

# TC18 电子束焊接头焊后热处理对组织与性能的影响

郭绍庆, 谷卫华, 余槐, 袁鸿, 张旺峰, 李晓红

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 为提高 TC18 合金电子束焊接头的力学性能, 测量焊态及 4 种焊后热处理的接头室温拉伸和冲击性能, 并对不同热处理状态的显微组织和冲击断口进行光学和扫描电镜观察。研究表明, TC18 电子束焊缝经不同热处理能够获得不同形态的晶内  $\alpha$ 。随晶内  $\alpha$  片长径比的减小, 塑性和冲击韧度提高, 强度大致呈降低的趋势。TC18 双重退火焊缝具有以粒状  $\alpha$  为主, 辅以适量片状  $\alpha$  的  $\beta$  晶内结构, 因而具有较好的强度、塑性和冲击韧度。

**关键词:** 钛合金; 电子束焊接; 焊后热处理; TC18

中图分类号: TG457.19

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2006)03-0116-06

许多  $\alpha + \beta$  型和  $\beta$  型钛合金具有较高的强度、塑性和韧度, 但是经过焊接热循环和一系列冶金变化, 焊缝及热影响区的性能损失严重, 主要表现为塑性和韧度的损失。如  $\alpha + \beta$  合金 T+62222 焊缝拉伸性能与母材相当, 但是缺口敏感性非常高, 韧性非常差, 所有试样在预制裂纹时断裂<sup>[1]</sup>。L. E. Stank 曾经系统地研究了多层气保护钨极氩弧焊焊缝的性能, 发现  $\alpha + \beta$  合金接头抗拉强度为 100~165ksi, 室温韧度为 45~5ftlb,  $\beta$  和近  $\beta$  合金接头抗拉强度在 110ksi 以上, 而韧度数值很低, 低于 10ftlb<sup>[2]</sup>。焊后热处理对接头力学性能具有重要影响<sup>[3,4]</sup>。为充分发挥钛合金的性能潜力, 有必要开展焊后热处理提高接头性能的研究。亚稳定型  $\alpha + \beta$  钛合金 TC18 是退火状态  $\beta$  相含量最高的  $\alpha + \beta$  型合金, 也是退火强度最高的合金, 特别适用于制造飞机机身、起落架结构中的大型锻件, 可用各种方法焊接<sup>[5]</sup>。本工作针对其电子束焊接接头, 研究接头塑性和韧度的损失程度和冶金原因, 考察不同焊后热处理对接头性能的影响, 为确立该类合金焊后塑性韧性的恢复技术提供依据。

## 1 实验方法

### 1.1 实验用料

TC18 供货态为模锻加双重退火处理: 835°C / 1h, FC 750°C / 2h, AC + 615°C / 4h, AC。其名义成分为

T+5A+5M+6V-1Cr-1Fe,  $\beta$  相变点为 870°C。从模锻件上线切割切取 8.5mm 厚焊接试板, 并做焊前酸洗。

### 1.2 焊接及焊后热处理

真空电子束焊机型号为 EIA-30, 加速电压为 60kV。焊接速率  $v = 14\text{mm/s}$ , 焊接电流  $I = 95 \sim 90\text{mA}$ , 工作距离  $D = 150\text{mm}$ , 聚焦电流  $I_f = 855\text{mA}$ 。从焊接试板上切取预留热处理氧化及机加工余量的试样, 在空气炉中进行试样的焊后热处理, 热处理制度包括: HT0 焊态; HT1 简单退火; HT2 双重退火; HT3 固溶时效; HT4 三重退火。

### 1.3 力学性能试样的加工与测试

拉伸采用 259H-N001 试样, 冲击采用 V 型缺口 259H-N005 试样, 平行试样数量为 3。焊缝和热影响区 (HAZ) 冲击试样的缺口位置通过腐蚀确定。室温拉伸在 INSTRON 4507 试验机上进行, 室温冲击在 JB6 试验机上进行。

