

AlN陶瓷与Al低温钎焊钎料设计及接头组织性能研究

周航泽^{1,3}, 龙飞², 徐瑞^{1,3}, 王策^{1,3}, 何鹏^{1,3}, 施清清⁴, 赵岩⁵

(1. 哈尔滨工业大学 郑州研究院, 河南 郑州 450018)

(2. 河南省科学院材料研究所, 河南 郑州 450046)

(3. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(4. 格力电器(郑州)有限公司, 河南 郑州 450066)

(5. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 针对目前缺乏适合AlN陶瓷和Al低温钎焊的钎料的问题, 通过向AgCuTi钎料中加入In和Sn元素来降低钎料熔点, 制备了新型低温钎料Ag-28Cu-35In-2Ti和Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti(质量分数), 从而实现AlN/Al接头的良好连接。探究了两种钎料对AlN陶瓷和Al的低温钎焊工艺和接头组织形貌及性能影响。结果表明: Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti钎料在钎缝处形成了InSn₃、TiAl₃等相对稳定的化合物。Ag-28Cu-35In-2Ti钎料在钎缝处生成Al₂Cu、AgIn₂和TiAl₃等相对稳定的化合物, 随着焊接温度的增加, 接头强度随之提高。为阻止In的扩散析出, 选择在Al表面镀Ni, 但镀Ni使接头导热性能有所下降。发现使用Ag-28Cu-35In-2Ti钎料进行焊接, 在640℃保温30 min的条件下, 接头强度最高, 为20.28 MPa; 在620℃保温15 min的条件下, 热扩散系数可达到65.941 m²/s。该钎料为AlN陶瓷/Al的高可靠连接提供了一种新的方法。

关键词: 低温钎料; AlN/Al; 组织性能; 表面改性

中图法分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)02-0453-10

随着智能化、信息化时代到来, 航空航天、军工国防、轨道交通等领域电子设备向尺寸小型化、功能一体化、高功率密度化方向迅猛发展, 同时由超高热流密度引发的热控问题也日益凸显^[1-2]。对于电子器件而言, 通常温度每升高10℃, 器件有效寿命就降低30%~50%。若热量不能及时散失, 温度过高会导致芯片与基板间产生热应力及热疲劳甚至会直接烧毁器件。故在此基础上, 对功率半导体器件进行科学的封装显得尤为重要^[3]。

对于功率半导体器件而言, 封装基板必须满足以下要求: (1) 高热导率。由于器件产生的热量大部分经封装基板传播, 所以导热良好的基板可使芯片免受热破坏。(2) 与芯片材料热膨胀系数匹配。由于芯片直接贴装于封装基板上, 两者热膨胀系数匹配会降低芯片热应力, 提高器件可靠性。(3) 耐热性好, 满足功率器件高温使用需求, 具有良好的热稳定性, 以及绝缘性好、机械强度高、价格适宜等要求^[4-7]。由高导热AlN陶瓷与Al连接而成的覆铝陶瓷基板因其优异的散热性能, 优良的抗热震疲劳性能, 良好的热稳定性, 轻质与良好的Al线键合能力成为新一代封装基板首选材料之一^[8-12]。目前我国对此基板的制造技术及其内在机理等尚处于探索阶段, 所以开

展AlN与Al高强度、高导热、高可靠连接及相关理论研究迫在眉睫。

由于AlN与Al材料性能差异, 实现二者的可靠连接存在以下难题: (1) 因Al氧化膜存在, 会影响接头焊接质量; (2) AlN性能稳定, 润湿性差, 导致目前缺乏合适的连接材料和方法; (3) AlN与Al热膨胀系数差异大, 界面残余应力高; (4) 通过预氧化法、活性钎焊法等制造的接头存在Al₂O₃等高热阻界面产物, 导致接头热导率低。(5) 研究集中于工艺探索和接头强度方面, 接头界面结合特性尚不清晰^[13-18]。

由于AlN陶瓷表面性质稳定, 润湿性差, 通过测试Al、Sn、In等14种金属钎料以及向其中加入Cr、Ni、Ti等活性元素的合金钎料在AlN表面的润湿性, 结果表明在不加活性元素的条件下, 只有Al和Si在AlN表面润湿, 而在活性元素中, 只有Ti元素可以起到提高钎料润湿性的作用^[19-23], 所以, 在目前广泛应用于陶瓷钎焊中的Ag-Cu系活性钎料中, 只有AgCuTi钎料适用于AlN陶瓷的钎焊^[24-28]。但AgCuTi钎料的焊接温度普遍在800℃以上, 高于Al的熔点(660℃), 不符合Al的焊接要求。所以目前缺乏适合AlN陶瓷和Al低温钎焊的钎料。而目前通常采用向钎料中加入In或Sn等降熔元素的方法对钎料降熔, 若向AgCuTi钎料中加入In或Sn等降熔元素,

收稿日期: 2024-09-29

基金项目: 中国博士后科学基金(2023M7408938); 国家自然科学基金(52305353)

作者简介: 周航泽, 男, 2000年生, 硕士, 哈尔滨工业大学郑州研究院, 河南 郑州 450018, E-mail: 13689798625@163.com

有可能使钎料熔点降低至 Al 熔点以下,满足 AlN 陶瓷和 Al 钎焊的温度要求。

综上,针对目前功率半导体器件对于散热基板的迫切需求,本研究设计新型低温钎料,对 AlN 陶瓷和 Al 低温钎焊以及接头组织性能调控进行研究,通过设计低温钎料,一体化制备 AlN 和 Al 高导热高强度连接接头,有望开发出高可靠、高导热、高强度的新一代陶瓷散热基板。本研究将对 AlN 陶瓷和 Al 连接及其它陶瓷基板的连接提供新思路。

1 实验

实验所用的 AlN 陶瓷基板尺寸为 114.3 mm×114.3 mm×3 mm,在 AlN 陶瓷中含有 2%~5%(质量分数)的 Y₂O₃ 烧结剂。Al 板尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm。为方便后期钎焊需要,将 AlN 陶瓷及 Cu 板分别用金刚石切割及电火花线切割方式进行规格重置,尺寸规格分别为 3.5 mm×3.5 mm×3 mm 和 7 mm×7 mm×5 mm。

制备钎料所采用的原材料:Ag-32.56Cu-22.12In-2.27Ti(In22)四元合金粉;Sn-3Ag-0.7Cu(SnAgCu)三元合金粉和 In 粉。通过 XGB2 行星式球磨机向钎料中混入 In 粉来制备新钎料,将钎料称量 20 g,倒入球磨罐中,并且在球磨罐中倒入无水乙醇和磨球,同时磨球:钎料:无水乙醇溶液的质量比为 2:1:1,且大球:小球的质量比为 1:1。将球磨罐放入球磨机紧固后,以转数 200 r/min,球磨时间 1.5 h 开始球磨^[29-31]。球磨完成后,将得到的钎料放入真空干燥箱中保存。通过上述方法,分别得到 Ag-29.3Cu-30In-2.1Ti(In30),Ag-28.3Cu-32In-2.04Ti(In32),Ag-28Cu-35In-2Ti(In35)和 Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti(SnAgCuInTi)4 种钎料粉末。

