

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.03

纯 Ag 钎焊镀钨 SiC 陶瓷的接头组织与强度

姚向雷^{1,2}, 全孝洋^{1,3}, 李荣程^{1,3}, 赵金花^{2*}, 黄 庆^{1*}

1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

2. 山东建筑大学 理学院, 山东 济南 250101

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 在多种 SiC 陶瓷的连接方法中, 钎焊因其工艺简单和较高的灵活性已经得到了广泛的研究。然而, 传统的活性钎焊方法在核能领域的应用中存在局限性。为此, 利用磁控溅射在无压烧结 SiC 陶瓷表面镀上 500 nm 厚的镀钨膜, 并使用纯度为 99.99 wt.% 的纯银作为钎料, 探索低活性钎焊方法。试验在 1 000 °C 的高真空环境下实现了 SiC 陶瓷的钎焊。在不添加活性元素的前提下, 钨镀层的存在极大地改善了银对 SiC 表面的润湿性。为了研究钎缝的结构, 采用机械抛光和离子溅射两种方法处理样品表面, 结果表明离子溅射法可有效避免机械抛光引入的划痕和杂质。显微观察和元素分析表明, 该方法形成了结合紧密的钎缝, 钎缝保持了界面层-钎料层-界面层的结构, 各层间的界限清晰。钎料层保持为纯银相, 界面层为钨镀层。X 射线衍射谱表明, W 与 SiC 基体发生了反应, 形成了 WC、W₂C、W₅Si₃ 相。这些相分布在钨镀层内, 未见基体内有明显的反应产物。接头连接强度为 27±7 MPa。钎缝断面普遍可见银钎料撕裂的形貌以及少量 SiC 基体局域破坏的形貌。以上结果表明采用钨镀层和银钎料的方案可以实现 SiC 的低活性连接。

关键词: 碳化硅; 钎焊; 镀钨层; 界面层; 微观组织; 剪切强度

中图分类号: TG425 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0016-07

Microstructure and Shear Strength of SiC Joint Fabricated by W Coating and Pure Ag Brazing

YAO Xianglei^{1,2}, QUAN Xiaoyang^{1,3}, LI Rongcheng^{1,3}, ZHAO Jinhua^{2*}, HUANG Qing^{1*}

1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

2. Shandong Jianzhu University Faculty of Science, Ji'nan 250101, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In the various methods of connecting SiC ceramics, brazing has been widely studied due to its simple process and high flexibility. However, traditional active brazing methods have limitations in their application in the nuclear energy field. For this reason, this study used magnetron sputtering to plate a 500 nm thick tungsten film on the surface of pressureless sintered SiC ceramics, and explored low-activity brazing methods using pure silver with a purity of 99.99 wt.% as the brazing filler metal. The brazing of SiC ceramics was realized in a high vacuum environment at 1 000 °C. Without adding active elements, the presence of the tungsten plating greatly improved the wettability of silver on the SiC surface. To study the structure of the brazing seam, both mechanical polishing and ion sputtering methods were used to treat the sample surface. The results showed that the ion sputtering method can effectively avoid scratches and impurities introduced by mechanical polishing. Microscopic observation and elemental analysis indicated that this method formed a tightly bonded brazing seam, which maintained an interface layer-brazing filler layer-interface layer structure, with clear boundaries between each layer. The filler layer remained as a pure silver phase, and the interface layer was the tungsten plating. X-ray diffraction spectra showed

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2025-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(12275348); 山东建筑大学国内访问学者经费资助

作者简介: 姚向雷(2000—), 男, 硕士, 主要从事 SiC 陶瓷的钎焊研究。

通讯作者: 赵金花(1985—), 女, 博士, 副教授, 主要从事材料表面改性方面的研究. E-mail: zhaojinhua@sdjzu.edu.cn.

