

TC4合金与碳纤维增强 ZrB_2-SiC 陶瓷钎焊接头的微观结构与力学性能

王 微¹ 吴 鹏² 李振亚³

(1 安徽机电职业技术学院航空与材料学院, 芜湖 241000)

(2 安徽工程大学机械与汽车工程学院, 芜湖 241000)

(3 中国航空无线电电子研究所工程部, 上海 200241)

文 摘 采用Ag-28Cu钎料对碳纤维增强 ZrB_2-SiC 复合陶瓷与TC4合金真空钎焊。利用扫描电子显微镜、能谱分析仪、力学万能试验机研究钎焊保温时间对钎焊接头界面微观结构与剪切强度的影响。结果表明:碳纤维增强 $ZrB_2-SiC/Ag-28Cu/TC4$ 钎焊接头结合良好,典型接头相组成如下:TC4/TiC+TiCu/Ti₂Cu/TiCu/Cu_{(s,s)}/Ag_{(s,s)}/Ti₅Si₃/TiC/ $ZrB_2-SiC-C$ 。不同的保温时间未改变钎焊接头的相组成,但对于接头界面微观形貌、焊缝厚度及组成相的数量有影响。随钎焊保温时间增加,焊缝中心Ag(s,s)、Cu(s,s)区域逐渐减小,近TC4侧反应中Ti-Cu反应层厚度逐渐增加,其中保温30 min焊缝厚度最厚为70 μm、焊缝中心区域厚度为45 μm。室温平均剪切强度随保温时间增加,先增加后降低,在保温时间20 min时,剪切强度最大为34 MPa。}}

关键词 碳纤维,TC4合金,微观结构,保温时间,剪切强度

中图分类号: TG454

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.01.007

Microstructure and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced ZrB_2-SiC Brazed Joints With TC4 Alloy

WANG Wei¹ WU Peng² LI Zhenya³

(1 School of Aviation and Materials, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241000)

(2 School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000)

(3 China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Engineering Department, Shanghai 200241)

Abstract Carbon fiber reinforced ZrB_2-SiC composite ceramic and TC4 alloy were connected by using Ag-28Cu filler in the vacuum brazing furnace. Scanning electron microscope, energy dispersion spectrometer and mechanical universal testing machine were used to study the effect of brazing holding time on the microstructure and shear strength of the brazed joint interface. The results show that the carbon fiber reinforced ZrB_2-SiC composite ceramic / Ag-28Cu / TC4 alloy joints are well bonded. The typical joints are composed as following: TC4/TiC+TiCu/Ti₂Cu/TiCu/Cu_{(s,s)}/Ag_{(s,s)}/Ti₅Si₃/TiC/ $ZrB_2-SiC-C$. Different holding times have not changed the phase composition of the brazed joints. However, it has an influence on the microstructure of the joints interface, the thickness of the weld and the number of constituent phases. With the increase of brazing holding time, the Ag (s, s) and Cu (s, s) areas in the center of the weld gradually decrease, the thickness of the Ti-Cu reaction layer gradually increased in the TC4 side reaction. The maximum thickness of the weld is 70 μm and the thickness of the central area of the weld is 45 μm when holding for 30 min. The average shear strength at room temperature increased first and then decreased with the}}

收稿日期:2020-06-11

基金项目:安徽省教育厅自然科学重点项目(KJ2018A0860);安徽省质量工程项目(2018kfk108、2019zyk39);安徽省教育厅高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqzd2020059)

第一作者简介:王微,1984年生,硕士,讲师,主要研究方向为复合材料、材料连接与加工技术。E-mail: ahjdww@163.com

increase of holding time and the maximum shear strength is 34 MPa at 810 °C with 20 min holding time.

Key words Carbon fiber, TC4 alloy, Microstructure, Holding time, Shear strength

0 引言

超高温陶瓷具有高硬度、高强度,与其他普通陶瓷相比有好的热传导性,抗氧化烧蚀性能优良,还具有良好的耐磨性,但这种材料的缺点是脆性大,因此超高温陶瓷的应用受到限制^[1-3]。

为克服超高温陶瓷材料的脆性,目前普遍采用的方法是在陶瓷基体中加入连续纤维(如碳纤维)增强体^[4-7]。通过上述方法制备的复合材料,实现了较好的复合效果,在航空航天等领域应用潜力巨大,如可用于航空发动机热端部件以及防热系统上等^[8-11]。尽管纤维增强陶瓷基复合材料已经取得了初步应用成效,但由于其加工成型困难,现在主要被用于制备小尺寸、结构简单的零件。制备复杂精密部件则主要通过纤维增强陶瓷基复合材料和金属等异种材料连接的方法制备。陶瓷/金属的主要连接工艺方法有钎焊、扩散焊、激光焊接和微波连接等^[12],其中钎焊是最为常用的方法,相较于其他几种连接方法,钎焊具有操作便捷、连接性能稳定、工艺适应面广等优点^[13]。

