

金合金导电环用低脆性钎料研究*

牟国情, 曲文卿, 寇璐璐, 庄鸿寿

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 采用共晶 SnPb 钎料和自制 InPbAg 钎料对导电环中的金合金片与镀银铜导线进行钎焊连接, 对两种钎焊接头显微组织、化合物成分、硬度及力学性能进行对比分析, 探讨自制 InPbAg 钎料对接头脆性的影响。结果表明: SnPb 钎料/金合金界面产生层状分布的 IMC 层, 主要成分为 AuSn_2 、 AuSn_4 、 Ag_3Sn 等脆性金属间化合物; InPbAg 钎料/金合金界面 IMC 层很薄, 主要成分为 AuIn_2 、 Ag_2In 化合物相, 其硬度均低于 SnPb 接头界面 IMC 层硬度, 说明 InPbAg 接头界面金属间化合物脆性相对较低。力学性能分析显示, InPbAg 接头力学性能稳定性相对较高, SnPb 接头为脆性断裂, InPbAg 接头为塑性断裂。

关键词: 金合金; 导电环; 脆性; 界面金属间化合物 (IMC); 钎料

Study on Low Brittleness Solder for Gold Alloy Conductive Ring

MU Guoqian, QU Wenqing, KOU Lulu, ZHUANG Hongshou

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The soldering test of gold alloy sheet and silver plated copper wire in conductive ring by using eutectic SnPb solder and self-made InPbAg solder was carried out. The microstructure, compound composition, micro-hardness and mechanical property of the two kinds of soldering joints were compared and analyzed, and the influence of the self-made InPbAg solder on the brittleness of the joints was discussed. The results show that the SnPb solder / gold alloy interface produces a layered IMC layer, and the composition is brittle intermetallic compounds of AuSn_2 , AuSn_4 , Ag_3Sn ; IMC layer of InPbAg solder / gold alloy interface is very thin with the composition of AuIn_2 , Ag_2In phase, and their hardness are all lower than that of SnPb joint, which indicates that the brittleness of InPbAg intermetallic compound is relatively low. The mechanical property analysis shows that the mechanical properties of InPbAg joints are relatively stable, SnPb joints are brittle fracture, and InPbAg joints are plastic fracture.

Keywords: Gold alloy; Conductive ring; Brittleness; Intermetallic compound (IMC); Solder

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.084

导电环是实现两个相对转动机构的电流、图像、数据信号及动力传递的精密输电装置, 可用于任何要求旋转并连续传输电源和数据信号的机电系统领域^[1], 广泛应用于宇航陀螺仪表、惯性导航平台和地球卫星、医疗、航空、军事、船舶等机电设备上^[2]。

为了满足长寿命、高可靠等要求, 导电环材料一般都采用贵金属及其合金或电镀贵金属及其合金的复合材料 (基底多为铜合金)^[3]。贵金属基电接触材料所具有的优异性能是一般金属电接触材料所无法比拟的^[4], 采用金合金刷丝对偶金合金滑环的导电环具有功率/体积比高、磨损率小、耐环境能力强等特点, 是许多航空

机构功率及信号传输环节的重要组成部分。尽管金及金合金的连接方法很多, 但钎焊连接仍作为其主要的连接方法, 目前导电环与导线或转接金属板的连接大多使用 SnPb 钎料和电烙铁手工焊接。

对于金合金而言, Au 易溶于 Sn^[5], 金合金采用 SnPb 钎料焊接时, 会发生金元素向钎料的溶解, 且 Au 在熔融共晶 SnPb 钎料中的溶解速度很快, 随着熔融钎料温度的增长, Au 溶解速度的增长呈非线性关系, 其溶解速率随温度的变化曲线如图 1 所示^[6]。冷却时在交界面产生 AuSn_4 、 AuSn_2 等斜方形脆性金属间化合物^[7], 这些金相脆性较强, 使钎焊接头变脆, 在振动等力学环境下容易断裂, 并且其对焊点的热疲劳特性起破坏作用, 使焊点在热循环过程中易于损坏, 严重影响整个产

* 基金项目: 国家科技部重点研发计划重点专项(2017YFB0305701)。

品的可靠性。 AuSn_2 和 AuSn_4 的生成速率非常快,接近 $1\mu\text{m/s}$ ^[8]。共晶 SnPb 钎料只有在严格控制钎焊温度和钎焊时间使金与锡的化合物减至最少量的情况下,方可被使用^[9]。因此要保证金合金导电环焊接可靠性,必须严格控制焊接过程中脆性金属间化合物的产生,需要研制低脆性或无脆性钎料。金基软钎料对金层无溶蚀现象,是高可靠金及金合金焊接的常用钎料,但是金基软钎料的熔点和钎焊温度偏高,仅适用于保护气体钎焊,不利于导电环的焊接。