### 1.4 显微组织及断口分析

金相试样制备过程包括砂纸打磨和抛光, 抛光采用  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  溶液。腐蚀液为  $\text{HNO}_3$ : HF: 甘油 = 1: 1: 1。光学显微镜或扫描电镜下观察微观组织并照相, 扫描电镜下观察冲击断口形貌并照相。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 TC18 接头拉伸性能

接头和母材的室温拉伸性能由表 1 和图 1 给出。焊态接头断裂于焊缝和近缝区, 焊缝及近缝区的强度和塑性与母材相比损失严重。接头系数仅为 78.6%, 延伸率只有母材的 41%。

简单退火使母材强度降低, 但塑性显著提高。接头抗拉强度比焊态提高 112 MPa, 接头系数达到

收稿日期: 2006-02-06; 修订日期: 2006-03-18

作者简介: 郭绍庆 (1969-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高强钢、钛合金和金属基复合材料连接技术及焊接过程数值模拟研究, (E-mail) shaoqing\_gu@biam.ac.cn

95.0%，延伸率也由 5.2% 提高至 14.5%。

双重退火使母材的抗拉强度降低 67 MPa 而塑性显著提高。接头的抗拉强度比焊态提高 202 MPa 延伸率由 5.17% 提高至 8.4%。接头断裂于焊缝，但接头接近等强度。

固溶时效使母材的抗拉强度提高 99 MPa 而塑性也略有提高。接头抗拉强度比焊态提高 32 MPa 接头系数达到 97.6%，而延伸率由 5.17% 降低至 4.6%。

三重退火使母材抗拉强度降低 94.3 MPa 而塑性显著提高。接头的抗拉强度比焊态提高 83 MPa 接头系数达到 92.9%，而延伸率由 5.17% 提高至 8.4%。

## 2.2 TC18 接头冲击韧度

不同焊后热处理状态下焊缝、HAZ 和母材的冲

击韧度测试结果由表 2 和图 2 给出。焊态下焊缝和 HAZ 的冲击韧度损失严重，分别只有母材的 27% 和 46.8%。

简单退火使焊缝、HAZ 和母材的冲击韧度明显改善，焊缝和 HAZ 冲击韧度分别是焊态的 4 倍和 2.1 倍。母材冲击韧度比供货态提高 79%。

双重退火使焊缝、HAZ 和母材的冲击韧度进一步提高至焊态的 5.5、3.5 和 2.3 倍。

固溶时效使焊缝和 HAZ 的冲击韧度分别提高至焊态的 2.9 和 1.34 倍。母材冲击韧度也有所提高。

三重退火的焊缝、HAZ 和母材冲击韧度最大，它们分别是焊态冲击韧度的 7.7、4.4 和 2.9 倍。

表 1 TC18 钛合金焊接接头室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of TC18 welded joint at room temperature

Postweld heat treatment	Specimen	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_b$ / MPa	$\delta_5$ / %	$\phi$ / %	Fracture position
HT0 (as welded)	Base metal	1118	1186	12.6	31.7	Weld metal fusion line or HAZ
	Welded joint	888	932	5.2	13.2	
HT1 (simple annealing)	Base metal	1038	1099	20.2	58.3	Base metal 5~7mm apart from weld center
	Welded joint	1003	1044	14.5	42.3	
HT2 (double annealing)	Base metal	1067	1119	21.3	59.1	Weld metal
	Welded joint	1091	1134	8.4	32.7	
HT3 (solution and aging)	Base metal	1226	1285	13.2	36.9	Weld metal
	Welded joint	1214	1255	4.6	15.9	
HT4 (triplex annealing)	Base metal	1007	1092	21.8	59.5	Weld metal
	Welded joint	983	1015	8.4	41.8	