通过 XRD 分析钎料的物相组成,通过 TG/DSC 同步热分析仪测定钎料的熔点,通过动态润湿角测量仪测定制得钎料的润湿角,设置温度曲线,即在 20 min 内从 0 °C 升温到 200 °C,在 200 °C 时保温 10 min;在 20 min 内从 200 °C 升温到 400 °C,在 400 °C 时保温 10 min;在 40 min 内从 400 °C 升温到 600 °C,在 600 °C 时保温 20 min;在 40

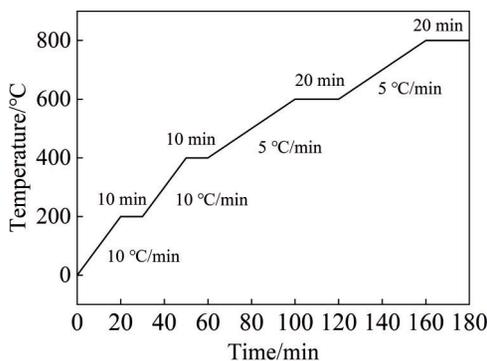


图 1 润湿加热曲线

Fig.1 Wetting heating curve

min 内从 600 °C 升温到 800 °C,在 800 °C 时保温 20 min,加热曲线如图 1 所示。通过计算机观察润湿角的实时变化,确定润湿时间和温度。

钎焊试样如图 2 所示,钎焊过程在真空钎焊炉中进行,钎焊设备可以提供的极限真空度为 1×10⁻⁴ Pa、最高加热温度为 700 °C,升温速率范围在 5~10 °C/min。焊接温度在 580~640 °C,保温时间在 15~30 min,在钎焊过程中,炉腔内的真空度一般保持在 5.0×10⁻³ Pa 以下。

焊接成功后,首先使用牙托粉对焊接试样进行冷镶固定,然后依次使用 80#、240#、400#、800#、1500# 和 2000# 砂纸进行打磨处理后,在精密研磨抛光机上借助 0.5 μm 的 Al₂O₃ 抛光剂完成对金相试样的抛光处理,使用 SU5000 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 及其附属的 UltimMax40 型 X 射线能量分散谱观察钎焊接头的组织并分析钎缝的成分,使用 X 射线衍射仪进一步确定钎焊完成后接头内部的反应相构成,与 EDS 结果进行验证,钎焊接头的剪切强度采用电子万能试验机进行测试,抗剪实验示意图如图 3 所示。

采用 TG/DSC 同步热分析仪测量接头的热扩散系数。为测量接头的热扩散系数,首先使用游标卡尺测量接头的厚度。而后使用阿基米德排水法测量接头的密度。通过热扩散系数的测量来分析接头的导热性能。

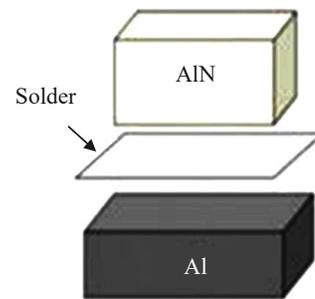


图 2 钎焊试样制备示意图

Fig.2 Preparation diagram of brazed specimen

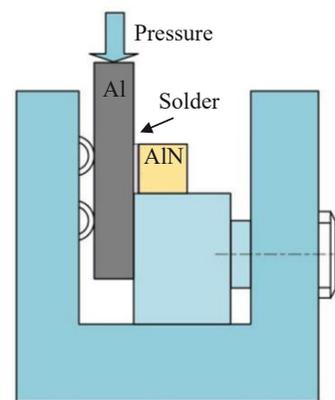


图 3 抗剪实验示意图

Fig.3 Schematic diagram of the shear resistance test

2 结果与讨论

2.1 低温钎料的成分设计与制备

2.1.1 低温钎料的成分设计

目前,由于在活性元素中只有Ti可以改善AlN陶瓷的润湿性,而活性钎焊法主要应用的AgCuTi体系钎料的钎焊温度较高,在800℃以上,而Al熔点为660℃。所以,为得到符合AlN陶瓷/Al钎焊温度要求的钎料,根据文献以及Ag-Cu-In与Sn-Cu-Ag的三元相图^[32-33]向钎料中混入降熔元素In、Sn,即通过固定Ag和Cu的含量加入In、Sn元素,使其成分点到达三者共晶点,从而降低钎料的熔点。根据相图可知,In的含量在30%~35%时可达到Ag、Cu、In三者共晶点,使混合后的钎料更均一,性能稳定。所以钎料中In的质量分数应在30%~35%之间。

2.1.2 低温钎料的制备与性能研究

能否获得良好的AlN/Al钎焊接头的关键在于钎料对于AlN陶瓷的润湿性以及钎料熔点是否满足Al钎焊的要求。因此在连接过程中,钎料中降熔元素In的添加量以及钎料的制备方法尤为重要,本节探讨钎料的成分制备以得到润湿良好的接头。

图4为不同In含量钎料与AlN陶瓷的润湿情况,其中图4a是购买所得的In质量分数为22%的AgCuInTi钎料,图4b~4d分别是用研钵充分研磨的In质量分数为30%,32%和35%的AgCuInTi钎料。可以

看出,购买的商用AgCuInTi钎料在710℃出现熔化迹象,润湿情况较差。In质量分数为30%的钎料润湿情况改善不明显。但接着随着In含量的增加,钎料熔点明显下降,润湿情况有明显改善。如图4c~4d所示,In质量分数为32%的钎料在680℃左右开始熔化,在700~720℃时润湿角变小速率明显增加,在740℃时润湿角可达44.487°。In质量分数为35%的钎料在640℃左右开始熔化,在640~700℃时润湿角迅速变小,在760℃时润湿角可达33.4°。可以看出,In质量分数35%的钎料润湿情况最好。

图5为In质量分数为35%的AgCuInTi钎料在球磨不同时间情况下与AlN陶瓷的润湿情况。图5a是用研钵充分研磨的钎料,图5b~5d分别是球磨时间为30,60和90 min的钎料。随着球磨时间的增加,钎料熔点明显下降,润湿情况有明显改善。未经球磨的钎料在640℃左右开始熔化,在640~700℃钎料熔化速率较快,在760℃时润湿角可达33.4°。如图5b~5d所示,经过30 min球磨后的钎料在590℃开始熔化,在590~620℃润湿角迅速减小,在690℃润湿角可达到19.0°。经过60 min球磨后的钎料在590℃开始熔化,在开始阶段钎料熔化速率较慢,在620℃钎料熔化速率增加,在690℃润湿角可达16.8°,经过90 min球磨后的钎料在570℃开始熔化,融化速率比较均匀,在690℃润湿角可达15.2°。可以看出,随着球磨时间增加,钎料的熔点下降,润湿情况逐渐变好。