黄 庆(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事熔盐堆结构材料服役性能评价研究. Email: huangqing2012@sinap.ac.cn.

that tungsten reacted with the SiC substrate to form WC, W_2C , and W_5Si_3 phases. These phases were distributed within the tungsten plating, and no obvious reaction products were seen in the substrate. The connection strength of the joint was 27 ± 7 MPa. The cross-section of the brazing seam generally showed the appearance of torn silver brazing filler and a small amount of local damage to the SiC substrate. The above results indicate that the scheme using tungsten plating and silver brazing filler can achieve low-activity connection of SiC.

Keywords: silicon carbide; brazing; tungsten coating; interfacial layer; microstructure; shear strength

引用格式:姚向雷,全孝洋,李荣程,等. 纯Ag钎焊镀钨SiC陶瓷的接头组织与强度[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 16–22.

Citation: YAO Xianglei, QUAN Xiaoyang, LI Rongcheng, et al. Microstructure and Shear Strength of SiC Joint Fabricated by W Coating and Pure Ag Brazing[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 16–22.

0 引言

碳化硅(SiC)陶瓷具有高热导率、高强度、优异的热稳定性、低中子吸收截面、良好的耐腐蚀和耐中子辐照的性能,在核能领域具有很大的应用潜力^[1–2]。然而, SiC陶瓷的高硬度和较差的机械加工性限制了其在大尺寸复杂结构的应用。因此,开发有效的连接技术对于SiC陶瓷的广泛应用尤为重要。目前,已有文献报道多种方法实现SiC的自连接以及与其他金属材料的连接,主要包括固相扩散法^[3]、金属钎焊法^[4–5]、玻璃陶瓷连接^[6–7]、陶瓷先驱体连接^[8]、MAX相连接^[9]等。其中,金属钎焊法操作简单、无需施压、适用于大批量生产,被认为是目前非常有应用前景的一种手段。在一些面向核能应用的SiC连接方法研究中,钎焊也占据了重要的位置^[10–11]。目前针对不同钎料的开发以及钎料和SiC基体的反应机制已有许多研究报道。尽管银–铜基钎料是SiC材料钎焊连接最常用的钎料之一,但由于银和铜不能浸润SiC表面,因而不能直接用于SiC的钎焊。常用的解决办法是添加活性金属,如添加钛形成的Ag–Cu–Ti钎料已经成功用于SiC的连接^[4, 12–13]。银和铜具有优异的延展性,可以有效缓解钎缝的残余应力。钛的加入使得钎料润湿SiC的表面,并与界面形成反应产物TiC、 Ti_3Si_3 等产物^[12–13]。此外,人们还开发了适用于高温环境的高温镍基^[14]和钴基钎料^[5]等。

虽然镍基、钴基合金钎料与SiC具有良好润湿性,但是SiC易与合金元素Ni、Co等发生强烈的界面化学反应。过度的界面反应会损伤SiC基材,进而可能影响接头的强度。因此,人们也在不断探索

适用于SiC的无反应钎焊或者近似无反应钎焊的方法。研究发现,在钎料中添加较高比例的Si可以抑制该钎料中的活性元素与SiC基体的反应,该方法已经在含Ti^[15]、Cr^[16]、Ni^[17–18]的钎料中得到验证。然而大量的游离硅不耐腐蚀,可能影响其在核能高温环境中应用。有研究采用纯银连接SiC和镍基合金^[19]。由于纯银无法浸润SiC表面,该方法在低于银熔点的温度下(900 °C),通过施加压力(16 MPa)实现SiC与镍基合金的有效连接。

鉴于银的化学性质稳定且延展性好,本研究采用纯银作为连接SiC的钎料。为了改善纯银对于SiC表面的浸润性,在SiC表面预制了一层金属钨层,利用银在金属钨表面的润湿性,成功实现了SiC材料的连接,进一步对钎缝进行了表征分析。

1 试验材料及方法

试验采用无压烧结SiC陶瓷材料,样品尺寸为12 mm×12 mm×6 mm和16 mm×12 mm×6 mm两种。两种尺寸样品的待焊接表面依次用120#、400#、800#、1200#的金刚石砂纸打磨平整,然后用丙酮、酒精、去离子水依次进行超声清洗干净。采用磁控溅射技术在SiC陶瓷待连接表面镀上厚度约500 nm的纯钨膜(纯度99.95 wt.%)。

