第 17 卷第 4 期 Vol.17 No.4

文章编号: 1004-0609(2007)04-0518-07

稀土 Er 对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 无铅焊料合金 组织与性能的影响

卢 斌,栗 慧,王娟辉,朱华伟,焦美贺

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要:研究稀土 Er 含量对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 无铅焊料合金显微组织以及性能的影响。结果表明: 当 Er 含量为 0.05%~0.50%(质量分数)时,对该无铅焊料合金的导电性和腐蚀性影响不大,但使熔化区间温度降低; 当 Er 含量 为 0.05%时,焊点剪切强度最高; 当 Er 含量为 0.10%时,焊料铺展面积最大,焊料润湿性有所改善,同时焊料的 拉伸强度达到最高; 当 Er 含量为 0.25%时,伸长率最大。随着 Er 含量的增加,该焊料合金的组织由树枝晶向等 轴晶转变,且组织逐渐细化。Er 的较佳添加量为 0.05%~0.25%。

关键词:无铅焊料; Sn-3.0Ag-0.5Cu; Er; 组织; 性能

中图分类号: TG 42 文献标识码: A

Effect of Er on microstructure and properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free solder alloy

LU Bin, LI Hui, WANG Juan-hui, ZHU Hua-wei, JIAO Xian-he

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Trace rare earth element Er was added into Sn-3.0Ag-0.5Cu solder to investigate the effect of rare earth on the microstructure and mechanical properties of SnAgCu solder. The results show that, when Er content(mass fraction) is within 0.05%–0.50%, the Er has a slight effect on the resistivity and corrosion, and lowers the melting range. When Er content is 0.05%, the shear strength is the highest. When Er content is 0.10%, the spreading area is the biggest and the tensile strength is the highest. When Er content is 0.25%, the elongation is the highest. With the increase of Er content, the microstructure of the solder changes from fir-tree crystal to equiaxed crystal and is refined. And the suitable content of Er is within 0.05%–0.25%.

Key words: lead-free solder; Sn-3.0Ag-0.5Cu; Er; microstructure; property

锡铅焊料因其具有良好的焊接性能和使用性能而 具有悠久的历史,但随着对铅毒性的认知和电子工业 发展对焊点的更高要求,新型无铅焊料的开发和应用 已迫在眉睫。

目前, SnAgCu 系焊料因具有良好的强度、抗疲 劳性能和塑性等特点而成为最重要的、最接近实用化 的无铅焊料体系之一^[1]。但是, 与 SnPb 共晶焊料相比, SnAgCu 系焊料熔点偏高(通常要高 30~40 ℃), 润湿 性较差。目前, 改善该系焊料合金的主要技术手段是

利用多元微合金化效应^[2]。Ti、Mn、Fe、Ni、Co等元 素有利于细化 SnAgCu 系焊料微观组织以及提高力学 性能,但 Co 易导致焊料合金的塑性明显降低^[3];Bi 和 In 元素复合添加有利于降低 SnAgCu 系焊料合金的 熔点和熔程,改善焊料综合性能,但单独添加 Bi 会导 致焊料熔程增大、润湿性和抗剪切性能下降^[4];共同 添加少量 Cr、Al 元素可以明显提高 SnAgCu 系焊料合 金的高温抗氧化和润湿性^[5];添加少量 Sb 可以细化该 系焊料合金晶粒、降低熔点、提高润湿性^[6]。近年来,

基金项目:湖南省科技攻关重点项目(06YKG2056)

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-11-20

通讯作者: 卢 斌, 教授; 电话: 0731-8836319; E-mail: luoffice@mail.csu.edu.cn

国内外开始重视稀土元素在无铅焊料中的研究。与国 外相比,国内对于轻稀土或混合稀土在 SnAgCu 系焊 料合金中研究较多,发现微量稀土 Ce 在该系焊料中 具有较好的效果^[7-11],但鲜见有关重稀土元素 Er 在 SnAgCu 系焊料合金中的研究报道。本文作者以 Sn-3.0Ag-0.5Cu 系合金为研究对象,探讨了微量稀土 Er 对该系合金显微组织和性能的影响。

1 实验

实验选用原材料为纯度大于 99.9%的单质金属 Sn 以及 Sn-10%Cu、Sn-17.9%Ag 和 Sn-3.25%Er 等中间合金,按 Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er(*x*=0,0.05,0.10,0.25,0.50)名义成分(质量比)配料,在真空感应熔炼炉中熔炼,熔炼温度为 600~650 ℃。如此反复熔炼 3 次,得到铸态合金试样。