本文针对金合金导电环采用 SnPb 钎料钎焊时的金脆性问题,研制适用于金合金导电环的低脆性钎料。由于铜与贵金属的亲合力较低,溶金速度只是锡的 $1/13\sim 1/14$ ^[10],并且 In-Pb 合金是一类固溶体(其二元合金相图如图 2 所示^[11]),其所有配方的固相线和液相线温度非常接近(均为近共晶),因此选用 In-Pb 系钎料。然后对共晶 SnPb 钎料、低脆性钎料钎焊接头显微组织、化合物成分、硬度及力学性能进行对比分析,探讨低脆

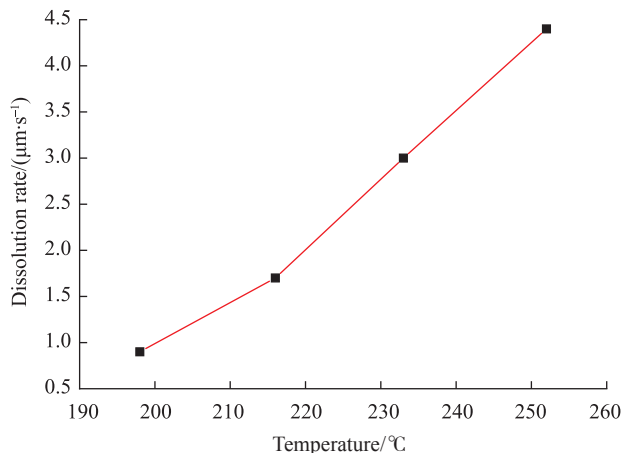


图1 Au在共晶SnPb钎料中的溶解速率随温度的变化

Fig.1 Variation of dissolution rate of Au in eutectic SnPb solder with temperature

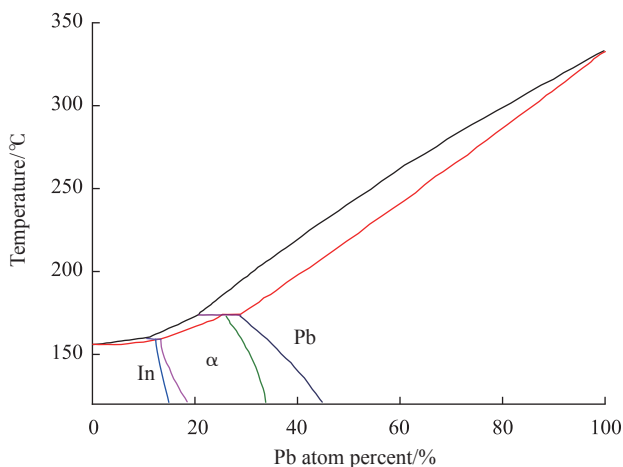


图2 In-Pb二元合金相图

Fig.2 In-Pb binary phase diagram

性钎料对接头脆性的影响。

1 试验材料及方法

采用共晶 SnPb 焊料(Sn 63%, Pb 37%)和自制 InPbAg 焊料分别将导电环中的金合金片与镀银铜导线钎焊连接。金合金片的化学成分为 60Au-34Ag-6Cu (%),尺寸为 $20\text{mm}\times 5\text{mm}\times 1\text{mm}$ 。镀银铜导线的直径为 1mm,长度为 20mm。焊接间隙 1.5mm,焊剂为 $\text{ZnCl}_2+\text{NH}_3\text{Cl}$,焊接设备为智能控温焊台。

采用锡、铅、铜、银(纯度均为 99.99%)等熔炼制备钎料:首先分别称取相应重量的组成成分,向石英坩埚内倒入少量钎剂覆盖剂,放于加热到一定温度的电热炉上,分别将称量好的金属依次放入坩埚内,当全部金属都熔融后,不断搅拌,使其充分发生反应,保温一定时间将熔融钎料倒出,清洗表面覆盖剂后即可使用。采用 DSC 热分析仪测试自制 InPbAg 钎料的熔化温度,结果如图 3 所示。由图 3 可知,自制 InPbAg 钎料的固相线温度为 175.1°C ,液相线温度为 196.2°C ,均满足金合金导电环与铜导线焊接的要求。焊接试样的制备:将钎料放置在金合金片表面,加热至 230°C ,保持一定时间直至钎料完全融化,将铜导线放入融化的钎料中,冷却至室温。

本次热时效试验,选择试验温度(125 ± 3) $^\circ\text{C}$ 、存储时间 96h,所用设备为鼓风干燥箱。本次热循环试验,选择极限温度 -55°C 和 100°C 、循环次数 100 次,所用设备和材料为鼓风干燥箱、保温容器、液氮、酒精和低温温度计等。

采用拉伸试验机(ISTRON)对两种钎焊接头的力学性能进行评价,其拉伸速率为 $0.5\text{mm}/\text{min}$,每组拉伸结果均采用 5 个试样的平均值。高温剪切性能测试要保持接头在 120°C 温度下,选用直径 6mm、高度 120mm 的加热电炉对接头进行加热,温度的调节控制通过调压器及热电偶实现。采用维氏硬度计(Mitutoyo HM-113)测试两种接头的显微硬度,试验加载载荷

