

TiAl 合金与 GH3039 高温合金的摩擦焊接

李娜^{1,2}, 杜随更¹, 王松林¹, 王晋伟³

(1. 西北工业大学, 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安, 710072; 2. 平凉职业技术学院, 平凉, 744000;
3. 中国北方发动机研究所, 大同, 037036)

摘要: 对 TiAl 合金与 GH3039 高温合金异种材料进行了摩擦焊接工艺试验. 基于接头的拉伸性能, 初步优化了焊接工艺参数. 采用扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 对焊接接头组织、焊合区成分变化及接头连接机理进行了分析. 结果表明, TiAl 合金与 GH3039 高温合金两种异种材料摩擦焊接具有可行性, 在摩擦焊接过程中热力耦合的作用下, GH3039 侧热力影响区塑性变形较大, TiAl 合金侧热力影响区变形较小; TiAl 合金与 GH3039 高温合金摩擦焊接连接界面两侧的合金元素发生了扩散, 形成了复杂的层状金属间化合物组织结构; 断于 TiAl 合金母材的焊接接头断口属于典型的脆性断口.

关键词: TiAl 合金; GH3039 高温合金; 摩擦焊接; 异种材料

中图分类号: TG 453+.9

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20190717003

0 序言

柴油发动机的涡轮增压器大多采用 K418 或 GH2132 涡轮与 42CrMo 结构钢转轴结构^[1], 这种结构涡轮材料比重和整体质量大, 从而导致转子系统的转动惯量大, 使发动机的瞬态响应性变差, 功率损失加大. 为了解决上述问题, 减小转子系统, 特别是涡轮的转动惯量是最根本的解决途径.

TiAl 合金因其密度远小于高温合金, 而室温和高温比强度却好很多, 室温韧性也比陶瓷材料好, 其优异的高温力学性、抗氧化性和较好的环境抗力, 被认为是高推比航空发动机和火箭推进系统极具潜力的新型材料, 同时也适宜于发动机高温隔热、高温运动部件, 如废气涡轮增压器中涡轮的制造.

关于 TiAl 合金的连接, 国内外已开展了包括电子束焊接、摩擦焊接、钎焊、自蔓延高温合金焊接等工艺的大量研究, 并取得了一定成果^[2-5]. 但是对于 TiAl 合金与结构钢转轴的连接研究较少. 姜明智等人^[6]采用过盈连接的方式对 TiAl 合金轴与 K418 合金套的连接进行了研究, 发现要实现连接强度的稳定性, 需控制加热时间、径向轴跳和

TiAl 合金轴表面粗糙度 3 个参数. Takuya^[7]对 TiAl 合金进行了摩擦焊接试验, 研究发现, 焊接接头包含 3 个区域, 接头抗拉强度达到 560 MPa. Ventzke 等人^[8]研究了 TiAl 合金和 Ti6Al4V 摩擦焊接, 指出焊接前后热处理是必须的, 接头拉伸强度主要取决于 TiAl 合金母材而不是连接界面. 赵全忠^[9]研究了 TiAl 合金与结构钢的摩擦焊接技术, 发现由于界面脆性相的形成, TiAl 合金与结构钢直接摩擦焊很难获得性能较好的接头. 王忠平等人^[10-11]采用 Inconel 718 作为中间层对 TiAl 合金和 42CrMo 进行了三体摩擦焊. 研究发现, 当中间层厚度介于 0.9~1.1 mm 时, 焊后接头抗拉强度可达到 360 MPa 左右. Zhu 等人^[12]研究了钎料结晶条件对 TiAl 合金和 42CrMo 真空钎焊的影响. Lee 等人^[13]将 Cu 作为中间层对 TiAl 合金和 AISI4140 钢进行了摩擦焊接试验, 发现引入 Cu 可以改善二者的摩擦焊接性, 焊接强度可达到 375 MPa. Park 等人^[14-15]研究了 TiAl/Cu/SCM440 和 TiAl/Ni/SCM440 摩擦焊接接头的微观结构和力学性能, 发现焊接界面的结构取决于嵌入层金属的类型, 并且 IMC 层的厚度随摩擦时间而变化. Kumar 等人^[16]引入 OFC 作为夹层研究了 Ti-6Al-4V 和 SS304L 之间的摩擦焊接特性, 获得最高拉伸强度. Dong 等人^[17-18]讨论了热处理对 TiAl 合金与 40Cr 及 40CrMo 调质钢摩擦焊接头显微组织及力学性能的影响, 经过 580 °C 和 630 °C 保温 2 h 焊后热处理, 接头的抗拉强度大

