

减少球窝缺陷的锡铅和无铅焊膏的研究与开发

美国,加利福尼亚州,圣安娜,Christopher Associates 公司:Jasbir Bath,Roberto Garcia

日本,东京,KoKi 焊料公司:Noriyoshi Uchida, Hajime Takahashi,Gordon Clark,Manabu Itoh

摘要:

近几年来,元件焊接的球窝缺陷发生率一直在上升。这一缺陷在各种基板上都有发生,包括消费类、电讯和军用产品等。产生这一缺陷有许多原因,如元件或基板的翘曲,BGA/CSP 元件焊球的非共面性,以及元件涂层的污染或过度氧化引起的非润湿等。已经发现,这一缺陷不仅发生在无铅焊接组件上,因为焊接温度的提高会带来元件/基板翘曲问题的上升,也发生在锡铅焊接的组件上。

为了减少这一缺陷,开发了一组锡铅和无铅焊膏,这些焊膏的焊剂配方具有较高的耐热性,不会很快丢失它们的焊剂活性,并可快速润湿,这有助于减少球窝缺陷。本文给出了对这些焊膏的评价结果,并探讨了引起球窝缺陷的其它原因,以及对行业标准的评估。

关键词:

无铅;锡铅;球窝;翘曲

引言

球窝 (heed-in-pillon) 焊接缺陷的发生是再流焊期间 BGA/CSP 元件焊球与熔融焊料不完全融合的结果(图 1)。引起这一缺陷的典型情况如下:

1) 在再流焊的预热和保温阶段,BGA/CSP 焊球和焊剂被氧化。

2) 在再流焊的开始阶段,焊膏开始熔化,焊剂的性能遭到削弱,使得 BGA/CSP 焊球和再流焊焊膏与焊球之间的间隙进一步氧化。

3) 随着焊料的熔化,焊剂被耗尽。

4) 在再流焊峰值温度阶段,BGA/CSP 焊球表面的氧化膜与再流焊焊膏没有融合,这时的焊剂层几乎没有活性。

5) 再加上冷却前液化温度以上的时间是有限的,便引起了球窝缺陷。

再流焊期间,BGA/CSP 焊球与焊膏分离的一些原因涉及元件封装的翘曲和 BGA/CSP 焊球尺寸的不一致性,无铅焊接期间,由于较高的无铅焊接温度,元件翘曲的问

题尤其严重。不合适的温度曲线如果导致元件/PCB 过度翘曲也会引起球窝缺陷。再流焊期间,由于润湿力的作用,也会有一些 BGA/CSP 焊球从焊膏中被提起的现象。

Vaccaro 等人的研究表明,大元件的翘曲部分地是由于潮湿引起和较高的无铅焊接峰值温度引起。这意味着即使元件根据 IPC/ JEDEC-J-STD-020 具有合格的湿敏等级(MSL)适用于无铅焊接,在生产中由于过度的元件翘曲仍会带来问题。对于 37.5 mm 的方形元件,芯片尺寸从 5 mm×5 mm 增大到 11 mm×11 mm,由于来自较大尺寸芯片的额外加劲,会有助于无铅再流焊期间元件翘曲的减小。

Lathrop 的研究也表明,影响 BGA 共面性的主要因素之一是由于底部填充和封装包覆成型操作引起的元件积层的翘曲。Lin 等人使用影栅云纹技术对 PoP(Package on Package)封装进行了研究,以了解无铅再流焊组装期间封装翘曲的影响,从 25 °C 到 260 °C,然后再返回到 25 °C。影响翘曲的各种因素包括芯片尺寸、模塑封料厚度和模塑封料 CTE(热膨胀系数)、基板材料、厚度和铜层比率,对它们进行优化可减小元件封装的翘曲。

