

外能辅助下 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni/Cu 钎焊 接头组织与性能

崔建国¹, 张柯柯^{1,2}, 赵迪¹, 马宁¹, 曹聪聪¹, 潘毅博¹

(1. 河南科技大学, 河南 洛阳 471023)

(2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心 河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 采用 SEM、EDS、XRD 等方法研究了超声、电场外能辅助下 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni/Cu 钎焊接头的组织与性能。结果表明, 借助于超声、超声-电场外能辅助能细化 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni/Cu 钎焊接头钎缝组织并使共晶组织比例增加, 界面区金属间化合物(IMC)平均厚度、粗糙度和界面 IMC 颗粒尺寸减小。超声和电场外能辅助下 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni/Cu 钎焊接头强度与其界面 IMC 层粗糙度密切相关, 超声的作用更为显著, 在超声-电场外能辅助钎焊接头界面 IMC 层粗糙度降低中占主导作用, 施加超声-电场外能辅助下钎焊接头剪切强度与传统钎焊相比提高 24.1%; 施加超声、超声-电场外能辅助使 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni/Cu 钎焊接头断裂途径由钎缝和界面 IMC 层组成的界面过渡区向钎缝侧迁移, 呈界面 (Cu,Ni)₆Sn₅ IMC 解理和钎缝解理+韧窝的脆-韧混合型断裂机制, 使接头剪切断口塑性区比例增加, 从而提高接头剪切强度。

关键词: Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni 无铅钎料; 超声-电场外能; 钎焊接头; 组织; 性能

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)09-2800-07

随着电子产品向高功率、高密度及高可靠性的方向发展和人们环保意识的增强, 对微连接无铅焊点质量和可靠性提出了更高要求, 开发环境友好、高可靠性的微连接用无铅钎料已成为该领域的研究热点之一^[1]。我国开发的独具特色 SnAgCuRE 系无铅钎料具有良好的发展潜力, 被认为是 Sn-Pb 钎料的最佳替代品之一^[2,3]。人们借助于合金化方法向无铅钎料合金中添加微量合金元素(如 RE、Ni)以提高钎料性能^[2-4], 如我国开发的低银高强韧 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni 钎料合金, 具有显著的技术经济效益。为适应苛刻条件无铅焊点高可靠性的要求, 钎焊时引入外能辅助(如超声振动、电场等)能有效去除氧化膜促进钎料润湿, 实现微连接无铅钎料的无卤高质量钎焊^[5-9]。但迄今为止, 关于外能辅助下无铅钎焊接头的研究还鲜见报道^[3,5]。本实验以 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni 钎料合金为研究对象, 在钎焊过程中辅以超声和电场, 研究外能辅助下钎焊接头组织与性能, 为环境友好高强韧高可靠性钎焊技术的开发提供理论实验依据。

采用纯度为 99.9% 的 Sn、Ag、Cu、Ni 以及含 Ce 和 La 的混合稀土(RE)作为原料, 在真空度为 5×10^{-3} Pa 的非自耗电炉(ZHW-600A)中制备 Sn_{2.5}Ag_{0.7}Cu_{0.1}RE_{0.05}Ni 钎料合金。实验试样为纯度 99.9% 的紫铜板, 钎剂为商用 CX600 水洗钎剂。

实验钎焊试样尺寸如图 1 所示。试样待焊表面用砂纸打磨、丙酮清洗, 将制备好的钎料合金轧制成 13 mm×20 mm×0.1 mm 的薄带, 在自行设计制造的外能辅助钎焊炉(见图 2)中钎焊。参考前期研究^[3,5]选钎焊温度为 270 °C, 钎焊时间为 240 s; 达到钎焊温度时开始施加超声和超声-电场外能辅助, 超声-电场外能辅助工艺参数为超声功率 88 W、超声施加时间 45 s, 电场强度 1.5 kV/cm、电场施加时间 60 s。

