

## 不基于熔态润湿的 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 直接钎焊

陈凡<sup>1</sup>, 石恺成<sup>1</sup>, 孙士阳<sup>1,2</sup>, 赵博文<sup>1</sup>, 尚海龙<sup>1</sup>, 李戈扬<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240; 2. 内蒙古科技大学, 包头 014010)

**摘要:** 针对 Al 熔液在 850℃ 以下不润湿 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 而难以直接钎焊的困难, 本工作研究了溅射 Al 对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的“润湿”作用, 提出了一种采用溅射 Al 基薄膜作为钎料直接钎焊 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的方法。结果表明, 这种方法可以在不满足熔态 Al 润湿条件的 680℃ 实现 Al 和 Al-Cu 合金对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的直接真空钎焊, 并且仅需 0.1 Pa 的真空度。所获得的 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的接头剪切强度达到 115 MPa, Al-1.6at% Cu 合金钎焊接头的剪切强度可提高到 163 MPa, 当钎料中的 Cu 含量提高至 14.3at% 后, 钎焊接头中焊缝与陶瓷界面产生 Cu 的偏聚, 接头的剪切强度因界面断裂降低为 127 MPa。并对这种不基于金属熔态润湿钎焊方法的原理进行了分析讨论。

**关键词:** 钎焊; 润湿性; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 接头强度; Al 合金

**中图分类号:** TQ174; TG454 **文献标识码:** A

## Direct Brazing of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> without Wettability of Molten Metal

CHEN Fan<sup>1</sup>, SHI Kai-Cheng<sup>1</sup>, SUN Shi-Yang<sup>1,2</sup>, ZHAO Bo-Wen<sup>1</sup>, SHANG Hai-Long<sup>1</sup>, LI Ge-Yang<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cannot be directly brazed with aluminum due to the poor wettability of aluminum on alumina below 850℃. Based upon effect of sputtered aluminum wetting on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a direct brazing method was proposed to utilize sputtered Al-based films as brazing fillers on alumina. The results show that direct brazing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Al and Al-Cu alloy can be achieved at 680℃ in vacuum with vacuum level only of 0.1 Pa. Through this method, the shear strength of joint with pure Al as brazing filler is 115 MPa and that with Al-1.6at% Cu is up to 163 MPa. When the Cu content in the Al-Cu alloy increases to 14.3at%, the shear strength of joint decreases to 127 MPa, due to the joint fracture generating at the interface caused by the interfacial segregation of Cu. Moreover, the principle of this direct brazing method not based on wettability of molten metal is analyzed.

**Key words:** brazing; wettability; alumina; joint strength; aluminum alloy

钎焊是通过熔融金属润湿固体基体进而实现冶金结合的一种连接方法, 对陶瓷而言, 钎焊则是最主要的连接方法。在现有的钎焊理论中, 润湿是钎焊的基础, 作为钎料的金属熔液只有润湿基体(金属、陶瓷)才能实现钎焊连接。但是金属熔液不能润湿常用的工程陶瓷(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AlN 等), 只能采用在陶瓷表面上烧结或镀覆<sup>[1-3]</sup>能与其反应的活性金属层

的金属化方法, 或在钎料中加入活性金属组分的活性钎料钎焊法<sup>[4-7]</sup>, 使陶瓷表面形成可被金属润湿的反应过渡层而实现钎焊连接, 因而现有的陶瓷钎焊接头中都存在不同程度影响接头性能的反应过渡层。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 因具有许多优异的性能而得到广泛应用, 如在电子工业中, 作为封装基片需要将 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与金

收稿日期: 2015-10-13; 收到修改稿日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51371118, 51401120) National Natural Science Foundation of China(51371118, 51401120)

作者简介: 陈凡(1990-), 男, 博士研究生. E-mail: sayno2010@sjtu.edu.cn

通讯作者: 李戈扬, 教授. E-mail: gyli@sjtu.edu.cn

属如Cu<sup>[8-9]</sup>、Al<sup>[10]</sup>、Ti<sup>[11]</sup>等进行钎焊连接。为了使金属钎料润湿Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,一般只能采用具有脆性反应过渡层的方式。例如,在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>直接覆铜法中<sup>[8]</sup>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu界面形成的CuAlO<sub>2</sub>化合物反应过渡层就会降低陶瓷基板的导热能力,而且其产生的内应力也影响了基板的热疲劳性能。为了避免钎焊接头产生反应过渡层最好的方法是实现金属对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的直接钎焊,为此就要求熔融金属钎料能够直接润湿Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

