

DOI: 10.3901/JME.2023.14.130

激光表面毛化对 Ti/K9 玻璃扩散焊接头性能的影响^{*}

王美荣^{1,2} 陈 敏^{1,2} 蒋嘉豪^{1,2} 宋晓国^{1,2} 唐冬雁³ 曹 健^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室 威海 264209;

3. 哈尔滨工业大学化工与化学学院 哈尔滨 150001)

摘要: 针对 Ti 与 K9 玻璃因化合键差异难以形成有效连接的问题, 采用纳秒激光毛化处理工艺改变 Ti 表面结构, 实现了其与 K9 玻璃的真空扩散连接。通过光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪和万能试验机和分析测试技术手段对激光表面毛化后的 Ti 表面及 Ti/K9 玻璃接头的微观组织形貌、物相组成以及力学性能进行表征。结果表明, Ti 经激光毛化处理后, 形成纵横交错的刻痕, 刻痕附近发生熔化再结晶产生凸起, 并伴随 Ti-O 化合物及 Ti-N 化合物生成; 随着激光加工次数增加, Ti-N 化合物含量增加而 Ti-O 化合物含量减少, 接头剪切强度呈现先升高后降低的趋势, 表明 Ti-N 化合物含量过多会引起接头强度降低; 当激光扫描次数为 15 次时, 接头剪切强度达到最大值, 为 13.1 MPa; 经能谱分析, 在 Ti/K9 界面处伴随有 Ti、Si 等元素的扩散和化学反应。采用激光蚀刻技术有助于增强元素的活性, 在一定程度上促进了元素扩散和化学结合。

关键词: 扩散连接; K9 玻璃; 工业纯钛; 激光表面毛化; 显微结构

中图分类号: TG453

Effect of Laser Texturing Technology on Joint Properties of Ti to K9 Glass Diffusion Bonding

WANG Meirong^{1,2} CHEN Min^{1,2} JIANG Jiahao^{1,2} SONG Xiaoguo^{1,2}
TANG Dongyan³ CAO Jian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. Shandong Provincial Key Lab of Special Welding Technology,
Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: For the problem that Ti and K9 glass are difficult to form an effective bonding due to the difference of chemical bonds, nanosecond laser texturing of Ti developed with which the diffusion bonding of Ti and K9 glass was achieved. The microstructure, phase composition, and mechanical properties of laser-textured Ti and Ti/K9 glass joint were characterized by optical microscope(OM), scanning electron microscope(SEM), X-ray diffractometer(XRD), and universal material testing machine. The results show that the interconnected networks were produced on the Ti surface after laser texturing, where melting and recrystallization occurred, with the formation of Ti-O and Ti-N compounds. With the increase of laser processing times, the content of Ti-N compounds was increased while the content of Ti-O compounds was decreased, and the shear strength of the joint increased first then decreased which indicates that the over-increased Ti-N compounds resulted in the decrease of the joint strength. The maximum shear strength of 13.1 MPa was obtained when the 15th laser processing was adopted. The energy dispersive scanning(EDS) analysis showed that chemical reaction and atomic diffusion among Ti, Si, and other elements between Ti and K9 glass at the bonding

^{*} 山东省重大科技创新工程(2019JZZY010330)和先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金(AWJ-21M19)资助项目。20220129 收到初稿, 20221211 收到修改稿

interface were detected. Laser texturing Ti is helpful to enhance the activity of elements, which helps promote elemental diffusion and chemical reaction.

Key words: diffusion bonding; K9 glass; Ti; laser texturing; microstructure

0 前言

Ti 与 K9 玻璃的连接件可应用于航空航天、气象预测、军事侦察及其他领域^[1-2], 近年来, 随着空间观测技术和遥感技术的发展, 金属与玻璃的连接件更能满足其中反射镜部件的轻量化和良好光学性能^[3-4]。纯钛的比强度高, 化学稳定性及抗腐蚀性好, 适合应用于酸性、太空环境、高温等恶劣条件^[5-6]。K9 玻璃属于硼硅酸盐玻璃, 其强度高, 化学稳定性好, 玻璃软化温度高约为 630 °C, 在可见光及近红外光谱中具有极高的透射率, 因此被广泛使用在光学窗口及航天器中^[7-8]。尽管两种材料的热膨胀系数相近(Ti 为 $9.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, K9 玻璃为 $7.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 但两者的化合键类型不同, 导致金属与玻璃较难形成有效连接, 因此选择合适的连接方法至关重要。