采用差分扫描热量计(DSC)测定焊料合金的液、 固相线温度, 氩气保护, 升温速率为 2 ℃/min。采用 开尔文直流双臂电桥法测试并计算样品的电阻率,样 品尺寸为 200 mm×10 mm×0.8 mm, 测试温度为 25 ℃。采用铺展法来评价焊料的润湿性,利用照相面 积法测出试样铺展面积,并通过专门图像处理软件计 算铺展面积,实验结果均为3次实验的平均值。通过 在 SI1287 电化学综合测试仪测量焊料合金的极化曲 线来计算腐蚀电位和腐蚀速率,并采用塔费尔直线外 推法,以此评估其抗腐蚀性能的好坏,电解液为3.5% NaCl 水溶液。在 CSS4100 型电子万能拉伸机进行拉 伸以及钎焊接头剪切实验,实验温度为室温,拉伸速 率为 1mm/min。拉伸样品尺寸为 d10 mm×50 mm, 焊 点剪切试样制备按 GB11363—89 进行,在 270 ℃下 恒温 60 s, 实现无铅焊料对铜件的钎焊。在 Olympus 光学显微镜(OM)和 KYKY-2800 型扫描电子显微镜 (SEM)及能谱仪(EDS)上进行焊料样品的微观组织观 察及成分分析, 腐蚀液为 20 mL HCl+10 g FeCl3+100 mL H₂O。在日本 Rigaka D/Max 2500 型 X 射线衍射仪 上进行焊料样品的物相分析。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 所示为 Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er(*x*=0~0.50)焊料合金的显微组织。从图中可以看出, Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金典型的组织特征为树枝状初晶和分布其间的共

晶组织,如图 1(a)和(b)所示,初晶为β-Sn相,共晶组 织包含 Cu₆Sn₅+β-Sn和 Ag₃Sn+β-Sn 2 种二元共晶组织 以及β-Sn+Ag₃Sn+Cu₆Sn₅ 三元共晶组织^[12]。其中,二 元共晶组织中的 Ag₃Sn 具有相当长的纤维组织特征, 二元共晶组织中的 Cu₆Sn₅ 具有片状组织特征,三元共 晶组织中的 Cu₆Sn₅和 Ag₃Sn 相混在一起,很难区分, 但可以通过 EDS 分析予以区别。当添加稀土 Er 后, 随着 Er 含量的增加,β-Sn 初晶由树枝状晶逐渐向等 轴状晶转变,且焊料的组织逐渐细化,如图 1(a)和 (c)~(f)所示。初晶形态对合金流动性有很大影响,添 加稀土 Er 可明显细化β-Sn 初晶,晶粒越细,凝固界 面越光滑,合金流动阻力越小,流动性越好^[13]。由于 晶粒越细越难形成裂纹形核所需的应力集中,同时裂 纹在不同位向上的各个晶粒内传播也更加困难,因此, 稀土 Er 细化焊料组织可提高合金力学性能。

图 2 所示为 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr(x=0, 0.25, 0.50) 焊料合金典型的 XRD 谱。由图 2 可见,当稀土 Er 含 量为 0~0.50%时,焊料合金主要由 β -Sn 相、Ag₃Sn 和 Cu₆Sn₅相组成;未发现富稀土 Er 中间化合物的存在, 这很可能与其含量极少导致 XRD 未分辨出有关。当 Er 含量少时,在 β -Sn 初晶生长过程中,由于 Sn 与 Er 相互吸引倾向大,导致 Er 主要富集于相界面或晶界 处,从而影响着初晶或共晶组织的生长形态。金相观 察显示,随着 Er 含量从 0 增加至 0.5%时,初晶形态 由树枝晶向等轴晶演变,这一现象与 Er 富集于 β -Sn 相界面或晶界处有关。

2.2 物理性能

2.2.1 熔化特性

作为无铅焊料,熔点是非常重要的一个特性, SnAgCu 焊料的熔化特征最好与 Sn37Pb 焊料相似, 以 免使基体母材晶粒长大、过烧或局部熔化,这样就可 以沿袭现有的焊接工艺和焊接设备。焊料作为合金, 它通常从固态熔化转变为液态经过一个温度区间。在 此温度区间,固液相并存,焊料的粘度增大,流动性 减小,因而在钎焊过程中,当焊料熔化时可造成基体 母材溶蚀现象, 使焊料的润湿性降低或者造成反润湿 [2]。该温度区间越大,凝固过程中越容易在晶内和晶 间产生偏析,同时形成热裂缝的可能性越大[14]。采用 热分析法分析了稀土 Er 对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金 的液固相线温度的影响,图3所示为典型的 Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.25Er 焊料合金的 DSC 曲线。从图 3 中可以看出,焊料在熔点附近发生吸热反应, Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.25Er 合金的吸热峰不是由单一吸热 反应引起的,其中可能包含着3个吸热反应。这意味