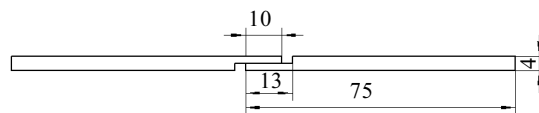


图 1 钎焊试样形状及尺寸

Fig.1 Configuration and dimension of specimen for soldering (mm)

1 实验

收稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1604132); 国家国际科技合作专项(2014DFR50820); 河南省科技创新杰出人才计划(154200510022); 河南省创新型科技团队

作者简介: 崔建国, 男, 1991 年生, 硕士生, 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023, E-mail: 1559206321@qq.com

将外能辅助钎焊接头沿纵向剖开用树脂镶嵌, 经打磨、抛光后 4%硝酸乙醇溶液腐蚀, 用 JSM-5610LV 扫描电镜观察钎焊接头组织形貌, 必要时借助于 EDS 能谱进行成分分析。为观察钎焊接头界面 IMC 俯视形貌, 用 20%盐酸乙醇溶液腐蚀, 并经超声波清洗处理。外能辅助钎焊接头剪切实验在 AG-I250kN 型万能材料试验机上室温下进行(拉伸速率为 1 mm/min, 取 5 个试样的平均值), 并借助于 EDS 能谱对剪切断面进行必要的成分分析和 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪物相分析。

参照文献[10]中关于微连接焊点界面厚度、粗糙度的测量方法(界面 IMC 粗糙度测量见图 3), 利用 AutoCAD 软件测量 5 个随机区域的接头界面 IMC 面积求得接头界面 IMC 的平均厚度。以平均厚度为基准线(见图 3 虚线), 测量选定区域界面 IMC 的峰值到基准线间的距离, 按公式(1)计算界面 IMC 粗糙度 R_{rms} (5 个随机区域的平均值)。基于定量金相学原理^[11]测量界面 IMC 颗粒平均截线长(L)以定量表征界面 IMC 颗粒大小。

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Z_i^2}{N}} \quad (1)$$

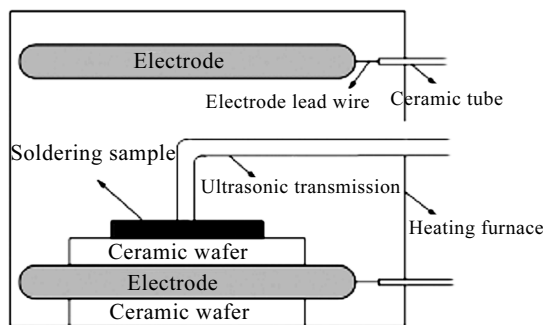


图2 钎焊装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the soldering process

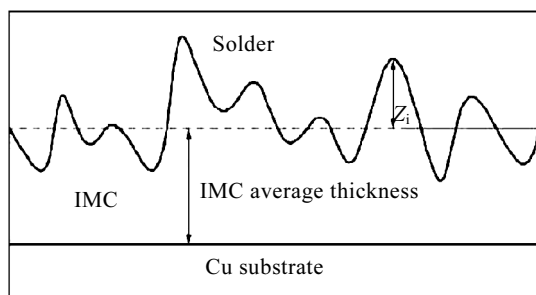


图3 钎焊接头界面粗糙度示意图

Fig.3 Schematic of R_{rms} at the solder joint interface

式中: R_{rms} 为粗糙度, μm ; N 为所选区域测量点的数目 ($N \geq 15$); Z_i 为所测量选定区域的 IMC 峰值曲线到测量基准线间的距离, μm 。

