

# TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头相组成及织构分析

李晓红<sup>1,2</sup>, 张彦华<sup>1</sup>, 李赞<sup>2</sup>, 张田仓<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学, 北京, 100191;

2. 中国航空制造技术研究院, 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京, 100024)

**摘要:** 利用电子背散射衍射技术对 TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头测试并分析, 对接头各区域进行相鉴定和织构分析. 结果表明, 与母材相比, 焊态接头两侧热力影响区  $\alpha$  相减少,  $\beta$  相增多. 由于焊缝区冷却迅速快, 焊态焊缝处发生动态再结晶, 生成了大量的亚稳定  $\beta$  相晶粒. TC17( $\beta$ ) 侧母材及热力影响区的织构分布密度比 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧强, 且焊态焊缝区产生 (5 4 6)[1  $\bar{3}$  3] 织构, 轧面与 (1 1 1) 近似平行. 经过 610 °C 热处理后, 焊缝区亚稳定  $\beta$  相发生分解, 形成细小的次生  $\alpha$  相和  $\beta$  相. 与焊态焊缝相比, 热处理后焊缝区晶体稍有转动, 焊缝区织构强度较焊态有较大增强, 形成 (5 5 7)[ $\bar{11}$   $\bar{17}$  20] 织构. 热处理前后的焊缝区晶体取向都存在着 ND 方向与 [1 1 1] 靠近, 轧面与 (111) 接近平行的择优取向.

**关键词:** 线性摩擦焊; 钛合金; 电子背散射衍射; 织构

**中图分类号:** TG 453+.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190219002

## 0 序言

线性摩擦焊 (linear friction welding, LFW) 是一种集摩擦学、塑性加工等学科和技术为一体的先进固相焊接技术<sup>[1-2]</sup>. 线性摩擦焊能够实现非轴对称、复杂截面、同质及异质材料的固相焊接. 能有效防止熔焊中易出现的偏析、裂纹、气孔等问题, 成为当前国内外公认的理想航空发动机整体叶盘制造与维修的关键技术.

TC17 是一种富  $\beta$  稳定元素的  $\alpha$ - $\beta$  型两相钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr. TC17 钛合金既适用于在两相区进行常规锻造和近  $\beta$  锻造, 得到高周疲劳性能好的双态或者等轴组织; 又适用于在单相区进行  $\beta$  锻造, 获得具有抗裂纹扩展能力好的网篮组织<sup>[3]</sup>.

线性摩擦焊焊接过程的特殊性, 焊接时接头温度达到钛合金相变温度, 接头处发生剧烈地塑性变形, 接头产生较强织构. 目前国内外对于线性摩擦焊同种材料异种组织的钛合金接头织构分析还鲜有报道, 利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术研究钛合金线性摩擦焊接头织构与相分布, 进而分析线性摩擦焊接头织构及组织对力学性能的影响, 对于提高接头质量, 发展中国高推重比航空发动机具有重要意义<sup>[4]</sup>.

## 1 试验方法

试验采用两种锻造工艺的 TC17 钛合金. 两种材料的化学成分如表 1 所示. 一种为常规锻造下的 TC17 钛合金, 它具有双态组织; 另一种是  $\beta$  区锻造的 TC17 钛合金, 该母材具有网篮组织, 组织形貌如图 1 所示.

表 1 TC17 钛合金的化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of TC17 titanium

材料	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	Ti
TC17( $\alpha + \beta$ )	5.07	2.06	2.05	3.80	3.99	0.15	余量
TC17( $\beta$ )	5.10	2.0	1.90	4.10	3.9	0.04	余量

