

引用格式: 黄常聪, 陈健, 马宁宁, 等. 陶瓷的激光连接技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(9): 850–858.

HUANG C C, CHEN J, MA N N, *et al.* Research Progress of Laser Joining for Ceramics[J]. Materials China, 2024, 43(9): 850–858.

陶瓷的激光连接技术研究进展

黄常聪^{1,2}, 陈 健¹, 马宁宁^{1,2}, 祝 明^{1,3},
陈文辉^{1,3}, 李凡凡^{1,2}, 黄政仁¹

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(3. 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210)

摘 要: 随着材料加工的快速化、智能化、数字化的发展趋势, 材料连接技术越来越受到广泛的重视, 其中激光连接陶瓷技术是引人关注的重要技术之一。论述了近年来激光连接陶瓷技术的研究现状与进展, 首先阐述了激光连接技术的原理和分类; 其次对适合陶瓷激光连接的激光器类型和特点进行了介绍, 并分析了影响激光连接陶瓷质量的关键因素; 然后对基于激光连接技术的陶瓷与陶瓷之间的连接以及陶瓷与异质材料之间的连接的研究进展进行了详细的介绍, 阐述了各种激光连接陶瓷方法的特点、机理和连接性能; 最后对激光连接陶瓷技术进行总结, 并展望其发展趋势。

关键词: 激光连接; 陶瓷材料; 异质材料; 激光器; 连接性能

中图分类号: TQ174; TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674–3962(2024)09–0850–09

Research Progress of Laser Joining for Ceramics

HUANG Changcong^{1,2}, CHEN Jian¹, MA Ningning^{1,2}, ZHU Ming^{1,3},
CHEN Wenhui^{1,3}, LI Fanfan^{1,2}, HUANG Zhengren¹

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3. School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: With the rapid, intelligent and digital development trend of material processing technology, material joining technology has attracted more and more attention. Laser joining ceramics technology is one of the most important technologies. The research status and progress of the laser joining ceramics technology in recent years are reviewed. Firstly, the principle and classification of laser joining technology are described. Secondly, the types and characteristics of lasers suitable for laser joining ceramics are introduced, and the key factors affecting the quality of laser joining ceramics are analyzed. Thirdly, the joining between ceramics and ceramics and between ceramics and dissimilar materials based on laser joining ceramics technology are reviewed in detail, and the characteristics, advantages, mechanisms and joining performance of various laser joining ceramics methods are described. Finally, the problems that need to be further explored for laser joining ceramics technology are discussed, and the development trend is prospected.

Key words: laser joining; ceramics; dissimilar materials; lasers; joining performance

收稿日期: 2022–01–21 修回日期: 2022–06–15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3701500); 国家自然科学基金资助项目(52072386); 上海市自然科学基金资助项目(21ZR1472300)

第一作者: 黄常聪, 男, 1999 年生, 硕士研究生

通讯作者: 陈 健, 男, 1981 年生, 研究员, 硕士生导师,

Email: nannancj@mail.sic.ac.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674–3962.202201015

1 前 言

陶瓷材料具有高温稳定性好、耐腐蚀、高强度、高模量、优异的电绝缘性以及生物相容性好等特性^[1–3], 在航空航天^[4]、电子信息^[5]、汽车工业^[6]和生物医药^[7]等领域当中有着广泛的应用。然而, 由于陶瓷的韧性差、塑性低和抗冲击性差^[8], 大尺寸和形状复杂的陶瓷试件无法直接制造, 需要通过陶瓷之间的连接得以实现。此

外, 随着对陶瓷材料的性能要求越来越高以及应用范围不断扩大, 陶瓷与金属、塑料等异质材料结合在一起^[9], 实现功能互补, 已经成为研究的热点, 而连接技术成为影响该类材料性能的重要因素之一。

目前常用的陶瓷连接技术主要有机械铰链法、钎焊、扩散连接法、陶瓷前驱体转化法等^[10]。每种连接方法有其独特的优缺点, 机械铰链法操作方便, 所需设备简单, 连接方式为物理连接, 不需要考虑界面的问题, 但是该方法连接的陶瓷接口比较松散, 不能完全密封; 钎焊法连接温度低, 工艺成熟, 比较容易得到良好的接口, 但是对设备要求高; 扩散连接法和陶瓷前驱体转化法所需的温度较高, 对于大型构件的连接存在较大的技术难题, 而且有时温度过高容易损伤基体。基于此, 一些新型陶瓷连接技术正在不断发展, 如激光连接、超声辅助连接^[11, 12]和放电等离子连接^[13]等技术。激光连接陶瓷技术是其中引人关注的重要技术之一, 该技术主要利用激光的辐射能量来实现有效连接, 具有作用温度高、试件变形小、热影响区小以及生产效率高等优点^[14], 在陶瓷连接上有着较好的应用前景。

本综述通过收集并整理关于激光连接陶瓷材料的文献, 介绍了激光连接技术的工作原理和分类、激光连接系统的组成及激光器分类、影响连接质量的关键因素以及激光连接陶瓷材料的研究现状。最后, 讨论了激光连接陶瓷技术仍需进一步研究与改进的地方。

2 激光连接技术概述

2.1 激光连接的原理

激光连接的主要原理是将高能量密度的激光束照射在特定区域, 随后连接面上的材料与激光束发生相互作用, 吸收光子的能量并通过热传导向周围扩散, 导致试件温度升高, 表面发生熔化或汽化, 冷却后形成接缝, 达到连接的目的^[15]。