在陶瓷基复合材料与金属的钎焊研究工作中,改善陶瓷/金属之间的润湿性、热膨胀系数的匹配性等是关键。研究者在这方面已开展了很多基础研究工作。Fabrizio Valenza等^[14]研究了添加少量Ti元素的Ag基与Cu基钎料对于ZrB₂-SiC陶瓷/TC4合金的润湿性,并进行了钎焊实验。结果表明Cu基钎料的润湿性很好,加入Ti元素,能够改善润湿性以及界面偏析情况。崔冰等^[15]采用Ag-Cu-Ti-(Ti+C)钎料对碳纤维/SiC复合材料与TC4进行真空钎焊,发现接头中形成的石墨与钛原位合成TiC强化的致密复合连接层,有利于缓解接头的残余热应力,提高了接头的高温性能。接头810 °C高温抗剪强度可达39 MPa。王万里等^[16]研究了980 °C钎焊时间15 min的工艺条件下,碳纤维/SiC复合材料与TC4真空钎焊接头的微观形貌。结果表明,在TC4钛合金侧,来自钎料与TC4的镍发生互扩散形成扩散层;连接层由弥散分布的Ti(Nb, Ni)和Ti₂Ni相组成;碳纤维/SiC与连接层界面为接头最薄弱环节,易形成裂纹。王刚等^[17]研究了添加泡沫铜对ZrB₂-SiC陶瓷/Ag-Cu/Inconel 600合金钎焊效果的影响。结果表明,添加泡沫铜前后,钎焊接头的相组成均为Cu(s, s), Ag(s, s)和(Fe, Cr)₇C₃相,但加入泡沫铜后不连续的块状Cu(s, s)含量增加了,进而降低了接头残余应力,使钎焊接头的抗剪强度从36 MPa提高到加入铜泡沫后的77 MPa。王子

晨等^[18]采用新型Ag-Cu+WC复合钎料进行ZrO₂陶瓷和TC4合金钎焊连接。研究发现,钎焊时WC颗粒与Ti原位反应生成TiC和W增强相,为Ag基、Cu基固溶体提供形核质点,并抑制脆性相Ti-Cu的生长,接头界面典型结构ZrO₂/TiO+Cu₃Ti₃O/TiCu+TiC+W+Ag(s, s)+Cu(s, s)/TiCu₂/TiCu/Ti₂Cu/TC4。钎焊温度890 °C保温10 min时,接头抗剪强度最高为82.1 MPa,比仅使用Ag-Cu钎料时的强度提高了57.3%。

从目前已报道有关纤维增强陶瓷材料/金属钎焊的研究工作来看,对于碳纤维增强ZrB₂-SiC基复合陶瓷材料与金属的钎焊研究还很少。因此有必要开展这方面的研究以了解其钎焊效果与反应机理。本文采用Ag-28Cu钎料对碳纤维增强ZrB₂-SiC陶瓷(以下简称ZSC_r)和TC4(Ti6Al4V)合金进行钎焊试验,对钎焊接头界面相组成、不同保温时间下界面微观结构形貌、剪切性能、剪切断口形貌进行研究。

1 实验

钎料为Ag-28Cu共晶合金,经多次熔炼制成规格为5 mm×5 mm×100 μm的箔片。TC4钛合金为商用Ti-6Al-4V,试样规格为10 mm×10 mm×5 mm。碳纤维增强ZrB₂-SiC复合陶瓷试样尺寸规格为5 mm×5 mm×5 mm, ZrB₂-SiC基体中SiC体积分数为20%。钎焊时将试样按照ZSC_r复合陶瓷/Ag-28Cu/TC4合金的顺序装配。碳纤维增强ZrB₂-SiC复合陶瓷采用PIP(先驱体浸渍裂解法)方法制备。图1为所制备的碳纤维增强ZrB₂-SiC陶瓷基复合材料显微组织形貌。经真空烧结后碳纤维与ZrB₂-SiC陶瓷基体结合致密,无气孔,增强体未受到大的损伤或出现严重断裂。

钎焊试验在真空钎焊炉中进行,真空度为(2~5)×10⁻³Pa。钎焊工艺如图2(a)所示。试验前先将待

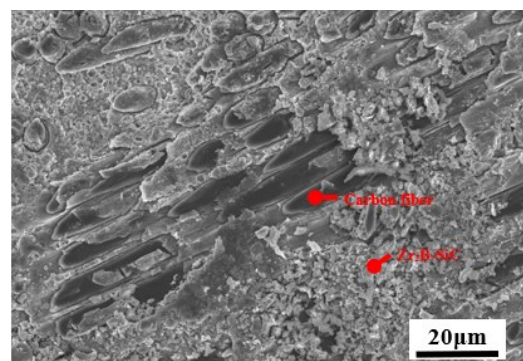
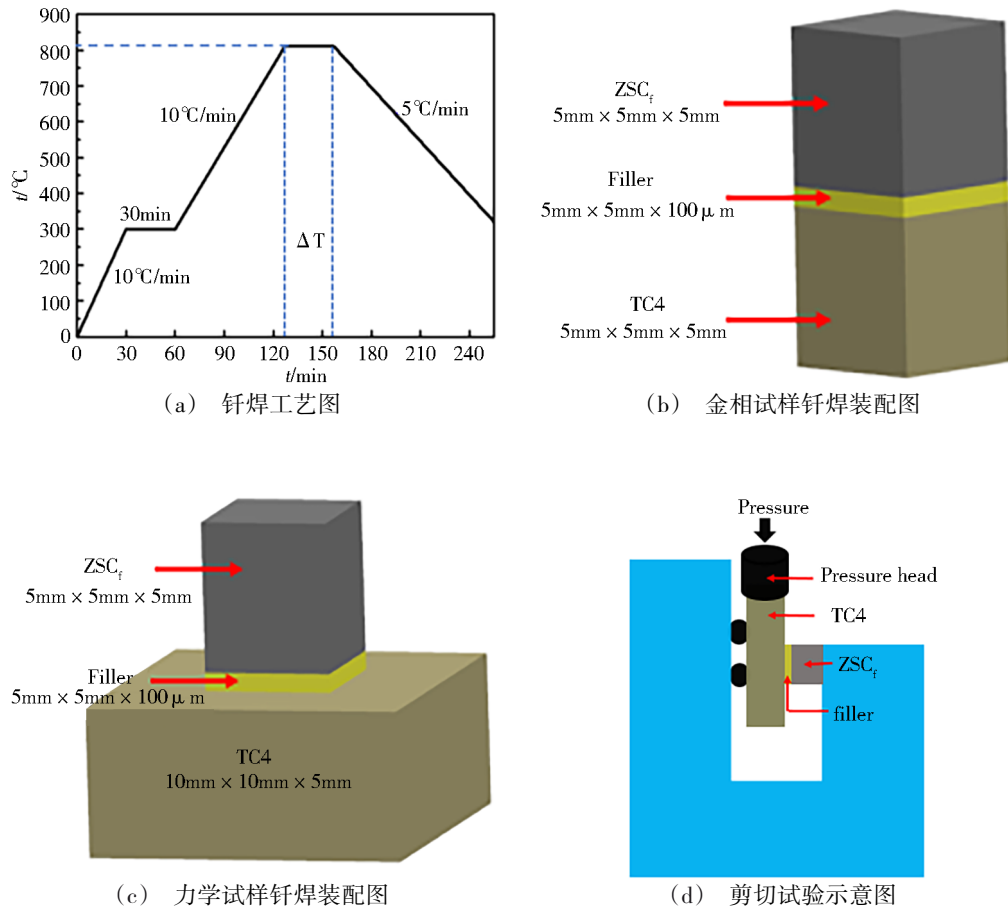