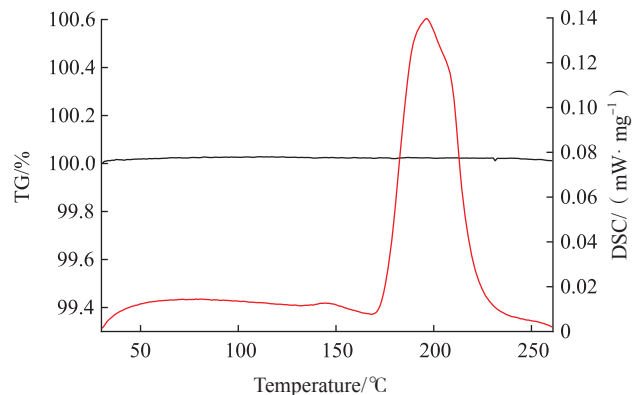


图3 自制InPbAg钎料的DSC曲线

Fig.3 DSC curve of InPbAg solder

为 10g, 加载时间为 15s。采用日立 S-530 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 观察钎焊接头的显微组织和拉伸断口形貌。用能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 与 X 射线衍射仪 (X-Ray Diffractometer, XRD) 分析界面金属间化合物 (IMC) 的相组成及其在钎焊接头中的分布。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

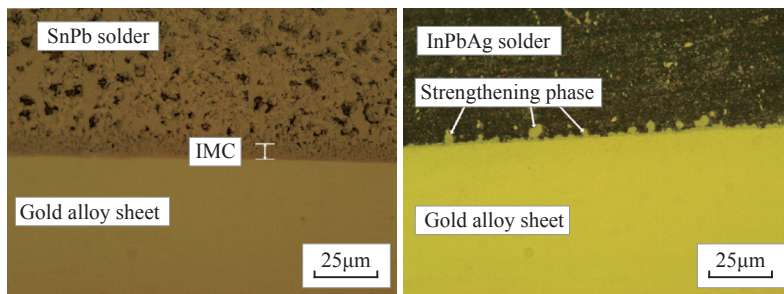
图 4 所示为两种钎焊接头显微组织照片。图 4 (a) 可以看出, SnPb 钎料 / 金合金界面处产生层状分布的金属间化合物层, 厚度约为 10 μm 。图 4 (b) 可以看出, InPbAg 钎料内部存在较多细小强化相, InPbAg 钎料 / 金合金界面处没有产生明显金属间化合物层, 只是钎料中的强化相在界面上聚集, 并没有形成连续较厚的金属间化合物层。

图 5 为两种钎焊接头界面组织成分测试照片^[12], 其中图 5 (a) 为 SnPb 钎料 / 金合金界面组织成分照片, 可知, 靠近金合金侧第 1 层界面 IMC 层 (①层) 主要为 AuSn₂ 相, 并存在少量 Ag₃Sn 相; 离界面较远较厚的第 2 层 IMC 层由多种化合物相组成, 经放大分析测试如图 5 (b) 所示, 可知, 第 2 层 IMC 层 (②层) 主要由浅灰色的 AuSn₄ 相和深灰色 Ag₃Sn 相组成, 两种物相交替均

匀分布, AuSn₄ 相数量较多, Ag₃Sn 相数量较少, 其中白色相为富 Pb 相, 这是因为金合金中 Au、Ag 原子比约为 1:1, 而 Au 与 Sn 反应形成一个 AuSn₄ 相需要一个 Au 原子, Ag 与 Sn 反应形成一个 Ag₃Sn 相需要 3 个 Ag 原子, 所以 AuSn₄ 相数量约为 Ag₃Sn 相数量的 3 倍, 存在白色富 Pb 相是由于金合金中的 Au 和 Ag 原子与 SnPb 钎料中的 Sn 原子反应形成 AuSn₄ 和 Ag₃Sn 相的过程中消耗了大量 Sn, 使钎料中局部 Sn 浓度降低从而导致富 Pb 相的形成^[13]。图 5 (a) 下部为钎料层, 钎料中存在较多细长棒状 AuSn₄ 相, 其中白色相为富 Pb 相, 黑色相为富 Sn 相。

由 SnPb 钎料 / 镀银铜导线的界面组织成分照片可知^[14], SnPb 钎料 / 铜导线界面存在一层较薄的金属间化合物层, 厚度约为 2~3 μm , 李敏雪等^[14]认为该物相为 Cu₆Sn₅ 相, Cu₆Sn₅ 相在长期热时效服役过程中会出现空洞等缺陷, 进一步降低焊接结构的服役寿命^[15], 并且铜导线表面的镀银层已经被钎料完全溶解吸收掉, 正是由于表面镀银层的溶解消失, 不能继续保护铜导线, 才导致 Cu 与钎料的反应。