钎料为纯度99.99 wt.%、厚度0.1 mm的纯银片,银片尺寸为10 mm×12 mm,将银片双面打磨后用酒精超声清洗干净,按照SiC(W膜)–Ag–(W膜)SiC的顺序装配成三明治的结构,并确保SiC表面的钨膜与纯银箔接触。为防止银和钨在高温下被氧化,钎焊过程在真空环境中进行。本研究采用密封

的石英管来实现高真空环境。为了使两个样品与银箔在后续的钎焊过程中保持相对位置,采用石墨夹具轻轻固定 SiC(W膜)-Ag-(W膜)SiC 装配体,并抽取石英管内的真空度至 $<1 \times 10^{-3}$ Pa,之后使用氢气焰进行熔封。随后,将装有样品的真空石英管置于高温炉中,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 $1\,000^\circ\text{C}$,并在该温度下保温 20 min ,然后随炉冷却至室温,从而完成碳化硅陶瓷的连接。

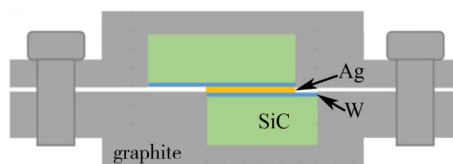


图1 钎焊试验样品装配示意

Fig. 1 Sketch of the assembling for brazing

为评估钨层对改善银的浸润性的效果,按照上述方法将纯银与原始 SiC 或者镀钨膜的 SiC 封在真空石英管中,在高温炉中升至 $1\,000^\circ\text{C}$ 保温 20 min (保持银在原始 SiC 或者 SiC 钨镀层表面上),然后随炉冷却至室温。进而对比研究了银在原始 SiC 表面和镀钨膜的 SiC 表面的接触角。钎焊后,样品端面先用金刚石砂纸研磨,然后依次采用 $9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 的二氧化硅悬浊液进行机械抛光。使用 LEO 1530vp 扫描电子显微镜观察钎缝的显微组织,并利用能谱仪(EDS)进行元素分析。为了防止机械抛光引入的表面损伤和杂质,又对焊接样品的截面采用了另一种处理方法:首先从焊接样品中切出 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的小样品(含钎缝),然后利用 5 keV 的氩离子束(掠入射角为 8°)溅射样品表面,以清洁并抛光表面,所使用的仪器为 Gatan Model 691 离子减薄仪。

为了研究高温环境中钎缝中及界面上发生的反应,使用 Bruker D8 衍射仪分别测量了 SiC 样品、镀钨膜 SiC 样品、高温 $1\,000^\circ\text{C}$ 处理之后的镀钨膜 SiC 样品的掠入射 X 射线衍射谱(X 射线入射角度为 1°),进而对物相进行了分析。此外,自行设计了夹具,在万能试验机上进行钎焊接头的剪切强度测试。万能力学试验机的加载速度为 $0.03\text{ mm}/\text{min}$ 。接头的剪切强度按照式(1)计算:

$$\tau = F/s$$

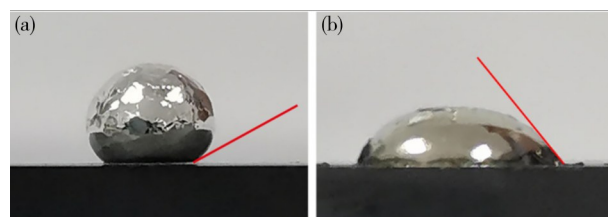
式中 τ 为抗剪强度(单位:MPa); F 为接头断裂时

的最大压力(单位:N); s 为接头的有效搭接面积(单位: mm^2)。

2 结果和讨论

2.1 银的润湿性

为了对比银对原始 SiC 表面和 SiC 表面钨镀膜的润湿性,对银在样品表面形成的液滴(冷却后)拍摄了照片,如图 2 所示。根据图片中银液滴的形状测量了银的接触角。纯 Ag 在原始 SiC 表面的接触角约为 150° (见图 2a),表明银不浸润 SiC 的表面^[20],银颗粒与 SiC 表面粘接不牢,容易脱落。相比之下,纯 Ag 在 SiC 表面钨镀膜上的接触角约为 56° (见图 2b),表明 Ag 能够润湿 SiC 陶瓷上的钨膜。银颗粒与 SiC 表面镀钨膜的粘接牢固,不脱落。因而选择镀钨膜有助于实现 SiC 陶瓷材料的钎焊。



