

BT20 钛合金激光焊接接头的断裂韧性研究

Study on Fracture Toughness of Laser-welded
Joint for BT20 Titanium Alloy

钟 飞¹, 史耀武¹, 李晓延¹, 巩水利², 陈 俐²

(1 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022;

2 北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

ZHONG Fei¹, SHI Yao-wu¹, LI Xiao-yan¹, GONG Shui-li², CHEN Li²

(1 School of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2 National Key Laboratory for High Energy Density Beam

Processing Technology, Beijing Aeronautical Manufacturing

Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

摘要: 对 BT 20 钛合金及其激光焊接接头的断裂韧性进行了研究。同时分析了合金及激光焊接接头的硬度分布及显微组织。断裂实验表明, 除了一个焊接接头紧凑拉伸 (CT) 试样是脆性启裂外, 其它 CT 试样均在裂纹延性启裂并缓慢扩展后, 发生脆性失稳断裂。母材的断裂韧性明显高于焊接接头, 轧制方向对母材断裂韧性的影响不明显。焊接热影响区的断裂韧性介于母材和焊缝金属之间。本研究采用的焊后热处理没有改善焊接接头的断裂韧性, 还有进一步恶化的趋势。添加活性剂对焊缝金属的断裂韧性没有明显作用, 但对延性裂纹扩展长度有所改善。

关键词: BT 20 钛合金; 激光焊接; 断裂韧性

中图分类号: TG 146.2+3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2005) 04-0033-05

Abstract: Fracture toughness test on Ti alloy BT 20 and laser-welded joints was carried out. Meanwhile, hardness distribution and microstructure of the alloy and welded joints were investigated. Fracture test indicated that brittle unstable fracture occurred after ductile crack initiation and slow propagation for all the compact tension (CT) specimens, except one welded joint specimen was brittle crack initiation. Fracture toughness of base metal was obviously higher than that of welded joint, and rolling directions had no obvious effect on fracture toughness of base metal. Fracture toughness of heat-affected zone (HAZ) was between the base metal and weld metal. Postweld heat treatment not only not improved the fracture toughness of welded joint, but also had the trend of deterioration. Addition of activating agent had no obvious effect on fracture toughness of weld metal, but it improved the length of ductile crack propagation.

Key words: BT 20 titanium alloy; laser welding; fracture toughness

BT 20 钛合金 (Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) 是飞机和发动机中选用的主要钛合金之一。该合金属于高 Al 当量的近 α 型钛合金, 强度水平超过 930 MPa, 长时间工作温度可达 500℃, 瞬时工作温度可达 800℃, 而在 450℃ 下工作时, 寿命可达 6000h^[1]。目前, BT 20 钛合金主要用于制造飞机和发动机的承力结构件, 尤其是焊接的承力结构件。

目前有关 BT 20 钛合金焊接的研究主要集中在焊接工艺、焊接缺陷、焊接接头的显微组织及接头常规力学性能等方面^[2-4]。关于钛合金及其焊接接头的断裂韧性研究目前报道较少, 而且主要涉及的是 TC4 钛合金^[5]。对 BT 20 钛合金薄板及其焊接接头的断裂韧

性或撕裂韧性的研究, 国内外几乎没有公开报道。

本研究在对钛合金薄板及其激光焊接接头组织性能分析的基础上, 测试了材料及焊接接头的断裂性能, 为改进钛合金材料的力学冶金性能、正确设计钛合金薄板焊接结构、合理制定焊接工艺及选择焊接方法提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 化学成分与拉伸性能

实验采用国产 BT 20 钛合金, 名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V。名义板厚为 2.5 mm, 本实验实

际板厚为 2.64 mm。

按照国家标准 GB 3076- 82 金属薄板(带)拉伸试验方法》^[6]测量材料的拉伸力学性能。试样长 95mm, 宽为 10mm, 均匀拉伸长度为 25mm。试样厚度为板材的原始厚度, 试样长度沿轧制方向。拉伸实验温度为 19℃, 加载速度为 1 mm/min。拉伸测试性能指标为: 屈服极限为 872.6 MPa, 抗拉强度为 1030.5 MPa, 延伸率为 17%。

