

引文格式: 续润洲, 岳喜山, 邓云华, 等. C/C 复材与高温合金异种材料蜂窝结构钎焊界面组织及力学性能[J]. 航空制造技术, 2023, 66(18): 86-90, 97.

XU Runzhou, YUE Xishan, DENG Yunhua, et al. Microstructure and mechanical properties of brazing interface between C/C composite and superalloy dissimilar material honeycomb structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(18): 86-90, 97.

C/C 复材与高温合金异种材料蜂窝结构钎焊 界面组织及力学性能

续润洲¹, 岳喜山¹, 邓云华¹, 任金伟², 朱小龙²

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 西安航空制动科技有限公司, 西安 713106)

[摘要] 在钎焊温度为 1040 °C, 保温时间为 15 min 的条件下, 采用 BNi-2 钎料钎焊连接 C/C 复合材料面板和 GH3536 高温合金异种材料蜂窝结构, 研究了不同钎料层厚度对板-芯界面微观组织变化和板-芯拉脱性能影响。结果表明, 焊后板-芯接头由钎料与 C/C 母材反应区、钎料与蜂窝反应区和钎料凝固区 3 个区域组成, 钎料与 C/C 母材反应生成了 Cr₃C₂ 反应层, 钎料与蜂窝反应区内生成了 Si 的金属间化合物和 Cr₃C₂ 颗粒。随着钎料厚度的增加, 接头拉脱性能先升高后降低, 当钎料厚度为 0.12 mm 时, 板-芯接头拉脱强度达到最高 9.69 MPa, 断裂位置主要发生在 C/C 基体内。

关键词: C/C 复合材料面板; 高温合金蜂窝; 钎焊; 界面组织; 拉脱性能

Microstructure and Mechanical Properties of Brazing Interface Between C/C Composite and Superalloy Dissimilar Material Honeycomb Structure

XU Runzhou¹, YUE Xishan¹, DENG Yunhua¹, REN Jinwei², ZHU Xiaolong²

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd., Xi'an 713106, China)

[ABSTRACT] BNi-2 braze was used to brazing C/C composite panel and GH3536 superalloy honeycomb under the brazing parameter at brazing temperature of 1040 °C and holding time 15 min. The influence of the thickness of brazing braze on the microstructure and flatwise tensile strength of C/C composite and superalloy honeycomb sandwich structure was analyzed. Results show that the panel-honeycomb interface can be divided into reaction zone between C/C composite and braze, reaction zone between braze and honeycomb and braze solidification zone. Cr₃C₂ reaction layer is formed between braze and C/C composite. Intermetallic compounds of Si are formed within the reaction zone between braze and honeycomb. With the increase of thickness braze, flatwise tensile strength increases first and then decreases. When the braze thickness is 0.12 mm, flatwise tensile strength reaches the maximum level at 9.69 MPa. The fracture site mainly occurs in the C/C composite base material.

Keywords: C/C composites panel; Superalloy honeycomb; Brazing; Interface microstructure; Flatwise tensile strength

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.18.086

C/C 复合材料具有高比强、高比模、高可靠性、耐高温、低热膨胀系数、化学性质稳定等优异性能, 是理想热防护结构材料之一^[1-3], 可应用于飞行器热流密度较大的机翼前缘、舵面和鼻锥等部位^[4-5]。蜂窝夹层结构具

有优异的比强度、比刚度和较低的密度, 大量应用于航空航天领域^[6-7]。刘宇峰等^[8]进行了 C/C 复合材料蜂窝结构的制备, 其中 C/C 复合材料面板和蜂窝结构独立制备, 经胶黏剂粘接集成, 但 C/C 复合材料蜂窝结构制

备工艺过程复杂、成本高,面板与蜂窝间胶粘剂的使用温度较低,限制了该结构在高温下的使用。若采用耐高温合金金属蜂窝替代 C/C 复合材料蜂窝芯,可降低蜂窝芯体制造工艺难度,同时提高结构强度,充分发挥 C/C 复合材料和高温合金高温性能优异的特性。