这一缺陷在检测和功能测试期间,通常很难探测到。在再流焊焊膏和焊料球之间有部分接触,但没有真正的冶金结合。这样当元件在工作现场受到机械或热应力时,



图 1 球窝焊接缺陷

球窝缺陷会导致失效。

球窝焊接触缺陷也被发现是在再流焊期间横跨 BGA 元件的大温度梯度 (ΔT) 的结果, ΔT 引起元件上焊球与焊膏的融合不一致。影栅云纹技术也被用于了解再流焊期间元件的翘曲。模拟再流焊炉生产的温度曲线, 调节影栅云纹测试设备中所使用的再流焊温度曲线。再流焊期间元件的翘曲会引起球窝缺陷; 因此在元件设计期间, 元件供应商就了解和控制元件在再流焊期间的翘曲/共面性性能是很重要的, 可防止在生产中出现的问题。

基于这一问题, 开发了有助于

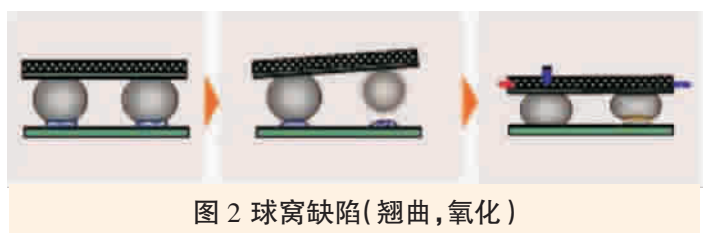


图 2 球窝缺陷(翘曲, 氧化)

减小这一影响的锡铅和无铅焊膏, 并进行了实验。根据讨论, 球窝缺陷的一些形成过程如下:

① BGA/CSP 焊球尺寸不一致或焊球和焊膏融合的时间延迟引起再流焊期间焊球与焊膏的分离。

② 由于彼此的离开, 焊膏和焊料球被氧化。

③ 随着再流焊的进行, 焊球开始回落进入焊膏中。

④ 焊膏和焊球后退形成接触。

⑤ 但焊球和焊膏表面的氧化物阻碍了它们的完全融合, 形成缺陷。

根据这些过程, 开发的锡铅和无铅焊膏在再流焊/冷却期间仍保持高活性, 这将有助于消除氧化膜。

锡铅 (Sn37Pb) 与无铅 (Sn3Ag0.5Cu) 焊膏相比, 无铅焊膏将有更高的融合温度, 在预热和再流焊期间随着温度的升高更容易氧化。由于这一原因, 无铅焊料的

润湿不良如不融化焊料、不润湿元件, 球窝缺陷将更经常发生。

开发的锡铅和无铅焊膏能适应高预热, 以防止/减少由于元件翘曲和氧化引起的球窝缺陷 (图 2)。开发的焊膏特别注意了焊剂的活性水平、耐热性和焊膏的可印刷性。下面将详细说明其实验和结果。

实验

为了防止和减少球窝缺陷, 进行了一系列的实验, 以了解和解决这一问题。以下分别从各个方面进行讨论。

焊剂流动性调整

为了减少焊膏的氧化, 对焊剂流动性进行了调整, 使焊剂在预热阶段对焊膏有

更多保护, 免于受热。

焊剂温阻特性改进

通过改进焊剂的温阻特性, 开发的焊剂在预热期间的活性水平被提高。该焊剂将能够更好地去除 BGA/CSP 元件焊球上的氧化膜。

氮气与空气气氛再流焊测试

球窝缺陷通常由于 BGA/CSP 元件氧化和焊剂退化引起, 采用有助于去除氧化膜同时选择更耐热的焊剂, 减少 BGA/CSP 元件的氧化, 可减小该缺陷的发生。

氮气气氛有助于减少氧化, 因而也能实现减少 BGA/CSP 元件氧化的目的。但是万一因氮气成本问题不能采用的话, 还是应该更多关注焊剂的开发。

锡铅和无铅焊膏焊剂配方的开发主要是去除 BGA/CSP 元件上的氧化膜, 提高焊剂的耐热性。

SnPb 球窝焊膏的开发

由于减少锡铅焊接中的球窝缺陷最初是客户问题, 因此, 最初

4~5 年的工作是去除使用锡铅焊膏时的球窝缺陷。下面将详细说明在这一方面的开发工作。

采用锡铅焊膏时片式元件的测试方法

为了模拟这一现象, 将一个氧化的元件贴放于事先经过再流焊氧化的锡铅焊膏上, 然后进行再流焊。对三种焊膏进行评价: 对比物锡铅焊膏 A、对比物锡铅焊膏 B 和改进的球窝 SnPb 焊膏 C。所采用的测试方法如下:

1) 片式元件氧化——150 °C 下 3h (2125C [0805] 芯片尺寸, 90Sn/OPb 元件涂层)

2) 再流焊焊膏氧化——150 °C 预热 1 min, 接着 230 °C 再流焊 1 min。所使用的再流焊温度曲线如图 3 所示。

氧化片式元件和再流焊焊膏后, 把片式元件贴放到如图 4 所示的经过再流焊的焊膏上。最好使用熔融焊膏更精确地复制球窝缺陷, 但是由于实验的困难, 使用了经过再流焊的焊膏。

采用再流焊模拟器观察经过再流焊的焊膏和片式元件之间的实时融合行为。所使用的再流焊模拟设备如图 5 所示。

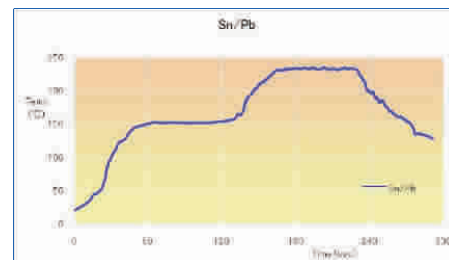


图 3 氧化锡铅焊膏所使用的再流焊温度曲线 (183 °C 以上时间 120 s)

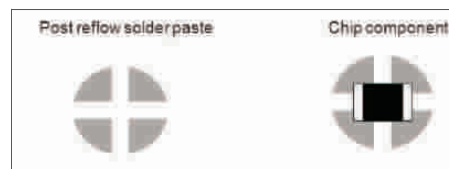


图 4 片式元件贴放到经过再流焊的焊膏上

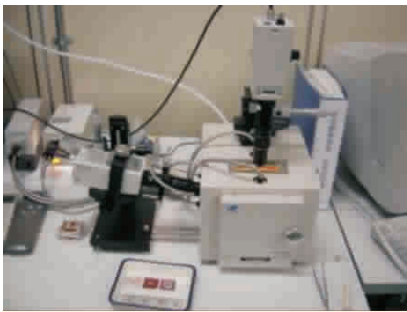


图5 采用再流焊模拟器观察经过再流焊的焊膏和元件的实时融合行为



图6 再流焊模拟器所使用的锡铅再流焊温度曲线(183℃以上时间60s)

在再流焊模拟器中所使用的再流焊条件如图6所示,温度上升速率为1℃/s,峰值温度为215℃。再流焊气氛为空气。

SnAg Cu 球窝焊膏开发

对于无铅焊膏的开发,同样使用片式元件与经过再流焊的焊膏,但是在开发阶段,使用了BGA/CSP焊球,因为这样可以更准确地模拟实际组件的测试条件。

焊球的测试方法

要证明焊膏防止球窝缺陷的有效性,需要大量的元件和时间。为了复制缺陷和加速评估过程,采用焊球,观察在高温下焊剂活性水平的保持以进行评估。

这涉及到在测试基板上印刷焊膏,然后把测试基板置于静态焊料槽上熔化焊膏。一旦焊膏熔化,焊球就会被在再流焊期间贴放到经过再流焊的焊膏上。如果焊球融化并与焊膏融合,可断定其为良好结果,称为“OK”,当没有融合发生时,可断定其为不良结果,称为“NG”,如图7所示。

组装板的测试方法

焊膏印刷到测试基板后,对基板进行再流焊,然后把BGA/CSP元件贴放到基板焊盘上再进行再流焊,观察BGA/CSP元件上焊点的成型,如图8所示。通过从再流焊后的测试基板上剥离BGA/CSP元件检测焊点,观察再流焊模拟器