幅提高. 李玉龙等人^[19]对 TiAl 合金与 42CrMo 钢的钎焊连接方式进行了研究, 结果表明在钎焊温度 1 123 ~ 1 273 K, 保温时间 120 ~ 1 500 s 范围内获得的 Al-Cu-Ti 系反应层在受外力作用下容易发生脆性断裂, 为接头的薄弱环节.

前期研究发现 TiAl 与 42CrMo 转轴的摩擦焊接性较差, 二者直接摩擦焊接很难获得优质的摩擦焊接接头, 加入中间层会改善它们的摩擦焊接性. 过渡层必须能兼顾两端母材性能, 比较后发现镍基变形高温合金 GH3039 中的镍能固溶大量 Co, Fe, Cr, Mo, W, V, Ti 和 Al 等元素, 高温性能 (弹性模量, 热膨胀率) 随温度的变化规律与 TiAl 合金较为匹配, 且与结构钢具有较好的摩擦焊接性. 故对 TiAl 与 GH3039 的摩擦焊接工艺进行研究, 对 TiAl 在涡轮增压器领域的实际应用有重要意义.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用 TiAl 合金棒材是由北京钢铁研究总院研究开发的铸造合金, 该合金通过真空感应悬浮炼制, 试棒采用金属模具浇注, 其化学成分见表 1. 铸态合金由长程有序面心立方 $L1_0$ (晶格常数 $c/a = 1.01 \sim 1.02$) 结构的 TiAl 相和约占 20% 体积分数的长程有序密排六方 DO_{19} 结构的 Ti_3Al 相组成. 铸态合金组织为两相平行排列的层片状组织, 铸态宏观组织基本上由沿散热方向 (如柱状铸锭中是垂直外圆面方向) 长大的柱状晶构成.

表 1 TiAl 化学成分 (原子分数, %)
Table 1 Chemical composition of TiAl alloy

Al	Cr	V	Ti
47	1.0	2.5	余量

GH3039 为单相奥氏体固溶强化合金, 在 800 ℃ 以下具有中等的热强性和良好的热疲劳性能, 冷成形和焊接性能良好, 热处理方式为: 固溶处理 (1 080 ℃, 空冷). 其化学成分见表 2.

表 2 GH3039 化学成分 (原子分数, %)
Table 2 Chemical composition of GH3039

C	Cr	Al	Ti	Fe	Mo	Nb
≤ 0.08	20.5	0.55	0.55	≤ 3.0	2.1	1.1

焊接所用 TiAl 合金和 GH3039 高温合金试样均为 $\phi 25$ mm 圆棒, 焊前将试样端面车削平整, 并用丙酮清洗端面.

1.2 试验设备及工艺参数

试验采用由西北工业大学开发的 C500 型连续驱动数控摩擦焊机进行焊接, 该焊机配备有工业控制计算机闭环控制系统, 能实现焊接过程参数 (焊接压力、转速、扭矩与轴向缩短量) 的实时检测、显示和控制, 主轴转速无级调节. 试验所采用的优化后焊接工艺参数见表 3. 焊后进行后续热处理, 热处理温度为 560 ℃, 时间为 45 min.

表 3 主要焊接工艺参数
Table 3 Main welding process parameters

始焊转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	摩擦压力 P_1/MPa	顶锻压力 P_2/MPa	摩擦时间 t/s
1 000	8	11.5	8

1.3 接头组织分析方法及设备

沿焊接接头纵向横截面取样, 采用不同的腐蚀剂对异种材料进行腐蚀. TiAl 一侧采用 5%HF + 10% H_2O + 85% H_2O ; GH3039 一侧采用 HNO_3 : $HCl = 1:3$. 采用 FM-800 型显微维氏硬度计对接头区域的宏观硬度分布进行测试, 试验载荷为 100 g, 加载时间为 10 s. 采用 Quanta FEG400 场发射扫描电子显微镜对典型断口进行分析, 以确定裂纹起源区、裂纹扩展的方向和断裂方式, 揭示断裂机理.

