蓝宝石的焊接方法研究现状

李书齐¹, 史维琴¹, 李华卿², 崔炜²

(1. 常州工程职业技术学院,江苏常州 213164; 2. 河海大学,江苏常州 213022)

摘要: 针对目前的研究较为偏重蓝宝石焊接的工艺效果,在蓝宝石/焊接材料界面结合机理和反应动力学方面的研究仍不够深入的问题。综述了蓝宝石焊接过程中的界面结合和热应力两个核心问题。蓝宝石具有较高的化学惰性,不易与焊缝填充材料发生扩散和化学反应,导致界面结合问题。蓝宝石的热膨胀系数较低,与焊缝填充材料的热膨胀系数可能具有较大差异,在焊接的热循环中会导致加大的热应力。归纳与总结了三种主要焊接方法,即陶瓷粉末烧结连接、扩散焊和钎焊,焊接过程中蓝宝石与焊接材料的反应原理、界面结合过程和接头强度,提出目前研究中所存在的主要问题及建议未来应关注的内容,希望对该领域的研究及应用提供参考。

关键词: 蓝宝石;焊接;科学问题;研究现状 中图分类号: TG454.14

0 前言

人造单晶 α-Al₂O₃ 在科研和工业领域一般称为蓝 宝石。它具有良好的光学和力学性能,同时具有很高 的熔点、极高的硬度、极强的耐腐蚀性和较好的导热 性^[1]。因此蓝宝石在高技术领域中需求广泛,如激光 设备^[2-3]和窗口^[4-6]、电子器件^[7]和科学仪器^[8]等。它 也是飞行器和导弹光学窗口材料^[9-10]。

在制造含蓝宝石的器件过程中往往需要焊接技术,其核心问题在于界面结合和热应力。首先,蓝宝石 具有极高的化学稳定性,与大多数的焊接材料之间的 反应、扩散和界面结合比较困难。其次,蓝宝石的热膨 胀系数较小,很难与焊缝填充材料相匹配,高温下形成 的焊缝在冷却的过程中容易形成较大的热应力,造成 焊接构件的畸变乃至微裂纹等缺陷。当前关于蓝宝石 焊接的研究主要是围绕着这两个问题展开。目前蓝宝 石焊接方法主要有三种:陶瓷粉末高温烧结法、扩散焊 法和钎焊法。

文中在概述蓝宝石的主要焊接方法研究成果的基础上,总结了焊接材料与蓝宝石之间的反应、扩散与结合行为机理及焊接接头的热应力特点,讨论了目前研究中所存在的主要问题,希望对该领域的基础研究及

doi: 10.12073/j.hj.20181019001

工程应用提供有益参考。

1 蓝宝石的陶瓷粉末烧结焊接

烧结连接法是将氧化物陶瓷粉末置于氧化铝基体 之间,在高温条件下对焊缝施加一定的压力,使得界面 能够通过扩散形成连接。这一方法又可以细分为固态 外延烧结连接和玻璃化反应烧结连接。因为焊接材料 与蓝宝石之间的热膨胀系数相近,因此这类方法可以 得到应力较低的接头。

1.1 固态外延烧结连接

将纯氧化铝粉末作为焊缝填充材料来焊接氧化 铝的方法被称为固态反应烧结连接。Scott^[11]较早地 使用了这一方法连接蓝宝石。后来这一方法得到了 较为广泛的研究,其基本原理如图1所示^[12]。小晶 粒氧化铝粉末具有较高的界面能,在高温条件下小晶 粒逐渐长大,大晶粒吞噬小晶粒。蓝宝石与焊缝的界 面向焊缝中迁移从而实现连接。这一反应也可以视 为高温条件下的固态反应外延。理论上这一方法能 够完全吞噬焊缝中的氧化铝粉末,实现两块蓝宝石之 间的完美结合。

单纯使用氧化铝粉末作为焊缝填充材料需要在很高温度下进行扩散而且扩散过程仍然十分缓慢。研究人员着手克服这一缺点,通过掺杂来提高晶界扩散的速度。例如,Dillon等人^[13]于 2007 年将经过掺杂 CaO的氧化铝粉末置于 α 单晶氧化铝管道中,在 1 600~1 945 ℃的高温下保温 0~2 h。发现蓝宝石与氧化铝粉末之间的边界发生迁移,但在焊缝内仍留有大量空