目前国内外已经利用不同方法实现了钛合金与玻璃的连接。ELREFAEY 等^[9]采用阳极键合和钎焊联立的方法对玻璃与 Ti 进行了连接。使用的活性液态锡基钎料与钛表面的镀 Ni 层反应形成 Ni_3Sn_4 金属化合物, 从而得到可靠的 Ti-玻璃接头。不过钎焊时钎料的熔化容易导致金属表面氧化, 这在试验过程中很难避免, 并且溶解在金属中的残余气体也会排出产生气泡, 进而影响接头质量。徐兴文^[10]研究了高硼硅玻璃和 TC4 钛合金的激光透射焊接, 虽然两者能实现有效连接, 但脉冲激光产生的热流容易烧蚀钛合金焊缝, 使玻璃产生裂纹。ROCHA 等^[11]使用 71Ag-27Cu-2Ti wt.% 钎料钎焊了微晶玻璃与 Ti, 并研究了接头的微观结构。但没有进一步对接头进行连接机理分析及力学性能测试。扩散焊作为一种异种金属材料、陶瓷等新材料的连接方法, 具有接头质量高, 焊接参数易于控制等优点, 能够很好回避上述方法出现的问题。但在众多钛合金与玻璃连接的报道中关于 Ti 和 K9 玻璃扩散连接方面的研究甚少。

钛与玻璃连接出现的主要问题是两侧母材结构差异大, 两者直接连接的接头质量很差^[12]。材料的表面形貌是影响接头性能的一个重要因素^[13]。因此针对这一问题可采用材料表面改性的方法解决。

近年来, 研究人员青睐于采用超快激光织构从而获得功能表面^[14], 比如激光铣削、激光毛化、激光表面相变硬化以及激光物理气相沉积等^[15]。而超快激光可分为纳秒激光、皮秒激光和飞秒激光, 其中纳秒激光是结构变化的动力学过程。大量研究表

明, 通过纳秒激光对 Ti 表面进行加工, 可以改变材料的表面结构和化学成分。MOURA 等^[16]利用纳秒激光对 Ti-6Al-4V 进行激光表面纹理化, 发现激光加工后钛氧化物层表现出良好绝缘性能。TAN 等^[17]采用纳秒激光在 TC4 基体表面织构网格图案, 随后将碳纤维增强热塑性复合材料(Carbon fiber reinforced thermoplastic composite, CFRTP)激光焊接到 TC4 接头上。经激光处理的 TC4 使熔融 CFRTP 在其表面的润湿性提高, 并且接头受力增加了 156%。鉴于纳秒激光处理可使钛合金表面性能改变的特点, 本文利用纳秒激光毛化的方法来改善 Ti 的表面结构, 使其获得与玻璃连接的条件。

本文采用纳秒激光器在工业纯钛表面蚀刻出规律的凹槽, 然后将 Ti 与 K9 玻璃进行真空扩散连接。使用万能材料试验机测试接头剪切强度, 并用扫描电子显微镜对焊接接头进行形貌及显微结构分析, 最后进行能谱仪(Energy dispersive spectroscopy, EDS)和 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)分析, 研究激光蚀刻深度对 Ti/K9 玻璃扩散焊接头微观组织形貌和性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用母材为上海昆山比钛特金属制品有限公司生产的工业纯钛(TA1)和广州奥固弘玻璃有限公司提供的商用 K9 玻璃, 其中工业纯钛的钛含量为 99.6%。K9 玻璃主要成分为 SiO_2 、 B_2O_3 , 属于硼硅酸盐玻璃, 组成成分如表 1 所示, 用玻璃刀将其切割为 15 mm×10 mm×2.5 mm 的块状备用。工业纯钛为 5 mm 厚钛板, 用电火花切割机将其尺寸加工为 20 mm×10 mm×5 mm。分别用 180 CW、400 CW、800 CW 金相砂纸将切好的 Ti 块打磨至表面无明显划痕, 使其原有氧化皮消失。随后用丙酮超声清洗, 将 Ti 试样分为三组, 用纳秒激光器在其表面蚀刻出纵横间距均为 0.8 mm 的网格线形状, 加工路径如图 1 所示, 表面加工次数分别为 5 次、15 次、25 次。激光工艺参数如表 2 所示。

表 1 K9 玻璃化学成分(质量分数) %

SiO_2	B_2O_3	Na_2O	K_2O
69.13	10.75	10.40	6.29

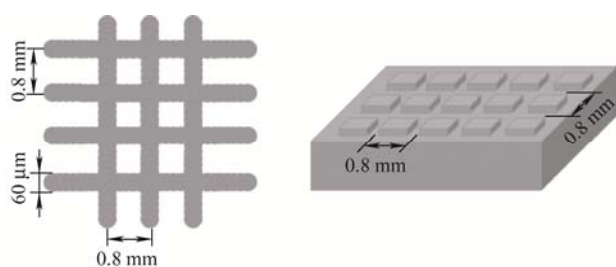


图 1 激光路径示意图

表 2 激光加工工艺参数表

激光频率 /kHz	脉冲能量 /mJ	脉冲宽度 /ns	激光功率 /W	离焦量 /mm
70	1.0	46	70	0

1.2 试验方法

在石墨板上均匀涂抹氧化钎焊剂后,将材料按照 Ti/K9 玻璃/Ti 的顺序放在石墨板上,在上方施加约 4 410 Pa 压力,装配示意图如图 2 所示。将其整体放入真空钎焊炉中,试验参数如图 3 所示。以 3 °C/min 的速度上升至 650 °C,保温 60 min 以降低两种母材之间由于热膨胀系数不同导致的应力,之后以 2 °C/min 的速度加热至 800 °C,保温 120 min 后随炉冷却至室温取出。