1.4 接头性能测试方法

采用 DDL300 电子万能试验机对焊接件接头的抗拉强度进行测试, 加载速度为 0.5 mm/min.

2 试验结果及讨论

2.1 焊接接头宏观形貌

摩擦焊接头宏观形貌如图 1 所示. 由图 1 可以看出左侧 TiAl 合金端几乎看不到宏观塑性变形, 而右侧 GH3039 端相对于 TiAl 合金发生了较大的塑性变形, 故焊接接头只在 GH3039 一侧形成了单侧飞边. 这是由于 TiAl 合金的高温强度远高于 GH3039, 当摩擦加热到 GH3039 的热塑性阶段, TiAl 合金依然保持了较高的高温强度, 并且 TiAl 合金为铸态组织, 不易发生塑性变形, 在摩擦压力的作用下, GH3039 侧的摩擦塑性变形不断发展, 顶锻后最终形成单侧飞边.

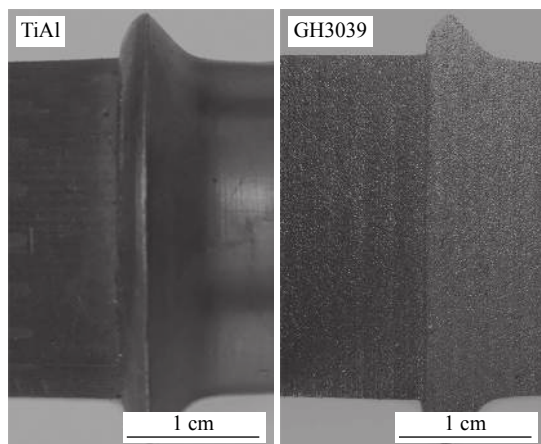


图 1 TiAl 与 GH3039 接头宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of TiAl and GH3039 joints

2.2 焊接参数优化

基于焊接接头的拉伸强度,对主要焊接工艺参数,如焊接转速、顶锻压力和焊后热处理时间等因素进行了单因素及正交优化试验.其中焊接接头拉伸强度随转速级别的变化规律如图 2 所示.

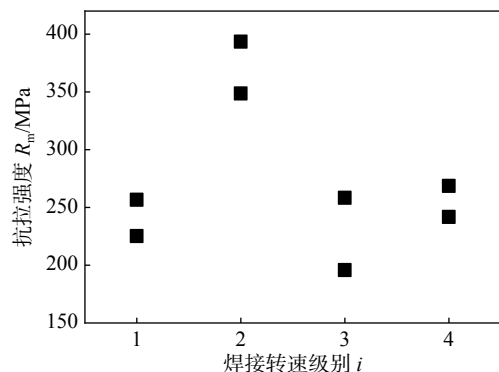


图 2 不同焊接转速下焊接接头的抗拉强度

Fig. 2 Tensile strength of welded joints at different welding speeds

由图 2 可以看出,不同焊接转速级别下焊接接头的抗拉强度差异较大,转速过低的同时焊接界面的温度也低,导致两侧母材之间的相互扩散程度低,不能形成有效的冶金结合,故接头拉伸强度低;转速过高的同时焊接界面温度也高,导致两侧母材之间的相互扩散程度高,形成了较厚的脆性中间合金相,故接头拉伸强度也低.只有当焊接转速级别为 2 时,焊接件的抗拉强度较高.说明焊接转速是影响 TiAl 与 GH3039 摩擦焊接头性能的一个关键因素,且其适用范围很窄.对其它焊接工艺参数也进行了类似的单因素试验和正交试验,详细试验过程及数据文中不再赘述.最终优化所得到的焊接工

艺参数为:焊接转速级别 2,摩擦压力 8 MPa,顶锻压力 11.5 MPa,焊后热处理温度 560 °C,热处理时间 45 min.

2.3 焊接接头硬度分布

对 TiAl 与 GH3039 试棒焊接接头横截面心部的硬度进行了测量,结果如图 3 所示.

