

# Ag-Cu-Sn-Ti 活性钎焊 Gr/2024Al 复合材料与 TC4 钛合金

石俊秒<sup>1</sup>, 张丽霞<sup>1</sup>, 李宏伟<sup>1</sup>, 田晓羽<sup>1</sup>, 冯吉才<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209)

**摘 要:** 采用自制的 AgCuSnTi 钎料对发汗材料 Gr/2024Al 复合材料和 TC4 钛合金进行钎焊, 对焊后接头界面组织及力学性能进行了分析. 结果表明, 接头典型界面组织为 Gr/2024Al/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ag<sub>2</sub>Al + Ag<sub>3</sub>Sn + Al<sub>2</sub>Cu + Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub>/Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub> + Ag<sub>3</sub>Sn/TC4. 钎焊时, 活性元素 Ti 与 Gr/2024Al 复合材料的石墨基体发生活性反应, 实现了 TC4 与 Gr/2024Al 复合材料的低温连接, 保证了复合材料的力学性能及发汗功能. 随钎焊温度升高及保温时间延长, 钎缝组织中弥散分布的 Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub> 化合物聚集长大成块状, 使接头性能下降. 当钎焊温度为 680 °C, 保温时间为 10 min 时, 接头抗剪强度达到最大值 17 MPa, 其为 Gr/2024Al 复合材料母材强度的 70%.

**关键词:** Gr/2024Al 复合材料; TC4; AgCuSnTi 钎料; 界面组织; 抗剪强度

**中图分类号:** TG 454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2014)11-0031-04

## 0 序 言

石墨渗铝复合材料(简称为 Gr/2024Al 复合材料)作为新一代发汗防热材料, 具有耐高温、耐烧蚀、抗冲刷、抗热震等特性, 成为非常有前途的新型高温材料; 此外, 由于其制作成本较低, 因此在航天领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>. Gr/2024Al 复合材料作为航天飞行器发动机喷管的替代材料, 在具体使用中需要与 TC4 钛合金喷注器进行连接. 而在陶瓷或陶瓷基复合材料与金属的连接中, 钎焊方法是最有前途的方法之一, 该方法操作简单、效率高、可批量生产, 因此文中拟采用钎焊方法对 Gr/2024Al 复合材料与 TC4 钛合金进行连接.

Gr/2024Al 复合材料主要以石墨为基体相, 因此与石墨基体的连接可靠与否成为这种复合材料连接的关键. 有学者<sup>[2-4]</sup>采用 AgCuTi 钎料分析石墨、金刚石、C/C 复合材料等碳材料的焊接性, 研究表明活性钛与碳发生反应, 生成 TiC 化合物层, 进而实现对碳材料的可靠连接. 由于 AgCuTi 钎料熔点高于 779 °C, 特别是 Gr/2024Al 复合材料中含有体积分数 20% Al, 为避免母材中的铝在钎焊过程中熔化挥发, 损害复合材料的力学性能及发汗功能, 因此需开发

一种低温活性钎料, 实现 Gr/2024Al 复合材料与 TC4 钛合金的可靠连接. 有文献[5]报道, AgCuTiSn 钎料可以成功钎焊石墨与铜, 且界面结合良好, 锡的加入降低了 AgCuTi 钎料的钎焊温度<sup>[6]</sup>. 但由于该钎料熔点仍偏高为 760 °C, 为此文中拟开发一种新的钎焊温度可在 680 °C 左右的 AgCuSnTi 钎料体系, 对 Gr/2024Al 复合材料与 TC4 钛合金进行钎焊. 研究了连接工艺参数(连接温度及保温时间)对接头界面结构及抗剪强度的影响.