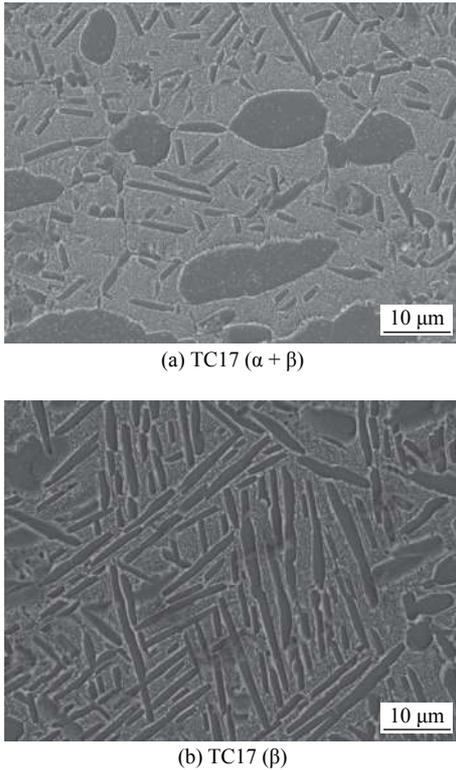


图 1 TC17 母材组织

Fig. 1 Microstructure of base metal. (a) TC17 ( $\alpha + \beta$ ); (b) TC17 ( $\beta$ )

60T 型线性摩擦焊机进行焊接试验. EBSD 试验采用 JSM 7001F 扫描电子显微镜配备 EDAX-TSL 系统, 获取到清晰的菊池花样后, 使用 EBSD 数据处理软件 EDAX-TSL 进行数据处理. EBSD 试验中, 试样测试面与水平方向倾斜, 如图 2 所示. 试验选取锻造方向 (RD) 为垂直焊接界面方向, 横向 (TD) 与法线方向 (ND) 组成的平面平行于焊接界面. 文中 EBSD 扫描时使用  $\beta$  相进行标定, 试样采用 610 °C 温度下, 保温时间 3 h, 随炉冷却的焊后热处理工艺 (PWHT).

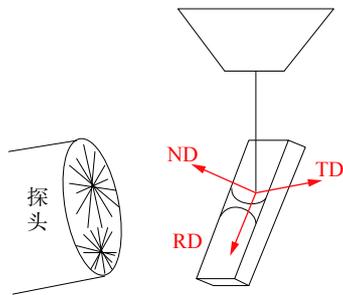


图 2 EBSD 试验样品坐标系

Fig. 2 Reference frame of specimen EBSD test

## 2 试验结果及分析

TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头

从组织特点上可分为 5 个区域<sup>[5]</sup>: TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材区 (BM)、TC17( $\alpha + \beta$ ) 热力影响区 (TMAZ)、焊缝区 (WZ)、TC17( $\beta$ ) 热力影响区、TC17( $\beta$ ) 母材区, 如图 3 所示.

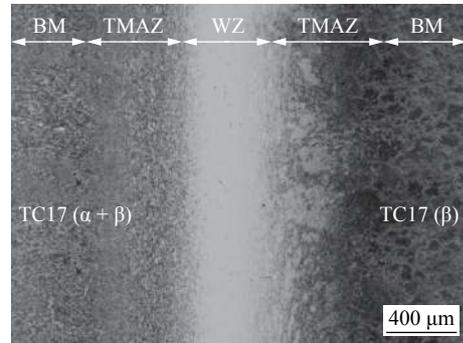


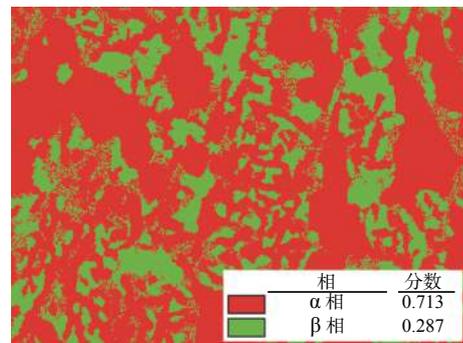
图 3 接头显微组织 (OM)

Fig. 3 Microstructure of joint

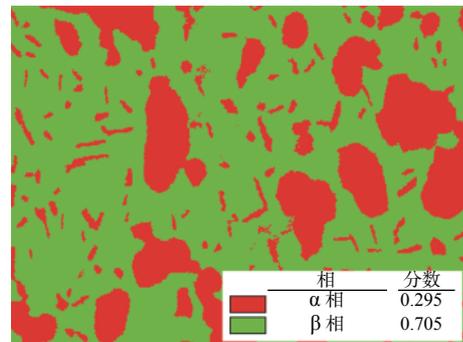
### 2.1 相鉴定

#### 2.1.1 焊态接头各区域相鉴定

EBSD 技术可以区分相的结晶学关系, 可对 7 大晶系任意对称的物质标定<sup>[6]</sup>. 接头各区域相分布及各相面积百分比如图 4 ~ 图 6 所示, TC17 钛合金由  $\alpha$  和  $\beta$  两相组成, 深色为  $\alpha$  相, 浅色为  $\beta$  相. 如图 4a 所示, TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材中  $\alpha$  相含量占 71.3%,