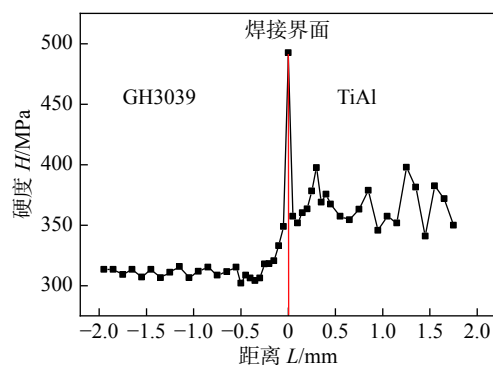


图 3 TiAl 与 GH3039 焊缝截面硬度分布 (HV0.1/10)

Fig. 3 Hardness distribution of weld cross section between TiAl and GH3039

由图 3 可以看出,焊接界面处硬度显著高于母材,表明此处形成了高硬度的第二相. GH3039 侧硬度均匀,靠近焊缝处热力影响区 (HMAZ) 硬度略有上升,应该与 HMAZ 组织变形与细化有关,但其范围很窄; TiAl 侧硬度跳动幅度较大,主要与压痕处片层取向有关.

2.4 焊接接头金相组织分析

TiAl 试棒与 GH3039 摩擦焊接接头的背散射组织如图 4 所示.

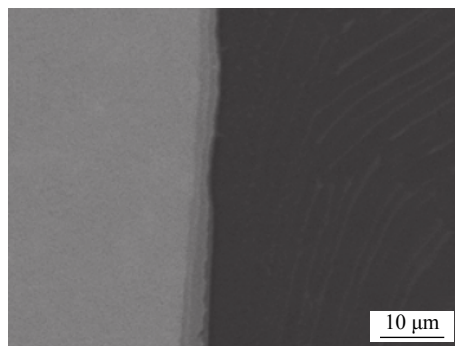


图 4 TiAl 与 GH3039 焊接接头显微组织形貌

Fig. 4 Microstructure of TiAl and GH3039 welded joints

由图 4 可以看出焊接界线,右侧为 TiAl 合金,左侧为 GH3039,焊合区域形成了明显的四层不同成分的层状组织结构. TiAl 母材组织为 $\alpha_2 + \gamma$ 相层片组织,近焊缝区的层片组织明显沿着焊缝方向发生了弯曲,说明摩擦焊接过程中, TiAl 近焊缝区也

