ⁴ Pa	抽真空 时间/s	汽相液注入量 /mL	汽相液注入时间 /s
1	6	预真空保持	20	30
2	6	10	200	20
3	6	30	480	40
4	6	0	400	30
5	8	0	400	30
6	6	2	-	-

空汽相焊后发现A面大部分表贴器件二次融熔焊点表面不光滑,出现不同程度的纹路现象(图1)。同时印制板B面表贴阻容也发现了轻微的纹路。

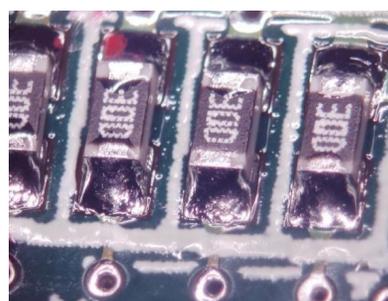


图1 多层板A面二次熔融后部分焊点形貌

Fig. 1 Partial welding spot morphology after secondary melting of multilayer plate

1.2 要因确认

本文对导致多层板真空汽相焊接后焊点出现纹路的主要问题展开多次分析和讨论,运用“5M1E”方法寻找问题产生的原因。根据现场跟产及重复实验论证,纹路问题产生的原因可能主要由于扰动,焊接峰值温度及焊后冷速的问题导致。扰动的因素经过充分论证被排除,而降低焊接峰值温度纹路有所改善,具体论证内容及结果见表2。

表2 焊点纹路的影响因素论证

Tab. 2 Validation of the influencing factors of solder joint pattern

序号	验证内容	方案	纹路现象
1	验证汽相液杂质对焊点形貌的影响	1、检查汽相液的纯净度和过滤方式 2、不更换汽相液的情况下跟踪其他单板焊点表面形貌	无改善
2	验证汽相液扰动对焊点形貌的影响	1、底部贴红胶固定器件进行真空汽相焊接 2、器件上方罩罩壳进行真空汽相焊接 3、B面器件换成热风回流焊进行焊接	无改善
3	验证导槽扰动对焊点形貌的影响	1、对真空汽相焊焊接好的器件进行随炉冷却 2、跟踪另一台单板进行确认	无改善
4	验证峰值温度过高对焊点形貌的影响	降低峰值焊接温度	减少

与先前的产品不同,此次焊接的基带板为20层印制板,其热容极大且排布的大尺寸芯片也导致吸热严重。在产品实际生产过程中,为保证CCGA等大热容芯片底部中心焊锡能充分熔融,无法降低焊接

温度。问题板热容大,焊接温度过高在一定程度上等效于降低了焊后冷却速率,产品实测多层板焊后的冷却速率只有 $1.3^{\circ}\text{C}/\text{s}$,远低于常规回流焊 $4^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的焊后冷却速率。本文将冷却速度确定为多层板焊点

纹路问题产生的主要原因并进行研究。

2 试验

2.1 方法

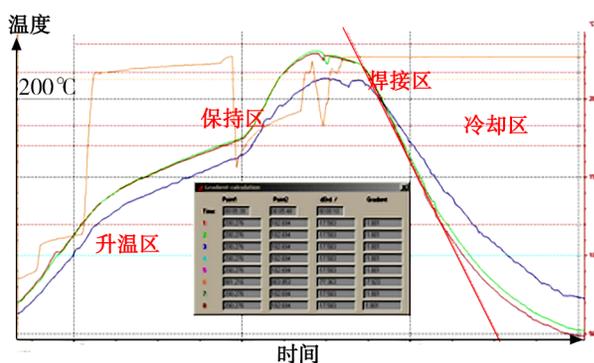
本文考虑通过增加冷速来避免多层板焊点纹路的产生,对现有真空汽相焊设备进行改造,增加冷却区底部氮气吹风装置(图2)。原本的真空汽相焊冷却区只有上出风口,对于多层大热容印制板(尤其是A面)的冷却效果不佳。本文在装载印制板的导槽下部安装出风口,利用电装车间现场的氮气作为气源,使得焊接后的印制板在拉出炉体时可进行双面冷却。