1.2 焊接试板与硬度实验

焊接试板的尺寸为 100mm×200mm。采用美国产 PRC4000 型 4kW CO₂ 激光焊机, 焊接规范为: 功率为 2680W, 焊接速度为 2.0 m/min。部分试板进行了焊后热处理, 处理规范为 650℃/2h 炉冷真空退火。还研究了添加活性焊剂的影响。典型焊缝横截面轮廓如图 1 所示。有明显的热影响区。

用 HXD-1000 显微硬度计测量焊接接头的显微硬度。加载载荷为 100g, 保持时间为 15s。BT 20 焊接接头热处理前后硬度分布如图 2 所示。热处理前母材, 热影响区, 焊缝硬度(HV) 平均值分别为 403.1, 400, 378.2; 热处理后母材, 热影响区, 焊缝硬度(HV) 平均值分别为 363.4, 350.8, 346.2。母材平均硬度高于热影响区, 热影响区平均硬度高于焊缝。

1.3 断裂试样及实验

本实验按照美国材料试验学会 ASTM E1820-01 断裂韧性测量标准试验方法》^[7]及英国标准草案

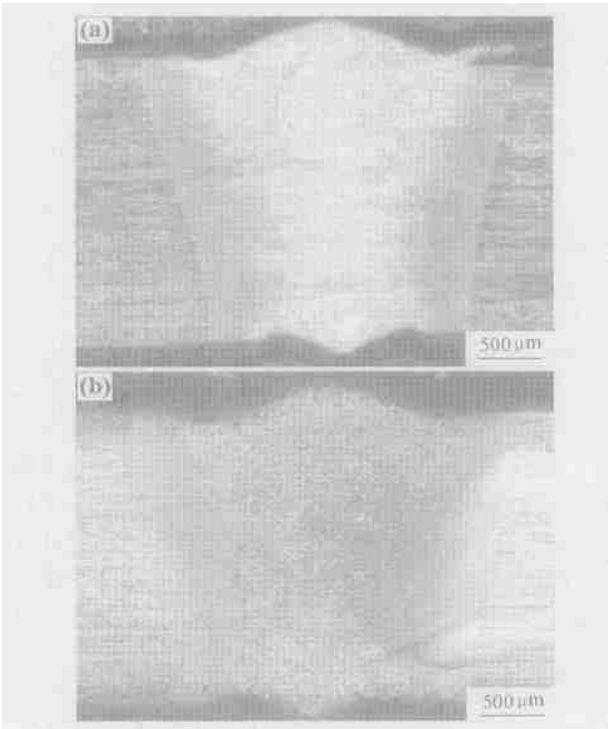


图 1 典型焊缝横截面轮廓 (a) 焊接状态; (b) 焊后热处理
Fig. 1 Configuration of cross-section for typical weld
(a) as-welded; (b) postweld heat treatment