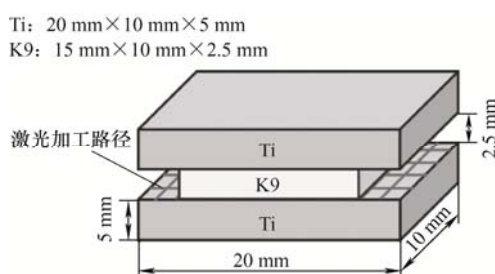


图 2 装配示意图

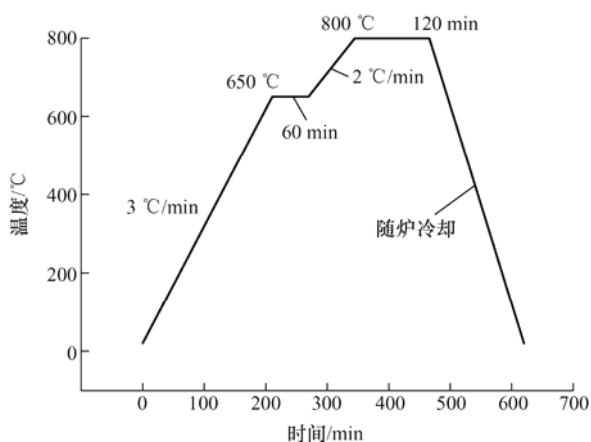


图 3 试验参数图

采用光学显微镜(DSX-150, Olympus),扫描电子显微镜(MERLIN Compact, ZEISS)、能谱仪

(Energy dispersive spectroscopy, EDS)确定相的组成, X 射线衍射仪(DX-2700)等分析测试技术研究激光蚀刻次数对 Ti/K9 玻璃扩散连接接头显微形貌的影响。剪切试验所用仪器为万能试验机(Instron Model 5967)。

2 结果与分析

2.1 激光扫描次数对 Ti 表面及 Ti/K9 玻璃接头显微形貌的影响

图 4 为激光表面毛化后 Ti 表面的 OM 图。利用纳秒激光器在空气环境下对 Ti 表面进行加工,蚀刻出纵横间距均为 0.8 mm 的网格线形状,如图 4a 所示。图 4b~4d 为激光表面毛化 5 次至 25 次后的 Ti 表面显微形貌图像,从图中可以观察到加工区域附近有少量飞溅物存在,且表面颜色产生变化,由近到远逐渐从蓝色过渡为金黄色,这是激光束将纯钛融化,与空气中的氧结合生成氧化层,相关报道^[18-19]中提到钛的不同氧化物具有一定色差,其多组分稳定氧化物包括 Ti_2O 、 TiO 、 Ti_2O_3 和 TiO_2 。

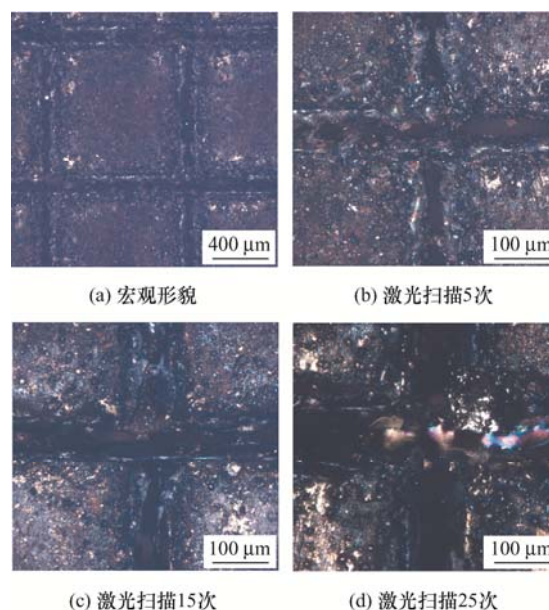


图 4 激光毛化后 Ti 的表面形貌

对激光加工不同次数后的 Ti 表面进行 XRD 测试,所得结果如图 5 所示。在激光加工 5 次时, Ti 表面检测到 $\text{TiO}_{0.325}$ 、 Ti_3O 及 TiO 。当激光加工 15 次时在原产物的基础上出现 Ti_6O 及 $\text{TiN}_{0.3}$ 。此时激光作用下 Ti 与 N_2 形成钛的氮化物,同时 Ti_xO_y 化合物中, x 与 y 比值上升,表明氮气参与反应时氧含量减小。激光加工 25 次时, Ti_6O 消失, $\text{TiN}_{0.3}$ 含量

增多,并且还检测到 TiN 的衍射峰。 Ti_6O 为低价 Ti-O 化合物,具有强还原性,其减少的原因可能是与 N_2 反应生成了 Ti-N 化合物,使产物中 Ti 的氮化物含量增多。