收稿日期: 2018-10-19

基金项目:国家自然科学基金(51605141,51705039);江苏省自然科学基金(BK20160285,BK20170320)。

隙的缺陷。





1.2 玻璃化反应烧结连接

将多种氧化物的混合物,如 SiO₂,CaO,Al₂O₃,MgO 等的混合物,作为焊缝填充材料的烧结连接被称为玻 璃化反应烧结连接。这些混合物之间以及它们与蓝宝 石之间在高温下会发生相互的扩散,并且会形成玻璃 化反应,使得填充材料在低于基体熔点的温度下液化, 从而实现界面的结合^[14]。这一方法的一个重要优点是 可在非真空、非保护气氛中进行。

哈尔滨工业大学王长文教授课题组[15-16]系统研究 了使用 Al₂O₃-SiO₂-MgO 混合粉末(MAS 玻璃粉末)作 为中间层烧结连接蓝宝石的工艺特点。与使用单纯的 Al₂O₂ 粉末相比,使用 MAS 玻璃粉末降低扩散焊所需 的温度,改善了焊缝的结构,减少了空隙的存在,提高 了强度。Fiore 等人^[17]使用厚度为 0.5 mm 的含有 Al₂O₃,SiO₂,MgO 等多种氧化物的多晶陶瓷薄片作为中 间层扩散焊接了蓝宝石,接头的四点弯曲强度达到 290 MPa。Fujitsu 等人^[18]使用 34CaO-30Al₂O₃-36SiO₂ 硅酸 盐玻璃薄片焊接蓝宝石和多晶氧化铝陶瓷管,接头四 点弯曲强度最高达到 343 MPa。哈尔滨工业大学的孙 剑飞教授课题组^[19]使用 0. 5MgO-94Al₂O₃-5. 5SiO₂ 混 合玻璃作为中间层扩散焊接了蓝宝石,发现原始的 Al₂O₃ 粉末尺寸为 50~200 nm, 而在 1 700 ℃ 保温 1 h 和1.5 h, 晶粒尺寸长大到平均5 µm 和8 µm。随着晶 粒长大晶粒之间的缝隙被弥合。曹健教授团队^[20]使用 B₂O₃+Al₂O₃ 粉末作为填充材料在 600~1 000 ℃下对多 晶α-Al₂O₂ 陶瓷(结构类似于蓝宝石)进行热压焊接,界 面生成了反应物晶须,强度达 90 MPa。何鹏教授团 队^[21]使用 B₂O₃-ZnO₂ 玻璃钎焊了蓝宝石,发现这种玻 璃对蓝宝石的润湿性极佳,蓝宝石界面形成了 ZnAl₂O₄ 的尖晶石过渡层,接头强度达到 70 MPa。可见硼化物 玻璃显著降低了焊接所需的温度,是未来可能大规模 应用于蓝宝石的焊接材料。

玻璃化反应连接蓝宝石不一定要使用加热炉来进 行,近年来很多学者采用激光作为热源,以玻璃材料作 为焊接材料来焊接蓝宝石,也取得了很好的焊接效 果^[22-23]。这类方法既可以归类于烧结焊接,也可以归 类于激光焊或者钎焊。可见以玻璃化反应为基础,使 用多种方式实现焊接是未来蓝宝石连接的一个重要发 展方向。

2 蓝宝石/金属扩散焊

以金属作为焊缝填充材料进行蓝宝石的扩散焊接 过程与上述烧结连接过程相似,但所需的温度更低。 这一方法通过金属与氧化铝陶瓷表面裸露的 Al 或 O 形成金属键或共价键。与一般意义的扩散焊接不同, 金属原子并不能渗透进入蓝宝石或者与其形成反应 层。