连接 C/C 复合材料与金属的方法主要有胶结^[9]、机械连接^[10]、扩散连接^[11]和钎焊连接^[12-13],钎焊方法可应用于复杂结构形式,制造成本低,操作过程简便易行,是研究较多的焊接方法,而钎料与 C/C 复合材料的润湿性是钎焊连接中的关键问题。因此,国内外开展了较多的相关工艺研究。Guo 等^[14]提出了一种新型 Ag-Cr 活性钎焊,将 C/C 复合材料钎焊到镍基单晶合金(DD3)上,C/C-AgCr-DD3 接头的微观组织研究表明 Cr 与 C 生成了 Cr₂₃C₆,接头剪切强度可达 27 MPa。Wang 等^[15]采用 Ag-Ti 混合粉末钎焊连接了 C/C 复合材料与 GH3044,钎料内 Ti 元素与 C 元素发生反应生成 TiC,接头强度可达 45.8 MPa。Shi 等^[16]则在 C/C 复合材料表面制备了 SiC 涂层后采用 Ni₇₁CrSi 钎料连接 C/C 复合材料与 GH3044, SiC 涂层不但与钎料 Ni₇₁CrSi 发生反应生成 Cr₇C₃, SiC 涂层热膨胀系数介于 C/C 复合材料与 GH3044 间,起到缓冲接头应力作用,接头强度可达 54.4 MPa。钎料内活性元素 Cr 与 Ti 可与 C/C 复合材料发生反应,在接头内实现了冶金结合与反应润湿。现有研究主要集中于 C/C 复合材料与高温合金块体连接研究^[13,17-18],对 C/C 复合材料与高温合金异种材料蜂窝结构钎焊研究未见公开报道,但是钎焊界面结构类似,钎焊界面反应过程仍具有借鉴意义。

因此,本研究采用了与高温合金相容性较好且含有活性元素 Cr 的 BNi-2 钎料,开展了 C/C 复合材料面板与高温合金芯体异种材料钎焊工艺研究,分析了钎料添加量对板-芯界面微观组织和夹层结构力学性能的影响规律研究,确定了最佳的钎料添加量,为工程应用奠定了基础。

1 试验材料与方法

蜂窝夹层结构中的面板材料为 2.5D 碳纤维编织化学气相沉积制备的 C/C 复合材料,密度约 1.7~1.8 g/cm³。蜂窝芯体材料为高温合金 GH3536,蜂窝芯内切圆直径 3.2 mm、壁厚 0.05 mm、高度 5 mm。钎料选用 BNi-2 非晶态箔带钎料,化学成分如表 1 所示。

在钎焊试样制备前,将 C/C 复合材料机械加工成 25 mm × 25 mm × 3 mm 块状试样,然后采用 1200# 砂纸打磨钎焊面,打磨后采用酒精超声波清洗 60 min,去除表面残留的粉末和杂质。高温合金蜂窝采用点焊而成,拼接成 25 mm × 25 mm × 5 mm 的试样。制备好试

样后将 C/C 复合材料、高温合金蜂窝和钎料箔带进行装配固定,装配过程如图 1 所示,在真空钎焊炉内钎焊,钎焊温度 1040 ℃,保温 15 min,钎焊过程真空压力不大于 1 × 10⁻² Pa。钎焊后试样按照 GJB 130.4—86《胶接铝蜂窝夹层结构平面拉伸试验方法》进行蜂窝拉脱性能测试。

采用 IT700 扫描电镜对焊后接头微观组织和断面进行观察,采用日本理学 SmartLab X 射线仪结合 EDS 能谱分析仪检测接头产物,采用 LE5105 电子万能材料试验机对板-芯接头拉脱性能进行测试。

2 试验结果分析

2.1 钎料厚度对钎焊接头微观组织影响

在钎焊温度 1040 ℃,保温 15 min 工艺条件下,分别添加厚度 0.08 mm、0.12 mm、0.16 mm 和 0.20 mm 的钎料对 C/C 复合材料面板和高温合金蜂窝进行钎焊,图 2 为添加不同钎料层厚度形成的板-芯界面微观组织。可知,钎料能够在 C/C 复合材料表面很好地铺展,并通过毛细作用填充蜂窝壁间隙,在板-芯界面形成圆润饱满钎角,且随着钎料厚度的增加,钎角尺寸增大。从板-芯焊缝区背散射放大图像可知,在相同的钎焊工艺参数下,板-芯界面均分布有不规则白色相和灰色相,当钎料厚度较薄时,白色和灰色相分布在钎角区域,随着钎料厚度增加,白色相和灰色相既在钎角位置生成,亦在蜂窝芯格壁和蜂窝面板间生成。当钎料厚度为 0.20 mm 时,白色相和灰色相则主要集中生成于蜂窝芯格壁与蜂窝面板间。

