

SiC 纤维增强钛基复合材料钎焊接头界面组织及连接机理

Microstructure of the SiC-reinforced Titanium Based Composite Joint and Joining Mechanism

陈 波, 熊华平, 毛 唯, 程耀永

(北京航空材料研究院 焊接及锻压工艺研究室, 北京 100095)

CHEN Bo, XIONG Hua-ping, MAO Wei, CHENG Yao-yong

(Laboratory of Welding and Forging, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 针对 SiC/ β 21S 钛基复合材料, 采用 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系新钎料, 进行了钎焊实验和接头组织研究。实验结果表明: Cu, Ni, Co 三种元素在整个钎缝中扩散充分, 这使得与 Ti 基体反应形成的化合物相在单位体积内减少; 同时, Al 和 Mo 两种 β 相形成元素在钎缝中大量分布, 导致钎缝基体与母材基体组织相近, 均由 β 相组成。这两方面因素共同存在将提高接头性能。

关键词: SiC/ β 21S; 钎焊; 接头

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)09-0064-03

Abstract: The vacuum brazing test of SiC/ β 21S titanium matrix compound was carried out and the joint microstructure was investigated. The results indicated that the elements Cu, Ni and Co diffused thoroughly into the whole joint, which decreased the quantity of Ti-M (M = Cu, Ni, Co) compounds per unit volume. In addition, because both Al and Mo are elements of β -phase formation and they existed in the joint with great quantity, the similar β -phase microstructure was observed in the joint and the base metal. The mechanical properties of the SiC/ β 21S joints will be increased due to the above two reasons.

Key words: SiC/ β 21S; brazing; joint

钛合金具有较高的室温和高温比强度、低密度、高弹性模量等优异性能^[1], 因此钛基复合材料成为超音速宇航飞行器、先进航空发动机的理想候选材料, 在气体涡轮机发动机风扇叶片、驱动轴、超高速飞行器、飞机起落架、飞机机构架结构、导弹结构方面具有良好的工程应用前景^[2]。其中 SiC 纤维增强钛基复合材料具有优良的高温综合性能, 能替代部分高温合金以制造高性能、轻量化的新结构, 其应用日益受到航空、航天及尖端技术领域的关注^[3-5]。钛基复合材料自身的研制目前仍属于研究热点^[6-8], 与此同时, 也亟待解决材料的连接、变形工艺等热加工技术关键问题。关于该种材料的连接, 虽然国内外进行了大量的研究, 但出于技术保密原因, 目前相关文献报道还很少。

本工作选用了 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系新钎料, 该钎料获得的 TC4 合金接头的强度均优于俄牌号钛基钎料 БИП16 (名义成分为 Ti-13Zr-21Cu-9Ni, 质量分数/%)^[5], 并且一定程度上改善了钛基钎料接头脆性

问题。研究 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系钎料对钛基复合材料的接头界面组织及连接机理为该系钎料更广泛应用以及提高钛基复合材料接头强度具有应用价值。

1 实验材料和方法

实验用母材为 SiC/ β 21S, 该材料是以 β 21S (名义成分为 Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si, 质量分数/%) 钛合金为基, 通过 SiC 纤维增强的钛基复合材料。Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系新钎料成分见表 1, 该钎料制备方法如下: 各元素组分混合后在氩气保护条件下采用电弧熔炼设备制成合金锭, 之后将合金锭置于石英管中, 再利用急冷态箔材制备设备将该钎料制成厚度约 45 μ m 的急冷态箔带。

实验前将 SiC/ β 21S 母材采用线切割方法加工成 7mm \times 5mm \times 2mm 的试样, 被焊表面经过细砂纸打磨后放置丙酮中进行超声清洗, 试样采用搭接方式连接,

表 1 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系新钎料成分(质量分数/ %)

Table 1 Composition of the Ti-Zr-Cu-Ni-Co filler metal (mass fraction / %)		
Ti	Zr	Cu+ Ni+ Co
Bal	14.0±28.0	16.0±25.0