图1 碳纤维增强ZrB₂-SiC陶瓷基复合材料微观形貌
Fig. 1 Microstructure of carbon fiber reinforced ZrB₂-SiC ceramic matrix composites

焊面依次用 800#、1 000#、1 200#、2 000# 的 SiC 砂纸打磨后, 超声清洗 10 min。金相试样与力学性能试样钎焊装配示意图如图 2(b)、(c) 所示。焊后试样取焊缝纵向剖切面打磨抛光处理后, 借助扫描电子显微镜 (SEM, SU-8010) 及能谱分析仪 (EDS) 对钎焊接头

界面反应层进行物相和微观结构分析。采用万能试验机 (Instron 5500) 进行室温剪切试验, 每种保温时间下的钎焊试样测试 3 组数据, 取平均值作为其室温最终平均剪切强度, 并观察室温剪切断面形貌, 剪切试验试样装配如图 2(d) 所示。



(a) 钎焊工艺图

(b) 金相试样钎焊装配图

(c) 力学试样钎焊装配图

(d) 剪切试验示意图

图 2 钎焊工艺与装配图

Fig. 2 Brazing process and assembly iagram

2 结果与讨论

2.1 不同保温时间下接头微观结构

图 3 为 TC4/Ag-28Cu/ZSC_r 在钎焊温度为 810 °C, 分别保温 10、20、30 min 的工艺条件下, 获得的钎焊接头微观形貌。由图 3(a)、(d)、(g) 可见, 随着保温时间的增加, 焊缝界面结构均由扩散区 I、过渡区 II、反应中心区 III、近 ZSC_r 侧区域组成, 总体上来看, 接头变化呈现出一定的规律性, 主要表现在各反应区域的厚度、形态、数量上, 但组成相未发生改变。随保温时间增加焊缝厚度逐渐增加, 保温 10、20、30 min 焊缝厚度依次约为 55、62、70 μm。

图 3(b)、(e)、(h) 分别为保温 10、20、30 min 时 TC4 合金侧界面微观形貌, 可以看出随着保温时间增加, 扩散区 I、过渡区 II 的厚度都增加了。其中保温 10 min 时 TC4 侧反应层最薄, 扩散区 I 平均厚度约在

3 μm 左右、过渡区 II 约为 5 μm 左右, 而保温 30 min 时 TC4 侧反应层最厚, 扩散区 I 平均厚度约在 8 μm 左右、过渡区 II 约为 10 μm 左右, 均有一定程度的增长。图 3(c)、(f)、(i) 为不同保温时间下 ZSC_r 陶瓷侧界面微观形貌, 可以看出在保温时间为 10 min 和 20 min 时, Ag-28Cu/ZSC_r 反应界面清晰、基本呈直线状, 钎料熔化铺展、ZSC_r 陶瓷溶解, 两者之间的反应在 Ag-28Cu/ZSC_r 界面各处较为均匀一致, 反应层较薄; 当保温时间增加至 30 min 时, Ag-28Cu/ZSC_r 界面呈不规则曲线状, 部分钎料由于受挤压排出钎缝, 进入 ZSC_r 陶瓷内部, 反应层厚度也明显增加^[19-20]。钎料与陶瓷之间形成反应层时, 一般包含三种的现象^[21]: 渗透、扩散、反应。试验中所用的 ZSC_r 复合陶瓷在烧结后, 仍有一定的孔隙率, 为钎料元素渗入 ZSC_r 基体中的微孔和空洞提供了一定的条件, 从而形成机械结

合作用。其次钎焊过程中钎料和母材之间的元素由于浓度差异和物质交换产生了化学吸附和扩散,尤其是活性元素如Ti等的扩散。另外,在一定条件下,当保温时间足够时,钎料和陶瓷产生界面反应形成一定厚度的反应层。

钎缝中心区域Ⅲ的微观结构形貌随着钎焊时间

增加,也发生了很大变化。首先是在钎焊过程中,钎缝中心区域Ⅲ中白色基体上分布的灰色相数量降低,分布逐渐不均匀,有集聚成块状的趋势,如图3(a)、(d)、(g)所示。其次是钎缝中心区域Ⅲ的厚度,随保温时间增加逐渐减小,保温30 min时最薄约45 μm 。