Al是钎焊Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的理想钎料,它们之间不发生化学反应,Al优异的导电、导热性可降低钎焊接头的热阻,良好的塑性也有益于接头内应力的减缓和热疲劳性能的提高。但是,熔融Al不能润湿Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,润湿角约为130°,只有当温度达到850℃以上时,润湿角才随时间的延长而逐步降低到90°以下<sup>[12-17]</sup>,因而实现Al对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的钎焊就必须解决在钎焊温度下Al对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的润湿问题。本工作采用磁控溅射的方法在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷表面溅射了Al或Al合金,研究溅射Al对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的“润湿”性,进而实现Al和Al合金对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的无反应过渡层直接钎焊。

## 1 实验方法

钎焊所用的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷为高纯度多晶片,陶瓷片经1 μm金刚石研磨膏抛光、无水乙醇超声清洗并干燥后,采用磁控溅射方法沉积Al和Cu薄膜作为钎料。在ANELVA SPC-350多靶磁控溅射仪上进行薄膜沉积,镀膜前真空室的背底气压预抽至低于4×10<sup>-4</sup> Pa,对陶瓷片加热至400℃并保温10 min以去除其表面吸附的杂质和气体。陶瓷片冷却至室温后,对真空室充入高纯Ar(纯度99.999%),并保持压强为0.6 Pa。φ76 mm的Al靶(纯度99.99%)和Cu靶(纯度99.99%)分别由独立的直流阴极和射频阴极控制。在薄膜沉积过程中,陶瓷基片不加热也不施加负偏压。实验在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面沉积了三种不同的薄膜,分别为:Al(7 μm)单层膜、Al(7 μm)+Cu(0.1 μm)和Al(7 μm)+Cu(1 μm)的双层膜。在双层膜中,Cu层都是薄膜的表面层,这些很薄的Cu层既可以防止Al膜氧化,还可以在其熔化后作为钎料的合金元素。由Al层和Cu层的厚度比可计算得到这两种双层膜形成的合金焊缝中Cu含量分别为1.6at%和14.3at%。

采用真空钎焊的方式进行钎焊,将两片已镀膜的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷片以膜面相对并水平放置于真空炉中,在陶瓷片上放置小重物对样品进行固定并施加压力,真空度达到0.1 Pa后,对试样加热至680℃保温10 min后随炉冷却。

采用电子拉伸试验机测试钎焊接头的剪切强度,

接头剪切面的尺寸为3 mm×2 mm,各种钎焊接头都测试10个以上的样品并取平均值。采用Hitachi s3400n扫描电子显微镜(SEM)及其附属的Apollo xp型X射线能量分散谱(EDS)观察钎焊接头的组织并分析焊缝的成分;在VHX-1000高景深光学显微镜下观察接头的断口形貌。

## 2 实验结果

由图1各钎焊接头的剪切强度可见,纯Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>钎焊接头的强度为115 MPa,Al-1.6at% Cu固溶体钎料的钎焊接头强度提高到163 MPa。然而进一步增加钎料中Cu含量至亚共晶成分的Al-14.3at% Cu后,接头的剪切强度略有下降,降低为127 MPa。

由图2不同焊缝成分接头的SEM照片可见,各焊缝呈现致密饱满的铸态组织,少有未焊透和气孔等钎焊缺陷,焊缝与陶瓷形成了良好的冶金结合。不同Cu含量的接头焊缝成分分别对应于纯Al(图2(a))、α-Al固溶体(图2(b))以及α-Al固溶体和Al<sub>2</sub>Cu相组成的亚共晶组织(图2(c))。通过比较可以发现,在含Cu钎料的焊缝中(图2(b)和图2(c))存在一些分布于焊缝与陶瓷界面的浅色相,并且它们的含量随焊缝Cu含量的增加而增加。在含14.3at% Cu的亚共晶焊缝中,这些浅色相几乎在界面形成连续状。由对应的Cu元素面扫描像(图2(d))可知,这种浅色相为Cu的富集区,微区成分分析得到其Al和Cu的原子比约为4:1,表明这些浅色相为Al固溶体和Al<sub>2</sub>Cu的混合物。在Cu含量较低的α-Al固溶体焊缝中(图2(b)),钎料中的Cu在熔融态时也具有富集于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷表面的倾向,使得凝固时界面处形成含Al<sub>2</sub>Cu的混合物浅色相。