(a) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) 母材



(b) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) TMAZ

图 4 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧焊态接头相鉴定

Fig. 4 Phase of TC17( $\alpha + \beta$ ) side joint(as-weld). (a) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) BM; (b) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) TMAZ

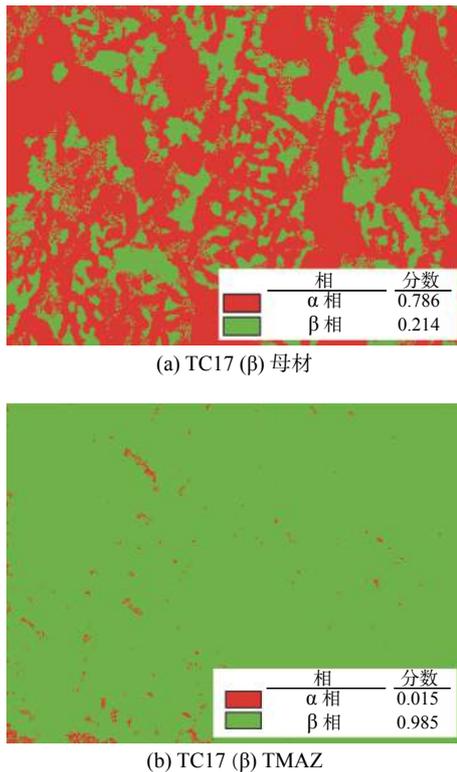
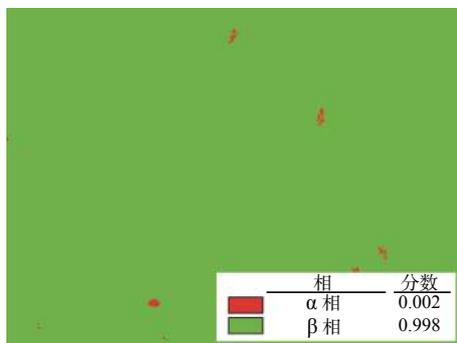
图 5 TC17( $\beta$ ) 侧焊态接头相鉴定Fig. 5 Phase of TC17( $\beta$ ) side joint(as-weld). (a) TC17 ( $\beta$ ) BM; (b) TC17 ( $\beta$ ) TMAZ

图 6 焊态焊缝中心区域相鉴定

Fig. 6 Phase of WZ(as-weld)

而  $\beta$  相含量占 28.7%。母材金属经过热和力的共同作用后, TMAZ 在  $\alpha + \beta$  相区温度内变形, 初生  $\alpha$  相分解生成  $\beta$  相。  $\alpha$  相含量下降,  $\beta$  相含量上升, 如图 4b 所示。 TC17( $\beta$ ) 母材和热力影响区相鉴定如图 5 所示, 因为母材是在  $\beta$  相区锻造, 该区域的网篮组织由大量的  $\alpha$  相构成,  $\beta$  相只占 21.4%。 焊接过程中, TC17( $\beta$ ) 热力影响区在  $\alpha + \beta$  相区温度范围内发生严重变形, 该区域发生动态再结晶, 网篮状  $\alpha$  相片层组织发生相变, 片层状  $\alpha$  转变为  $\beta$  相, 导致  $\beta$  相增多。

图 6 为焊态焊缝中心相鉴定图。 焊态下的焊缝

区域  $\beta$  相占 99.8%, 表明线性摩擦焊焊缝区域已经达到了  $\beta$  转变温度, 在焊后快速冷却的过程中, 由于焊缝冷却速度快, 焊缝处保留了大量的亚稳定  $\beta$  相晶粒, 但仍有微小的  $\alpha$  相晶粒在焊缝处依附杂质点优先形核。