图 1 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr 焊料合金的显微组织

Fig.1 Microstructures of Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er solders: (a) x=0(OM); (b) x=0(SEM); (c) x=0.05(OM); (d) x=0.1(OM); (e) x=0.25(OM); (f) x=0.50(OM)



图 2 Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er 焊料合金典型的 X 射线衍射谱 Fig.2 XRD patterns of Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er solders: (a) *x*=0; (b) *x*=0.25; (c) *x*= 0.50



图3 Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.25Er 焊料合金典型的升温 DSC 曲线

Fig.3 DSC curve of Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.25Er solder

着升温过程中在熔点附近存在 3 个吸热熔化反应:① Sn+Ag₃Sn+Cu₆Sn₅→液体;②Sn+Ag₃Sn 共晶→液体; ③Sn→液体。需指出②和③吸热熔化反应有重合的趋势,这与文献[15] (Sn-3.0Ag-0.5Cu 合金的 DSC 曲线 上存在明显的三个阶段)有所差别。

图 4 所示为 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr($x=0\sim0.50$)焊料合金的熔化特征。与 Sn-3.0Ag-0.5Cu 合金相比,随着稀土 Er 含量的增加,固相线温度 T_s 和液相线温度 T_i 均略微上升,固相线温度增加幅度要略大于液相线温度,而熔化区间 ΔT (即 $T_i - T_s$)均呈现先降低然后回升的趋势,当 Er 含量在 0.05%,熔化区间 ΔT 最小。从目前对熔点的研究情况来看,SnAgCu 焊料的熔点(液相线和固相线)偏高,固液相温差较大。研究表明,稀土Er 略微提高焊料的熔点,但可缩小熔化温度范围,提高焊料的流动性,减小形成焊接裂缝的可能性,改善钎焊工艺性。





2.2.2 电阻率

现代微电子产业正向高性能和微型化方向发展, 电子器件所承受的体积和焊点可靠性尺寸越来越小, 要求焊料具有低的电阻率^[16-17]。焊料电阻率过高会导 致这些微小钎焊接头局部电阻过大,造成电路局部高 温,甚至可能导致钎焊接头重熔失效,引起电路短路。 由于以上原因,电阻率成为了一项受人们密切关心的 焊料物理性能。图 5 中曲线 1 所示为稀土 Er 对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金电阻率的影响。从图中可知, 随着 Er 含量增加,除 Er 为 0.05%时焊料的电阻率略 微上升外,其余焊料的电阻率均低于未添加 Er 的焊 料,并且以 Er 含量为 0.25%时焊料的电阻率最小。由 此可见,稀土 Er 的添加(w(Er)≥0.10%)可略微降低焊 料的电阻率,表现出良好的导电性,在同等功率载荷 下,焊料发热减少,局部温度降低,同时,产生的热



图 5 Er 对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金电阻率和铺展面积的 影响

Fig.5 Influence of Er on resistivity and spread area of Sn-3.0Ag-0.5Cu solder

量可及时传导出去,使温度更趋于均匀化,从而减少 钎焊结构的热应力。

2.3 铺展性能

润湿性是指一种液态金属在一个固体表面铺展的 能力。对于焊料来说,能否与基板形成良好的浸润是 完成钎焊的关键。为了保证钎焊牢固,焊料必须很好 地润湿基板材料。影响焊料润湿性的主要因素^[18]有: 焊料和母材的成分、温度、金属表面氧化物、助焊剂、 母材表面的状态、表面活性物质等。焊料的可焊性检 验主要包括铺展面积、铺展率、浸润角、浸润时间和 附着力等指标。本实验通过测试焊料与 Cu 基板的铺 展面积来评价 Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er(*x*=0~0.50)焊料合金 的可焊性。

图 5 中曲线 2 所示为稀土 Er 含量对 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr 焊料合金钎焊铺展面积的影响。 从图中可以看出,随着 Er 含量增加,焊料铺展面积增加,但是当 Er 含量超过 0.10%后,焊料的铺展面积又 呈现逐渐下降趋势。实验表明,当稀土 Er 的添加量为 0.10%时可更好的改善 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料的润 湿性。