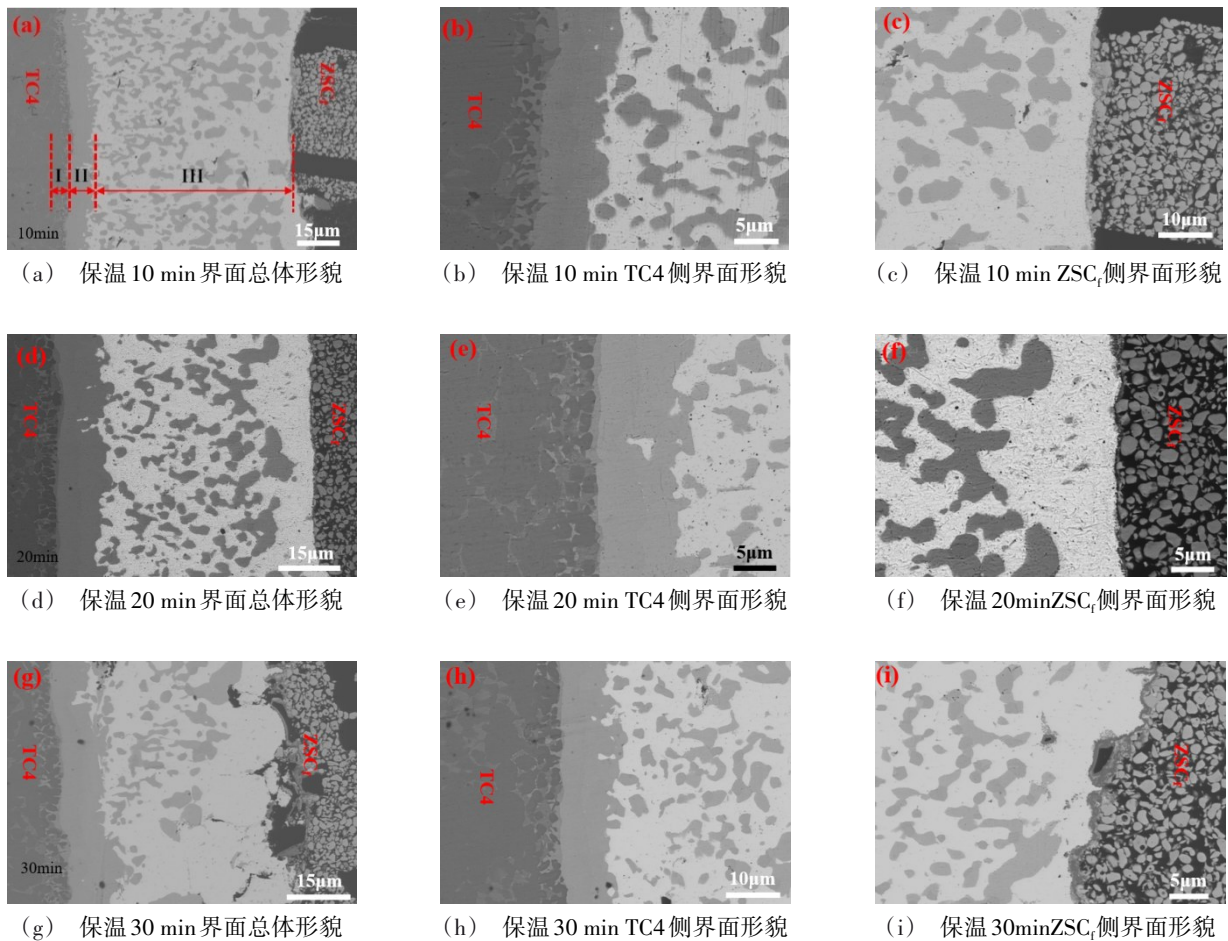


图3 不同钎焊保温时间下TC4/Ag-28Cu/ZSCr钎焊接头显微形貌

Fig. 3 Microstructure of TC4/Ag-28Cu/ZSCr brazing joints with different brazing holding time

2.2 钎焊接头界面相组成

为了解钎焊时界面元素扩散情况,采用扫描电子显微镜对试样中元素进行面分布扫描。图4为在钎焊温度810 $^{\circ}\text{C}$ 保温20 min的工艺条件下,采用Ag-28Cu钎料钎焊TC4/ZSCr获得的钎焊接头界面形貌和元素分布图。图4(a)为焊缝接头整体形貌,图4(b)~(j)为焊缝中元素面分布情况,可以观察到元素Ti、Al、V、Cu、C均发生了不同程度的扩散,其中Ti、Cu元素扩散最为显著,Ti元素在Ag-28Cu/ZSCr陶瓷界面处形成了线状聚集带如图4(i)所示,Cu元素则大量的聚集在TC4/Ag-28Cu界面处如图4(d)所示。B、Si、Zr、Ag未发生明显扩散,主要分布在各自母材或

是钎料区域。

图5为钎焊温度810 $^{\circ}\text{C}$ 保温30 min反应界面扫描电镜下的微观结构形貌。从图5(a)可以看出,接头形貌分为以下几部分:靠近TC4侧扩散区I、过渡区II、反应中心区III、近ZSCr侧区域。对图5(b)、图5(c)中所示接头中各区域进行能谱测试,以确定钎焊接头界面反应产物的成分、可能生成的相,测试与分析结果如表1所示。

图5(b)为TC4侧反应界面放大图。其中扩散区I反应产物由黑色相A、灰色相B、浅灰色相C共同组成。从表1能谱结果发现,A处主要由Ti、Cu、C三种元素组成,其中Ti:(Cu+C)约为1:1,推测该处产物为TiC+