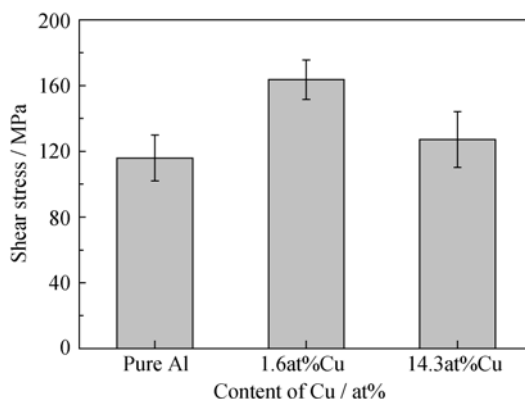


图1 不同Cu含量钎料接头的剪切强度

Fig. 1 Shear strength of the brazing joints with filler metals containing various Cu contents

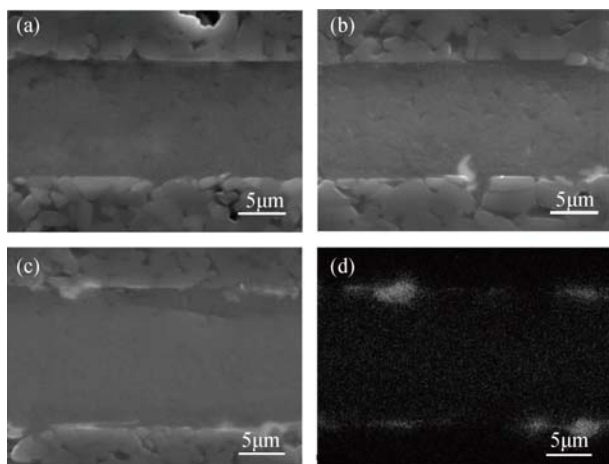


图 2 不同成分钎料焊缝的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of the brazing joints with different Cu content fillers

(a) Pure Al; (b) Al-1.6at% Cu; (c) Al-14.3at% Cu; and (d) Cu X-ray map corresponding to area of (c)

图 3 为接头剪切断口的高景深光学显微镜照片。其中图 3(a)纯 Al 焊缝接头的剪切断裂面呈现犁沟状形貌的韧性断口, 显示出焊缝接头断裂时高塑性纯 Al 相的刮擦痕迹。在图 3(b)含 1.6at% Cu 固溶体焊缝的断裂面上, 犁沟状形貌的面积减少, 犁沟长度减短, 表明固溶体焊缝在提高接头强度的同时塑性略有降低。与图 3(a, b)钎焊接头在焊缝处断裂不同, 图 3(c)亚共晶焊缝的剪切断裂面既产生在焊缝中也产生在焊缝与陶瓷的界面处, 图中浅色的焊缝断裂区仍存在一些较短的犁沟状形貌, 而深色部分则为  $\alpha$ -Al 相和  $\text{Al}_2\text{Cu}$  混合物与陶瓷界面的脱粘区。显然, 脆性  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相在界面的偏聚降低了亚共晶焊缝接头的剪切强度。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 界面结合与润湿性