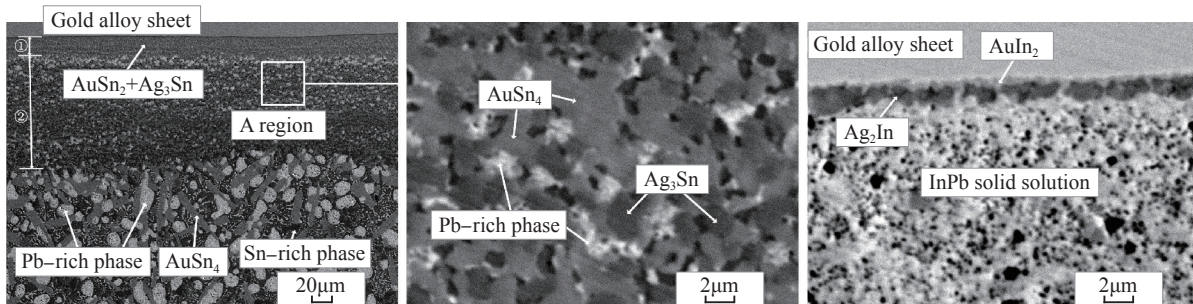
由 InPbAg 钎料 / 金合金界面组织成分照片图 5 (c) 可知, 界面处靠近金合金侧存在一层颜色较浅且很薄的 IMC 层, 厚度不到 1 μm , 分析其为 AuIn₂ 相。研究发现 AuIn₂ 金属间化合物层比较软, 工作温度在 125 $^{\circ}\text{C}$ 以



(a) SnPb 钎料接头 (b) InPbAg 钎料接头

图4 两种钎焊接头显微组织对比

Fig.4 Comparison of microstructure of two soldered joints



(a) SnPb 钎料 / 金合金界面

(b) A 区组织放大图

(c) InPbAg 钎料 / 金合金界面

图5 两种钎焊接头界面组织成分分析

Fig.5 Analysis on the microstructure of two soldered joints

下时,钢与金生成的金属间化合物具有很柔和的特性,并且不会变脆,当对此施以更大的热循环时能产生无裂纹变形^[16]。第2层颜色较深不连续的金合金化合物层,是钎料中强化相在界面聚集而成,分析其为 Ag_2In 相,钎料中也存在少量 Ag_2In 相,钎料基体成分为In-Pb固溶体相。

由InPbAg钎料/镀银铜导线界面组织成分照片可知^[14],InPbAg钎料/铜导线界面也存在一层IMC层,靠近钎料一侧为 Ag_2In 相,靠近铜导线一侧主要为Ag,说明镀银层未完全扩散溶解到钎料中。由图4(b)和5(c)可知,钎料中的强化相 Ag_2In 相容易向界面处聚集, Ag_2In 相聚集在界面处,阻碍了镀银层向钎料中的溶解。以上说明InPbAg钎料可抑制铜导线侧镀银层向钎料中溶解,从而保护铜导线表面的镀银层,进而避免了Cu与钎料的进一步反应。

2.2 接头显微硬度分析

接头的微观组织决定性能,接头在化合物成分上的差异又会在硬度上表现出来,硬度与脆性存在一定对应关系,硬度越高脆性越大。两种钎焊接头显微硬度测试照片如图6所示^[12]。可知,SnPb接头各区域硬度分布不均匀,金合金母材硬度为229.6HV,第1层IMC层硬度为289.5HV,第2层IMC层硬度降低,约为121.2HV,SnPb钎料硬度更低,为14.6HV。结合钎焊接头界面组织成分分析,第1层是由 $AuSn_2$ 和 Ag_3Sn 组成的IMC层,其硬度值最高,说明 $AuSn_2$ 相硬度较高脆性较高;第

2层硬度值降低,这是因为其组织成分为 $AuSn_4$ 、 Ag_3Sn 相和少量富Pb相,富Pb相硬度较低导致。第1层硬度比金合金母材硬度要高,第2层IMC层硬度降低,钎料的硬度最低,这种硬度分布对SnPb钎焊接头力学性能稳定性很不利。

由于InPbAg钎料/金合金界面IMC层厚度很薄,主要是由 Ag_2In 和 $AuIn_2$ 两种物相构成,其硬度分别为90.2HV(Ag_2In 相)、55.8HV($AuIn_2$ 相),均低于SnPb接头界面IMC层硬度,说明InPbAg接头界面金属间化合物硬度较低,脆性相对较低。

2.3 接头力学性能分析

对两种钎焊接头进行常温和高温力学性能测试,分析接头的剪切力学性能,结果如图7所示。常温下,SnPb接头和InPbAg接头强度分别为64.93MPa和52.31MPa。经高温拉伸后,两种接头强度均明显下降,SnPb接头强度下降到36.7MPa,下降43.5%;InPbAg接头强度下降到29.62MPa,下降43.6%。说明高温120℃的环境对两种接头力学性能均有较大影响。比较而言,在常温下,InPbAg接头强度为SnPb接头强度的80%;在高温120℃时,InPbAg接头强度为SnPb接头强度的81%,说明两种接头抵抗高温能力相当。

对两种钎焊接头热时效和热循环后的力学性能进行测试,分析接头的剪切力学性能,结果如图8所示。经125℃/96h热时效后,SnPb接头强度为54.99MPa,下降15.30%;InPbAg接头强度为54.77MPa,上升