钎料夹在上下两试样中间。采用真空钎焊方法,钎焊规范为 960℃/10min,热态真空度不低于 1.0×10^{-2} Pa,加热速度为 10℃/min。通过扫描电镜(SEM)观察了钎焊接头的微观组织形貌,使用 X 射线能谱仪(XEDS)分析了接头中某些微观区成分以及接头中各元素的面分布。

2 实验结果与分析

图 1 给出了采用 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系新钎料获得的 SiC_f/β21S 接头组织的背散射电子照片,从照片中可以看出,采用该钎料获得了完整的接头,无气孔、未焊上等缺陷存在。钎缝组织与其附近母材组织相近,未出现层状结构。I 区为钎料与母材的扩散反应区,由于颜色与母材相近(见图 1),只是成分略有差别(见表 2 中“1”和“2”),所以很难辨别宽度范围。II 区为钎缝基体区,其颜色较 I 区略浅,宽度为 60μm 左右,中心分布着灰黑色块状相。

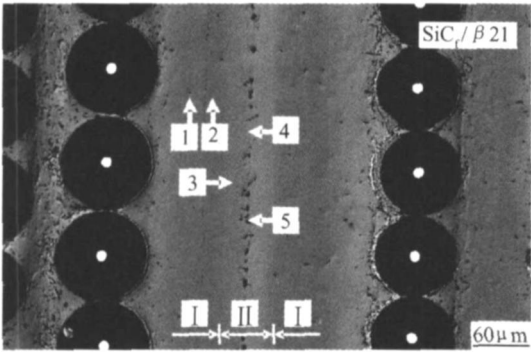


图 1 960℃/10min 规范下 SiC_f/β21S 接头组织背散射电子像
Fig. 1 The BSE image of the SiC_f/β21S joint at 960℃ for 10min

钎缝基体区较原始间隙(即钎料原始厚度 45μm)增加了近 1/3,扩散反应区 Ni, Co 含量有所增加,以及 II 区与 I 区颜色及组织相近,这都说明了在钎焊过程中液态钎料与母材基体发生了反应并且相互扩散。具体作用过程如下:当加热温度达到了钎料的熔点,钎料开始熔化,固态的 SiC_f/β21S 母材与液态的 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 钎料接触的表面层发生反应,由于反应发生在固-液两相的界面上,使得液态钎料对固态母材润湿,并且 Ti, Mo, Al, Ni, Co 等原子进行交换。该反应的发生破坏了 β21S 固态母材晶格的原子结合,此时液态原子与固态原子形成了新的键,这为固液相原子的进一步扩散提供了条件。本实验中采用的钎焊规范为 960℃/10min,钎料处在液态的时间相对较长,该时间远大于相与相之间能峰的松弛时间,从而保证了各种原子扩散过程的充分进行。在随后的阶段,溶解的母材原子从边界扩散层向液态钎料中迁移,迁移通过扩散与对流实现。由于母材与钎料之间的成分差别,导致了初始扩散的母材原子在液态钎料体中出现了浓度差,这种浓度差为原子的扩散提供了动力;同时液态钎料内局部微区存在密度及温度不均匀,导致对流在液态内部产生,这同样加速了原子扩散的进行。随着液态钎料与固态母材之间相互扩散过程的持续,使得液态钎料成分发生了较大的变化,钎料中 Al 和 Mo 含量有所提高, Cu, Ni 和 Co 等元素扩散较为充分,在整个接头中分布均匀化。钎缝中这些元素成分的变化导致液态钎料熔点发生变化,当熔点超过钎焊温度即 960℃时,钎缝进入等温凝固过程。在等温凝固过程中,液相基本消失,原子在固态钎缝中进一步扩散,且扩散速度变缓,降温冷却时扩散逐渐停止。