2.1 低温扩散焊

以铝或者铝合金作为中间层进行扩散焊接时,铝 可以是液态的,也可以是固态的。Ning 等人^[24]使用热 压液态铝与氧化铝烧结陶瓷的方法,制作了功率电子 基板。氧化铝/铝表面长出很多台阶状的突起,说明发 生了反应外延。Montesa 等人^[25]采用相似的方法,以纯 铝和 Al-12Si 作为中间层,在高于金属熔点 10 ℃的条 件(670 ℃,610 ℃)下进行了热压液相扩散焊,得到蓝 宝石表面生成台阶状的氧化铝。

使用固态铝扩散焊接氧化铝材料的研究中,有代 表性的主要是 Saiz 等学者^[26-27]在 650 ℃(低于熔点 10 ℃)以纯 Al 为中间层,扩散焊接烧结蓝宝石,界面上形 成了厚度约为几纳米的 O-Al 非晶层。

固态铝扩散焊接蓝宝石的改进方法是表面活化 连接法(Surface activated bonding, SAB),较早由 J. P. Ott 等人^[28]在 1989 年提出,即在高真空条件下使用 离子轰击材料金属铝和蓝宝石表面,使它们处于高能 状态,然后将两个表面对接并扩散,形成连接。这种 方法的优点在于可以降低对扩散温度的要求,1997 年,Akatsu 等人^[29]使用这种方法焊接单晶铝与蓝宝 石,接头拉伸强度达到 20~30 MPa,其界面如图 2 所 示。

但是 SAB 法要求铝的纯度较高,这样才能保证很好的塑性,以利于扩散界面结合的形成,但是这造成接头强度不可能提高。另外 SAB 方法得到的铝-氧化铝接头往往不能实现百分之百结合^[30]。因此 SAB 方法焊接蓝宝石试验在最近几年已经很少有学者涉足了。



图 2 使用 SAB 方法得到的蓝宝石/铝界面

2.2 高温扩散焊

高熔点金属作为中间层扩散焊接蓝宝石所使用 的中间层材料以 Nb 为主。Nb 的热膨胀系数与氧化 铝接近,得到的接头应力较小。而且 Nb 本身的晶格 结构与蓝宝石的匹配较好,能够得到晶格错配较小的 界面。Nb 原子能在蓝宝石表面的一个原子层上占据 本该属于 Al 或 O 的位置,形成 O-Nb 键或 Al-Nb 键^[31-32]。其基本过程如图 3 所示,其中图 3a.3b 分别 是焊缝平面的俯视图和侧视图,A,B,C 为晶格表面的 空位。Nb 作为中间层可以使用 Nb 箔夹在蓝宝石之 间^[33],也可以使用离子溅射方法在蓝宝石表面制造 一个 Nb 层^[34]。



图 3 蓝宝石与 Nb 扩散结合界面结构示意图

由于直接使用 Nb 的扩散焊接的难度较大,需要很 高的温度和较长时间的扩散,学者们提出了改进型的 扩散焊接方法,即一种瞬间液相扩散连接(Transient liquid phase, TLP)^[35]。这种方法主要是将较低熔点的 金属覆盖在 Nb 的两侧。在扩散焊时,外侧金属熔化并 被挤出焊缝,其中一部分与 Nb 发生扩散或者共晶反 应,从而使 Nb 部分液化并与蓝宝石形成紧密的接触. 最终实现结合。较常见的多层中间层结构由 Ni/Nb/Ni 和 Cu/Nb/Cu 等组成^[36]。

蓝宝石/金属扩散焊技术能够得到较高强度的连 2019 年第3期

接和较好的焊缝热膨胀系数匹配,但是这一方法一般 需要高温和一定的加压设备,加工过程耗时较长,而且 一般只能用于简单的平面对接接头,灵活性较低,因此 目前对这种方法的研究和应用也没有得到大规模的展 开,在2010年后也少见报道。

3 蓝宝石的钎焊

钎焊是陶瓷材料连接中广泛使用的一种方法。其 基本过程主要包括液态金属在高温下在陶瓷表面形成 润湿,在焊缝中形成铺展并填满整个焊缝。待填缝完 成后,整个接头冷却的过程中金属凝固并与陶瓷界面 形成结合。钎焊方法具有接头适用性强、方法灵活、选 材范围广等优点。但钎料合金一般熔点较低,钎焊的 陶瓷部件一般难以应用于高温环境,另外接头的热应 力问题也较难调节。