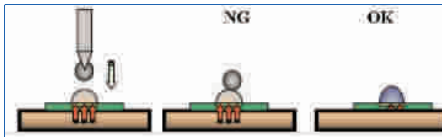


图7 通过焊球与焊膏评估焊剂活性水平

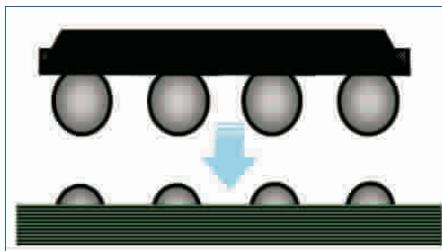


图8 在经过再流焊的焊膏上贴装BGA/CSP元件,对焊点成型进行评估

中的融合行为。

测试媒介评估

采用测试基板评价球窝性能,首先故意氧化BGA/CSP元件,然后将其组装到印刷焊膏的测试基板上进行再流焊,通过对氧化BGA/CSP焊球元件的焊接分析,看是否开发的焊膏有助于提高球窝性能。

结果与讨论

SnPb 球窝焊膏开发结果片式元件的结果

通过再流焊模拟器,三种不同的焊膏与元件的润湿情况见表1。

从表1可知,对比物SnPb焊膏A,再流焊后,焊膏(预先经过再流焊的)与元件之间无实际的

焊接连接。由于焊膏中的焊剂是高粘度的,倾向于存留在元件下,阻碍了元件端和焊膏之间的良好连接,球窝的成功率不是很好。对比物SnPb焊膏A有焊剂残留物,该残留物比球窝SnPb焊膏C的焊剂残留物硬。在较高的熔融温度下,该焊剂残留物没有焊膏C的焊剂残留物软,与焊膏C相比,它降低了焊膏A与元件端的接触,增加了球窝缺陷。同样的原理对于BGA/CSP元件也一样。焊剂粘度越高,在BGA/CSP元件和焊膏之间越容易形成不良接触,引起球窝缺陷。

对比物SnPb焊膏B,焊膏中焊剂的粘度小于对比物SnPb焊膏A,因此,在元件端和焊膏之间形成良好的接触,这将有助于减少球窝缺陷。然而,由于焊剂的保留量在焊膏(预先经过再流焊的)与元件的连接处相对较少,元件的润湿不是很好,增大了球窝缺陷的可能性。

球窝SnPb焊膏C,具有较低的焊剂粘度,该焊膏使得元件端和焊膏之间形成良好的接触。与对比物SnPb焊膏B相比,降低了焊剂

表1 对比物SnPb焊膏A、对比物SnPb焊膏B和球窝SnPb焊膏C的再流焊模拟器结果

	210℃	215℃
焊膏A		
焊膏B		
焊膏C		

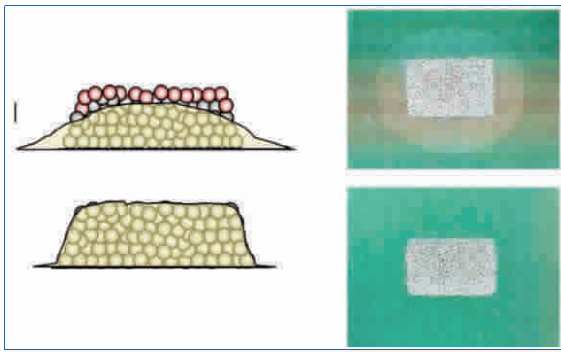


图9 两种焊剂的焊剂流动性比较,表现出不同的焊料粒子覆盖率

的流动,这将有助于在焊膏与元件连接处有所需的焊剂量,去除元件的氧化膜。另外,焊膏C中的焊剂在锡-铅再流焊温度曲线下比焊膏A和B具有更好的焊剂活性,在较低的焊接峰值温度下(210℃)有更好的润湿性。

开发的SnPb焊膏C,具有一定的焊剂流动性,因此,在预热和再流焊期间对焊料粒子具有更多的保护,提高了球窝性能,如图9所示。

如图9的上图所示,在预热期间,焊剂流出,焊料的顶部暴露出来,使其更容易产生缺陷,如球窝焊接缺陷。如图9的下图所示,焊剂的流动性小,焊剂覆盖在焊料的顶部。这将有助于加热期间防止焊料氧化,提高球窝性能。