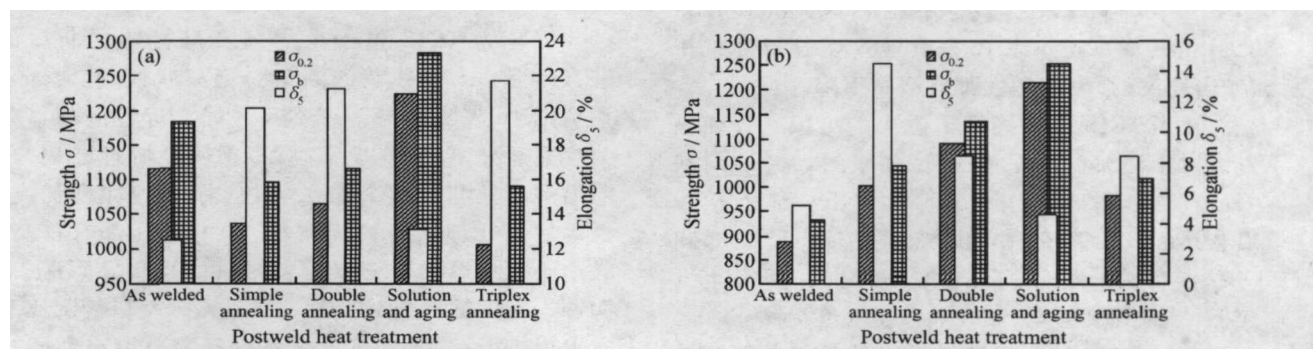


图 1 焊后热处理对 TC18 电子束焊接头拉伸性能的影响

(a) 母材; (b) 接头

Fig 1 Effect of postweld heat treatment on tensile properties of TC18 electron beam welded joints

(a) base metal; (b) welded joint

表 2 TC18焊接接头冲击性能

Table 2 Impact toughness of TC18 welded joints

Postweld heat treatment	Impact toughness $a_{KV} / J \cdot cm^{-2}$		
	Weld metal	HAZ	Base metal
HT0 (as welded)	3.35	5.8	12.4
HT1 (simple annealing)	13.4	12.1	22.2
HT2 (double annealing)	18.53	20.3	28.3
HT3 (solution and aging)	9.59	7.8	14.2
HT4 (triplex annealing)	25.8	25.4	35.6

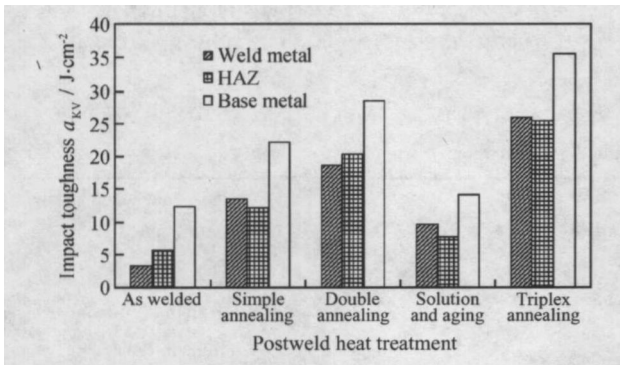


图 2 焊后热处理对 TC18 电子束焊接接头冲击韧度的影响

Fig 2 Effect of postweld heat treatment on impact toughness of TC18 electron beam welded joints

### 2.3 TC18 接头组织及断口分析

图 3 给出了 TC18 电子束焊接接头焊态显微组织。焊缝为粗大的柱状晶, 近缝区晶粒也严重粗化。母材  $\beta$  晶粒内细小  $\alpha$  片呈网篮状编织, 晶界  $\alpha$  较粗且有不同程度的断续。焊缝组织为亚稳态  $\beta$ , 由于电子束焊热循环非常快, 焊态下看不到晶内析出。HAZ 在焊接高温下发生了部分固溶, 原先的  $\alpha$  片轮廓变粗。粗大的亚稳态  $\beta$  晶粒导致焊缝与母材相比, 冲击韧度、强度和塑性都有严重下降。

