

来的热冲击。焊接流程用于实现电子元器件外引线与印刷电路板焊盘之间的连接。如果只是焊接通孔插装元件，一般采用双向单波峰焊。如果是通孔插装元件与表面贴装元件的混装形式，一般采用如图1所示的双波峰焊。前面的端流波可渗入到所有待焊表面以保证良好润湿，而后面的双向宽平波完成最后的连接过程。由于其钎料流动平坦且较为缓慢，有利于保证印刷电路板在钎料波流动速率最小点处脱离钎料波峰，进而最大限度地抑制桥连(bridge)、毛刺(icicle)等焊接缺陷的产生。

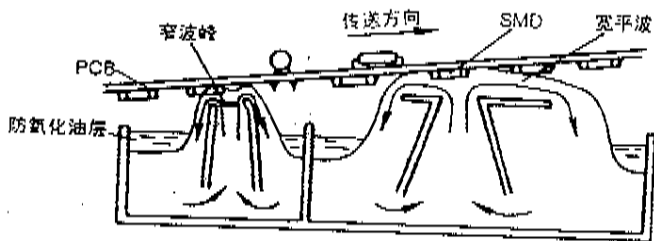


图1 双波峰焊示意图

3. 无铅钎料的波峰焊

在文献[1]中，我们已经报告了无铅钎料的最新发展进程并论述了开发无铅电子组装技术的迫切性。下面就无铅波峰焊面临的工艺与设备问题进行详细说明。如[1]中所述，具备应用前景的无铅钎料为Sn基合金，针对波峰焊而言主要是Sn-0.7Cu共晶合金和Sn-Ag-Cu共晶合金。这些无铅钎料有2个重要特点。一是钎料中Sn含量很高，一般高于90wt.%，与传统的Sn63-Pb37或Sn60-Pb40钎料相比，无铅钎料合金的熔点、密度、润湿性、氧化性、腐蚀性等物理性能有很大变化。二是无铅钎料的高熔点(一般为220°C左右，比Sn-Pb钎料熔点高出约40°C)必然导致较高的钎焊温度，如预热温度应调高至100°C以上，钎料槽的温度应设定为260-275°C左右。这两个特点为无铅钎料的波峰焊工艺与设备带来一系列问题。

3.1 氧化

图2为不同温度下SnO₂和PbO这两种氧化物标准生成自由能DG的数据对比[2]。可见与Sn-Pb钎料相比，高Sn含量的无铅钎料更容易氧化，而无铅波峰焊较高的焊接温度使得氧化问题更为严重，从而导致熔融钎料表面形成更多的残渣(dross)。在使用Sn-Pb钎料的情况下，向熔融钎料槽中加入适量的抗氧化油可有效抑制钎料氧化问题，但对于无铅钎料的波峰焊，我们建议应尽量采用惰性气体(如氮气)保护。

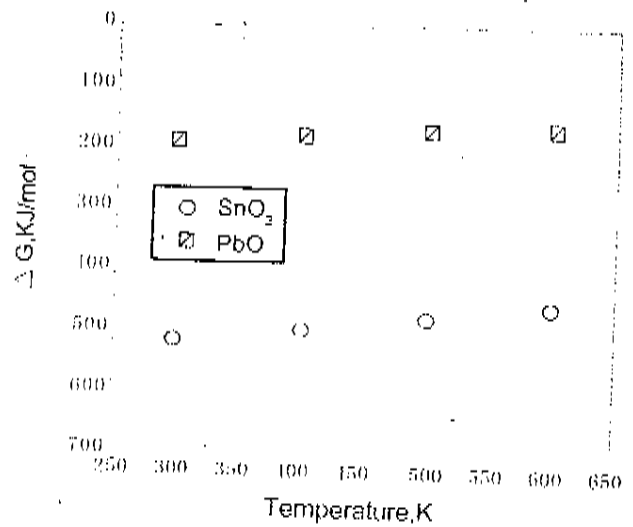


图2 不同温度下SnO₂和PbO的标准生成自由能

3.2 腐蚀

传统上波峰焊设备的很多部件材料采用不锈钢，但是高温下高Sn含量的无铅钎料对Fe有很强的溶解能力，这一溶解反应首先是将Sn-Fe化合物带入熔融钎料之中，从而影响其成分的精确性，而随着时间的增长，如图3所示，可能最终导致部件的溶蚀损坏[3]。事实上一些具备多年Sn-3.5Ag钎料(该钎料远在无铅钎料概念出现之前即已被广泛应用)使用经验的公司，其通常做法是每月更换一次钎料槽内的钎料合金，每6个月更换一次离子泵及喷嘴，每年更换一次钎料槽。有些专家也建议无铅波峰焊用钎料槽材料应采用铸铁并镀以表面防护层，喷嘴等部件应尽可能采用钛合金材料。