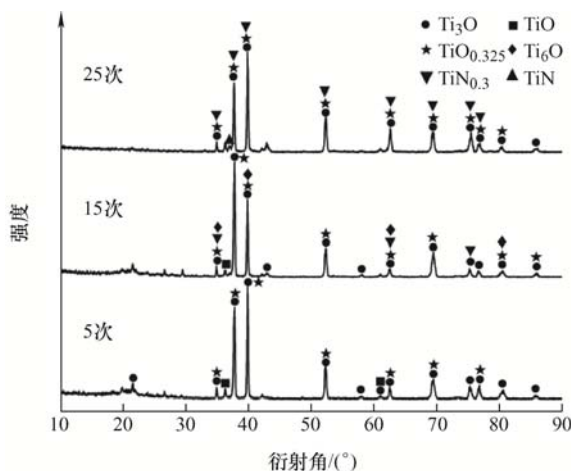


图5 激光表面毛化后 Ti 表面物相组成

Ti 经激光毛化后,其截面 OM 形貌如图 6a~6c 所示,由图可知,经过激光表面毛化后 Ti 表面出现锥形凹槽与两侧凸起,加工次数由 5 次增加到 25 次时,凹槽深度由 118 μm 增加至 288 μm 。KANG 等^[20]和 KONONENKO 等^[21]的研究表明,激光加工后,凹槽的两侧凸起是 Ti 在激光高温冲击下的熔化和再结晶现象。凹槽呈火山口状与激光能量的高斯分布有关^[22],激光照射在 Ti 表面时,由于高温作用,金属表面发生局部熔化并产生熔池,激光束中心能量高于四周热量,因此会形成类似于火山口状的中心凹槽。

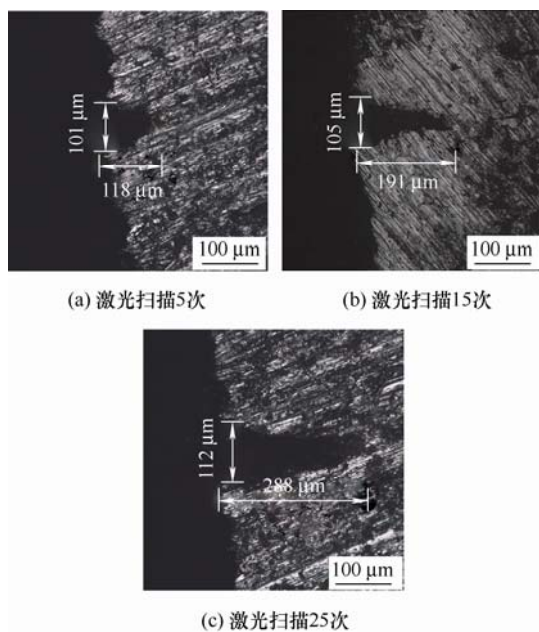


图6 激光毛化后 Ti 截面形貌

随着熔化次数的增加,在原有凹槽基础上会进行多次熔化再结晶。金属的局部熔化使激光束不断深入,凹槽中的 Ti 熔化形成熔池并伴随少量汽化,熔池内存在的温度梯度产生表面张力,方向由温度高端指向温度低端,如图 7 所示,熔化的 Ti 从熔池中心流向熔池边沿形成凸起,激光扫描次数增加使更多的 Ti 熔化,随着表面张力的流动在边沿凝固堆积,凹槽内 Ti 含量的减少致使凹槽深度增加。并且工件表面的粗糙度也会影响金属的激光吸收率^[23],当激光束照在光滑平面时只产生单次反射,经多次扫描后伴随凹槽和凸起的形成,激光在照射时经多次反射被材料吸收,照射次数越多,激光吸收率越大,熔池中的熔融 Ti 增多,因此最后在凸起处凝固大量 Ti 使凹槽加深。

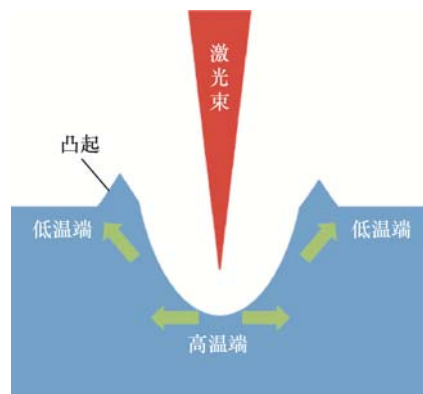


图7 激光毛化凹槽和凸起形成原理图

对比图 6 中不同加工次数的凹槽形貌,还可以发现熔池宽度差异不大,基本保持一致。这是因为每一次激光毛化的过程是相对独立的^[24],作用在匙孔后沿液态金属的表面张力大小和方向一致。凸起刚开始随着扫描次数的增加而增高,这是由于熔池中 Ti 因冷却在凹槽边缘产生凝固堆积。当扫描次数达到一定时,熔池中新熔化的 Ti 在表面张力作用下流动至凸起顶部,由能量守恒定律,当凸起高度到达某一定值时,新形成的液态 Ti 的动能将全部转化为势能和内能,凸起高度不再改变,因此凹槽宽度也不随扫描次数增加而改变。