图 6 所示为稀土 Er 含量对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料 合金在 Cu 基板上铺展后表面状态的影响。从图中可 以看出,随着 Er 含量增加,焊料表面光亮度增加,但 是当 Er 含量超过 0.10%后,焊料表面开始呈现暗灰色, 表面光亮程度呈现逐渐下降趋势。结果表明,在 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金中添加微量的稀土 Er 可以改 善钎焊焊点表面质量,获得光亮的焊点;但当稀土 Er 含量超过 0.10%后,反而由于稀土 Er 氧化加剧导致焊



(1)

点表面残留氧化物量增加而降低了焊点表面质量。

对于体系铺展后的最终形状可由杨氏(Young)方程^[19]来描述:

$\sigma_{\rm sg} - \sigma_{\rm sl} - \sigma_{\rm lg} \cos \theta = 0$

式中 σ_{sg} 为固-气相界面张力; σ_{sl} 为液-气相界面张 力; σ_{lg} 为固-液相界面张力; θ 为平衡状态下的接触角。 由式(1)可以推导出接触角与各界面张力的关系:

 $\cos\theta = (\sigma_{\rm sg} - \sigma_{\rm sl})/\sigma_{\rm lg} \tag{2}$

接触角的大小表征了体系润湿与铺展能力的强 弱。钎焊时,一般希望液态焊料在母材上的接触角要 小于 20°。根据式(2)可知,为改善液态焊料对母材的 润湿性,要使 θ 角减小, cos θ 增大,即增大 σ_{sg} ,减 小 σ_{sl} 或 σ_{lg} 。从物理概念上说, σ_{lg} 减小意味着液体内 部原子对表面原子的吸引力减弱,液体原子容易克服 本身的引力趋向液体表面,使表面积扩大,焊料容易 铺展。 $\sigma_{\rm sl}$ 减小,表示固体对液体原子的吸引力增大, 使液体内层的原子容易被拉向固-液界面,也容易使 焊料铺展。由此可知,凡是能使 σ_{sl} 和 σ_{lg} 减小的因素 都可提高其润湿性能。稀土元素 Er 可以改善钎料合金 润湿性,主要是基于以下两个方面的原因:一是稀土 Er 的表面张力小^[20-21],可以降低液态焊料的表面张力 σlg,使得焊料流动性提高;另一方面就是稀土元素本 身为表面活性物质, 浸润性好, 有利于焊料合金流动, 充型能力好,从而使焊料的润湿性得到明显改善。但 同时由于稀土元素化学性质活泼,在钎焊过程中,易 于生成稀土化合物,将妨碍液态焊料在母材表面上的 铺展,降低焊料合金的润湿性。正是由于稀土元素 Er 对于液态焊料在基板母材的润湿铺展过程中存在上述 两个相反作用,导致稀土 Er 添加量存在一个临界值, 小于此临界值时,有利于改善焊料的润湿性能和表面 光亮程度。

2.4 抗腐蚀性能

现代电子产品正向高性能、高可靠性的方向发展, 由于新型无铅焊料的组成元素的过电位较低,因而采 用无铅焊料的焊接接头在潮湿的环境中,容易发生电 极极化反应,降低电路的可靠性,这对无铅焊料的研 究和使用是至关重要的。在室温 3%NaCl水溶液环境 下,采用动电位测定焊料合金的阳极极化曲线,考察 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr 焊料合金的抗腐蚀性能。

图 7 所示为 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr(x=0~0.50)焊料合 金的极化曲线。从图中可以看出,随着稀土 Er 含量的 增加, Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr(x=0~0.50)焊料合金的腐蚀 电位降低,腐蚀电流密度(J)增大,电极反应容易发生, 使得合金的耐蚀性能降低。利用塔菲尔直线外推法, 计算出各焊料合金的腐蚀电位和腐蚀速率,图 8 所示 为稀土 Er 含量对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金腐蚀电位 和腐蚀速率的影响。从图中可以看出,随着稀土 Er 含量的添加,腐蚀速率呈现出增大的趋势。这说明该





Fig.7 Polarization curves of Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er solders: (a) *x*=0; (b) *x*=0.05; (c) *x*=0.10; (d) *x*=0.25; (e) *x*=0.50



图 8 Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er 焊料合金的腐蚀电位和腐蚀速率 Fig.8 Corrosion potential and corrosion rate of Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er solders

