

SiC 基陶瓷与 Q235A 钢钎焊连接的接头组织与性能研究

韩春福¹, 高天翔¹, 吴坤²

(1. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719001; 2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 通过向 Ag-26.88Cu-4Ti 粉末中加入不同体积分数的 TiN 粉末, 研究出一种适用于钎焊 SiC(70%SiC+30%Si₃N₄)陶瓷与 Q235A 钢的钎料组分配比及合适的钎焊工艺。通过扫描电子显微镜对焊缝微观界面组织进行观察, 探讨钎料与 SiC 母材的连接机理, 并通过剪切实验, 测试其连接强度。结果表明, 此种钎料具有良好的流动性, 且钎料与 SiC 母材结合紧密, 无明显孔洞现象, 得到良好的连接层, 所得的反应产物主要为 TiC 和 Ti₅Si₃; 当钎料中的 TiN 体积分数不断增加时, 钎料的流动性变差, 当 TiN 体积分数为 5%时, 钎料具有最好的流动性; 当钎焊温度过低时, 钎料流动性差, 造成连接强度低, 当钎焊温度过高时, 生成过厚的 Ti₅Si₃ 脆相; 综合研究发现, 当加入 5%TiN(体积分数)粉末、钎焊温度为 920 °C、保温时间为 10 min 时, 焊接效果最好, 钎焊接头得到最大剪切应力, 为 85.6 MPa。

关键词: 陶瓷; 金属; 钎焊; 复合钎料; 剪切强度

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2024)03-0052-07

Study on structure and properties of the joint between SiC ceramic and Q235A steel through brazed connection

HAN Chunfu¹, GAO Tianxiang¹, WU Kun²

(1. Shanxi Shanmei Coal Caojiatan Mining Co. Ltd., Yulin 719001, Shanxi, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: A brazing material and process suitable for brazing SiC(70%SiC+30%Si₃N₄) ceramics and Q235A steel together were developed by adding different volume fractions of TiN powders into Ag-26.88Cu-4Ti powders. The microstructure of the weld interface was observed by scanning electron microscope, and the connection strength was tested through shear experiments. The connection mechanisms between solder and SiC base metal were explored. The experimental results indicated that this type of brazing material had good flowability and was tightly bonded to the SiC base material without obvious pores, forming a good connection layer. The reaction products were found to be mainly TiC and Ti₅Si₃. The brazing material displayed the best flowability when the volume fraction of TiN reached 5%. Further increase in the volume fraction led to a decrease of the flowability of the brazing material. Too low brazing temperature would compromise the fluidity of the brazing material, resulting in low connection strength, whereas brazing at a high temperature would give rise to an excessive thickness of Ti₅Si₃ brittle phase. Comprehensive research demonstrated that the best welding results could be achieved by adding 5% TiN powder and brazing at 920 °C for 10 minutes, and the maximum shear stress of the brazed joint would be up to 85.6 MPa.

Key words: ceramics; metals; brazing; composite solder; shear strength

SiC 陶瓷具有高硬度、耐高温、耐腐蚀及耐磨 损等优异的物理化学性能^[1], 被广泛应用于航天航

空、电子机械、仪表工业、军事装甲等众多领域^[2], 其中在陶瓷渣浆泵的叶轮制造过程中, 常被用做基材, 然而由于陶瓷材料的本身脆性以及超高的硬度, 造成其难以加工成复杂的大型构件^[3-7]。金属材料具有优异的韧性和延展性, 把陶瓷材料与金属材料进行有效连接, 可以实现两者的性能互补, 具有很好的应用前景。但陶瓷与金属的热物性质参数差异较大, 造成连接强度低甚至直接断裂的情况, 这给陶瓷与金属的连接带来了巨大困难, 目前许多学者都在从事该方面的研究。

陶瓷与金属连接的办法主要有机械连接、扩散焊接、自蔓延高温合成连接、熔化焊接及钎焊连接等^[8-9], 在一些应用领域中, 机械连接经常配合粘结剂一起使用来提高连接强度^[10]。在众多连接方法中, 由于钎焊具有工艺简单、操作方便、焊接界面不会污染等优点, 被学者广泛研究^[11-12]。由于陶瓷及金属材料的多样性, 在对特定陶瓷和金属焊接时需要进行大量试验。已有研究多针对纯 SiC 陶瓷、Si₃N₄ 陶瓷以及氧化物陶瓷与金属的焊接进行。国内外众多学者采用 Ag-Cu-Ti 钎料对陶瓷和金属进行