Ti/K9 玻璃扩散焊接头的典型界面如图 8 所示,由图可以看出在激光毛化后, Ti 与 K9 玻璃能够紧密连接在一起。由 XRD 分析结果可知,经激光表面毛化, Ti 表面生成了不同氧化产物,有利于界面反应,同时激光扫描形成的凸起嵌入玻璃,对连接起到了机械锚固的作用^[25]。由于两侧母材均为固相,所以凹槽内部无液相填充,只是作为表面改性的附带产物出现,因其尺寸不大及凸起强化作用所以对试验结果影响不大。

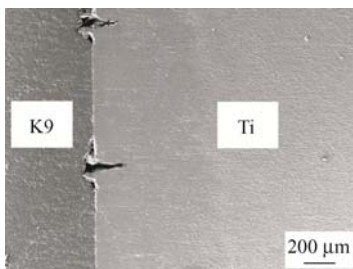


图 8 激光扫描 15 次 Ti 与 K9 玻璃扩散焊接头典型界面

Ti/K9 玻璃扩散焊接头的显微形貌如图 9a~9c 所示, 激光加工次数为 5 次时(图 9a), Ti 表面活化程度不足以使 Ti 与 K9 玻璃实现良好冶金结合, 所以在界面处焊缝不平整, 并伴有细小孔洞; 相比之下, 激光加工次数为 15 次时(图 9b), 焊缝平整且致密, 无明显裂纹; 当加工次数达到 25 次时(图 9c), 接头处显微裂纹增多, 并且伴有母材组织脱落的现象。结合 XRD 结果来看, 此时 Ti-N 化合物增多, 不利于界面反应的进行, 这是裂纹产生的一个原因。另外, 激光表面毛化程度增大, 也会使玻璃与金属的接触面积减小, 也会影响 Ti 与 K9 玻璃的连接。通过对比以上三种激光扫描次数下获得的扩散焊接头界面可以看出: Ti 经激光毛化处理后能够与 K9 玻璃实现有效连接; 三种情况的接头界面处反应层较薄, 均不明显; 在扫描次数为 15 次时, 连接效果最佳。

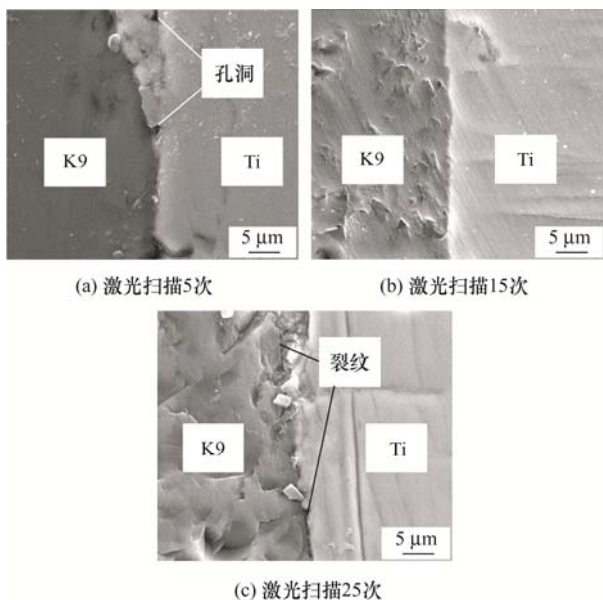


图 9 Ti 与 K9 玻璃扩散焊接头显微形貌

2.2 激光扫描次数对 Ti/K9 玻璃接头剪切强度影响及其断口分析

图 10 是激光加工次数由 5 次增大到 25 次时的扩散焊接头剪切强度, 可以看到剪切强度在激光加工次数为 15 时达到最高, 这一点与图 9 中微观接头

形貌分析结果相一致。结合图 5 与图 6 可知, 当激光加工 25 次时, 凹槽深度达到 288 μm , Ti 表面形貌变化较大, 在高温下熔化再结晶的 Ti 在凹槽两侧产生凸起和稳定的化合物 TiN, 致使 Ti 与玻璃接触面积减小和界面反应受阻, 因扩散连接需要通过元素扩散来进行, 而两侧母材接触面积减小及 TiN 增多不利于元素扩散, 故使接头剪切强度降低, 仅为 7.8 MPa。当激光加工 5 次时, 由于激光作用时间较短, 对 Ti 表面影响较小, 不足以使界面处反应更大程度地进行, 获得的剪切强度为 9.9 MPa, 稍高于加工 25 次的强度。激光加工 15 次时剪切强度最高, 平均强度达到 13.1 MPa。这主要由于以下几点: ① 激光表面毛化造成的熔化再结晶现象尚未阻碍两种母材的接触; ② 激光预处理时可以将材料表面的惰性层去除并增大粗糙度。产生的能量使加工区域的表面能提高。相关研究^[26-27]提出激光具有活化作用, 可以增强 Ti 表面原子活性, 使接头抗剪强度增大。