(a) 原始 SiC 陶瓷上的银液滴(冷却后) (b) SiC 陶瓷表面钨镀层上的银液滴(冷却后)

图2 银的润湿性对比

Fig. 2 Comparison of silver wettability

2.2 钎缝的显微结构

机械抛光后的镀钨 SiC 陶瓷样品钎焊钎缝的 SEM 形貌如图 3 所示(A、B、C、D 为利用 EDS 进行元素测量的位置)。在图 3a 中,两侧深灰色代表 SiC 基体,中间浅色为钎缝。由图可见,钎缝宽度均匀,钎缝内钎料无缺失、断裂情况,也未见明显的裂纹、气孔等缺陷。随机取三个区域放大,以观察钎缝的结构,如图 3b~3d 所示。图中可见钎料与基体结合紧密,测得钎缝宽度约为 $22\text{ }\mu\text{m}$ 。此外可见,无压烧结 SiC 基体存在一定的孔隙。

取钎缝与 SiC 基体的界面区域进一步放大,如图 3e~3g 所示,明显可见钎料层、界面层和 SiC 基体三个区域,三个区域界限清晰。原始 SiC 基体有意选择不抛光,所以表面存在起伏。可见界面层和钎料层均能有效填充基体凹陷处,形成紧密的结合。

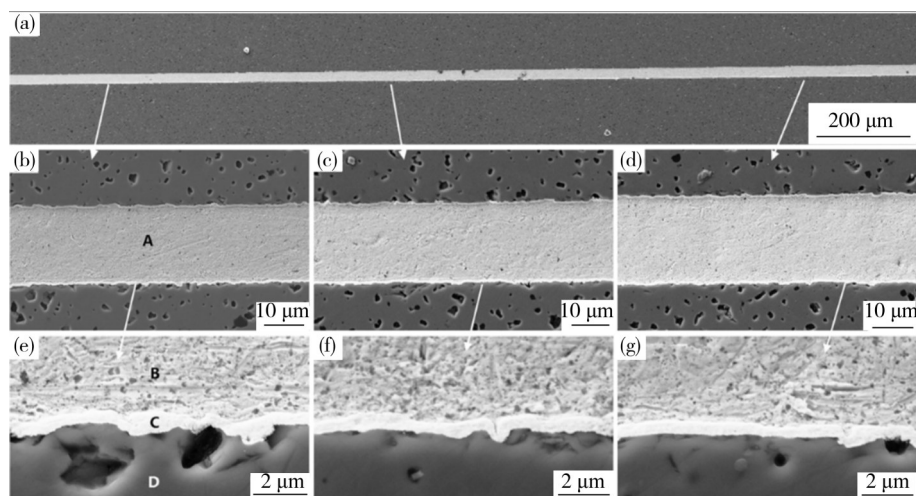


图3 机械抛光后镀钨SiC钎缝的SEM图片

Fig. 3 SEM images of the SiC joint after mechanical polishing

界面层厚度约500 nm,可以推测为钨镀层。钎料层内可见机械抛光留下的划痕,且有亚微米尺度的深灰色颗粒。由于所用抛光介质(氧化硅颗粒)和研磨下来的SiC颗粒均比银硬得多,可以推测,这些深灰色颗粒可能是机械抛光过程引入的杂质。但是仅从图中也难以排除这些颗粒是钎焊过程形成的新相的可能性。