## 1 试验方法

使用的母材为 Gr/2024Al 复合材料和 TC4 钛合金, 其中 Gr/2024Al 复合材料主要由体积分数 80% 的石墨和 20% 的铝合金组成. 用于金相分析的试样被加工成 5 mm × 4 mm × 3 mm; 用于抗剪强度测试的试样被加工成 5 mm × 5 mm × 4 mm. 文中使用的钎料为自配的 AgCuSnTi 粉, 是将 AgCu 共晶粉末(质量分数 72 % Ag 和 28% Cu)、锡粉(纯度为 99.5%)、钛粉(纯度为 99.5%)按 0.7:0.27:0.03 的质量比混合后, 在室温条件下模压成形. 母材及钎料按三明治方式放入自制的石墨模具中, 然后在真空钎焊炉中进行连接. 钎焊时采用配重加压, 连接温度为 640 ~ 700 °C, 保温时间为 5 ~ 20 min.

文中采用 Instron-5569 电子万能试验机对接头

进行抗剪强度测试,采用 Quanta 200FEG 扫描电子显微镜分析接头界面组织形貌,用其附带的能谱仪(EDS)分析界面各物相的成分.用旋转阳极 X 射线衍射仪(XRD)对界面产物进行确定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 典型界面组织分析

图 1 为钎焊温度 680 °C,保温 10 min 的条件下

获得的 Gr/2024Al/AgCuSnTi/TC4 钎焊接头组织背散射电子形貌.由图 1 可知,焊后接头处钎料与两侧母材均发生良好的冶金反应,未发现裂纹等缺陷生成.为分析方便,将接头界面组织分为 I, II, III 三个反应区.并对上述区域中典型组织进行能谱分析,结果见表 1.然后对界面区域进行 XRD 分析(图 2).结合 EDS 及 XRD 分析结果最终确定界面反应产物.

由图 1b、图 2 及表 1 可知,反应区 I 是介于钎

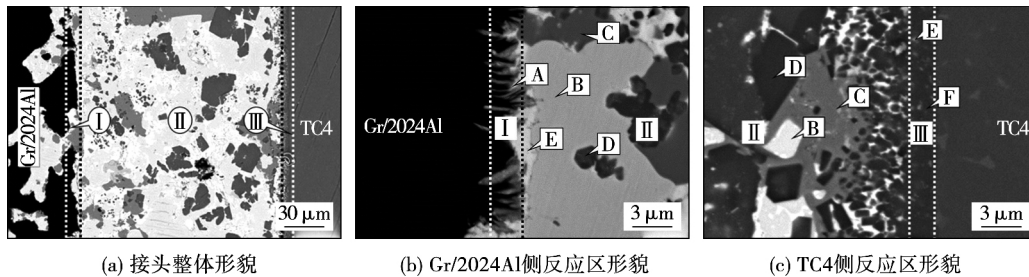


图 1 680 °C/10 min 时接头界面形貌

Fig. 1 Interfacial microstructure of joint brazed at 680 °C/10 min

表 1 图 1 中不同区域内各点 EDS 成分分析(质量分数, %)

Table 1 EDS results of chemical compositions of each point in Fig. 1

序号	Al	Ag	Sn	Ti	Cu	Fe	可能相
A	22.1	1.6	1.6	70.4	2.8	1.5	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub>
B	39.0	54.0	1.0	0.5	4.7	0.8	Ag <sub>2</sub> Al
C	64.2	1.2	0.5	4.8	29.8	0.5	Al <sub>2</sub> Cu
D	59.9	1.1	2.7	22.3	13.2	0.8	Al <sub>5</sub> CuTi <sub>2</sub>
E	2.8	68.9	23.9	0.3	4.1	—	Ag <sub>3</sub> Sn
F	60.4	3.0	1.6	20.5	11.4	3.1	Al <sub>5</sub> CuTi <sub>2</sub>

料和 Gr/2024Al 复合材料之间的化合物层,该层主要由 Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub><sup>[7]</sup> 组成.反应区 II 占据钎缝大部分区域,如图 1b 和图 1c,该区主要由大片的浅灰色 Ag<sub>2</sub>Al 相、灰色的 Al<sub>2</sub>Cu 相、深灰色的 Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub> 相以及絮状白亮的 Ag<sub>3</sub>Sn 相组成.图 1c 中 III 区为一连续的反应层,结合图 2 及表 1 分析结果可知,其主要由大量的 Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub> 及少量的 Ag<sub>3</sub>Sn 相组成.