连接, 研究结果表明, 钎料中的 Ti 元素可以和基体发生反应, 对基体具有很好的润湿性能, 可以形成良好的焊接接头^[13]。

TiN 具有低的热膨胀系数、良好的耐磨和耐腐蚀性能^[14-15], 因此本文向 Ag-26.88Cu-4Ti 粉末中加入不同体积 TiN 粉末, 制备出复合钎料来钎焊一种渣浆泵用复合 SiC 基陶瓷与 Q235A 钢, 研究组分配比、钎焊温度参数的变化对接头组织及力学性能的影响。本研究成功实现 SiC 基陶瓷与钢的钎焊连接, 具有重要的工程应用价值。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用的陶瓷材料为某型号陶瓷渣浆泵所用的 SiC 基体(约 70%SiC+30%Si₃N₄)陶瓷, 陶瓷的宏观形貌如图 1(a)所示, 其 XRD 分析结果如图 1(b)所示。从图中可以看出, 主要成分为 SiC 和 Si₃N₄。金属材料为陶瓷渣浆泵金属轮毂常用的 Q235A 钢, 两者的物理性能参数如表 1 所列。

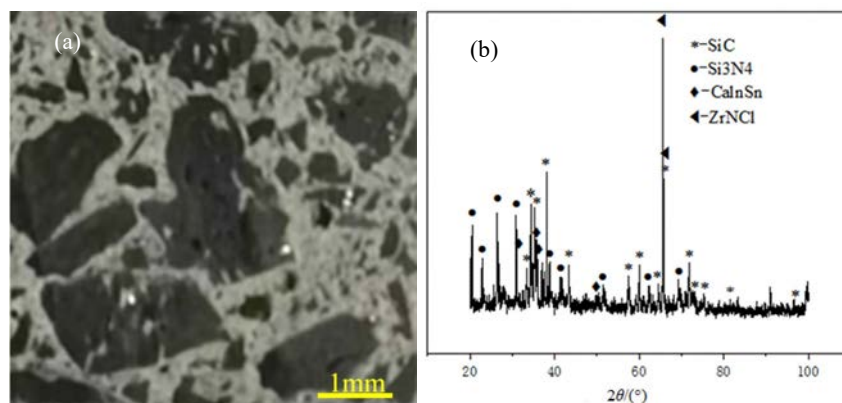


图 1 陶瓷表面形貌(a)及 XRD 图谱(b)

Fig.1 Ceramic surface morphology (a)and XRD pattern(b)

表 1 陶瓷和 Q235A 钢的性能参数

Tab.1 Properties of ceramics and Q235A steel

材料	密度 ρ /(g/cm ³)	热膨胀系数 α /(10 ⁻⁶ /K)	抗弯强度 σ_b /(MPa)	弹性模量 E /(GPa)	热传导率 λ /(W/(m·K))
SiC 陶瓷	3.1	4.7	≥380	≥400	120
Si ₃ N ₄ 陶瓷	3.19	3.6	800~1050	318	2~155
Q235A	37.85	10.6~12.2	215	200	49~53

实验所用的钎料成分为 Ag、Cu、Ti、TiN 粉末, 纯度高于 99%(质量分数)。在对钎料进行制备过程中, 按比例称取各个粉末质量, 倒入球磨罐中, 对其进行机械混合。其中先制备 Ag-26.88Cu-4Ti 粉末,

Ag-Cu 按共晶成分分配比, Ag 的质量分数为 73.12%, Cu 的质量分数为 26.88%, Ti 的质量分数为 4%, 然后向 Ag-26.88Cu-4Ti 粉末中加入不同体积的 TiN 粉末, TiN 体积分数选择 5%、7%、9%, 按比例称取