### 2.1.2 热处理后接头各区域相鉴定

接头经过热处理后, TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧接头组织发生了明显变化, 如图 7 所示。 TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材中  $\beta$  转变基体的次生  $\alpha$  相片层细化, 初生  $\alpha$  相等轴化,  $\beta$  相含量增加。 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧热力影响区中  $\beta$  相中弥散析出  $\alpha$  相,  $\beta$  相含量降低。 热处理后 TC17( $\beta$ ) 侧接头相鉴定, TC17( $\beta$ ) 母材相鉴定如图 8a 所示, 网篮状的  $\alpha$  相层片厚度减小, 母材  $\alpha$  相含量提高。 经过热处理后 TC17( $\alpha + \beta$ ) TMAZ 中的  $\beta$  相分解析出层片状的  $\alpha$  相,  $\beta$  相含量大幅度降低,  $\alpha$  相含量提高到 60.3%, 如图 8b 所示。

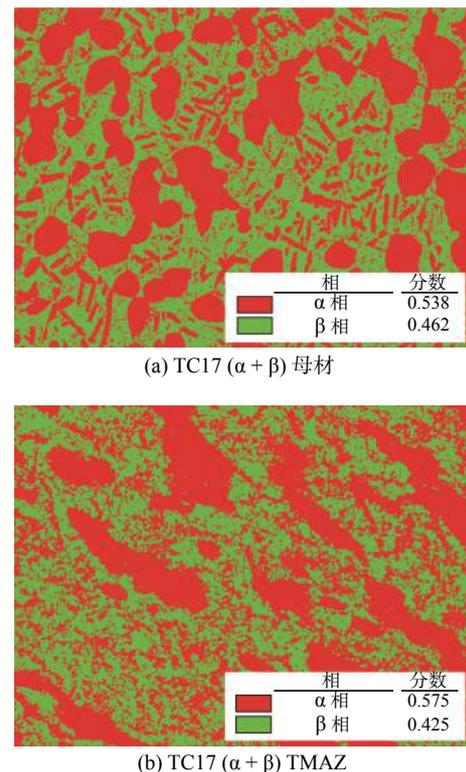
图 7 热处理后 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧接头相鉴定Fig. 7 Phase of TC17( $\alpha + \beta$ ) side joint(PWHT). (a) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) BM; (b) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) TMAZ

图 9 所示为热处理后的焊缝中心相分布图。 焊后热处理使得焊缝区动态再结晶生成的亚稳定  $\beta$  相分解, 再结晶晶粒内部为细小的次生  $\alpha$  相和  $\beta$  相。 其中  $\beta$  相含量较低,  $\alpha$  相含量高达 72.1%。 这是由于  $\beta$  相为高温相, 焊缝区金属经过 610  $^{\circ}\text{C}$  热处理后, 焊缝区两相组元平衡所致。

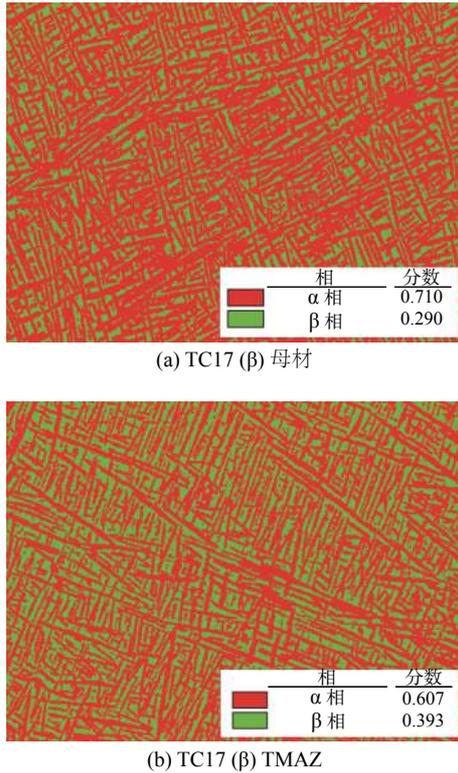


图 8 热处理后 TC17(β) 侧接头相鉴定

Fig. 8 Phase of TC17(β) side joint(PWHT). (a) TC17 (β) BM; (b) TC17 (β) TMAZ

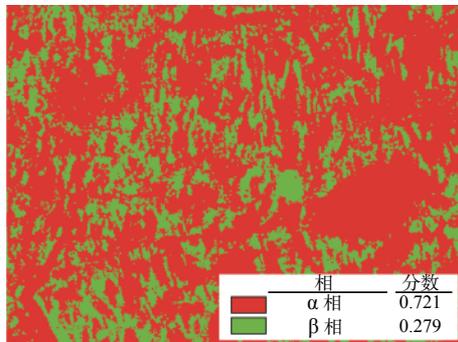


图 9 热处理后焊缝中心区域相鉴定

Fig. 9 Phase of WZ(PWHT)