综上所述,当钎焊温度 680 °C,保温时间 10 min 时,接头的界面结构从 Gr/2024Al 复合材料至 TC4 侧,可依次表示为: Gr/2024Al/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ag<sub>2</sub>Al +

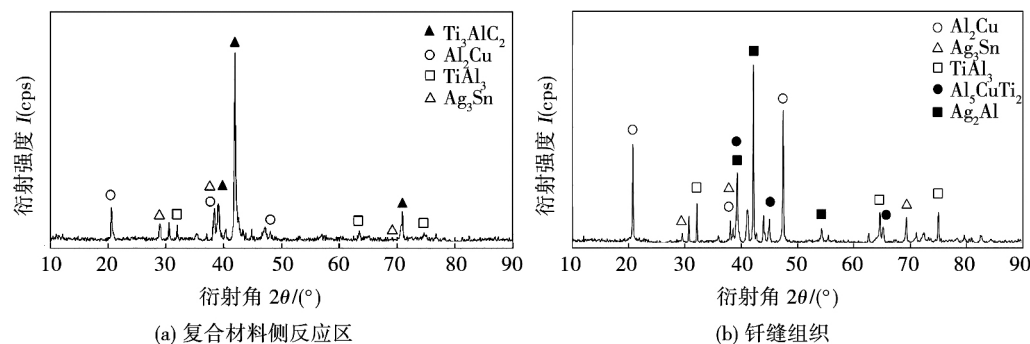


图 2 680 °C/10 min 时接头的 XRD 分析结果

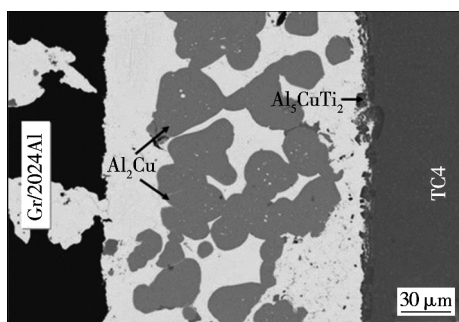
Fig. 2 XRD pattern of joint brazed at 680 °C/10 min

Ag<sub>3</sub>Sn + Al<sub>2</sub>Cu + Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub>/Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub> + Ag<sub>3</sub>Sn/TC4.

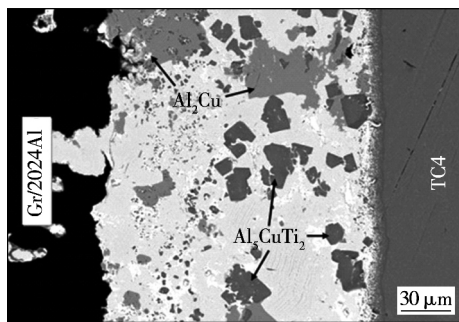
### 2.2 钎焊温度对接头界面结构的影响

图 3 为不同钎焊温度下 Gr/2024Al 复合材料/

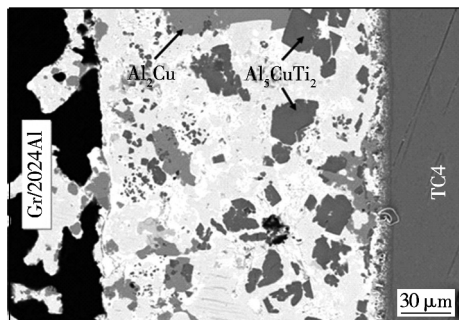
TC4 钎焊接头界面组织形貌.可以看出,当钎焊温度较低时(640 °C),界面中部存在大片 Al<sub>2</sub>Cu 化合物,由于此时 TC4 母材向界面中溶解的 Ti 元素含量