各个粉末质量,倒入球磨罐中,对其进行机械混合。

1.2 工艺流程及设备

实验前将大块的陶瓷用内圆切片机切割成 5 mm×5 mm×4 mm 的试样块,金属板材切割成 10 mm×10 mm×4 mm 的试样块,陶瓷试样表面用 1000# 的金刚石磨盘逐级打磨,并用金刚石悬浮液进行多次抛光;金属试样表面用 600#、1000# 的 SiC 砂纸逐级打磨。然后将待焊试样放入丙酮溶液或酒精溶液中进行超声清洗 10 min,清洗取出后用吹风机吹干,装入密封袋中保存待用。

向不同 TiN 体积分数的钎料粉末中加入自制粘结剂制成膏状钎料,粘结剂的成分为羟乙基纤维素和松油醇。将膏状钎料涂覆到陶瓷与金属之间,厚度为 0.3 mm,然后用石墨夹具进行装配,研究当 TiN 体积为 5%、7%、9% 对接头组织及性能的影响;研究当钎焊温度为 900、920、940 °C,保温时间为 10 min 时,对接头的组织及力学性能的影响。

实验所用的加热设备为沈阳好智能新材料制备技术有限公司生产的 HVYH-2 真空钎焊炉,额定温度为 1500 °C,额定真空度为 10⁻⁴ Pa。

对焊接好的试样进行打磨、抛光及腐蚀处理后,利用 MAIA3 LMH 场发射扫描电子显微镜(FSEM)对焊接界面进行组织观察分析,并用 Z020 型电子万能试验机对试样进行剪切实验,测试其力学性能。

2 结果及讨论

制备出 Ag-26.88Cu-4Ti+TiN 复合钎料,混合后的粉末形貌如图 2 所示。从图 2 中可以看出,圆形的 TiN 颗粒均匀的分布于复合钎料中。

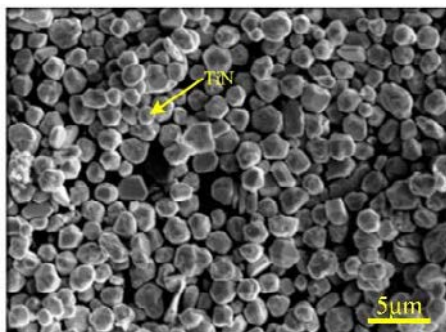


图 2 球磨混粉后的粉末形貌图

Fig.2 Powder morphology after ball milling and mixing

2.1 不同 TiN 体积分数对接头组织和性能的影响

图 3 为钎焊温度 920 °C,保温时间为 10 min,不同 TiN 体积分数下接头的显微组织。从图 3 发现

均结合紧密且气孔较少。对 TiN 体积分数为 9% 时的试样做具体分析,发现在陶瓷侧形成两个反应层,反应层厚度约为 30 μm,金属侧反应层厚度约为 2.5 μm。

对陶瓷侧(图 3(c)横线)进行能谱分析,线扫描结果如图 4 所示。根据线扫描分析及结合下文的点扫描分析,可以推测,紧靠陶瓷侧的为铜基固溶体及 C 单质,第二反应层主要为 TiC 和 Ti₅Si₃,主要是因为陶瓷中的 SiC 高温下发生分解,分解出来的 C 元素和 Si 元素与钎料中的 Ti 元素发生反应,形成 TiC 反应层,有力增强 Q235A 钢与陶瓷的连接强度。随着 TiN 体积分数的逐渐增加, SiC 陶瓷侧钎料层厚度变厚,主要原因是 TiN 颗粒不熔化,导致钎料流动性变差。

