

# TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织及力学性能分析

周军, 梁武, 张春波, 乌彦全

(哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028)

**摘要:** 针对固溶时效态 TC17 钛合金焊态及焊后热处理态线性摩擦焊接头, 进行显微组织及力学性能对比分析. 结果表明, 焊态时焊缝组织发生了回复与再结晶, 由于焊后冷却速度较快, 生成了亚稳定  $\beta$  相, 焊缝区发生了软化; 热影响区组织沿受力变形方向拉长、细化、交替呈带状分布, 加工硬化程度较高, 显微硬度明显高于其它区域; 热影响区由于二次次生  $\alpha$  相基本溶解于亚稳定  $\beta$  相, 导致显微硬度显著降低. 经过焊后热处理, 亚稳定  $\beta$  相发生时效分解, 析出了弥散程度更高的针状次生  $\alpha$  相使得焊接区硬度大幅度提高. 由于亚稳定相的生成, 焊态接头发生软化, 拉伸均断裂在焊缝区, 抗拉强度达到母材强度 91.8%, 断口呈脆性断裂形态; 焊后热处理态接头由于二次次生  $\alpha$  相的析出, 起到弥散强化的作用, 拉伸试验均断在母材, 断口呈典型韧性断裂形态.

**关键词:** 线性摩擦焊; 焊后热处理; 组织分析; 断口分析

**中图分类号:** TG 453

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20200408002

## 0 序言

航空发动机整体叶盘是指把发动机转子的叶片和轮盘通过机械加工或者焊接的方法制造成一体化结构, 无需加工榫头、榫槽; 不但减重效果明显, 而且消除了榫齿根部缝隙中的气体逸流损失, 避免了叶片和轮盘装配不当造成的磨损; 既是新一代航空发动机实现结构创新与技术提升的核心部件, 也是实现高推比、长寿命、低成本的关键结构; 已广泛的应用于 R.R. 公司、普惠公司生产的各型号发动机上. 线性摩擦焊接技术作为一种优质的固相焊接技术, 因其焊缝质量高、焊接过程绿色环保, 既可以实现空心叶片与轮盘的连接, 也可以实现异种材料整体叶盘的制造, 还可以对损坏的单个叶片进行修复等优点, 已经成为航空发动机整体叶盘制

造和修复的关键技术<sup>[1-5]</sup>.

TC17 是一种富  $\beta$  稳定元素的过渡型钛合金, 既具有  $(\alpha + \beta)$  型钛合金的特点, 也具有  $\beta$  型钛合金的特点, 具有强度高、断裂韧性好、锻造温度区间宽等优点, 被广泛的应用于制造航空发动机风扇和压气机盘件<sup>[6-7]</sup>. 文中将对 TC17 钛合金线性摩擦焊接头进行焊后热处理, 通过 OM、SEM、室温拉伸、断口分析、显微硬度等检测分析方法对焊态和焊后热处理态接头进行对比分析.

## 1 试验材料

试验材料选用 TC17 钛合金, 其化学成分如表 1 所示, 试件焊前经过高温固溶  $840\text{ }^{\circ}\text{C} + 4\text{ h}$ , AC; 固溶  $800\text{ }^{\circ}\text{C} + 4\text{ h}$ , WQ; 时效  $630\text{ }^{\circ}\text{C} + 8\text{ h}$ , AC 处理.

表 1 TC17 钛合金化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of TC17 titanium alloy

Al	Cr	Mo	Sn	Zr	Fe	O	Ti
5.43	4.26	3.99	2.07	1.95	0.117	0.112	余量

试验采用哈尔滨焊接研究院有限公司自主研发的 HWI-LFW-30 T 型线性摩擦焊机, 最大焊接

力 300 kN. TC17 钛合金焊接试件尺寸为  $20\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 焊接面积为  $(20 \times 15)\text{ mm}^2$ , 选用振幅 2 mm, 频率 35 Hz, 焊接压力 75 MPa, 焊接时间 3 s 的优化焊接工艺参数进行焊接. 焊后切除飞边, 截取 2 件金相试样和 4 件拉板, 其中 1 件金相试样

