

TC21 细晶钛合金 TIG 焊接接头组织及力学性能研究

周水亮, 陶 军, 郭德伦

(北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 开展了不同晶粒尺寸的细晶粒 TC21 钛合金的 TIG 焊接实验, 研究了母材及接头组织和力学性能。结果表明: 细晶粒 TC21 钛合金 TIG 焊接接头抗拉强度达到母材的 95% 左右, 焊接性较好; 但是焊接接头脆化严重, 伸长率和断面收缩率均较低。焊缝中心和热影响区组织相似, 为 α' 马氏体组织。相同焊接规范下, $2\mu\text{m}$ 的细晶 TC21 合金焊缝及热影响区为片状或长粒状 α' 组织; 而 $7\mu\text{m}$ 的细晶 TC21 合金接头中 α' 的尺寸较小且相互交错, 形成针状或短粒状 α' 组织。硬度测试表明: 靠近母材的热影响区细晶区存在一个软化区, 该区域硬度最低, 而焊缝中心与热影响区粗晶区分界处(细晶过渡区 (FTZ)) 也存在硬度的下降, 不过此区域下降幅度不大。常温拉伸断口呈准解理断裂特征, 随着母材晶粒度的增大, 焊接接头解理特征越明显。

关键词: 细晶粒 TC21 钛合金; TIG 焊接; 组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2009.6.011

中图分类号: TG444

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)06-0053-06

钛合金因具有密度小、比强度高、耐高温、耐蚀、可焊等优良的综合性能在航空领域得到广泛应用。损伤容限性能已经成为先进飞机和发动机满足结构完整性要求的破损—安全设计概念和选材判据^[1]。作为航空飞机关键的结构材料, 钛合金也逐渐向高损伤容限型方向发展。TC21 钛合金是我国具有自主知识产权的 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Cr-Nb-X 系损伤容限型两相钛合金, 具有高强 (1100MPa)、高韧 (70 MPa $\text{m}^{1/2}$) 和较低的裂纹扩展速率 (da/dN) 等特点^[2,3]。它的优良综合性能特别适合于制造大型框、梁等主承力结构件^[4]。钛合金大型结构件需要依靠焊接技术保障实现结构整体制造和高减重效率目标需求, 因此控制 TC21 钛合金焊接结构质量成为这种材料应用的关键问题。

在力学性能方面, 根据 Hall-Petch 关系, 晶粒的细化可以使材料具有高的强度; 另外, 晶粒的细化可以使材料获得高应变速率超塑性或低温超塑性, 提高合金的加工性能^[5,6]。与常规 TC21 钛合金相比, 细晶粒 TC21 钛合金的抗拉强度, 屈服强度, 疲劳性能等都有了较大的改善。但是目前国内外对于细晶 TC21 钛合金熔化焊过程的研究却很少, 因此, 为高损伤容限型细晶 TC21 钛合金的推广应用, 开展细

晶粒 TC21 钛合金的 TIG 焊接实验研究具有非常重要的意义。

1 实验方法

TC21 钛合金板材的名义成分(原子分数)为 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb-0.1Si, 相变点温度为 $950 \pm 5^\circ\text{C}$ 。经轧制热机械处理后, 晶粒细化到 $2\mu\text{m}$ 和 $7\mu\text{m}$ 。焊接试件规格为 $150\text{mm} \times 100\text{mm}$, 板厚为 2.5mm, 轧制沿 100mm 的方向进行。焊丝牌号为 TC3。焊接之前进行必要的酸洗, 然后采用钢丝刷去除待焊区氧化膜, 并用丙酮擦拭干净。实验在纵缝自动氩弧焊机上进行, 焊接电源为 Miller351 交直流焊机, 焊接夹具为自行研制的双支点琴键式焊接夹具, 背面用铜垫板保护。焊接实验参数见表 1。

焊接接头如图 1 所示。

焊后按 HB 5376—1987 对焊接接头进行 X 射线探伤检测焊接质量; 用金相显微镜、扫描电镜分析接头组织及拉伸断口形貌; 用显微硬度仪测试焊接接头显微硬度; 用万能试验机测试接头拉伸性能。