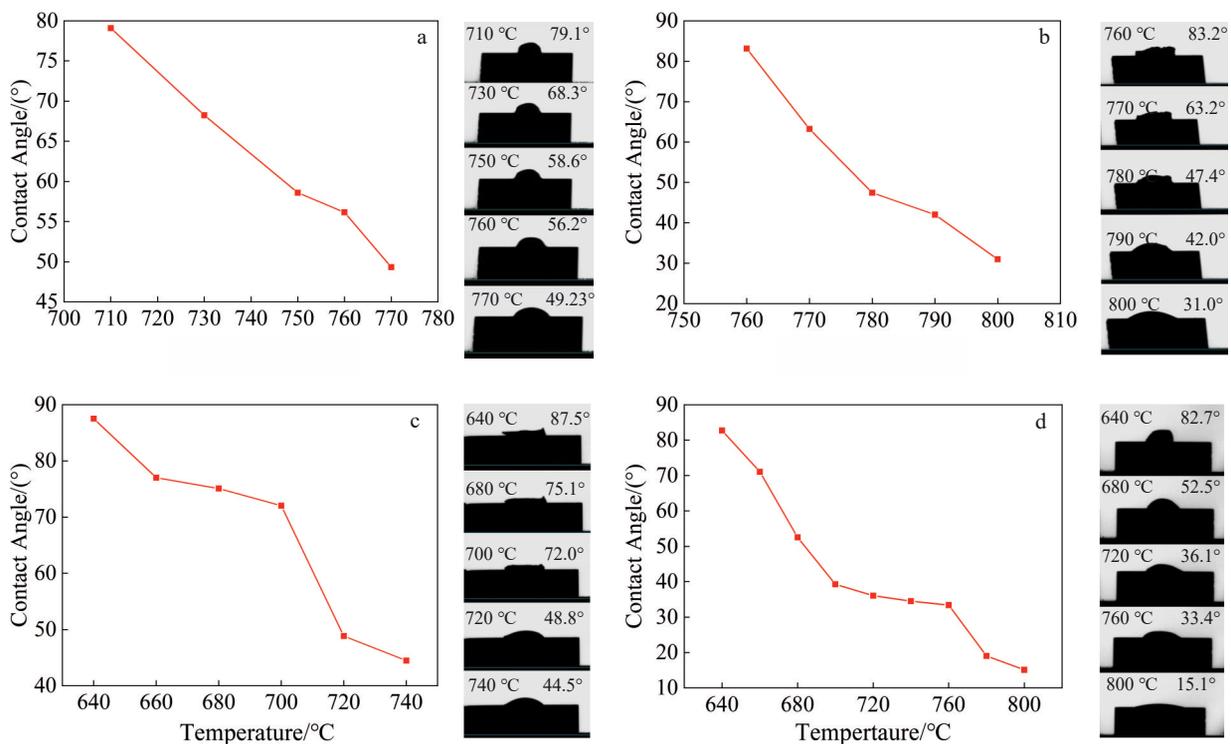


图4 不同In含量钎料对AlN润湿情况

Fig.4 Wettability of AlN with brazing metal with different In contents: (a) 22%, (b) 30%, (c) 32%, and (d) 35%

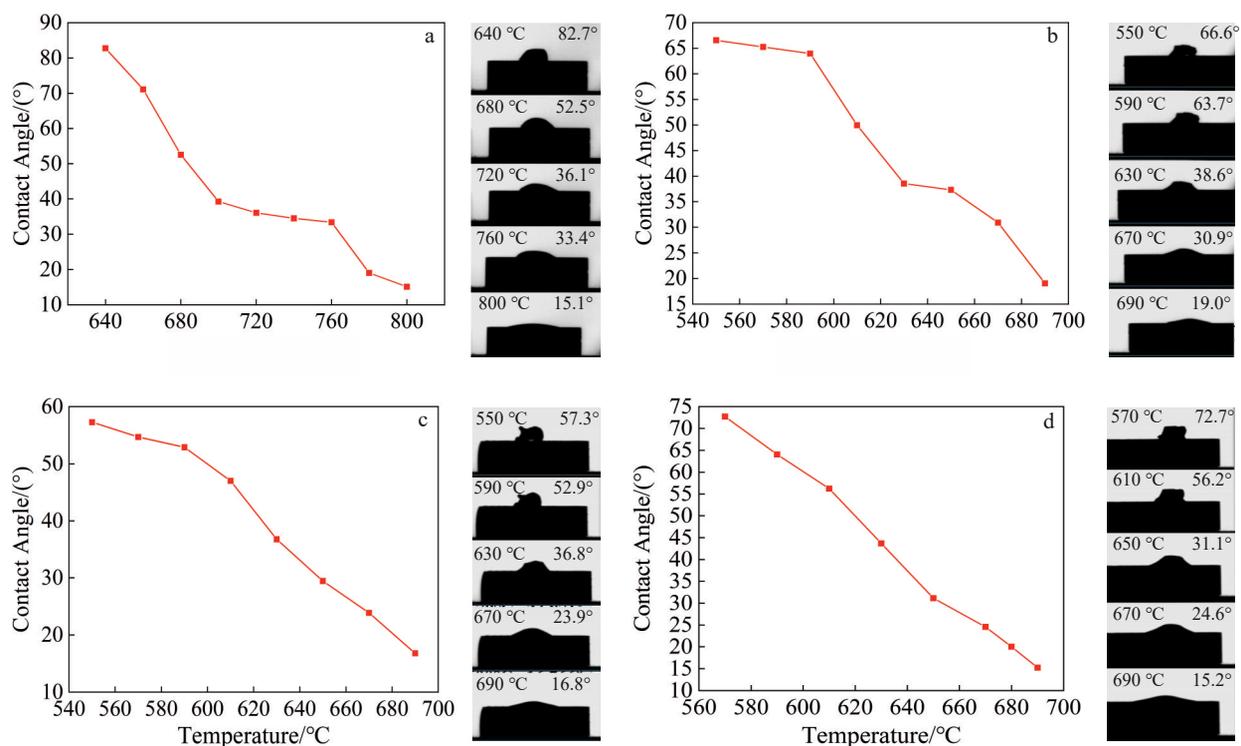


图 5 球磨不同时间钎料对 AlN 润湿情况

Fig.5 Wettability of AlN with brazing metal ball milled for different time: (a) mortar, (b) 30 min, (c) 60 min, and (d) 90 min

所以,从图4和图5和可以看出,随着钎料中In含量的增加以及在制备钎料的过程中球磨时间的延长,钎料的熔化温度逐渐下降,钎料对石墨的润湿情况得到改善。从图6可以看出,随着球磨时间的增加,界面处气孔随之