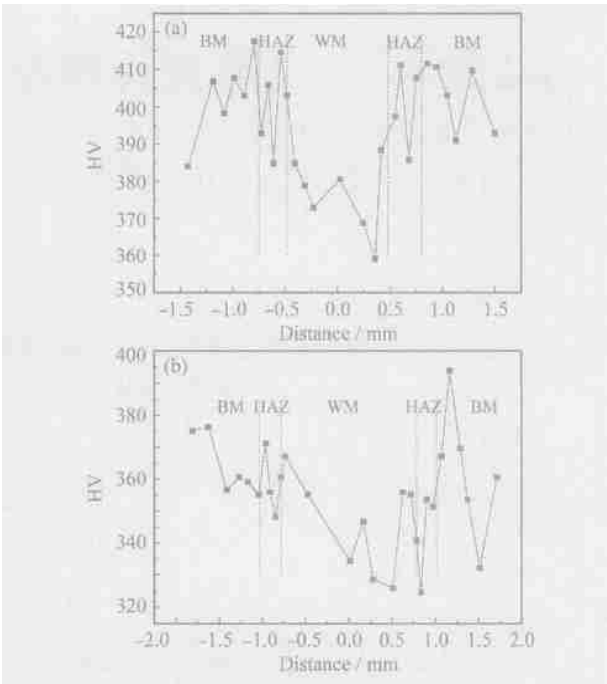


图 2 BT 20 焊接接头硬度分布 (a) 焊接状态; (b) 焊后热处理
Fig. 2 Hardness distribution of welded joint for BT 20 alloy
(a) as-welded; (b) postweld heat treatment

BS7448- 1997^[8]进行。该标准提供了用单个试样测试韧性参数的通用方法。

母材试样按 L-T 及 T-L 方向制备。L 为板材纵向轧制方向, T 为板材宽度方向。L-T 为预期裂纹沿 T 方向扩展, T-L 为预期裂纹沿 L 方向扩展。焊接试样的缺口有开在焊缝中心处或熔合线处两种。母材及焊接接头标准 CT 试样如图 3 所示。试样厚度方向不加工, 采用原始板厚。试样缺口线切割加工, 然后预制疲劳裂纹至 $a/W = 0.55$ 。

首先测量试样初始尺寸, 包括厚度、宽度。预制疲劳裂纹并记录初始裂纹长度。实验采用 MTS 810 材料实验系统。实验环境温度为 20℃。记录载荷-位移数据及曲线, 观察裂纹的扩展。处理数据, 确定 J 积分并判断其有效性。

母材 CT 试样预制疲劳裂纹的最大载荷为 1.5kN, 最小载荷为 0.2kN。焊接接头 CT 试样预制疲劳裂纹的最大载荷为 2.2kN, 最小载荷为 0.2kN。频率均为 5Hz。预制疲劳裂纹的长度约为 1~2mm。

2 断裂实验结果及分析

2.1 特征断裂韧性的确定

CT 试样的 J 值按下式计算:

$$J = J_e + J_p \tag{1}$$

J_e 为 J 积分的弹性部分, J_p 为 J 积分的塑性部分。

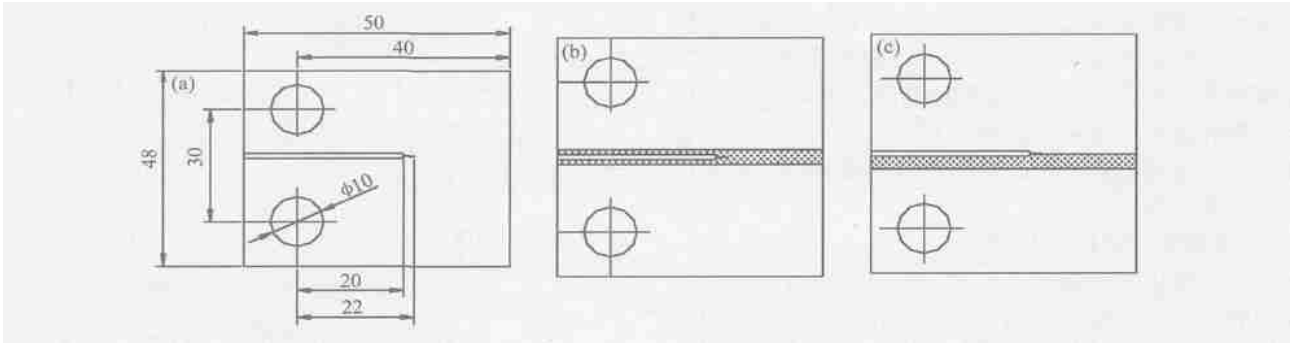


图 3 断裂韧性实验试样 (mm) (a) 母材试样; (b) 焊缝试样; (c) 热影响区试样
Fig. 3 Geometry of fracture toughness specimen (mm) (a) base metal; (b) welded metal; (c) heat-affected zone