2 结果与分析

2.1 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头组织

图 4 为超声-电场辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE-0.05Ni/Cu 钎焊接头显微组织及分析结果。由图 4 可知, 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头包括母材区、界面区和钎缝区 3 部分。其中界面区为“扇贝状”的 IMC 层, 由界面向钎缝不规则生长有两层组成, 靠近铜基体侧的 Cu_3Sn 和靠近钎缝侧的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ ^[3,12]; 钎缝区由初生 $\beta\text{-Sn}$ 和网状共晶组织组成, 共晶组织包括颗粒状 $\beta\text{-Sn} + \text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 和针状的 $\beta\text{-Sn} + \text{Ag}_3\text{Sn}$ 二元共晶组织, 以及 $\beta\text{-Sn}$ 、 Cu_6Sn_5 和 Ag_3Sn 组成的三元共晶组织^[3]。由图 4c 的超声-电场辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断面 XRD 图谱可知, 外能辅助钎焊接头存在以 Cu_6Sn_5 为基的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 相和 Ag_3Sn 相, 这表明钎焊接头界面 IMC 和钎缝共晶组织中存在的 Cu_6Sn_5 相被 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 取代。这是由于 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni 钎料中加入的 Ni 元素, 与 Cu 原子具有相同的晶体结构, 在钎焊过程中 Ni 原子置换出 Cu_6Sn_5 中部分 Cu 原子而形成了 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ ^[12]所致。界面区 IMC 尚未发现 Cu_3Sn (见图 4b), 这可能是由于界面区 Cu_3Sn IMC 层较薄而未被检测到。

图 5 为外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头钎缝显微组织。由图 5 可知, 超声-电场辅助钎焊接头钎缝区组织与传统钎焊接头钎缝组织一样, 由初生 $\beta\text{-Sn}$ 和网状共晶组织组成。与传统钎焊接头钎缝区组织为初生 $\beta\text{-Sn}$ 尺寸较大、形状不规则(见图 5a)相比, 超声-电场辅助钎焊接头钎缝区初生 $\beta\text{-Sn}$ 尺寸较小、形状近似等轴状, 且共晶组织比例较多(见图 5b)。这可能是由于超声振动的引入使钎焊接头铜基体受到液态钎料的冲蚀, 界面 IMC 断裂被带到液态钎料中使得钎焊接头钎缝中的 Cu 原子等形核质点浓度增加, 为先析出的 $\beta\text{-Sn}$ 提供更多的形核中心而有利于钎缝组织细化有关^[13]。超声-电场辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu-0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头钎缝区深腐蚀后的显微组织形貌见图 5c, 钎缝中的 $\beta\text{-Sn}$ 基体被腐蚀后为 $\beta\text{-Sn}$ 基体上分布着针片状 Ag_3Sn 和棒状的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$, 其对钎焊接头性能有一定影响^[13,14]。

2.2 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头界面 IMC

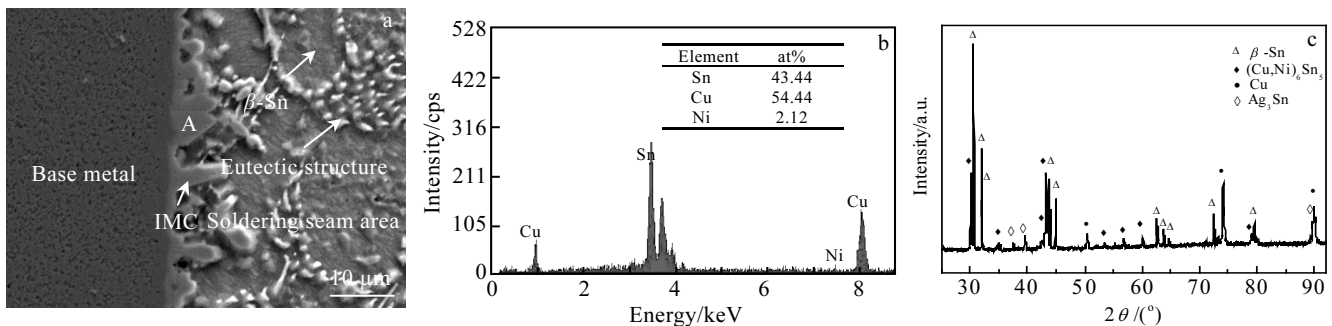


图 4 超声-电场辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头显微组织及 EDS 和 XRD 分析

Fig.4 Microstructure and EDS-XRD analysis of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joints under external energy: (a) microstructure of solder joint, (b) EDS results of point A, and (c) XRD pattern of solder joint