与可见光束不同, 激光束的能量服从高斯分布, 激光在二维平面上的功率密度分布函数 $I(r)$ 可用式(1)^[16]表示:

$$I(r) = \frac{2P}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

式中: P 是激光功率; ω 是激光光斑的半径; r 是到光斑中心的距离。

随着激光照射在材料上, 激光和材料发生相互作用, 使材料的温度升高, 在激光光斑范围内任意一点材料的温度 T 可表示为^[17]:

$$T = \frac{P}{K\pi^2 r \omega^2} \exp\left(-Ax - \frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (2)$$

式中: K 是材料的热导率; A 是材料对激光辐射能量的

吸收系数; x 是激光入射作用位置距表面的距离(作用深度)。

从式(2)可知, 激光作用下形成的熔池的温度是不均匀的, 其边缘温度低于中心温度, 熔池边缘的材料具有较大的表面张力, 表面张力的不同导致了马兰戈尼效应(Marangoni effect)的出现, 导致熔池中心的材料流向边缘, 发生流体的流动现象。

由于在连接过程中材料会经历快速升降温的剧烈温度变化, 往往会产生一定的残余热应力, 对连接质量产生影响。连接过程中产生的残余热应力 σ_T 可表示为式(3)^[18]:

$$\sigma_T = \frac{E_c E_s t_s (\alpha_c - \alpha_s) \Delta T}{(1 - \nu)(E_s t_s + E_c t_c)} \quad (3)$$

式中: ΔT 是加工温度和初始温度之间的差值; α 是热膨胀系数; E 是杨氏模量; t 是厚度; ν 是泊松比; 下标 C 和 S 分别指连接材料和基材。

从式(3)可以发现, 残余热应力主要由材料之间的热膨胀系数来决定, 热膨胀系数相差越大, 产生的残余热应力越大, 越容易产生裂纹等缺陷。因此, 为了减小残余热应力, 提高连接质量, 在进行激光连接时一般会选择热膨胀系数相近的材料体系。

结合式(1)和式(2)可以知道, 激光连接的优势有: ① 激光光斑较小, 激光的功率密度很高, 而在高能量密度激光束照射下材料在短时间内即可达到很高的温度, 使得激光连接具有作用温度高、连接速度快、生产效率高、连接的接缝较窄^[19]等优点; ② 激光和连接面上的材料之间的作用时间很短, 加热和冷却速度快, 因此只有激光直接作用的连接面附近的小部分材料会受到影响, 热影响区比较小, 在进行精密连接时可防止试件因大量受热而发生破坏; ③ 激光连接还可以与五轴机床结合或者搭配多个智能机器人进行自动化、多角度连接, 加工过程方便灵活, 不受基体形状尺寸的限制; ④ 一些非氧化物陶瓷在高温的空气环境中容易氧化, 很难在空气环境中实现激光直接连接, 必须在真空或者气氛保护的条件下进行连接, 目前在一些研究中为了实现气氛保护准备了一个密闭的腔体, 不仅连接件的尺寸受到腔体的大小限制, 而且激光入射角度也受到限制, 影响连接的灵活性, 针对该问题, 激光连接可以采用激光加工和气氛吹扫同步进行的方法, 在有气氛保护的同时也不会影响激光连接的灵活性。

2.2 激光焊接的分类

激光焊接按功率密度可分为激光热传导焊和激光深熔焊。其中激光热传导焊是指较低功率的激光照射在焊件上, 表面材料吸收部分激光能量并以热传导的方式向

内部扩散,达到一定温度后表面熔化,形成一个浅而宽的熔区。激光深熔焊是指在高功率激光照射下,表面材料受热蒸发并下凹形成“匙孔”,这种特殊结构的形成使得试件几乎可以完全吸收激光的能量,提高焊接效率。激光热传导焊和激光深熔焊主要以激光的输出功率来划分,每种材料的临界功率都有所不同,需要实际分析。

激光焊接按焊接类型可分为激光填丝焊、激光点焊和激光-电弧复合焊接^[20]。激光填丝焊又叫激光填料焊,是指通过在焊件之间提前或同步加入焊料,激光照射并熔化焊料,熔融态的焊料润湿两边的试件,在冷却后形成焊接接头。因为陶瓷材料的熔点高、脆性大、抗热冲击性差,而激光填丝焊可以利用低熔点焊料的表面张力以及与焊件之间的相互作用将高熔点的陶瓷材料连接起来,且不需要激光直接照射到陶瓷基体上,减小热影响区,避免陶瓷材料发生破坏^[21, 22],因此激光填丝焊是激光连接陶瓷应用较多的一种方法。

激光点焊是指将激光束聚焦在一个小点上,迅速熔化该区域的材料,随后移动到另一个点上,冷却后形成多个焊接点。激光点焊一般采用脉冲式激光器作为热源,具有焊接速度快、焊接精度高、不需真空环境等优点^[23],但能量较低,适用于焊接较薄的试件。

激光-电弧复合焊接是指利用激光和电弧 2 种热源共同作用,熔化并连接试件。电弧具有稀释等离子体、加热母材、提高激光吸收效率和增大熔深等作用^[24]。但是由于陶瓷材料大部分为电绝缘体,所以激光-电弧复合焊接在激光焊接陶瓷上的应用较少。

根据能量输出是否连续,激光焊接又可分为连续激光焊接和脉冲激光焊接^[25]。相较于连续激光来说,脉冲激光特别是超快脉冲激光会与材料产生非线性吸收效应,具有低热损伤、高精度、作用时间短、不易开裂等特点,适合应用于透明陶瓷及热膨胀系数相差较大的异质材料间的连接。