SnAgCu 球窝焊膏开发

焊球结果

开发的无铅球窝焊膏和对比物焊膏无铅SnAgCu焊球的测试结果见表2。

无铅SnAgCu球窝焊膏D在焊膏与焊球融合测试中对比物SnAg焊膏E表现出较好的性能,甚至在较长的再流焊时间后。

这是由于焊膏D中所采用的焊剂更耐热,能够去除焊料球的氧化物,甚至在特别长的融合时间后。

正如已经指出的,无铅球窝焊膏的开发涉及到提高熔融后焊料

粒子的覆盖率以减少氧化,以及提高焊剂的耐热性。由于熔融后焊剂覆盖焊料表面,保护焊料在峰值温度下不被氧化,因此与传统的无铅焊膏相比增强了焊球球窝缺陷的能力,如图10所示。

进行改进后焊剂的抗热性测试:焊剂在300℃下加热,测定焊剂松香颜色的变化。加热后仅浅颜色变化是良好的结果(图11)。

对比物SnAgCu焊膏E和其它SnAgCu焊膏材料(焊膏F到I)

表2 无铅球窝SnAgCu焊膏D(上一行)与对比物无铅SnAgCu焊膏E(下一行)焊剂活性水平的保留情况

After 30sec	After 50sec	After 70sec

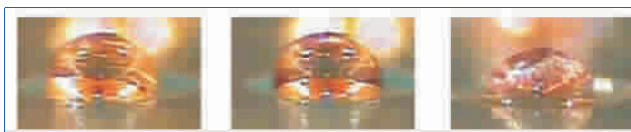


图10 无铅球窝焊膏与传统焊膏熔融行为比较

的评估(20s~50s)比较,如图12所示,在焊膏和焊球(60s)连接性能测试中,球窝SnAgCu焊膏D退化需要较长的时间。

组装基板结果

用于确定所开发的无铅球窝焊膏能力的测试基板具有很好的耐热

性,焊膏中的焊剂能够在再流焊模拟器较苛刻的测试条件下去除氧化膜,如图13所示。

新开发的球窝SnAgCu焊膏D在225℃下,在焊膏和焊球之间开始形成焊点,在235℃实现与焊球的完全融合。对于对比物SnAgCu焊膏E,焊膏与焊球没有完全融合,因为在第一次再流焊中焊料和焊剂都被氧化了,在后来的再流焊中剩余的焊剂不能够去除焊球上的氧化膜。从基板剥离元件后焊点的可视外观实例如图14所示。无铅SnAgCu球窝焊膏D与对比物SnAgCu焊膏E相比具有较好的焊点性能。

焊点结果

各种无铅SnAgCu焊膏的评价结果如图15所示。

从图15可以看出,与测试对比物SnAgCu焊膏E和其它SnAgCu焊膏材料相比,球窝焊膏D无球窝缺陷发生。

无铅SnAgCu焊膏氮气氛与空气中再流焊测试结果

在比较氮气氛和空气中再流焊研究中,发现使用氮气氛(1000ppm O₂)可

以提高球窝性能,因为氮气氛有助于无铅SnAgCu焊膏在再流焊温度



图11 无铅SnAgCu焊膏在300℃下加热,焊剂松香颜色的比较,反映了传统的与球窝焊膏的性能

SIPLACE at
Nepcon Shanghai
Apr 20 - 22, 2010

眼见为实，耳听为虚

— — SIPLACE您值得信赖的伙伴

SIEMENS

Compare
SIPLACE

SIPLACE information

SIPLACE

- 您的生产线实际性能达到了您的需求吗？您能以合理的价格获得更具高科技的贴片机吗？
- 您的SMT生产线可以不更换贴装头就能使其自动适应不同的产品且保持平衡吗？
- 您对设备利用率和生产效率满意吗？您的产品质量有可靠的保证吗？
- 您的供应商的全球服务和技术支持达到您的期望吗？

siplace

SIPLACE一直致力于创新，不断推出新技术，旨在帮助您提高生产线的生产效率和降低制造成本。

2010年4月20日至4月22日，敬请光临Nepcon光大西厅西门子1E01展台，观摩SIPLACE D系列，X和SX系列，以及SIPLACE软件和服务的精彩内容。

预约参观，请联系SIPLACE团队：siplace-info.seas@siemens.com

www.siplace.com

Answers for industry.