系焊料合金中加入稀土元素 Er 会略微降低焊料合金的抗腐蚀性能。

2.5 力学性能

焊点的剪切强度和抗拉强度是焊料最为重要的 2 个力学性能指标。图 9 所示为稀土 Er 含量对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊料合金力学性能的影响。从图中可 知,随着稀土 Er 含量的增加,焊料合金的抗拉强度和 伸长率均随之增加。当 Er 含量为 0.10%时,抗拉强度 达到最大值;当 Er 含量为 0.25%时,抗拉强度降到未 添加稀土 Er 焊料的水平,但焊料伸长率却达到最大 值,随后又逐渐降低。剪切强度在稀土 Er 含量为 0.05% 达到最大值,随着含量增加,也明显地呈现下降趋势。 由前面的分析可知,一方面在 SnAgCu 焊料合金中加 入稀土 Er 后,可以细化 β-Sn 初晶,缩小共晶区域和 富 Sn 相区域的间距,使组织分布均匀;另一方面从 生成金属间化合物角度来考虑,由于稀土 Er 几乎不固 溶于 Sn 基体中,而是富集于相界面或晶界处,因此 在凝固过程中,适量的稀土 Er 有利于阻碍焊料中 Ag₃Sn 和 Cu₆Sn₅ 脆性 IMC(金属间化合物)的生成,并 细化这些 IMC 粒子,从而提高焊料合金的抗拉强度和 剪切强度。但稀土 Er 含量超过某一临界值后,会导致 焊料合金的晶界变宽、晶内富稀土 Er 析出相质点分布 不均匀以及富稀土 Er 的 IMC 量增多,结果使焊料合 金的强度和塑性呈现下降趋势。另外,从钎焊接头样 品的断面来看,随着稀土 Er 含量的增加,在钎焊界面 附近出现的气孔数量增多,这与文献报道的现象相一 致^[8],说明加入 Er 元素会使焊料的填缝能力显著下降, 明显降低焊料的剪切强度。



图 9 Er 含量对 Sn-3.0Ag-0.5Cu-xEr 焊料合金力学性能的 影响

3 结论

1) Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er(*x*=0~0.50)焊料合金中,微 量稀土 Er 可以减小焊料的熔化区间,改善焊接工艺 性。Er 含量为 0.05%时,熔化区间最小。随着 Er 含 量增加,焊料熔化温度有所上升,但变化不大。Er 的 添加对焊料的电阻率影响比较小,表现出良好的导电 性,略微降低焊料的抗腐蚀性能。

2)随着稀土 Er 含量的增加,焊料铺展面积增加。 当 Er 含量为 0.10%时,钎料铺展面积最大;当 Er 含量超过 0.10%时,焊料铺展面积则逐渐下降。

3) 微量稀土 Er 可以显著地改善 SnAgCu 焊料的 力学性能。当 Er 含量为 0.05%时,剪切强度为最大值, 当 Er 含量超过 0.05%后,剪切强度呈下降趋势。当 Er 含量增加到 0.10%时,抗拉强度最大。当 Er 含量

Fig.9 Effect of Er content on mechanical properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu-*x*Er solders

达到0.25%时,伸长率最大。

4) 随着 Er 含量的增加,焊料组织由树枝晶向等 轴晶转变,且组织逐渐细化。稀土 Er 在 SnAgCu 焊料 合金中的最佳添加量为 0.05%~0.25%。

REFERENCES

- [1] 娄浩涣. 无铅 BGA 封装可靠性的力学试验与分析[J]. 半导体 技术, 2005, 30(3): 36-40.
 LOU Hao-huan. Mechanical test and analysis on the reliability of lead-free BGA packaging[J]. Semiconductor Technology, 2005, 30(3): 36-40.
- [2] 张富文,刘 静,杨福宝,胡 强,贺会军,徐 骏. Sn-Ag-Cu 无铅焊料的发展现状与展望[J]. 稀有金属, 2005, 29(5):
 619-624.

ZHANG Fu-wen, LIU Jing, YANG Fu-bao, HU Qiang, HE Hui-jun, XU Jun. Developing tendency and current situation of Sn-Ag-Cu lead-free solder[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(5): 619–624.

- [3] Kim K S, Huh S H, Suganuma K. Effects of fourth alloying additive on microstructures and tensile properties of Sn-Ag-Cu alloy and joints with Cu[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43: 259–267.
- [4] 陈国海,耿志挺,马莒生,张 岳.新型无铅焊料合金
 Sn-Ag-Cu-In-Bi 的研究[J].电子元件与材料, 2003, 22(4): 36-38.
 CHEN Guo-hai, GENG Zhi-ting, MA Ju-sheng, ZHANG Yue. A

new type lead-free solder Sn-Ag-Cu-In-Bi[J]. Electronic Components & Materials, 2003, 22(4): 36–38.