发生了一定程度的塑性变形, 只是变形程度比 GH3039 低。

为了确定焊接区域组织成分, 对焊合区及附近区域做 SEM/EDS 线扫描, 结果如图 5 所示。

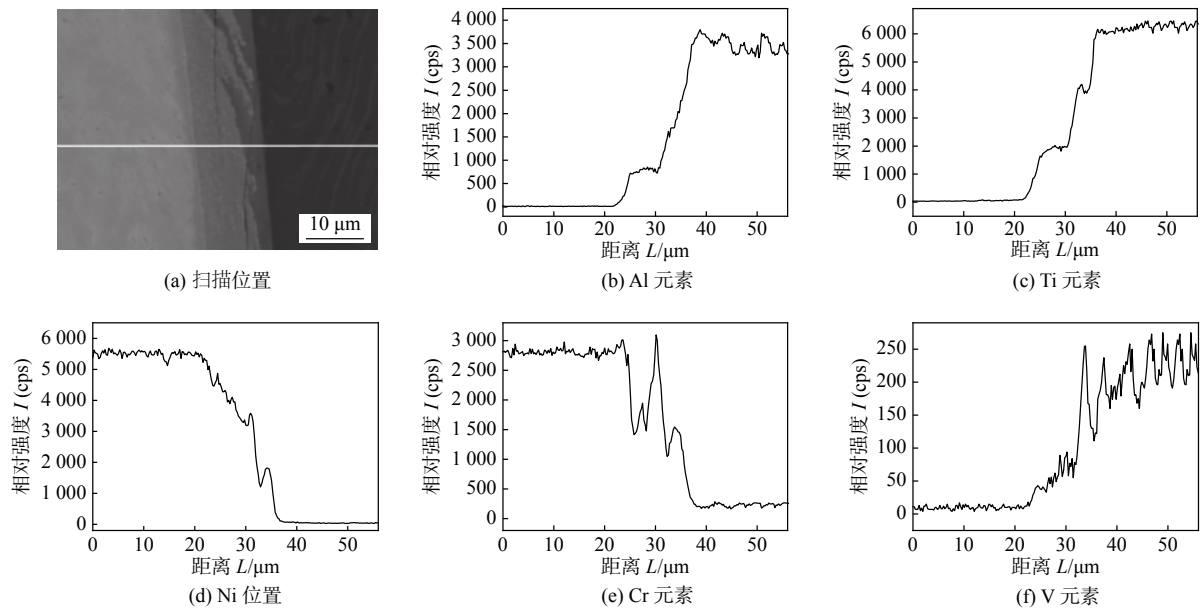


图 5 轴线附近焊合区及附近区域 SEM/EDS 分析

Fig. 5 SEM/EDAX of weld area near the axis. (a) scanning position; (b) Al element; (c) Ti element; (d) Ni element; (e) Cr element; (f) V element

从左侧 GH3039 高温合金开始, 沿试样轴向扫描到右侧的 TiAl 合金, 扫描长度大约为 56 μm , 主要合金元素 Al, Ti, Ni, Cr, V 的含量变化如图 5b ~ 5f 中曲线所示。由图 5a 可以看出焊后形成一个宽度约为 12 μm 的焊合区, 在焊合区左侧界线即扫描线长度约 24 μm 处, 合金元素开始发生显著变化, 说明元素已发生了扩散。GH3039 侧主要元素 Ni 逐步降低, 而 Cr 元素成分略有波动, 说明在焊合区域内形成了富 Cr 的第二相; TiAl 合金侧的主要元素 Ti, Al 在焊合区左侧存在一段平台区域, 说明在该位置有新相生成。在焊合区域靠近右侧边界的位置 Ni, Cr 元素含量显著下降, Ti, Al 元素突增, 直至过渡到 TiAl 母材。从整体来说, 在焊缝附近, 两侧合金元素发生扩散, 主要合金元素 Ti, Al, Ni, Cr 的浓度变化范围大, 原子半径、价电子浓度不同, 从而易于形成金属间化合物, 构成了复杂的焊合区域组织。

2.5 焊接接头拉伸断口扫描分析

焊后采用电子万能试验机对焊件进行拉伸性能测试。结果显示, TiAl 合金与 GH3039 棒材焊件的最高抗拉强度可以达到 400 MPa 左右, 焊接强度高时大部分焊接接头从 TiAl 合金母材一侧断裂, 说明焊接接头的抗拉强度已经大于 TiAl 合金母材强度。

断于 TiAl 母材的焊接接头断口宏观形貌如图 6 所示。由图可以看出, 断口参差不齐, 高低起伏, 没有塑性变形痕迹, 可清楚地观察到裂纹起源区, 并呈放射状花样向外围扩展, 有少量的河流花纹, 层片团中还夹杂少量白亮的 γ 晶粒解理面, 断面垂直于最大拉应力方向。

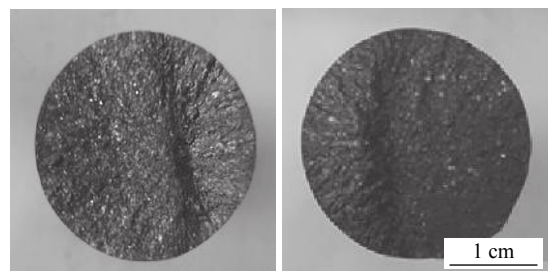


图 6 TiAl 母材断口两侧互补断面宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of complementary cross sections on both sides of fracture surface of TiAl base metal

上述断口的扫描分析结果如图 7 所示, 由试样断口的微观形貌可以看出, 断裂为脆性断裂, 断裂方式主要为穿层片断裂, 少量沿片层断裂, 以及部分沿 γ 晶粒解理断裂。