为了避免机械抛光引入的杂质和损伤,取另一个钎焊样品,采用氩离子束掠入射样品表面,利用物理溅射的方法清洁并抛光表面。氩离子溅射后

镀钨SiC样品的形貌照片如图4所示(A'、B'、C'、D'为利用EDS进行元素测量的位置)。与图3所示一致的是,该样品也形成了厚度和结构均匀的钎缝,无明显裂纹和孔隙缺陷。图4e~4g显示钎料层和界面层均能有效填充SiC表面的凹坑,形成紧密的结合。与图3所示不同的是,钎料层内深灰色斑点消失,证实图3所示钎料层中的斑点是机械抛光引入的杂质。由图4可见,钎料层形成了均匀的相。该样品钎料层厚度为35 μm,比图3所示样品的钎料层更厚。

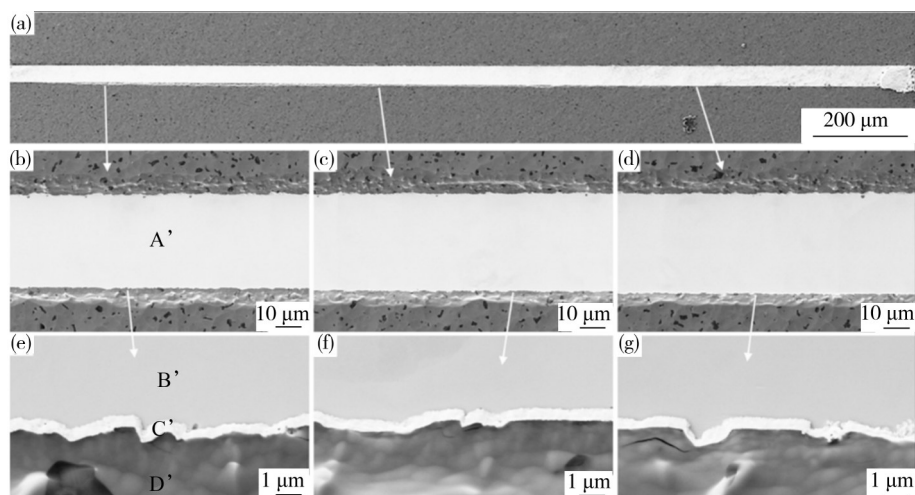


图4 离子溅射后镀钨SiC钎焊样品钎缝的SEM图片

Fig. 4 SEM images of the SiC joint after ion milling

2.3 化学成分分析

为了确定钎缝中的相,分别从机械抛光和离子溅射的两个样品中选择了代表点,并使用EDS分析

其化学成分。图3和图4中的A和A'代表钎料层中部,B和B'代表钎料层接近界面处,C和C'代表界面层,D和D'代表基体。每个点都选择了三个代表性

位置进行分析,然后对获取的元素含量取平均,结果列于表1中。

表1 银钎焊镀钨SiC钎缝各位置的元素分布(原子分数,%)

Table 1 The chemical content (at. %) of the various positions in the joint of W-coated SiC

区域	Ag	W	C	Si	O
A	87.75	—	—	0.99	11.26
B	82.68	—	—	1.51	15.81
C	2.19	53.21	40.26	4.34	—
D	—	—	52.87	47.13	—
A'	99.01	—	—	0.99	—
B'	97.25	—	—	2.75	—
C'	2.28	50.13	40.69	6.9	—
D'	—	—	53.64	46.36	—
E	100	0	0	0	0

A和A'区域主要为银元素,且都有原子含量0.99 at.%的Si元素。不同的是A位置(机械抛光)含有11 at.%的氧,但A'位置(离子溅射)没有测到氧,即氧是由机械抛光引入的杂质。B和B'位置也是钎料层,只不过离界面比较近,所以结果与A和A'位置所得结果基本一致。不同的是B和B'位置的硅含量更高,可达2 at.%左右。根据银-硅合金相图,室温下硅在纯银中的固溶度极低。即使银在高温下溶解了一定量的硅,冷却后也应当发生共晶凝固。图3钎缝中的深灰色颗粒已被证实是机械抛光引入的杂质;图4钎缝呈现均一的相。据此可以推测,钎缝中测到的硅元素并非钎缝内真实的成分,而是制样过程引入到表面的(机械抛光过程中嵌入钎缝的氧化硅颗粒或者离子溅射的SiC基体在钎缝上的再沉积)。