收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项 (2018ZX04010001)

和2件拉板进行焊态接头组织分析、硬度测试及常温拉伸性能测试,另1件金相试样和2件拉板经过焊后热处理后,再进行接头组织分析、硬度测试及常温拉伸性能测试。金相及拉伸试样取样位置如图1所示,焊后热处理制度为630℃、保温3h,空冷。对金相试样进行研磨、抛光、腐蚀后采用OM、SEM、显微硬度仪进行组织分析、硬度测试,拉板用电子拉伸试验机及进行常温拉伸试验。

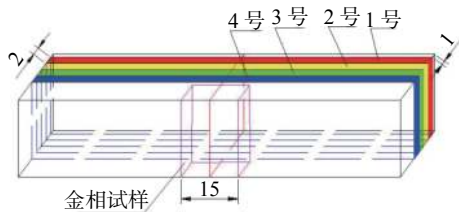


图1 金相及拉伸试样取样位置

Fig. 1 Sampling positions of metallography and tensile samples

## 2 试验结果及分析

### 2.1 母材组织

图2为经过高温固溶840℃+4h, AC; 固溶800℃+4h, WQ; 时效630℃+8h, AC处理的TC17钛合金母材组织。原β相晶粒较粗大,晶粒尺寸在0.5~1.5mm之间。在原β相晶界可见断续的网状晶界α相。原β相晶内β相基体上有大量α相。其中呈块状及形状不规则条状白色相为840℃高温固溶处理残留的初生α相;以一定的方向性分布在β基体上,呈典型网篮组织形态的α相是800℃固溶处理析出的一次次生α相;在初生和一次次生α相之间呈针状细小弥散分布的α相为630℃时效处理时析出的二次次生α相,二次次生α相对合金有很大的强化作用。

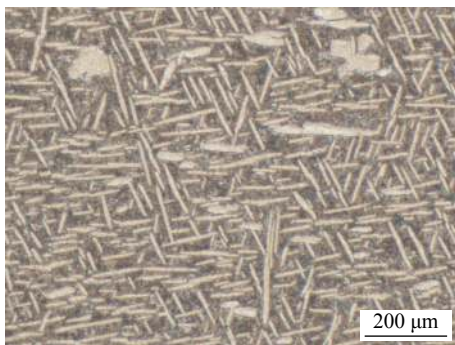


图2 母材组织

Fig. 2 Microstructure of base metal

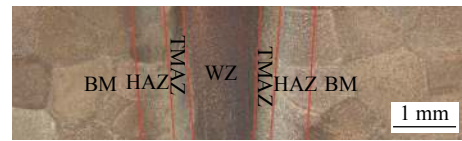
### 2.2 接头显微组织

#### 2.2.1 接头宏观组织形貌

图3所示为TC17钛合金线性摩擦焊接头低倍显微组织形貌,图3a为焊态接头形貌,图3b为焊后热处理态接头形貌。根据接头不同区域明暗程度和宏观组织特征,学者们一般把线性摩擦焊接头划分为母材区(BM)、热力影响区(TMAZ)和焊缝区(WZ),但从图3中可以观察到TC17线性摩擦焊接头中存在明显的焊接热影响区(HAZ)。从图2中可以看到,TC17母材晶粒较为粗大,晶粒尺寸在0.5~1.5mm之间,α相以针状形态分布在β基体上;热力影响区组织沿受力方向呈明显的流线型分布形态,经过焊后热处理,流线型分布形态趋势减弱;热影响区组织未见形变特征和晶粒长大特征。