SIEMENS

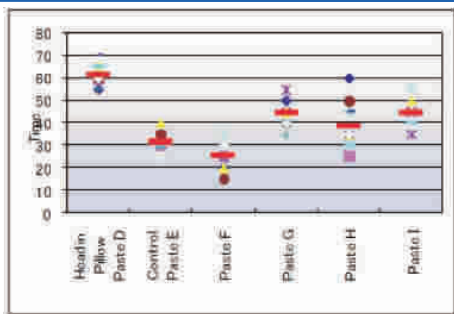


图 12 无铅球窝 SnAgCu 焊膏 D 与其它 SnAgCu 焊膏材料连接性能比较

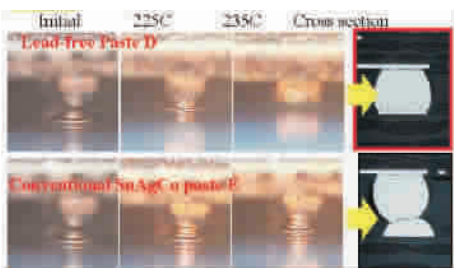


图 13 再流焊模拟器中,氧化的 BGA/CSP 焊球元件与无铅球窝 SnAgCu 焊膏 D 和传统 SnAgCu 焊膏 E 的观察情况

曲线下保留和提高焊剂活性,如图 16 所示。

正如已经指出的,由于再流焊中氮气的成本问题,主要的开发工作集中在无铅 SnAgCu 焊膏的改进上,以及空气中再流焊温度曲线下焊剂配方的开发改进。

基板和元件翘曲标准以及影响球窝焊接缺陷的其它因素讨论

正如已经提到的,引起球窝问题的主要因素之一就是元件和/或基板翘曲。对于元件,JEDEC JEP-

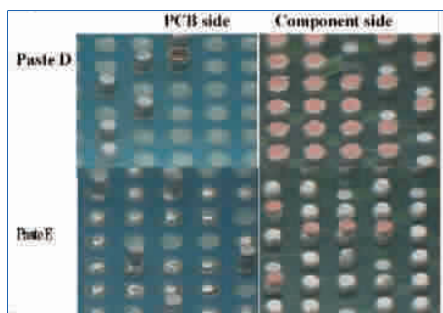


图 14 无铅球窝焊膏 D 与传统的 SnAgCu 焊膏 E 的 BGA 焊点结果

95 标准提到室温下元件共面性/平整度的测量。室温下球间距 0.4 mm~1.27 mm 的最大封装翘曲为 0.075 mm~0.2 mm。然而,室温下元件的共面性和平整度会与 SMT 再流焊温度下的有所不同,在 SMT 再流焊温度下会发生球窝缺陷。JEITA 和 JEDEC 标准正在制定 SMT 再流焊期间的元件共面性和平整度技术规范指南。基于球间距 0.4 mm~1.27 mm,建议再流焊期间最大封装翘曲为 0.075 mm ~ 0.15 mm。

对于基板,目前 IPC 标准提到最大基板平整度为 7.5 mil/英寸。对于大 I/O BGA 元件,这将使得允许的沿着基板焊盘对角线的最大共面性/翘曲太大。目前的基板标准与封装尺寸和 I/O 数不相适应,需要相应地调整。目前 iNEMT 正在进行室温和再流焊温度下基板共面性的测量工作。基于这一工作,推荐的可接受的标准将建议给有关的 IPC 标准小组。另外, iNEMT 工作的结果将提供和加入到 JEITA 和 JEDEC 的基板和元件共面性要求中,以便制定通用标准。