C和C'为界面层,主要元素为钨和碳,这说明该界面层就是原始的钨镀层,但是经过高温处理之后与SiC基体发生了反应,根据元素判断主要与碳反应形成了碳化钨。该层内测到4 at.%~7 at.%的硅元素,说明硅也与钨反应形成了化合物。该层内还能测到银元素。已知银和钨二者不固溶,C和C'中测到的银应该是由钨层太薄电子束打到钨层外面导致的。最后,D和D'中只含硅和碳两种元素,碳的原子分数略高于硅的原子分数,说明基体为富碳的SiC。值得指出的是,图3所示的SiC基体中的孔隙在图4中显示为某种物质(深灰色衬度区域)。经过元素分析,表明该物质为碳,这恰好说明为什么SiC

基体中富碳。相比于坚硬的SiC,碳很软,在机械抛光中很容易被研磨掉,显示为孔隙。

高温处理之后,钨镀层与SiC基体的界面依然清晰。再结合元素分析结果,可以判断化学反应主要在界面处发生,进而硅和碳扩散到整个钨镀层。

为了进一步确定钨与SiC的反应产物,利用掠入射XRD测量了原始SiC、镀钨SiC以及高温处理(1 000 °C)后的镀钨SiC样品的X射线衍射谱,如图5所示。由于钨镀层很薄,镀钨SiC样品的XRD谱(红色谱线)中依然能测到SiC的峰。经过高温处理之后,XRD谱(蓝色谱线)中出现了很强的WC、W₂C的峰,也能观察到W₅Si₃的峰,这与上述元素分析的结果是一致的。尽管有以上反应产物的峰,W金属的峰依然很强,表明W并没有完全与SiC发生反应。根据元素分析和XRD物相分析,可以判断钨主要与碳反应形成了碳化钨,与硅的反应相对微弱一些,这与文献报道的结果是一致的^[21]。

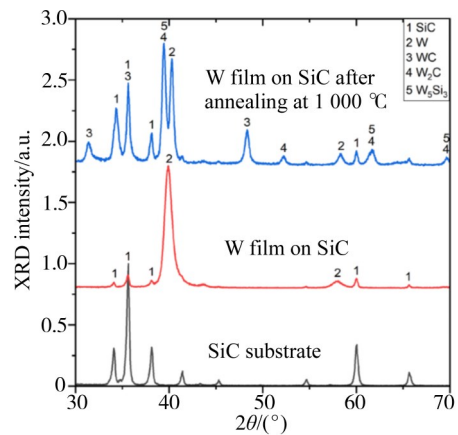


图5 原始SiC、镀W膜SiC、高温处理后的镀W膜SiC的掠入射XRD图谱

Fig. 5 The glancing-incident XRD spectra of original SiC, tungsten-coated SiC and tungsten-coated SiC after annealing.

2.4 剪切强度

在万能试验机上对钎焊接头的剪切强度进行了测试。初始样品的钎焊面积为12 mm×10 mm,经过测试发现SiC基体总是早于钎缝断裂。为更准确地测量钎缝的剪切强度,将钎焊面积缩小至12 mm×4 mm。典型的剪切强度测试曲线如图6所示,其中包含了夹具的示意图。在约600 N时,曲线出现一个下降的小峰,这是由于SiC陶瓷边角被提前压裂所致。经过三次测试并取平均值,得到钎焊接头的