选取两块多层板进行焊点纹路验证试验,板1从炉内拉出后只进行上吹风,板2从炉内拉出后上下均

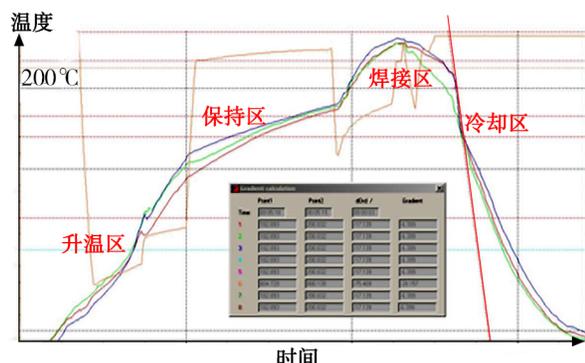


图2 改造后的真空汽相焊冷却区

吹风。两块板上粘贴热电偶,用真空汽相焊设备的测试模式测试焊点表面实际的冷却速度,测试出两块验证板的工艺曲线如图3所示。



(a) 单面吹风



(b) 双面吹风

图3 不同吹风模式下多层板的焊接工艺曲线

Fig. 3 Welding process curves of multilayer plate under different cooling modes

由图3可以看出两块板的焊接峰值温度相同但是冷却速率差异极大。对200~183℃冷却速率进行了测定,结果表明对多层印制板B面吹氮气(气流压强:0.35 MPa),冷速由原来的1.8℃/s升至6.3℃/s。

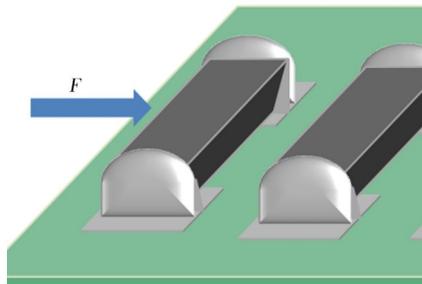
2.2 测试

采用2.1节确定的实验方法进行试验后,对不同冷速下的焊点进行分析观察分析。用三维视频显微镜(KH-7700,日本浩视)对焊点表面进行观察;用场发射扫描电子显微镜(SU8100,日本日立)对焊点表面的微观形貌进行观察;对样品1和样品2的表面镀Pt 30 s,使用15 kV加速电压对焊点表面进行放大观察。根据IPC-TM-650 2.2.1F测试方法手册对焊点进行切片分析^[6]。样品经切割、冷镶、抛光和微蚀处理后,用场发射扫描电子显微镜对焊点IMC层截面的微观形貌进行观察。根据GB/T 17359—2012,用能谱仪对合金层进行成分分析^[7]。将焊点机械剥离后,用场发射扫描电子显微镜对IMC层表面的微观形貌进行观察,方法同上。用推拉力计(SPH-500,上海思为仪器制造有限公司)对焊点的剪切力进行表征。根据实际可能受力的情况,推拉力计的力从侧

面施加,测试焊点推断时的峰值剪切力,测试仪器及力的作用方向如下图4所示。



(a) 测试方法及仪器



(b) 剪切力作用方向

图4 剪切力测试仪器及力的作用方向示意图

Fig. 4 Shear force testing instrument and applied force direction

3 结果与讨论

3.1 焊点表现形貌

不同冷速冷却后对两块板的焊点表面宏观形貌进行观察,焊点表面的光学图像如图5所示。慢冷下板1的焊点表面粗糙[图5(a)],有明显纹路。快冷下板2的焊点表面光亮[图5(b)],无纹路。经分析,慢冷条件下焊点纹路缺陷应为焊点冷却时的不均匀凝固现象造成的:多层印制板焊接温度高、热容大,在冷却时源源不断地向焊点传导热量,使焊点不能在同一时间凝固,最终导致表面粗糙,有纹路。对比试验证明了增加冷却速度对于多层板真空汽相焊焊点纹路缺陷改善的可行性。焊后快冷形成的焊点宏观形貌符合检验要求,但改造后的设备考虑用于实际生产,还需进一步验证焊点可靠性。

对两块验证板焊点的表面进行扫描电镜(SEM)

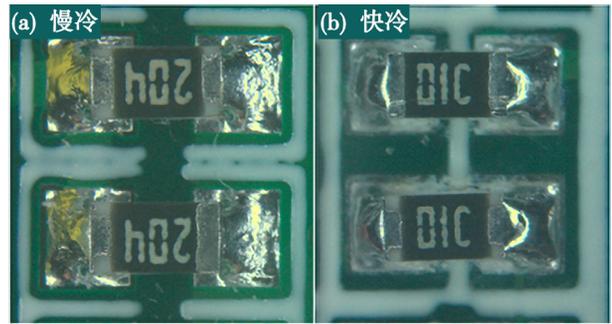


图5 不同冷却条件下的焊点表面形貌
Fig. 5 Surface morphology of solder joints under different cooling conditions