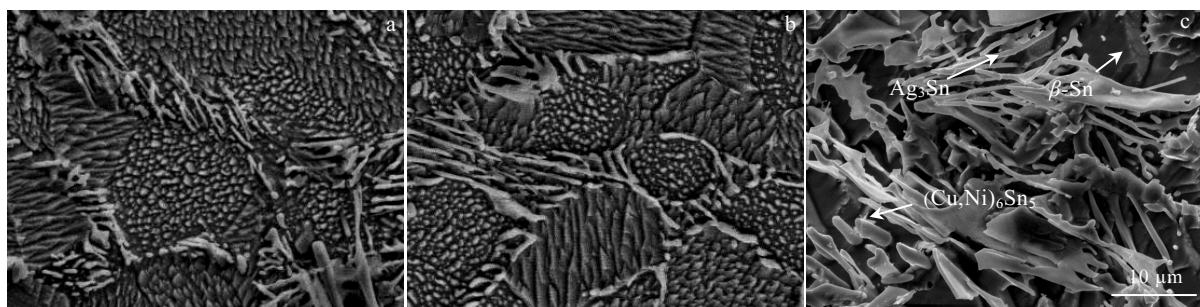


图 5 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头钎缝的显微组织

Fig.5 Microstructure of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder seam under external energy: (a) conventional soldering, (b) with ultrasonic wave (USW) and electric field (E) assisting, and (c) the microstructure of the deep-etched solder joints

无铅钎焊接头界面 IMC 作为钎焊连接的重要组成部分,其形貌、尺寸与钎焊接头可靠性密切相关^[10]。外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 的形貌、俯视形貌及尺寸见图 6 和表 1。由图 6a~6c、表 1 可知,Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 均呈“扇贝状”。与传统钎焊界面“扇贝状”IMC 层平均厚度(4.3 μm)、粗糙度(2.6 μm)较大且局部存在显微空洞等缺陷相比,超声辅助钎焊界面 IMC 层平均厚度(3.6 μm)、粗糙度(1.9 μm)减小且局部显微空洞等缺陷明显变小;超声-电场辅助钎焊界面 IMC 层平均厚度薄且均匀,平均厚度 3.0 μm 减小 30.2%、粗糙度 1.7 μm 减小 34.6%,IMC 层显微空洞等缺陷基本消失;与超声辅助钎焊界面 IMC 层粗糙度相比,增加电场后的超声-电场辅助钎焊界面 IMC 层粗糙度略有减小,约占 IMC 层粗糙度减小的 1/5,这表明施加电场对外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 的俯视形貌及形态尺寸可知,钎焊界面“扇贝”状 IMC 由界面处向钎缝生长。与传统钎焊界面 IMC 颗粒呈尺寸较大的短棒状或块状(平均尺寸 3.4 μm)、界面高低不平且

存在颗粒间隙相比,超声辅助钎焊界面 IMC 颗粒呈尺寸较小(平均尺寸 3.0 μm)的近似球状、界面较为平整且颗粒间隙减小;超声-电场辅助钎焊界面 IMC 颗粒呈细小、均匀(平均尺寸 2.7 μm 减小了 20.5%)、平整的球状且颗粒间隙基本消失;施加超声、超声-电场辅助钎焊界面 IMC 颗粒尺寸与 IMC 层平均厚度呈对应同步地减小。在传统钎焊界面 IMC 表面吸附有分布不均、数量较多的纳米数量级 Ag_3Sn ,随着施加超声和超声-电场辅助钎焊,钎焊界面 IMC 表面吸附的纳米数量级 Ag_3Sn 减少直至几乎消失。这之前所述的外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 层平均厚度、粗糙度及局部显微空洞缺陷的演变规律相一致,是 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 三维形貌演变的真实反映。超声波的空化效应^[14]使液态钎料内部局部产生高温、高压可有效去除母材表面氧化膜,加速了液态钎料对界面的冲刷^[15],使界面 IMC 的厚度、粗糙度减小;引入电场能改善钎料和母材间的固液表面张力^[16],有助于钎焊界面的良好接合,但其作用有限。与传统钎焊界面 IMC 端部形成纳米级 Ag_3Sn 被界面 IMC “俘获”^[17,18]相比,外能辅助下钎焊界面 IMC 表面纳米级