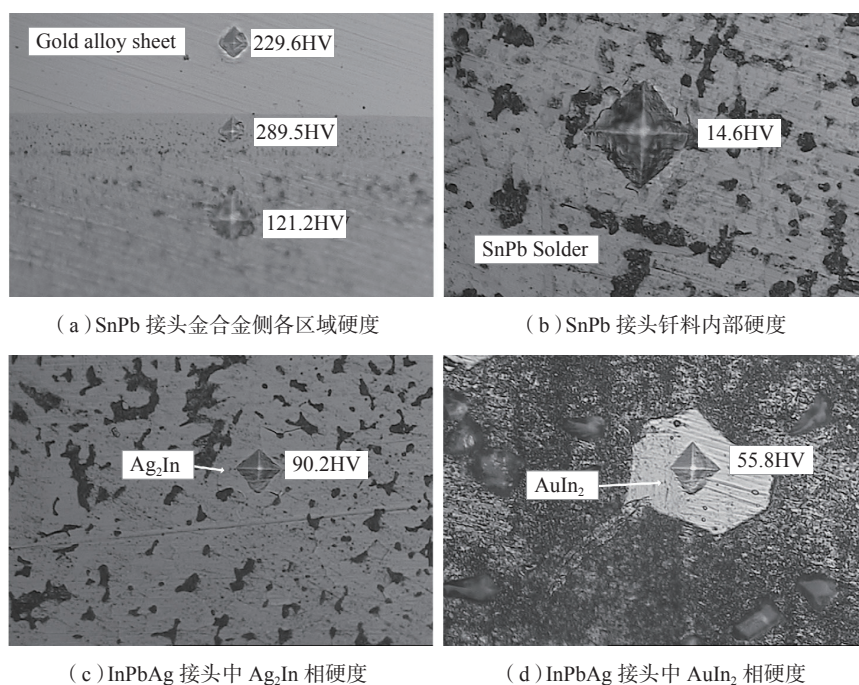


图6 两种钎焊接头显微硬度分析

Fig.6 Analysis on microhardness of two soldered joints

4.70%。经 -55~100℃ /100 次热循环后, SnPb 接头强度为 54.85MPa,下降 15.52% ; InPbAg 接头强度为 52.27MPa,下降 0.07%,说明 InPbAg 接头抵抗环境变化

能力相对较强,性能稳定性相对较高。

两种钎焊接头常温、高温时载荷位移曲线如图 9 所示,可知, SnPb 接头为明显的脆性断裂,当载荷达到最

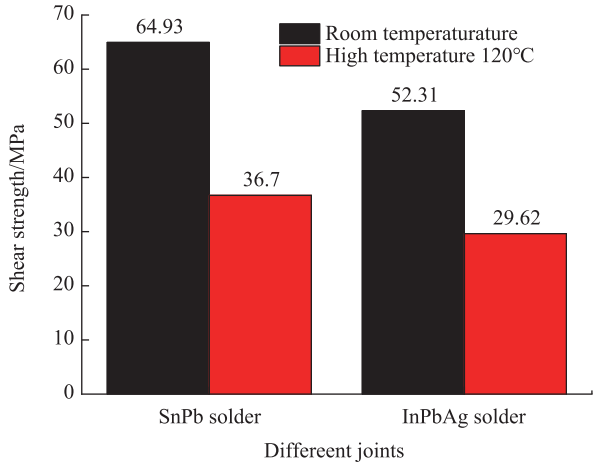


图7 两种钎焊接头常温、高温时剪切强度对比

Fig.7 Comparison of shear strength of two soldered joints at room temperature and high temperature

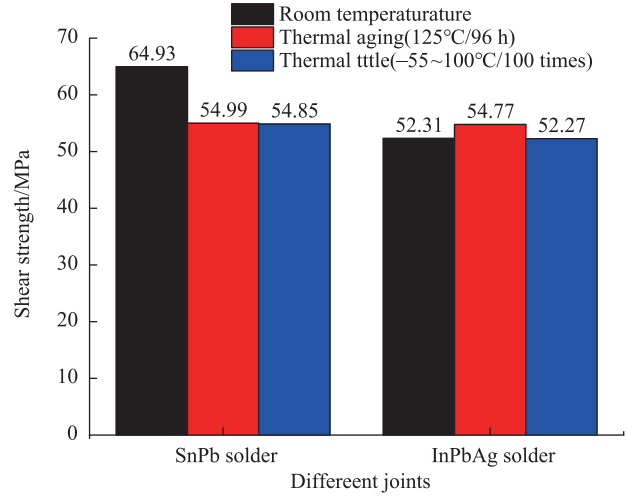


图8 两种钎焊接头热时效、热循环后剪切强度对比

Fig.8 Comparison of shear strength of two soldered joints after thermal aging and thermal cycling