图 7a 为沿层片断裂; 图 7b 可以看到较多的沿层片断裂的解理面和穿层片断裂形貌, 断口裂纹源区有沿层片断裂的解理面; γ 晶粒解理断裂放大后

如图 7c、图 7d 为典型的穿层片断裂的断口形貌。TiAl 合金母材断口上看不到金属材料断口上常见

的韧窝形貌。上述断口形貌表明, TiAl 合金属于典型的脆性材料, 断裂时几乎没有塑性变形。

3 结论

(1) TiAl 合金与 GH3039 高温合金的异种材料摩擦焊接具有可行性。

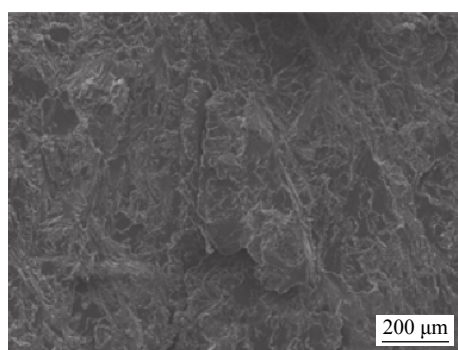
(2) 在摩擦焊接过程中热力耦合作用下, GH3039 侧热力影响区塑性变形较大, TiAl 合金侧热力影响区变形较小。

(3) TiAl 合金与 GH3039 高温合金摩擦焊接连接界面两侧合金元素发生了扩散, 形成了复杂的层状金属间化合物组织结构。

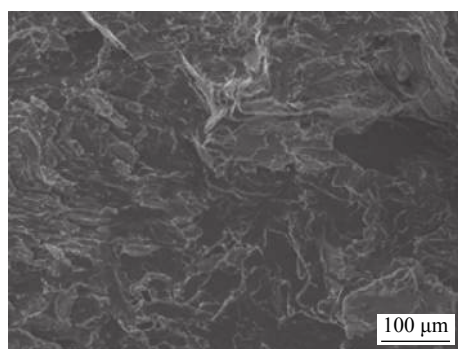
(4) 断于 TiAl 合金母材的焊接接头断口属于典型的脆性断口。

参考文献

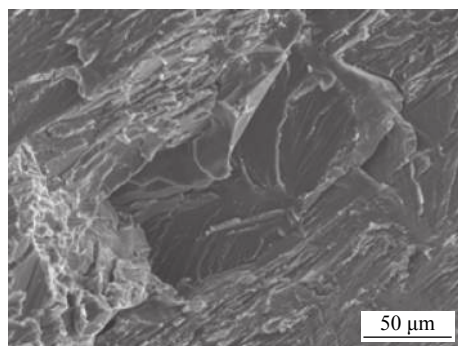
- [1] 杜随更, 傅莉, 王晋伟, 等. K418 高温合金与 42CrMo 钢异种金属摩擦焊接头碳化物带形成机制 [J]. 中国有色金属学报, 2003(2): 323 – 327.
Du Suigeng, Fu Li, Wang Jinwei, *et al.* Formation mechanism of carbide zone in K418 superalloy and 42CrMo steel dissimilar metal friction welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003(2): 323 – 327.
- [2] Yue Hangyu, Chen Yuyong, Wang Xiaopeng, *et al.* Microstructure, texture and tensile properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy produced by selective electron beam melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766: 450 – 459.
- [3] Xu Xiangjun, Lin Junpin, Guo Jian, *et al.* Friction weldability of a high Nb containing TiAl alloy[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(21): 3556 – 3562.
- [4] Simões Sônia, Soares Ana, Tavares Carlos José, *et al.* Joining of TiAl alloy using novel Ag-Cu sputtered coated Ti brazing filler[J]. Microscopy and microanalysis: the official journal of Microscopy Society of America, Microbeam Analysis Society, Microscopical Society of Canada, 2018, 25(1): 1 – 4.
- [5] Sun Wei, Yang Fei, Kong Fantao, *et al.* Interface characteristics of Ti6Al4V-TiAl metal-intermetallic laminate (MIL) composites prepared by a novel hot-pack rolling[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 173 – 181.
- [6] 姜明智, 朱春雷, 李海昭, 等. 改善 K418 合金套与 TiAl 合金轴过盈连接的稳定性研究 [J]. 机械制造, 2014, 52(9): 56 – 58.
Jiang Mingzhi, Zhu Chunlei, Li Haizhao, *et al.* Study on improving the stability of the interference joint between K418 alloy sleeve and TiAl alloy rods[J]. Machinery, 2014, 52(9): 56 – 58.