## 2.2 TC17(α + β)/TC17(β) 接头各区域织构

### 2.2.1 焊态接头各区域织构

图 10 为焊态接头 TC17(α + β) 侧的取向分布函数 (ODF) 图。图 10a 为 TC17(α + β) 母材区域  $\varphi_2 = 75^\circ$  的 ODF 截面图, 从中可知该母材中主要织构为  $(15\ 4\ 5)[1\ \bar{1}0\ 5]$ , 这是母材在锻造过程中产生的织构。而图 10b 为 TC17(α + β) 热力影响区  $\varphi_2 = 70^\circ$  的 ODF 恒  $\varphi_2$  截面图, 对比图 10a 可知, TMAZ 中  $(9\ 3\ 22)[1\ \bar{3}\ 0]$  织构是由于焊接时, 母材受到热和力的共同作用, 晶体滑移、转动, 引起了该晶体的取向变化, 产生了热加工织构。焊态接头 TC17(β) 侧区域取向

分布函数图, 图 11a 所示为 TC17(β) 母材  $\varphi_2 = 45^\circ$  的 ODF 截面图。该母材中存在  $(1\ 1\ 1)[\bar{1}\ \bar{1}\ 2]$  的基面织构。因热力影响区发生动态再结晶,  $(1\ 1\ 1)[\bar{1}\ \bar{1}\ 2]$  的基面织构组分消失, 产生了  $(16\ 35\ 10)[35\ \bar{1}8\ 7]$  织构, 一定程度上反映出再结晶晶粒在焊接过程中吞噬  $(1\ 1\ 1)[\bar{1}\ \bar{1}\ 2]$  取向变形晶粒的现象, 如图 11b 所

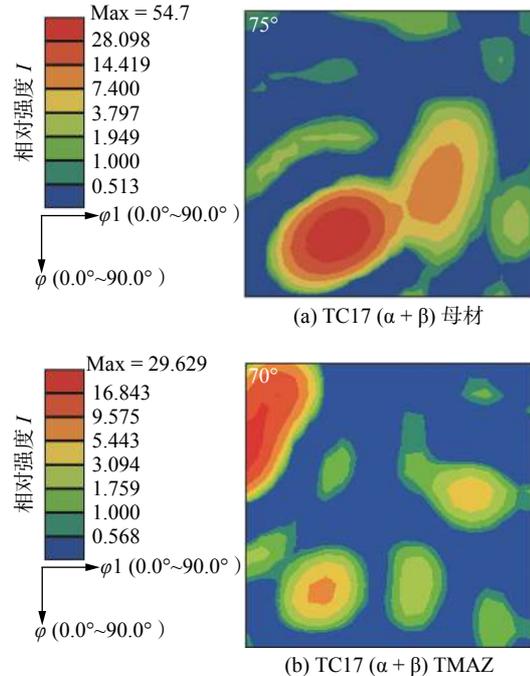


图 10 焊态接头 TC17(α + β) 侧区域取向分布函数图

Fig. 10 ODF of TC17(α + β) side joint(as-weld). (a) TC17 (α + β) BM; (b) TC17 (α + β) TMAZ