2 实验结果与讨论

2.1 X 射线检测

按照 HB 5376—1987 对 TC21 焊接接头进行 X 射线检测检测结果表明, 对于平板对接试件, 在焊接

收稿日期: 2008-10-25; 修订日期: 2009-01-19

作者简介: 周水亮 (1981—), 硕士, 工程师, 主要从事钛合金高温合金等材料的工艺研究, (E-mail) pippozi@yahoo.cn。

表 1 细晶 TC21 常规 TIG 焊接工艺参数
Table 1 parameters of TIG welding for fine grain TC21

Grain size	Welding current I/A	Are voltage U/V	Wirefeed speed $v_w/(m/h)$	Welding speed $v/(m/h)$
$2\mu m$	120	10.5	11.6	8.1
	140	13.4	11.5	8.1
	160	15.9	11.5	8.1
	180	16.8	11.6	8.1
$7\mu m$	120	10.5	11.6	8.3
	140	13.6	11.8	8.1
	160	16.0	11.5	8.1
	180	16.8	11.7	8.2

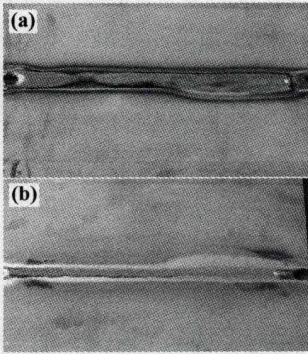


图 1 $2\mu m$ 细晶粒 TC21 钛合金 TIG 焊缝全貌(160A)
(a) 焊缝正面;(b) 焊缝背面

Fig. 1 Weld of fine grain TC21 alloy in TIG(160A)
(a) face of weld;(b) back of weld

电流为 160 ~ 180A 时,焊缝的正反面成形和熔透性均较好,接头质量符合航空一级焊缝标准;在焊接电流低于 140A 时,焊接接头出现未熔合。

2.2 焊接接头组织观察

2.2.1 低倍组织形态

不同晶粒尺寸的细晶 TC21 常规 TIG 焊接接头的低倍组织如图 2 所示。由图 2 可以明显的看到焊缝中心主要是由沿焊缝厚度方向平行生长的原始 β 柱状晶组成,焊缝下部和热影响区为细小的等轴晶;进一步观察可以看到,在焊缝中心 β 柱状晶和热影响区等轴晶之间的熔合线上还存在一薄层更细小的晶粒。

因为在焊接过程中,从熔池底部到顶部,温度梯度逐渐降低,冷却速率逐渐增加。根据林鑫等^[7]发展的柱状晶/等轴晶转变 (CET) 模型,在熔池下部,温度梯度很高,其沿高度方向的分量也远大于其他方向的分量,热量将朝焊缝背面方向散失,因此晶粒向上呈柱状晶生长,并在生长过程中将与竖直方向偏差较大的晶粒淘汰掉,加之较低的冷却速率,柱状晶粒可充分长大(如图 2a,b,c,d)。在熔池底部以

下热影响区部分,热量除向基体散失外,通过铜垫板导热散失也占到较大比例,导致温度梯度及其沿高度方向的分量都减小但冷却速率增大,进而出现柱状晶向等轴晶的转变(如图 2a,b,c,d)。

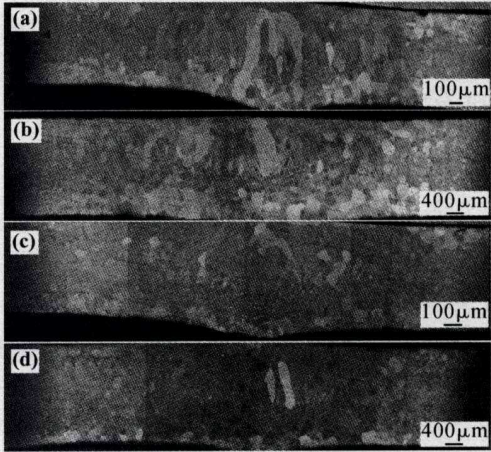


图 2 为不同工艺条件下细晶粒 TC21 接头组织照片
(a) 晶粒尺寸 $2\mu m$, 焊接电流 140A;(b) 晶粒尺寸 $2\mu m$, 焊接电流 120A;(c) 晶粒尺寸 $7\mu m$, 焊接电流 140A;(d) 晶粒尺寸 $7\mu m$, 焊接电流 120A

Fig. 2 Microstructure of welded joint of fine grain TC21 with various parameters (a) grain size $2\mu m$, welding current 140A;(b) grain size, welding current 120A;(c) grain size $7\mu m$, welding current 140A;(d) grain size $7\mu m$, welding current 120A