图 4 为 TC18 接头经简单退火的组织。焊缝晶粒内析出非常细小的  $\alpha$  片, 同一集束的  $\alpha$  片取向基本平行。热影响区也有细小  $\alpha$  片析出。细小  $\alpha$  片析出兼具强化和降低  $\beta$  过饱和的作用, 使焊缝和 HAZ 拉伸和冲击性能显著提高。母材晶内编织状  $\alpha$  片变粗, 导致强度降低, 塑性和冲击韧度提高。

图 5 为 TC18 接头经双重退火的组织。焊缝经第一步热处理, 显现出凝固形成的胞状晶, 晶界出现  $\alpha$ , 晶内析出短条状  $\alpha$ , 经第二步热处理, 晶内析出大量弥散的细小  $\alpha$  颗粒。这种在  $\beta$  晶粒内  $\alpha$  颗粒弥散分布外加短条状  $\alpha$  的组织特征, 使焊缝的强度、塑性和冲击韧度显著比焊态均有较大提高。HAZ

晶内也有大量条状和粒状  $\alpha$  析出, 因此 HAZ 冲击韧度提高显著。而母材经双重退火处理, 原有的片状  $\alpha$  粗化, 冲击韧度和塑性有显著提高, 强度则略有降低。

图 6 为 TC18 接头经固溶时效的组织。母材与供货态相比,  $\beta$  晶内编织状的片状  $\alpha$  略有加粗, 同时又有新的细小  $\alpha$  片生成, 冲击韧度和塑性略有提高, 而强度提高显著。焊缝中出现细长的针状  $\alpha$ , 同时有大量细小的粒状  $\alpha$  析出。HAZ 的片状  $\alpha$  仍呈部分固溶状态, 轮廓模糊, 说明固溶不能使 HAZ 重新析出片状  $\alpha$ 。因此焊缝和 HAZ 的冲击韧度虽然比焊态有所提高, 但未恢复到母材的水平。

图 7 为 TC18 接头经三重热处理的组织。焊缝经第一步热处理, 析出短条状初生  $\alpha$ 。第二步热处理具有促进次生  $\alpha$  形核的作用, 经第三步热处理后, 片状  $\alpha$  变粗变圆。母材经三重热处理原有的粒状  $\alpha$  和片状  $\alpha$  粗化。焊缝、HAZ 和母材具有最高的冲击韧度, 焊缝和母材塑性较好, 而强度比双重热处理低。

图 8 为 TC18 电子束焊缝及母材冲击断口的 SEM 照片。母材供货态断口为韧窝形貌, 但大部分韧窝细小, 表明冲击韧度不高。焊态焊缝的断口亦为穿晶断裂, 但韧窝极细小, 很像脆性解理断口, 这与沿焊缝柱状晶开裂有关, 对应极低的冲击韧度。经焊后热处理断口韧窝增加, 冲击韧度都有提高。其中经双重退火和三重退火的断口韧窝大而深, 说明冲击韧度达到充分恢复。双重退火断口韧窝比三重退火细浅, 冲击韧度低一些。经简单退火和固溶时效的焊缝断口表现出部分沿晶断裂的特征, 其中固溶时效更严重, 这表明这两种热处理制度提高焊缝冲击韧度的效果差一些。焊接造成的粗大柱状晶, (图 3a) 也是造成焊缝及 HAZ 冲击韧度和塑性损失的重要原因之一。