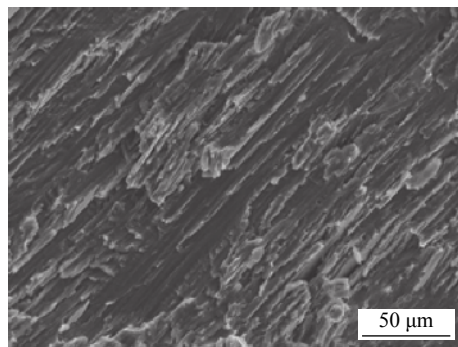
(a) 沿层片断裂断口形貌



(b) 沿层片断裂的解理面



(c) γ 晶粒的解理断裂



(d) 穿层片断裂断口形貌

图 7 TiAl 母材断口微观形貌

Fig. 7 Microscopic fracture morphology of TiAl base material. (a) fracture morphology along lamellar fracture; (b) cleavage surface along lamellar fracture; (c) cleavage fracture of γ -gain; (d) fracture morphology of through lamellar fracture

- [7] Takuya Miyashita, Haruki Hino. Friction welding characteristics of TiAl intermetallic compounds[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1994, 58(2): 215 – 220.
- [8] Ventzke V, Riekehr S, Horstmann M, *et al.* The development of the rotational friction welding process for the welding of γ -TiAl-casting alloy Ti-47Al-3[J]. Practical Metallography, 2014, 51(5): 321 – 352.
- [9] 赵全忠. TiAl 金属间化合物与结构钢摩擦焊接技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
- [10] 王忠平, 钟燕, 张立军, 等. TiAl 金属间化合物与 42CrMo “三体”摩擦焊成形控制 [J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(1): 50 – 53.
Wang Zhongping, Zhong Yan, Zhang Lijun, *et al.* Structural control of “three-body” friction welding of TiAl to 42CrMo[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2005, 41(1): 50 – 53.
- [11] 王忠平, 张立军, 周正航. 中间层厚度对 TiAl 金属间化合物三体摩擦焊接性的影响 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(3): 364 – 367.
Wang Zhongping, Zhang Lijun, Zhou Zhenghang. On the effect of the interlayer thickness on the three-body friction weldability of TiAl intermetallic compounds[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(3): 364 – 367.
- [12] Zhu Ying, Zhang Mo, Wang Guojian, *et al.* The effect of different crystal conditions of filler metal on vacuum brazing of TiAl alloy and 42CrMo[J]. China Welding, 2007, 16(4): 17 – 19.
- [13] Lee W B, Kim Y J, Jung S B. Effects of copper insert layer on the properties of friction welded joints between TiAl and AISI 4140 structural steel[J]. Intermetallics, 2004, 12(6): 671 – 678.
- [14] Park J M, Kim K Y, Kim K K, *et al.* Effects of insert metal type on interfacial microstructure during dissimilar joining of TiAl alloy to SCM440 by friction welding[J]. Metals and Materials International, 2018, 23(3): 626 – 632.
- [15] Park S H, Kim K Y, Park J M, *et al.* Interfacial properties of friction-welded TiAl and SCM440 alloys with Cu as insert metal[J]. Korean Journal of Materials Research, 2019, 29(4): 258 – 263.
- [16] Kumar R, Balasubramanian M. Experimental investigation of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer[J]. Defence Technology, 2015, 11(1): 65 – 75.
- [17] Dong Honggang, Yu Lianzhen, Deng Dewei, *et al.* Direct friction welding of TiAl alloy to 42CrMo steel rods[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(9): 1104 – 1108.
- [18] Dong Honggang, Yu Lianzhen, Gao Hongming, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction welds between TiAl alloy and 40Cr steel rods[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3126 – 3133.
- [19] 李玉龙, 吕明阳, 冯吉才, 等. 生成相性质及其对 TiAl 合金/42CrMo 钢钎焊接头力学性能影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 41 – 44.
Li Yulong, Lü Mingyang, Feng Jicai, *et al.* Characteristics of reaction phases and effects of phases on mechanical properties of TiAl/42CrMo steel brazed joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 41 – 44.

第一作者简介: 李娜, 1988 年出生, 硕士, 讲师; 主要从事摩擦焊接工艺及无人机教育方面研究. Email: linasyt@163.com.
通信作者简介: 杜随更, 教授; Email: fwcenter@nwpu.edu.cn.

(编辑: 崔炜)