(a) 焊态接头



(b) 焊后热处理态接头

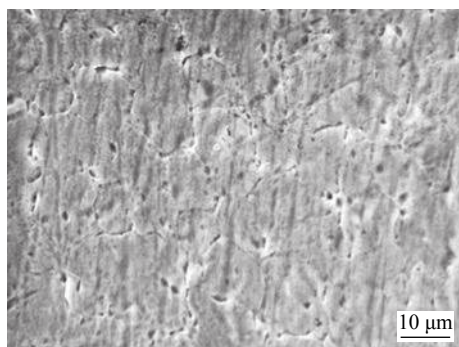
图3 接头宏观组织特征

Fig. 3 Macrostructure of joint. (a) welded joint; (b) PW-HT joint

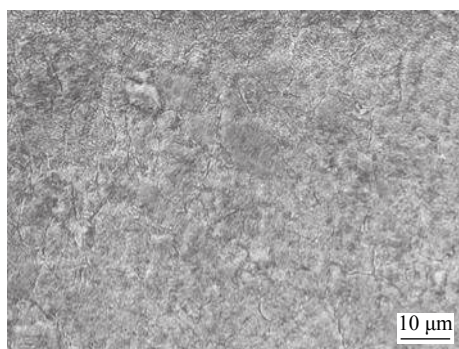
#### 2.2.2 焊缝区组织

图4为焊缝区组织。图4a所示为焊态接头焊缝区显微组织,由于线性摩擦焊接过程中,焊接界面温度超过了1200℃<sup>[8]</sup>,焊缝区整体温度超过TC17钛合金β转变温度895℃,焊缝区金属在高温及高变形的热力耦合作用下发生了动态再结晶,形成了典型再结晶等轴组织,晶粒尺寸10μm左右。但焊后冷却速度较快,β相来不及完全转变,以亚稳定形态保留至室温,仅在能量较高的晶界有少量α相以颗粒形式析出,形成不连续的晶界α相。SEM图片显示晶粒内部存在点状及条状模糊影像应是由于焊接过程很短,α相溶解后,一些合金元素来不及均匀化,耐腐蚀能力不足造成的;经过焊后热处理,焊缝区显微组织如图4b所示,亚稳定β相发生时效分解,形成了层片状或网篮状的次生α相+稳定的β相组织。





(a) 焊态



(b) 焊后热处理态

图 4 焊缝区组织

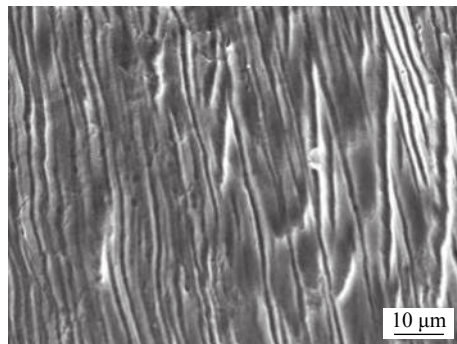
Fig. 4 Microstructure of WZ. (a) welded joint; (b) PWHT joint

### 2.2.3 热力影响区组织

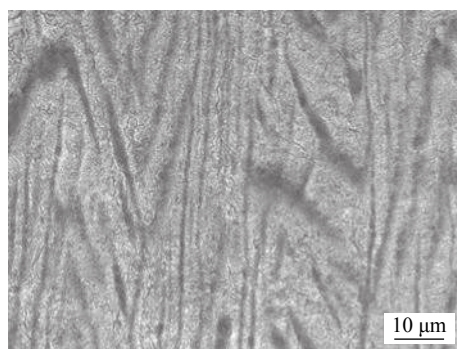
图 5 所示为热力影响区组织。其中图 5a 为焊态显微组织,从图中可以看出,热力影响区组织为亚稳定的  $\beta$  相,二次次生  $\alpha$  相已全部溶解,从相组成变化看,热力影响区焊接时所处温度区间应该在  $800 \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, $\beta$  和  $\alpha$  相受流变的作用发生严重变形,但部分  $\beta$  相晶粒发生再结晶,形成很多细小的等轴  $\beta$  相晶粒,已看不出变形形貌, $\alpha$  相变长、变细,细长  $\alpha$  相沿金属流动方向分布,清楚显示了变形情况。近焊缝的热力影响区由于温度高, $\alpha$  相溶解较多,数量较少,但形成的细小再结晶的  $\beta$  晶粒数量较多,近热影响区的热力影响区情况正相反。经过焊后热处理后,热力影响区组织如图 5b 所示,亚稳定  $\beta$  相析出细小的次生针状  $\alpha$  相弥散分布在  $\beta$  相基体上。