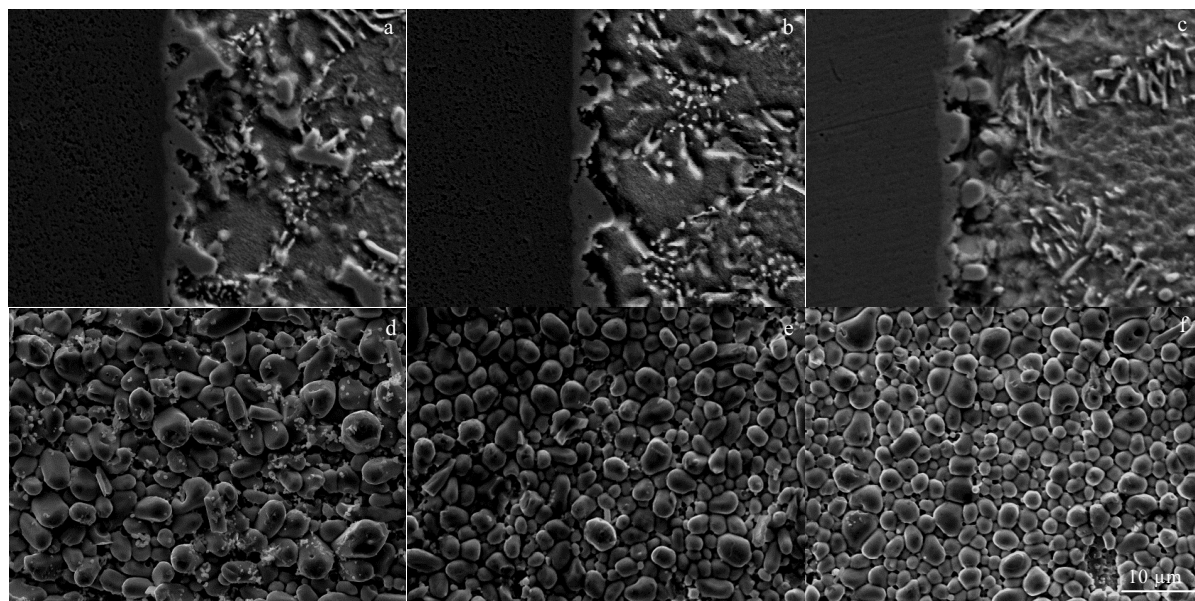


图 6 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 形貌

Fig.6 SEM images of IMCs at the interface of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joints: (a) conventional soldering, (b) with USW assisting, (c) with USW and E assisting, (d) top-view of conventional soldering, (e) top-view of solder joints with USW assisting, and (f) top-view of solder joints with USW and E assisting

表 1 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头界面 IMC 平均厚度、粗糙度和颗粒尺寸

Table 1 Thickness, roughness and grain size of interfacial IMC for Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu joints (μm)

Solder joints	IMC thickness	IMC roughness	Grain size of IMC
Conventional solder joints	4.3	2.6	3.4
USW assisted solder joints	3.6	1.9	3.0
USW and E assisted solder joints	3.0	1.7	2.7

Ag_3Sn 逐渐消失, 这可能是由于超声、电场外能的引入加速了钎缝区原子的扩散使 Ag 原子更加分散而不宜形成富银相所致。

2.3 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头力学性能

外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 平均厚度、粗糙度及接头剪切强度见图 7。由图 7 可知, 与传统 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切强度 22.0 MPa 相比, 引入超声、超声-电场外能辅助后钎焊接头剪切强度相应提高 19.1%、24.1%, 使接头剪切强度达 27.3 MPa。超声振动冲刷了钎焊接头界面, 使得一些界面 IMC 质点脱离铜基体进入钎缝, 增大了钎焊接头中钎缝区的形核率, 细化了钎缝组织并使共晶组织比例增加, 同时也减小界面 IMC 的厚度和粗糙度从而提高了钎焊接头强度。超声振动使钎缝区的 Cu 原子浓度增大, 会否引起钎缝脆化而影响钎焊接头强度尚待进一步研究。与超声辅助钎焊相比, 增加电场后在超声-电场