3 激光连接系统的组成及激光器分类

3.1 激光连接系统的组成

激光连接系统的主要组成有电源系统、中央控制系统、光学系统和激光器。电源系统提供了所需要的能量,并具有保护电路的作用,如进行过压、过流保护。中央控制系统与其它设备的控制程序连接在一起,进行统一控制,简化操作流程。光学系统由导光装置、观察装置及改善光束性能装置等组成。激光器即发射激光的装置,是激光焊接的能量来源,实现了由电能到光能的转变。激光器是激光连接系统的核心组成部分,其按工作介质的不同可分为固体激光器、气体激光器、半导体激光器

和光纤激光器。

3.2 激光器的分类

3.2.1 固体激光器

固体激光器是以晶体或玻璃作为基质材料,掺杂稀土金属离子或过渡金属离子等激活离子的一类激光器。目前常用的激光连接固体激光器有 Nd:YAG 激光器、Yb:YAG 激光器、Cr:YAG 激光器,其中 Nd:YAG 激光器是应用最广泛的一类固体激光器。

固体激光器具有激光功率大、能量输出稳定和体积小等优点,在激光连接陶瓷领域有着较广泛的应用,但其能量转换效率低,光束质量较差。

3.2.2 气体激光器

气体激光器是指以气体或蒸汽作为工作介质的一类激光器,可分为原子气体激光器、分子气体激光器、离子气体激光器和准分子激光器。激光连接领域中最为常见的气体激光器是 CO₂ 激光器,具有功率范围大、能量转化率高以及光束质量好等特点。因为 CO₂ 激光器的激光波长容易被陶瓷材料吸收,所以它适用于陶瓷的激光加工^[26]。

但 CO₂ 激光器的激光波长长,光斑直径较大,使得焊缝宽度较宽,不适合应用在热敏感性较大的材料或器件的连接上^[9]。

3.2.3 半导体激光器

半导体激光器又叫激光二极管,是以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)、硫化镉(CdS)等半导体材料作为工作介质的激光器。其输出波长可覆盖可见光、近红外和中红外多个范围,能量效率高,设备体积小,使用寿命长。

然而半导体激光器激光波长对于非氧化物陶瓷来说是不透射的,即采用半导体激光器作为光源时,激光无法穿过非氧化物陶瓷,导致主要加热位置是材料表面,只能通过热传导的方式加热陶瓷内部。半导体激光器激光波长对于氧化物陶瓷来说是部分透射的,即不仅材料表面会吸收激光能量,其内部同样也会吸收,可以利用该特性在氧化物陶瓷内部进行激光连接^[27]。

此外,半导体激光器的光斑发射角较大,光束质量较差,国内外对半导体激光器的研究方向之一就是如何在保证光束质量的前提下提高半导体激光器的功率和转换效率^[28]。

3.2.4 光纤激光器

光纤激光器的原理与固体激光器类似,是以掺杂各种稀土元素离子的掺杂光纤作为工作介质的一类激光器,具有低阈值、高效率、光束质量好和性价比高优点^[29]。

Mian 等^[30]分别利用光纤激光器和半导体激光器对硼硅玻璃和聚酰亚胺进行焊接,发现半导体激光器处理后

产生的残余应力更大, 试件产生裂纹, 而使用光纤激光器能得到强度更高的接头。

4 影响连接质量的因素

4.1 激光类型

不同类型的激光器所产生的激光波长不同, 材料对每种激光波长具有不同的吸收系数, 需要针对不同的材料灵活选取激光光源。

对于激光填料焊工艺来说, 应选择加热更加均匀的激光类型, 使得焊接填料熔化更加均匀, 减少飞溅。对于激光深熔焊来说, 应该选择大功率的激光源, 如 CO_2 激光器和 Nd:YAG 激光器。而对于热膨胀系数差异比较大的异质材料来说, 超快脉冲激光无疑是一个很好的选择。此外, 超快脉冲激光可以在不添加光吸收材料的情况下实现完全透明或部分透明的材料之间的连接^[31]。

4.2 激光参数

激光功率、激光扫描速度、光斑直径以及离焦量等激光参数是影响连接质量的重要因素。

激光功率关系着单位时间输出的能量的多少, 选择合适的激光功率是提高连接质量最可靠和有效的方法。若激光功率太低, 则焊件或焊料温度不足, 不能得到充分的熔化, 流动性及润湿性不好。若激光功率过高则会导致产生的热应力变大, 母材发生变形, 并出现气孔、飞溅等缺陷。Ai 等^[32]在建立模型并进行算法优化后, 基

于信噪比和方差分析发现, 激光功率是影响焊缝完整性和焊缝宽度的最主要因素。

激光扫描速度也是激光焊接的一个重要参数, 它影响了材料与激光的作用时间, 还会影响气泡的生成情况^[33]。Wang 等^[34]研究了激光功率、激光扫描速度等参数对接头强度的影响情况, 发现激光功率和扫描速度过大或过小均会对接头的强度产生负面影响, 如图 1 所示。而对于脉冲激光连接来说, 相对于脉冲持续时间, 脉冲能量对接头强度的影响更加明显^[35]。

激光功率和扫描速度会互相影响, 通常将两者的比值作为衡量激光能量的一个综合参数, 称为线能量密度 (激光功率/扫描速度)。Yadroitsev 等^[36]发现随着线能量密度的提高, 熔池尺寸有所增大, 熔体粘度降低, 选择合适的线能量密度是获得高质量焊件的基础。

光斑直径是决定焊缝宽度、激光能量分布和周围受热情况的关键因素。若光斑直径过大会导致激光能量密度较低, 焊接效率慢, 热影响区大, 容易破坏材料。若光斑直径太小则会导致照射区域温度过高, 有强烈的飞溅趋势。