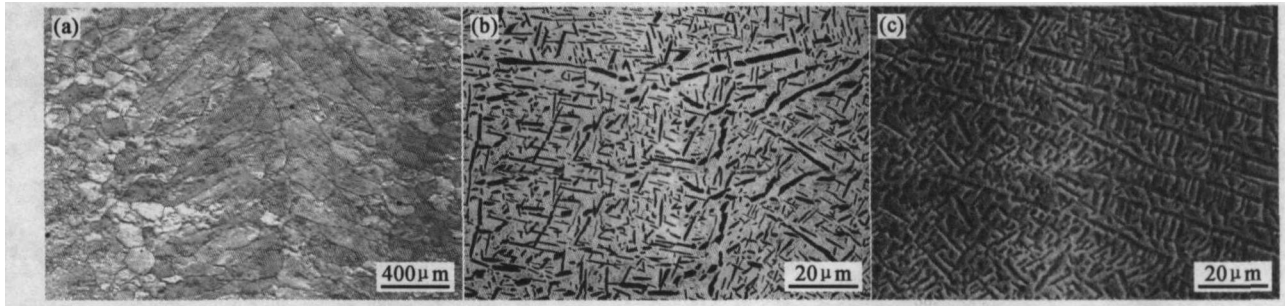


图 3 TC18 电子束焊接头焊态组织

(a) 焊缝; (b) 母材; (c) HAZ

Fig. 3 Microstructure of welded joint in as-welded condition

(a) weld metal (b) base metal (c) HAZ

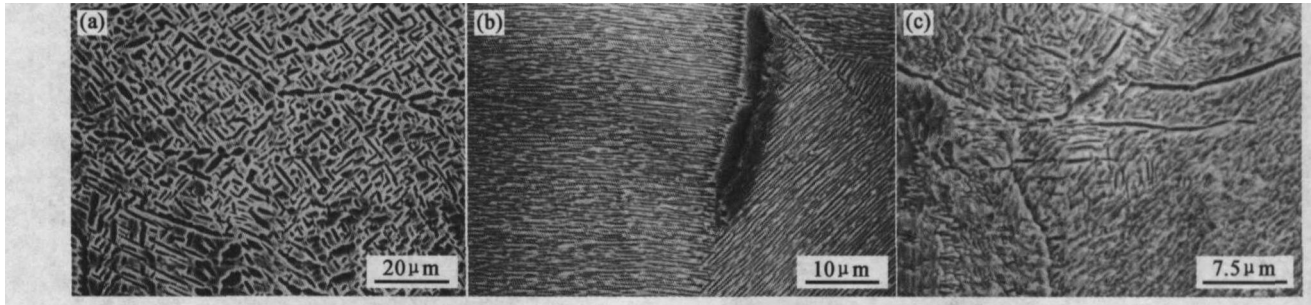


图 4 TC18 接头经简单退火的组织

(a) 母材; (b) 焊缝; (c) HAZ

Fig. 4 Microstructure of welded joint after simple annealing

(a) base metal (b) weld metal (c) HAZ

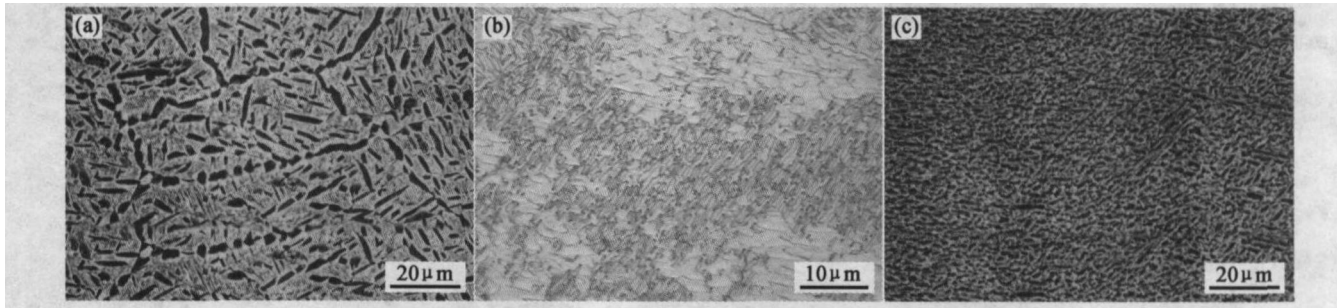


图 5 TC18 接头经双重退火的组织

(a) 母材; (b) 双重退火第一步的焊缝; (c) 焊缝

Fig. 5 Microstructure of welded joint after double annealing

(a) base metal (b) weld metal after first annealing (c) weld metal

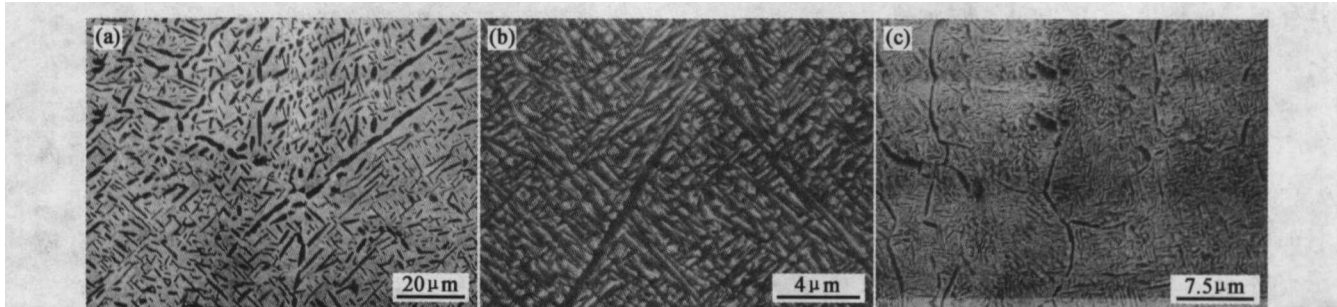


图 6 TC18 接头经固溶时效的组织

(a) 母材; (b) 焊缝; (c) HAZ

Fig. 6 Microstructure of welded joint after solution and aging

(a) base metal (b) weld metal (c) HAZ