2.2.2 高倍显微组织特征

由图 3a,b 可知,不同晶粒尺寸细晶 TC21 钛合金母材都是由等轴 $\alpha + \beta$ 相组成,晶粒尺寸为 $7\mu m$ 的细晶钛合金母材中还有少量片状 α 。相同焊接电流下不同晶粒尺寸的细晶 TC21 钛合金焊缝中心组织相似,为 β 转变组织,即 β 晶粒内分布着片状或针状 α' 马氏体。当母材晶粒尺寸为 $2\mu m$ 时,焊缝中心为密集排布的长粒状(片状) α' 马氏体;而当母材晶粒尺寸为 $7\mu m$ 时,焊缝中心为较短的粒状 α' 丛,

α' 丛的尺寸较小且相互交错(图 3d,f)。

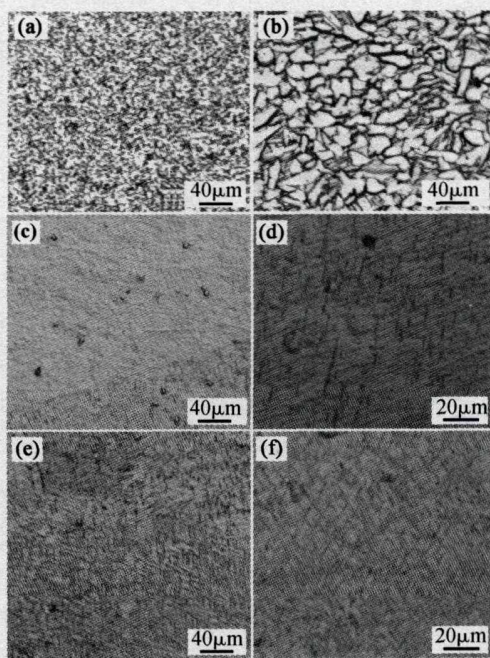


图3 相同焊接参数(140A)下细晶 TC21 焊接接头高倍显微组织 (a)2 μm 细晶母材;(b)7 μm 细晶母材;(c)2 μm TC21 热影响区;(d) 2 μm TC21 焊缝中心;(e)7 μm TC21 热影响区;(f) 7 μm TC21 焊缝中心

Fig. 3 Microstructure of welded joint of fine grain TC21 with same parameters(140A)

(a)2 μm base metal;(b)7 μm base metal;
(c)2 μm heat-affected zone;(d)2 μm fusion zone;(e)7 μm heat-affected zone;
(f)7 μm fusion zone

出现上述现象的原因是:晶粒越细,热导率减小,晶界越多,晶界对热量传导的阻碍作用加大^[8]。图4为实验测量的两种不同晶粒尺寸 TC4 钛合金热导率,已能证明文献[8]的分析。所以相对于晶粒尺寸为 2 μm 的 TC21 钛合金,相同的焊接热输入下,由于细晶晶界的阻碍作用增大,细晶粒钛合金熔池温度较高,高温区停留时间增长,相应的冷却速率减慢,较小的冷却速率导致了此区域的过冷度减小,所以当高温 β 相在冷却过程中发生分解时,晶核首先在晶界上形成,并在晶界形成网状 α' 相,同时 α' 由晶界向晶内生长,最后在 β 晶粒内部形成位相相同,并互相平行排列的片状或长粒状的 α' 组织;而 7 μm 的细晶钛合金焊缝中心冷却速率较快,过冷度较大,虽然高温 β 相在冷却过程中发生分解时不同位相的 α' 形核率高,但是对于 $\alpha + \beta$ 双相钛合金 TC21 来说,由于 β 稳定系数较高(50%),晶格转变阻力较大,所以原始 β 晶粒内部只有少部分 α' 相生

成,生成的相由于冷却速率较快而使之无法长大,最终导致 α' 丛的尺寸较小,且相互交错,形成短粒状 α' 组织。

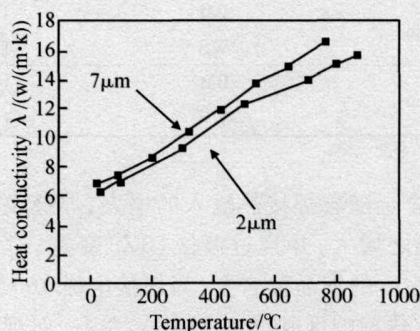


图4 细晶粒 TC4 钛合金热导率

Fig. 4 Heat conductivity of fine grain TC4 alloy

不同晶粒尺寸的细晶钛合金焊接接头热影响区组织与焊缝中心组织相似,也是 β 转变组织,由密集排列的细小的粒状马氏体组成(图 3c,e);这是由于与焊缝中心相比,热影响区冷却速率较快,所以冷却过程中高温 β 相分解生成的 α' 相来不及长大,最终导致马氏体针很窄,已经接近光学显微镜的分辨极限,所以低倍光学显微镜上呈一片白亮(如图 2a,b,c,d)。

