



稀土元素对 SnAgCu 钎料性能的影响

叶 焕,薛松柏,张 亮,皋利利,曾 广

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院,江苏 南京 210016)

摘要:综合评述了无铅化背景下 SnAgCu 系钎料合金的性能特点和研究现状,着重讨论分析了微量稀土元素的添加对 SnAgCu 系钎料润湿性能、力学性能、蠕变性能和显微组织的影响及其作用机理,并对具有广阔发展前景的 SnAgCuRE 系无铅钎料的研究与发展趋势进行了展望。

关键词:SnAgCu 钎料;稀土;润湿性能;力学性能;蠕变性能

中图分类号:TG425+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2009)10-0090-06

Effect of rare earths elements on properties of SnAgCu solder alloy

YE Huan, XUE Song-bai, ZHANG Liang, GAO Li-li, ZENG Guang

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the development of lead-free solders, the properties and research status of the SnAgCu solders was reviewed comprehensively. Effects of rare earths elements on wettability, mechanical property, creep property and microstructure of SnAgCu solders were discussed and comment respectively. Moreover, the prospect on lead-free SnAgCuRE solders was investigated and looked-ahead.

Key words: SnAgCu solder; rare earth elements; wettability; mechanical property; creep property

0 前言

随着钎焊技术的进步以及人们环保意识的增强,开发具有更高性能的环境友好性新型无铅钎料以适应环保和现代电子封装业的要求已成为微电子连接材料研究的新热点^[1-2]。在诸多电子封装用无铅钎料中,SnAgCu 系钎料合金因其具有相对较低的熔点、优良的物理力学性能以及良好的可焊性,已成为 SnPb 钎料中最有潜力的替代品之一^[3]。

然而,尽管与传统 Sn-Pb 钎料相比,SnAgCu 系钎料合金具有较好的综合性能,但仍存在一些缺陷,还需进一步改进并优化其性能,以满足实际应用的

需要。在众多的优化方案中,通过向该系钎料中加入微量元素的方法以改善焊点性能是当前研究的热点之一,而稀土元素因其对材料的变质作用大、有明显改性作用、成本相对较低等原因日益受到人们的重视^[4-6]。

本研究概述了目前国内外在 RE 对 SnAgCu 系钎料合金性能影响方面的最新研究成果,并着重分析讨论了微量稀土元素的添加对该系钎料润湿性能、力学性能、蠕变性能和显微组织的影响以及作用机理。

1 RE 对润湿性能的影响

钎焊时,熔融钎料润湿基体金属而形成接触界面,界面上的基体金属和钎料相互作用才会形成实现连接所必须的界面金属间化合物层或合金层,因此,钎料对母材的润湿是形成优良焊点的必要条件;钎料的润湿性是影响钎焊接头质量的关键因素之

收稿日期:2009-01-19;修回日期:2009-08-26

基金项目:2008 年南京航空航天大学大学生创新基金资助项目;2006 年江苏省“六大人才高峰”资助项目(06-E-020);江苏省普通高校研究生科技创新计划资助项目(CX07B_087z)

作者简介:叶 焕(1986—),男,湖北黄冈人,硕博连读研究生,主要从事无铅钎料及微电子焊接的研究。

—^[6-7]。相关研究表明,添加微量稀土元素可改善钎料合金的润湿性能。

Hao^[8]等人发现,向 Sn3.8Ag0.7Cu 合金中加入稀土 Y 会改变钎料的铺展面积和润湿角;当钎料中 $w(Y)=0.15\%$ 时,钎料获得最大的铺展面积和最小的润湿角,Sn3.8Ag0.7Cu 钎料合金获得最佳润湿性能。稀土 Y 对其铺展面积的影响规律如图 1 所示,这可能是由于稀土 Y 作为一种表面活性元素容易聚集于界面,降低液态钎料表面能,从而降低钎料和钎剂间的界面张力,获得较好的润湿性能;而当 Y 含量过多时,润湿性下降,这是由于在钎焊时 Y 容易氧化,生成的氧化物增加了液态钎料的表面张力,同时钎料粘性增大,致使润湿角增大。Shi^[9]等人研究了另一种重稀土 Er 对 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料性能的影响,发现添加质量分数为 0.25% 的稀土 Er 时,钎料合金能够获得相对较大的铺展面积,从而改善了钎料的润湿性能,其作用机理与稀土 Y 类似。