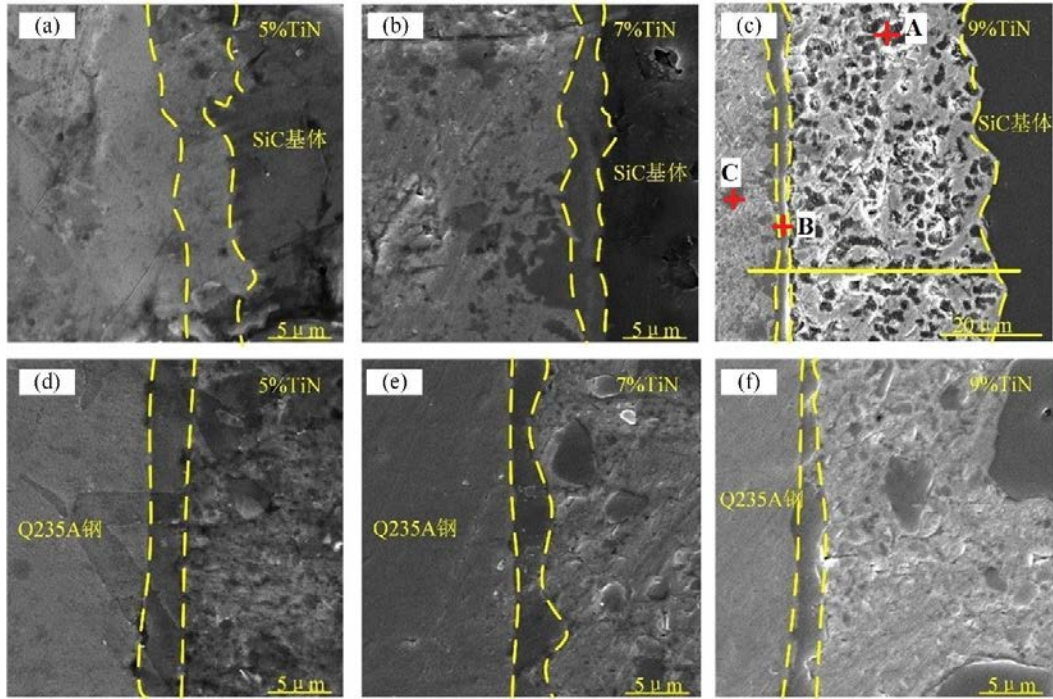
当 TiN 体积分数为 9% 时,反应层厚度约为 30 μm,而且反应层中出现黑色颗粒,对其进行点扫描,结果如表 2 所列。扫描结果显示,反应层中黑色颗粒主要成分为碳元素,推测主要原因是随着 TiN 体积分数的增加,会增强 Ag-Cu-Ti+TiN 钎料对基体中碳元素的吸附能力。位置 B 的主要组分为 TiC 和 Cu 基固溶体,与线扫结果对应。对 C 点灰色位置进行点扫描,主要元素为 Fe-C-Si-Ti,推测灰色位置主要是 Ti₅Si₃,主要原因是钎料中的 Ti 元素与 SiC 陶瓷中分解出的 Si 元素发生反应,生成 Ti₅Si₃。当 TiN 体积分数为 5% 和 7% 时,各个反应层紧密结合,很难区分出各个反应层的结合界面。

对使用 Ag-Cu-Ti+TiN 不同体积分数的试样进行剪切实验,实验处理数据如表 3。当 TiN 体积分数为 5% 时,剪切强度达到最高为 85.6 MPa,当 TiN 为 3% 时,剪切强度为 19.8 MPa。因为陶瓷基体与 Q235A 钢基体的热膨胀系数差异太大,且 Ag-26.88Cu-4Ti 复合钎料与基体的热膨胀系数差异也较大,其中 SiC 陶瓷的热膨胀系数为 3.8×10⁻⁶ K⁻¹, Ag-Cu-Ti 为 19×10⁻⁶ K⁻¹,而 TiN 为 9.35×10⁻⁶ K⁻¹,通过 TiN 粉末的加入可以降低复合钎料的热膨胀系数,进而降低两基体在连接过程中由于热膨胀系数差异大引起的热残余应力。

为了更清楚的从量上表达混合粉末的热膨胀系数大小,现用 Schapery 计算模型进行计算,计算公式如式(1)、(2)所示:

$$C_c = C_m V_m + C_r V_r + \frac{4G_r V_m (C_r - C_m)(K_c - K_m)}{K_c(3K_m + 4G_r)} \quad (1)$$

$$K_c = \frac{\frac{V_r K_r}{3K_r + 4G_m} + \frac{V_m K_m}{3K_m + 4G_m}}{\frac{V_r}{3K_r + 4G_m} + \frac{V_m}{3K_m + 4G_m}} \quad (2)$$