$$J_c = \frac{1 - \nu^2}{E} \left[\frac{P}{BW} f\left(\frac{a}{W}\right) \right]^2 \tag{2}$$

$$J_p = \frac{\eta U_p}{Bb} \tag{3}$$

式中: P 为特征点的载荷,即加载终止点的载荷, B 为试样厚度, W 为试样宽度, a 为裂纹长度,计算中采用初始裂纹长度为 a_0 , ν 为泊松比,对钛合金取 0.321, E 为弹性模量,对钛合金取 115700 MPa。

$$\eta = 2 + 0.522 \frac{b}{W} \tag{4}$$

式中: b 为韧带长度,等于 $W - a_0$; U_p 为形变功的塑性分量,由载荷-位移曲线的面积积分求得。

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{(2 + a_0/W) [0.886 + 4.64(a_0/W) - 13.32(a_0/W)^2 + 14.72(a_0/W)^3 - 5.6(a_0/W)^4]}{(1 - a_0/W)^{3/2}} \tag{5}$$

实验过程中,记录瞬时载荷-位移数据,观察断裂特征。发现除了一个焊接接头试样的断裂特征为 J_c 外,其余所有试样的断裂特征均为 J_u 。 J_c 代表裂纹没有经过明显撕裂阶段即失稳断裂; J_u 代表裂纹经过缓慢扩展,但没有达到峰值载荷,即快速失稳断裂。实验结果列于表 1。典型载荷-位移曲线示于图 4。

从上述结果可以看出,母材的断裂韧性明显高于

表 1 特征断裂韧性的实验结果

Table 1 Test result of characteristic fracture toughness

Type	Code	$J_c / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$J_p / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$J / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	Value
T-L base metal	T-L	78.748	88.090	166.838	J_u
L-T base metal	L-T	98.912	52.797	151.709	J_u
Welded metal	Weld	50.645	24.305	74.950	J_u
HAZ	HAZ	60.020	42.826	102.846	J_u
PWHT weld metal	HT-weld	29.144	24.375	53.519	J_u
PWHT HAZ	HT-HAZ	30.350	5.733	36.083	J_c
Weld metal with active agent	A-weld	42.315	20.111	62.426	J_u
PWHT welded metal with active agent	HT-a-weld	44.610	33.893	78.503	J_u

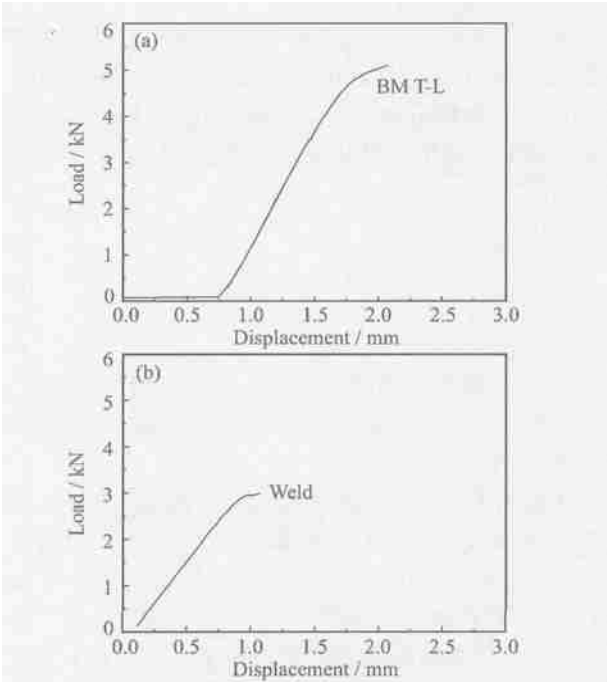


图 4 典型焊后态断裂试样的载荷-位移曲线

(a) T-L 母材; (b) 焊缝金属

Fig. 4 Load-displacement curve of fracture test for as-welded specimens (a) T-L base metal; (b) weld metal