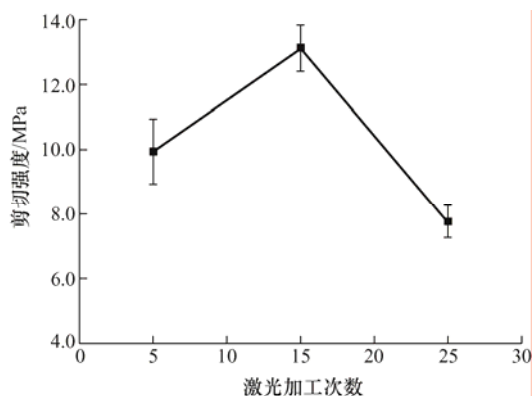


图 10 激光加工次数对 Ti/K9 玻璃剪切强度的影响

图 11 为三次激光表面毛化处理后扩散焊接头的 3D 断口形貌。断裂发生时, 试样中一侧的 Ti 与玻璃分离, 而另一侧的 Ti 仍与玻璃保持连接, 同时玻璃本身也在边缘处发生碎裂。经对比发现, 激光加工 5 次(图 11a)和 25 次时(图 11c)玻璃断裂处较平整, Ti 基体没有多余玻璃粘附物, 说明断裂较脆, 剪切强度不高。而激光加工 15 次时(图 11b)玻璃断裂处出现分层现象, 整个断口形貌更加复杂, 这也说明此时断裂发生更困难, 故强度较高。并且在靠近激光加工路径处伴随有大量玻璃粘附现象, 这是由于激光加工处金属表面活性更高, 更有利于生成促进反应进行的产物。在激光加工 25 次时可观察到断口处激光加工路径不规则, 这是因为激光加工次数增加, 使 Ti 表面熔化再结晶程度加大, 对母材损伤更严重。由此看来, 断口形貌分析结果刚好与剪切试验结果相吻合。

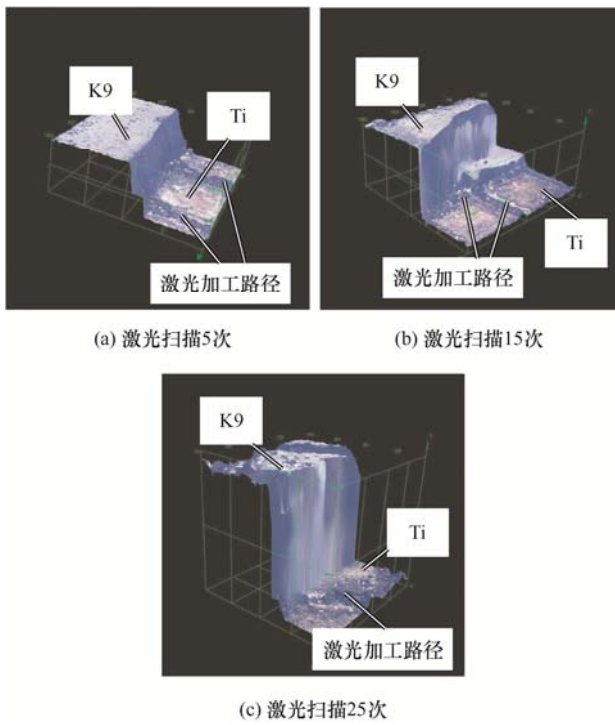
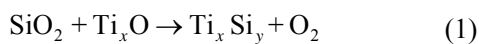


图 11 Ti 与 K9 玻璃扩散焊接头 3D 断口形貌

以激光加工 15 次为例, Ti/K9 玻璃扩散焊接头的线扫描图像如图 12 所示。从线扫描结果可以看出 Ti、Si 元素都向对侧母材发生扩散, 而 O、Na、K 元素含量变化较小; 在连接处出现一个元素过渡区, 厚度大约为 $2\ \mu\text{m}$ 。在玻璃一侧, 当扩散焊温度为 $800\ ^\circ\text{C}$ 时, K9 玻璃的网络结构被破坏, Si 元素会向金属钛一侧扩散, 并穿过 TiO 、 Ti_6O 等氧化层。Ti 原子为密排六方晶格, $a=295.08\ \text{pm}$, 间隙半径分别为 $43.08\ \text{pm}$ 和 $28.60\ \text{pm}$, 远小于 Si 原子半径 $110\ \text{pm}$, 故 Si 原子在此后扩散比较困难, 扩散距离被限制。在 Ti 一侧, 氧化层中的低价强还原性氧化物能与 SiO_2 发生反应从而实现连接。在相关学者^[28]对于钛合金与玻璃连接的研究中, Ti 预氧化后生成一系列钛氧化物充当缓冲层, 玻璃在连接之后也出现晶化现象析出了硅酸盐 CaSiO_3 , 并且在连接界面处检测到 Ti_5Si_3 及钛酸钠盐。 Ti_6O 及 Ti_3O 不是 Ti 的稳定化合物, 其热力学小于 SiO_2 。因此, 在连接过程中 Ti 元形成的强还原性氧化物可能与 SiO_2 发生如下反应



综上所述, 整个扩散焊的过程可分为以下三个阶段: ① Ti 表面经激光毛化后生成 Ti-O 化合物, 并且熔化再结晶; ② 在扩散焊连接过程中, K9 玻璃与 Ti 因压力作用相互接触, 温度升高至 $800\ ^\circ\text{C}$ 时, K9 玻璃中的 Si-O 骨架摆脱网络束缚并在表面重新排列; ③ Si-O 键开始活跃并与强还原性低价