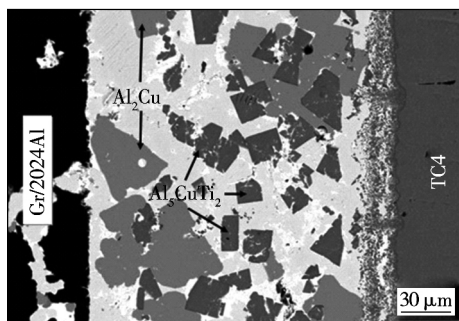
(a) 钎焊温度640 °C



(b) 钎焊温度660 °C



(c) 钎焊温度680 °C



(d) 钎焊温度700 °C

图3 不同钎焊温度的 Gr/2024Al/TC4 接头界面结构

Fig. 3 Interfacial microstructure of joints brazed for 10 min

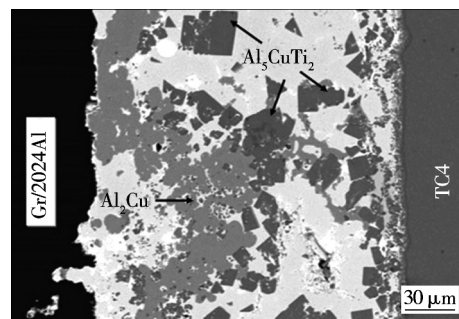
较少,界面中  $\text{Al}_2\text{Cu}$  向  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  的转化受到抑制, TC4 侧  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  反应层极薄,如图 3a 所示;随着钎焊温度升高到 660 °C,母材中 Al、Ti 等元素在界面处向钎缝中溶解程度加大,同时液态钎料中元素扩散能力提高,生成的化合物数量增加,体积减小,分布弥散,如图 3b 所示;当钎焊温度为 680 °C 时,界面化合物分布愈加弥散,TC4 侧  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  层厚度增加,如图 3c 所示;进一步提高钎焊温度至 700 °C 时,接

头界面如图 3d 所示,母材中的 Al、Ti 等元素向液态钎料的溶解量高,这些元素与液相中 Cu 元素等发生剧烈反应生成大量  $\text{Al}_2\text{Cu}$  及  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物,TC4 侧  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  反应层增厚,使接头组织脆化。