(a)/(d). 5%TiN; (b)/(e). 7%TiN; (c)/(f). 9%TiN

图 3 不同 TiN 体积比条件下接头的显微组织

Fig.3 Microstructure of the joints with different TiN volume fractions

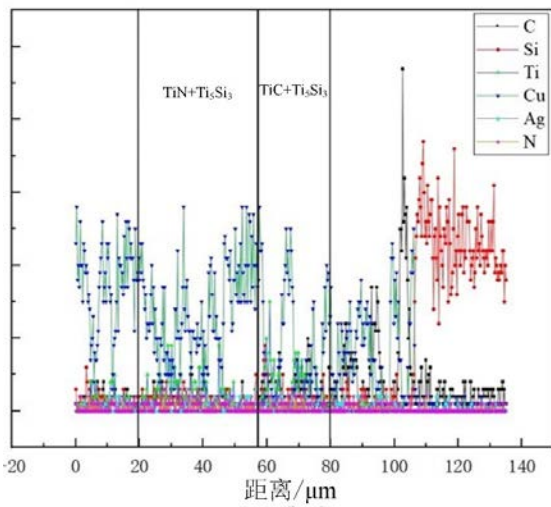


图 4 能谱分析

Fig.4 Energy spectrum analysis

表 2 不同区域(图 3(c))能谱分析

位置	C	Si	Ti	Fe	Cu	可能相
A	93.35	0.31	0.11	0.41	3.83	C
B	22.02	0.87	30.4	0.59	45.58	Cu+TiC
C	11.97	19.95	35.93	17.94	11.92	Fe-Ti-Si-C

表 3 不同 TiN 体积分数试样的剪切应力

Tab.3 Shear stress of the specimen with different TiN volume fraction

TiN(V/V)/%	剪切应力/MPa
3	19.8
5	85.6
7	65.3
9	46.2

式(1)、(2)中, C_c 为复合钎料的热膨胀系数, 角标 c 、 m 、 r 分别为复合钎料、基体和增强相, V_m 、 V_r 表示基体和增强体的体积分数, E 为弹性模量, n 为泊松比, K 为体积模量, G 为切变模量, 体积模量和切变模量各自计算公式如式(3)、(4)所示。

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3 \times (1 - 2\nu)} \quad (4)$$

计算出的不同体积分数的 TiN 复合钎料的热膨胀系数列于表 4。由表 4 可见, 随着 TiN 体积分数的增加, 复合钎料的热膨胀系数呈现减小的趋势。当加入过少的 TiN 粉末时, 热残余应力没有有效的

表 4 不同 TiN 体积分数钎料的热膨胀系数

Tab.4 Thermal expansion coefficients of solder metals with different TiN volume fractions

TiN(V/V)/%	热膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/K)$
3	18.67
5	18.45
7	18.23
9	18.02

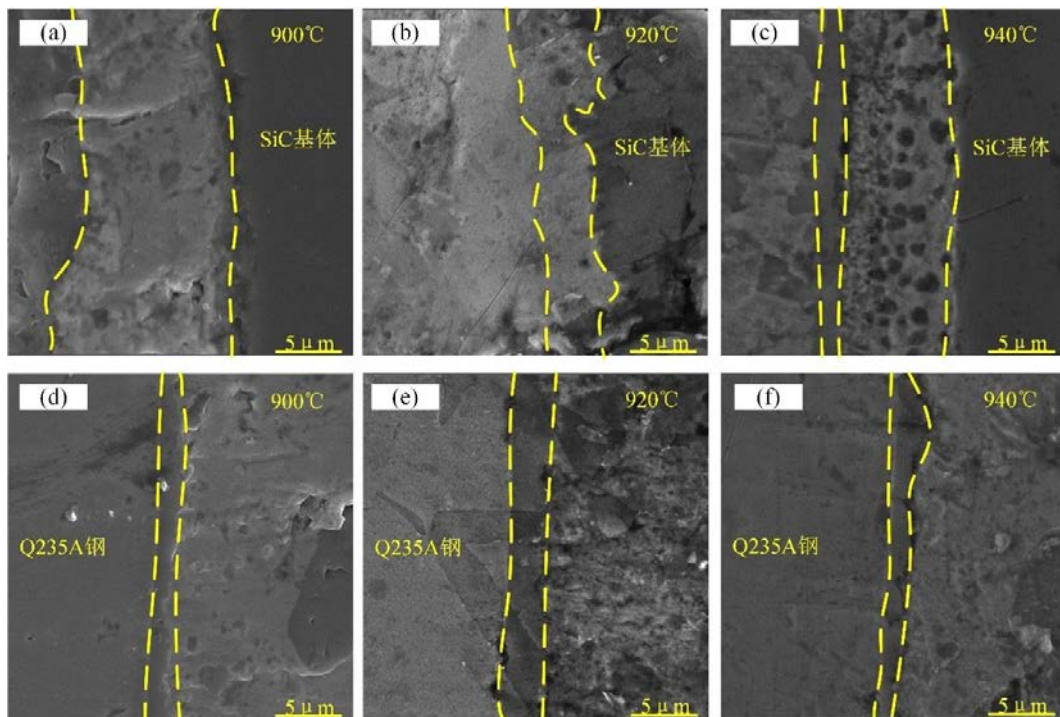
降低,造成连接强度过低;当 TiN 体积分数为 7%、9%时,剪切强度都没有 TiN 体积分数为 5%的高,这和上面分析的 TiN 体积分数过多时钎料流动性变差相对应。