因为激光焦点处的功率密度过高, 不适合直接作用在试件表面上, 所以往往会使激光焦点与实际连接面有一定的距离, 即离焦量。离焦量又可分为正离焦和负离焦, 过大或过小的离焦量都会导致激光功率无法满足连接要求, 影响连接质量。

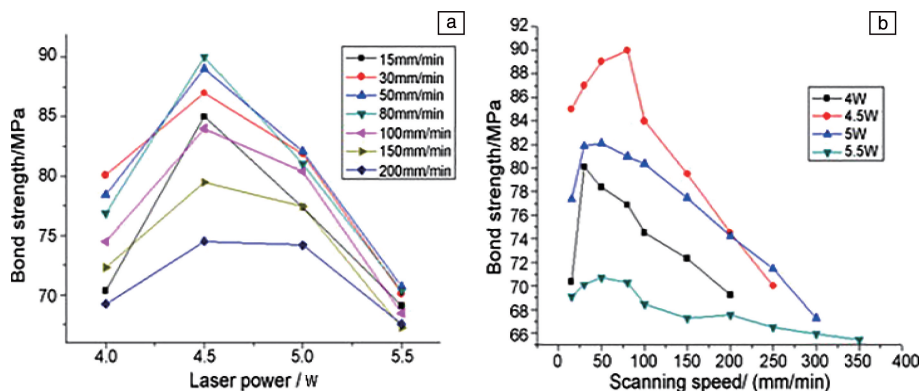


图1 激光功率(a)和扫描速度(b)对连接强度的影响^[34]

Fig.1 Effect of laser power (a) and scanning speed (b) on bond strength^[34]

4.3 材料性能

在激光连接中, 连接的有效性在很大程度上取决于连接材料或填料的性能, 如热膨胀系数、激光吸收率、透光度以及熔点等。

热膨胀系数决定着材料在加热和冷却过程中体积的变化程度, 对2种热膨胀系数差异比较大的材料进行激光连接是非常困难的, 因为在冷却过程中会产生很大的

残余热应力, 导致薄试件或者陶瓷等脆性材料产生裂纹甚至发生断裂, 严重影响连接质量。

激光吸收率反映了材料吸收激光能量的效率, 也同时决定了激光的穿透性。透光度则是保证激光能穿过材料照射在另一种材料上的能力。对于激光热传导焊来说^[37], 要求上层材料具有良好的透光度以及较低的吸收率, 而对于下层材料则要求相反, 保证激光能穿透上层

材料照射到连接界面上, 下层材料吸收能量并传递给上层材料, 如图 2 所示。

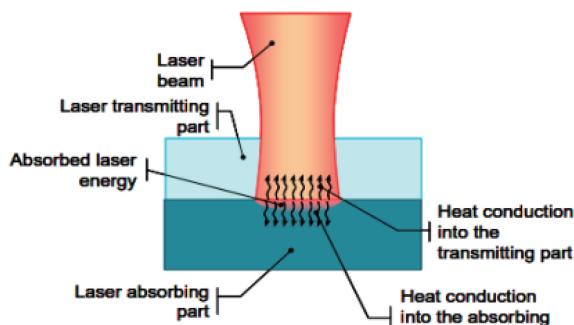


图 2 激光热传导焊接示意图^[37]

Fig. 2 Schematic diagram of laser heat-conduction welding^[37]

连接基体和焊料的熔点或玻璃化转化温度决定着激光焊接的工作温度, 也很大程度上决定了激光功率的选择。若材料熔点过高, 会导致材料无法充分熔化, 影响流动性和润湿性, 降低连接质量; 基体熔点过低会导致热变形较大, 焊料熔点过低则会导致焊料与基体的润湿性不好, 且容易形成飞溅等缺陷。

4.4 焊接气氛

为了保证试件在高温焊接过程中不被氧化, 改善润湿性能以及减小等离子体的负面影响, 激光焊接一般需要在保护气体的环境下进行, 常见的保护气体有氦气、氮气、氩气等。

Herrmann 等^[38]利用半导体激光器将涂有玻璃陶瓷填料的 SiC_f/SiCN 陶瓷基复合材料分别在空气和氮气条件下进行连接, 发现高温下 SiC_f 容易和空气发生反应形成气泡, 在冷却过程中随着材料粘度的增大, 气泡在接头当中保存下来, 形成缺陷并影响接头强度, 如图 3a 所示。而在氮气气氛下不会形成气泡, 得到没有明显缺陷的接头, 如图 3b 所示。但该过程要在一个封闭的腔体内进行, 会对连接的灵活性和连接组件的尺寸产生影响。

此外, 为了解决高功率激光焊接产生的焊缝下垂、飞溅和强等离子体作用等问题, 往往会在真空或减压环

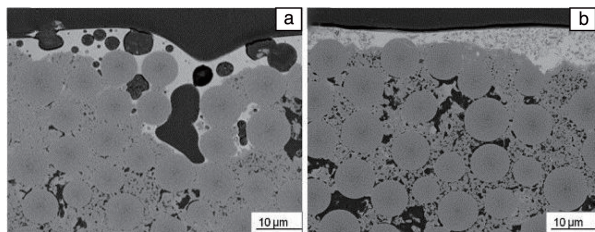


图 3 不同气氛下激光连接的陶瓷基复合材料的横截面组织形貌^[38]: (a) 空气, (b) 氮气

Fig. 3 Cross section micro-morphology of ceramic matrix composites laser bonded under different atmospheres^[38]: (a) air, (b) nitrogen