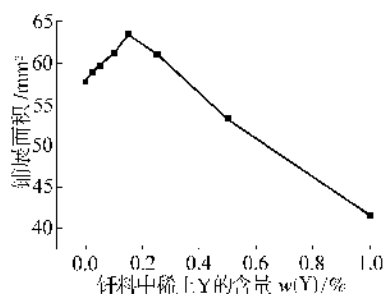


图 1 Sn3.8Ag0.7Cu(x)Y 钎料润湿性能与 Y 含量的关系

也有学者研究了轻稀土对钎料润湿性能的影响。Xue^[10-12]等人研究发现,当向 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料中加入质量分数为 0.03% 或 0.05% 的单一轻稀土 Ce 时,钎料的润湿性较加入其他成分略有提高。究其原因可能是由于所加的稀土 Ce 半径较大,亲氧性较强,可与氧气良好结合,因而减少了钎料、试件与氧气的接触,使钎料和试件表面生成氧化膜的几率减小,致使试件与钎料间的界面张力减小,使得润湿更容易发生,钎料的润湿性能得以改善。文献^[13-14]研究了微量轻稀土 La 对钎料润湿性能的影响;发现向 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料合金中添加质量分数为 0.1% 的 La 时,该钎料的润湿性显著提高。

还有不少研究人员将目光转向了探究混合稀土对 SnAgCu 钎料合金润湿性能的影响。Yu^[15]等人在研究 RE 对 Sn3.5Ag0.7Cu 钎料性能的影响时发现:向钎料中添入质量分数为 0.1% 的混合稀土时,钎料的润湿力提高,润湿角减小,其润湿性能得到一定的

改善;其原因是稀土元素的添加降低了液态钎料的表面张力^[15-16]。Law^[5,17]等人研究了加入混合 Ce 和 La 对 SnAgCu 合金钎料润湿性能的影响,发现添加适量的混合稀土时钎料可获得较好的润湿性能。Chen^[18]等人发现,向 Sn3.8AgCu 钎料中添加质量分数为 0.1% 的 Ce 基混合稀土时钎料润湿性最佳,而当 RE 含量低于 0.5% 时,润湿性改善效果不明显。还有学者发现,向 Sn2.5Ag0.7Cu 钎料中添加质量分数为 0.1% 的商用混合稀土时,该钎料在铜板上的润湿性能可接近 Sn-Pb 钎料的水平,继续添加稀土达 0.5% 时发现,组织中会出现稀土元素富集所形成的花瓣状稀土化合物,该化合物会阻止钎料合金在铜板上的润湿而降低合金的润湿性能^[19]。

2 稀土对蠕变性能的影响

蠕变变形被认为是钎焊接头的一种主要变形失效形式,钎料的蠕变特性是焊点可靠性的重要因素^[20]。在日益精细的间距设计以及越来越苛刻的服役环境条件要求下,如何进一步改善其焊点运行过程中的可靠性成为迫切需要解决的问题^[21-22]。文献研究表明,向 SnAgCu 钎料合金中添加微量稀土元素,可以明显提高钎料的抗蠕变能力,有效提高焊点可靠性。

Chen^[18,21,23]等人研究了添加微量混合稀土对 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料疲劳断裂寿命的影响。研究发现,在室温条件下,微量混合稀土的添加可以显著提高钎料接头的蠕变断裂寿命。当稀土质量分数为 0.1% 时,蠕变断裂寿命达最大值,为普通钎料的 7 倍以上;当稀土的质量分数大于 0.1%,接头的蠕变断裂寿命呈下降趋势;当稀土的质量分数为 1.0% 时,钎料接头的蠕变断裂寿命降至低于原 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料接头的水平,与 SnPb 钎料接头的蠕变断裂寿命相近。其原因是微量 RE 的加入有助于降低钎料界面能,使 RE 在晶界聚集形成网状结构,从而阻碍了晶界的滑移,使得接头蠕变抗力增大,蠕变断裂寿命提高,其变化规律示意如图 2 所示。而在 65 °C 温度下,接头蠕变断裂寿命提高得不多,最高只有 SnAgCu 钎料的两倍多,其原因是在较高的温度下,原子活性增强,而添加稀土改善钎料接头蠕变抗力的效果不明显。文献^[24-25]研究了微量混合稀土对低银 Sn2.5Ag0.7Cu 钎料疲劳断裂寿命的影响,发现在一定范围内,随着 RE 添加量的增加,焊点蠕变断裂寿命提高;当向该钎料合金中掺入质量分数为 0.1%