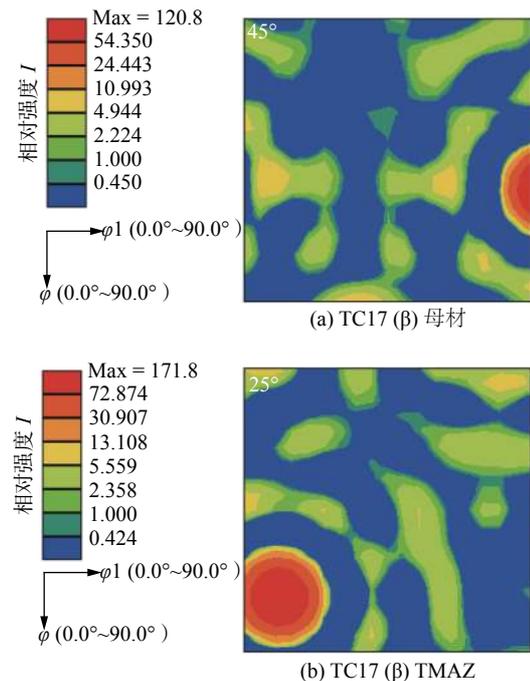


图 11 焊态接头 TC17(β) 侧区域取向分布函数图

Fig. 11 ODF of TC17(β) side joint(as-weld). (a) TC17 (β) BM; (b) TC17 (β) TMAZ

示. 由于具有网篮组织的 TC17( $\beta$ ) 母材有  $\alpha$  相集束, 所以接头 TC17( $\beta$ ) 侧织构分布密度比 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧强.

焊态焊缝处的取向分布函数截面图如图 12 所示. 焊接时, 在摩擦热的作用下, 焊缝区金属加热到粘塑性状态. 在随后的摩擦剪切力和顶锻力的共同作用下, 塑性金属被挤出焊接界面, 形成飞边, 焊缝区发生动态再结晶, 产生  $(5\ 4\ 6)[1\ \bar{3}\ \bar{3}]$  结构, 轧面与  $(1\ 1\ 1)$  平面近似平行. 由于塑性变形过程导致金属内生成变形织构, 动态再结晶过程会造成再结晶织构, 但因两过程同时或交替进行, 使两类织构均不能得到充分发展, 所以经过热变形后形成的焊缝区织构强度很弱.

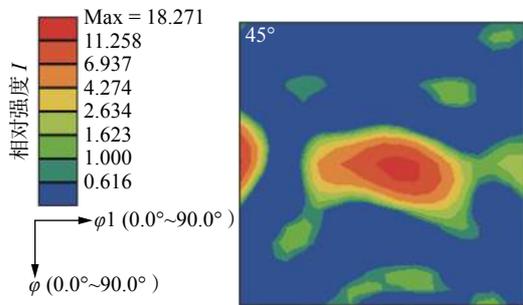


图 12 焊态焊缝中心取向分布函数图  
Fig. 12 ODF of WZ(as-weld)

### 2.2.2 热处理后接头各区域织构

线性摩擦焊在经过热处理后, 接头残余应力降低, 晶粒长大<sup>[7]</sup>; 同时焊缝区的亚稳定  $\beta$  相组织在热处理后, 发生相变, 生成  $\alpha$  相, 使得接头两侧热处理前后织构类型发生不同程度的改变, 如图 13 ~ 图 14 所示. 图 13a 和图 13b 分别为 TC17( $\alpha + \beta$ ) 母材和热力影响区  $\varphi_2 = 20^\circ$  ODF 截面图, 经过热处理后母材中主要织构为  $(3\ 10\ 19)[7\ \bar{4}\ 1]$ , 织构强度较焊态有所降低, 而 TC17( $\alpha + \beta$ ) 热力影响区中主要是  $(1\ 3\ 23)[16\ \bar{13}\ 1]$  织构. 这是因为线性摩擦焊焊接过程中, 热力影响区金属发生严重变形<sup>[8-10]</sup>, 晶格发生畸变, 变形组织结构中存在着以位错为主的晶体缺陷. 这使得热力影响区内保留了一定的储存能, 并成为再结晶的驱动力. 再结晶通常包含再结晶晶核的形成, 并涉及大角度晶界迁移的晶核生成过程. 热处理后畸变能释放, 高缺陷密度的变形基体被新晶粒取代. TC17( $\alpha + \beta$ ) 热力影响区中发生再结晶, 大量  $\alpha$  相晶粒形核且长大 (图 13b), 生成再结晶织构. 图 14a 所示为 TC17( $\beta$ ) 母材  $\varphi_2 = 80^\circ$  的 ODF 截面图, 该热处理后母材中存在  $(6\ 1\ 1)[\bar{2}\ \bar{9}\ 21]$  的织构. TC17( $\beta$ ) 热力影响区在热处理后晶体取向稍有

转动, 存在  $(6\ 18\ 1)[11\ \bar{4}\ 6]$  织构, 如图 14b 所示.