表 2 给出了图 1 中某些微观区域元素的含量,从中可以看出,Al 和 Mo 在 I 区和 II 区中“3”的位置上含量相当,其中 Al 保持在 2%~3%, Mo 保持在 14%~16%,较原始母材中的含量变化较小,由于 Al 和 Mo 为 β 相稳定元素,它们在钎缝中的含量决定了钎缝的相组成。I 区和 II 区均以 Ti 作为基体,在这两个区域中 Ti 总体变化不明显,只是在钎缝中心的灰黑色

表 2 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 钎料对应 SiC_f/β21S 钎焊接头微区能谱分析结果(质量分数/ %)

Table 2 The EDS analysis result of SiC _f /β21S joint with Ti-Zr-Cu-Ni-Co filler metal at different micro zones (mass fraction / %)									
Micro zone	Al	Si	Ti	Co	Ni	Cu	Zr	Mo	Cu+ Ni+ Co
1	2.83	0.25	79.75	0.94	0.63	—	—	15.60	1.57
2	2.78	0.31	80.78	1.03	0.66	—	—	14.44	1.69
3	2.37	0.22	75.58	1.91	1.27	1.71	2.35	14.57	4.89
4	1.57	—	73.26	2.45	1.33	2.69	11.47	7.23	6.47
5	—	—	89.57	—	—	—	10.43	—	—

块状相(见图 1 中“5”)中分布略多, 达到 89.57%, 但是该相中只包含了 Ti 和 Zr 两种元素, 而且这两种元素以固溶体形式存在, 所以这些相的存在不会削弱接头的性能。Co, Ni 两种元素分布趋势为由扩散反应区至钎缝中心逐渐增加, 但增加量很少, Cu 分布情况类似, 但在扩散反应区即 I 区中未检测到。在整个钎缝中, Cu, Ni, Co 三种元素质量分数之和的最大值所对应的区域位于钎缝基体的中心区(图 1 中“4”所对应的区域), 数值为 6.47%, 该值远小于原始钎料 Cu+Ni+Co 的质量分数(16.0%~25.0%), 说明扩散较为

充分, 这在一定程度上降低了钎缝中脆性相的含量。

图 2 给出了钎焊接头元素的面分布图, 从图中可以看出, Al 和 Mo 两种元素的分布较为明显, 在 SiCf/ β 21S 母材基体及扩散反应区(I 区)中分布较多, 而在 II 区含量变少, 隐约出现钎缝基体的轮廓。Cu, Ni, Co 三种元素由于在整个钎缝中扩散充分, 单位区域内含量很低, 导致从面分布图谱中观察其含量趋势不明显, 而 Ti 与此相反, 由于含量过多而使得面分布图白亮。Zr 主要分布在 II 区, 但在纤维周围也出现了明显的分布, 分析认为是试样制备时所致。