的 RE 时,焊点的疲劳断裂寿命达最大值。这是由于稀土元素的添加细化了焊点组织,并使 IMC 变得较为均匀,IMC 平均尺寸减小,从而提升钎料接头的蠕变性能。

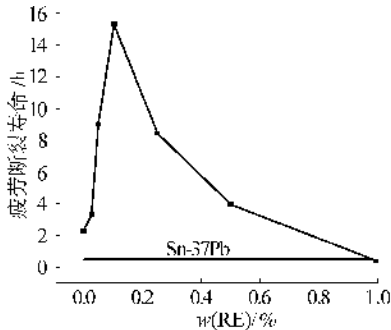


图 2 室温条件下 RE 含量对疲劳断裂寿命的影响(16.5 MPa)

相关研究表明,向 SnAgCu 钎料合金中添加单一稀土也会对钎料接头的蠕变性能产生明显的影响。文献[12]研究发现微量重稀土 Er 对焊点的蠕变断裂寿命有显著影响,当 $w(\text{Er})=0.1\%$ 时,Sn3.8Ag0.7Cu0.1Er 钎料的蠕变断裂寿命较原 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料提高 6.5 倍;当 $w(\text{Er})=0.25\%$ 时,钎料蠕变断裂寿命提高 7.1 倍。适量轻稀土 Ce 的添加也可显著提高钎料合金的蠕变性能。室温下,向 Sn3.0Ag2.8Cu 钎料中添加质量分数为 0.1% 的 Ce 可较大提高钎料的蠕变性能,所得合金的蠕变断裂寿命为原钎料的 9 倍多^[26]。这是由于微量的稀土 Ce 可细化钎料组织,减小了晶界附近的应变,并抑制空洞等缺陷的形成,从而提高了钎料的蠕变断裂寿命^[26-27]。

3 稀土对力学性能的影响

当钎料在母材上发生充分的润湿后,在钎料和母材之间会形成一个界面层,界面层的力学性能直接影响着焊点的可靠性。因此研究钎料合金成分对接头力学性能的影响具有重要意义^[28]。在当前研究中,向无铅钎料中添加微量稀土以影响钎料力学性能已取得了良好的试验结果^[27]。

3.1 对拉伸性能的影响

钎料的拉伸性能对 SMT 焊点的可靠性起着重要的作用。在稀土对无铅钎料拉伸性能的影响的研究方面,目前结论不一,仍存在争议^[13,18,29]。

Wu^[5,30]等人认为,随着稀土元素的加入,钎料组织得到细化,从而改善钎料合金的拉伸性能。向 SnAg 系钎料中添入质量分数为 0.5% 的 Ce 与 La 的混合稀土时,发现该无铅钎料的最大抗拉强度(UTS)提高了 15%,但过量稀土元素的添加会降低钎料的

抗拉强度和延伸率。研究认为这可能是由于过量的 RE 使得组织中脆硬的稀土相增多的缘故。Yu^[31]等人通过比较 Sn2.5Ag0.7Cu、Sn3.5Ag0.7Cu、Sn3.5Ag0.7Cu0.1RE 和 Sn3.5Ag0.7Cu0.25RE 钎料合金的性能时发现,适量 RE 的添加会提升钎料的拉伸性能。而文献[18,31]研究认为,稀土元素的添加对钎料拉伸强度的作用不大。本研究以 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料为研究对象,向其中添加 Ce 基混合稀土,试验发现,稀土作用十分有限,钎料的抗拉强度仅有略微提升,且仍然低于 SnPb 钎料的水平。但稀土元素的添加使钎料的延伸率有较大增强,最高可提升延伸率达 30%;该实验数据如表 1 所示。

表 1 钎料合金拉伸试验结果

钎料类型	最大抗拉强度 σ_b / MPa	延伸率 δ / %
Sn3.8Ag0.7Cu	43.31	21.0
Sn3.8Ag0.7Cu0.025RE	43.77	25.7
Sn3.8Ag0.7Cu0.05RE	44.95	27.2
Sn3.8Ag0.7Cu0.1RE	45.04	23.5
Sn3.8Ag0.7Cu0.25RE	45.17	22.2
Sn3.8Ag0.7Cu0.5RE	45.38	16.2
Sn3.8Ag0.7Cu1RE	45.80	14.8
SnPb	50.31	38.0