引起发生球窝缺陷的其它因素有不充足的焊膏沉积,通过了解模板开孔,模板面积比以及由于潜在的污染或涂层的过度氧化产生的元件或基板的非润湿,对不充足的焊膏沉积进行校验。在生产中,如果丝网印刷机在基板上沉积不充足的焊膏或有不正确的印刷记录,也会引起球窝焊点。如果 BGA/CSP 元件贴装机有不正确的 X-Y 元件贴装或没有充足的向下压力把元件焊球推入焊膏沉积中,也会引起球窝缺陷。有一些修正模板厚度和模板开孔的补救法,可提高焊膏的沉积,补偿元件封装和基板翘曲引起的缺陷。除了焊膏检测保证良好的焊膏沉积以外,也应该调整贴装机的贴装压力,保证 BGA 焊

球正确地安装在印刷焊膏中。

再流焊温度曲线的优化也是需要的,以及已经提到的在整个再流焊温度曲线上具有较高耐热性焊剂配方的开发,这都将有助于减少锡铅和无铅组件的球窝缺陷。

总之,球窝缺陷有许多潜在的原因,包括元件和基板的翘曲、焊球的共面性和焊球的氧化、焊膏量和类型、元件贴装和所使用的再流焊温度曲线。其中翘曲、氧化和共面性在无铅焊接较高温下会增大。需要一个系统的方法和解决方案来识别引起问题的特定原因,然后集中力量去消除/减少缺陷。

结论

新开发的锡铅和无铅焊膏证明,控制焊剂的流动性和提高焊膏

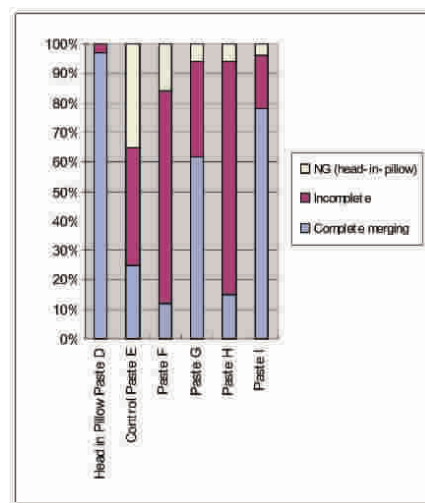


图 15 测试的各种无铅 SnAgCu 焊膏的焊点成型

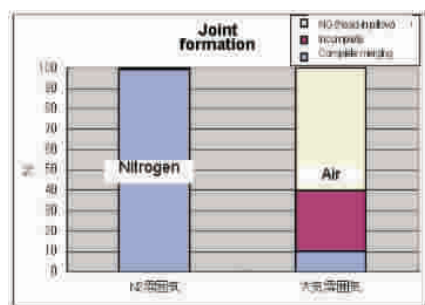


图 16 在空气和氮气氛下进行无铅 SnAgCu 焊接球窝焊接缺陷的发生

中所使用焊剂的耐热性,将有助于减少球窝缺陷的发生。

然而,这只是部分解决方案,仍需要大量的工作,减少再流焊期间元件和基板的翘曲,并升级/开发与此相关的行业标准。

今后的工作

正如已经指出的,今后需要做的更多工作为再流焊期间减少元件和基板翘曲的标准制定。另外,无卤无铅的球窝焊膏的开发正在进行,需要开发具有高耐热性焊剂能力的新型无卤焊剂配方。

致谢

作者衷心感谢 KoKi 焊料公司的各位同仁,感谢他们在测试方法和锡铅和无铅球窝焊膏新型焊剂

配方开发中所给予的帮助与支持。

参考文献

- [1] B.T. Vaccaro et al., Plastic Ball Grid Array Package Warpage and Impact on Traditional MSL Classification for Pb-free Assembly, SMTAI conference, 2004.
- [2] IPC/JEDEC J-STD-020 standard, Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices, 2008.
- [3] R. Lathrop, BGA Coplanarity Reduction during the Ball Attach Process, SMTA Pan Pacific conference, 2008.
- [4] W. Lin et al., Material and Package Optimization for PoP Warpage Control, SMTA Nepcon Shanghai conference, 2007.
- [5] B. Smith, A Proposed Mechanism and Remedy for Ball-in-Socket and Foot-

in-Mud Soldering Defects on Ball Grid Array and Quad Flat Pack Components, SMT magazine, 2006.