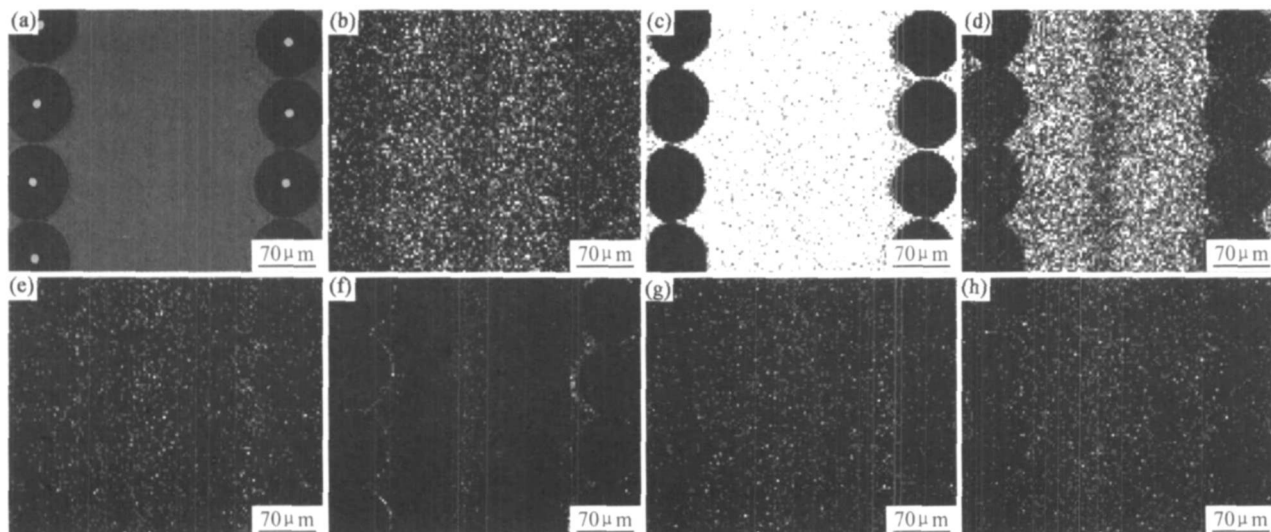


图 2 采用 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 钎料获得的 SiCf/ β 21S 接头界面背散射电子像

(a) 及元素(b) Al; (c) Ti; (d) Mo; (e) Cu; (f) Zr; (g) Ni; (h) Co 的面分布

Fig. 2 The BSE image of the SiCf/ β 21S joint (a) and area distribution images of elements

(b) Al; (c) Ti; (d) Mo; (e) Cu; (f) Zr; (g) Ni; (h) Co using Ti-Zr-Cu-Ni-Co filler metal

Al 和 Mo 两种 β 相形成元素在钎缝中大量分布, 导致钎缝基体与母材基体组织相近, 均由 β 相组成, 这在一定程度上提高了接头的性能。另外, Cu, Ni, Co 三种元素在整个钎缝中扩散充分, 单位区域内三者含量之和很少, 使得与 Ti 基体反应形成的脆性化合物相减少, 且这些物相均匀分布在钎缝基体中, 从而对接头的抗拉强度及冲击韧性的提高起到了至关重要的作用。

3 结论

(1) 采用 Ti-Zr-Cu-Ni-Co 系新钎料钎焊 SiCf/ β 21S 获得了完好接头, 实现了钛基复合材料的成功连接。

(2) Al 和 Mo 两种 β 相形成元素在钎缝中大量分布, 导致钎缝基体与母材基体组织相近, 均由 β 相组成, 这在一定程度上会提高接头的强度及韧性。

(3) Cu, Ni, Co 三种元素在整个钎缝中扩散充分, 这使得与 Ti 基体反应形成的化合物相在单位体积内减少, 这对接头性能有利。

参考文献

- [1] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] YANG Y Q, DUDEK H J, KUMPFERT J. Interfacial reaction and stability of SCS-6 SiC/Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo composites [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A246: 213-220.
- [4] CHANG D J, KAO W H. SiC reinforced titanium corrugated structures for high temp. application [J]. SAMPI Journal, 1998, 24(2): 336-340.
- [5] UPADHYAYA D, AANDHU S. Interfacial reactions in Ti-6Al-4V/a-1240 fibre metal matrix composite [J]. Materials Science and Technology, 1995, 11: 1156-1161.

(下转第 70 页)

Mg₁₇Al₁₂的扩展相,只是 β -Mg₁₇Al₁₂中的一小部分Al被Zn取代。 β -Mg₁₇Al₁₂相是硬脆相, β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂相和 β -Mg₁₇Al₁₂相性质相似,也是硬脆相。当钎焊接头受外力产生变形时, β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂相其协调变形能力很低,难以与 α -Mg基体协调一致地变形, β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂相的脆性导致裂纹很容易形成与扩展,同时 β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂相与 α -Mg基体在界面处由于受到外力作用时易产生应力集中,在应力集中的作用下,使得硬脆 β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂相沿 α -Mg界面被拉开产生裂纹,从而导致接头拉伸断口表现为较明显的沿晶脆性断裂特性。