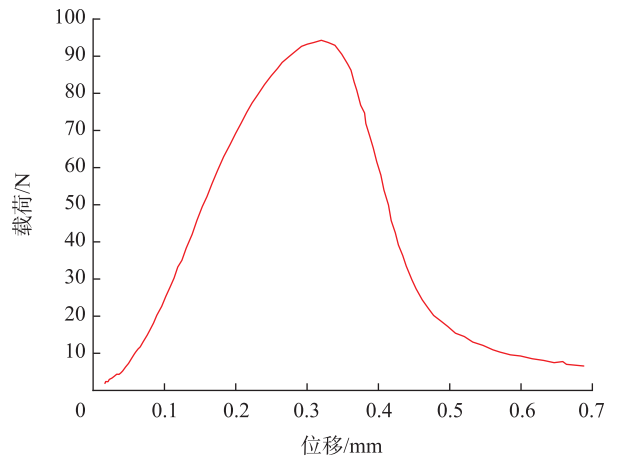
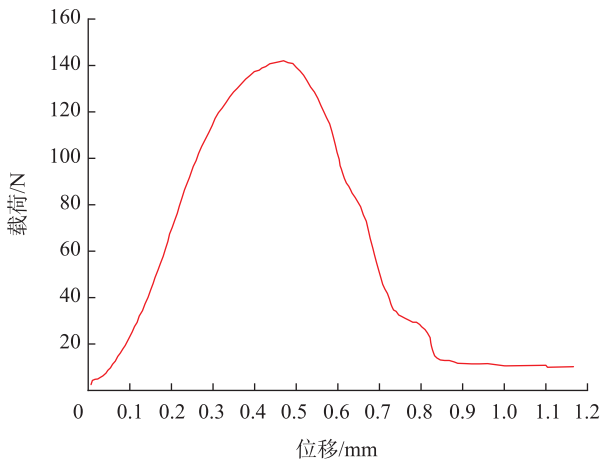
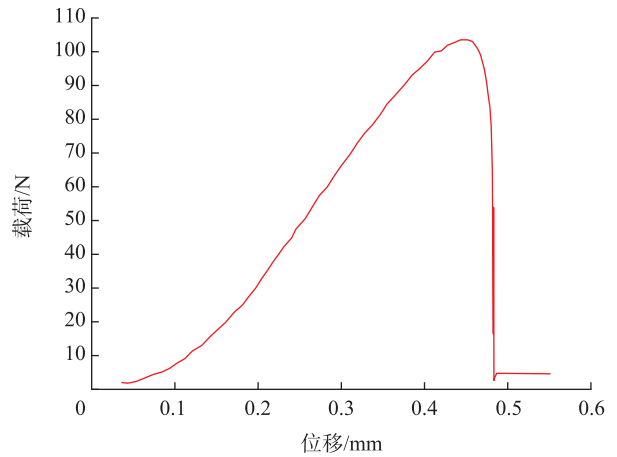
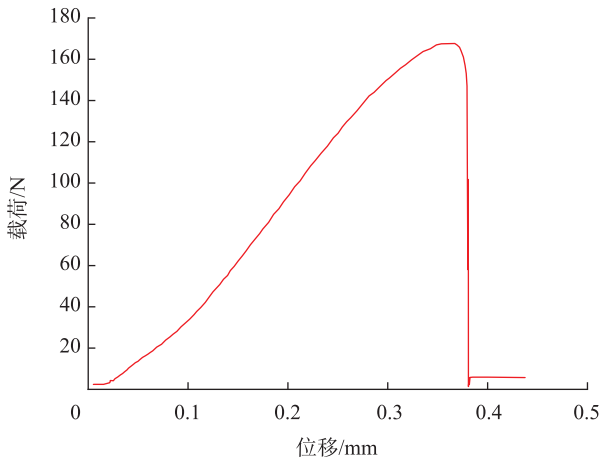


图9 两种钎焊接头常温、高温时载荷-位移曲线对比

Fig.9 Comparison of tensile curve of two soldered joints at room temperature and high temperature

高值时马上发生断裂,不存在屈服现象; InPbAg 接头为塑性断裂,弹性变形后存在屈服变形阶段,从载荷达到最大值发生断裂开始,随着剪切位移的增加,载荷是缓慢降低的,直至接头完全被剥离。这说明 SnPb 接头在服役过程中可能发生脆性断裂,而 InPbAg 接头具有了一定的塑性。研究也表明,钎焊连接界面结合层发生塑性变形需要承受应力时宜选用钢基钎料,钢基钎料的抗疲劳性远高于锡铅钎料^[17]。

通过接头断口形貌进一步分析其力学性能,图 10 给出了两种接头常温和热时效后剪切断口形貌。SnPb 接头断裂发生在靠近金合金侧,但不是紧贴金合金断裂,可能是由于接头界面过渡层较厚且化合物硬度梯度较大造成;由图 10 (a)可看出,SnPb 接头断口为明显的脆性断裂,不存在韧窝和撕裂岭,断口很平整,能明显看到有被剥离的现象;图 10 (b)显示,热时效后 SnPb 接头虽然有一定程度的塑性,但仍以脆性为主。由图 10 (c)可知,InPbAg 接头断口为塑性断裂,断口表面有明显的韧窝,晶粒有明显被拉长的现象;图 10 (d)显示,InPbAg 接头热时效后断口仍为塑性断裂。以上说明 InPbAg 钎料接头具有一定的塑性。