- [6] JEDEC Publication 95 (JEP 95), JEDEC Registered and Standard Outlines for Solid State and Related Devices, 2000.
- [7] M. Varnau, Implementing High Temperature Component Requirements for Components and PWBs, INEMI presentation, www.inemi.org.
- [8] JEITA-ED-7306 standard, Measurement methods of package warpage at elevated temperature and the maximum permissible warpage, 2007.
- [9] JEDEC JEP 95 SPP-024A standard, Reflow Flatness Requirements for Ball Grid Array Packages, 2009.
- [10] M. Mehrotra et al., BGA Warpage and Assembly Challenges, SMTAI conference, 2004.

(上接第 12 页)

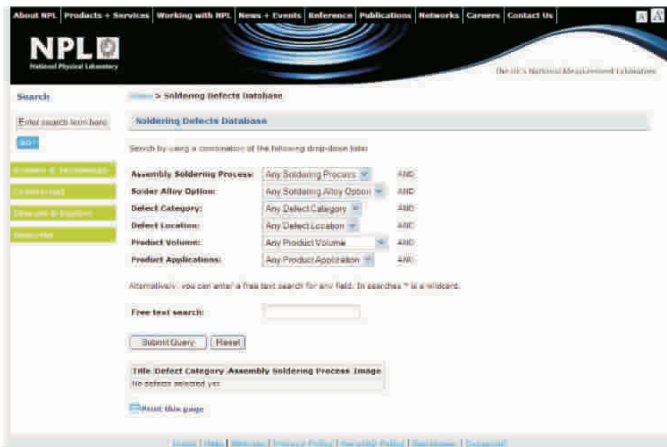


图 22 NPL 缺陷数据库首页

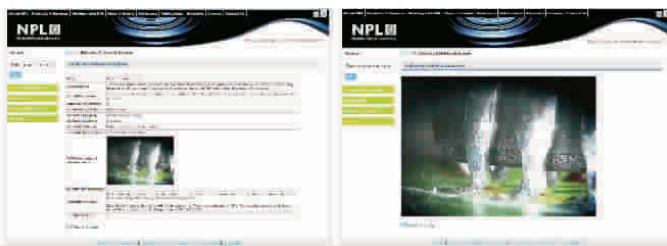


图 23 焊接缺陷的一个示例

焊料在整个表面的流动速率是最小的。无铅焊料的研究表明,无铅焊料的润湿性和流动性是有限的,与锡铅焊料相比相对要小。一般表面安装焊点经历一个再流焊同期,

锡/铜金属间化合物厚度为 $2\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$, 封装通孔再流焊焊点的为 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 。

有关再流焊的铜溶解经验很少。铜金属间化合物的形成将随焊接温度、液态时间和液相线上冷却时间的不同而变化。焊点的再流焊和多次返修操作会累积其影响。

铜溶解,你需要查寻什么?

提供的生

动案例为工程师和制造人员确认铜溶解提供了参考。案例中的铜溶解在某种程度上可以被认为是极端情况,但是铜溶解在制造中是确实存在的。对具有类似情况的印制

电路板组件应赶快调查研究,并审核其生产工艺或材料。

英国国家物理实验所的项目报告将给出有关铜溶解的更多信息:英国国家物理实验所报告 MAT26: 无铅焊料中的铜溶解测量。

致谢

我们衷心感谢创新、大学与技能部(DIUS)为本研究提供资金。我们也衷心感谢 Milos Dusek 为本实验所给与的帮助。

我们也衷心感谢下面的所有项目合作者所给与的支持与投资(按字母顺序):

Artetch Circuits, Celestica, Cookson Electronic Assembly, DKL Metals, Dolby Laboratories, European Sapce Agency, Falcon Metals, Henkel Technologies, Hewlett-Packard Co, Indium Corporation of Europe, MBDA (UK), Photomechanical Services (Essex) Ltd, Rockwell Collins, Seho, Vitronics Soltec BV.