为了进一步确定板-芯界面形成过程,选取添加钎料厚度为 0.12 mm 的板-芯界面,对界面处标记点位 1~5 进行 EDS 能谱分析,并对板-芯界面进行面扫描测试,获得不同元素在板-芯界面的分布结果,如图 3 所示。

表 1 BNi-2 化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of BNi-2 (mass fraction) %

Ni	Cr	Fe	Si	B	C
余量	6.0~8.0	2.5~3.5	4.0~5.0	2.75~3.5	≤0.06

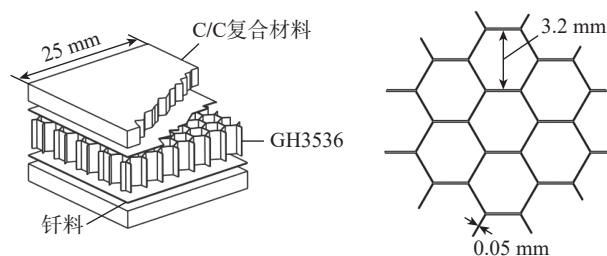


图 1 蜂窝钎焊装配和蜂窝芯格示意图

Fig.1 Schematic diagram of honeycomb brazing assembly and honeycomb core

通过面扫描图像和EDS分析结果可知,Cr元素(红色)主要集中分布在C/C复合材料表面附近和蜂窝芯内部,Mo元素(蓝色)主要分布于蜂窝芯和C/C复合材料面板间靠近蜂窝芯区域,因此接头可大致分为3个区域:C/C复合材料与钎料反应区、钎料与蜂窝反应区和钎料凝固区。

图3中对应点元素分析见表2,C/C母材与钎料反应区内,在C/C复合材料表面存在一层均质的暗灰色相,通过EDS分析(点1)可知该反应层主要元素是Cr和C。根据Qing等^[19]的研究可知,Cr₃C₂生成的标准吉布斯自由能在1040℃时为负值,表明钎焊条件下钎料中的Cr原子与C/C复合材料中的C原子有发生反应生成相应的碳化物的可能性。结合Cr-C二元相图和XRD物相分析结果(图4),推测C/C复合材料表面生成了Cr₃C₂^[19-20]。图3中,在距该界面约40μm处分布着与反应层类似的暗灰色相(点2),其主要成分与点1类似,为Cr和C元素,并含有微量的Fe、Ni和Mo元素,由于EDS扫描分析选取的是点2附近微区内物相,由此推测暗灰色相亦为Cr₃C₂。

钎料与蜂窝反应区内含有较多BNi-2钎料内不含有Mo元素(蓝色),且该区域范围超过了250μm,表明部分蜂窝芯溶解至钎料内。该区内主要存在白色相(点3)、暗灰色相(点4)和灰色相(点5),EDS分析结果表明,白色相主要成分为Mo、Ni、Cr和Si,可能为金属与Si形成的金属间化合物。暗灰色相和C/C母材与钎料反应区生成的物相在背散射信号下类似,说明物相成分接近,推测该处物相为Cr₃C₂。与C/C母材附近生成的Cr₃C₂不同的是,该处物相C元素不来源于C/C母材,而是来源于BNi-2钎料和GH3536材料自身含有的微量C元素。

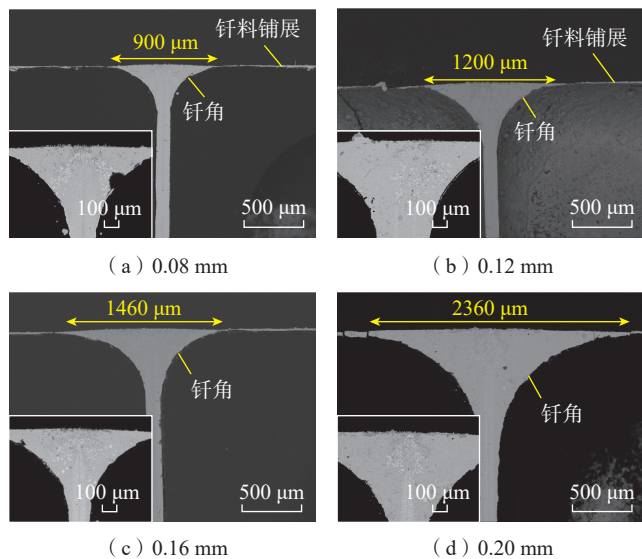


图2 不同BNi-2钎料厚度下钎焊接头微观组织形貌
Fig.2 Microstructure of joints brazed with different BNi-2 thicknesses