### 2.2.4 热影响区组织

图 6 为热影响区组织。图 6a 所示为焊态热影响区组织,与母材组织相比,原  $\beta$  相晶粒尺寸、次生及一次次生  $\alpha$  相数量和形貌未见变化,但二次次生  $\alpha$  相基本溶解于亚稳  $\beta$  相中,极少量二次次生  $\alpha$  相长大球化。经过焊后热处理的热影响区组织如图 6b 所示,原  $\beta$  相晶粒尺寸、次生及一次次生  $\alpha$  相未见明显变化,亚稳  $\beta$  相发生分解,变成  $\beta$  相+次生



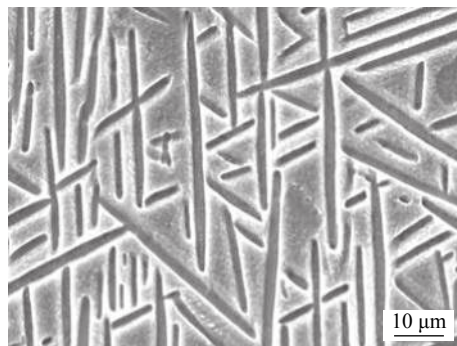
(a) 焊态



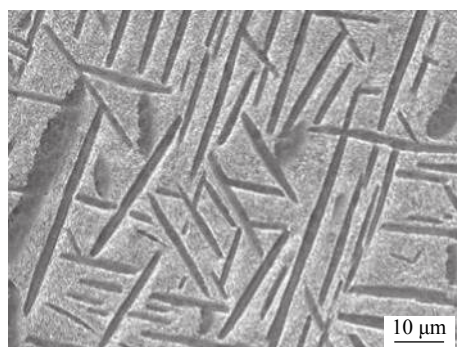
(b) 焊后热处理态

图 5 热力影响区组织

Fig. 5 Microstructure of TMAZ. (a) welded joint; (b) PWHT joint



(a) 焊态



(b) 热处理态

图 6 热影响区组织

Fig. 6 Microstructure of HAZ. (a) welded joint; (b) PWHT joint

$\alpha$  相,细小针状次生  $\alpha$  相弥散分布于  $\beta$  相基体上。

### 2.3 显微硬度分析

采用显微硬度仪对接头进行显微硬度 HV 0.5 测试,测试点间距 0.2 mm,测试结果见图 7。由图 7 可知,TC17 母材硬度为 375 HV 左右,焊态及时时效态硬度基本没有变化,表明 630 ℃ 保温 3 h 焊后热处理对母材的性能影响不大。焊态接头热影响区硬度为 320 HV 左右,焊缝区硬度为 340 HV 左右,热力影响区硬度与母材相当,表明热影响区和焊缝区存在两个明显的弱化区。在线性摩擦焊接过程中,金属内部同时进行着加工硬化和回复、再结晶软化两个相反的过程,以及可以明显影响合金性能的相变过程。在焊缝区,焊接过程使原来的  $\beta$  相 + 初次生  $\alpha$  相 + 网篮的一次次生  $\alpha$  相 + 细小针状二次次生  $\alpha$  相强化效果好的母材转变为强度比较低的亚稳  $\beta$  相等轴组织,虽然晶粒细化有一定强化作用,但再结晶使加工硬化状态消除<sup>[9]</sup>,所以出现硬度显著下降;而热力影响区组织变形程度较大,初次生  $\alpha$  相 + 网篮的一次次生  $\alpha$  相没有发生再结晶,保持高度硬化状态,基本抵消了二次次生  $\alpha$  相溶解带来的硬度损失;热影响区组织受焊接热循环作用,细小针状二次次生  $\alpha$  相几乎全部溶解,弥散强化消失,造成显微硬度显著降低。经过焊后热处理,焊缝区、热力影响区和热影响区中的亚稳定  $\beta$  相发生时效分解,析出了弥散程度更高的弥散分布的针状次生  $\alpha$  相,使得焊接区硬度大幅度提高。