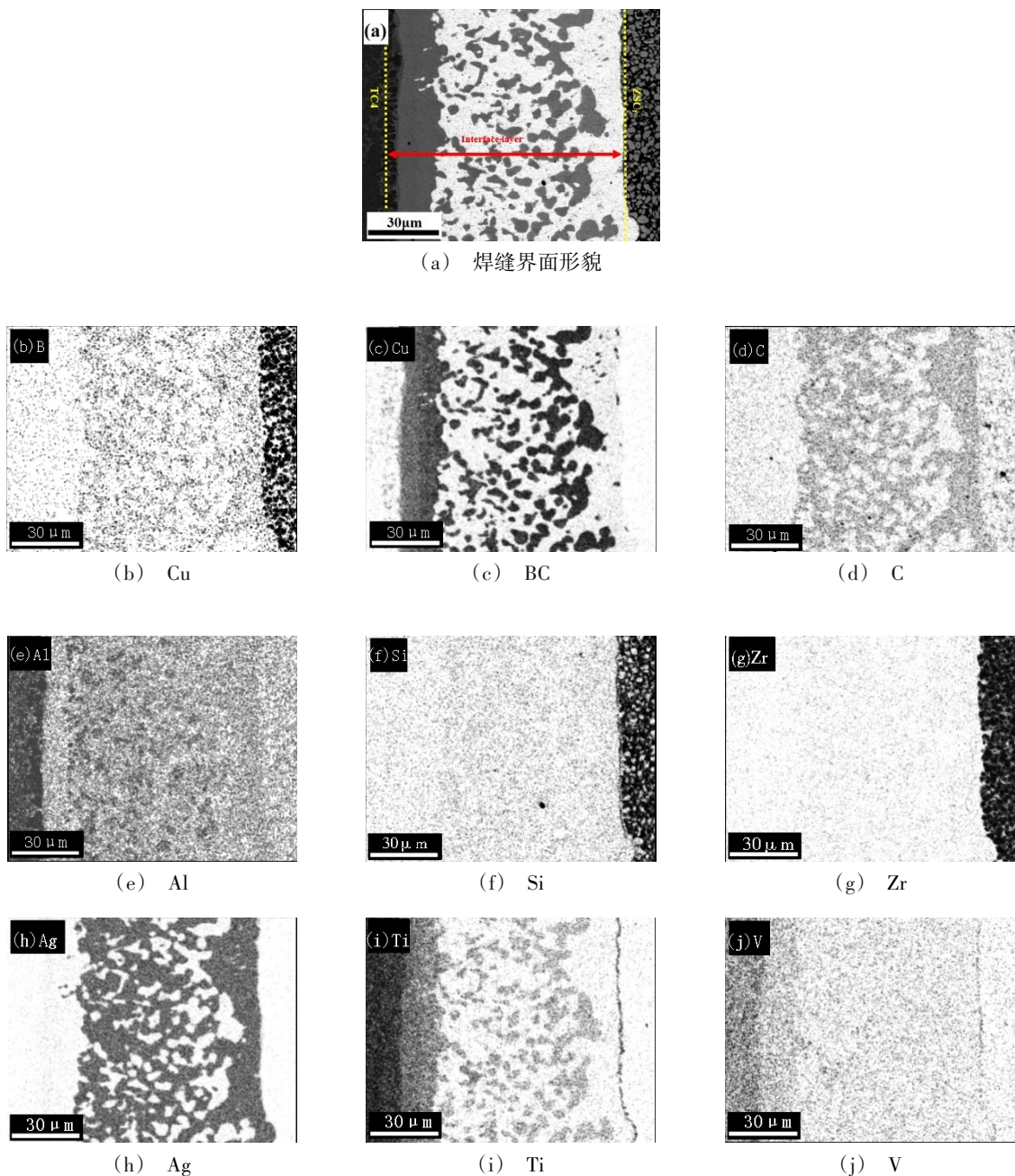


图4 810 °C保温20 min TC4/Ag-28Cu/ZSC_r钎焊接头界面形貌及元素面分布情况

Fig. 4 Interface morphology and element plane distribution of TC4/Ag-28Cu/ZSC_r brazing joints at 810 °C for 20 min

TiCu。B处与C处成分中出现了较多的Cu元素,且Ti与Cu之间原子体积比接近2:1,在钎焊过程中相应的发生如下反应: $2\text{Ti} + \text{Cu} = \text{Ti}_2\text{Cu}$,B、C处可能为 Ti_2Cu 。过渡区Ⅱ主要由灰色相D组成,此处Ti、Cu原子比约为1:1,钎焊过程中Cu原子主要在Ⅱ处富集,与母材TC4中扩散的Ti原子发生如下反应: $\text{Ti} + \text{Cu} = \text{TiCu}$,反产物可能为TiCu。图5(c)焊缝中心区域Ⅲ反应产物由块状分布的灰色相E和白色基体相F组成。灰色相E中以Cu元素为主,主要来自泡沫铜,白色相F主要组成元素为Ag,结合表1能谱结果可知灰色相E为 $\text{Cu}_{(s,s)}$,白色相F为 $\text{Ag}_{(s,s)}$ 。Ag-28Cu/ZSC_r界面形成了宽度约为0.3 μm

的反应层,反应产物为灰色相G及少量的白色相H。表1能谱结果显示,G相中Ti、Si元素含量的原子比接近5:3,二者发生化学反应: $5\text{Ti} + 3\text{Si} = \text{Ti}_5\text{Si}_3$,此处反应产物可能为 Ti_5Si_3 ;H相主要为Ti、C,二者极易反应形成碳化物,根据其原子比推测反应产物为TiC。

综上可知,采用Ag-28Cu钎料对TC4/ZSC_r钎焊可实现良好的冶金结合,钎焊接头无明显裂纹,接头产物主要为 $\text{TiC} + \text{TiCu} / \text{Ti}_2\text{Cu} / \text{TiCu} / \text{Cu}_{(s,s)} / \text{Ag}_{(s,s)} / \text{Ti}_5\text{Si}_3 / \text{TiC}$ 。