3.1 蓝宝石的直接钎焊

大多数液态金属在蓝宝石表面的润湿和结合都很 差,但是如果在金属中加入能降低界面能的元素,如 Ti,V,Cr,Zr,Nb,则可以通过界面处的活化反应促进金 属与陶瓷之间的结合^[37]。目前使用含有 Ti 元素的钎 料进行高温钎焊是最受关注的方法。

2008年, Durov等人^[38]使用原位观察的方法,考察 了 Ag-36.65Cu-8.15Ti 钎料在真空环境下在蓝宝石表 面的铺展和反应情况,发现在800℃下,在数分钟之内 Ti即可与蓝宝石反应生成肉眼可见的化合物。Stephens 等人^[39]使用 Ag-Cu-Ti 钎料在 880 ℃下真空钎焊 蓝宝石6 min,在蓝宝石的表面发现了 Cu₃Ti₃O, TiO, Ti₂O 等生成物,如图 4 所示。Kozlova 等人^[40]在 850~ 900 ℃下使用 63 Ag-35. 25 Cu-1. 75 Ti 合金考察了其在蓝 宝石表面的润湿和反应,界面上的生成物为Ti₂O。





Ti 等活化元素也可以加在 Sn 等低熔点合金中来 实现氧化铝材料的焊接^[41],但是应用于蓝宝石的研究 还较少。Kolenak 等人^[42]使用 Sn-Ag-Ti 钎料进行真空 钎焊蓝宝石仍然需要在 750~800 ℃下进行才能实现。 这可能是由于多晶氧化铝与单晶的蓝宝石之间的润湿 和反应差别导致的。

超声波钎焊是近年受关注的一种钎焊方法,利用 超声波引起的空化效应产生局部的高温高压和指向固 体界面的射流。在空化效应的作用下很多需要特殊条 件才能发生的反应可以在常规条件下发生。

较早使用超声波钎焊进行氧化铝陶瓷焊接的是日本的 Naka 等人^[43]。Kolenak 等人^[44-45]使用 Sn-Ag-Ti 钎料超声涂覆后钎焊的方法,在 300℃连接了氧化铝 和蓝宝石,得到的接头抗剪强度达到 30 MPa,接近于使 用相同钎料在 800℃下真空钎焊的强度。这表明超声 波可能促进了 Ti 元素的活化反应。哈尔滨工业大学的 闫久春教授课题组^[46]对蓝宝石的超声波钎焊方法进行 了系统地研究,揭示了超声作用下液态铝在蓝宝石表 面的润湿和结合特征,发现了 Sn-Al 钎料在蓝宝石表面 形成的纳米氧化物过渡层可以提高界面结合强度^[47], 并将这一方法应用于使用 Zn-Al 合金^[48]和 Al-Mg 合 金^[49]进行蓝宝石的钎焊,其接头抗剪强度高达 120~ 160 MPa。

3.2 蓝宝石的间接钎焊

间接钎焊是指在蓝宝石表面预制一层具有较好焊 接性的涂层或者薄膜然后再进行钎焊的方法。这一方 法可以通过烧结法和沉积法两种手段实现。

烧结法的基本过程是将金属粉末和金属氧化物粉 末混合在一起制成浆料,涂抹于待处理的蓝宝石表面。 在高温条件下,混合粉末浆料内的金属氧化物发生玻 璃化反应形成流体,一方面与蓝宝石结合,另一方面将 金属颗粒粘在一起。这样在蓝宝石表面就形成了由部 分氧化物玻璃和部分金属组成的混合过渡层,如图 5 所示。烧结法的典型代表方法是"钼锰法",即使用 金属钼和锰、钨等作为主要的金属颗粒,与Al₂O₃,CaO,



图 5 烧结蓝宝石表面金属化方法示意图

MgO,SiO₂等粉末制作浆料^[50-53]。烧结制得的金属化 层内部往往含有气孔和微裂纹等缺陷。

沉积法指使用离子溅射、磁控溅射、物理气相沉积 和化学气相沉积等方法,直接在陶瓷表面形成一层金 属薄膜^[52-53]。沉积法是近些年才开始出现的新型焊接 方法,沉积层与蓝宝石的结合决定了最终的强度。这 一方法的研究和应用尚未充分开展,可能是未来研究 的一个重要方向。