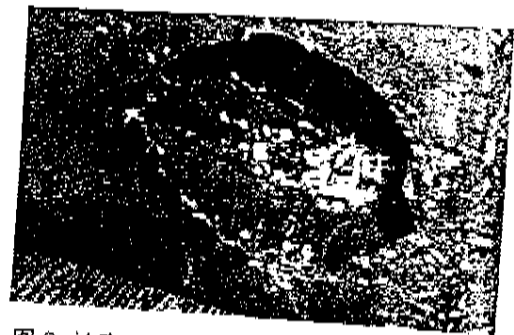


图3 被高Sn含量无铅钎料溶蚀的钎料槽部件

3.3 Cu的溶解与清除

在波峰焊过程中，电子元器件外引线及印刷电路板表面的Cu会不断地向熔融钎料中溶解并进而析出Cu₃Sn₅金属间化合物。当熔融钎料中Cu的浓度和/或Cu₃Sn₅金属间化合物含量超过一定量时，钎料的熔点、粘度等物理性能将显著改变，从而大大增加桥连、毛刺等焊接缺陷的出现几率。Cu在Pb中溶解度很低，327°C以下其溶解度低于0.007wt%，但在Sn中有较高的溶解度。

270°C时为0.7wt%，300°C时更高达2.5wt%。因此与Sn-Pb钎料相比，高Sn含量的无铅钎料溶解Cu的速率可能更快（尽管目前还缺乏试验数据，但必须考虑到含Cu的无铅钎料可能对Cu的溶解有一定抑制作用）。

更主要的问题在于Cu的清除方面。对于采用Sn-Pb钎料的波峰焊而言，一般采用重力分离法来清除熔融钎料中的Cu。即将钎料槽温度冷却至188°C（Sn-Pb共晶合金的熔点为183°C，因此此时钎料仍为液态），然后放置8小时以上，此时Cu₆Sn₅化合物将漂浮在Sn-Pb钎料表面之上（注：前者密度为8.28g/cm³，而后者密度为8.8-8.9g/cm³），从而可以较为容易地清除Cu₆Sn₅化合物并补充纯Sn来对钎料槽中熔融钎料的成分进行调整。可惜的是，这一重力分离法不适用于无铅钎料，因为其密度一般为7.29-7.39g/cm³，Cu₆Sn₅化合物不会漂浮于其表面，而是沉于底部。因此对于无铅钎料的波峰焊而言，可能需要定期更换钎料槽中的钎料并清洗钎料槽来避免其成分出现较大偏差，显然这种方法将增加生产成本。

3.4 Fillet-lifting 缺陷与快速冷却

Fillet-lifting 缺陷，即冷却凝固后钎料圆角与印刷电路板焊盘脱离、圆角部分向上张开，是通孔插装元件的无铅钎料波峰焊中特别突出的一类焊接缺陷[4]。其产生原因在于冷却过程中，钎料合金的冷却速率大于印刷电路板的冷却速率，通孔内部及圆角处的钎料合金开始凝固时，焊盘/圆角界面处的钎料合金还处于熔融状态。因此前者的凝固收缩产生的拉应力导致钎料圆角与焊盘相脱离。如果采用的是含Bi的无铅钎料且元件外引线端/或印刷电路板表面为含有Pb的镀层，由Sn-Pb-Bi之间可形成一熔点仅为96°C的低熔点相，这一问题将更加严重。最好的解决办法是在钎料波峰的出口处施加快速冷却，从而促使印刷电路板的冷却速率大于焊点处钎料合金的冷却速率。因此波峰焊设备的生产商需要对出口处的冷却系统进行重新设计。