境下进行激光焊接。真空激光焊接具有增加熔深、抑制等离子体、减少气孔缺陷等优点^[39]。

5 激光连接陶瓷研究进展

5.1 陶瓷与陶瓷的激光连接

由于陶瓷本身的固有缺点, 需要通过陶瓷连接技术制备大尺寸陶瓷材料, 而激光连接是一种较为新颖的连接技术, 受到了研究者的广泛关注。

陶瓷的熔点较高, 熔融状态下的粘度大, 相较于直接激光连接, 添加低熔点填料的激光填料连接工艺应用得更多。但陶瓷材料的化学惰性使得填料对母材的润湿性较差, 给连接带来了一定的挑战, 寻找合适的填料成为研究的热点。

玻璃填料由于具有优异的润湿性和良好的物理化学特性, 经常被用于连接陶瓷材料。Harrysson 等^[40]对 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 体系在激光作用下玻璃相和结晶相的形成进行了基础研究, 确定了在激光和快速冷却的作用下体系的非平衡相图, 发现形成稳定玻璃相的范围有所扩大, 当 SiO_2 质量分数小于 20% 时不会形成玻璃相。

Börner 等^[41]研究了一种用于激光连接氧化锆和氧化铝陶瓷的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-MeO}$ (Me : Ba, Sr) 多元玻璃钎焊填料, 可在波长范围为 808~1010 nm 的连续半导体激光器的作用下获得没有气泡和宏观缺陷的均匀接缝结构, 连接后的氧化铝和氧化锆陶瓷的平均接头强度分别为 158 和 190 MPa。

Herrmann 等^[38]利用 Y-Al-Si-O 多元玻璃陶瓷填料将 SiC_f/SiCN 陶瓷基复合材料在激光器辅助下连接起来, 该填料对陶瓷基复合材料有较好的润湿性, 可在氮气气氛下连接得到近乎无缺陷的接头。Herrmann 等^[10]还在氦气气氛下, 采用 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 玻璃体系作为填料, 对 2 个中空的碳化硅陶瓷试件进行了激光连接, 随后对连接件进行退火处理。连接前后的碳化硅试件如图 4 所示, 发现填料能很好地润湿碳化硅表面, 两者之间的交界处没有产生缺陷。在碳化硅的激光连接过程中, 接头主要结晶产物为结晶速率快的硅酸钇, 其大小和形状取决于温度条件, 而随后的退火处理则会产生莫来石以及 YAG 结晶。

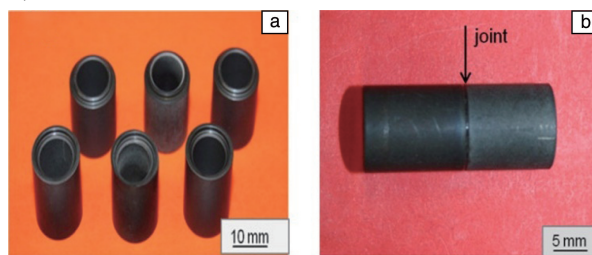


图 4 连接前(a)和连接后(b)的碳化硅试件^[10]

Fig. 4 Silicon carbide specimens before (a) and after (b) connection^[10]

文献[38]和文献[10]的激光连接过程需在保护气体的环境下进行,虽然得到了质量更好的接头,但也在一定程度上限制了激光连接的灵活性。

Börner 等^[42]对氧化锆陶瓷激光连接用填料进行了研究,以 $\text{SiO}_2\text{-BaO-B}_2\text{O}_3$ 和 BaO-SrO-SiO_2 三元玻璃体系为基础,通过添加不同添加剂来调控玻璃的性能,开发了 G018-339、G018-340、G018-345 这 3 种玻璃填料。发现玻璃填料热膨胀系数和氧化锆陶瓷接近,在半导体激光器照射下粘度可调节,润湿性较好,成功对 2 个棒状陶瓷以及圆柱形陶瓷与内部的矩形棒进行了连接。

陶瓷材料连接另一个常用的填料体系是金属填料体系。Jung 等^[43]使用薄 Zr 片作为夹层材料,利用激光束扫描的方法在室温和大气环境中对 2 个碳化硅试件进行连接,发现连接反应层由各种 Zr-Si-C 相材料组成,如 ZrSi_2 、 $\text{Zr}_5\text{Si}_3\text{C}_x$ 等。

除了利用激光直接进行连接外,目前还研究了利用激光照射对陶瓷表面进行改性,进而提高陶瓷连接质量的新方法。Ma 等^[44]首先利用激光熔覆技术在碳化硅表面制备一层均匀的硅层,然后将硼硅酸盐玻璃钎料置于硅层上,形成碳化硅/硅层/焊料/硅层/碳化硅的三明治状连接结构,如图 5 所示。由于激光覆硅层可以显著提高焊料与碳化硅之间的润湿性,降低了连接温度,随后通过玻璃焊料在 900 °C 的空气环境中即可完成碳化硅材料的连接,其抗弯强度达到了 110 MPa。

传统的激光连接技术一般采用连续激光作为光源,其热应力大,激光热冲击效应强烈,焊接后陶瓷焊缝中存在裂纹的问题严重,限制了激光连接陶瓷材料的进一步发展。而随着脉冲能量和频率足够高的超快脉冲激光器的出现,一种新型激光连接陶瓷材料的技术得到了发展,它具有高精度、高功率密度、低热损伤等特点,大大降低了激光连接过程中的试件开裂倾向。

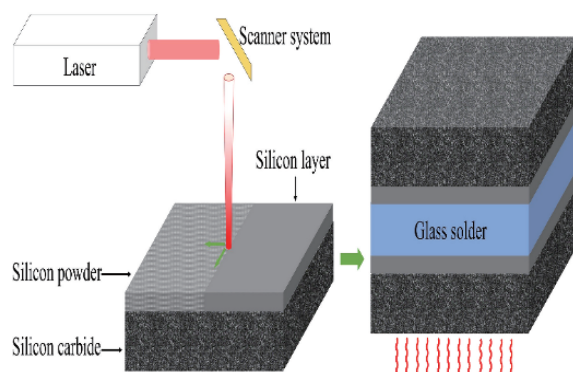


图 5 激光辅助玻璃焊料连接碳化硅的示意图^[44]