4 问题和讨论

在蓝宝石焊接的过程中,所主要需要解决的两个 方面的问题首先是蓝宝石母材与焊接材料之间的扩 散、反应和结合问题,其次是焊接接头的热应力问题。

蓝宝石母材与焊接材料之间的扩散、反应和结合 问题已经得到了较好的定性研究。在较高温度下陶瓷 粉末、金属或活化元素与蓝宝石之间都能发生相应的 反应和结合。但是相关问题在定量和动力学方面的研 究开展还很不充分。

陶瓷粉末烧结过程中,母材与焊接材料之间的晶体融合动力学研究还很少。如何促进扩散和晶粒生长 是烧结连接中所要解决的主要问题。

蓝宝石/金属扩散焊过程中金属与蓝宝石的成键 微观过程和反应动力学也缺乏足够的认识,更缺乏定 量的调控手段。这一方法的广泛应用受到这些基本问 题的限制。

蓝宝石钎焊的核心问题是解决蓝宝石与钎料之间 的界面反应和结合。活性钎焊法可以通过高温条件下 活性元素的反应,在低温条件下需要使用外加能量促 进活化元素的活性。这些反应的热力学研究尚未充分 展开。间接钎焊需要解决表面金属化层与蓝宝石基体 的结合问题。在这些过程中元素与蓝宝石之间的扩散 过程和反应过程既缺少微观的理论分析,又缺少宏观 上的反应进度预测模型。

这些基础理论研究的不足使得目前蓝宝石的焊接 工艺方法严重依赖于经验和试验研究,对于普遍适用 的规律研究适用性较小,而且耗费的时间和资源投入 较大。因此可以展望在未来的蓝宝石焊接方法研究 中,基础理论和模型的研究以及基于这些理论和模型 的新方法将是研究的重要方向。

热应力问题可以通过设计焊缝热膨胀系数匹配等 工艺方法加以解决,这一问题已经具备了较好的解决 方案,在具体的焊接过程中加以实施即可取得较好的 效果。

参考文献

- [1] Dobrovinskaya E R, Lytvynov L A, Pishchik V. Sapphire: material, manufacturing, applications [M]. Springer, New York, USA, 2009: 95-205.
- [2] Xie J, Ling W J. High power mode-locked picosecond Ti: sapphire laser based on fast SESAM [J]. Laser Journal, 2017, 38(7): 10-12.
- [3] Gürel K, Wittwer V J, Hakobyan S, et al. Carrier envelope offset frequency detection and stabilization of a diodepumped mode-locked Ti: sapphire laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(6): 1035-1038.
- [4] Drozhzhin O A, Tereshchenko I V, Emerich H, et al. An electrochemical cell with sapphire windows for operando synchrotron X-ray powder diffraction and spectroscopy studies of high-power and high-voltage electrodes for metal-ion batteries[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, 25(2): 468-472.
- [5] Lin Z Q, Wang G G, Tian J L, et al. Broad-band anti-reflective pore-like sub-wavelength surface nanostructures on sapphire for optical windows[J]. Nanotechnology, 2018, 29 (5): 1-10.
- [6] Liu S, Wang Z P, Cui W, et al. Sealing of sapphire infrared windows by ultrasonic interfacial deposition soldering
 [J]. Advanced Materials Research, 2014, 941-944: 2074 -2078.
- [7] Horng R H, Chiang C C, Hsiao H Y, et al. Improved thermal management of GaN/sapphire light-emitting diodes embedded in reflective heat spreaders [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(11): 310-313.
- [8] Sarkisyan D, Sarkisyan A S, Guéna J, et al. Alkali-vapor cell with metal coated windows for efficient application of an electric field [J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(5): 87–92.
- [9] 吕汉雄. 蓝宝石生长方法和晶向对晶体质量与性能影响 规律研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2017.
- [10] 殷胜昔, 楚建新. 蓝宝石整流罩与金属弹体新型的连接 方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2010,46(1):54-57.
- [11] Scott C, Tran V B. Diffusion bonding of ceramics [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1985, 64: 1129-1131.
- [12] Pazol B G, McGuire P, Gentilman R L, et al. Large area flat and curved sapphire window blanks[C]. Inorganic Optical Materials II, San Diego, USA, 2000: 52–58.
- [13] Dillon S J, Harmer M P. Mechanism of "solid-state" single-crystal conversion in alumina[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(3): 993-995.