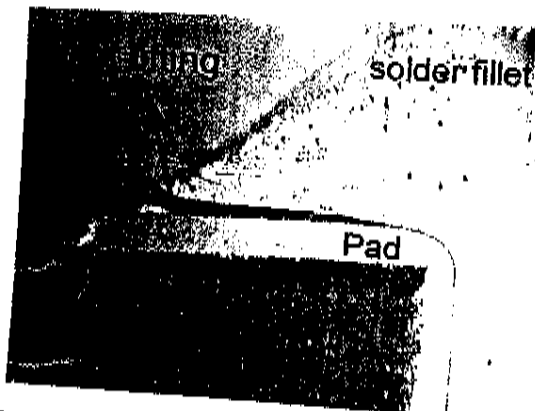


图4 无铅钎料波峰焊时易出现的 Fillet-lifting 缺陷

3.5 钎剂

无铅钎料波峰焊的一个重要特点是钎焊温度显著高于传统的Sn-Pb钎料，因此相应的钎剂选择也必须与此相匹配。这一问题与具体的产品及工艺要求相关，很难一概而论。我们建议以下两个基本原则。（1）减少钎剂中挥发性物质的百分含量。如采用松香基钎剂，则增加松香的百分含量而降低醇类溶剂的百分含量。当然这又会带来更多的松香残渣及相关的清洗问题。另一方面我们建议采用挥发性物质含量很低的水溶性钎剂。（2）需要对活性剂成分进行调整以适用于高温，即提高活性剂的活性温度。这一方面，材料提供与工艺实施双方应该充分协调，才能做到切合实际的调整。

四、结语

尽管电子工业发达国家中电子元器件的表面组装率（多采用再流焊）已经高达70%，国内的实际情况是波峰焊仍为主流。在采用无铅钎料已经成为不可避免的发展趋势的今天，相应的波峰焊工艺与设备的改进及开发也是迫在眉睫。如文中所述，高Sn含量钎料及高钎焊温度这两个基本特点为无铅钎料波峰焊带来了一些不同于传统的Sn-Pb钎料的新问题，我们期待着与同行之间的更多交流，从而为顺利过渡到无铅波峰焊而共同努力。

参考文献

- [1] 马鑫, 吴建新. 无铅钎料的发展现状 见《SMT工艺与设备》2003.3/4 第二十二期 P/53-- P/55 页
- [2] M. Abtey and G. Selvaduray. Lead-free solders in microelectronics. Mater. Sci. Eng. Reports, 27 (2000) 95.
- [3] AIM. Lead-free soldering guide, 2002
- [4] NPL and ITRI Report. An analysis of the current status of lead-free soldering, 1999

www.dyfenco.com
DYFENCO
 东莞市长安镇街口村横岗头工业区
 Tel: 0769-533-0095 Fax: 0769-533-0096
 E-mail: earnmore@dyfenco.com
 justin@dyfenco.com

營業部 區域經理
 Sales Dept. -Manager

黃振鑑 手機 13828759269
Justin Huang

无铅焊接简介

Ha Sau Mooi

Henkel Malaysia Sdn Bhd

885

无铅焊料在许多年以前已经应用在各种工业领域。在70年代初期食用水管设备已经改用无铅焊料以防止铅污染人类的食用水源。美国为了防止含铅电子废物对荒地污染的可能性，已在1991年成立了法规以禁止含铅原料应用于电子产品。虽然美国已经删除了有关禁止使用铅的法规，但是欧洲却提议成立类似的法规，也就是 WEEE 法规，规定大部份之电子产品必须于2004年之前禁止使用含铅原料，之后改其禁用期限至2008年，而最近又将禁用期提前至2006年。近来许多规模较大的日本公司以很快的速度领导电子领域消除使用含铅原料，这鼓禁铅浪潮使禁铅活动继续涌起。

铅是毒性物，如果人体累积太多的铅，它会损害人体之神经系统。虽然含铅电子废物对水源之污染的正确证据不足，但含铅电子废物的日愈增加是一件难以解决的问题，所以使用无铅焊接原料的方向会显示得愈来愈重要。即使没有明确的法规以禁止使用含铅物料，但控制丢弃含铅电子废物的条件会逐渐严格。