大量研究表明, 在  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  体系中, Al 熔液的

润湿角只有在温度高于  $850^\circ\text{C}$  后才能逐步小于  $90^\circ$  而实现润湿<sup>[12-17]</sup>。这一过程已有许多理论研究<sup>[18-20]</sup>, Zhang 等<sup>[20]</sup>采用分子动力学的研究表明, Al 熔液与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面接触时, 熔液中的 Al 原子和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面的 O 原子存在两种吸附状态, 熔液温度较低时, 它们之间仅为存在“间隙”的物理吸附状态, 只有温度升高至  $800^\circ\text{C}$  以上才能从物理吸附状态逐步转变为具有 Al-O 化学键的化学吸附状态, 从而降低  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  的界面张力, 使 Al 熔液得以润湿和铺展。显然, 它们实现润湿的本质是形成了 Al-O 键, 而其形成则需要高温以使 Al 原子获得克服势垒所必需的动能。

Ksiazek 等<sup>[12]</sup>采用座滴法对  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  体系的研究发现, 当润湿角由  $121^\circ(750^\circ\text{C})$  和  $96^\circ(850^\circ\text{C})$  不润湿状态到  $79^\circ(950^\circ\text{C})$  润湿态后, 界面的剪切强度可由 29 MPa 和 35 MPa 提高到 46 MPa。这一研究也表明  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  界面结合状态与润湿性的关系。宁晓山等<sup>[21-23]</sup>也发现了类似关系, 他们采用石墨压铸方法在  $730\sim 780^\circ\text{C}$  范围成功地去除 Al 熔液表面的氧化膜, 实现了金属 Al 对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的镀覆, 然而强度测试却发现断裂主要发生在  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  的界面。显然, 由于所采用的镀覆温度尚不能为熔液中的 Al 原子提供足够的热动能, 所获得的  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  界面并未形成具有 Al-O 键的化学结合, 界面的物理结合使其难以呈现高强度。

本实验采用的钎焊温度为  $680^\circ\text{C}$ , 显然, Al 熔液对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的润湿并不是在此温度下获得的。其实, 作为润湿本质的界面 Al-O 键形成在 Al 作为钎料镀覆于陶瓷表面的过程中已经实现: 磁控溅射时, 从阴极靶面溅射出的气相 Al 粒子(原子、离子或它们的团簇)具有可达到  $10^0\text{ eV}$  水平的高能量, 这一能量不但远高于  $850^\circ\text{C}$  熔液中 Al 原子的热动能, 而且比 Al 在  $1000^\circ\text{C}$  以上热蒸发原子所具有的能量( $10^{-1}\text{ eV}$ )还高一个数量级<sup>[24]</sup>。高能量溅射 Al 粒子沉积时对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面产生的撞击不但可以去除其表面吸附物,

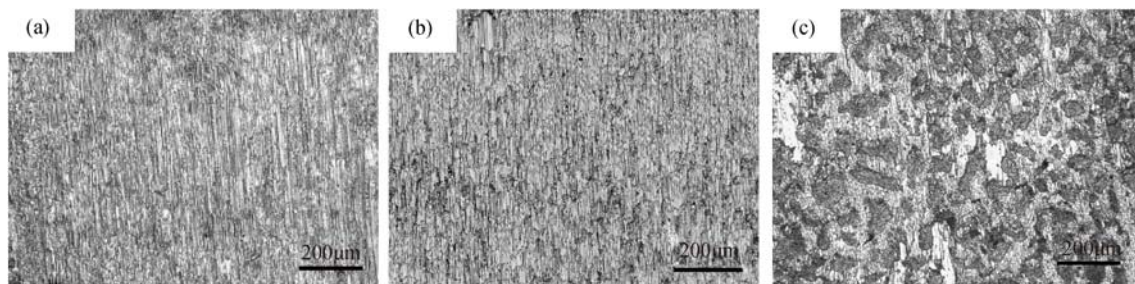


图 3 钎接头剪切断口的高景深光学显微镜照片

Fig. 3 Shear fracture morphologies of the brazing joints with different brazing fillers through optical microscope with a large depth of field

(a) Pure Al; (b) Al-1.6at% Cu; (c) Al-14.3at% Cu



而且能够克服势垒形成 Al-O 键,并且,这种已经形成的化学结合在 Al 薄膜加热熔化后仍能保持。

由于以上分析的 Al、O 间化学键的改变仅产生在 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 界面几个原子层内的原子之间,对这种界面原子间化学键变化的直接表征是极为困难的,我们采用一种间接的对比实验方法对其进行了证明。