减少,界面情况得到改善。所以,钎料中In含量的增加和球磨时间的延长会使得焊接接头质量得到提升。

对含In质量分数为22%的钎料和含In质量分数为35%的AgCuInTi钎料分别球磨90 min,并将混粉所得含

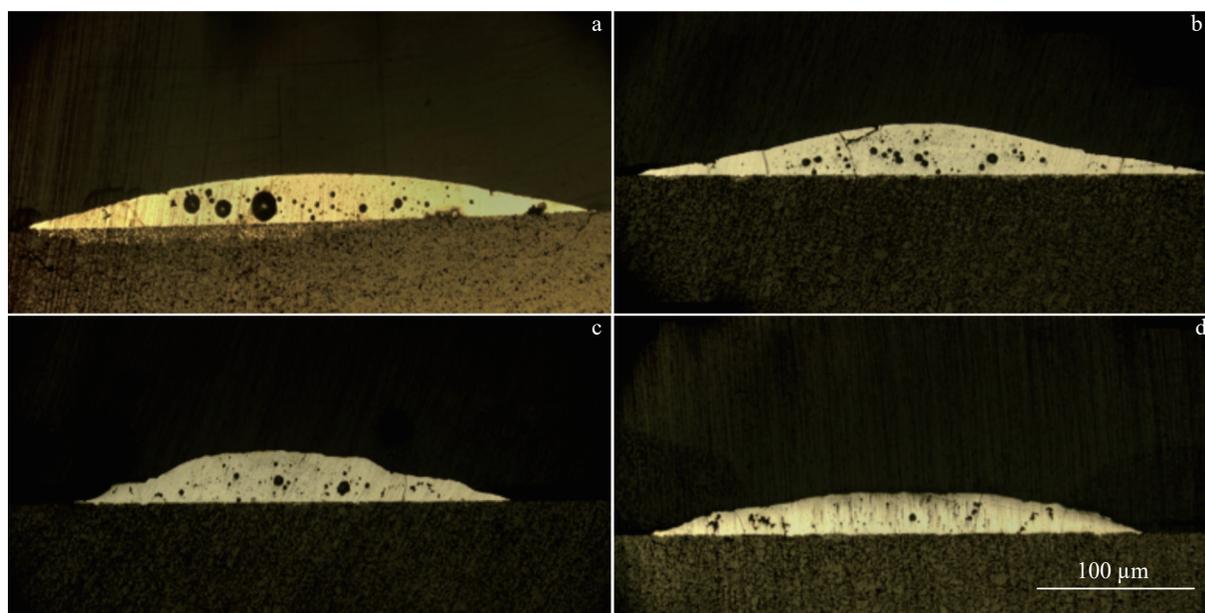


图 6 球磨不同时间In35钎料钎焊接头OM照片

Fig.6 OM images of brazed joints with In35 brazing metal ball milled for different time: (a) mortar, (b) 30 min, (c) 60 min and (d) 90 min

In 质量分数为 35% AgCuInTi 钎料与购买所得 SnAgCu 钎料按照 1:1 的比例进行球磨混合,对所得的 3 种钎料进行 XRD 与 DSC 测量,进行对比分析,如图 7 和图 8 所示。

图 7a 为含 In 质量分数为 22% 的 AgCuInTi 钎料粉末 XRD 图谱,由于在制作粉末过程中,经历了压片,加热等操作,使图像呈现非晶形态的馒头峰,同时,In 与 Ag, Cu 反应,反应产物为 Ag_9In_4 , Cu_9In_4 析出。图 7b 为含 In 质量分数为 35% 的 AgCuInTi 钎料粉末 XRD 图谱。可以看出,加入的 In 没有完全与原钎料合金化,其中部分 In 在粉末中以单质的形式存在,同时 In 与原钎料中的 Cu 发生反应并析出了 Cu_7In_3 。图 7c 为将混粉所得含 In 质量分数为 35% 的 AgCuInTi 钎料与 SnAgCu 钎料按照 1:1 的比例

进行球磨混合所得的钎料 Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti (SnAgCu-InTi),可以看出,钎料中有 Sn 析出,加入的 In 没有完全与原钎料合金化,部分 Sn 与 In 以单质的形式在钎料中存在。同时,少量 Sn 与钎料中的 Cu 发生反应并析出了 Cu_3Sn 。

从图 8 可以看出,加入 In 粉后钎料的固液相转变温度明显下降,含 In 量 22% 的钎料熔化温度为 610 °C,含 In 量 35% 的钎料熔化温度为 559 °C。向钎料中加入 In 后,钎料熔化温度明显下降,所制得的钎料符合 Al 低温钎焊的要求。而 SnAgCu 钎料熔化温度为 237 °C,将 SnAgCu 钎料与 AgCuInTi 钎料混合同样可以起到降低钎料熔化温度的作用,新制得钎料熔化温度为 487 °C。

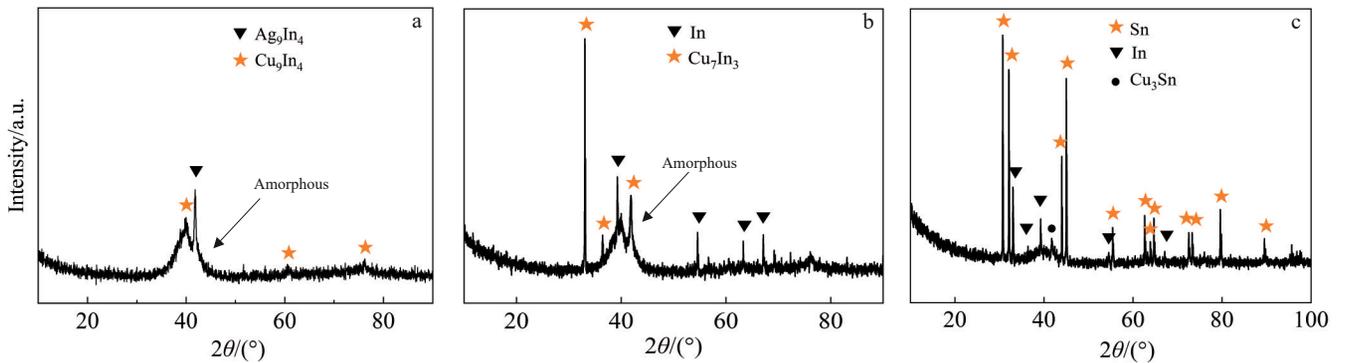


图 7 钎料粉末 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of solder powder: (a) In22, (b) In35, and (c) SnAgCuInTi

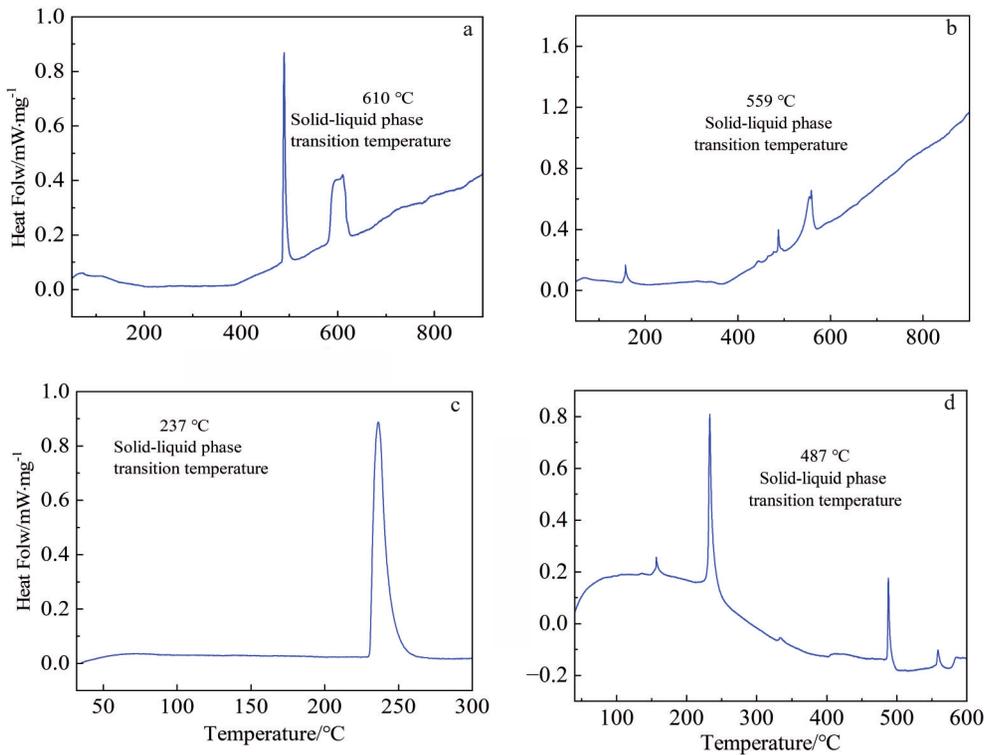


图 8 钎料粉末 DSC 曲线

Fig.8 DSC curves of solder powder: (a) In22, (b) In35, (c) SnAgCu brazing material, and (d) SnAgCuInTi