在了解无铅焊接所带来的问题和寻求解决方法的同时，我们应该先去明白为何电子行业当前会将铅和锡列为焊接的主要材料。锡是焊接材料“活跃的成份”，它帮助金属与金属之间的接合。铅的价格比锡便宜很多，把铅加入锡内可以减低焊料的价格，同时也改进焊料的物理性质，适合与锡混合为合金的金属有好几种，如：(铋)(铜)(锌)(银)和

银、铜、锡、铋、铜、锌

铋等金属。将铋、铜和锌等金属加入锡内可以明显地降低焊接(熔融)的温度，但是它会带来其他负面的问题。铋会使焊料的温度降低至不可接受的范围，锌即过渡活跃而造成腐蚀，铜的价格昂贵而且不容易取得。根据个案研究，将适量的银、铜和铋加入锡成为合金后，其熔点温度会比较接近锡铅合金的熔点温度。

在无铅焊接材料热潮兴起之前，一系列之无铅合金已经存在，但这些无铅合金之焊接温度不是过高，就是过低，不能符合一般电子业的要求。电子业所需求之焊料的焊接温度不可以过高到破坏电子零件的功能，焊接后之产品又必须要能耐高温，一般之成品的操作温度是在150℃左右。因此至目前为止在电子焊接方面没有一种无铅合金焊料可以直接取代锡铅合金焊料。一般认为锡、铜和银的合金是最佳之无铅焊料，增添铋和少许之铜或锌可以降低焊接温度以免破坏某些对温度敏感的零件，但增添这些金属会影响焊点之可信赖度。

无铅的定义是焊料成份内不可超过0.1%之铅含量。到目前为止，电子装配程序中所用之无铅焊料普遍上已经被接受，但零件内所须之高温焊料依然无法找到可以取代的金属，因为现有之无铅焊料的熔点范围很小(即从138至236℃之间)，无法达到电子零件内所需的温度，所以暂时仍然允许零件生产商使用含铅的原料。

虽然无铅焊接的研究工作在波峰焊接和回流焊

接的程序中下了许多功夫，但至目前为止在日本以外的电子厂生产线很少使用无铅焊接的技术。无铅的技术比较容易应用于回流焊接，而比较难应用于波峰焊接，这是因为无铅焊料除了必须操作在比较高温外，其对铜和钢的溶解率比较高，而且表面张力也比一般锡铅合金高，所以在波峰焊接程序中难以稳定地控制焊接的低缺陷率。

无论如何，经过许多方面的研究和所吸取的经验，无铅波峰焊的问题已经解决，焊接机器生产商已采用可以防止无铅焊料侵蚀之材料来制造波峰焊锡的锡槽。研究团体也已经重新评审焊点之可接受规格。同时，也采用了新方法模拟锡槽杂质的成份，在过去无铅焊料比较适合与高固体含量的松香助焊剂并用，但近来助焊剂生产商已经研发了可用于无铅焊接之低固体含量助焊剂。一般上经过波峰焊后的焊角脱落之主要原因是因为焊角上的无铅原料被铈或铅污染而造成的。

而无铅回流焊接最大的问题是由于焊接温度较高而破坏了一些对温度比较敏感的零件。零件生产商已开始努力研发可耐高温之零件，以便使用者可配合锡、银、铜合金焊料使用。一般上使用无铅于回流焊接会造成焊点有比较明显的空隙现象，而其他的問題就是焊点比较粗糙，不光亮和在铜表面的润滑性比较差。

无铅焊点的强度（尤其 'Creep Strength'）比锡铅合金更强，而加速老化实验的结果就和锡铅合金相似。

总结而言，虽然到目前为止还没有找到可以直接取代锡铅合金的焊料，但是现有之无铅原料已可以在良好的控制条件下应用于基板和安装焊接程序中，而现在最大的障碍就是在于无铅的零件问题和零件对温度的敏感性问题。虽然锡铅合金的焊点在非常严格之测试情况下依然显得特别优越，但对无铅焊料之最主要的要求就是所装配出来的产品在某些情况下，其焊点的可信度必须与锡铅合金之焊点类似。