研究表明单一稀土可改善钎料合金的拉伸性能。文献[13-14]研究发现,单一稀土 La 对 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料的拉伸性能影响较为明显,当添加质量分数 0.1% 的 La 时,钎料的抗拉强度和延伸率均有明显提高;但当 La 含量超过 0.4%,会降低钎料合金的力学性能。轻稀土 Ce 也可明显提高 Sn3.0Ag2.8Cu 钎料的抗拉强度和延伸率,研究发现,无论试样为铸态还是轧制态,当其含 Ce 量小于 0.1% 时,随着 Ce 量的增加,钎料的抗拉强度和延伸率均有一定提高^[26,32]。重稀土 Er 对 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料拉伸性能影响也较明显,随着 Er 含量的增加,钎料合金的抗拉强度和延伸率均随之增加,当 Er 含量为 0.10% 时,钎料抗拉强度达到最大值;而当 Er 含量为 0.25% 时,其抗拉强度降至未添加稀土 Er 时的水平,但钎料伸长率却达到最大值,随后又逐渐降低^[33]。

3.2 对剪切性能的影响

钎料的剪切性能对焊点的疲劳失效特性和可靠性影响较大。相关研究表明,微量稀土元素的添加会对钎料合金的剪切性能产生影响。有学者研究了 Ce 对 SnAgCu 钎料合金剪切性能的影响。文献[11,34]向 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料中加入适量稀土钕发

现焊点剪切力增大,钎缝抗剪强度有明显提高。文献[32]研究表明稀土 Ce 也可提高 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料的剪切性能。Dudek^[35]等人研究发现:向 Sn3.9Ag0.7Cu 钎料中添加 La 会使钎料合金的最大抗剪强度呈下降趋势,而焊点失效时对应的应变增大,如表 2 所示。

表 2 钎料剪切试验结果

合金	最大抗拉强度 σ_b /MPa	失效时的 剪切应变/%
Sn3.9Ag0.7Cu	26.8±0.2	94±5
Sn3.9Ag0.7Cu0.1La	23.4±1.4	164±67
Sn3.9Ag0.7Cu0.5La	17.3±0.5	239±22

稀土元素 Er 的添加也会影响到钎料的剪切性能。Shi^[9,36]等人在向 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料中添加稀土 Er 时发现:当 Er 含量在 0.1% 时,钎料剪切强度可增加 18%;随着稀土含量的进一步增加,强度又逐渐降低,当稀土含量超过 0.5% 时,剪切强度变化不明显,但仍高于 SnAgCu 钎料。文献[33]研究了 Er 对 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料剪切性能的影响,发现 Er 含量为 0.05% 时,该钎料的剪切强度达最大值,稀土 Er 的继续加入会使得焊料填缝能力显著下降,明显降低焊料的剪切强度。

文献[37]研究表明,单一重稀土 Y 也可提升钎料的剪切性能。本研究向 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料中加入 0.25% 的 Y 后发现合金获得了较大的剪切强度。还有人研究了 Y 的氧化物 Y₂O₃ 对钎料性能的影响。该研究以 Sn3.0Ag0.5Cu 为试验对象,发现当向钎料中添加适量的 Y₂O₃,焊点的剪切强度明显提高^[38-39]。

Li^[34]等人研究发现稀土还可以减缓 SnAgCu 系钎料合金时效过程剪切强度下降的速率。他们发现,向 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料中添加适量混合 RE 后,所获得的 Sn3.8Ag0.7Cu0.1RE 钎料在时效处理时,其剪切强度的降低速率明显低于原 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料剪切强度的降低速率。

4 稀土对微观组织的影响

钎料的性能在很大程度上取决于其微观组织的形貌特征^[29,40]。SnAgCu 系钎料合金的微观组织主要由初晶 β -Sn 相、Cu₆Sn₅ 和 Ag₃Sn 三相组成^[41],典型的 SnAgCu 钎料铸态组织形态分布示意如图 3 所示^[17]。