2.2 AlN/Al 低温钎焊连接及接头组织性能

使用含 In 质量分数为 35% 的 AgCuInTi 钎料对 Al 和 AlN 在 620 °C, 保温 30 min 的条件下钎焊, 焊后试样进行磨抛处理, 处理后试样的 SEM 照片和元素面分布如图 9~10 所示。可以看出, 焊接过程中有 AgIn₂, TiAl₃ 和 Al₂Cu 等相对均匀的化合物生成, 钎料中 Ag、Cu 以及 In 元素向母材发生扩散, Ag 与 Cu 固溶在 Al 中, 而 In 沿 Al 的晶界析出。

使用 SnAgCu 与 In35 混合钎料对 Al 和 AlN 在 620 °C, 保温 20 min 的条件下钎焊, 焊后试样进行磨抛处理, 处理后试样的 SEM 照片和元素面分布如图 11、图 12 所示。可以看出, 焊接过程中 Ag、Cu、In、Sn 元素向母材发生扩

散, Ag 与 Cu 固溶在 Al 中, 而 In 和 Sn 析出反应生成 InSn₃, 同时在界面处 Ti 与 Al 反应生成 TiAl₃。对接头的力学性能测量后, 发现接头剪切强度较低, 仅有 1 MPa 左右。所以, 在之后的实验中选择 AgCuInTi 钎料来探究钎焊温度对接头性能的影响。

选择 In 含量 35% 的 AgCuInTi 钎料, 研究连接过程中钎焊温度对接头组织和力学性能的影响, 固定其他钎焊过程参数, 保温时间为 30 min, 钎焊温度分别为 580、600、620 以及 640 °C, 所得钎焊接头如图 13 所示。

从图 13 中可以看出, 当保温时间保持 30 min 不变时, 随着钎焊温度升高, 钎料逐渐反应完全。当钎焊温度为 580 °C 时, 在钎缝处还有未反应完全的钎料残留, 同时

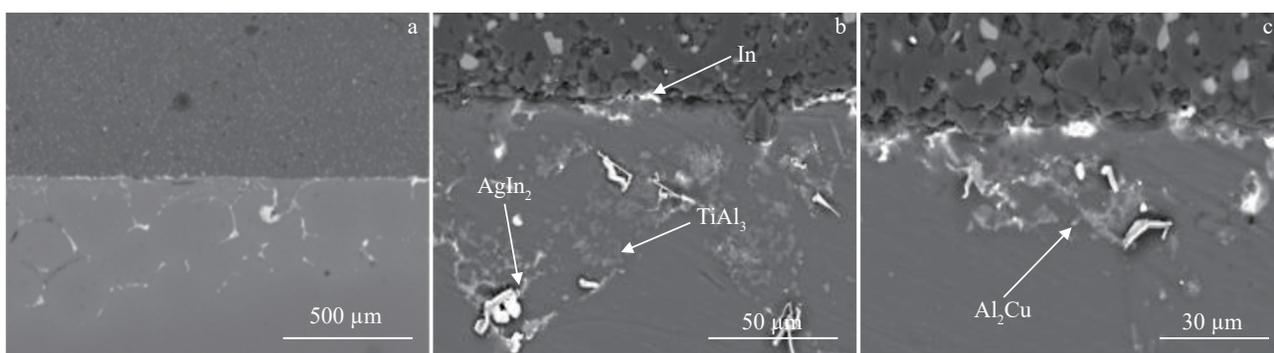


图 9 In35 钎料 620 °C 保温 30 min 焊缝不同放大倍数 SEM 照片
Fig.9 SEM images of the welded seam with In35 brazing metal held at 620 °C for 30 min

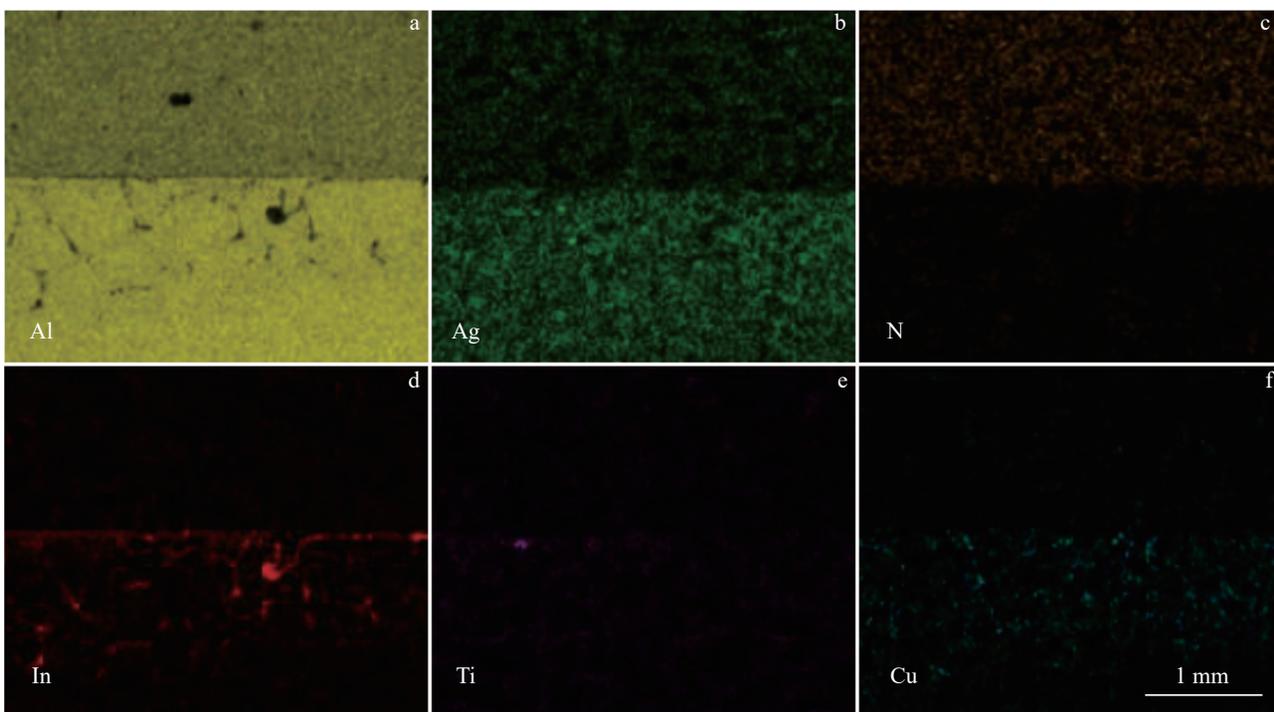


图 10 图 9a 对应 EDS 面扫描
Fig.10 Element mappings corresponding to Fig.9a: (a) Al, (b) Ag, (c) N, (d) In, (e) Ti, and (f) Cu