无铅回流焊工艺的先进曲线技术

Bjorn Dahle, KIC

当今世界越来越关注铅带来的环境和健康危险。尽管电子方面的铅只占世界总铅量中极其微小的一部分，人们所关注的是大部分的电子元器件将最终将流入地下，污染地球和水资源。虽然每年只有一万吨的锡铅合金焊料用于这一领域，但是这些焊料几乎没有得到回收。相反，其他很多产品使用大量的铅，但是在世界大部分市场都得到了严格的控制和有效的回收。

欧洲已经采用许多的法律手段来禁止和限制电子行业使用铅。比如说，WEEE 表示：“必须去除任何生活类电子或电气设备中含有以下成分（铅）的元器件，这些设备最终将埋入地下，被焚烧或重新利用。”尽管本法令含有很多例外，但仍将于 2006 年 1 月 1 日生效。不管那些含铅的产品是在哪里生产的，这创始性的第一步将影响到这些产品进入欧洲市场。

事实上，早在 1998 年，日本电子工业协会就决定主动去除电子装配中的铅。他们的目标是到 2004 真正作到“无铅”。

美国目前还没有这样的法令。有些公司推崇铅的回收利用，认为它是一种比“无铅”更好的解决办法。总之，业界已经广泛接受“无铅”趋势。

有竞争性的考虑要求

许多使用无铅焊接的预言家们觉得法律手段是可以讨论的，而在不久的将来，市场要求本身就将促使电子组装业的无铅化。Iwona Turnik 博士，摩托罗拉高级技术中心总裁在 IPC99 年的市场调查表明：

1. 20%的消费者在购买时会积极考虑环境问题。
2. 45%的消费者已购买产品的原因是因为它环保安全。
3. 50%的消费者更换品牌是因为发现它有害环保。
4. 76%的消费者将在价格和质量相当的情况下选择环保产品。

例如，日本所有的大型消费电子公司都在大量生产无铅电子产品，推销时使用“绿色产品”作为竞争卖点，特别是消费电子市场。松下 1998 年推出了无铅微型 CD 播放机，使用环保安全标志的绿叶包装，市场份额增长显著：从 4.7% 增长到 15%。

自动化产品将是“无铅”趋势的主要动力。这一领域不仅对环保利益感兴趣，而且无铅焊接焊点也改善了温度特性。大部分自动化电子产品都被安装在发动机分隔间，因此要承受更高的操作温度（高达摄氏 150 度）和更强的温度变化。竞争的压力，害怕被排挤出国际大市场，二者综合考虑使大部分世界主要电子生产厂家开始为无铅产品做准备。

无铅合金

目前市场有许多种无铅合金。而其中最前景的是锡/银/铜合金和锡/银/铋合金。现在的趋势是二者选其一。锡/银/铜合金焊膏的焊点比现在的锡/铅合金要牢固，但是当温度达到 217℃ 时会有水蒸气。例如，美国 NEMI 已选择 95.5 锡/3.9 银/0.6 铜的焊膏。

铋合金，在温度 206℃ 到 213℃ 之间出现水蒸气，尽管人们认为对于消费电子产品来说，它的焊

点有足够的可靠性,但性能还是不如现在焊膏的焊点性能优良,主要因为众所周知的焊点起皱现象。有人选择铋合金是因为它们是含铅合金最接近的替代品。他们深受日本人的青睐,目前也被用于许多无铅电子组装业。它们要比锡/银/铜合金昂贵许多,并且也有人关注世界是否有足够的铋资源满足整个市场需求。

将来不可能有一种所谓“标准”的无铅焊膏,而是会有几种不同的焊膏,各有利弊。对于它们的选择将很可能取决于产品的特殊的要求。

对制造工艺的影响

1. 丝网印刷: 很小的影响 (如果有的话)。
2. 贴片: 很小的影响。也有人认为,因为使用了无铅焊膏,使贴片元件的“自定位效应”减弱,需要提高贴装的精度。
3. 回流: 由于熔化温度高出 20℃ 到 50℃,对制造工艺有重要影响。
4. 波峰焊: 有一定的影响。助焊剂和合金成分变得很重要。工艺问题包括“锡须”和“焊点起皱”,可能需要氮气。
5. 检测: 与无铅焊接焊点表面晦涩相关的最大的变化,可能需要重新设置自动光学检测系统。还需要额外的操作员培训。最后一个更感性的因素是无铅焊膏焊点不如含铅焊膏焊点光亮,但是不影响组装质量。
6. 返修: 耗时且难度大。与锡/铅组装相比,返修需要更高的温度和更长的加热时间。然而,实验证明,无铅组装的良好返修是可以实现的。