[5] 刘 静,张富文,徐 骏,杨福宝,朱学新. 合金元素 Cr、 Al元素对SnAgCu基无铅焊料高温抗氧化和润湿性的影响[J]. 稀有金属,2006,30(1):16-20. LIU Jing, ZHANG FU-wen, XU Jun, YANG Fu-bao, ZHU Xue-xin. Effect of alloying elements Cr, Al on high-temperature oxidation resistance and wettability of SnAgCu based lead-free

solder[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(1): 16-20. [6] 张曙光,何礼君,张少明,石力开.绿色无铅电子焊料的研 究与应用进展[J]. 材料导报, 2004, 18(6): 72-75. ZHANG Shu-guang, HE Li-jun, ZHANG Shao-ming, SHI Li-kai. Progress of research and application of lead-free solder [J]. Materials Review, 2004, 18(6): 72-75.

- [7] Wu C M L, Yu D Q, Law C M T, Wang L. Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions[J]. Materials Science and Engineering R, 2004, 44(1): 1–44.
- [8] 陈志刚, 史耀武, 夏志东. 微量混合稀土对 SnAgCu 钎料合 金性能的影响[J]. 电子工艺技术, 2003, 24(2): 53-58.
 CHEN Zhi-gang, SHI Yao-wu, XIA Zhi-dong. Effect of mixed rare earth on the properties of SnAgCu lead-free solder alloy[J].
 Electronics Process Technology, 2003, 24(2): 53-58.

- [9] 卢 斌,张宇航,章四琪. 微量稀土 Ce 对 SnAgCu 系焊料合 金性能的影响[J]. 中国材料科技与设备, 2005, 2(4): 60-63. LU Bin, ZHANG Yu-hang, ZHANG Si-qi. Effect on the performances of SnAgCu lead-free solder with the addition of Ce[J]. Science and Technology and Equipment of Chinese Materials, 2005, 2(4): 60-63.
- [10] Mavoori H, Ramirez A G, Jin S. Lead-free universal solders for optical and electronic devices[J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(11): 1160–1165.
- [11] Ramirez A G, Mavoori H, Jin S. Bonding nature of rare-earth-containing lead-free solders[J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(3): 398–400.
- [12] Monn K W, Boettinger W J, Kattner U R, Biancaniello F S, Handwerker C A. Experimental and thermodynamic assessment of Sn-Ag-Cu solder alloy[J]. Journal of Electronic Materials, 2000, 29(10): 1122–1236.
- [13] 孙伟成,张淑荣,侯爱芹. 稀土在铝合金中行为[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 106-110.
 SUN Wei-cheng, ZHANG Shu-rong, HOU Ai-qin. The Behavior of Rare Element in the Aluminous[M]. Beijing: Weaponry Industry Press, 1992: 106-110.
- [14] 虞觉奇,易文质.二元合金状态图集[M].上海:上海科学技术出版社,1987:58-59.
 YU Jue-qi, YI Wen-zhi. State Atlas of Binary Alloy[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987: 58-59.
- [15] 菅沼克昭.无铅焊接技术[M]. 宁晓山,译. 北京:科学出版社, 2004: 44-45.

Suganuma K. Lead-Free Welding Technique[M]. NING Xiaoshan, transl. Beijing: Science Press, 2004: 44–45.

- [16] Zeng K, Tu K N. Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology[J]. Materials Science & Engineering R, 2002, 38(2): 55–105.
- [17] Amagai M. Mechanical reliability in electronic packaging[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4/5): 607–627.
- [18] 陈 铮,周 飞. 材料连接原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大 学出版社, 2001: 65-99.
 CHEN Zheng, ZHOU Fei. Material Joint Theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001: 65-99.
- [19] Young T. An essay on the cohesion of fluids[J]. Philosophical Transaction of the Royal Society of London, 1995, 1805(95): 65-87.
- [20] 徐光宪. 稀土(下册)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 473-499.

XU Guang-xian. Rare Earth(Vol.3)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 473–499.

[21] YAN Li-jun, XIE Yun-an, XING Xian-yan, QIAO Zhi-yu. Prediction of surface tension of pure liquid metals and alloys[J]. Journal of Rare Earth, 1999, 17(3): 182–188.

(编辑 杨幼平)