实验在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基片上溅射沉积了两种薄膜,样品(a)的结构为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu(50 nm)/Al(7 μm); 样品(b)的结构为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al(50 nm)/Cu(50 nm)/Al(7 μm)。这两种样品的差别在于(a)为薄膜的 Cu 层接触 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,而(b)则是薄膜的 Al 层直接接触 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。将两种样品在真空下加热至 680℃ 薄膜熔化并保温 10 min 后随炉冷却,图 4 示出了两种样品薄膜经熔化后表面的高景深光学显微镜三维形貌照片。由图 4 可见,在图 4(a)Cu 层接触 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的样品表面,可观察到薄膜熔化后熔液聚集而使薄膜产生开裂的形貌。与不同的是,在 Al 层直接接触 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的样品表面,尽管薄膜熔化后产生了熔液聚集的趋势,但薄膜却未开裂,仍然完整地覆盖于陶瓷表面(图 4(b))。这一对比实验表明,溅射 Al 原子的直接撞击可与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面的 O 原子形成 Al-O 化学键,正是这一高键能化学键的存在使得薄膜熔化后不发生开裂,呈现润湿特

征,而溅射 Cu 原子由于不能在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面形成高键能化学键,覆盖于其上的 Al 薄膜熔化后发生开裂,表现出不润湿特征。

### 3.2 氧化膜的去除

有效去除表面氧化膜一直是 Al 钎焊(包括钎焊 Al 材和用 Al 钎料进行钎焊)必须面对的问题。众所周知,Al 熔液的表面与 Al 固体一样存在着致密坚固的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 固态氧化膜,这一氧化膜的熔点高达 2050℃,而且化学稳定性极高,即使在 1000℃ 的高温下也需要在低于 10<sup>-30</sup> Pa 的氧分压才能分解<sup>[25]</sup>。已有的技术在非真空钎焊时,主要采用氯化物钎剂去除基材和 Al 熔液表面的氧化膜,而在真空 Al 钎焊中除了需达到 10<sup>-3</sup> Pa 以上的真空度外还需利用 Mg 蒸气将 Al 氧化膜还原。

本实验中比较了两种去除 Al 熔液氧化膜的方式:在以 Al-Cu 合金为钎料时,实验采用了在 Al 膜表面沉积一层很薄 Cu 层的设计,这一 Cu 层不但可作为合金元素,更起到了防止 Al 膜氧化的作用,所产生的疏松氧化物(Cu<sub>2</sub>O、CuO)也不会阻碍 Al 熔液的流动和融合。实验还表明,即使在 Al 膜表面不沉积 Cu 层,在 0.1 Pa 这一较低的真空度下也可顺利实现钎焊,因为钎焊时两陶瓷表面 Al 膜的相对放置和接触,使处于其间的很薄固态氧化膜随着两侧 Al 膜的熔化而破碎,并分散于熔液之中。

### 3.3 该钎焊方法的优点

与现有的钎焊方法相比,本工作不基于熔态金属润湿的钎焊方法还具有如下优点:

1) 无须对陶瓷的钎焊面进行改性或镀覆反应过渡层,钎料中也不需要添加任何与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应的活性元素,因而所获得的钎焊接头中不产生可能影响接头性能的化合物反应过渡层。

2) 所采用的镀覆双层或多层薄膜的方法,对钎料合金元素具有选择面宽、添加及含量控制方便易行等优点,钎焊接头的强度可通过优选合金元素得到提高。

3) 相对于现有 Al 钎焊需 10<sup>-3</sup> Pa 以上的真空度,本方法仅需 0.1 Pa 的真空度,这一工艺特点也具有重要优势。

4) 气相沉积薄膜钎料所具有的厚度薄和对钎焊面全覆盖的特点也可减小焊缝的厚度,从而有利于减缓接头因金属焊缝与陶瓷基材热膨胀系数差异所产生的内应力。

由此可见,采用在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面溅射沉积 Al 薄膜作为钎料的钎焊方法不仅仅是一种钎料添加方式的改变,更由于能够在界面形成 Al-O 化学键实现 Al 对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的“润湿”。根据这一现象的揭示,我们提出了不基于