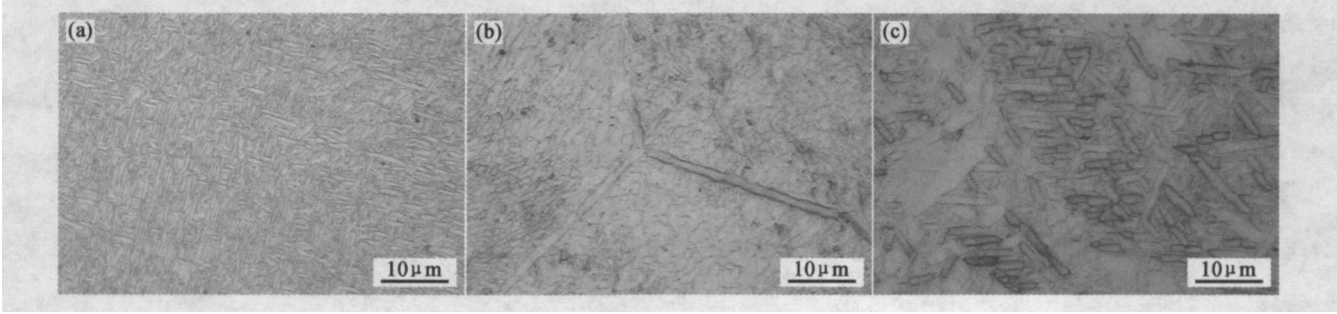


图 7 TC18接头经三重退火的组织

(a) 第一步处理的焊缝; (b) 焊缝; (c) 母材

Fig. 7 Microstructure of triplex annealed welded joint

(a) weld metal with only the first annealing (b) weld metal (c) base metal

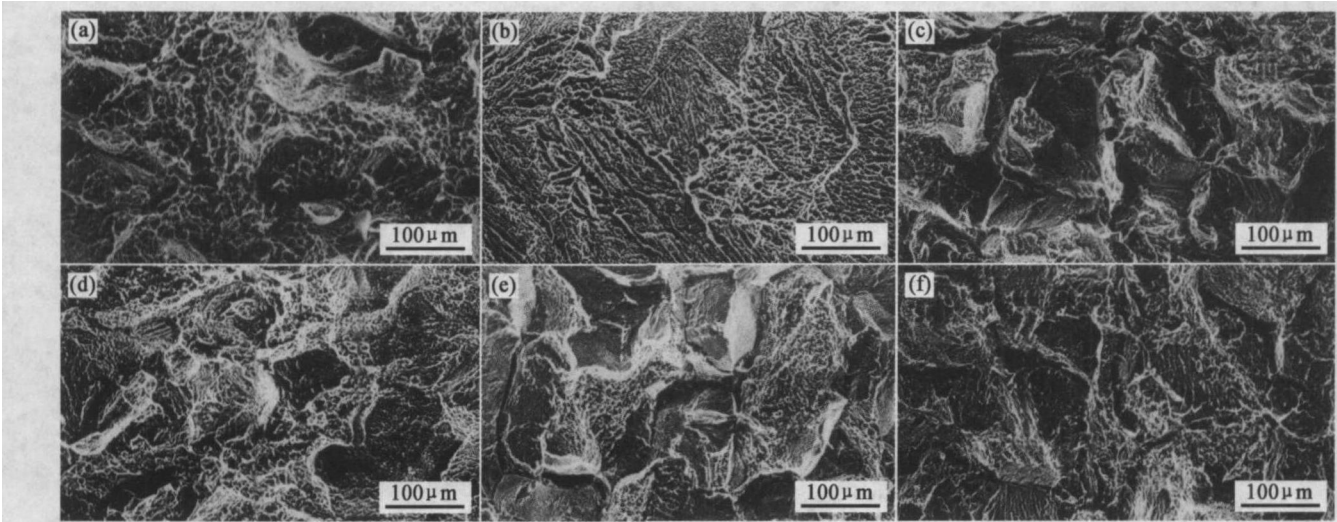


图 8 TC18焊缝及母材冲击断口 SEM

(a) 供货态母材; (b) 焊态焊缝; (c) 简单退火焊缝; (d) 双重退火焊缝;  
(e) 固溶时效焊缝; (f) 三重退火焊缝

Fig. 8 Fracture morphology of impact toughness specimen for weld metal and base metal

(a) base metal (b) as welded (c) simple annealed (d) double annealed  
(e) solution and aged (f) triplex annealed weld metal

### 2.4 分析与讨论

TC18母材的塑性和冲击韧度有较好的关联性, 塑性好, 则冲击韧度高。按母材延伸率从高到低对热处理制度排序: 三重退火 > 双重退火 > 简单退火 > 固溶时效 > 焊态。按冲击韧度得到相同的排序。

对比各种热处理状态母材的显微组织(图 3~7), 可以发现,  $\beta$  晶粒内的  $\alpha$  片形态与塑性(延伸率  $\delta_5$ )和冲击韧度  $a_{KV}$  有较明确的对应关系。