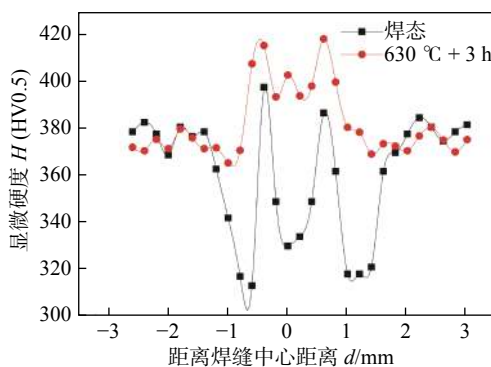


图 7 接头显微硬度

Fig. 7 Microhardness of joint

### 2.4 拉伸试验和断口分析

对热处理前后 TC17 钛合金线性摩擦接头进行室温拉伸力学性能试验,试验结果如表 2 所示,拉伸试件如图 8 所示。焊态焊接接头均断于焊缝区,时效态焊接接头断于母材。焊态焊接接头各项拉伸性能均低于时效态焊接接头。

表 2 接头拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results of joints

序号	试件状态	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{0.2}$ /MPa	断后伸长率 $A$ (%)
1	焊态	1036.5	1035.6	0.2
2	焊态	1083.7	1073.5	1.2
3	焊后热处理	1157.5	1098.2	6.0
4	焊后热处理	1152.6	1089.6	5.7



图 8 拉伸试件

Fig. 8 Tensile specimen

文中试验 TC17 钛合金母材抗拉强度为 1 155 MPa,相比于母材,焊态接头抗拉强度达到母材的 91.8%,焊态焊接接头强度低的原因如图 7 所示,焊接区由于二次次生  $\alpha$  相溶解带来的硬度和强度损失。经过焊后热处理由于针状弥散的次生  $\alpha$  相再次析出,接头抗拉强度显著提升,达到与母材相当。

对 TC17 焊态接头常温拉伸断口进行 SEM 分析,焊态断口形貌如图 9 所示。断口宏观形貌如图 9a 所示,断口主要由几个较大的断裂平面构成,断裂处没有颈缩,剪切唇非常窄,从宏观断口判断应属脆性断裂。为了更好地认识断口开裂特性,对具有典型区域 A 区和 B 区进行了高倍观察。如图 9b, 9c 所示, A 区断裂面非常平整,上面布满了按一定走向的撕裂棱,断裂性质应为准解理,沿一定的晶面开裂,撕裂棱应与  $\beta$  亚稳定相对应,撕裂棱围成的近长方形应与一次次生  $\alpha$  相相关;如图 9d, 9e 所示, B 区断口为韧窝+撕裂棱开裂,韧窝和撕裂棱呈平行走向,具有片层组织开裂特征。按上述断口特征,可以认为开裂位置处于热影响区和热力影响区。焊后热处理态拉伸断口如图 10 所示,通过高倍 SEM 观察,发现断裂面呈典型韧窝形态,属于韧性断裂。