Fig. 5 Schematic diagram of laser assisted glass solder joining silicon carbide^[44]

Penilla 等^[45]提出了 2 种超快脉冲激光连接陶瓷的方法,一种是先对陶瓷的光学性能进行调整,使其透光率更好,对光具有较低的散射,然后利用该特性使得激光足以穿过陶瓷聚焦于焊接组件界面处完成连接(如图 6a 所示)。具体做法如下:将圆柱形盖子放置在一个可用于电子封装的中空管子上,并对试样施加一个荷载,将超快脉冲激光聚焦于接口处,旋转组件,对接口进行焊接。由于只在局部沉积能量,除接口外的大部分组件温度保持不变,实现在保证密封材料不受损坏的情况下将接口焊接起来,可用于柔性器件或电子器件的封装。

Penilla 等^[45]提出的另一种方法是在工件界面处设置一定距离的缝隙,使得激光穿透性更好,更有效地在界面上进行能量沉积,从而获得性能良好的焊缝。具体做法如下:在 2 个圆柱形试件的界面处引入了一个小缝隙,以便在漫反射陶瓷的界面处对激光进行聚焦,保证能量足以完成焊接(如图 6d 所示)。这两种方法可应用在透明陶瓷及具有类似光学带隙的氧化铝、尖晶石、钇铝石榴石等一系列材料上,可连接获得几何形状更复杂的试件。

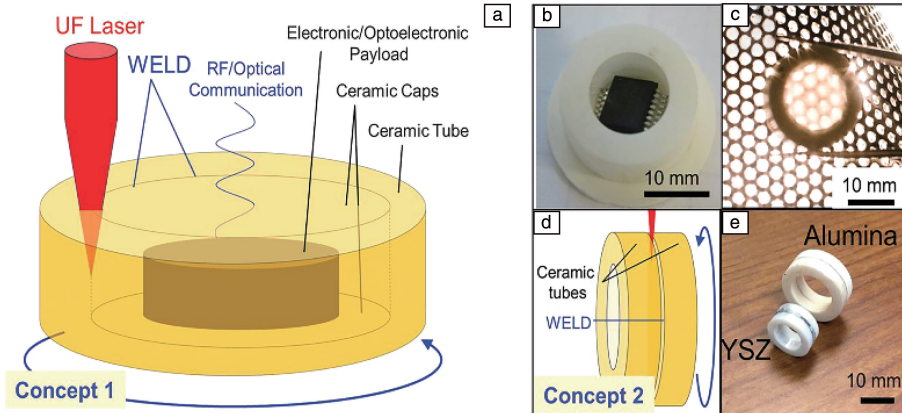


图 6 超快脉冲激光焊接 Al_2O_3 (a) 和 YSZ (b~e) 陶瓷^[45]

Fig. 6 Ultrafast pulsed laser welding of Al_2O_3 (a) and YSZ (b~e) ceramics^[45]

陶瓷与陶瓷的激光连接目前主要采用的是激光填料连接技术,主要研究方向也是寻找合适的填料。而随着大功率超快脉冲激光器的出现,对陶瓷材料进行直接连接也成了个热门的研究方向。

5.2 陶瓷与异质材料的激光连接

将不同类型的材料结合在一起,克服材料本身的固有缺陷,实现功能互补,可以拓宽材料的应用范围。

金属材料具有高塑性、高韧性和高导热性等优点,但其高温性能不好。陶瓷与金属材料连接制备成复合结构,可以弥补陶瓷材料塑性和韧性差的固有缺点,达到优势互补、简化制备工艺等目的,满足更多工程领域的需求。目前陶瓷与金属的连接有以下难点:两者的熔点相差较大,难以使用熔化焊进行连接;陶瓷和金属的化学性质不同,难以进行反应,对焊料要求较高;弹性模量和热膨胀系数差异较大,残余热应力大,容易开裂。为了克服上述困难,激光连接陶瓷与金属成了一个新的研究方向。Thomazin 等^[46]通过有限元建模研究了铝和氧化铝在激光作用下的熔体变化情况,发现由于陶瓷具有较高的熔化温度和较低的导电性,氧化铝的吸收能量仅为铝的 1/7,在连接过程中应重点关注陶瓷熔体的流动情况。

钎焊方法是目前金属与陶瓷材料最有效的连接方式之一。Zhang 等^[47]通过添加铜基金属钎料(61.2Cu-37.2Zn-0.28Si-0.89Sn),对钛合金与 Al_2O_3 陶瓷进行激光钎焊连接。在该研究中,通过将激光偏向钛合金部分的方式,利用热传导熔化钎料,形成钎焊接缝以及熔焊接缝,两者由未完全熔化的钛合金隔开。钛合金一侧的局部加热产生的体积膨胀和热应力反而有助于钛合金、填充金属以及陶瓷之间的紧密连接。该作者用同样的方法还完成了氧化铝与不锈钢之间的激光连接^[48]。Lee 等^[49]用高强度激光束对陶瓷片进行穿透,然后激光照射在底部的金属层上,熔化的金属通过毛细管力填充陶瓷孔,完成连接。