3 结论

(1) SnPb 钎料 / 金合金界面产生层状分布的 IMC

层,主要成分为 $AuSn_2$ 、 $AuSn_4$ 、 Ag_3Sn 等脆性金属间化合物; InPbAg 钎料 / 金合金界面 IMC 层很薄,主要成分为 $AuIn_2$ 、 Ag_2In 化合物相。SnPb 钎料 / 铜导线界面 IMC 层厚度约为 $2\sim 3\mu m$,成分为 Cu_6Sn_5 相; InPbAg 钎料 / 铜导线界面 IMC 层很薄,成分为 Ag_2In 相。另外 InPbAg 钎料有保护铜导线表面镀银层的作用。

(2) SnPb 接头各区域硬度分布不均匀,金合金母材硬度为 229.6HV,第 1 层 IMC 层硬度为 289.5HV,第 2 层硬度为 121.2HV,SnPb 钎料硬度为 14.6HV。InPbAg 钎料 / 金合金界面的 Ag_2In 相硬度为 90.2HV, $AuIn_2$ 相硬度为 55.8HV,均低于 SnPb 接头界面 IMC 层硬度,说明 InPbAg 接头界面金属间化合物脆性相对较低。

(3) 常温下,SnPb 接头和 InPbAg 接头强度分别为 64.93MPa 和 52.31MPa;高温条件下,强度分别降低 43.5% 和 43.6%;热时效后,强度分别下降 15.30% 和上升 4.70%;热循环后,强度分别下降 15.52% 和 0.07%。说明 InPbAg 接头力学性能稳定性相对较高。载荷位移曲线和断口形貌显示,SnPb 接头为明显的脆性断裂,InPbAg 接头为塑性断裂。SnPb 接头断裂发生在靠近金合金侧,但不是紧贴金合金断裂。

参考文献

[1] 衣伟,毛书勤.圆柱式通孔导电环装配工艺技术[J].电子

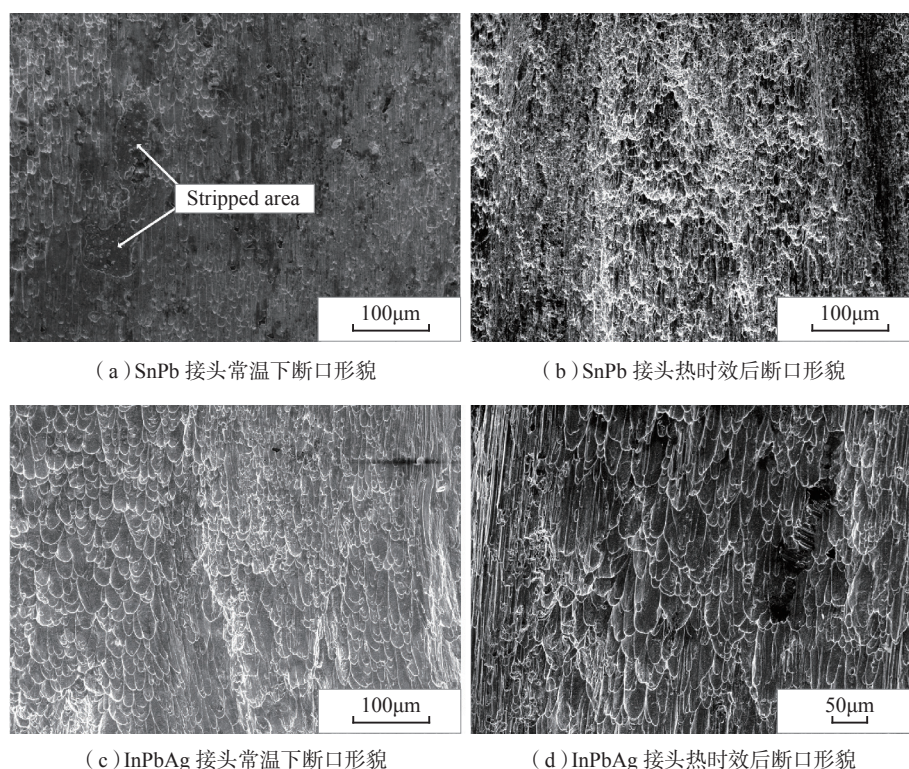


图10 两种接头常温、热时效后剪切断口形貌

Fig.10 Micro-fractography of two soldered joints by SEM

工艺技术, 2010, 31(5): 293-295.

YI Wei, MAO Shuqin. Cylindrical through-hole conductive ring assembly technology[J]. Electronic Technology, 2010, 31(5): 293-295.

[2] 张会林, 张凤山. 精密导电环在高速高温真空环境中输电特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 461-463.

ZHANG Huilin, ZHANG Fengshan. Transmission characteristics of precision conducting rings in high speed and high temperature vacuum environment[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2003, 22(6): 461-463.

[3] 薛萍, 陈少兵, 刘丽. 电滑环中的导电环和电刷[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2012(1): 11-13, 25.

XUE Ping, CHEN Shaobing, LIU Li. Conductive rings and brushes in electric slip ring[J]. Fiber and Cables in the Slip Ring and Their Application Technology, 2012(1): 11-13, 25.