侯桂贤^[12]研究的 Ag-Cu-Ti 复合钎料钎焊 SiC 陶瓷,界面反应产物主要为 TiC 化合物,由 Ti 与 SiC 陶瓷分解出的 C 元素反应所得。王天鹏^[14-15]研

究的 Ag-Cu-Ti+TiNp 钎焊 Si₃N₄ 陶瓷/42CrMo 钢和 Ag-Cu-Ti+TiNp 钎焊 Si₃N₄ 陶瓷/Fe 基合金,界面反应产物主要为 TiN 化合物,由 Ti 元素与 Si₃N₄ 陶瓷分解出的 N 元素反应所得。本文所用的为复合 SiC 陶瓷(70%SiC+30%Si₃N₄),在焊接界面生成的反应产物既有 TiC 化合物,也有 TiN 化合物。复合 SiC 陶瓷与纯 SiC 陶瓷和纯 Si₃N₄ 陶瓷相比,复合 SiC 陶瓷内部结合比较疏松,且在焊接界面产生大小不同的残余应力,造成连接强度有所降低,但连接强度和现有方式的连接强度相比提高 45 MPa。

2.2 钎焊温度对接头组织和性能的影响

由 TiN 添加的不同体积分数的微观组织及剪切应力可知,当钎料组分为 Ag-26.88Cu-4Ti+5%TiN 时,连接强度达到最高,因此在对钎焊温度进行研究时,采用 Ag-26.88Cu-4Ti+5%TiN 的钎料组分,不同钎焊温度所得的焊缝显微组织如图 5 所示。



(a)/(d). 900 °C; (b)/(e). 920 °C; (c)/(f). 940 °C

图 5 不同钎焊温度下接头的显微组织

Fig.5 Microstructure of joints at different brazing temperatures

从图 5 中可以看出,随着钎焊温度的升高,在 Q235A 钢一侧,钎焊层厚度几乎没有太大变化,而在 SiC 陶瓷侧,钎料反应层厚度逐渐变厚。主要是因为钎焊温度过低时,钎料未能完全融化,钎料流动性较差,未能与基体充分扩散,元素还不能与基

体充分反应所造成,并且温度过低时,造成焊缝中出现孔洞及不连续的反应层,形成连接效果不好的焊接接头组织;当温度持续升高时,钎焊温度为 920 °C 时,钎料中的元素扩散与基体反应,形成紧密的连接层;当钎焊温度为 940 °C 时,陶瓷侧出现