陶瓷与金属材料之间的连接同样可以利用激光辅助改性陶瓷的方法进行。Chen 等^[50]利用激光照射 AlN 陶瓷,发现激光照射后陶瓷表面粗糙度降低,亲水性和表面能提高,析出了 Al 元素,增强 AlN 陶瓷和金属的相互作用,在 $620\text{ }^\circ\text{C}$ 的低温下即可完成 AlN-Cu 之间的紧密连接。类似地, Song 等^[51]用相似的步骤对 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Cu}$ 进行了连接,形成了牢固而稳定的结合界面,连接步骤如图 7 所示。

陶瓷与塑料之间的连接也是一个异质材料连接研究方向,目前常用的连接方法是粘合或机械键合,但连接强度较低。Kawahito 等^[52]采用激光连接技术将氮化硅陶瓷与聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)工程塑料连接起来。

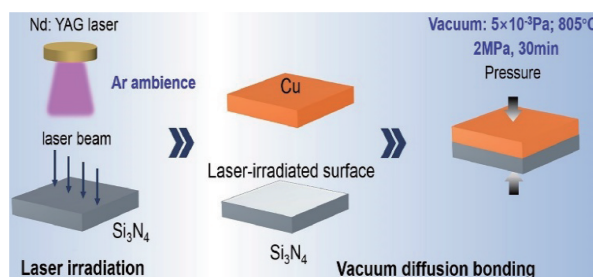


图 7 激光辅助连接 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Cu}$ 的过程示意图^[51]

Fig. 7 Schematic diagram of the process of laser assisted connection of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Cu}$ ^[51]

在连接过程中,激光通过透明塑料将陶瓷表面加热到足以熔化和部分分解 PET 塑料的高温,陶瓷与塑料之间产生高压接触。两者的交界处不仅有机键合作用,还形成了范德华相互作用力和化学键合,得到的接头抗拉剪强度最大达到了 3.1 kN ,但是塑料内部会在连接过程中产生许多气泡。

Tamrin 等^[23]研究了激光照射时间、焊接点数、焊接距离等参数对陶瓷-热塑性塑料接头性能的影响。研究表明,随着激光照射时间和光斑数目的增加,激光照射点数目越多,接缝性能越好。每增加一个额外的焊接点,接头强度都会有大幅提高。此外,较大的焊接距离对焊缝性能产生了有利的影响。

总的来说,陶瓷与异质材料之间的连接研究目前主要集中在陶瓷-金属之间的连接,而陶瓷-塑料之间的连接研究相对较少,主要是因为陶瓷和塑料的熔点、强度等性能差异较大。

6 结 语

激光连接技术具有试件变形小、热影响区小以及生产效率高等优点,在陶瓷材料连接方面的应用前景良好,特别是在陶瓷电子封装和生物陶瓷领域。随着激光器的成本下降和性能的提高,激光连接技术得到了进一步的应用,成为高精度的工业化生产模式不可或缺的一部分。但目前激光连接陶瓷材料的研究没有激光连接金属多,需对激光连接陶瓷材料技术进行更深入的研究,其关注点主要包括:① 解决陶瓷对常见激光波长散射较大的问题,提高陶瓷对激光的吸收效率;② 激光连接一般采用快速加热和冷却工艺,应研究如何减小热应力和瞬时热冲击的不利影响,避免裂纹的出现;③ 与连续激光器相比,超快脉冲激光器或许更适合用于陶瓷连接,应进一步研究超快脉冲激光连接陶瓷材料的工艺和机理;④ 如何实现大尺寸陶瓷的激光连接是将激光连接陶瓷技术推广应用的主要挑战之一,目前直接运用激光方法连接的陶瓷尺寸都非常小,而通过激光高温形成连接界面,