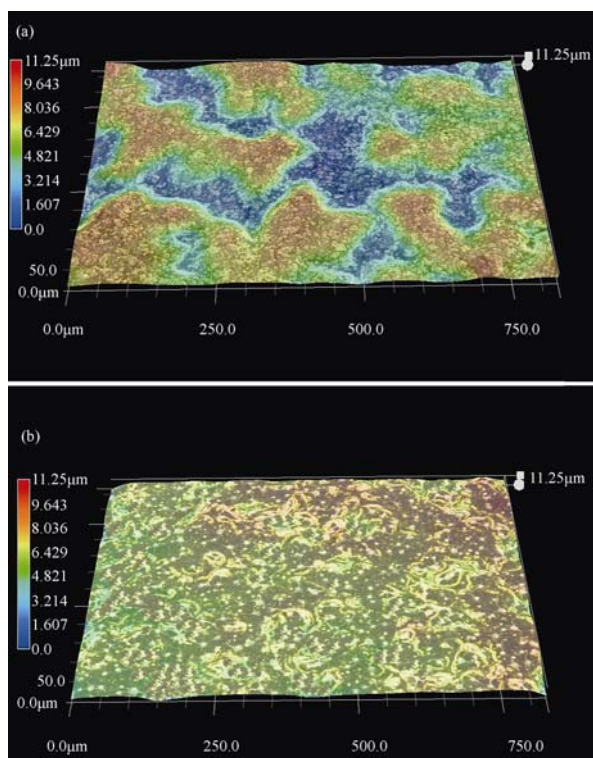


图4 Al 薄膜熔化后的高景深光学显微镜三维形貌照片  
Fig. 4 Three-dimensional morphologies of Al films after melting through optical microscope with a large depth of field (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu(50 nm)/Al(7 μm) sample; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al(50 nm)/Cu(50 nm)/Al(7 μm) sample

熔态金属润湿陶瓷的钎焊方法, 这种无反应过渡层的直接钎焊方法为陶瓷的钎焊提供一种新的思路。

## 4 结论

1) 基于对溅射 Al 原子可“润湿” $\text{Al}_2\text{O}_3$  现象的揭示提出了一种不基于熔态润湿的 Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  钎焊方法, 该方法通过在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  表面溅射沉积 Al 和 Al-Cu 薄膜作为钎料, 克服了 Al 熔液在钎焊温度下不润湿陶瓷的困难, 实现了对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的无反应过渡层直接钎焊, 并可将钎焊所需的真空度降低到 0.1 Pa。

2) 采用该方法获得的 Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  接头可达到 115 MPa 的剪切强度, 而含 1.6at% Cu 铝合金固溶体钎料的接头强度还可提高到 163 MPa, 接头的剪切断裂都产生于接头的焊缝金属中; 进一步提高钎料的 Cu 含量至 14.3at% 后, 接头将在焊缝与陶瓷的界面上产生 Cu 的偏聚, 使得钎焊接头的断裂发生在焊缝与陶瓷的界面, 剪切强度有所降低, 降低至 127 MPa。