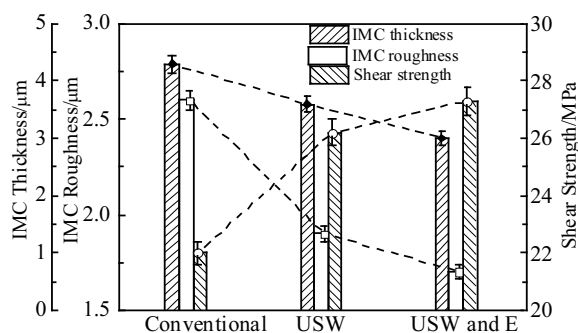


图 7 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊界面 IMC 平均厚度、粗糙度及接头剪切强度

Fig. 7 Effect of external energy on the interfacial IMC thickness, roughness and shear strength of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE-0.05Ni/Cu joints

外能共同辅助下钎焊对接头强度的贡献不及前者，这与超声、电场对外能辅助钎焊接头界面 IMC 粗糙度作用呈一致的演变规律，而并不主要取决于钎焊接头界面 IMC 的平均厚度。外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断面形貌及能谱分析结果见图 8 和表 2。从图 8a~8c、表 2 可知，Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断面呈以解理为主和韧窝组成的脆-韧混合型断裂，断面中解理、撕裂棱和韧窝呈明显的方向性，如图 7 中韧窝呈“抛物线”形；由图 8 中呈解理断裂的 A、B、C 3 区域能谱分析结果表明，A、C 区域成分是以 Sn 为主的钎缝区，B 区域成分为(Cu,Ni)₆Sn₅属于界面 IMC 层，这表明外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断裂发生在钎缝与 Cu 基板间由钎缝和界面 IMC 层组成的界面过渡区（见图 8d）；随着施加超声、电场外能辅助，与 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 传统钎焊接头剪切断面相比，断面中韧窝更深、细密，

大韧窝间分布有数量众多的小韧窝，且韧窝比例增加，这说明由界面(Cu,Ni)₆Sn₅ IMC 解理断裂(图 8 中的 B 区)和钎缝区解理(图 8 中的 A、C 区)和韧窝(图 8 中的 C 区周边)组成的脆-韧混合型断裂构成的钎焊接头剪切断面塑性增加，Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头剪切断裂途径也由钎缝和界面 IMC 层的过渡区向钎缝方向迁移，相应地 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头的剪切强度提高。这表明钎焊接头界面 IMC 形态（平均厚度和粗糙度）直接影响钎焊接头的剪切强度。一方面，钎焊界面硬脆的 IMC 厚度减小会降低应力集中程度从而影响接头剪切强度；另一方面，钎缝/IMC 界面粗糙度的减小即界面变得平坦，会减轻 IMC 凸进钎缝部分根部的应力集中程度，从而提高钎焊接头剪切强度。由表 1 可知，超声辅助钎焊接头界面 IMC 的粗糙度和厚度均比传统钎焊接头的粗糙度厚度有所减小，其钎焊接头剪切强度增高；虽然超声-电场辅助钎焊接头界面 IMC 厚