焊接接头,轧制方向对母材断裂韧性的影响不明显。焊接热影响区的断裂韧性介于母材和焊缝金属之间。应该说,焊缝金属断裂韧性低,除了受焊缝金属显微

组织改变的影响外，还和焊缝金属的变形集中有关。硬度实验结果表明，焊缝金属存在强度低匹配。另外，焊后热处理不但没有改善焊接接头的断裂韧性，还有进一步恶化的趋势。添加活性剂对焊缝金属的断裂韧性没有明显作用。

2.2 启裂断裂韧性的确定

实验采用部分卸载柔度法，确定实验过程中的裂纹扩展长度。实验开始先做 3 次弹性加载-卸载循环，载荷较低。 J 积分实验过程中的部分卸载载荷约为极限载荷的 0.2 倍。

J 积分由式 (1) 至式 (5) 确定。计算时，用弹性柔度法确定当前的裂纹长度 a_i 取代初始裂纹长度 a_0 。裂纹长度计算由式 (6) 得出：

$$a_i/W = 1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5$$

(6)

式中：

$$u = \frac{1}{[BEC_i]^{1/2} + 1}$$

(7)

C_i 为弹性柔度，等于 $\Delta l / \Delta P$ 。

由于只有母材及添加活性剂焊缝的延性裂纹扩展量大于 0.5mm，可以用部分卸载法确定启裂韧性，图 5 是实验点的分布及 J 积分与裂纹扩展量的关系曲线，图中还给出了钝化线及有效数据范围。钝化线方程为：

$$J = 2\sigma_y \Delta a$$

(8)

$$\sigma_y = \frac{(\sigma_{ys} + \sigma_{ts})}{2}$$

(9)

式中： σ_{ys} 为材料的屈服极限， σ_{ts} 为材料的抗拉强度。因此，根据公式计算得出 BT 20 钛合金母材的有效屈服强度 σ_y 等于 951.6MPa。

按幂乘率对实验点进行拟合，参加拟合的点必须在规定的界线以内。合格数据区的左偏置线为过 $\Delta a = 0.15\text{mm}$ 处作钝化线的平行线，右偏置线为过 $\Delta a = 1.5\text{mm}$ 处作钝化线的平行线。上界线为过 $J_{\text{limit}} = b_0\sigma_y/15$ 的点作 Δa 轴的平行线，根据不同试样 b_0 的差别， J_{limit} 约为 1140kJ/m^2 。合格的数据应该在此封闭区内。

为了确定启裂韧性，采用最小二乘法对合格实验点进行拟合，拟合曲线如式 (10) 所示。拟合曲线与 0.2mm 偏置线的交点即为条件启裂韧性 J_Q ，示于图 5。启裂断裂韧性列于表 2。

$$J = C_1 \Delta a^{C_2}$$

(10)