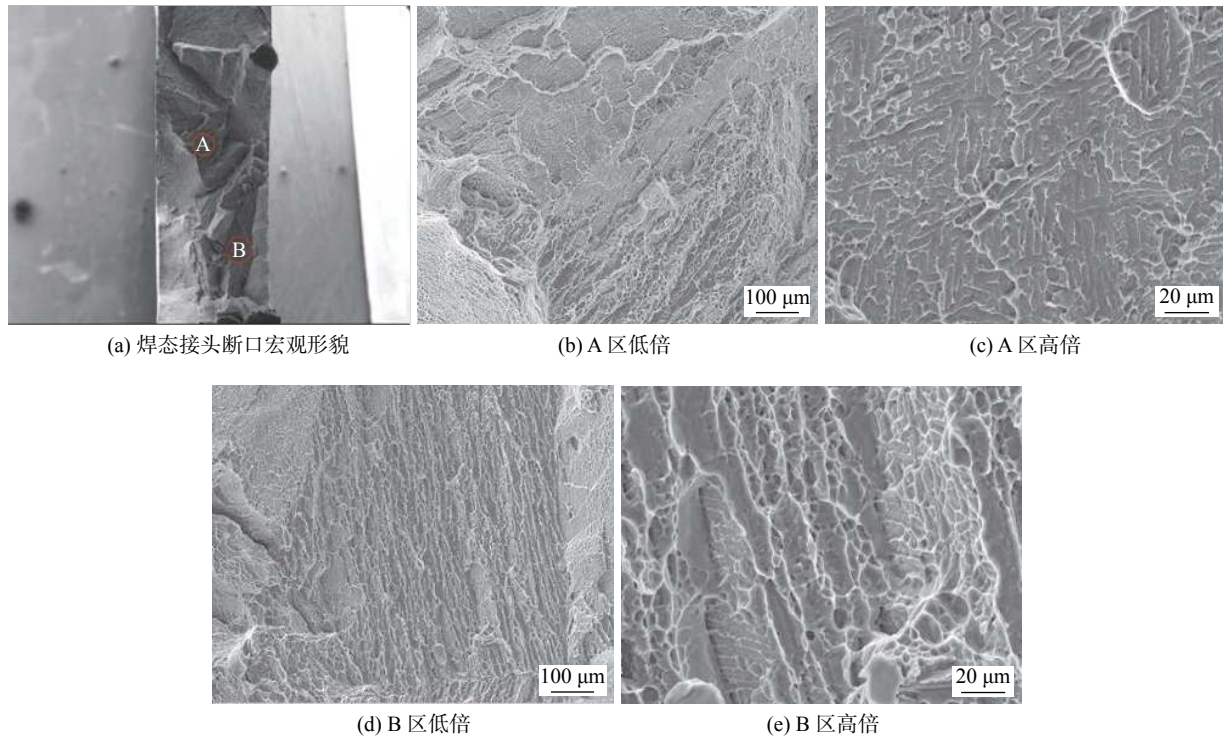


图 9 焊态断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of welded. (a) macro morphology of welded joint; (b) low power microstructure of A zone; (c) high power microstructure of A zone; (d) low power microstructure of B zone; (e) high power microstructure of B zone

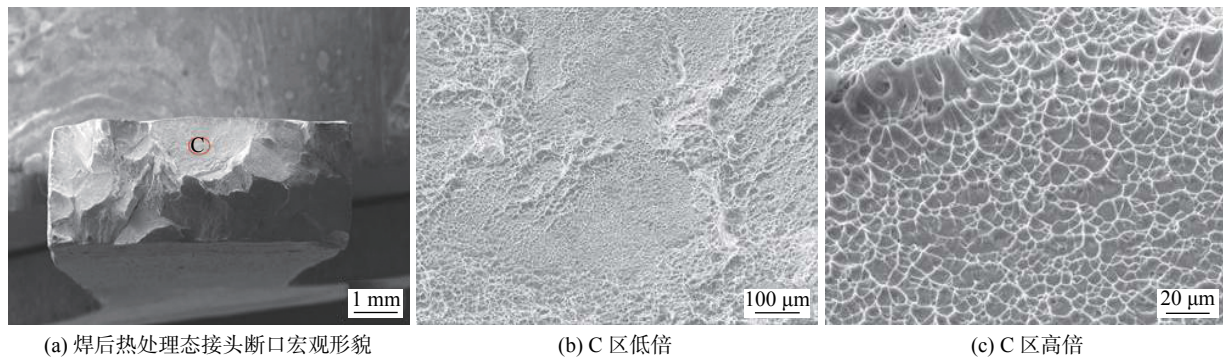


图 10 焊后热处理态断口形貌

Fig. 10 Fracture morphology of PWHT. (a) macro morphology of PWHT joint; (b) low power microstructure of C zone; (c) high power microstructure of C zone