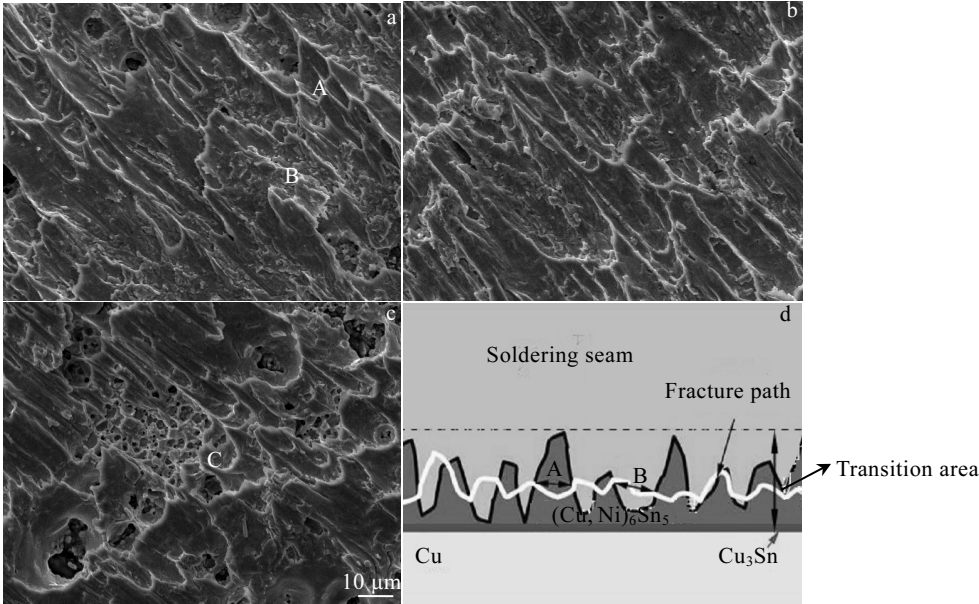


图 8 外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头断面形貌及脆-韧混合断裂示意图

Fig.8 Fracture morphology of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu joints under external energy: (a) conventional soldering, (b) with USW assisting, (c) with USW and E assisting, and (d) schematic of ductile-brittle mixed fracture

表 2 图 8 中 A、B 和 C 点能谱分析结果
Table 2 EDS results of A , B and C points in Fig.8

Point	Mole fraction/%			
	Sn	Ag	Cu	Ni
A	90.49	3.17	6.34	-
B	44.94	-	53.68	1.38
C	92.95	3.96	3.09	-

度与超声辅助钎焊相比有所减小，但其钎焊接头剪切强度变化不大，对应钎焊接头界面 IMC 粗糙度变化也不大，这表明钎焊接头剪切强度与界面 IMC 粗糙度是密切相关的。由此可见，在适宜的界面 IMC 平均厚度范围内（如本实验 3~5 μm），界面 IMC 层粗糙度对钎焊接头剪切强度的影响占主导作用。与传统钎焊界面 IMC 层粗糙度大、钎焊接头受剪切应力时脆而硬的 IMC 易发生断裂^[19]相比，施加超声辅助和超声-电场辅助 Sn2.5Ag0.7Cu0.1-

RE0.05Ni/Cu 钎焊接头界面 IMC 层粗糙度明显减小, 钎焊接头断裂途径由钎缝和界面 IMC 层组成的界面过渡区向钎缝侧迁移, 由界面 IMC 层解理和钎缝解理+韧窝组成的脆-韧混合型剪切断裂则更多发生在钎缝区域, 这使钎焊接头剪切断面塑性区比例增加, 相应地接头剪切强度升高。

3 结 论

1) 施加超声、超声-电场外能辅助使 Sn2.5Ag0.7Cu-0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头钎缝初生 β -Sn、共晶组织细化且共晶组织比例增加, 界面区 IMC 平均厚度、粗糙度和界面 IMC 颗粒尺寸减小。

2) 超声和电场外能辅助下 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE-0.05Ni/Cu 钎焊接头强度与其界面 IMC 层粗糙度密切相关, 超声作用更为敏感。超声在超声-电场外能辅助钎焊接头界面 IMC 层粗糙度降低中占主导作用, 相应钎焊接头强度升高, 与传统钎焊相比施加超声-电场外能辅助钎焊接头剪切强度提高 24.1%。

3) 施加超声、超声-电场外能辅助使 Sn2.5Ag0.7Cu-0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头断裂途径由钎缝和界面 IMC 层组成的界面过渡区向钎缝侧迁移, 呈界面 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ IMC 解理和钎缝解理+韧窝的脆-韧混合型断裂机制, 使接头剪切断面塑性区比例增加, 接头剪切强度升高。