2.2 钎料厚度对钎焊接头力学性能影响

钎焊温度1040℃,保温15min工艺条件下,在C/C复合材料面板和GH3536蜂窝之间添加不同厚度的钎料,将面板和蜂窝钎焊后,采用电子万能材料试验机对拉脱性能进行测试,图5为C/C复合材料和高温合金蜂窝板-芯接头拉脱强度测试结果。可知,当面板和蜂窝芯中间添加0.04mm的钎料时,板-芯拉脱强度仅有2.58MPa,随着钎料厚度的增加,板-芯接头室温拉脱强度缓慢升高。当添加0.08mm和0.12mm厚度的钎料时,板-芯拉脱强度分别升高至4.59MPa和9.69MPa,添加0.12mm厚度钎料时强度最高。当钎料层厚度继续增加至0.16mm和0.20mm时,板-芯室温拉脱

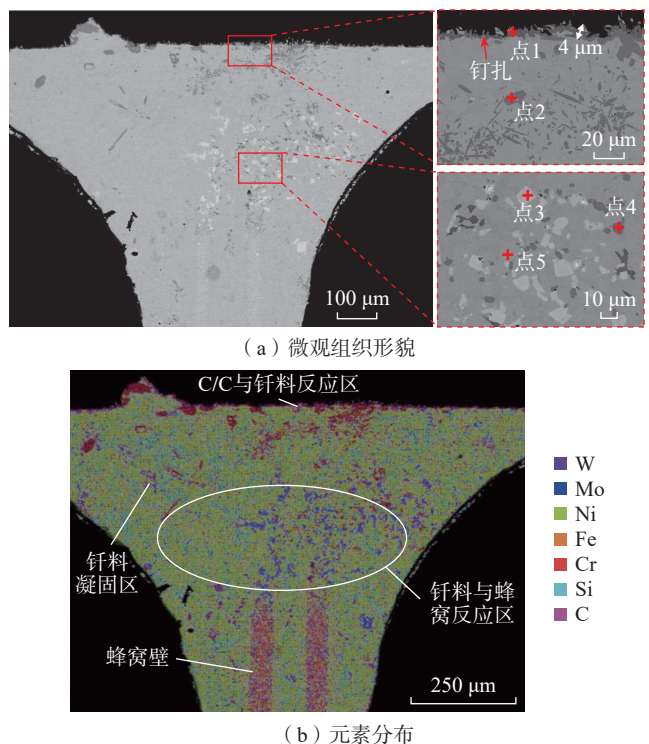


图3 0.12mm钎料厚度接头微观组织形貌和元素分布
Fig.3 Microstructure and mapping scanning results of joint brazed with braze of thickness 0.12 mm

表2 图3中对应点元素分析(原子数分数)
Table 2 EDS analysis results of corresponded spots in Fig.3 (atomic fraction) %

位置	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	Mn	可能相
点1	0.12	93.47	0.87	1.91	3.42	0.21	—	Cr ₃ C ₂
点2	0.26	84.38	5.22	8.26	1.78	0.10	—	Cr ₃ C ₂
点3	15.57	29.65	1.74	35.64	16.71	0.69	—	M ₅ Si ₃
点4	0.81	82.45	2.69	5.91	7.93	0.21	—	Cr ₃ C ₂
点5	10.30	5.02	8.71	75.60	0.06	0.02	0.14	Ni基固溶体

强度降低至 5.8 MPa 和 4.87 MPa。

结合板-芯界面微观形貌分析可知,钎料熔化后会在毛细作用下首先沿着蜂窝壁爬升^[21],当填满蜂窝壁间隙后再次填充蜂窝壁和面板间隙。由于 C/C 复合材料为多孔材料,钎料亦会通过 C/C 母材表面的微孔洞浸润至 C/C 母材内形成“钉扎”效应,He 等^[22]在 C/C 复合材料与其他金属连接过程中也发现了类似的界面结构。而当钎料较少时,钎料大部分流向了蜂窝芯格壁,导致钎料与 C/C 母材形成的“钉扎”效应较微弱。其次,钎料较少时,板-芯形成的钎角较小。当添加钎料厚度为 0.08 mm 时,钎角与面板连接长度仅为 900 μm 。随着钎料厚度的增加,钎料与 C/C 母材形成的“钉扎”效应同步提升,当添加钎料厚度为 0.12 mm 时,钎角随之增大,此时板-芯连接强度达到最大。这是因为在一定的钎焊工艺参数下,钎料与 C/C 母材反应和蜂窝壁反应所消耗的钎料量一定,此时板-芯界面“钉扎”效应和钎角与 C/C 母材间的内应力达到平衡。当钎料添加量继续增加时,熔化后剩余的钎料在钎角处堆积过多,造成板-芯界面处遗留钎料和 C/C 母材热膨胀系数不匹配导致内应力增大,板-芯界面连接强度下降。