观察,如图6所示。不同冷却条件下的焊点均形成由富铅(Pb)相(浅色区域)和富锡(Sn)相(深色区域)组成的亚共晶组织。比较图6(a)(c)相同放大倍数下图像可知:快冷细化了焊点本体的内部组织,使得Pb在Sn中的分布更为弥散。

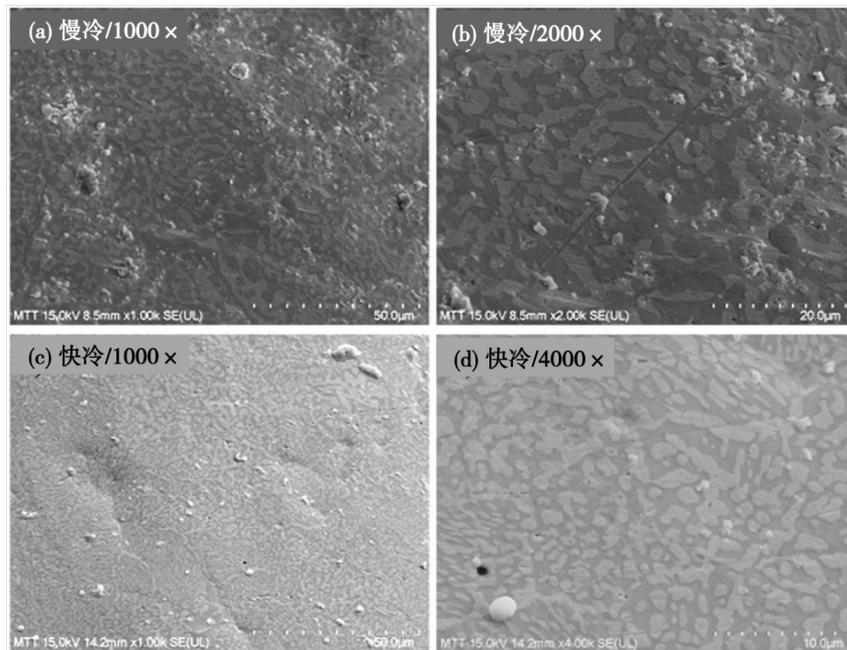


图6 不同冷却条件及放大倍数下的焊点SEM图像

Fig. 6 SEM images of solder joints under different cooling conditions and different magnification

3.2 IMC层截面形貌

选取两块验证板按2.2所述方法进行处理,对界面金属化合物层截面形貌进行观察分析。如图7所示,慢冷和快冷下IMC层形貌均呈连续的扇贝状。同时,对两者IMC层的元素进行分析,根据其原子比推断,IMC的成分主要为 Cu_6Sn_5 ,如图8所示。用软件对IMC层的厚度进行测量,慢冷情况下IMC层的平均厚度为 $2.82 \mu m$,快冷情况下IMC层的平均厚度为 $2.51 \mu m$ 。在钎焊过程中,Cu的消耗量由式(1)表述^[8]:

$$\Delta h = A \exp\left(\frac{-Q}{KT}\right) t^n \quad (1)$$

式中, Δh 为Cu的消耗量; Q 为扩散激活能; K 为玻尔兹曼常数; T 为焊接温度; t 为焊接时间; A 和 n 为常量。根据式(1)可得铜的消耗量与焊接温度和焊接时间成正比,更高的焊接温度会使Cu更多地向钎料中溶解,导致界面层中铜的富集,从而使IMC的厚度增加。本次试验中,慢冷和快冷条件下的焊接温度一定,但更慢的冷却速度间接使得焊接时间延长,所以慢冷下生成的IMC层应更厚。根据研究表明,IMC层本身的强度并不高,在钎焊过程中,IMC的厚度越薄对焊点抗疲劳强度的提高越有利^[9]。