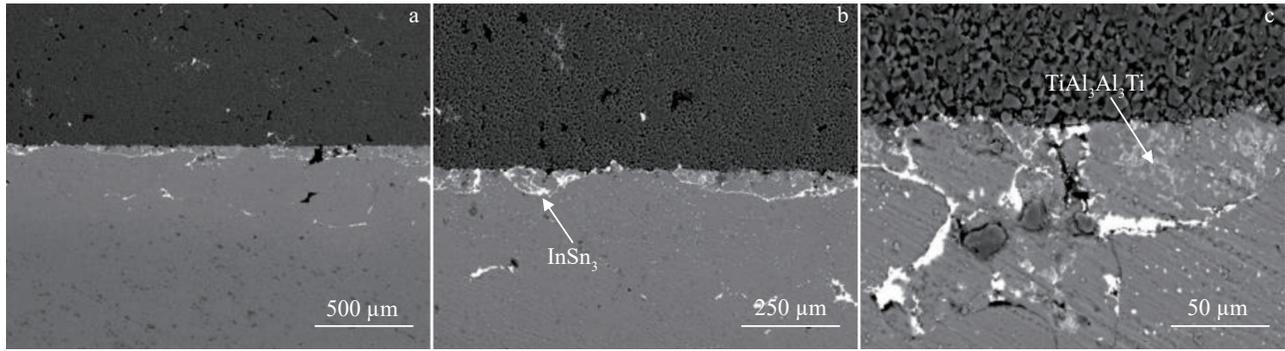


图 11 SnAgCuInTi 钎料 620 °C 保温 20 min 焊缝不同放大倍数 SEM 照片
 Fig.11 SEM images of weld seam with SnAgCuInTi brazing metal held at 620 °C for 20 min

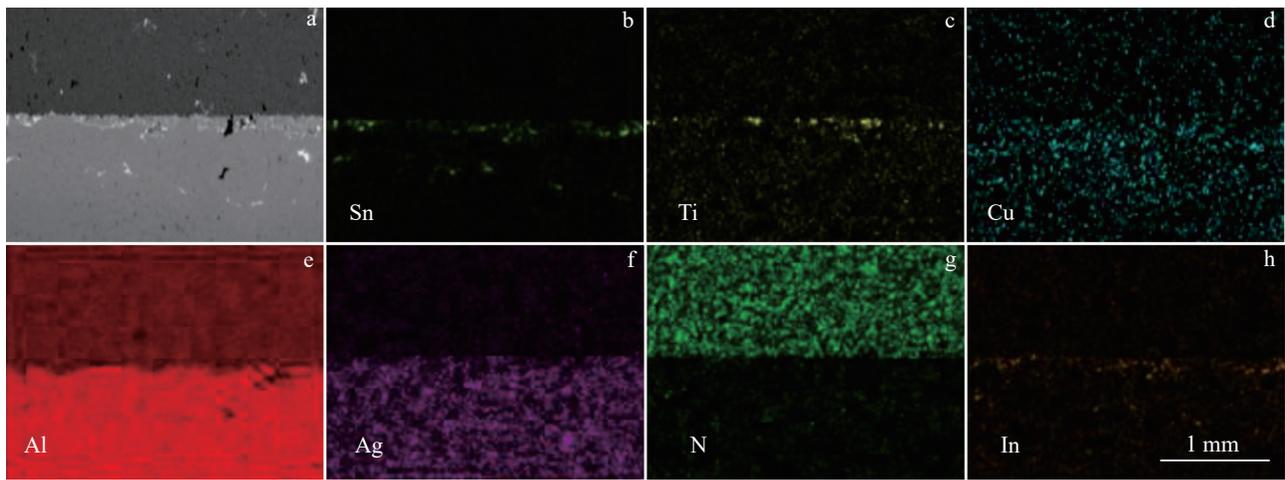


图 12 SnAgCuInTi 钎料 620 °C 保温 20 min 接头 EDS 面扫描
 Fig.12 Element mappings (a) of joint with SnAgCuInTi brazing metal held at 620 °C for 20 min: (b) Sn, (c) Ti, (d) Cu, (e) Al, (f) Ag, (g) N, and (h) In

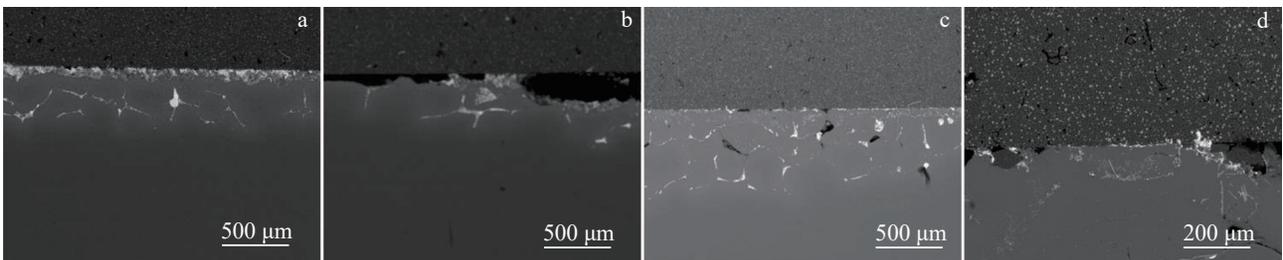


图 13 In35 钎料不同连接温度下的接头组织
 Fig.13 Microstructures of joints with In35 brazing metal at different connection temperatures: (a) 580 °C, (b) 600 °C, (c) 620 °C, and (d) 640 °C

在靠近铝侧有 Ag-Cu 固溶体生成。当温度逐渐升高后,钎料反应完全,在钎缝处有 Al_2Cu 和 $AgIn_2$ 生成,同时有 $TiAl_3$ 生成以及 N 的析出。当温度到 640 °C 时,在钎缝处有少量 $AgIn_2$ 和大量 $TiAl_3$ 生成。

图 14 是在保温时间 30 min 不变时,选用不同的连接温度焊接所获得的 AlN 陶瓷和 Al 的焊接接头的室温抗剪强度。如图 14 所示,当保温时间为 30 min 不变时,随着钎焊温度的升高,接头的室温抗剪强度逐渐升高,并在焊接温度 640 °C 时达到最大值 20.28 MPa。由此可见,焊

接温度的升高使得钎料逐渐反应完全,对接头的室温抗剪强度起到了增强作用。

对 620 °C 下保温 30 min 的接头断口进行 XRD 分析,如图 15 所示。可以看出,接头断裂位置处的相以 In、 $AgIn_2$ 、 Al_2Cu 等析出相,反应相为主,说明断裂位置在反应界面处。说明钎焊界面是焊接接头的薄弱位置。

2.3 基于 Al 表面改性对 AlN/Al 低温钎焊连接及接头组织性能影响

可以看出,在焊接过程中,In 的析出是一个普遍的现象

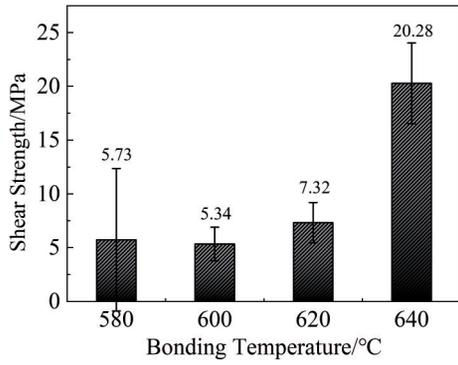


图 14 不同钎焊温度下 In35 钎焊接头的室温抗剪强度

Fig. 14 Room temperature shear strength of In35 brazed joints at different brazing temperatures