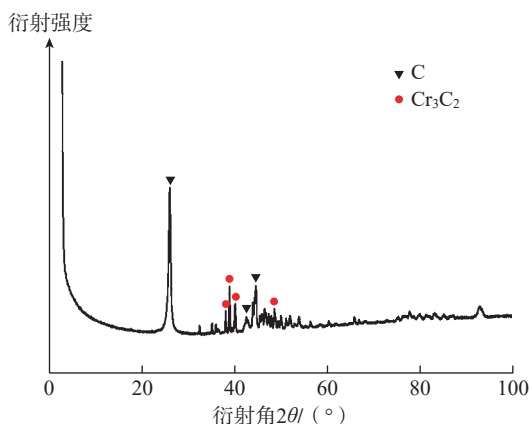


图 4 1040 °C/15 min 条件下钎焊接头断面 X 射线衍射结果

Fig.4 XRD scanning results of fracture surface within joint under brazing temperature 1040 °C and dwelling time 15 min

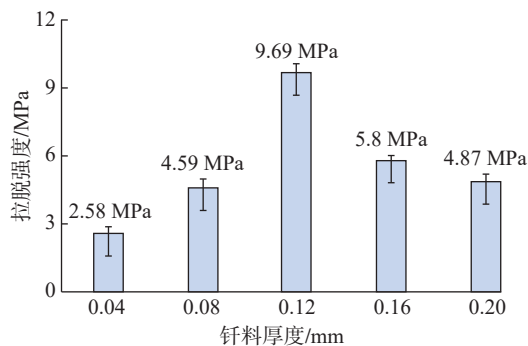


图 5 钎料厚度对接头拉脱强度的影响(1040 °C/15 min)

Fig.5 Flatwise tensile strength of joint brazed by different thickness braze (1040 °C/15 min)

2.3 钎焊接头物相和断口分析

图 6 为添加厚度为 0.12 mm 和 0.20 mm 钎料的接头 C/C 一侧和蜂窝一侧拉脱断面宏观形貌。通过对比图 6 (a)和(b)可知,在 C/C 复合材料一侧的断面黑色区域均呈现出规则的蜂窝芯格形状,黑色区域内能够观察到明显横向和纵向分布的碳纤维束,黑色区域包裹的区域是 BNi-2 钎料铺展至 C/C 复合材料表面后凝固留下的金属层。观察图 6 (a)和(b)中金属区域后,金属区域均存在裂纹,表明钎料铺展至 C/C 复合材料表面凝固后,与 C/C 母材发生反应,但是金属层与 C/C 基体热膨胀系数差异过大,金属层发生龟裂。此外,图 6 (a)中断面除了观察到母材断裂特征,还可观察到断裂后留在表面的蜂窝壁,表明钎料厚度为 0.12 mm 的板-芯接头断裂除了发生在 C/C 母材内,部分蜂窝一同发生断裂,因而板-芯连接强度最高。结合图 2 中接头微观组织形貌可知,硬脆的 Si 的金属间化合物在钎料添加厚度为 0.12 mm 时同时分布在钎角区域与蜂窝壁和面板间,此处裂纹延伸至蜂窝壁时沿着 Si 的金属间化合物处扩展,亦表明此时接头内应力状态较为平衡。

通过对比蜂窝一侧断面图 6 (c)和(d)可知,随着钎料厚度的增加,蜂窝壁上粘连的 C/C 基体宽度随之增大,与图 2 中观察到的板-芯界面钎角和面板连接宽度一致。另外,图 6 (c)中亦可观察到蜂窝拉断的痕迹,与图 6 (a)中面板处蜂窝断裂残留特征匹配;此外,图 6 (d)中可以观察到孔洞间粘连的基体间均存在贯穿性裂纹,进一步表明钎料用量过多时,钎角处应力过大。