无铅回流工艺

无铅焊接给电子组装带来的首要挑战就是更高温度,标准的含铅焊膏的工艺窗口很宽,典

型的最高温度限度介于 208℃ 到 235℃。但是锡/银/铜焊膏建议最高温度介于 242℃ 到 262℃。印制板上的敏感元件可能只能承受 240℃,因此这些元件来说,这种工艺是不可能运用的。(参见西门子对这些元件的解决方案一章)。还有许多其他元件的最高温度限度都低于 262℃。对于这些组装,相对于含铅产品来说,通用的工艺窗口极大的缩小了。另外,无铅焊膏的不良润湿需要更好的工艺控制最高温度。这个工艺窗口不可能很快变宽。可能需要元件制造商许多年时间发明一代新的抗高温元件,而这种元件也许将因价格更高而告终。

温度更高和高温下更长的滞留时间将导致氧化影响可焊性的可能性更大。惰性气体将极大的减小这种影响,许多工艺专家和公司极力推荐这种方法。但是,有必要提及的是,不是每个人都相信无铅产品使用惰性气体的必要性。由于氮气成本高,再加上有些无铅产品使用正常气体成功的例子,人们仍在讨论是否需要使用惰性气体。

随着元件密度增加的日趋复杂的组装的趋势,工艺窗口狭窄的问题将变得越来越突出。但是很难找到一个可以适应这些组装,特别是可以承受线路板上大的最高温度 DELTAS 的曲线。在更加狭窄的无铅工艺窗口进行这项工作需要使用更高级的工艺优化工具。

有些公司在转向无铅产品过程中犹豫不决的原因,除了质量问题,另一个原因是产品成本更高。一个最大的担心是生产线的生产量和生产率将下降。在生产线上回流炉显然不是最慢的机器。但是在安装无铅产品的炉子是,由于狭窄的工艺窗口,传送带的速度必须极大的调慢。这样,回流炉可能成为整个生产线的瓶颈,而且降低产量。对于生产多种产品的生产线,使炉子的转换时间最小化是关键,在整个生产线上,炉子往往是最慢准备就绪进入新产品的生产。在含铅工艺中的宽的工艺窗口中,很容易找到生产多种产品的炉子。显然在将来却很困难。

有一个好消息就是上述的质量和生产率的问题都可以解决，并且证据显示甚至针对于现在的水准也是可以的。为了取得成功，需要新的思维和工艺方法，还需要使用更高级的工艺工具。生产者需要着重于促进更好的工艺，在生产中不断的控制它们。

工艺发展

含铅组装宽的温度工艺窗口使生产者远离肮脏的工艺。很多组装者几乎不知道确切的工艺限度，很少给他们的回流炉和波峰炉设置温度曲线。更糟糕的是，当决定他们的工艺设置的质量时，许多工艺工程师更多的依赖于他们对于工艺数据的主观解释，而不是客观而科学的方法。为了建立一个适合于无铅产品的温度工艺发展方案，事实证明以下三步方法是有效的。

限定规格（工艺窗口）

在这个工艺中，限定工艺窗口是一个重要部分。产品的质量基本上依赖于恰当的窗口内的生产板。而这有特别地基于焊膏的性质，还要考虑许多其他的因素。敏感元件需要和普通焊膏性质不同的工艺窗口。板上和板下的温度可能要不同。元件可能被放置在某一指定的区域，如果温度升高到足以回流到那些元件密集区域时，留出板可能焦化的区域。

恒量工艺

通过测量曲线的结果，决定在指定的工艺窗口下一种工艺方法或炉子的装配是否适合于生产产品。我们必须决定每个元件上每个热电偶的结果是否符合每个已建立的数据。这个可能耗时，主观，而且还需要以前的回流工艺知识。一个有用的设想叫做工艺窗口指数 (PWI)。给出一个曲线，它计算出现有的工艺窗口有多少用于它的工艺规格。高于100%的表明超出曲线范围，等于100%的 PWI 显示曲线包括了整个工艺窗口。这是一个不稳定的工艺，任何沉积物都将导致曲线超出它的限度。只要在温度曲线范围内，曲线越低，位置越好，曲线将指向工艺窗口的中间。