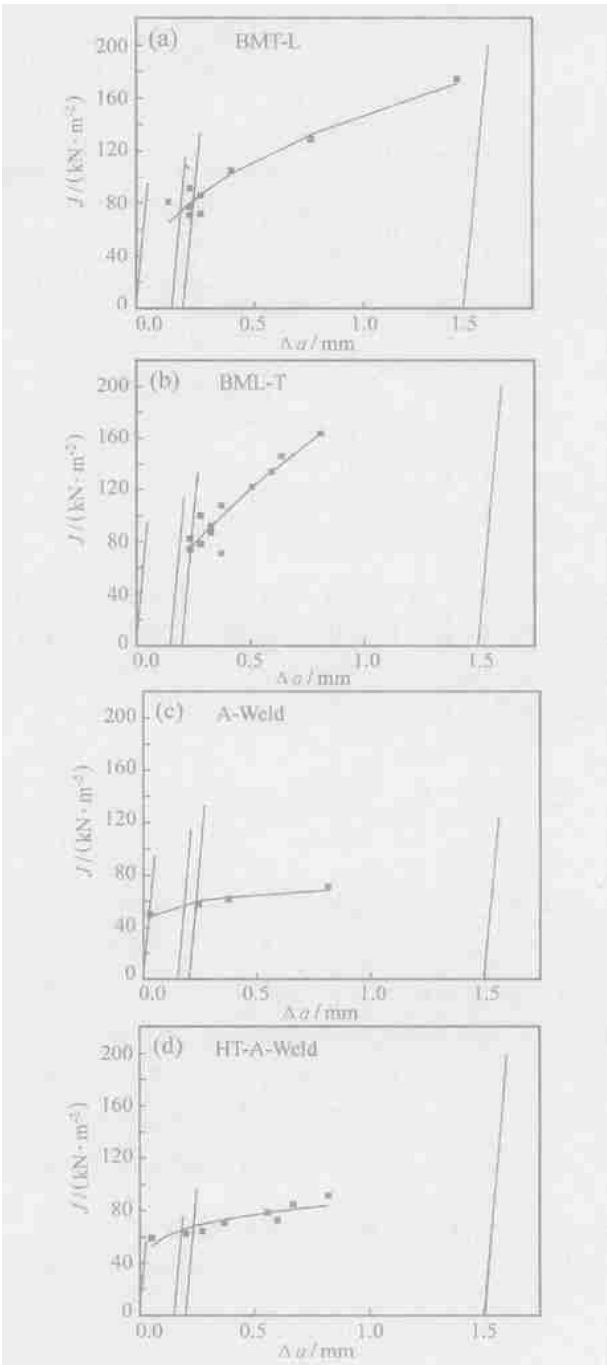


图 5 J 积分与裂纹扩展量的关系
(a) T-L 母材；(b) L-T 母材；(c) 焊缝添加活性剂；
(d) 添加活性剂焊缝热处理态
Fig.5 Relation between J integral and crack propagation
(a) T-L base metal；(b) L-T base metal；
(c) weld metal with active agent；
(d) postweld heat treatment weld metal with active agent

式中的拟合参数列于表 3。拟合曲线的参数 C_2 均小于 1，符合 ASTM E1820- 01 标准要求。拟合曲线的相关系数为 0.95，略小于上述标准要求的 0.96。

如果试样厚度 B 及试样初始韧带尺寸 b_0 满足式 (11) 的条件，则 J_Q 为有效的材料启裂断裂韧性。

表 2 启裂断裂韧性的确定

Table 2 Determination of fracture toughness at crack initiation

Type	$\Delta a_{\max} / \text{mm}$	$J_Q / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$(\Delta a)_Q / \text{mm}$
T-L base metal	1.352	82.916	0.244
L-T base metal	0.810	75.081	0.239
Weld metal with active agent	0.813	60.047	0.232
PWHT weld metal with active agent	0.823	67.994	0.236

表 3 $J-\Delta a$ 曲线拟合参数

Table 3 Fit parameter of $J-\Delta a$ curve

Type	C_1	C_2	Correlation coefficient
T-L base metal	150.327	0.421	0.95
L-T base metal	186.643	0.637	0.95
Weld metal with active agent	69.915	0.104	0.95
PWHT weld metal with active agent	86.738	0.169	0.95