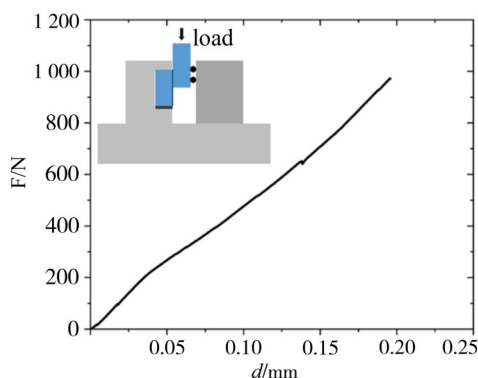


图6 典型剪切强度测试曲线

Fig. 6 Typical force-displacement curve of the shearing test

剪切强度为 27.3 ± 7.2 MPa。

2.5 断口形貌

断口形貌如图7所示。通过EDS元素分析,发现图7a中I为银钎料,II为SiC基体,III为残余的钨镀层。从图中还可以看到银钎料层被撕裂的断面(即图中字母E所示的具有平行细纹的区域)。为了进一步确认钎缝中的成分,在撕裂的断面处取多点进行了元素分析,结果均显示为100%的银,如表1所示。进一步证实钎缝为纯银相,上述钎缝中测到的硅为制样引入的杂质。此外,从图7b可见,剪切测试甚至破坏了局部的SiC陶瓷基体,表明了钎焊的紧密程度。

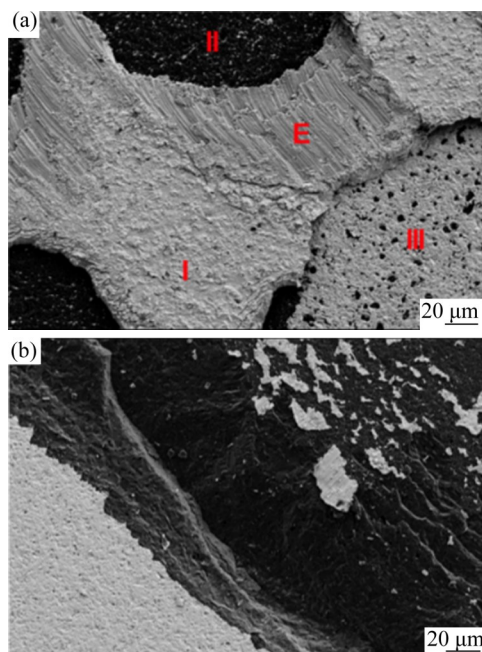


图7 钎焊接头剪切断面形貌

Fig. 7 SEM images of two typical areas of the fracture surface

3 结论

在无压烧结SiC陶瓷表面溅射一层钨金属膜,然后以纯银为钎料在1000℃的高真空下进行了SiC陶瓷的钎焊研究。主要结论如下:

(1)通过在SiC陶瓷表面制备500 nm厚的钨镀层,显著改善了纯银对SiC表面的润湿性,从而实现了在1000℃高真空环境下的钎焊连接。

(2)钎缝微观结构分析表明,形成的钎缝保持了清晰的界面层-钎料层-界面层结构。界面层为钨镀层,钎料层为纯银,显示出良好的结合性能。

(3)通过EDS元素分析和XRD测试表明,钎料层为纯银,界面层为钨镀层。在1000℃下,钨与SiC基体发生了反应,反应产物为WC、 W_2C 、 W_3Si_3 。经测试,钎焊接头剪切强度为 27.3 ± 7.2 MPa,钎缝断面中普遍可见银钎料撕裂的形貌,并可见SiC基体局部破裂的区域。结果表明,采用钨镀层和银钎料,可以实现碳化硅陶瓷的低活性钎焊连接。

参考文献:

- [1] Katoh K, Snead L L. Silicon carbide and its composites for nuclear applications – Historical overview [J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 526: 151849.
- [2] 秦刚, 邹顺睿, 蒋龙飞, 等. 碳化硅纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料研究进展综述 [J]. 陶瓷学报, 2023, 44 (3): 389–407.
QIN G, ZOU S, JIANG L, et al. Research Progress of Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Carbide Ceramic Matrix Composites [J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(3): 389–407.
- [3] Jung Y, Kim S H, Kim H G, et al. Microstructures of diffusion bonded SiC ceramics using Ti and Mo interlayers [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 441: 510–513.
- [4] Zhou L, Li C, Si X, et al. Flash brazing of SiC using Ag–Cu–Ti alloy at ultra-low temperature in air via electric field assistance [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43: 7708–7713.
- [5] 李文文, 熊华平, 吴欣, 等. Co–Nb–Pd–Ni–V 钎料真空钎焊 Cf/SiC 复合材料的接头组织与性能 [J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 128–132.
LI W, XIONG P, WU X, et al. Microstructure and strength of the Cf/SiC composite joint brazed with Co–