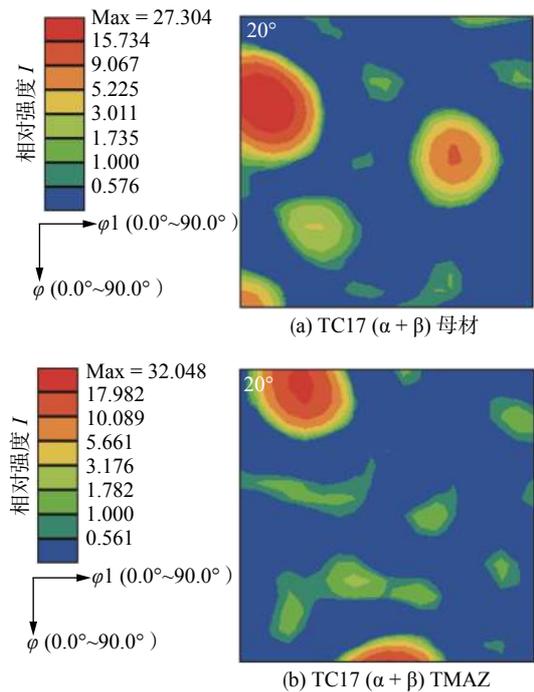


图 13 热处理后 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧区域取向分布函数图  
Fig. 13 ODF of TC17( $\alpha + \beta$ ) side joint(PWHT). (a) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) BM; (b) TC17 ( $\alpha + \beta$ ) TMAZ

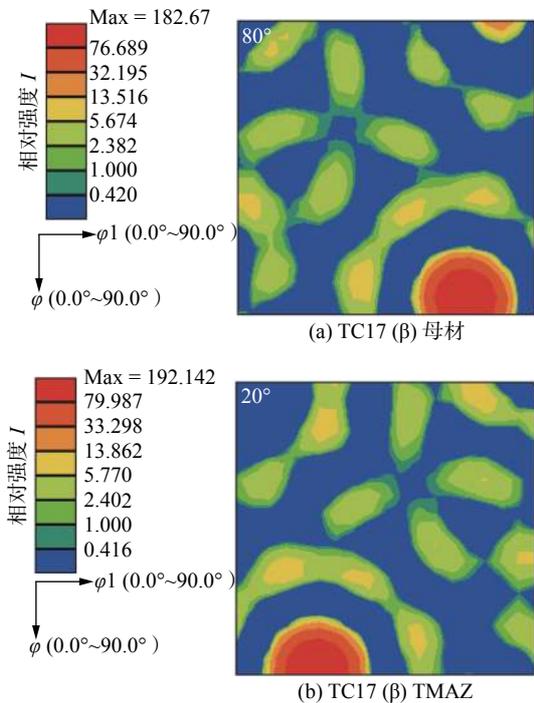


图 14 热处理后 TC17( $\beta$ ) 侧区域取向分布函数图  
Fig. 14 ODF of TC17( $\beta$ ) side joint(PWHT). (a) TC17 ( $\beta$ ) BM; (b) TC17 ( $\beta$ ) TMAZ

热处理后焊缝处的取向分布函数截面图如图 15 所示. 与焊态焊缝相比, 热处理后焊缝区晶体稍有转动, 焊缝区织构强度较焊态有较大增强, 形成  $(5\ 5\ 7)[\bar{11}\ \bar{17}\ 20]$  织构. 热处理前后的焊缝区晶

体取向都存在着 ND 方向与  $[1\ 1\ 1]$  靠近, 轧面与  $(111)$  接近平行的择优取向。

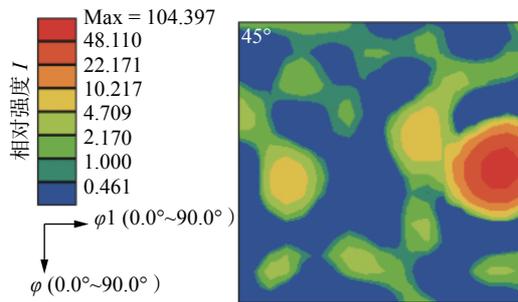


图 15 热处理后焊缝中心取向分布函数图  
Fig. 15 ODF of WZ(PWHT)