参考文献 References

- [1] Suganuma K. Translated by Ning Xiaoshan(宁晓山). *Lead-free Soldering Technology*(无铅焊接技术)[M]. Beijing: Science Press, 2004: 138
- [2] Liu Yang(刘 洋), Sun Fenglian(孙凤莲). *Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(2): 460
- [3] Zhang Xiaojiao(张晓娇), Zhang Keke(张柯柯), Zhao Kai(赵恺) *et al.* *Transactions of Materials & Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2014, 35(9): 70
- [4] Liu Ping, Yao Pei, Liu Jim. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2009, 486(1-2): 474
- [5] Zhang Keke, Zhang Xiaojiao, Qiu Ranfeng *et al.* *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2014, 25(4): 1681
- [6] Naka M, Hafez K M. *Journal of Materials Science*[J], 2003, 38(16): 3491
- [7] Chinnam R K, Fauteux C, Neuenschwander J *et al.* *Acta Materialia*[J], 2011, 59(4): 1474
- [8] Kang J, Conrad H. *Materials Science & Engineering A*[J], 2003, 356(1-2): 8
- [9] Tan A T, Tan A W, Yusof F. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2017, 705: 188
- [10] Yu D Q, Wang L. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2008, 458(1-2): 542
- [11] Ren Huailiang(任怀亮). *Metallographic Experimental Technique*(金相实验技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 140
- [12] Zhang Keke(张柯柯), Guo Xingdong(郭兴东), Wang Huigai(王悔改) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(5): 1353
- [13] Ji Hongjun, Wang Qiang, Li Mingyu *et al.* *Journal of Electronic Materials*[J], 2014, 43(7): 2467
- [14] Ji Hongjun, Wang Qiang, Li Mingyu. *Journal of Electronic Materials*[J], 2016, 45(1): 1
- [15] Ji Hongjun, Qiao Yunfei, Li Mingyu. *Scripta Materialia*[J], 2016, 110: 19
- [16] Conrad H, Guo Z, Sprecher A F. *Scripta Metallurgica*[J], 1989, 23(6): 821
- [17] Yu Daquan(于大全). *Research on Lead-free Solder and Its Interface in Electronic Packaging Interconnection*(电子封装互连无铅钎料及其界面问题研究)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004
- [18] Liu Xiaoying, Huang Mingliang, Zhao Yanhui *et al.* *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2010, 492(1): 433
- [19] Teo J W R, Sun Y F. *Acta Materialia*[J], 2008, 56(2): 242

Microstructure and Properties of Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu Solder Joints Obtained by External Energy Assisted Soldering

Cui Jianguo¹, Zhang Keke^{1,2}, Zhao Di¹, Ma Ning¹, Cao Congcong¹, Pan Yibo¹

(1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

(2. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals, Henan Key Laboratory of Non-ferrous Materials Science & Processing Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joints were fabricated by the ultrasonic wave (USW) and electric field (E) assisted soldering technique. The microstructure and mechanical properties of the solder joints were analyzed by the scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD). Results show that the USW or the USW-E have great influence on the microstructure of the solder joints. The USW or USW-E assisted soldering technique refines microstructure of the Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu solder joints and promotes the proportion of eutectic structure, as well as reduces the average thickness, roughness and grain size of interfacial IMC. The shear strength of the Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu soldering joints under the USW-E assisted soldering is closely related to the roughness of interfacial IMC layer. The USW plays an important role in the decrease of roughness of the interfacial IMC during the USW-E assisted soldering. Compared with shear strength of the traditional soldering joints, an increment of 24.1% in shear strength of the soldering joints is achieved with the USW-E assisted soldering. With applying the USW or the USW-E, the fracture path of the Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu soldering joints transfers from the interfacial transitional region composed of soldering seam and interfacial IMC layer to the side of soldering seam. The fracture mechanism of the soldering joints obtained by the USW or the USW-E assisted soldering are brittle-ductile mixed fracture with the cleavage of interfacial (Cu,Ni)₆Sn₅ IMC and the cleavage-dimple of soldering seam, which increases the proportion of ductile fracture zone and the shear strength of soldering joints.

Key words: Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni solder; USW-E external energy; soldering joint; microstructure; properties

Corresponding author: Zhang Keke, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, P. R. China, E-mail: zhkekekd@163.com