Ti-O 化合物反应生成 Ti_xSi_y 化合物, 界面形成冶金结合。

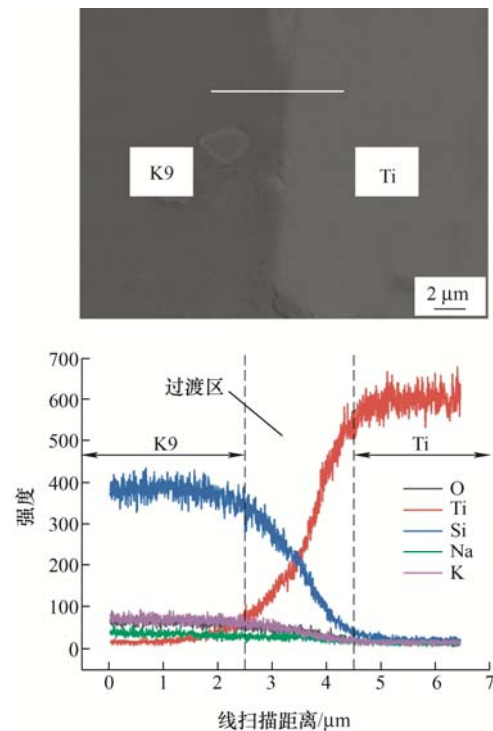


图 12 激光加工 15 次后 Ti/K9 玻璃扩散焊接头线扫描分布

3 结论

(1) 利用纳秒激光对 Ti 表面进行蚀刻后成功与 K9 玻璃实现扩散连接, 接头典型界面结构为 $\text{Ti/Ti}_x\text{O}_y + \text{TiN}_x/\text{Ti}_x\text{Si}_y/\text{K9 玻璃}$ 。

(2) 在激光加工作用下, Ti 表面生成一系列 Ti-O 及 Ti-N 的化合物, 并且加工次数越高, Ti-N 化合物含量升高。

(3) 激光扫描在 Ti 表面形成了火山口状凹槽, 扫描次数由 5 次增加到 25 次时, 凹槽深度由 $118\ \mu\text{m}$ 增加到 $288\ \mu\text{m}$ 。

(4) 激光加工次数对 Ti/K9 扩散焊接头强度及界面有明显影响。当加工次数为 5 次时, 界面反应程度较低, 难以使 Ti 与 K9 形成连续的连接层。当激光加工次数为 25 次时, Ti-N 化合物增多, 阻碍界面反应, 从而形成裂纹使接头强度降低。相比之下, 激光加工次数为 15 次时界面连接效果最好。

(5) 随着激光加工次数的增加, 扩散焊接头强度先升高后降低。在加工次数为 15 次时达到最高, 为 $13.1\ \text{MPa}$, 此时激光在提高 Ti 表面活性的同时, 又避免了 Ti 因表面形貌变化过大使结合面积减小的问题。