2.3 剪切强度与断口形貌分析

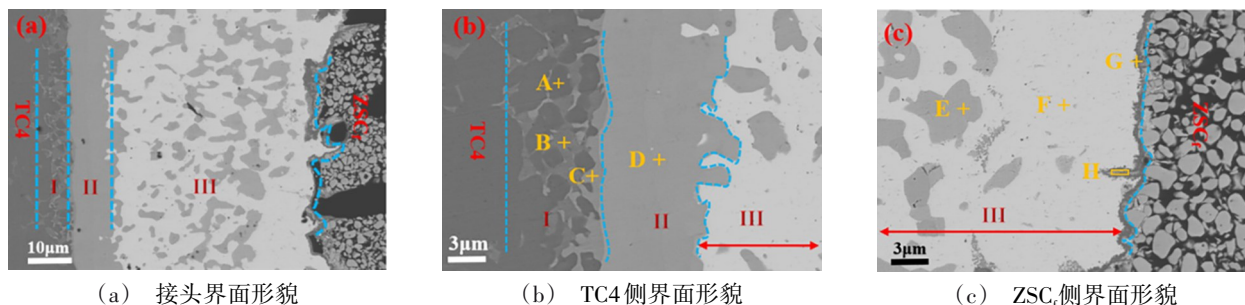


图5 钎焊温度810 °C保温30 min反应界面各处的扫描电镜显微形貌

Fig. 5 Scanning electron microscope morphology of the reaction interface at 810 °C for 30 min

表1 图5中各点能谱结果

Tab. 1 Energy spectrum results of each point in figure 5

	B	C	Cu	Al	Si	Zr	Ag	Ti	V	可能的相
A	0.53	14.63	16.6	0.41	0.18	0.05	0.1	63.68	3.81	TiC+ TiCu
B	0.24	16.43	23.21	3.46	0.27	0.08	0.39	53.46	2.46	Ti ₂ Cu
C	1.11	13.39	25.77	4.51	0.45	0.11	0.98	50.03	3.66	Ti ₂ Cu
D	0.85	15.14	36.83	2.28	0.63	0.06	1.27	40.45	2.5	TiCu
E	0.38	13.05	68.11	0.65	0.19	0.06	0.72	15.64	1.19	Cu _(s,s)
F	21.8	11.97	4.09	1.69	0.27	0.03	57.54	1.11	1.5	Ag _(s,s)
G	0.33	7.89	1.74	1.02	24.42	0.18	0.78	55.15	8.51	Ti ₅ Si ₃
H	0.33	24.42	1.74	1.02	7.89	0.18	0.78	55.15	8.51	TiC

图6为TC4/Ag-28Cu/ZSC_r钎焊接头不同保温时间下的室温平均剪切强度。可以看出随着保温时间的增加,钎焊接头的剪切强度先增加后降低,在保温时间为20 min时获得的室温平均剪切强度最大约为34 MPa。这种变化趋势同文献[22]研究结果相似,主要原因有三方面:一是随着保温时间延长,泡沫Cu三维框架结构坍塌,失去弹性;二是ZSC_r侧反应层随着保温时间延长,逐渐形成连续反应薄层,但是当保温时间过长反应层断裂如图3(g)所示,可以看出原本连续的反应层变为几段;三是TC4侧反应层影响,从图3焊缝界面微观结构可知,TC4侧反应层以脆性相Ti₂Cu、TiCu为主,是焊缝中的脆性层,在保温10 min时,钎料和母材之间反应时间短,界面反应弱,所生成的接头焊缝较薄,母材与钎料结合强度低;随着保温时间延长至20 min时,界面反应得以充分进行,形成焊缝厚度可达62 μm,此时脆性层尚未过度长大增厚,母材与钎料之间形成了合适的连接,强度较好;当温度延长至30 min时,界面反应过度,TC4侧脆性反应层最厚,不利于接头强度提高,反而使强度下降。文献[23]研究表明一定温度下脆性层厚度随连接时间的变化符合抛物线生长规律,较短的钎焊时

间短下,钎料和母材之间的接合率低,连接强度不高;随钎焊时间增加,钎料和母材的接合率得以提高,但同时界面脆性层也显著长大增厚,使接头强度值显著下降。

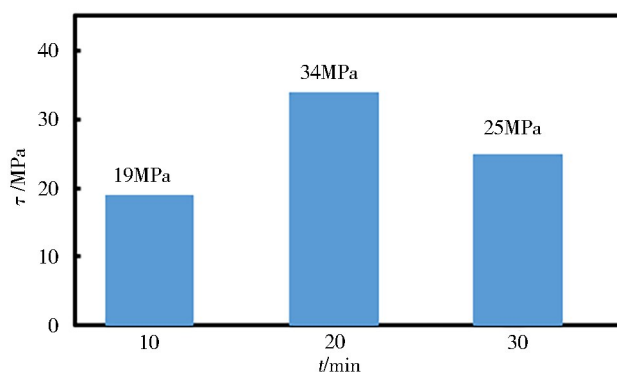


图6 TC4/Ag-28Cu/ZSC_r钎焊接头在不同保温时间下剪切强度

Fig. 6 Shear strength of TC4/Ag-28Cu/ZSC_r brazing joints at 810 °C for different holding time

图7为钎焊温度810 °C,保温10、20、30 min时ZSC_r陶瓷侧剪切断面形貌、界面断裂形貌及界面断裂放大形貌,三种保温时间下,断裂都发生在近ZSC_r陶瓷侧及反应层中。

从图7(a)、(d)、(g)陶瓷侧断面上能观察到碳纤维束基本保持着编织预制体十字交叉的状态,断面上有一定厚度的反应层,碳纤维被拉拔后留下的孔洞清晰可见。图7(b)、(e)、(h)为界面断裂微观形貌,断口平整、分区清晰,呈现典型的脆性断裂特征。从图7(c)、(f)、(i)界面断裂放大图中可以看出,断口上分布着不连续的块状反应层,碳纤维在剪切试验过程中发生脱粘、断裂、拉拔,图7(c)断口上可见纤维拉拔后留下的孔洞,但整体上断口整齐。由断口形貌可知,不同保温时间下钎焊接头断裂的方式均为脆性断裂。