供货态母材晶内  $\alpha$  片细,  $a_{KV}$  和  $\delta_5$  较低, 而强度较高; 经简单退火后,  $\alpha$  片粗化,  $a_{KV}$  和  $\delta_5$  明显提高, 而强度降低; 经双重退火, 晶内  $\alpha$  片和晶界粗化加重, 同时又有新的细  $\alpha$  片产生,  $a_{KV}$  和  $\delta_5$  进一步提高, 而强度则略有提高; 经固溶时效, 晶内  $\alpha$  片以细  $\alpha$  片为主,  $a_{KV}$  和  $\delta_5$  与供货态基本相当, 但强度显著提高; 而经三

重退火, 晶内  $\alpha$  呈短棒状,  $a_{KV}$  和  $\delta_5$  达到最高值, 而强度有所下降。

TC18电子束焊缝在焊态下为过饱和的亚稳  $\beta$ ,  $a_{KV}$ ,  $\delta_5$  及强度都很低; 经简单退火, 亚稳  $\beta$  分解, 析出  $\alpha$  片, 因加热温度较低(750°C),  $\alpha$  片形核多, 在炉冷过程中长成平行细片状, 其冲击韧度比焊态有显著改善; 经双重退火第一步, 形成晶界  $\alpha$  和晶内片状  $\alpha$ , 由于冷速较快, 片状  $\alpha$  形成量较少, 经第二步退火,  $\beta$  晶内析出大量的粒状  $\alpha$ , 这种组织具有较好的强度、塑性和韧度; 三重退火使焊缝的  $\beta$  晶内  $\alpha$  粗化, 长径比减小, 因而具有最好的塑性、韧度, 而强度比双重退火降低。固溶时效在  $\beta$  晶内造成大量的细长  $\alpha$  针, 这种组织对应着较低的冲击韧度、最低的塑性以及最高的强度。可见, 对于焊缝, 随晶内