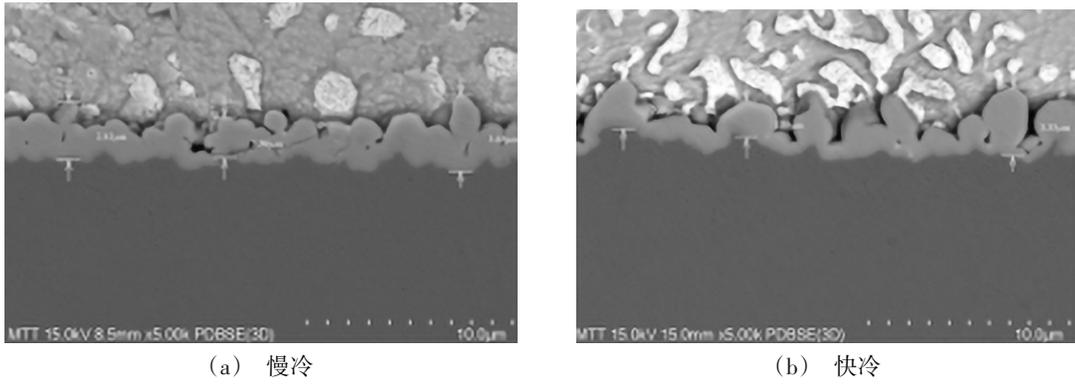


图7 不同冷却条件下IMC层截面的SEM图

Fig. 7 SEM images of cross-section of IMC layer under different cooling rates

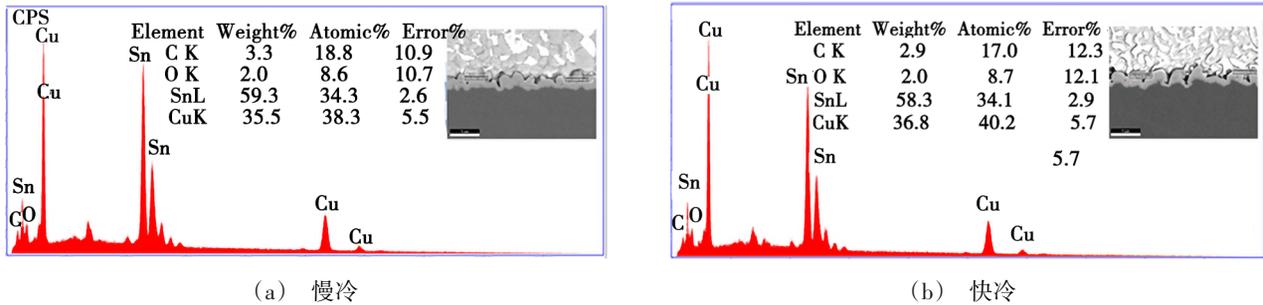


图8 不同冷却速率下的IMC层截面成分分析

Fig. 8 Component analysis of cross-section of IMC layer under different cooling rates

3.3 IMC层剥离面形貌

选取两块验证板按2.2所述方法进行处理,对IMC层剥离面进行观察分析。如图9所示,IMC层剥离面主要由Cu和Sn组成,没有检测到Pb元素。此外,元素分析结果中Cu元素含量较高,证明断裂发生在IMC层,且靠近焊盘的一侧。图10(a)(b)分别为慢冷和快冷条件IMC层剥离面的SEM图像。在慢冷条件下,IMC层的晶粒粗大,单个晶粒尺寸在5 μm左右;在快冷条件下,IMC层的晶粒细小,单个晶粒尺寸在1 μm左右。晶粒越细,阻碍滑移的晶界越多,屈服极限也就越高。细小晶粒对焊点强度的提高,可以用霍尔-佩奇公式来解释^[10]:

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, σ_s 为材料屈服强度; σ_0 为单位晶格摩擦阻力; d 为晶粒平均直径; k 为与材料性质及晶粒尺寸相关的常数。由式(2)可知材料屈服强度和晶粒尺寸成反比,所以快冷下生成的细小晶粒更有利于焊点强度的提高。

慢冷条件下,IMC晶粒表面还生成了众多细小薄片状的新晶粒,如图10(a)所示。薄片状的物质在焊点中(尤其是界面层)是不利的,其极易容易成为裂

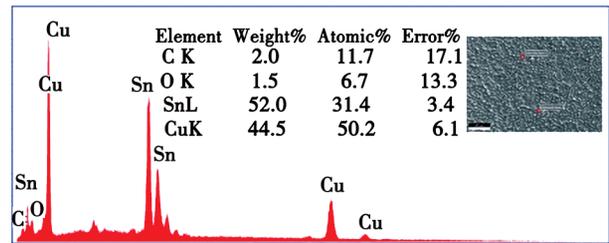
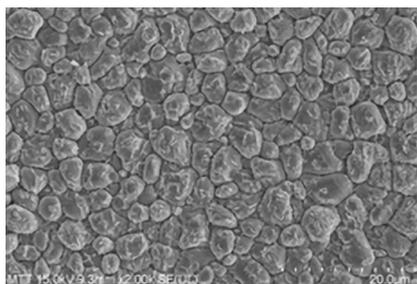


图9 IMC层剥离面表面元素分析

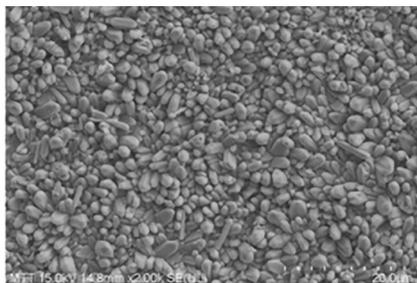
Fig. 9 Surface element analysis of stripping surface of IMC layer