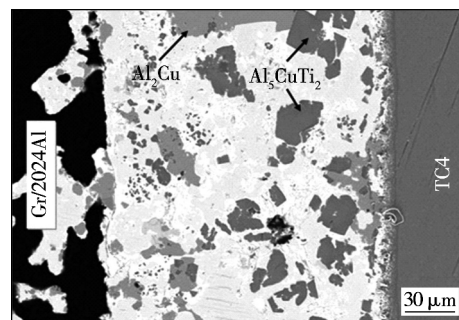
### 2.3 保温时间对接头界面结构的影响

图 4 为不同保温时间下,Gr/2024Al 复合材料/TC4 钎焊接头组织背散射形貌。

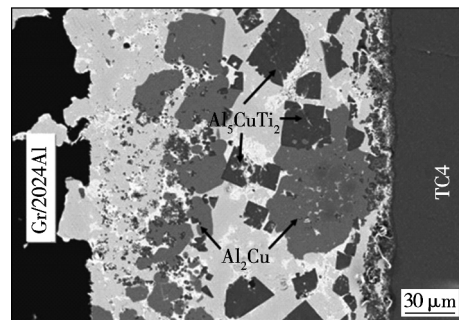
可以看出,保温时间为 5 min 时,钛向钎料中的



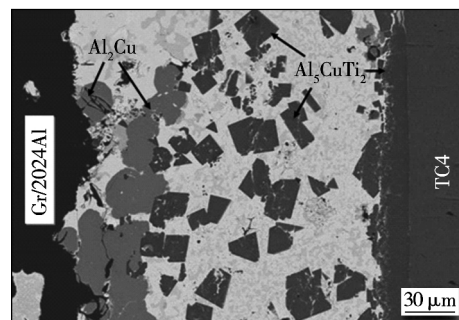
(a) 保温时间5 min



(b) 保温时间10 min



(c) 保温时间15 min



(d) 保温时间20 min

图4 不同保温时间的 Gr/2024Al/TC4 接头界面结构

Fig. 4 Interfacial microstructure of joints brazed at 680 °C

溶解量较少,只有少量区域生成  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物,界面中  $\text{Al}_2\text{Cu}$  化合物只有很少一部分被消耗,靠近复合材料一侧有大片的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  化合物存在,如图 4a 所示;当保温时间延长至 10 min 时,钛向钎料中溶解增多,界面中  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物也增多,而  $\text{Al}_2\text{Cu}$  化合物相应减少,不再成大片状, $\text{Al}_2\text{Cu}$  与  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  都呈弥散分布,如图 4b 所示;当保温时间进一步延长, $\text{Al}_2\text{Cu}$  进一步减少, $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物继续长大,如图 4c 所示;当保温时间为 20 min 时,界面中有大片的  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物存在, $\text{Al}_2\text{Cu}$  化合物只在界面中部分区域存在,且紧靠  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物边缘,见图 4d。

## 2.4 工艺参数对接头性能的影响

图 5a 所示保温时间为 10 min,钎焊温度对接头抗剪强度影响,可知,随着钎焊温度升高,接头抗剪强度呈现先升高后降低的变化趋势,当钎焊温度为 680 °C 时,接头抗剪强度获得最大值,为 17 MPa,该强度为 Gr/2024Al 复合材料强度的 70%。

与钎焊温度对接头抗剪强度的影响相似,当钎焊温度固定为 680 °C,随着保温时间的延长,接头的抗剪强度也是先升高后降低,当保温时间为 10 min 时,获得最高抗剪强度为 17 MPa,见图 5b。

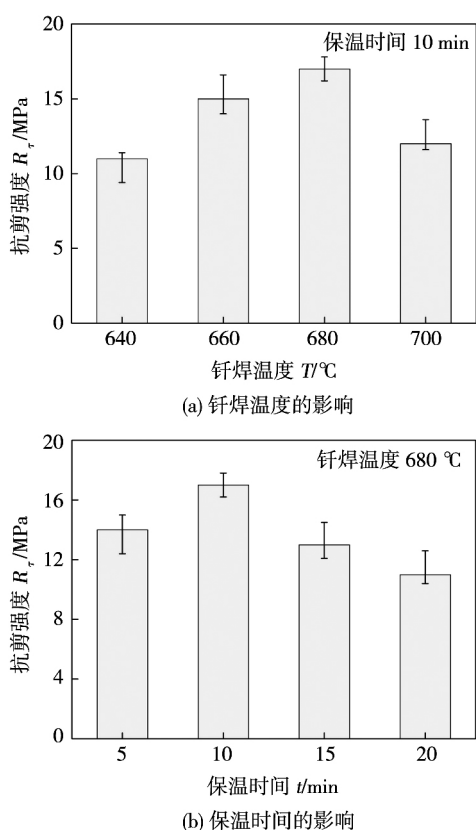


图 5 钎焊工艺参数对接头抗剪强度的影响

Fig. 5 Effect of brazing process on shear strength

钎焊工艺参数对接头抗剪强度产生上述影响的

原因是,当钎焊温度较低或保温时间较短时,液态钎料与复合材料中的铝的反应剧烈,生成的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  化合物在界面中呈片状分布,使接头性能变差。随钎焊温度或保温时间延长,钛向钎缝内溶解增多, $\text{Al}_2\text{Cu}$  被消耗生成  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$ ,从而界面处弥散有  $\text{Al}_2\text{Cu}$  与  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$ 。当钎焊温度为 680 °C,保温时间 10 min 时,界面中这两种化合物弥散强化作用最为明显,接头抗剪强度最高。当钎焊工艺参数继续升高时,TC4 母材向钎缝中溶解的钛更多,导致  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物长大并逐渐连成片状及在 TC4 侧形成较厚的  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  反应层,由于其硬度大、塑性差,接头中存在较大的残余应力,接头抗剪强度较低。

## 3 结 论

(1) 采用自配的 AgCuSnTi 钎料可成功实现 Gr/2024Al 复合材料和 TC4 合金的连接,当钎焊温度为 680 °C,保温时间为 10 min 时,接头可获得最高抗剪强度 17 MPa,该强度为 Gr/2024Al 复合材料母材强度的 70%。