(6) 在 Ti 与 K9 玻璃连接界面处伴随有 Ti、Si

原子扩散, 扩散距离大约为 $2\ \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] 王美荣, 雷玉珍, 唐冬燕, 等. 钎焊时间对 K9 玻璃/ $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ /纯钛钎焊接头组织和性能影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 80-83.
WANG Meirong, LEI Yuzhen, TANG Dongyan, et al. Effect of holding time on the interfacial microstructure and mechanical properties of K9 glass/ $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ /pure Ti brazing joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 80-83.
- [2] 王震, 程雪岷. 快速反射镜研究现状及未来发展[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 373-379.
WANG Zhen, CHENG Xuemin. Research progress and development trend of fast steering mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 373-379.
- [3] BOROWITZ M. Strategic implications of the proliferation of space situational awareness technology and information: Lessons learned from the remote sensing sector[J]. Space Policy, 2018, 47(1): 18-27.
- [4] SANDERS K, MASRI S. The energy-water agriculture nexus: The past, present and future of holistic resource management via remote sensing technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 117(1): 73-88.
- [5] BRAZ C, VENTURA C, OLIVEIRA M, et al. Investigating the application of customized abrasive cutoff wheels with respect to tool wear and subsurface integrity in metallographic cutting of pure titanium[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2019, 8(6): 826-832.
- [6] MLGA B, XBWA B, PPGB C, et al. Properties of hydrophobic carbon-PTFE composite coating with high corrosion resistance by facile preparation on pure Ti[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(11): 2321-2330.
- [7] XU S Z, YAO C Z, DOU H Q, et al. An investigation on 800 nm femtosecond laser ablation of K9 glass in air and vacuum[J]. Applied Surface Science, 2017, 406(6): 91-98.
- [8] YANG C. Remote Sensing and precision agriculture technologies for crop disease detection and management with a practical application example[J]. Engineering, 2020, 6(5): 528-532.
- [9] ELREFAEY A, JANCZAK-RUSCH J, KOEBEL M M. Direct glass-to-metal joining by simultaneous anodic bonding and soldering with activated liquid tin solder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2716-2722.
- [10] 徐兴文. 钛合金与玻璃的激光透射焊接实验研究、工艺优化及数值模拟[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
XU Xingwen. Experimental study, process optimization and numerical simulation of laser transmission welding of titanium alloy and glass[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [11] ROCHA L A, BARBOSA M A, PUERS R. Active metal brazing for joining glass-ceramic to titanium-a study on silver enrichment[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 1995, 6(12): 835-838.
- [12] DONALD I W, MALLINSON P M, METCALFE B L, et al. Recent developments in the preparation, characterization and applications of glass- and glass-ceramic-to-metal seals and coatings[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(7): 1975-2000.
- [13] HU L F, XUE Y Z, WANG H. Glass-Cu joining by anodic bonding and soldering with eutectic Sn-9Zn solder[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789(1): 558-566.
- [14] 孙磊强, 赵作福, 莫梓睿, 等. 激光技术在材料表面改性方面的研究进展[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 378-381.
SUN Leiqiang, ZHAO Zuofu, MO Zirui, et al. Research progress of laser technology in surface modification of materials[J]. Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition), 2018, 38(6): 378-381.
- [15] 丁旭, 罗海龙. 激光技术在材料加工领域的应用探究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(9): 34-37.
DING Xu, LUO Hailong. Research on the application of laser technology in the field of material processing[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(9): 34-37.
- [16] MOURA C G, CARVALHO O, GONÇALVES L M V, et al. Laser surface texturing of Ti-6Al-4V by nanosecond laser: Surface characterization, Ti-oxide layer analysis and its electrical insulation performance[J]. Materials Science and Engineering: C, 2019, 104(109901): 1-11.
- [17] TAN C W, SU J H, FENG Z W, et al. Laser joining of CFRTP to titanium alloy via laser surface texturing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 103-114.
- [18] O'HANA S, PINKERTON A J, SHOBA K, et al. Laser surface colouring of titanium for contemporary jewellery[J]. Surface Engineering, 2008, 24(2): 147-153.
- [19] PINO A, FERNÁNDEZ-PRADAS J M, SERRA P, et al. Coloring of titanium through laser oxidation: Comparative

- study with anodizing[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 187(1): 106-112.
- [20] KANG Z, FU Y, JI J, et al. Effect of local laser surface texturing on tribological performance of injection cam[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1): 1751-1760.
- [21] KONONENKO T V, FREITAG C, SOVYK D N, et al. Influence of pulse repetition rate on percussion drilling of Ti-based alloy by picosecond laser pulses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 103(1): 65-70.
- [22] 杨奇彪, 张弘, 周维, 等. 飞秒激光诱导硬质合金 YG6 表面累积效应[J]. 光子学报, 2019, 48(6): 70-76.
- YANG Qibiao, ZHANG Hong, ZHOU Wei, et al. Surface incubation effect of carbide YG6 induced by femto second laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(6): 70-76.
- [23] KAPLAN A, BERGSTRÖM D, POWELL J. Absorptance of nonferrous alloys to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature[J]. Applied Optics, 2007, 46(8): 1290-1301.
- [24] 谭向虎, 单际国, 唐磊, 等. 面向碳纤维增强树脂基复合材料/钢异质结构连接的汽车钢板高速激光毛化工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 54-60.
- TAN Xianghu, SHAN Jiguo, TANG Lei, et al. Study on laser surf-sculpt of GMW2 autobody sheet steel for carbon fiber reinforced polymer/steel dissimilar joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 54-60.
- [25] 李海刚, 毕建勋, 马武军, 等. 激光毛化对 Cf/SiC 与 TC4 钎焊接头组织及性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(1): 42-46.
- LI Haigang, BI Jianxun, MA Wujun, et al. Influence of laser roughing technology on microstructure and properties of Cf/SiC-TC4 brazing joints[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(1): 42-46.
- [26] 崔开放, 钟良, 龚伟, 等. 陶瓷表面激光无钼活化及其化学镀镍[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 622-626.
- CUI Kaifang, ZHONG Liang, GONG Wei, et al. Palladium free activation and electroless nickel plating on ceramic surface[J]. Laser Technology, 2018, 42(5): 622-626.
- [27] 代竟雄, 钟良, 龚伟, 等. ABS 塑料表面化学镀铜激光无钼活化新工艺[J]. 化工进展, 2018, 37(7): 2759-2764.
- DAI Jingxiong, ZHONG Liang, GONG Wei, et al. A new laser assisted palladium-free activation technology for ABS plastic surface electroless copper plating[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(7): 2759-2764.
- [28] 刘星. 建筑用玻璃与不锈钢/钛合金的激光焊接工艺及性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- LIU Xing. Study on process and performance of glass to stainless steel/titanium alloy with laser welding[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.

作者简介: 王美荣(通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为新型材料制备、异种材料连接。

E-mail: wmr21c@163.com

陈敏, 女, 1994 年出生。主要研究方向为异种材料连接。

E-mail: cm769018986@163.com