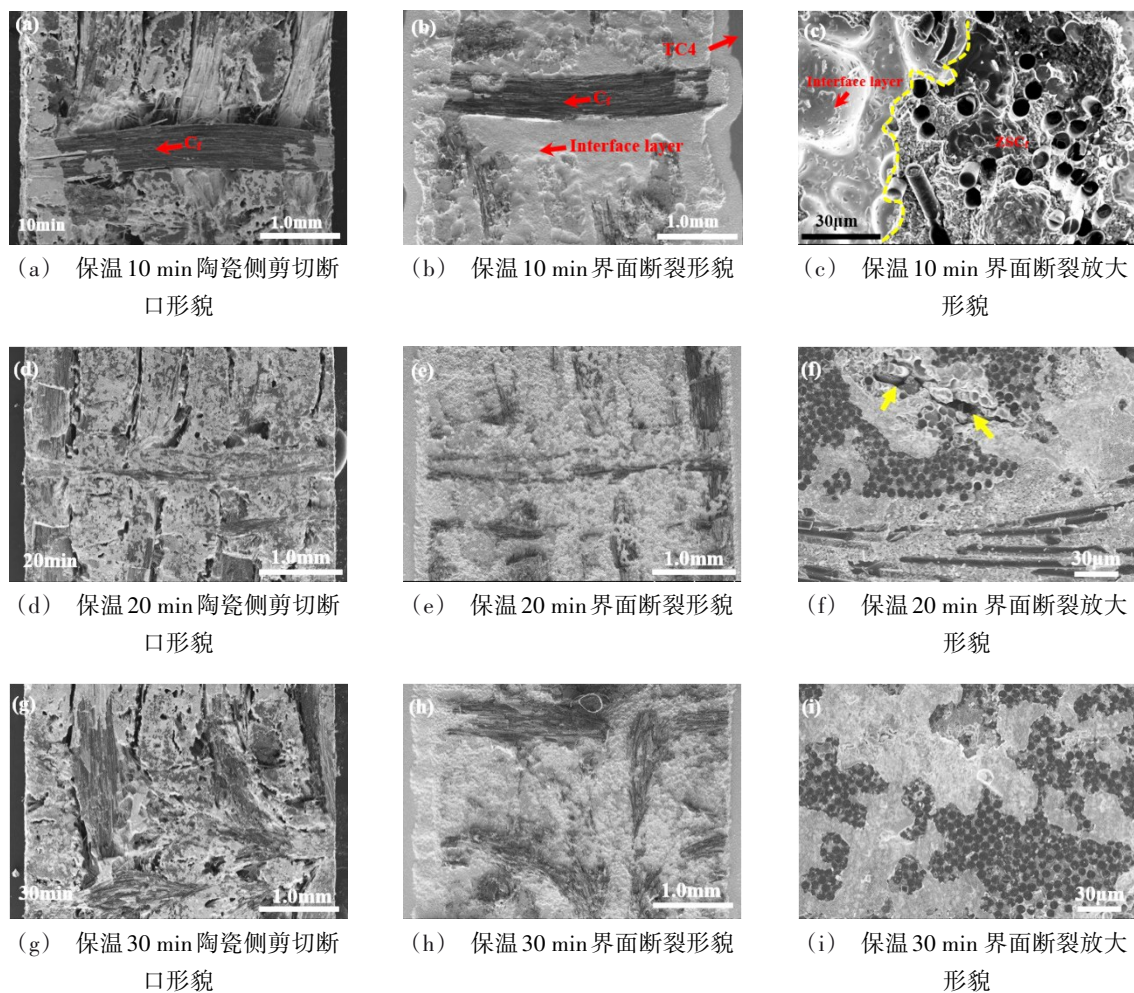


图7 钎焊温度810 °C不同保温时间下剪切断口显微形貌

Fig. 7 Microstructure of shear fracture at brazing temperature of 810 °C for different holding time

3 结论

(1) TC4/Ag-28Cu/ZSC_r 钎焊接头实现了冶金结合, 界面主要组成相由 TC4 合金侧向 ZSC_r 陶瓷一侧依次为: TC4/TiC+TiCu/Ti₂Cu/TiCu/Cu_{(s,s)}/Ag_{(s,s)}/Ti₅Si₃/TiC/ZSC_r。}}

(2) 不同的保温时间未改变钎焊接头的相组成, 但对于接头界面微观形貌、焊缝厚度及组成相的数量有影响。随着温度的增加, 焊缝总厚度增加, 焊缝中心区域Ⅲ厚度减小, 其中保温 30 min 焊缝最厚为 70 μm、焊缝中心区域Ⅲ厚度最薄为 45 μm。

(3) 随保温时间增加, TC4/Ag-28Cu 界面 Ti-Cu 反应层厚度逐渐增加, 30 min 时最厚达 14 μm, Ag-28Cu/ZSC_r 侧 Ti₅Si₃ 相数量逐渐增加, 焊缝中心区域Ⅲ处的 Cu_(s,s) 数量减少。

(4) 三种保温时间下, 断裂都发生在近 ZSC_r 陶瓷侧及反应层中, 为脆性断裂。在一定温度下进行钎焊时, 应严格控制保温时间以获得最佳的界面反应。

参考文献

[1] 倪德伟, 陈小武, 王敬晓, 等. C_r/ZrB₂-ZrC-SiC 超高温

陶瓷基复合材料的设计、制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(12): 1661-1668.

NI D W, CHEN X W, WANG J Y, et al. Design, fabrication and properties of C_r/ZrB₂-ZrC-SiC ultra-high temperature ceramic matrix composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(12): 1661-1668.