图 7 为添加 0.12 mm 和 0.20 mm 钎料层钎焊试样拉断后 C/C 一侧断面微观形貌和蜂窝一侧断面。通过

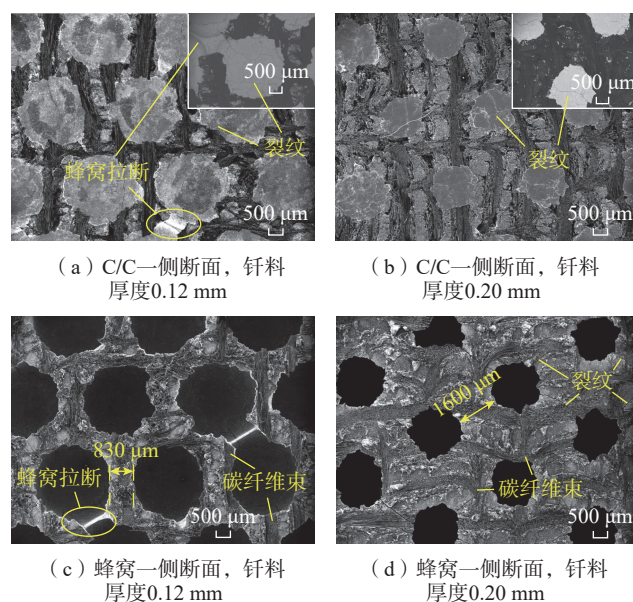


图 6 钎焊接头断面宏观形貌

Fig.6 Morphology of fracture surface braze

对比图7(a)和(b)可知,背散射图像下C/C基体完全裸露,只有少部分的白亮色金属镶嵌其中,表明不同钎料层厚度的接头断裂位置均主要发生在C/C母材。将过渡界面放大(图7(c))可看出,C/C母材表面遗留大量碳纤维断裂留下的纤维孔,在蜂窝一侧断面(图7(d))可观察到突出的碳纤维,二者特征相匹配。在背散射信号、C/C母材断裂区和金属断裂区之间分布的主要是暗灰色相,结合钎焊接头微观组织可知,该部分主要成分为Cr₃C₂。由断面的EDS结果可知(表3),与C/C复合材料直接接触的是Cr₃C₂层,越靠近金属断裂区,Cr的含量就越低,而Si的含量呈现出先升高后降低的趋势。由此可知钎焊接头在断裂时,由于纤维束之间碳纤维的结合力较差,裂纹由此萌生并扩展,当裂纹扩展至纤维束边界时候,反应层Cr₃C₂层被拉断,裂纹在Cr₃C₂层继续扩展至富含Si的金属间化合物层,由于金属间化合物为

硬脆相,裂纹迅速扩展至接近板-芯界面的钎料区,产生脆性断裂。

3 结论

(1) 采用BNi-2钎料钎焊C/C复合材料面板与GH3536蜂窝,当在钎焊温度为1040℃,保温时间为15min条件下,随着钎料厚度的增加,板-芯拉脱强度先升高后降低,当钎料厚度为0.12mm时,拉脱强度最高可达9.69MPa。

(2) 板-芯界面区由C/C复合材料与钎料反应区、钎料凝固区和钎料与蜂窝反应区3个区域组成。在钎料与C/C复合材料反应生成了Cr₃C₂反应层,钎料与蜂窝反应区内生成了Si的金属间化合物。

(3) 接头裂纹扩展路径为裂纹从C/C基体纤维束开始萌生,纤维拉断拓展至Cr₃C₂反应层内,继而扩展至金属间化合物处发生脆性断裂。

参考文献

[1] 王俊山,徐林,李炜,等. 航天领域C/C复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(2): 1-12.

WANG Junshan, XU Lin, LI Wei, et al. Research progress on C/C composites for aerospace applications[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(2): 1-12.

[2] CHEN S, QIU X C, ZHANG B W, et al. Advances in antioxidation coating materials for carbon/carbon composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 886: 161143.

[3] 程皓,薛宁娟,侯卫权,等. C/C复合材料在制动系统的应用及发展[J]. 炭素, 2020(3): 30-33, 29.

CHENG Hao, XUE Ningjuan, HOU Weiquan, et al. The application and development of carbon/carbon composites in aircraft and high-speed train braking systems[J]. Carbon, 2020(3): 30-33, 29.

[4] SHI Y A, ZHA B L, SUN Z S, et al. Air plasma ablation/erosion test for 4D C/C composites used in the throat of solid rocket motor[J]. Ceramics International, 2022, 48(11): 15582-15593.

[5] SHEEHAN J E, BUESKING K W, SULLIVAN B J. Carbon-carbon composites[J]. Annual Review of Materials Science, 1994, 24: 19-44.