### 3 结论

(1) 利用电子背散射衍射技术, 对 TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头进行了相鉴定。接头两侧热力影响区  $\alpha$  相减少,  $\beta$  相增多。由于焊缝冷却速度快, 焊态焊缝处保留了大量的亚稳定  $\beta$  相晶粒。热处理后, 焊缝区动态再结晶生成的亚稳定  $\beta$  相发生分解, 形成细小的次生  $\alpha$  相和  $\beta$  相。

(2) 网篮组织的 TC17( $\beta$ ) 母材具有  $\alpha$  相集束, TC17( $\beta$ ) 侧母材织构分布密度比 TC17( $\alpha + \beta$ ) 侧母材强。焊态焊缝区产生  $(5\ 4\ 6)[1\ \bar{3}\ \bar{3}]$  织构, 轧面与  $(1\ 1\ 1)$  近似平行。

(3) 与焊态焊缝相比, 热处理后焊缝区晶体稍有转动, 焊缝区织构强度较焊态有较大增强, 形成  $(5\ 5\ 7)[\bar{1}\bar{1}\ \bar{1}\bar{7}\ 20]$  织构。热处理前后的焊缝区晶体取向都存在着 ND 方向与  $[1\ 1\ 1]$  靠近, 轧面与  $(111)$  接近平行的择优取向。

### 参考文献

- [1] Vairis A, Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V[J]. Materials Science and Engineering, 1999, 27(1): 477 - 484.
- [2] 常川川, 张田仓, 李菊. Ti-22Al-27Nb 合金线性摩擦焊接头组织与显微硬度分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 146 - 150.  
Chang Chuanchuan, Zhang Tiancang, Li Ju. Study on microstructure and microhardness of linear friction welded joints of Ti-22Al-27Nb alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(3): 146 - 150.
- [3] 田伟, 伏宇, 钟燕, 等. 锻造工艺对 TC17 钛合金的显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(9): 57 - 61.  
Tian Wei, Fu Yu, Zhong Yan, et al. Effects of forging process on microstructure and properties of TC17 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(9): 57 - 61.
- [4] 李菊, 张田仓, 郭德伦, 等. TC17( $\alpha + \beta$ )/TC17( $\beta$ ) 钛合金线性摩擦焊接头组织与力学性能[J]. 航空制造技术, 2015, 472(3): 68 - 70.  
Li Ju, Zhang Tianchang, Guo Delun, et al. Structure and mechanical property of TC17( $\alpha + \beta$ ) and TC17( $\beta$ ) linear friction welding joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 472(3): 68 - 70.
- [5] Anthony R McAndrew, Paul A Colegrove, Clement Bühr, et al. A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 225 - 257.
- [6] Ma T J, Zhong B, Li W Y, et al. On microstructure and mechanical properties of linear friction welded dissimilar Ti-6Al-4V and Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si joint[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2012, 17(1): 9 - 12.
- [7] Yang X, Li W, Li J, et al. Finite element modeling of the linear friction welding of GH4169 superalloy[J]. Materials & Design, 2015, 87: 215 - 230.
- [8] 张传臣, 张田仓, 刘颖. TA15 线性摩擦焊接头高周疲劳性能分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 105 - 108.  
Zhang Chuanchen, Zhang Tiancang, Liu Ying. Cycle fatigue properties of TA15 titanium alloy linear friction welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 105 - 108.
- [9] 季亚娟, 张田仓, 张连锋, 等. TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织及性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 156 - 160.  
Ji Yajuan, Zhang Tiancang, Zhang Lianfeng, et al. Structure and mechanical property of TC17 linear friction welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 156 - 160.
- [10] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 异质钛合金线性摩擦焊接头显微组织与显微硬度分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 97 - 100.  
Zhang Chuanchen, Huang Jihua, Zhang Tiancang, et al. Investigation on microstructure and microhardness of linear friction welded joints of dissimilar titanium alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 97 - 100.

第一作者简介: 李晓红, 1972 年出生, 博士, 研究员; 主要从事钛合金钎焊及线性摩擦焊方面的研究; 发表论文 20 余篇; Email: [lixhamti06@163.com](mailto:lixhamti06@163.com).

(编辑: 张亮)