[2] ZHANG G, NI D, ZOU J, et al. Inherent anisotropy in transition metal diborides and microstructure/property tailoring in ultra-high temperature ceramics: A review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38: 371-389.

[3] XIONG J H, HUANG J H, ZHANG H, et al. Joining of C_r/SiC composite and TC4 using Ag-Al-Ti active brazing alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20: 1084-1089.

[4] 陈小武, 董绍明, 倪德伟, 等. 碳纤维增强超高温陶瓷基复合材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(9): 843-854.

CHEN X W, DONG S M, NI D W, et al. Progress on carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites [J]. Materials China, 2019, 38(9): 843-854.

[5] 王鸿飞, 李国栋, 孙晔华, 等. Si 碳纤维增强 AlN-SiC 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第1期

复合材料的制备及力学性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(3): 232-238.

WANG H F, LI G D, SUN Y H, et al. Fabrication and mechanical properties of silicon carbide fiber reinforced AlN-SiC composites [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24(3): 232-238.

[6] ZHU M, WANG Y G. Pressureless sintering ZrB₂-SiC ceramics at low temperatures [J]. Materials Letters, 2009, 63(23): 2035-2037.

[7] ZOLI L, MEDRI V, MELANDRI C, et al. Continuous SiC fibers-ZrB₂ composites [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(16): 4371-4376.

[8] PICHON T T, BARRETEAU R, SOYRIS P, et al. CMC thermal protection system for future reusable launch vehicles: Generic shingle technological maturation and tests [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(1-2): 165-176.

[9] MIRIYALA N. Fabric orientation effects on the monotonic and fatigue behavior of continuous fiber-reinforced ceramic-matrix composites (CFCCs) [J]. Open Problems in Topology II, 2007, 28(12): 407-422.

[10] NI D, WANG J, DONG S, et al. Fabrication and properties of C_f/ZrC-SiC based composites by an improved reactive melt infiltration [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2018, 101(8): 3253-3258.

[11] BELARDO M, GARDI R. Conceptual design of the junction between C/SiC thermal protection system and anisogrid fuselage cold structure [J]. Procedia Engineering, 2015, 114: 46-53.

[12] 刘会杰, 李广, 冯吉才, 等. 陶瓷与金属扩散连接的研究现状[J]. 焊接, 2000(9): 7-12.

LIU H J, LI G, FENG J C, et al. Reaearch status quo of diffusion bonging of ceramics to metals [J]. Welding and Joining, 2000(9): 7-12.

[13] 梁凯, 熊腊森. 先进的结构陶瓷材料及其钎焊连接技术的研究进展[J]. 现代焊接, 2006, 44(8): 11-14.

LIANG K, XIONG L S. The research development of advanced structural ceramics material and soldering joining technology [J]. Modern Welding, 2006, 44(8): 11-14.

[14] VALENZA F, ARTINI C, PASSERONE A, et al. ZrB₂-SiC/Ti6Al4V joints: Wettability studies using Ag- and Cu-based braze alloys [J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(24): 8439-8449.

[15] 崔冰, 黄继华, 熊进辉, 等. TiC增强 C_f/SiC复合材料与钛合金钎焊接头工艺分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 85-88.

CUI B, HUANG J H, XIONG J H, et al. Analysis of brazed joints between carbon fiber reinforced SiC composite and titanium alloy with TiC [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(3): 85-88.

[16] 王万里, 范东宇, 黄继华, 等. TiNiNb钎焊 C_f/SiC与TC4接头组织结构[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 13-16.

WANG W L, FAN D Y, HUANG J H, et al. Brazed Joint of C_f/SiC to TC4 with TiNiNb filler materials [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(12): 13-16.

[17] WANG G, CAI Y J, WANG W, et al. Brazing ZrB₂-SiC ceramics to Inconel 600 alloy without and with Cu foam [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 29-35.

[18] 王子晨, 曹健, 代翔宇, 等. Ag-Cu+WC复合钎料钎焊 ZrO₂陶瓷和TC4合金[J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 5-9.

WANG Z C, CAO J, DAI X Y, et al. Brazing ZrO₂ ceramic and TC4 alloy using Ag-Cu+WC composite filler [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 5-9.

[19] 吴铭方, 蒋成禹, 于治水, 等. TC4/72Ag-28Cu钎焊组织及Ti-Cu化合物生长机理研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(3): 29-32.

WU M F, JIANG C Y, YU Z S, et al. Microstructure of TC4/72Ag-28Cu joint and production mechanism of Ti-Cu compound at the interface [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(3): 29-32.

[20] 蒋成禹, 吴铭方, 余春, 等. 72Ag-28Cu钎焊TC4的接头组织及强度[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(4): 295-297.

JIANG C Y, WU M F, YU C, et al. Morphology and strength of TC4 joint with 72Ag-28Cu filler metal [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(4): 295-297.

[21] 李卓然, 顾伟, 冯吉才. 陶瓷/AgCuTi/不锈钢钎焊连接界面组织与结构[J]. 焊接学报, 2009(7): 1-4.

LI Z R, GU W, FENG J C. Interface structure of ceramic/AgCuTi/stainless steel brazed joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009(7): 1-4.

[22] WANG X Y, LI C, SI X Q, et al. Brazing ZTA ceramic to TC4 alloy using the Cu foam as interlayer [J]. Vacuum, 2018, (155): 7-15.

[23] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余. TiAl/40Cr钢扩散连接界面组织结构对接头强度的影响[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(2): 144-147.

HE P, FENG J C, QIAN Y Y. Effect of interfacial microstructure of TiAl/40Cr diffusion bonding on strength of joint [J]. Materials Science and Technology, 2003, 11(2): 144-147.