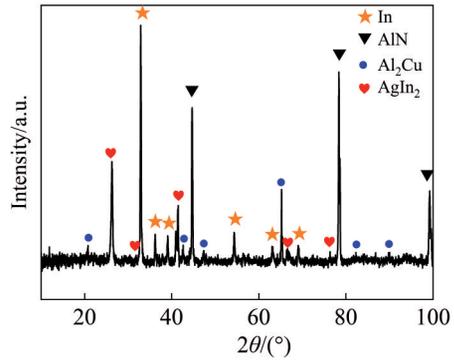


图 15 620 °C 保温 30 min 下 In35 钎焊接头断口 XRD 图谱

Fig. 15 XRD pattern of In35 brazing joint held at 620 °C for 20 min

象,对接头的导热和力学性能产生一定的影响。为改善 In 的扩散情况,选择在 Al 表面镀 Ni 层^[34]。

通过磁控溅射的方式在 Al 表面镀 Ni 层,在磁控溅射前,对 Al 表面进行磨抛处理,保持 Al 表面清洁,磁控溅射时间为 2 h。而后在 620 °C 保温 15 min 的情况下进行焊接,并与不镀 Ni 所得的焊接接头进行对比。如图 16、图 17 所示。可以看出,镀 Ni 后所得接头在钎缝处有 AgIn₂ 生成,仍有少量 In 析出,但

由于 Al 与 Ni 反应生成 Al₃Ni,呈带状分布在 Al 中,有效阻止了 In 向 Al 侧的扩散,使得 In 的析出主要存在于焊接界面处。

对焊接接头的热扩散系数进行测量,同时与母材对比如图 18 所示。可以看出,虽然在 Al 表面镀 Ni 有效阻止了 In 的扩散,但由于 Al 与 Ni 反应生成 Al₃Ni,使接头的导热性能下降,热扩散系数仅达到 21.452 m²/s,为不镀 Ni 接头 65.941 m²/s 的 1/3。

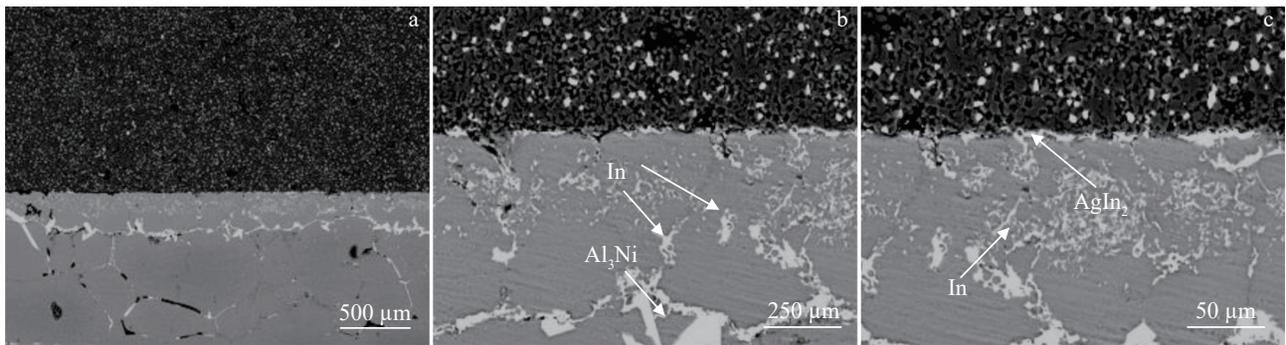


图 16 620 °C 保温 15 min 镀 Ni 焊缝不同放大倍数 SEM 照片

Fig. 16 SEM images of Ni plating weld held at 620 °C for 15 min

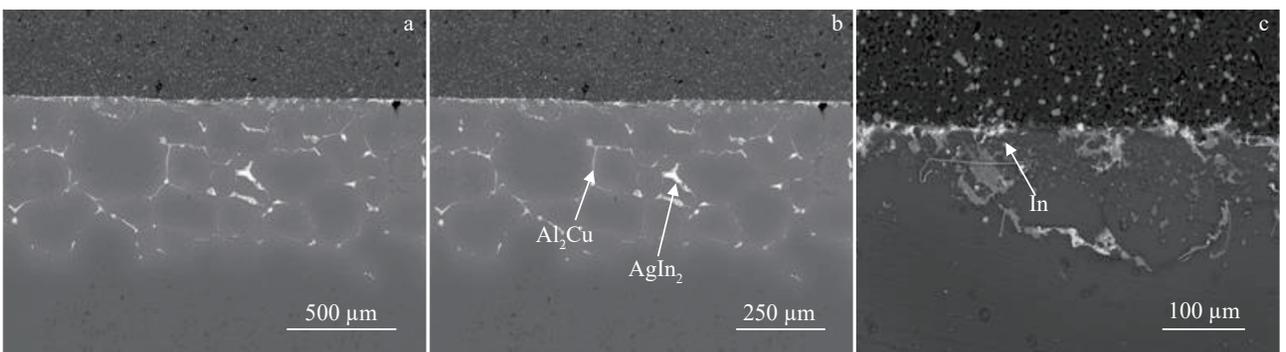


图 17 不镀 Ni 焊缝不同放大倍数 SEM 照片

Fig. 17 SEM images of non-Ni plating weld

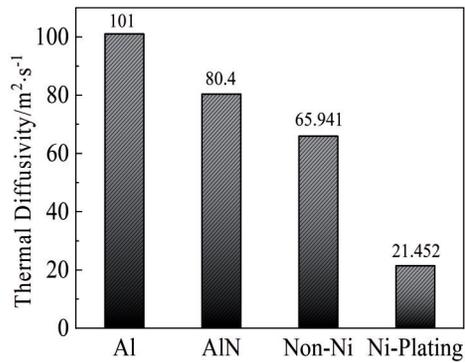


图 18 接头热扩散系数

Fig.18 Thermal diffusivity of the joint

3 结论

1) 通过 AgCuInTi 钎料中加入不同质量分数的 In 降低钎料熔点, 改善钎料润湿性。并探究了球磨时间对钎料的影响, 发现当 In 含量到达 35%, 球磨时间为 90 min 时, 钎料的熔点最低, 且润湿角低, 在 570 °C 发生熔化, 润湿角在 690 °C 仅为 15.2°, 润湿性良好。通过将含 35%In 的 AgCuInTi 钎料与 SnAgCu 钎料 1:1 混合得 Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti 钎料在 487 °C 发生熔化。

2) 使用 Ag-28Cu-35In-2Ti 钎料所得接头是由 Al_2Cu , $AgIn_2$, $TiAl_3$, In 以及 Al 基固溶体所组成。使用的 Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti 钎料所得接头是由 $InSn_3$, Al_3Ti 以及 Al 基固溶体所组成。

3) 使用 Ag-28Cu-35In-2Ti 钎料所得接头的抗剪切强度随温度升高呈现上升趋势, 随着温度升高, 钎料逐渐反应完全, In 析出量减少, 接头强度升高。

4) Al 表面镀 Ni 可以有效阻止 In 的扩散, 但接头热扩散系数仅为 21.452 m^2/s , 而不镀 Ni 的接头热扩散系数可达到 65.941 m^2/s , Al 表面镀 Ni 使接头导热性能明显下降。