研究表明稀土元素对 SnAgCu 钎料的微观组织有很大影响。这是由于 RE 在 SnAgCu 钎料体系中具有明显的亲 Sn 现象,稀土元素与 Sn 的活度相互

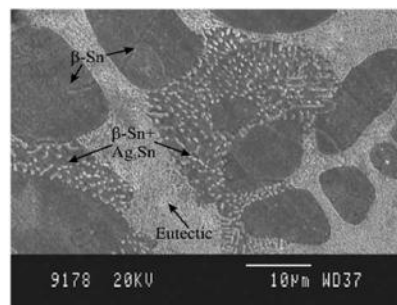


图 3 Sn3.5Ag0.7Cu 钎料组织示意

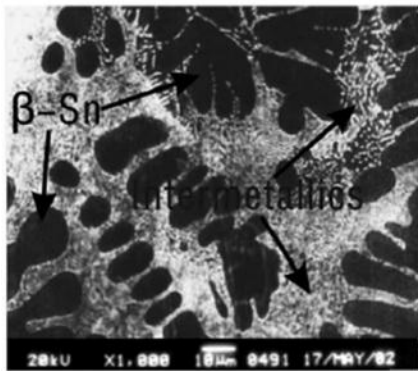
作用系数负值很大,形成 RE-Sn 化合物的趋势也很大,从而导致 Sn 的活性下降。因此,在 SnAgCu 钎料中加入微量的稀土元素,可以抑制金属间化合物的生长,减小 Sn 与其他元素结合的驱动力,细化钎料组织,从而改善钎料性能^[42]。

Yu^[15]等人在向 Sn3.5Ag0.7Cu 合金中添加 Ce 与 La 的混合稀土时研究发现:组织中粗大 β -Sn 相的生长受到抑制;与此同时,Cu₆Sn₅ 和 Ag₃Sn 相得到细化和均匀化,有效改善钎料综合性能。稀土含量不同时该钎料的显微组织形貌分布如图 4 所示。

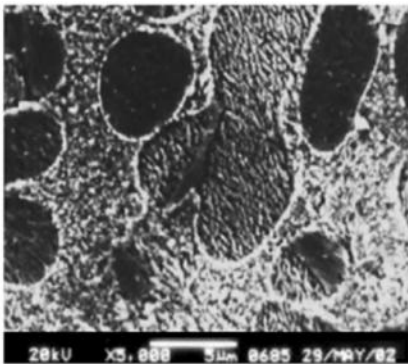
文献[43]研究了 RE 对 Sn3.8Ag0.7Cu 钎料合金微观组织和 IMC 的影响,实验数据表明,添加适量铈镧混合稀土可抑制金属间化合物(IMCs)的生长,当 RE 含量在 0.1% 时,接头界面光滑平整,板状和针状 IMC 明显少于其他情况,合金性能得到改善。文献[40]还发现在混合稀土添加量达 0.1% 时,该钎料组织内部会出现如图 5 所示的雪花状稀土相。

在单一稀土对钎料显微组织影响的研究方面,有关镧系稀土特别是 La 和 Ce 的研究也有相关报道。Dudek 等在文献[35,44]中研究发现,向 Sn3.9Ag0.7Cu 钎料中加入适量稀土元素 La 时,组织中会生成树枝状 La₃Sn 相,该相在钎料凝固时提供更多的非均质成核质点,有效细化钎料组织,改善钎料性能。文献[14]也发现质量分数为 0.1% 的稀土 La 可使 Sn3.0Ag0.5Cu 钎料合金晶粒细化,显著提高钎料性能;而过量 La 会使钎料组织中形成粗大 La₃Sn 初生相,降低合金性能。

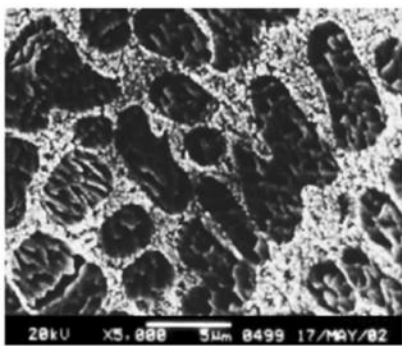
文献[10,45]研究发现,稀土 Ce 可使 SnAgCu 钎料组织中的长条状 Ag₃Sn 和块状 Cu₆Sn₅ 相变细变小,改善合金性能;但随着 Ce 量的增多,钎料中会产生黑色富 Ce 相,形成 Ce 与 Sn 的化合物,降低钎料性能产生。文献[32]认为,Ce 作为一种活性元素,在进入钎料组织内部时将产生吸附效应,可抑制金属间化合物(IMCs)的长大,细化晶粒,从而提高焊