[4] 马晓东, 余建军, 赵涛. 贵金属电接触材料的发展概况[J]. 山东工业技术, 2016(19): 255-256.

MA Xiaodong, YU Jianjun, ZHAO Tao. Development of precious metal electrical contact materials[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(19): 255-256.

[5] CHANG C W, HO C E, YANG S C, et al. Kinetics of AuSn₄ migration in lead-free solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(11): 1948-1954.

[6] BADER W G. Dissolution of Au, Ag, Pd, Pt, Cu and Ni in a molten tin-lead solder[J]. Weld Journal, 1969, 28(12): 551-557.

[7] LAURILA T, VUORINEN V, MATTILA T. Analysis of the redeposition of AuSn₄ on Ni/Au contact pads when using SnPbAg, SnAg, and SnAgCu solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(1): 103-110.

[8] HO C E, CHEN Y M, KAO C R. Reaction kinetics of solder-balls with pads in BGA packages during reflow soldering[J]. Journal of Electronic Materials, 1999, 28(11): 1231-1237.

[9] BERWER D H. Solder for sick gold packing[J]. Welding Journal, 1970, 49(10): 465-470.

[10] 杨英惠. 厚的黄金喷镀件用的铜-铅合金[J]. 现代材料动态, 2004(9): 9.

YANG Yinghui. Indium lead alloy for thick gold spray parts[J]. Modern Material Dynamics, 2004(9): 9.

[11] MINIC D, ZIVKOVIC D, ZIVKOVIC Z, et al. Contribution to phase diagram investigation of Pb-In binary system[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2003, 74(3): 915-922.

[12] 尹娜, 曲文卿, 杨淑娟. 金合金锡铅软钎焊接头脆性行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 670-673.

YIN Na, QU Wenqing, YANG Shujuan. Brittleness behavior of gold alloy joint soldered with tin-lead solder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 670-673.

[13] 李福泉, 王春青, 杜森, 等. SnPb 钎料与 Au/Ni/Cu 焊盘反应过程中 Au 的分布[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 53-56.

LI Fuquan, WANG Chunqing, DU Miao, et al. Distribution of Au in reaction between SnPb solder and Au/Ni/Cu pad[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(1): 53-56.

[14] 李敏雪, 曲文卿, 代国琴, 等. AuNi₉ 导电环刷丝的钎料成

分改进及性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(1): 73-76.

LI Minxue, QU Wenqing, DAI Guoqin, et al. Solder composition improvement and performance analysis for the AuNi₉ conductive ring brush wire[J]. Aerospace Materials Technology, 2015, 45(1): 73-76.

[15] 尹立孟, 位松, 李望云. 电子封装用低银含量无铅钎料的研究和应用进展[J]. 焊接技术, 2011, 40(2): 1-5.

YIN Limeng, WEI Song, LI Wangyun. Progress in research and application of lead-free solders with low silver content for electronic packaging[J]. Welding Technology, 2011, 40(2): 1-5.

[16] 王立群. 宇宙空间用金属材料[J]. 国外稀有金属动态, 1991, 7(7): 425-427.

WANG Liqun. Metallic materials used in space[J]. Foreign Rare Metal Dynamics, 1991, 7(7): 425-427.

[17] LEE C C, WANG C Y, MATIJASEVIC G. Au-In bonding below the eutectic temperature[J]. Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1993, 16(3): 311-316.

通讯作者: 曲文卿, 副教授, 研究方向为航空宇航先进钎焊技术及基础理论, E-mail: quwenqing@buaa.edu.cn. (责编 铃兰)

(上接第83页)

[10] 李俊焯, 许颖, 杨立峰, 等. 非直线管零件的磨粒流加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(13): 1729-1734.

LI Junye, XU Ying, YANG Lifeng, et al. Experimental study on abrasive flow processing of non-linear pipe parts[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(13): 1729-1734.

[11] VENKATESH G, APURBBA K S, NITISH S. Simulation of media behaviour in vibration assisted abrasive flow machining[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015, 51: 1-13.

[12] FURUMOTO T, UEDA T, AMINO T, et al. A study of internal face finishing of the cooling channel in injection mold with free abrasive grains[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1742-1748.

[13] 张焜州, 明伟伟, 安庆龙, 等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(4): 447-451.

ZHANG Hongzhou, MING Weiwei, AN Qinglong, et al. Application of response surface method in surface roughness prediction model and parameter optimization[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(4): 447-451.

[14] 武文革, 刘丽娟, 范鹏, 等. 基于响应曲面法的高速铣削 Ti6Al4V 表面粗糙度的预测模型与优化[J]. 制造技术与机床, 2014(1): 39-43.

WU Wenge, LIU Lijuan, FAN Peng, et al. Prediction model and optimization of surface roughness of high speed milling Ti6Al4V based on response surface method[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2014(1): 39-43.

通讯作者: 刘维伟, 博士, 副教授, 研究方向为先进复合材料结构设计制造和 3D 打印精确成形工艺, E-mail: liuwv@nwpu.edu.cn. (责编 一元)