### 3 结 论

(1) TC17 线性摩擦焊接头存在明显的热影响区, 并由于二次次生针状  $\alpha$  相的溶解使该区域发生软化, 显微硬度明显低于母材区。

(2) TC17 钛合金焊态接头存在焊缝区和热影响区两个明显的弱化区。焊缝区金相组织几乎全部为亚稳定  $\beta$  相, 导致该区域发生软化, 显微硬度显著降低。经过焊后热处理, 亚稳定  $\beta$  相发生时效析

出, 产生弥散分布的针状次生  $\alpha$  相和稳定  $\beta$  相, 显著提升焊缝区和热影响区硬度。热力影响区由于变形程度较高, 加工硬化现象显著, 显微硬度最高, 平均为 415 HV。

(3) TC17 焊态接头常温拉伸断裂在焊缝区, 平均抗拉强度为 1060.1 MPa, 属于脆性断裂, 在断面上存在典型热影响区和热力影响区开裂特征; 经过 630  $^{\circ}\text{C}$  焊后热处理, 常温拉伸均断在母材区, 属于韧性断裂。

## 参考文献

- [1] 周军, 张春波, 杜森, 等. 摩擦焊在航空领域的应用 [J]. 焊接, 2017(6): 1 – 5.  
Zhou Jun, Zhang Chunbo, Du Miao, *et al.* Application of friction welding in aviation[J]. Welding & Joining, 2017(6): 1 – 5.
- [2] 张田仓, 李菊, 何胜春, 等. 摩擦焊技术在航空发动机研制中的应用 [J]. 航空制造技术, 2014, 464(20): 69 – 71.  
Zhang Tiancang, Li Ju, He Shengchun, *et al.* Application of friction welding technology in aeroengine development[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014, 464(20): 69 – 71.
- [3] 郭德伦. 国外先进焊接技术在航空领域的应用进展 [J]. 航空制造技术, 2014(20): 62 – 64.  
Guo Delun. Application progress of foreign advanced welding technology in aviation[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014(20): 62 – 64.
- [4] 梁武, 张春波, 乌彦全, 等. 轻质异种材料摩擦焊研究现状 [J]. 焊接, 2008, 545(11): 19 – 25.  
Liang Wu, Zhang Chunbo, Wu Yanquan, *et al.* Research status of friction welding of lightweight heterogeneous materials[J]. Welding & Joining, 2008, 545(11): 19 – 25.
- [5] 季亚娟, 张田仓, 李晓红. TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织与性能 [J]. 航空制造技术, 2011(8): 58 – 61.  
Ji Yajuan, Zhang Tiancang, Li Xiaohong. Microstructure and performance of linear friction welding joint of TC11/TC17 titanium alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(8): 58 – 61.
- [6] 李菊, 张田仓, 郭德伦. 热处理对 TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) 线性摩擦焊接头组织及力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 97 – 100.  
Li Ju, Zhang Tiancang, Guo Delun. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded joints of TC17 ( $\alpha + \beta$ )/TC17 ( $\beta$ )[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 97 – 100.
- [7] 贺建超, 张田仓, 季亚娟, 等. 热处理对 TC4/TC17 线性摩擦焊接头组织与性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37(1): 188 – 191.  
He Jianchao, Zhang Tiancang, Ji Yajuan, *et al.* Effects of heat treatment on microstructure and properties of TC4/TC17 linear friction welding joints[J]. Journal of material heat treatment, 2016, 37(1): 188 – 191.
- [8] 赵鹏康. TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织与性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.  
Zhao Pengkang. Study on microstructure and performance of linear friction welding joint of TC11/TC17 titanium alloy [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [9] 崔忠圻, 刘北兴. 金属学与热处理原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.  
Cui Zhongqi, Liu Beixing. Principles of metallization and heat treatment [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.

第一作者简介: 周军, 1963 年出生, 研究员, 博士研究生导师; 主要从事摩擦焊接工艺及装备研究; 已发表论文 50 余篇; Email: [mch\\_zhoujun@126.com](mailto:mch_zhoujun@126.com).

(编辑: 杨婉春)