[6] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 227: 109393.

[7] JI R T, WANG Z L, DING C, et al. Three-dimensional numerical study of the directional heat transfer in an L-shaped carbon/carbon composite thermal protection system[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 168: 107018.

[8] 刘宇峰,张中伟,许正辉,等. 空间高稳定碳/碳蜂窝夹层结构制备及性能[J]. 宇航学报, 2020, 41(8): 1067-1075.

LIU Yufeng, ZHANG Zhongwei, XU Zhenghui, et al. Preparation and properties of carbon/carbon honeycomb sandwich panels for space ultra-stable structures[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(8): 1067-1075.

[9] WANG M C, MIAO R, HE J K, et al. Silicon carbide whiskers reinforced polymer-based adhesive for joining C/C composites[J]. Materials & Design, 2016, 99: 293-302.

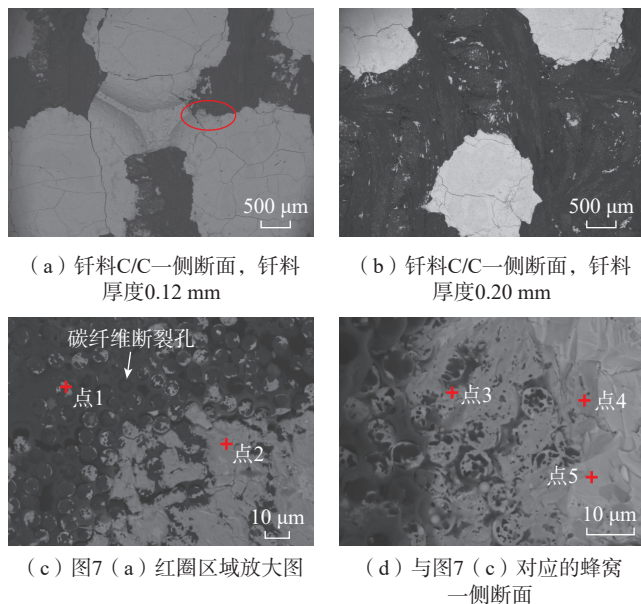


图7 接头断面微观组织形貌
Fig.7 Microstructure of fracture surface braze

表3 图7中对应点元素分析(原子数分数)
Table 3 EDS analysis results of corresponded spots in Fig.7 (atomic fraction) %

位置	C	Si	Cr	Fe	Ni	Mo	W	可能相
点1	68.90	0.09	28.84	0.43	0.96	0.72	0.05	Cr ₃ C ₂
点2	61.48	0.22	35.45	0.52	1.22	1.09	0.02	Cr ₃ C ₂
点3	69.66	4.39	11.46	0.33	13.71	0.44	—	Cr ₃ C ₂ +Ni ₃ Si
点4	60.12	10.24	0.82	0.66	28.14	0.02	—	富Si化合物
点5	64.33	4.73	1.98	1.76	27.14	0.06	—	Ni基固溶体

(下转第97页)