(2) 接头的界面结构从 Gr/2024Al 复合材料至 TC4 侧可表示为 Gr/2024Al/ $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ / $\text{Ag}_2\text{Al} + \text{Ag}_3\text{Sn} + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{Al}_5\text{CuTi}_2$ / $\text{Al}_5\text{CuTi}_2 + \text{Ag}_3\text{Sn}$ /TC4。随钎焊工艺参数的增加,TC4 母材溶解到钎缝中的钛增多, $\text{Al}_2\text{Cu}$  易与钛发生反应生成  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  化合物,且该化合物由最初的弥散状聚集生长成大片状,TC4 侧  $\text{Al}_5\text{CuTi}_2$  反应层也增厚,最终降低接头抗剪强度。

## 参考文献:

- [1] 姜 鹤. Gr-Al-Mg 复合材料抗热震与抗烧蚀性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [2] 朱 艳,王永东,赵 霞. 石墨与铜真空钎焊接头的组织与强度[J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 81-84.  
Zhu Yan, Wang Yongdong, Zhao Xia. Microstructure and strength of graphite and copper brazed joints in vacuum[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 81-84.
- [3] 卢金斌,徐九华. Ag-Cu-Ti 钎料钎焊金刚石的界面微观组织分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 29-32.  
Lu Jinbin, Xu Jiuhua. Microstructure of interface between Ag-Cu-Ti brazing filler metal and diamond[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 29-32.
- [4] 秦优琼,冯吉才,张丽霞. C/C 复合材料与 TC4 钎焊接头的组织与断裂形式分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 13-16.  
Qin Youqiong, Feng Jicai, Zhang Lixia. Microstructure and fracture properties of carbon/carbon composite and TC4 titanium alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 13-16.

[下转第 38 页]

表 3 所示.

表 3 沸腾硝酸法腐蚀试验结果  
Table 3 Corrosion test results with boiling nitric acid method

接头	腐蚀前质量 $M_0/g$	腐蚀后质量 $M/g$	腐蚀速率 $K/(10^{-7} g \cdot mm^{-2} \cdot h^{-1})$
A-TIG 焊	2.490	2.419	2.74
TIG 焊	2.650	2.580	2.70

从表 3 中数据可看出, A-TIG 焊接头和 TIG 焊接头腐蚀速率相当, 活性剂的加入并没有降低焊缝的抗腐蚀性能.

### 3 结 论

(1) 430 不锈钢刀背和“三明治”(3Cr13-4Cr17-3Cr13) 不锈钢刀刃可以通过 A-TIG 焊进行焊接, 焊缝成形美观, 可以实现单面焊接双面成形.

(2) 和常规 TIG 焊相比, A-TIG 焊能够有效减小熔宽, 显著增加熔深; 未出现气孔, 夹杂等缺陷.

(3) 活性剂加入未对接头的拉伸力学性能及其抗腐蚀性能造成不良影响.

#### 参考文献:

- [1] Klas W. Welding processes handbook [M]. Wood Head Publishing Company, 2003.
- [2] Gurevich S M, Zamkov V N. Nekotorye osovennosti svarki titana neplaviachimsia zlektrodoms primeneniem flynssov [J]. Avtomati-Cheskaya Svarka, 1966, 12(1): 13-16.
- [3] 张瑞华, 尹 燕, 水谷正海, 等. 激光辅助活性焊接法 [J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 21-24.  
Zhang Ruihua, Yin Yan, Mizitani Katayama, *et al.* Laser aided

activating TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 21-24.