- [14] Sandhage K H, Yurek G J. Indirect dissolution of sapphire into calcia magnesia alumina silica melts electron microprobe analysis of the dissolution process[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1990, 73(12): 3643-3649.
- [15] 上媛媛. 扩散连接单晶α-Al₂O₃ 工艺的研究[D]. 哈尔 滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2009.
- [16] 赵德才. 蓝宝石连接性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业 大学硕士学位论文, 2005.
- Fiore D F. High strength diffusion bonding of sapphire[D].
 Doctorial thesis of Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2002: 95-135.
- [18] Fujitsu S, Ono S, Nomura H, et al. Joining of single-crystal sapphire to alumina using silicate glasses [J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2003, 111(7): 448-451.
- [19] Zhang L Y, Xing D W, Sun J F, et al. Bonding layer microstructures and mechanical behavior of sapphire/sapphire joints diffusion-bonded using MgO-Al₂O₃-SiO₂ interlayer
 [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2011, 8(5): 1183-1191.
- [20] Cao J, Li C, Song X G, et al. Microstructure evolution of alumina/alumina joint bonded by boron oxide-alumina nonmetal powder interlayer[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12(3): 652–657.
- [21] Guo W, Lin T S, He P, et al. Microstructure and characterization of interfacial phases of sapphire/sapphire joint bonded using Bi₂O₃-B₂O₃-ZnO glass[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(3): 1073-1081.
- [22] Döhler F, Zscheckel T, Kasch S, et al. A glass in the CaO/MgO/Al₂O₃/SiO₂ system for the rapid laser sealing of alumina[J]. Ceramics International, 2017, 43(5): 4302– 4308.
- [23] Pablos-Martin A D, Tismer S, Benndorf G, et al. Laser soldering of sapphire substrates using a BaTiAl₆O₁₂ thin-film glass sealant [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 81: 153-161.
- [24] Ning X S, Lin Y B, Xu W, et al. Development of a directly bonded aluminum/alumina power electronic substrate [J]. Materials Science and Engineering B, 2003, 99(1-3): 479 -482.
- [25] Montesa C M, Shibata N, Choi S Y, et al. High-resolution transmission electron microscopy observation of liquid-phase bonded aluminum/sapphire interfaces [J]. Materials Transactions, 2009, 50(5): 1037-1040.
- [26] Suganuma K, Saiz E, Tomsia A P. Microstructure and strength of interface between pure aluminum and alpha-alumina [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1998, 62(1): 92–97.
- [27] Saiz E, Tomsia A P, Suganuma K. Wetting and strength is-

sues at Al/alpha-alumina interfaces [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23(15): 2787-2796.