纹扩展源。在外力作用下,裂纹很容易沿着薄片与焊料的结合面方向扩展,在后续的循环应力下甚至导致焊点的整体失效。

为验证不同冷速下的焊点结合强度,按2.2所述方法对焊点的剪切力进行测试。在板1和板2上各随机选取3个0603电阻焊点进行测试,剪切力的测试结果见表3。试验结果表明,慢冷条件下焊点的剪切力平均值为26.5 N,快冷条件下焊点的剪切力平均值为37.97 N。0603电阻焊盘总面积为2.2 mm²,计算可得慢冷下焊点的平均剪切强度为12.05 MPa,快冷下焊点的平均剪切强度为17.26 MPa。快冷使得焊点的强度提高了43%,与上述快冷导致焊点微观形貌细化达到细晶强化目的结论一致。



(a) 慢冷



(b) 快冷

图10 不同冷却速率下的IMC层剥离面SEM图

Fig. 10 SEM images of stripping surface of IMC layer under different cooling rate

表3 不同冷速条件下焊点的剪切力

Tab. 3 Shear force of solder joints at different cooling rates

样品	剪切力/N				标准差 /N
	焊点1	焊点2	焊点3	平均	
慢冷板	25.6	28	25.9	26.5	1.31
快冷板	38.2	39.7	36	37.97	1.86

5 结论

多层印制板由于热容大、焊接峰值温度高等综合因素导致焊后冷却效果不佳,从而使得焊点表面出现不规则纹路。本文对设备的冷却区进行改造,使得20层板的焊后冷却速率从 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 提高到 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,改善了由于不均匀冷却导致的多层板焊点出现纹路的现象。实验结果表明:

(1)大冷速下形成的焊点组织更加均匀,Pb在Sn中的分布更弥散;

(2)在钎料和焊盘的界面,快冷和慢冷均形成连续的扇贝状 Cu_6Sn_5 化合物层且快冷形成的IMC层更薄;

(3)快冷使得晶粒细化,快冷下形成IMC层晶粒直径在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右;

(4)快冷使得焊点的剪切强度显著提高,快冷下0603电阻焊点的剪切强度为 17.26 MPa ,较慢冷提高了43%,达到细晶强化的目的。

本文对现今广泛应用的多层大热容印制板的可靠焊接有极强的参考价值 and 借鉴意义,值得推广。

参考文献

[1] 樊融融. 现代电子装联工艺可靠性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 196-197.

FAN R R. Reliability of modern electronic assembly process [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 196-197.

[2] 鲜飞. 芯片封装技术的发展历程[J]. 印制电路信息, 2009(6): 65-69.

XIAN F. Development of chip packaging technology [J]. Printed Circuit Information, 2009(6): 65-69.

[3] 高尚通, 杨克武. 新型微电子封装技术[J]. 电子与封装, 2004, 4(1): 10-15.

GAO S T, YANG K W. New microelectronic packaging technology[J]. Electronics and Packaging, 2004, 4(1): 10-15.

[4] DAVID L A. EW103: Tactical battlefield communications electronic warfare [J]. Artech House InC, 2009: 190-191.

[5] 陈柳, 郁佳萍, 张绍东, 等. 射频功率模块低空洞真空汽相焊接技术[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(4): 4.

CHEN L, YU J P, ZHANG S D, et al. Low hollow vacuum vapor phase welding technology of RF power module [J]. Electronic Process Technology, 2020, 41(4): 4.

[6] IPC-TM-650-2019, Test methods manual[S].

[7] GB/T 17359-2012, 微束分析 能谱法定量分析[S].

GB/T 17359-2012, Microbeam analysis quantitative analysis by energy spectrum [S].

[8] 徐波. 无铅回流焊冷却速率对焊点质量的影响[D]. 哈尔滨工业大学, 2006.

XU B. Effect of cooling rate on solder joint quality in lead-free reflow welding[D]. Harbin Institute of Technology, 2006.

[9] 南旭惊, 刘晓艳, 陈雷达, 等. 温度循环对CCGA焊柱可靠性影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(2): 81-85.

NAN X J, LIU X Y, CHEN L D, et al. Effect of temperature cycling on reliability of CCGA welding column [J]. Journal of welding, 2021, 42(2): 81-85.

[10] KIM H K, TU K N. Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic SnPb alloy and Cu accompanied by ripening [J]. Physical Review B. Condensed Matter, 1996, 53(23): 16027.