3 结论

(1) 以Al基钎料在氩气保护条件下可以实现对变形镁合金AZ31B高频感应钎焊,钎缝主要生成相为 α -Mg, β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂。钎焊对接接头平均拉伸强度为42MPa,搭接接头平均剪切强度为27MPa。

(2) 钎焊对接接头的拉伸断口表现为较明显的沿晶脆性断裂特性,断裂主要产生在沿 α -Mg晶界网状分布的粗大骨骼状 β -Mg₁₇(Al,Zn)₁₂硬脆相处。

参考文献

- [1] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 366- 370.
- [2] SHAPIRO A E. Brazing magnesium alloys and magnesium matrix composites[J]. Welding Journal, 2005, 84(10): 33- 43.
- [3] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 296- 299.
- [4] 美国焊接学会. 钎焊手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982. 209- 216.
- [5] Committee on Brazing and Soldering. Brazing Manual[M]. Miami: American Welding Society, 1975. 161- 168.
- [6] CAND I, ARNE S M. Entwicklung von magnesium-basis legierungen zum L ten von Leichtmetallen[D]. Aachen: Rheinisch-westf Lische Technische Hochschule Aachen, 2005. 25- 26.
- [7] WATANABE T, KOMATU S, YANAGISAWA A, et al. Development of flux and filler metal for brazing magnesium alloy AZ31B[J]. Yosetsu Gakkai Ronbunshu Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2004, 22(1): 163- 167.
- [8] WATANABE T, KOMATU S, OOHARA K. Development of flux and filler metal for brazing magnesium alloy AZ31B[J]. Welding Journal, 2005, 84(3): 37- 40.
- [9] 刘楚明, 朱秀荣, 周海涛. 镁合金相图集[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
- [10] 李艳, 刘奎立, 陈芳雷. AZ31 镁合金铸态组织及其退火工艺研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 339- 341.
- [11] 屠怡范, 陈晶益, 张波萍, 等. AZ31 铸造镁合金的物相和显微组织[J]. 铸造, 2006, 55(5): 509- 512.
- [12] 金头男, 聂祚仁, 李斗星. 浸渍挤压(SiCw+ B4Cp)/Mg(AZ91)复合材料的微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 110- 114.
- [13] 郭强, 严红革, 陈振华, 等. 均匀化退火工艺对铸态AZ80镁合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 77- 80.
- [14] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989. 189- 193.
- [15] 张菊梅, 蒋百灵, 王志虎, 等. 固溶和时效对AZ80镁合金断裂行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(9): 663- 666.

基金项目: 北京市教委科技发展计划面上项目(KM200710005005)

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-16

作者简介: 马力(1971—), 男, 博士研究生, 现从事镁合金钎焊材料及钎焊工艺研究, 联系地址: 北京工业大学材料科学与工程学院(100124)。E-mail: mali2050@emails.bjut.edu.cn

(上接第66页)

- [6] MOGILEVSKY P. Application of diffusion barriers in composite materials[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A242: 235- 247.
- [7] SUBRRAMANIAN P R. Fabrication of SiC fibre reinforced titanium matrix composite by magnetron sputtering [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A244, 1- 5.
- [8] 吕祥鸿, 杨延清. Ti基复合材料界面反应扩散的微观分析[J]. 材料工程, 2008, (6): 21- 24.
- [9] 陈波, 毛唯, 谢永慧, 等. Ti+Zr-Cu-N+Co系新钎料的成分设计

及TC4合金钎焊接头的力学性能[J]. 航空材料学报, 2006, 26(1): 59- 62.

基金项目: 航空基础科学基金资助项目(2006ZE21004)

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-20

作者简介: 陈波(1979—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事新材料的钎焊扩散焊研究工作, 联系地址: 北京 81 信箱 20 分箱(100095)。E-mail: chenbo621@sina.com