$\alpha$  片长径比的减小, 塑性和冲击韧度提高, 强度则呈降低趋势。

双重退火焊缝具有以粒状  $\alpha$  为主, 辅以适量片状  $\alpha$  的  $\beta$  晶内结构, 因而具有较好的强度、塑性和冲击韧度。为确保焊缝及接头的综合性能, 推荐对 TC18 电子束焊接头做焊后双重退火处理, 与常规热处理 (简单退火) 相比, 它使接头屈服强度提高 8.8%, 抗拉强度提高 8.5%, 焊缝冲击韧度提高 38.3%。

### 3 结 论

(1) TC18 母材的塑性和冲击韧度有较好的关联性, 塑性好, 则冲击韧度高。 $\beta$  晶粒内的  $\alpha_{KV}$  片形态与塑性 (延伸率  $\delta_5$ ) 和冲击韧度  $\alpha_{KV}$  存在一定的对应关系。随晶内  $\alpha$  片粗化,  $\alpha_{KV}$  和  $\delta_5$  提高, 而强度降低。

(2) TC18 电子束焊缝经不同热处理, 能够获得不同形态的晶内  $\alpha$ 。随晶内  $\alpha$  片长径比的减小, 塑性和冲击韧度提高, 强度则大致呈降低的趋势。

(3) TC18 双重退火焊缝具有以粒状  $\alpha$  为主、辅

以适量片状  $\alpha$  的  $\beta$  晶内结构, 因而具有较好的强度、塑性和冲击韧度。为确保焊缝及接头的综合性能起见, 推荐对接头做焊后双重退火处理。

### 参考文献:

- [1] MESSLER R W. Electron beam weldability of advanced titanium alloys[J]. Welding Journal 1981(5): 78s-84s
- [2] STARK L E. The strength-toughness properties of welds in plates of commercial titanium alloys[J]. Welding Journal 1971(2): 58s-70s
- [3] BORGGREEN K, WILSON I U. Use of postweld heat treatments to improve ductility in thin sheets of Ti-6Al-4V[J]. Welding Journal 1980(1): 1s-9s
- [4] GREENFIELD M A, PIERCE C M. Postweld aging of an metastable beta titanium alloy [J]. Welding Journal 1973(11): 524s-527s
- [5] 《大型军用运输机材料分析与选用》编委会. 大型军用运输机材料分析与选用 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.

## Effect of Postweld Heat Treatment on Microstructure and Properties of Electron Beam Welded TC18 Joint

GUO Shao-qing GU Wei-hua YU Hua-j YUAN Hong ZHANG Wang-feng LIXiao-hong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials Beijing 100095, China)

**Abstract** In order to improve the mechanical properties of electron beam welded joint in titanium alloy TC18, its tensile and impact properties at room temperature were measured for as welded condition and four kinds of postweld heat treatment. Meanwhile the microstructure and impact fracture morphology were studied with optical and scanning electron microscope. It is shown that heat treatment can change the shape and size of  $\alpha$  phase in initial  $\beta$  grain. With the decrease of L/D ratio for intragranular  $\alpha$ , the ductility and impact toughness of welded joint increase while the strength decreases. Double annealing can produce a kind of intragranular structure dominated by  $\alpha$  particle and assisted by  $\alpha$  plates of appropriate number, then result in better strength, ductility and impact toughness.

**Key words** titanium alloy; electron beam welding; postweld heat treatment; alloy TC18