- [28] Ott J P, Michal G M, Chottiner G S. Shear-strength of aluminum-sapphire interfaces [J]. Materials Letters, 1989, 8(11-12): 481-485.
- [29] Akatsu T, Sasaki G, Hosoda N, et al. Microstructure and strength of Al-sapphire interface by means of the surface activated bonding method[J]. Journal of Materials Research, 1997, 12(3): 852-856.
- [30] Park Y J, Enoki M, Suga T, et al. Relation between plasticity of al and bonded area fraction in Al/sapphire joint fabricated by SAB[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1999, 63(12): 1485-1489.
- [31] Sinnott S B, Dickey E C. Ceramic/metal interface structures and their relationship to atomic and meso scale properties
 [J]. Materials Science and Engineering R, 2003, 43(1-2): 1 -59.
- [32] Ernst F. Metal-oxide interfaces [J]. Materials Science & Engineering R, 1995, 14(3): 97-156.
- [33] Scheu C, Liu Y, Oh S H, et al. Interface structure and strain development during compression tests of Al₂O₃/Nb/ Al₂O₃ sandwiches[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(23): 7798-7807.
- [34] Soyez G, Elssner G, Ruhle M, et al. Crack formation in sapphire/niobium/sapphire joints under compression [J].
 Journal of Materials Science, 2000, 35(5): 1087-1096.
- [35] Hong S M, Bartlow C C, Reynolds T B, et al. Ultrarapid transient-liquid-phase bonding of Al₂O₃ ceramics [J]. Advanced Materials, 2008, 20(24): 4799-4801.
- [36] Marks R A, Chapman D R, Danielson D T, et al. Joining of alumina via copper/niobium/copper interlayers[J]. Acta Materialia, 2000, 48(18-19): 4425-4438.
- [37] Saiz E, Cannon R M, Tomsia A P. Reactive spreading: adsorption, ridging and compound formation[J]. Acta Materialia, 2000, 48(18-19): 4449-4462.
- [38] Durov O V, Krasovskyy V P. In situ observation of Ag-Cu-Ti liquid alloy/solid oxide interfaces [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 495(1-2): 164-167.
- [39] Stephens J J, Hosking F M, Headley T J, et al. Reaction layers and mechanisms for a Ti-activated braze on sapphire
 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34 (12): 2963-2972.
- [40] Kozlova O, Voytovych R, Eustathopoulos N. Initial stages of wetting of alumina by reactive Cu-Ag-Ti alloys[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(1): 13–16.
- [41] Chang S Y, Chuang T H, Yang C L. Low temperature bonding of alumina/alumina and alumina/copper in air using

Sn3. 5Ag4Ti(Ce,Ga) filler[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(9): 1193–1198.

- [42] Koleňák R, Chachula M, Šebo P, et al. Wettability and shear strength of active Sn₂Ti solder on Al₂O₃ ceramics[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2011, 23(4): 224 -228.
- [43] Naka M, Maeda M. Ultrasonic brazing of alumina to copper using Zn-Al-Cu fillers[J]. Transactions of J W R I, 1991, 20(3): 91-96.
- [44] Kolenak R, Zubor P. Soldering of ceramic materials using ultrasonic energy[J]. Welding in the World, 2005: 546-553.
- [45] Kolenak R, Ebo P, Provaznik M, et al. Shear strength and wettability of active Sn3. 5Ag4Ti(Ce,Ga) solder on Al₂O₃ ceramics[J]. Materials and Design, 2011, 32(7): 3997– 4003.
- [46] Cui W, Wang C W, Yan J C, et al. Wetting and reaction promoted by ultrasound between sapphire and liquid Al-12Si alloy[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1): 196– 201.
- [47] Cui W, Yan J C, Dai Y, et al. Building a nano-crystalline alpha-alumina layer at a liquid metal/sapphire interface by ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 22: 108– 112.
- [48] Cui W, Li S Q, Yan J C, et al. Microstructure and mechanical performance of composite joints of sapphire by ultrasonic-assisted brazing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 1-6.
- [49] Cui W, Li S Q, Yan J C, et al. Ultrasonic-assisted brazing of sapphire with high strength Al-4. 5Cu-1. 5Mg alloy [J]. Ceramics International, 2015, 41(6): 8014-8022.
- [50] Zheng J W, Gao D M, Qiao L, et al. Influence of the Cu₂O morphology on the metallization of Al₂O₃ ceramics[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 285: 249-254.
- [51] 齐立君,陆艳杰,张小勇,等. 蓝宝石钨金属化层显微 分析[J]. 真空电子技术, 2015(4): 23-27.
- [52] Xin C L, Liu W B, Li N, et al. Metallization of Al₂O₃ ceramic by magnetron sputtering Ti/Mo bilayer thin films for robust brazing to Kovar alloy [J]. Ceramics International, 2016, 42(8): 9599-9604.
- [53] Donner K-R, Gaertner F, Klassen T. Metallization of thin Al₂O₃ layers in power electronics using cold gas spraying
 [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1-2): 299-306.
- 第一作者简介: 李书齐, 1984年出生,博士,讲师;主要从事陶 瓷的激光焊接和可靠性方面的科研和教学工 作;已发表论文 10 余篇。