- [4] 杨春利. 表面活性剂对 TIG 焊电弧现象及焊接熔深的影响 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(12): 43-46.  
Yang Chunli. Effect of surface active flux on welding pool depth and phenomenon in TIG welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(12): 43-46.
- [5] 张瑞华, 樊 丁, 尹 燕. 低碳钢高效 TIG 焊活性剂研究 [J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(4): 8-10.  
Zhang Ruihua, Fan Ding, Yin Yan. Development of efficient activating flux for TIG welding of low-carbon steel [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2001, 27(4): 8-10.
- [6] 魏艳红, 徐艳利. A-TIG 焊接熔深增加机理的研究 [J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 37-40.  
Wei Yanhong, Xu Yanli. Mechanism of increasing welding penetration with A-TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 37-40.
- [7] 张瑞华, 樊 丁. 低碳钢 A-TIG 焊活性剂焊接性 [J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 85-87.  
Zhang Ruihua, Fan Ding. The weldability of activating flux for A-TIG welding of mild steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 85-87.
- [8] 张瑞华, 尹 燕, 水谷正海, 等. 活性剂钨极惰性气体保护电弧焊接熔池行为的观察 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 115-118.  
Zhang Ruihua, Yin Yan, Mizitani Katayama, *et al.* Observations of molten pool behavior during A-TIG welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 115-118.
- [9] 胡礼木, 胡 波, 张永宏, 等. 不锈钢 A-TIG 焊接头的抗腐蚀性能分析 [J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 34-36.  
Hu Limu, Hu Bo, Zhang Yonghong, *et al.* Analysis of corrosion resistance of A-TIG welded joint for austenitic stainless steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(7): 34-36.

作者简介: 尹 燕, 女, 1973 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 主要研究方向为高效焊接技术及焊接物理. 发表论文 30 余篇.  
Email: yinyan@lut.cn

#### [上接第 34 页]

- [5] 谢凤春. 石墨与铜的钎焊机理及新型低温活性钎料的制备 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [6] Hsieh Y C, Lin S T. Microstructural development of Cu-Sn-Ti alloy on graphite [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2008, 446: 126-132.
- [7] Song I, Kim D K, Hahn Y D, *et al.* Investigation of  $Ti_3AlC_2$  in the in situ TiC-Al composite prepared by the exothermic reaction

process in liquid aluminum [J]. Materials Letters, 2004, 58: 593-597.

作者简介: 石俊秒, 男, 1990 年出生, 博士研究生. 主要从事钎焊, 新材料连接研究工作. 发表论文 1 篇. Email: shijunmiao-1990@163.com

通讯作者: 张丽霞, 女, 教授. Email: zhanglxia@hit.edu.cn

crack initiation and propagation of welded joint , finite element method was used to calculate the stress concentration and stress intensity factor around the pores. Finally , the characteristics of fatigue crack initiation and propagation with welding defects were discussed.

**Key words:** welded joint; aluminium alloy; super high cycle fatigue; pore; stress intensity factor

#### **Effect of laser power on arc behavior and metal transfer in laser-twin-wire pulsed MIG hybrid welding process**

ZHANG Xiaofeng<sup>1</sup> , LI Huan<sup>1</sup> , YANG Lijun<sup>1</sup> , GAO Ying<sup>2</sup> ( 1. Tianjin Key Laboratory of Joining Technology , Tianjin University , Tianjin 300072 , China; 2. Tianjin Key Laboratory of High-speed Cutting & Precision Machining , Tianjin Vocational and Technical Normal University , Tianjin 300222 , China) . pp 23 – 26 , 62

**Abstract:** Laser-twin-wire pulsed MIG hybrid welding is a new welding technology which combines laser welding and twin-wire MIG welding. As one of the most important factors in this technology , laser power has significant effect on the welding procedure and properties of joint. A laser-twin-wire pulsed MIG hybrid welding system was established to investigate the effect of laser power on arc behavior and metal transfer in this process. High-speed photography system with synchronous electrical signal , including current and voltage signals , were adopted to record the arc behavior and metal transfer during welding. The results showed that the arc shape and stress status of the droplet were affected by the interaction between laser-induced plasma and arc plasma. With the increase of laser power , the laser-arc attraction was enhanced , the component force of plasma stream force in the vertical downward which could promote droplet transfer reduced. As a result , the droplet transfer frequency decreased.