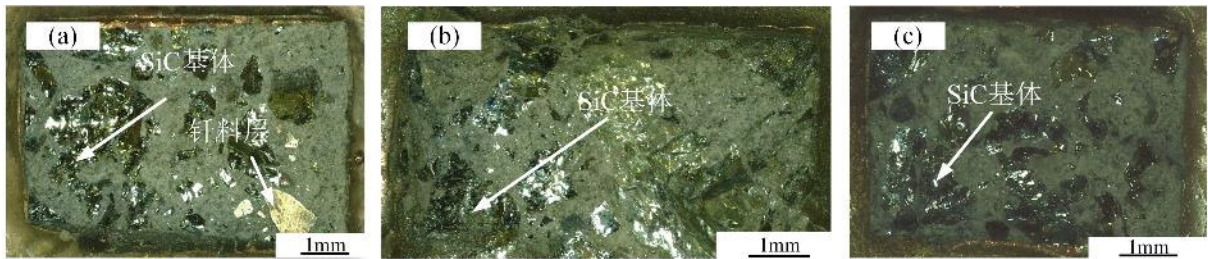
三个连续反应层, 经过面扫描发现, 第二连续反应层为 Ti_5Si_3 , 因 Ti_5Si_3 脆相的热膨胀系数是 TiC 的 1.4 倍, 而弯曲强度却是 TiC 的 1/7, 硬度也只有 TiC 的 1/3, 该脆相的生成造成连接强度降低; 且温度高时, 反应层变厚, 对陶瓷基体造成侵蚀, 陶瓷材料本身的结构遭到破坏, 这使得结合面处晶格的错配力增大, 进一步造成连接强度降低。对比图 5 发现, 当钎焊温度为 920 °C 时, 反应层厚度适中, 结合紧密且无明显孔洞和裂纹。

对不同钎焊温度下的试样做剪切实验, 当钎焊

温度为 900 °C 时, 剪切强度为 68.9 MPa, 主要是因为温度过低时, 钎料与母材未能充分反应; 当钎焊温度为 920 °C 时, 剪切强度达到最高, 为 85.6 MPa; 当钎焊温度为 940 °C 时, 剪切强度为 46.9 MPa; 由以上结果可见, 反应层厚度及 Ti_5Si_3 连续反应层的生成, 对连接强度造成极大的影响, 此显示结果与显微组织所观察到的现象完全吻合。

2.3 断口形貌分析

图 6 为 TiN 不同体积分数钎料下剪切断口形貌。图 7 为金属与陶瓷的三种断裂形式。



(a). 900°C; (b). 920°C; (c). 940°C

图 6 不同钎焊温度下的断口形貌

Fig.6 Fracture morphology at different brazing temperatures



图 7 典型断口形貌

Fig.7 Typical fracture morphology

图 7 中, 第一种断口形貌是典型的由于热残余应力大造成的拱形断裂形式; 第二种断口形貌也是发生在陶瓷侧, 但断口平直, 这是金属与陶瓷钎焊连接最好的效果; 第三种断口形貌断裂发生在钎料层, 因为钎料钎料层的力学性能较低。可以看出, 当 TiN 体积分数为 3% 时, 断裂面发生在钎料层, 分析可知, 当加入 TiN 过少时, 陶瓷与金属间的热膨胀系数的差异过大很难被钎料层缓解, 造成连接后有较大的残余应力, 断裂面发生在钎料层附近; 陶瓷与金属 3% 以上 TiN 不同体积分数钎料下的剪切断裂均发生在陶瓷侧, 说明 Q235A 钢与 SiC 基体

与陶瓷连接良好, 已形成紧密的结合层, 陶瓷侧的断裂形状为拱形, 说明接头结合紧密, 但在冷却过程中, 在陶瓷侧产生了较大的残余应力, 残余应力是决定接头性能的主要因素。

3 结论

1) 在使用 Ag-26.88Cu-4Ti+TiN 对 Q235A 钢与 SiC 基体陶瓷进行焊接时, 钎料中的 Ti 元素与 SiC 母材发生反应, 生成 TiC 和 Ti_5Si_3 反应层, 形成紧密的焊接接头。

2) 增强体 TiN 的加入可以过渡基体热膨胀系数差异过大而引起的残余应力, 但当 TiN 加入的体积分数过大时, 钎料的流动性变差, 造成焊接性能降低, 当钎料配比为 Ag-Cu-Ti 加体积分数为 5% 的 TiN 时, 剪切强度达到最高。

3) 钎焊温度过低时, 钎料不能与基体充分反应, 造成连接强度过低, 钎焊温度过高时, 元素扩散剧烈, 在 SiC 侧生成连续的脆相 Ti_5Si_3 反应层, 造成连接强度下降, 当钎焊温度为 920 °C 时, 连接强度达到最高。