改善提高（优化工艺）

一旦决定了一种方法是好还是坏，就必须改善或优化工艺。在一台典型的回流炉上，可能有无数种可供选择的配置。现代的曲线工具和特殊化的软件能够在几秒钟内搜索到所有的配置并选择出最适合的。“最适合”的可能是指向工艺窗口中间的那条曲线，或者可能是产量最快，或者是二者的综合。这极大的影响到无铅产品的质量和生产率。

工艺控制 (CPK)

一旦电子制造商彻底采用无铅工艺就会开始生产。由于狭窄的无铅工艺曲线，留给不可避免的有温度、导轨速度、速率变化等引起的工艺堆积物的空间就很小了。统计工艺控制(SPC)数据可能对工艺控制有帮助，但是难度较大。所幸目前市场上有几种连续控制系统，这种系统提供实时工艺数据（每块PCB板上真实曲线的数据，而不是来自炉子的数据）。当超出曲线范围时，这种连续控制系统就会即时报警。它还可以控制每个操作部分的 CPK 层次。这样通过在超出曲线范围之前就对失控工艺实时报警，可以保证产品的零缺陷。

结论

现在有些公司，特别是日本的一些消费电子产品公司，正在大量生产无铅产品，并且成效卓著。另外，国际上在不同的实验室和生产线，广泛的进行了无数的有一定产量、强度和终生测试的无铅实验。也许这些测试会出乎意料地真正证明：在正确的工艺操作下，无铅焊点比标准的含铅焊点更牢固，有更长期的可靠性。

西门子 Dematic 电子对锡/银/铜焊膏进行的一个突破性的研究推论说，最高温度为 232℃ 的润湿性和焊点强度和最高温度 257℃ 时一样。这一发现意义重大，因为它说明对于现在那些温度不能超过 240℃ 的敏感元件，只要工艺发展和控制适当，就可以用于无铅工艺。我们还需要对无铅最高温度低

于 240℃ 作另外研究,但是如果这一发现得到证实,就不需再等待新的抗高温元件了。

可喜的是,尽管制造商需要操作更狭小的工艺窗口,却不会带来什么额外的成本。除了一些非常陈旧,短,而且设计糟糕的回流炉,现在炉子都能够进行无铅工艺操作。但是可能需要工艺发展和控制的工具。那些积极转换无铅产品的 OEM 公司,很快将不仅受益于焊点更牢固,而且在市场上也有竞争力。同样, CMS 公司将给客户在这个竞争极其激烈的行业提供新的赢得市场的能力。

F. Baldwin, Philip Kazmierowicz,《消除无铅回流烦恼》, Apex 2003。

考

1. Greg Jones, Ph.D., 《作好无铅组装的准备了吗?》表面贴装杂志, JUNE 2000。
2. Robert Pfahl, Ph.D. 环境意识电子学杂志, 《无铅在北美 TWG 的地》。Nov. 2002。
Brian Richards, Ph.D, 《无铅焊接是独立的部分吗?》英国国家物理实验室, 2003。
3. Jasbir Bath, 《可制造的无铅表面组装工艺》 Jan. 2003, 电路组装杂志
4. Dongji Xie, Minna Arra, Hoang Phan, Dongkai Shangguan, David Geiger, Sammy Yi, 《手工产品无铅焊点的生命预示》 May 15, 2002, Telecom Hardware Solution conference.
5. Arun Gowda, 《无铅返修的挑战》。Feb. 5, 2002, 泛太平洋研讨会。
6. Phil Zarrow, 《无铅——行动, 而不要反应!》电路组装杂志, June 2000。
7. Hyoryoon Jo, Ph.D., Benjamin E. Nieman, Ning-Cheng Lee, Ph.D., 《微孔无铅焊接空洞》。
8. Hemant Belbase, 《无铅焊接材料、可靠性和工艺优化》。UML Graduate Student Thesis, 2000。
9. Paul M. ... Brian J. Lewis, Daniel