**Key words:** laser-twin-wire pulsed MIG hybrid welding; metal transfer; arc behavior; high-speed photography

#### **Morphology of molten pool based on shadow during high-power laser deep penetration welding**

ZHANG Yanxi , GAO Xiangdong ( School of Electromechanical Engineering , Guangdong University of Technology , Guangzhou 510006 , China) . pp 27 – 30

**Abstract:** The morphology of molten pool , especially the volume of molten pool can not be measured directly by the current measurement methods. In this study , surfacing welding of thick 304 stainless steel plate with high-power disk laser welding was conducted. With extra auxiliary infrared laser light and high-speed camera , clear images of the molten pools and their shadows were obtained , and then the shadow area of molten pool was extracted to be analyzed by one-dimensional linear regression equation and correlation coefficient analysis method. The experimental results confirmed that the shadow area variation of molten pool had positive correlation with welding quality , and this provided a new method for test of welding quality.

**Key words:** high-power disk laser welding; shadow of molten pool; morphology of molten pool; welding quality

#### **Activating brazing of Gr/2024Al composite material to TC4 titanium alloy with Ag-Cu-Sn-Ti filler**

SHI Junmiao<sup>1</sup> , ZHANG Lixia<sup>1</sup> , LI Hongwei<sup>1</sup> , TIAN Xiaoyu<sup>1</sup> , FENG Jicai<sup>1,2</sup> ( 1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology , Harbin Institute of Technology , Weihai 264209 , China) . pp 31 – 34 , 38

**Abstract:** Gr/2024Al composite material and TC4 titanium alloy were successfully brazed with self-developed Ag-Cu-Sn-Ti filler alloy , and the interfacial microstructure and mechanical properties of the brazed joints were investigated. The results show that the typical interfacial structure of brazed joint was Gr/2024Al composite material/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ag<sub>2</sub>Al + Ag<sub>3</sub>Sn + Al<sub>2</sub>Cu + Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub>/Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub>/TC<sub>4</sub> titanium alloy. With the increasing of brazing temperature and extending of dwelling time , the amount of Al<sub>2</sub>Cu compounds decreased but the amount of Al<sub>5</sub>CuTi<sub>2</sub> increased and it finally grew into bulk in the brazed seam. While brazed at 953 K for 10 min , the joint obtained maximum shear strength of 17 MPa at room temperature.

**Key words:** Gr/2024Al composite material; TC4; Ag-Cu-Sn-Ti filler; interfacial microstructure; shear strength

#### **Weldability of dissimilar steels for high-end cutting tools with A-TIG welding**

YIN Yan<sup>1</sup> , LIU Zhao<sup>1</sup> , SUN Peng<sup>1</sup> , ZHANG Ruihua<sup>2</sup> , LI Jihui<sup>3</sup> ( 1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China; 2. China Iron & Steel Research Institute Group , Beijing 100081 , China; 3. Yang Jiang ShiBaZi Group , Yangjiang 529500 , China) . pp 35 – 38

**Abstract:** In TIG welding of high-end cutting tools , the entire tools must be preheated. A-TIG welding was selected in this paper to weld 430 stainless steel knife back and sandwich ( 3Cr13-4Cr17-3Cr13) stainless steel blade , and study the effect of fluxes on the weld shape. The differences between A-TIG and conventional TIG on the weld penetration , pores in the weld , microstructure , mechanical properties and corrosion resistance of the joint were studied in this paper. The results show that satisfied joint with excellent weld appearance between 430 stainless steel knife back and sandwich ( 3Cr13-4Cr17-3Cr13) stainless steel blade could be achieved by A-TIG welding. No defects were detected in the joint and the grains in weld were refined. The HAZ was very narrow and the tensile strength of joint was 606 MPa. The activating flux did not reduce the corrosion resistance of welded joint.

**Key words:** A-TIG welding; dissimilar steels; microstructure; mechanical property

#### **Effect of detonation velocity on interface and properties of Al/Ti composite tube under explosive welding**

DENG Wei<sup>1,2</sup> , LU Ming<sup>2</sup> , XU Qian<sup>2</sup> ( 1. 63981 Unite of PLA , Wuhan 430311 , China; 2. College of Field Engineering , PLA Univ. of Sci. & Tech. , Nanjing 210007 , China) . pp 39 – 42

**Abstract:** To obtain low detonation velocity explosive , commercial attenuant was blended into the emulsion explosive.