参考文献:

- [1] 林国标, 黄继华, 张华. Zr 对(Ag-Cu-Ti)-SiCp 钎焊 SiC 陶瓷/钛合金连接层组织结构的影响[J]. 材料研究学报, 2006(2): 176-180.
- LIN G B, HUANG J H, ZHANG H. Effects of Zr on the microstructure of (Ag-Cu-Ti)-SiCp interlayer between SiC ceramic and Ti-alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research. 2006(2): 176-180.
- [2] 苗赫濯, 林旭平, 齐龙浩. 先进结构陶瓷材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S1): 14-19.
- MIAO H Z, LIN X P, QI L H. The progress of research on advanced structural ceramics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S1): 14-19.
- [3] DAI X Y, CAO J, CHEN Z, et al. Brazing SiC ceramic using novel B4C reinforced Ag-Cu-Ti composite filler[J]. Ceramics International, 2016(42): 6319-6328.
- [4] DAI X Y, CAO J, TIAN Y T, et al. Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of SiC/SiC joints brazed by Ag-Cu-Ti+B4C composite filler[J]. Materials Characterization, 2016(118): 294-301.
- [5] ZHANG Y, FENG D, HE Z, et al. Progress in joining ceramics to metals[J]. Journal of Iron and Steel Research, International. 2006, 13(2): 1-5.
- [6] LIU G M, ZOU G S, WU A P, et al. Improvements of the Si₃N₄ brazed joints with intermetallics[J]. Materials Science and Engineering: 2006, 415(1/2): 213-218.
- [7] BROCHU M, PUGH M D, DREW R, et al. Joining silicon nitride ceramic using a composite powder as active brazing alloy[J]. Materials Science and Engineering: 2004, 374(1/2): 34-42.
- [8] 姜良朋, 张克平, 姚亚萍. 铬系白口铸铁组织与性能的研究进展[J]. 铸造技术, 2016, 37(6): 1162-1165.
- JIANG L P, ZHANG K P, YAO Y P. Research progress on microstructure and properties of chromium white cast iron[J]. Foundry Technology, 2016, 37(6): 1162-1165.
- [9] 郑仕远, 曹优明, 胡德斌, 等. Si₃N₄ 陶瓷的连接研究进展[J]. 化学通报, 2003(1): 71.
- ZHENG S Y, CAO Y M, HU D B, et al. The development of Si₃N₄ ceramic joining process[J]. Chemistry, 2003(1): 71.
- [10] 王新阳, 李炎, 魏世忠, 等. 陶瓷与金属连接技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(13): 145-148.
- WANG X Y, LI Y, WEI S Z, et al. Research progress in connecting techniques of ceramics and metals[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(13): 145-148.
- [11] 吴爱萍, 邹贵生, 任家烈. 先进结构陶瓷的发展及其钎焊连接技术的进展[J]. 材料科学与工程, 2002(1): 104-106.
- WU A P, ZOU G S, REN J L. Recent development of advanced structural ceramics and its brazing joining[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 38(13): 145-148.
- [12] 侯桂贤. Ag-Cu-Ti 复合钎料钎焊 SiC 陶瓷的工艺和连接机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- HOU G X. Process and joining mechanism of brazing SiC ceramics with Ag-Cu-Ti composite filler[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [13] SINGH M, SHPARGEL T P, ASTHANA R. Brazing of yttria-stabilized zirconia (YSZ) to stainless steel using Cu, Ag, and Ti-based brazes[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(1): 23-32.
- [14] 王天鹏. Ag-Cu-Ti+TiNp 钎焊 Si₃N₄ 陶瓷/42Cr Mo 钢组织性能和数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WANG T P. Microstructure and mechanical properties and numerical simulation of the Si₃N₄ ceramic/42CrMo steel brazed with Ag-Cu-Ti+TiNp composite filler[D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] 王天鹏. Ag-Cu-Ti+TiNp 钎焊 Si₃N₄ 陶瓷/Fe 基合金接头的组织性能及连接机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG T P. Research on microstructure, properties and bonding mechanisms in Si₃N₄ ceramic/Fe-based alloy joint brazed with Ag-Cu-Ti+TiNp composite[D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2016.