5) 使用 Ag-28Cu-35In-2Ti 钎料进行焊接, 在焊接温度为 640 °C, 保温时间为 30 min 的条件下, 所得的焊接接头抗剪切强度最高, 为 20.28 MPa。

参考文献 References

- [1] Lin Jincheng, Xiao Bangyang, Xing Lili *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2022, 42(9): 3708
- [2] Wang Yifeng, Jin Zhouxin, Feng Guangjie *et al. Crystals*[J], 2022, 12(7): 933
- [3] Zhang Jiayou, Mo Yiming. *Chemical Engineering Journal*[J], 2022, 435: 134889
- [4] Cheng Hao(程浩), Chen Mingxiang(陈明祥), Luo Xiaobing(罗小兵) *et al. Advanced Ceramics(现代技术陶瓷)*[J], 2019, 40(4): 265
- [5] Ning Pingfan, Liu Jie, Wang Didi *et al. IEEE Access*[J], 2021, 9:

12074

- [6] Li Shishuai, Chen Huanbei, Wang Heide *et al. International Journal of Applied Ceramic Technology*[J], 2022, 19(5): 2873
- [7] Ethireddy R, Samuel T, Pamu D. *Ceramics International*[J], 2022, 48(19): 29372
- [8] Mu Guoqian, Zhang Yanhua, Qu Wenqing *et al. Welding in the World*[J], 2022, 66(7): 1447
- [9] Wang Xingxing, Li Zhenfeng, Gao Di *et al. International Journal of Modern Physics B*[J], 2022, 36(5): 2250045
- [10] Peng Rong(彭榕), Zhou Heping(周和平), Ning Xiaoshan(宁晓山) *et al. Journal of Inorganic Materials(无机材料学报)*[J], 2002, 17(6): 1203
- [11] Han Lubin, Liang Lin, Chen Dedong *et al. Microelectronics Reliability*[J], 2020, 110: 113645
- [12] Andreas L, Gerhard S. *IEEE Transactions on Power Electronics* [J], 2007, 22(2): 384
- [13] Zhang Shibiao(张世镖), Li Jian(李健), Zhao Guohui(赵国惠) *et al. Gold(黄金)*[J], 2021, 42(3): 79
- [14] Zheng Jiachong(郑家翀). *Uniform Electric Growth of Copper Pillar on Packaging Substrate and Application(封装基板铜柱均匀电生长及应用)* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023
- [15] Ding Jiawen(丁家文). *Study on Preparation and Properties of Nitride Ceramic Copper Cold Plate(氮化物陶瓷覆铜板的制备及其性能的研究)*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023
- [16] Lu Yanping, Zang Xiangrong, Du Bin. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2021, 261: 124222
- [17] Wang Shuaichao(王帅超). *Research on Active Brazing of Aluminum Nitride Ceramics and Copper(氮化铝陶瓷和铜的活性钎焊研究)* [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022
- [18] Long Weimin(龙伟民), Zhang Lei(张雷), Cheng Yafang(程亚芳). *MW Metal Forming(金属加工)*[J], 2008, 12: 47
- [19] Chen Bo, Xiong Huaping, Cheng Yaoyong *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2015, 31(10): 1034
- [20] Lv Jinling(吕金玲). *Research on Process and Brazing Mechanism for Joining AlN and Cu with Ag-Cu-Ti Based Composite Filler(Ag-Cu-Ti 基复合钎料连接 AlN/Cu 的工艺与机理研究)*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020
- [21] Zhang Xiaoyi(张笑一), Shang Hailong(尚海龙), Ma Bingyang(马冰洋) *et al. Acta Metall Sinica(金属学报)*[J], 2018, 54(4): 575
- [22] Zhao Bowen(赵博文), Shang Hailong(尚海龙), Chen Fan(陈凡) *et al. Acta Physica Sinica(物理学报)*[J], 2016, 65(8): 305
- [23] Su Zhoulin, Meng Qinglong, Zhang Bin. *Optical Materials*[J], 2016, 60: 443
- [24] Long Fei, He Peng, Sekulic D P. *Metals*[J], 2018, 8(5): 315
- [25] Long Fei, Zhang Guanxing, He Peng *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(2): 385

- [26] Long W M, Zhang G X, Zhang Q K *et al. Scripta Materialia*[J], 2016, 110: 41
- [27] Long Weimin, Li Shengnan, Du Dong *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(12): 3781
- [28] Long Weimin(龙伟民), Zhang Guanxing(张冠星), Zhang Qingke(张青科) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2015, 36(11): 1
- [29] Long Weimin(龙伟民), Qiao Peixin(乔培新), Wang Haibin(王海滨) *et al. Chinese Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2001, 37(10): 107
- [30] Chen Dongdong, Qin Junhu, Gan Youwei *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(2): 502
- [31] Wang Zitong, Dong Di, Xiong Ning *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(5): 1229
- [32] Cai Zhengxu(蔡正旭), Qi Yuefeng(齐岳峰), Zhang Guoqing(张国清) *et al. Welding & Joining(焊接)*[J], 2017, (4): 29
- [33] Shang Yangeng(商延赓), Xu Feixia(许飞霞), Sun Daqian(孙大千) *et al. Electronics Process Technology(电子工艺技术)*[J], 2007, 28(1): 10
- [34] Wang Huigai, Zhang Keke, Wang Bingying *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(6): 1523

On Low-Temperature Brazing of AlN Ceramics and Al: Design of Brazing Material, Microstructure and Properties of Joint

Zhou Hangze^{1,3}, Long Fei², Xu Rui^{1,3}, Wang Ce^{1,3}, He Peng^{1,3}, Shi Qingqing⁴, Zhao Yan⁵

(1. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450018, China)

(2. Institute of Materials, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, China)

(3. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(4. Gree Electric (Zhengzhou) Appliances Inc, Zhengzhou 450066, China)

(5. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd, Nanyang 473000, China)

Abstract: This study addresses the lack of brazing materials suitable for low-temperature brazing of AlN ceramics and Al. By adding elements In and Sn to AgCuTi brazing materials to lower their melting points, new low-temperature brazing materials Ag-28Cu-35In-2Ti and Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti were prepared to achieve good bonding of AlN/Al joints. The low-temperature brazing process, joint microstructure and properties of AlN ceramics and Al using two types of brazing materials were explored. Results show that for Sn-19Ag-14.35Cu-17.5In-1Ti brazing materials relatively stable compounds such as InSn₃ and Al₃Ti form at the solder joints. Ag-28Cu-35In-2Ti brazing material generates relatively stable compounds such as Al₂Cu, AgIn₂, and TiAl₃ at the solder joint, and the joint strength increases with the increase in welding temperature. To prevent the diffusion and precipitation of In, Ni plating is chosen on the surface of Al, but it reduces the thermal conductivity of the joint. It is found that using Ag-28Cu-35In-2Ti brazing material for welding contributes to the highest joint strength of 20.28 MPa at 640 °C for 30 min; under the condition of 620 °C for 15 min, the thermal diffusion coefficient can reach 65.941 m²/s. This brazing material provides a new method for highly reliable connection of AlN ceramics/Al.

Key words: low temperature brazing material; AlN/Al; microstructure and properties; surface modification

Corresponding author: He Peng, Ph.D., Professor, State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: hithepeng@hit.edu.cn