## 参考文献:

- [1] CUI W, YAN J, DAI Y, *et al.* Building a nano-crystalline  $\alpha$ -alumina layer at a liquid metal/sapphire interface by ultrasound. *Ultrason. Sonochem.*, 2015, **22**: 108–112.
- [2] ALI M, KNOWLES K M, MALLINSON P M, *et al.* Microstructural evolution and characterization of interfacial phases in  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag-Cu-Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$  braze joints. *Acta Mater.*, 2015, **96**: 143–158.
- [3] YADAV D P, KAUL R, GANESH P, *et al.* Study on vacuum brazing of high purity alumina for application in proton synchrotron. *Mater. Des.*, 2014, **64**: 415–422.
- [4] JASIM K M, HASHIM F A, YOUSIF R H, *et al.* Actively brazed alumina to alumina joints using CuTi, CuZr and eutectic AgCuTi filler alloys. *Ceram. Intl.*, 2010, **36**(8): 2287–2295.
- [5] LAIK A, MISHRA P, BHANUMURTHY K, *et al.* Microstructural evolution during reactive brazing of alumina to Inconel 600 using Ag-based alloy. *Acta Mater.*, 2013, **61**(1): 126–138.
- [6] XIA H, WU A, FAN Y, *et al.* Effects of ion implantation on the brazing properties of high purity alumina. *Surf. Coat. Technol.*, 2012, **206**(8): 2098–2104.
- [7] GHOSH S, CHAKRABORTY R, DANDAPAT N, *et al.* Characterization of alumina-alumina/graphite/monel superalloy brazed joints. *Ceram. Int.*, 2012, **38**(1): 663–670.
- [8] PIETRZAK K, OLESINSKA W, KALINSKI D, *et al.* The relationship between microstructure and mechanical properties of directly bonded copper-alumina ceramics joints. *Bull. Pol. Acad. Sci.*, 2014, **62**(1): 23–32.
- [9] FU W, SONG X G, HU S P, *et al.* Brazing copper and alumina metallized with Ti-containing  $\text{Sn}_{0.3}\text{Ag}_{0.7}\text{Cu}$  metal powder. *Mater. Des.*, 2015, **87**: 579–585.
- [10] LOVRO G, BLUGAN G, BORETIUS M, *et al.* Fracture behavior of soldered  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic to A356 aluminum alloy and resistance of the joint to low temperature exposure. *Mater. Des.*, 2015, **88**: 889–896.
- [11] LEINENBACH C, WEYRICH N, ELSENER H R, *et al.*  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ti solder joints-influence of ceramic metallization and thermal pretreatment on joint properties. *Int. J. Appl. Ceram. Tec.*, 2012, **9**(4): 751–763.
- [12] KSIAZEK M, SOBCZAK N, MIKULOWSKI B, *et al.* Wetting and bonding strength in Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  system. *Mater. Sci. Eng., A*, 2002, **324**(1): 162–167.
- [13] SANGGHALEH A, HALALI M. An investigation on the wetting of polycrystalline alumina by aluminium. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **197**(1): 156–160.
- [14] LEE S B, KIM Y M. Direct observation of in-plane ordering in the liquid at a liquid Al/ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\bar{1}10\bar{2}$ ) interface. *Acta Mater.*, 2011, **59**(4): 1383–1388.
- [15] YU Z Q, WU G H, SUN D L, *et al.* Coating of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  additive on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder and its effect on the wetting behaviour in the system  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ . *Mater. Lett.*, 2003, **57**(20): 3111–3116.
- [16] SANGGHALEH A, HALALI M. Effect of magnesium addition on the wetting of alumina by aluminium. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(19): 8202–8206.
- [17] CUI W, LI S, YAN J, *et al.* Ultrasonic-assisted brazing of sapphire with high strength Al-4.5Cu-1.5Mg alloy. *Ceram. Intl.*, 2015, **41**(6): 8014–8022.
- [18] PILANIA G, THIJSSE B J, HOAGLAND R G, *et al.* Revisiting the Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  interface: coherent interfaces and misfit accommodation. *Sci. Rep.*, 2014, **4**: 1–9.
- [19] ZHANG W, SMITH J R. Nonstoichiometric interfaces and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  adhesion with Al and Ag. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(15): 3225–3228.
- [20] ZHANG Q, CAGIN T, VAN D A, *et al.* Adhesion and nonwetting-wetting transition in the Al/ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  interface. *Phys. Rev. B*, 2004, **69**(4): 45423-1–45423-11.
- [21] WANG B, NING X S, LI S. A new process for bonding Al to  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramics. *Rare. Met. Mater. Eng.*, 2011, **40**(22): 518–521.
- [22] LI S, NING X S, WANG B. Study on dip-coating of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics with Al. *Rare. Met. Mater. Eng.*, 2011, **40**(22): 525–528.
- [23] PENG R, ZHOU H P, NING X S, *et al.* Research of the performance of Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrate substrates. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **17**(4): 731–736.
- [24] 郑伟涛. 薄膜材料与薄膜技术. 北京: 化学工业出版社, 2004: 72.
- [25] FUJII H, NAKAE H, OKADA K. Interfacial reaction wetting in the boron nitride/molten aluminum system. *Acta metall. mater.*, 1993, **41**(10): 2963–2971.