a Sn3.5Ag0.7Cu



b Sn3.5Ag0.7Cu0.1RE



c Sn3.5Ag0.7Cu0.25RE

图 4 Sn3.5Ag0.7Cu(x)RE 钎料组织示意

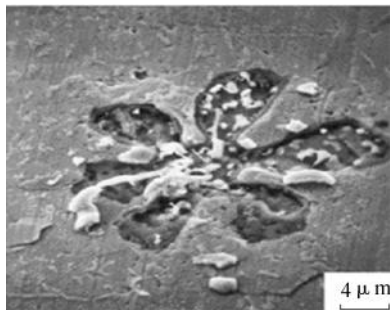


图 5 Sn3.8Ag0.7CuLa 钎料组织中的稀土相

料合金的性能。Zhao^[20]等人在向 Sn3.0Ag2.8Cu 中添加一定量的稀土 Ce 后发现,在焊点内部出现如图 6

所示的鱼骨状的稀土化合物相,对钎料合金的力学性能产生不利影响。



图 6 Sn3.0Ag2.8CuCe 钎料组织中的 La₃Sn 相

研究发现在一定范围内随着 Er 含量的增加, Sn3.8Ag0.7Cu 钎料合金的组织由树枝晶向等轴晶转变,且组织逐渐细化。对于稀土 Y 对钎料组织的影响,文献[37]研究认为,由于 Y 的活性和熔点较高,因而可吸附并沉积在合金晶粒表面以抑制其长大,且稀土 Y 也有可能充当晶粒形核的质点,从而细化组织,提高合金性能。

5 结论与展望

从综合性能角度考虑,添加微量稀土元素对 SnAgCu 系钎料合金性能的优化作用明显。

(1)微量稀土元素的添加可增大 SnAgCu 系钎料在母材上的铺展面积,减小其润湿角;即添加适量稀土元素对 SnAgCu 钎料的润湿性能有提升作用。

(2)稀土元素的添加可改善钎料的力学性能;RE 对钎料蠕变性能的改善作用尤其明显,无论是单一稀土还是混合稀土的添加均可显著提高 SnAgCu 钎焊接头的蠕变断裂寿命,提升钎料的蠕变性能。

(3)向钎料中添加适量的稀土元素可细化组织,影响焊点界面化合物的形貌,抑制金属间化合物的过度生长,因而可改善钎料合金的综合性能。

随着电子工业的发展,电子器件也向超高密度、微型化方向发展,因此对无铅钎料性能和焊点的可靠性要求也越来越高。新型 SnAgCuRE 钎料合金在综合性能和焊点可靠性的提高方面表现出了极大的潜力,围绕这一新型钎料的相关研究和开发工作具有广阔的发展前景。


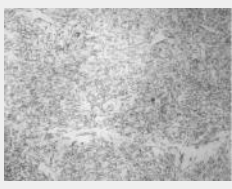
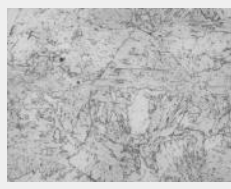
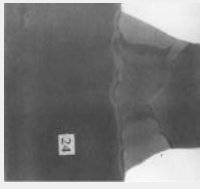
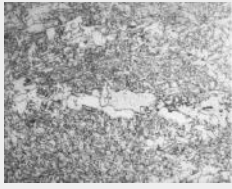

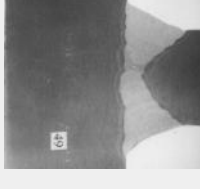
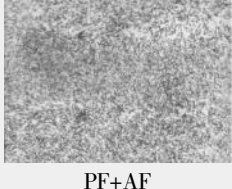

参考文献:

[1] 薛松柏,姚立华,韩宗杰,等.半导体激光工艺参数对 Sn-Ag-Cu 钎料润湿性影响分析[J].焊接学报,2005,26(12): 39-42.