再通过传统的低温连接方法是实现大尺寸陶瓷连接最有效可行的手段。

参考文献 References

- [1] WANG H, LIN H, WANG C, *et al.* Journal of the European Ceramic Society[J], 2017, 37(4): 1157–1173.
- [2] ARAGÓN-DUARTE M C, NEVAREZ-RASCÓN A, ESPARZA-PONCE H E, *et al.* Ceramics International[J], 2017, 43(5): 3931–3939.
- [3] CHEN S, GOU Y, WANG H, *et al.* Materials & Design[J], 2017, 117: 257–264.
- [4] PADTURE N P. Nature Materials[J], 2016, 15(8): 804–809.
- [5] DUAN Y, ZHANG J, LI X, *et al.* Ceramics International[J], 2018, 44(4): 4375–4380.
- [6] OKADA A. Materials Science and Engineering: B[J], 2009, 161(1): 182–187.
- [7] PUNJ S, SINGH J, SINGH K. Ceramics International[J], 2021, 47(20): 28059–28074.
- [8] 石宇皓, 石成杰, 吴炳英, 等. 精密成形工程[J], 2018, 10(1): 10–22.
- SHI Y H, SHI C J, WU B Y, *et al.* Journal of Netshape Forming Engineering[J], 2018, 10(1): 10–22.
- [9] TAMRIN K F, NUKMAN Y, ZAKARIYAH S S. Materials and Manufacturing Processes[J], 2013, 28(8): 857–871.
- [10] HERRMANN M, LIPPMANN W, HURTADO A. Journal of the European Ceramic Society[J], 2014, 34(8): 1935–1948.
- [11] CHEN X, XIE R, LAI Z, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2017, 33(5): 492–498.
- [12] JI H, CHEN H, LI M. Ultrasonics Sonochemistry[J], 2017, 35: 61–71.
- [13] 董红英, 陈晓东, 贾朋伟, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2020, 49(2): 634–638.
- DONG H Y, CHEN X D, JIA P W, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2020, 49(2): 634–638.
- [14] ZHAN Y, ZHANG E, GE Y, *et al.* Applied Sciences[J], 2018, 8(10): 1997.
- [15] GONÇALVES L F F F, DUARTE F M, MARTINS C I, *et al.* Infrared Physics and Technology[J], 2021, 119: 103931.
- [16] MA N, CHEN J, HUANG Z, *et al.* Ceramics International[J], 2019, 45(6): 7703–7708.
- [17] 高雪松. 基于激光熔覆技术制备高结合强度陶瓷涂层的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- GAO X S. The Basic Research on High Bonding Strength of Ceramic Coatings Fabricated by Laser Cladding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [18] KADOLKAR P B, WATKINS T R, HOSSON, *et al.* Acta Materialia[J], 2007, 55(4): 1203–1214.
- [19] SHAO W J, HUANG Y, ZHANG Y. Optics & Laser Technology[J], 2018, 99: 39–51.
- [20] 李志红, 黄博, 罗志伟. 中国设备工程[J], 2020(23): 178–181.
- LI Z H, HUANG B, LUO Z W. China Plant Engineering[J], 2020(23): 178–181.
- [21] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, JOUVARD J M. Applied Mathematics and Computation[J], 2013, 219(13): 7103–7114.
- [22] CUI C Y, CUI X G, REN X D, *et al.* Materials & Design[J], 2013, 49: 761–765.
- [23] TAMRIN K F, NUKMAN Y, SHEIKH N A. Materials and Manufacturing Processes[J], 2015, 30(9): 1138–1145.
- [24] ACHERJEE B. Optics & Laser Technology[J], 2018, 99: 60–71.
- [25] HOU J, LI R, XU C, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2021, 68(PA): 657–667.
- [26] TZANAKAKIS E C, SKOULAS E, PEPELASSI E, *et al.* Materials[J], 2021, 14(12): 3370.
- [27] LIPPMANN W, HILLE C, HERRMANN M, *et al.* Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE16), vol 1[C]. Orlando: Sponsor of ICONE16, 2008: 827–834.
- [28] 罗博伟. 半导体激光焊接石油内衬管 Al_2O_3 陶瓷的机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- LUO B W. Research on the Mechanism of Diode Laser Joining Al_2O_3 Ceramic Liners from Ceramic Lined Composite Pipes[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [29] 王志, 胡芳友, 崔爱永, 等. 新技术新工艺[J], 2016(3): 42–44.
- WANG Z, HU F Y, CUI A Y, *et al.* New Technology & New Process[J], 2016(3): 42–44.
- [30] MIAN A, NEWAZ G, MAHMOOD T, *et al.* Journal of Materials Science[J], 2007, 42(19): 8150–8157.
- [31] 孙轲, 孙盛芝, 邱建荣. 激光与光电子学进展[J], 2020, 57(11): 290–299.
- SUN K, SUN S Z, QIU J R. Laser & Optoelectronics Progress[J], 2020, 57(11): 290–299.
- [32] AI Y, SHAO X, JIANG P, *et al.* Optics and Lasers in Engineering[J], 2016, 86: 62–74.
- [33] DOS S P L E, PEREIRA M, DE SOUZA P P A, *et al.* Journal of Laser Applications[J], 2019, 31(2): 2403.
- [34] WANG X, LI P, XU Z, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2010, 210(13): 1767–1771.
- [35] YUSOF F, YUKIO M, YOSHIHARU M, *et al.* Materials & Design[J], 2012, 37: 410–415.
- [36] YADROITSEV I, BERTRAND P, SMUROV I. Applied Surface Science[J], 2007, 253(19): 8064–8069.
- [37] MARWA A K, KADHIM A H, MOHANNED M A. Journal of Physics: Conference Series[J], 2021, 1973: 012023.
- [38] HERRMANN M, SCHÖNFELD K, KLEMM H, *et al.* Journal of the European Ceramic Society[J], 2014, 34(12): 2913–2924.
- [39] MENG J, WANG T, YANBIN C. Applied Sciences[J], 2017, 7(9): 909.
- [40] HARRYSSON R, VOMACKA P. Journal of the European Ceramic So-

- ciety[J], 1994, 14(4): 377–381.
- [41] BÖRNER F, LIPPMANN W, HURTADO A. Journal of Nuclear Materials[J], 2010, 405(1): 1–8.
- [42] BÖRNER F, LIPPMANN W, HURTADO A, *et al.* Journal of the European Ceramic Society[J], 2014, 34(3): 765–772.
- [43] JUNG Y, KIM H, KIM I, *et al.* Journal of Nuclear Materials[J], 2014, 455(1): 586–590.
- [44] MA N, CHEN J, HUANG Z, *et al.* Journal of the European Ceramic Society[J], 2021, 41(4): 2974–2978.
- [45] PENILLA E H, DEVIA-CRUZ L F, WIEG A T, *et al.* Science[J], 2019, 365(6455): 803–808.
- [46] THOMAZIN J A, OLSON L G, HIRSCH J W. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow[J], 1996, 6(3): 35–46.
- [47] ZHANG Y, CHEN Y, ZHOU J, *et al.* Scientific Reports[J], 2021, 11(1): 21251.
- [48] ZHANG Y, CHEN Y, ZHOU J, *et al.* Metallurgical Research & Technology[J], 2020, 118(1): 104.
- [49] LEE Y M, KIM S W, KIM J, *et al.* Journal of Mechanical Science and Technology[J], 2013, 27(9): 2823–2827.
- [50] CHEN N, CHEN B, LIU D, *et al.* Ceramics International[J], 2021, 47(19): 27979–27986.
- [51] SONG Y, LIU D, JIN G, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2022, 99: 169–177.
- [52] KAWAHITO Y, NISHIMOTO K, KATAYAMA S. Physics Procedia[J], 2011, 12: 174–178.

(编辑 惠 琼)