- Nb-Pd-Ni-V filler alloy[J]. Transactions of the china welding institution, 2019, 40(9): 128-132.
- [6] Ferraris M, Salvo M, Casalegno V, et al. Joining of machined SiC/SiC composites for thermonuclear fusion reactors [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 375: 410-415.
- [7] 王亚峰, 魏连峰, 杨富荃, 等. SiC-Al₂O₃-Y₂O₃ 中间层放电等离子扩散连接 SiC 陶瓷的接头组织与强度[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 1-6.
- WANG Y, WEI L, YANG F, et al. Microstructure and Strength of SiC Ceramic Joints Diffusion Bonded by Spark Plasma Sintering with the SiC-Al₂O₃-Y₂O₃ Interlayer[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(12): 1-6.
- [8] 陈楚童, 罗永明, 徐彩虹. 硅基陶瓷前驱体用于耐高温连接材料研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(11): 79-87.
- CHEN C, LUO Y, XU C. Research Progress of Silicon-based Ceram Precursors for High-temperature Connection Materials. Materials Reports, 2023, 37(11): 79-87.
- [9] Henager C H, Kurtz R J. Low-activation joining of SiC/SiC composites for fusion applications [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417: 375-378.
- [10] Katoh Y, Snead L L, Cheng T, et al. Radiation-tolerant joining technologies for silicon carbide ceramics and composites [J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 448: 497-511.
- [11] 徐晓卫, 李宁, 刘自豪, 等. 碳化硅陶瓷连接技术研究现状[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 10-19.
- XU X, LI N, LIU Z, et al. Research Status of Joining Technology for SiC Ceramic [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(8): 10-19.
- [12] 刘岩, 黄政仁, 刘学建, 等. 活性钎焊法连接碳化硅陶瓷的连接强度和微观结构[J]. 无机材料学报, 2009, 24(2): 297-300.
- LIU Y, HUANG R, LIU X, et al. Joining Strength and Microstructure of Sintered SiC/SiC Joints Prepared by Active Brazing Process [J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24(2): 297-300.
- [13] 张超, 侯桂贤, 钟志宏, 等. Ag-Cu-Ti+W 复合钎料钎焊 SiC 陶瓷的接头性能研究[J]. 电焊机, 2021, 51(5): 97-102.
- ZHANG C, HOU G X, ZHONG Z H, et al. Properties of the joint of SiC ceramics brazed by Ag-Cu-Ti+W composite filler [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(5): 97-102.
- [14] Wang Z, Liu Y, Zhang H, et al. Joining of SiC ceramics using the Ni-Mo filler alloy for heat exchanger applications [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41: 7533-7542.
- [15] Riccardi B, Nannetti C A, Petrisor T, et al. Low activation brazing materials and techniques for SiC/SiC composites [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307-311: 1237-1241.
- [16] Riccardi B, Nannetti C A, Petrisor T, et al. Issues of low activation brazing of SiC/SiC composites by using alloys without free silicon [J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329-333: 562-566.
- [17] Liu G W, Valenza F, Muolo M L, et al. SiC/SiC and SiC/Kovar joining by Ni-Si and Mo interlayers [J]. Journal Materials Science, 2010, 45: 4299-4307.
- [18] Shi H, Peng H, Yan J, et al. Investigations of the effect of Si addition on graphite elimination and the oxidation behavior of SiC joint using Inconel 625 powder filler [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42: 1258-1271.
- [19] Hattali M L, Valette S, Ropotal F, et al. Study of SiC - nickel alloy bonding for high temperature applications [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29: 813-819.
- [20] Kalogeropoulou S, Rado C, Eustathopoulos N. Mechanisms of reactive wetting: the wetting to non-wetting case [J]. Scripta Materialia, 1999, 41(7): 723-728.
- [21] Du Y, Hinoki T. Effect of tungsten matrix on the mechanical property of SiC fiber reinforced tungsten composites with foils fabricated at 1700 °C [J]. Nuclear Materials and Energy, 2022, 31: 101142.