- [2] 菅沼克昭.无铅焊接技术[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] Anders I E. Alloying Effects in near-eutectic Sn-Ag-Cu solder alloys for improved microstructure stability[J]. Journal of electronic materials, 2001, 9(30): 1050.
- [4] 李 攀, 史耀武, 夏志东, 等. 添加微量稀土元素的 SnAgCu 无铅钎料的研究[J]. 电子工艺技术, 2004, 9(5): 193-195.
- [5] Wu C M, L, Yu D Q, Law C M T. Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions[J]. Materials Science and Engineering, 2004, 44(1): 1-44.
- [6] Lu B, Wang J H, Li H, *et al.* Effect of cerium on microstructure and properties of Sn-0.7Cu-0.5Ni[J]. Journal of the Chinese Rare Earth, 2007, 25(2): 217-222.
- [7] Suganuma K. Advances in lead-free electronics soldering[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2001, 5(1): 55-64.
- [8] Hao H, Tian J, Shi Y W, *et al.* Properties of Sn_{3.8}Ag_{0.7}Cu solder alloy with trace rare earth element Y additions[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(7): 766-774.
- [9] Shi Yaowu, Jun Tian, Hu Hao, *et al.* Effects of small amount addition of rare earth Er on microstructure and property of SnAgCu solder[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 453(1-2): 180-184.
- [10] Xue Songbai, Yu Shenglin, Wang Xuyan, *et al.* Effects of rare earth element Ce on solder abilities of micron-powdered Sn-Ag-Cu solder[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(6): 1285-1289.
- [11] 薛松柏, 陈 燕, 吕晓春, 等. 稀土元素 Ce 对锡银铜无铅钎料润湿性及钎缝力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2005, 10(6): 1-3.
- [12] 陈 燕. 稀土铈对锡银铜无铅钎料组织性能的影响[D]. 哈尔滨: 机械科学研究院, 2006.
- [13] 周迎春, 潘清林, 何运斌, 等. La 对 Sn-Ag-Cu 无铅钎料组织与性能的影响[J]. 电子工艺技术, 2007, 6(28): 341-345.
- [14] Zhou Yingchun, Pan Qinglin, He Yunbin, *et al.* Microstructures and properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder alloys containing La[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(S1): 1043-1048.
- [15] Yu D Q, Zhao J, Wang L. Improvement on the microstructure, stability, mechanical and wetting properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder with the addition of rare earth elements[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 376(1-2): 170-175.
- [16] Wu C M L, Law C M T. The wettability and microstructure of Sn-Zn-RE alloys[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(2): 63-69.
- [17] Law C M T, Wu C M L, Yu D Q, *et al.* Microstructure, solderability and growth of intermetallic compounds of Sn-Ag-Cu-RE lead-free solder alloys[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(1): 89-93.
- [18] Chen Zhigang, Shi Yaowu, Xia Zhidong, *et al.* Properties of lead-free solder SnAgCu containing minute amounts of rare earth[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 4(32): 235-243.
- [19] Zhang Keke, Cheng Guanghui, Yu Yangchun. Effect of rare earths on microstructure and properties of Sn_{2.0}Ag_{0.7}Cu-RE solder alloy[C]. International Conference on Electronic Packaging Technology, 2005.
- [20] Mahmudi R, Geranmayen A R, Bakherad M, *et al.* Indentation creep study of lead-free Sn-5%Sb solder alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 45(1-2): 173-179.
- [21] 陈志刚. SnAgCuRE 钎焊接头蠕变行为的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- [22] Zhang Liang, Xue Songbai, Han Zongjie, *et al.* Mechanical properties of fine pitch device soldered joints based on creep model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(6): 82-85.
- [23] Chen Zhigang, Shi Yaowu, Xia Zhidong. Constitutive Relations on Creep for SnAgCuRE Lead-Free Solder Joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(9): 964-971.
- [24] Zhang Keke, Yang Jie, Wang Yaoli, *et al.* Research on creep properties of SnAgCuRE lead-free soldered joints[C]. International Conference on Electronic Packaging Technology, 2006.
- [25] Cheng Guanghui, Zhang Keke, Man Hua, *et al.* Effect of rare earths on microstructure and properties of Sn_{2.0}Ag_{0.7}CuRE solder alloy for surface mount technology[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2005, 23(4): 486-489.
- [26] Zhao Xiaoyan, Zhao Maiqun, Cui Xiaoqing, *et al.* Effect of cerium on microstructure and mechanical properties of Sn-Ag-Cu system lead-free solder alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(4): 805-810.
- [27] 冯武锋, 王春青, 李明雨. 电子元件焊接中的钎料合金研制及设计方法[J]. 电子工艺技术, 2000, 21(2): 47-59.
- [28] Shohji I, Yoshida T, Takahashi T, *et al.* Tensile properties of Sn-Ag based lead-free solders and strain rate sensitivity[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 366(1): 50-55.
- [29] Wu C M L, Yu D Q, LAW C M T, *et al.* Microstructure and mechanical properties of new lead-free Sn-Cu-RE solder alloys[J]. Journal of Electronic Material, 2002, 31(9): 928-932.
- [30] Wu C M L, Yu D Q, Law C M T, *et al.* Improvements of microstructure, wettability, tensile and creep strength of eutectic Sn-Ag alloy by doping with rare earth elements[J]. Materials Research Society, 2002, 31(9): 3146-3154.
- [31] 陈志刚, 史耀武, 夏志东, 等. 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.
- [32] 张宇航, 卢 斌, 戴贤斌, 等. Ce 对 SnAgCu 系无铅焊料合金组织和性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2007, 1(4): 295-298.
- [33] 卢 斌, 栗 慧, 王娟辉, 等. 稀土 Er 对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 无铅焊料合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 518-524.