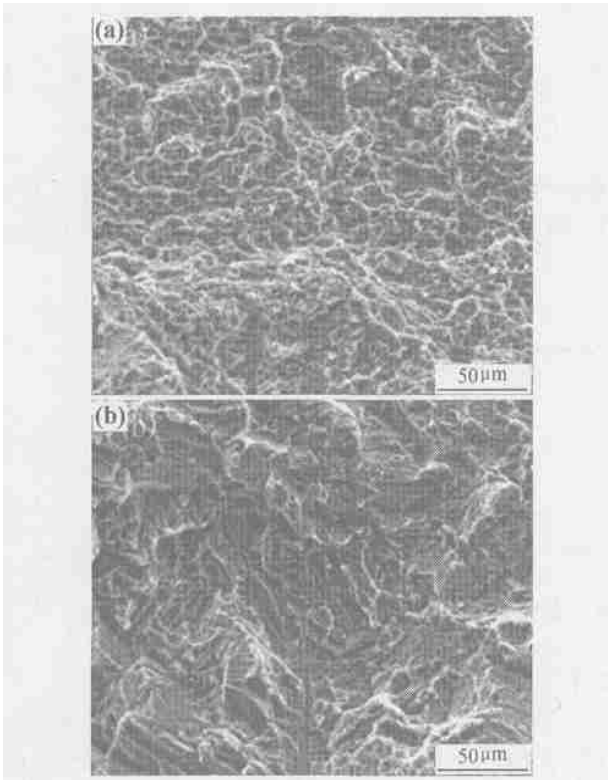


图 6 BT 20 钛合金及其焊接接头的断口扫描照片
(a) L-T 母材; (b) 焊缝金属

Fig. 6 SEM fractography of BT 20 alloy and welded joints
(a) L-T base metal; (b) weld metal

$$B, b_0 > 25J_Q/\sigma_y \tag{11}$$

经计算，上述条件启裂断裂韧性 J_Q 均满足对试样尺寸的要求，可以认为 J_Q 即材料有效 J_{1c} 值。

2.3 电镜扫描结果及解释

用 FEI QUANTA200 型扫描电镜，观察钛合金及焊接接头撕裂试样的断口。母材及焊缝金属的典型断口特征如图 6 所示。可以看出，母材的裂纹扩展区呈三角形。母材和热影响区断口有明显的韧窝。焊缝断口具有明显的沿晶或沿亚晶断裂的特征，这也说明焊缝金属有明显的脆性。添加活性剂或焊后热处理对断口特征无明显变化。

3 结论

- (1) BT20 钛合金激光焊焊接后，除了一个焊接接头试样是脆性启裂外，其它试样均在裂纹延性启裂并缓慢扩展后，发生脆性失稳断裂。
- (2) 母材的断裂韧性明显高于焊接接头，轧制方向对母材断裂韧性的影响不明显。
- (3) 焊接热影响区的断裂韧性介于母材和焊缝金属之间。本实验的焊后热处理没有改善焊接接头的断裂韧性，还有进一步恶化的趋势。
- (4) 添加活性剂对焊缝金属的断裂韧性没有明显作用，但对延性裂纹扩展长度有所改善。

致谢:

感谢北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室的资助。

参考文献

[1] 姚伟, 巩水利, 陈俐. 焊后真空热处理对 BT 20 钛合金激光焊接接头性能的影响 [J]. 焊接, 2003, (6): 21- 24.

[2] 巩水利, 汤昱, 杜翔, 等. BT 20 钛合金 CO₂ 激光焊接工艺 [J]. 焊接, 2002, (10): 32- 35.

[3] 邹世坤, 汤昱, 巩水利. 钛合金薄板激光焊接技术研究 [J]. 焊接技术, 2003, 32 (5): 16- 18.

[4] 王桂生. Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 合金组织与性能的研究 [J]. 稀有金属, 1995, 19 (5): 352- 356.

[5] 王焕琴. 钛及钛合金焊接接头的组织、性能和断裂特性 [J]. 焊接, 2002, (11): 27- 19.

[6] GB 3076- 82, 金属力学性能及工艺性能试验方法 [S].

[7] ASTM E 1820- 01, Standard test method for measurement of fracture toughness, annual book of ASTM standards [S].

[8] BS 7448, Method for determination of K_{1c} , critical CTOD and critical J value of welds in metallic materials [S].

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (514610101QT0102)
收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2004-10-18
作者简介: 钟飞 (1979-), 男, 硕士, 从事材料科学与工程方面研究工作, 联系地址: 北京工业大学材料科学与工程学院 (100022)。