- [20] MA X P, WANG L J, LIU C M, et al. Role of Nb in low interstitial 13Cr super martensitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(22–23): 6812–6818.
- [21] NATH S D, CLINNING E, GUPTA G, et al. Effects of Nb and Mo on the microstructure and properties of 420 stainless steel processed by laser-powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 682–691.
- [22] LI B C, ZHU H M, QIU C J, et al. Development of high strength and ductile martensitic stainless steel coatings with Nb addition fabricated by laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154985.
- [23] LI X F, FENG Y H, LIU B, et al. Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788: 485–494.
- [24] 吴绮雯, 马明星, 朱天辉, 等. 铌、铬对激光熔覆原位合成颗粒增强铁基复合涂层的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 107–112.
- WU Qiwen, MA Mingxing, ZHU Tianhui, et al. Influences of Nb and Cr on in situ particle reinforced Fe-matrix composite coating by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 107–112.
- [25] XIAO Y, LIU Z D. Characteristics study on in-situ NbC particles reinforced Ni-based alloy composite coating by laser cladding[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1635(1): 012076.
- [26] WANG Q Y, XI Y C, ZHAO Y H, et al. Effects of laser remelting and annealing on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Fe-based amorphous/crystalline composite coating[J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 239–247.
- [27] TIAN W P, YANG H W, ZHANG S D. Synergistic effect of Mo, W, Mn and Cr on the passivation behavior of a Fe-based amorphous alloy coating[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 31(3): 308–320.
- [28] CAO Y B, ZHI S X, QI H B, et al. Evolution behavior of ex-situ NbC and properties of Fe-based laser clad coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105999.
- [29] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- YE Dalun, HU Jianhua. *Handbook of practical inorganic thermodynamic data*[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [30] YANG L, YU T B, LI M, et al. Microstructure and wear resistance of in-situ synthesized Ti(C, N) ceramic reinforced Fe-based coating by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(18): 22538–22548.
- [31] CAO Y B, ZHI S X, GAO Q, et al. Formation behavior of in situ NbC in Fe-based laser cladding coatings[J]. *Materials Characterization*, 2016, 119: 159–165.
- [32] GUO Y J, LI C G, ZENG M, et al. In-situ TiC reinforced CoCrCuFeNiSi_{0.2} high-entropy alloy coatings designed for enhanced wear performance by laser cladding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 242: 122522.
- [33] YANG J A, HUANG J H, FAN D Y, et al. Microstructure and wear properties of Fe–6wt% Cr–0.55wt% C–X wt% Nb laser cladding coating and the mechanism analysis[J]. *Materials & Design*, 2015, 225: 108–123.
- (上接第 90 页)
- [10] TANG Y L, ZHOU Z G, PAN S D, et al. Mechanical property and failure mechanism of 3D carbon–carbon braided composites bolted joints under unidirectional tensile loading[J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 243–253.
- [11] NISHIDA T, SUEYOSHI H. Effects of carbon fiber orientation and graphitization on solid state bonding of C/C composite to nickel[J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(1): 148–154.
- [12] JIN C K, WANG Y, YANG Z W, et al. C/C composite surface modified by electrophoretic depositing SiC nanowires and its brazing to Nb[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(1): 204–211.
- [13] 冯贞伟, 高腾飞, 邵天威, 等. C/C 复合材料与镍基高温合金 GH3128 钎焊 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(12): 105–108, 118.
- FENG Zhenwei, GAO Tengfei, SHAO Tianwei, et al. Brazing of C/C composites with Ni-based superalloy GH3128[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(12): 105–108, 118.
- [14] GUO X J, SI X Q, LI C, et al. Brazing C/C composites to DD3 alloy with a novel Ag–Cr active braze[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(11): 15090–15097.
- [15] WANG Y L, WANG W L, HUANG J H, et al. Reactive composite brazing of C/C composite and GH3044 with Ag–Ti mixed powder filler material[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759: 303–312.
- [16] SHI X H, JIN X X, LIN H J, et al. Joining of SiC nanowires-toughened SiC coated C/C composites and nickel based superalloy (GH3044) using Ni₇₁CrSi interlayer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 693: 837–842.
- [17] LIU D, SONG Y Y, SHI B, et al. Vacuum brazing of GH99 superalloy using graphene reinforced BNi-2 composite filler[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1843–1850.
- [18] 田晓羽, 亓钧雷, 张丽霞, 等. BNi²⁺TiH₂ 复合钎料钎焊 C/C 复合材料与GH99 镍基高温合金 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(5): 35–38, 114.
- TIAN Xiaoyu, QI Junlei, ZHANG Lixia, et al. Brazing C/C composites and GH99 nickel-based superalloy with BNi²⁺TiH₂ composite filler metal[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(5): 35–38, 114.
- [19] QING H W, WU Z Y, LI H Z, et al. Preparation of chromium carbide coatings on graphite via powder immersion reaction assisted coating[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(23): 33725–33730.
- [20] 朱嵘. C/C 复合材料钎焊接头界面及连接性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- ZHU Rong. *Research on interface and connection performance of C/C composite brazed joint*[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [21] WANG S Y, XU Y X, ZHANG X G, et al. Design and fabrication of aluminum honeycomb sandwich structures by atmosphere protect brazing: Microstructural evolution and mechanical behavior[J]. *Materialia*, 2022, 22: 101423.
- [22] HE Y M, ZHU X S, CHEN W J, et al. An ultra-high bond strength of the C_f/C composite-TC4 alloy joint brazed using pure Ni and revealing of synergetic action of multiple stress-relief mechanisms[J]. *Materials Letters*, 2022, 308: 131245.

通讯作者: 李晓峰, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为激光加工过程中材料的组织及性能演化。

(责编 晓月)

通讯作者: 续润洲, 工程师, 硕士, 主要从事金属蜂窝壁板钎焊技术研究和产品研发。

(责编 七七)