- [34] Li Guangdong, Shi Yaowu, Hao Hu, *et al.* Effect of rare earth addition on shear strength of SnAgCu lead-free solder joints[J]. Journal of Material Science: Materials in Electronics, 2005, 40(13): 3361-3366.
- [35] Dudek M A, Sidhu R S, Chawla N, *et al.* Microstructure and mechanical behavior of novel rare-earth-containing Pb-free solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(12): 2088-2097.
- [36] 田 君, 郝 虎, 史耀武, 等. SnAgCuEr 系稀土无铅钎料的显微组织与性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(2): 281-283.
- [37] 郝 虎, 田 君, 史耀武, 等. SnAgCuY 系稀土无铅钎料的显微组织与性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(2): 121-123.
- [38] Wang L, Yu D Q, Han S Q, *et al.* The evaluation of the new composite lead free solders with the novel fabricating process[C]. International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability, 2004.
- [39] 刘晓英, 于大全, 马海涛, 等. Y₂O₃ 增强 Sn-3Ag-0.5Cu 复合无铅钎料[J]. 电子工艺技术, 2004, 25(4): 156-159.
- [40] Chen Zhigang, Shi Yaowu, Xia Zhidong, *et al.* Study on the Microstructure of a novel lead-free solder alloy SnAgCu-RE and its soldered joints[J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(10): 1122-1128.
- [41] Lewis D, Allen S, Notis M, *et al.* Determination of the eutectic structure in the Ag-Cu-Sn system[J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(2): 161-167.
- [42] Ma X, Qian Y Y, Yoshida F. Effect of La on the Cu-Sn intermetallic compound(IMC) growth and solder joint reliability[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 334(1): 224-227.
- [43] Li Bo, Shi Yaowu, Lei YongPing, *et al.* Effect of rare earth element addition on the microstructure of Sn-Ag-Cu solder joint[J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(3): 217-224.
- [44] Dudek M A, Sidhu R S, Chawla N. Novel rare-earth-containing lead-free solders with enhanced ductility[J]. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 2006, 58(6): 57-62.
- [45] 陈 燕, 薛松柏, 吕晓春, 等. 稀土元素 Ce 对锡银铜无铅钎料显微组织的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 17-27.
- [46] 田 君, 郝 虎, 史耀武, 等. SnAgCuEr 系稀土无铅钎料的显微组织[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 31-34.

表 8 Q420qE 钢焊接金相(部分)

项目	宏观酸蚀照片	焊缝组织(400×)	过热区组织(400×)
50+50 对接 Q420qE SAW H60Q+SJ105q		 PF+AF	 B
44+36 熔透角接 Q420qE MAG WER60+φ(Ar)80%+φ(CO ₂)20%		 PF+AF	 B
44+36 熔透角接 Q420qE FCAW Sup71h+CO ₂		 PF+AF	 B

《南京大胜关长江大桥主桥钢梁制造规则》和设计技术要求。施工实践证明本次焊接工艺评定对不同的焊接工艺因素进行了考虑,涵盖了全部焊缝;为制定焊接工艺指导书打下基础,在此基础上制定焊接工艺规程和工艺措施合理,焊缝一次探伤合格率高,保证了大桥的焊接质量达到优良水平。

参考文献:

- [1] 中铁大桥勘测设计院.南京大胜关长江大桥钢梁制造规则[S], 2007.
- [2] 周孟波, 秦顺全. 芜湖长江大桥大跨度低塔斜拉桥板桁组合结构建造技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [3] 武汉钢铁集团. 中铁大桥勘测设计院高强度 Q420 结构钢应用研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.