2.3 性能

2.3.1 拉伸性能

对 2 μm 、7 μm 两种晶粒尺寸的钛合金母材及 TIG 焊接头进行了室温拉伸性能测试,结果表明,焊接接头拉伸试件均断裂于熔合线区域。具体拉伸性能数据如表 2 所示,由表可以看出,不同晶粒尺寸的 TC21 钛合金母材的强度很高,塑性较好。相同焊接规范下不同晶粒尺寸的细晶粒 TC21 焊接接头抗拉强度均较高,达到了母材强度的 95% 左右;但是与母材相比较,拉伸过程中无屈服阶段,无法得到屈服强度;其伸长率和断面收缩率均较低,接头塑性较差。随着晶粒度的增大,细晶母材及焊接接头的强度和塑性均降低,力学性能变差。

2.3.2 焊接接头硬度

图 5 为两种晶粒尺寸细晶 TC21 钛合金不同焊接规范下焊接接头的显微硬度分布。经历焊接热循环后,细晶 TC21 合金热影响区(包括细晶区与粗晶区)、焊缝中心的硬度均高于母材,靠近母材的热影响区(也称为过渡区(TZ))硬度最低,为一个明显的软化区;而焊缝中心与热影响区粗晶区分界处(称为细晶过渡区(FTZ))也存在硬度的下降,不过下降幅度不大(如图 5a,b,c,d)。相同晶粒尺寸细晶

表 2 细晶粒 TC21 钛合金相同焊接规范(160A)的焊接接头拉伸性能

Table2 Tensile properties of welded joint of fine grain TC21 with same parameters(160A)

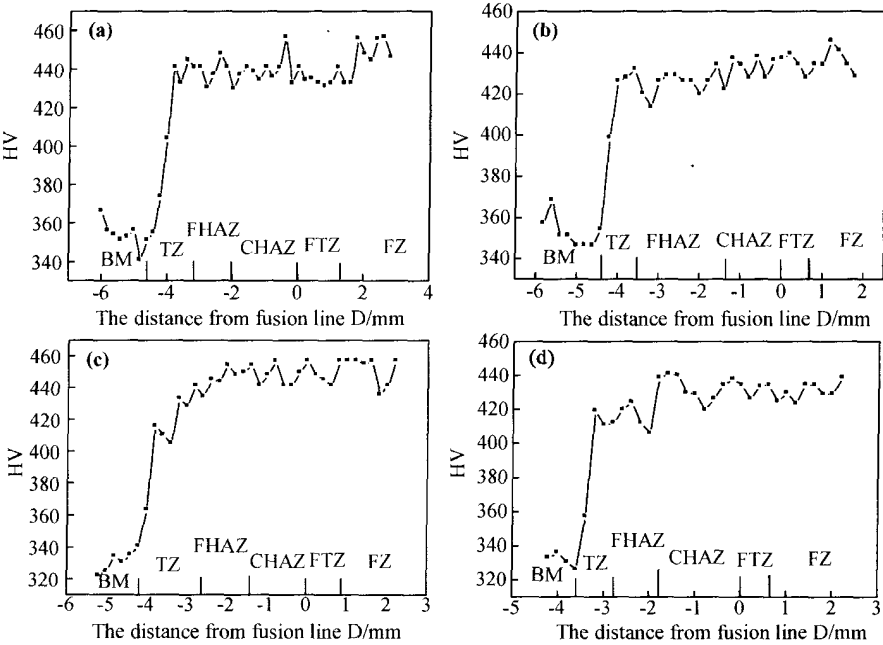
Grain size	Test sort	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
2 μ m	BM	1210.8	1146.7	8.86	9.13
	WS	1156.2	—	1.98	3.52
7 μ m	BM	1101.3	1034.7	6.31	4.42
	WS	1050.4	—	1.00	2.25

TC21 钛合金随着焊接热输入的增大,焊缝及热影响区硬度随之增大,并且过渡区(TZ)变宽;对于晶粒尺寸为 2 μ m 的细晶钛合金,当焊接电流 160A 时,接头焊缝及热影响区硬度为 430HV 左右,而焊接电流 180A 时焊缝及热影响区硬度 440HV 上下波动。相同焊接规范下随着晶粒尺寸的增大,软化区变宽,且硬度下降趋势减慢(图 5a,c)。

2.4 焊接接头断口分析

对细晶粒 TC21 合金母材和焊接接头横向拉伸试样断口形貌进行分析可以发现,细晶粒 TC21 母材的宏观断口较平坦,起伏不大,断口颈缩很小,无明显的宏观变形或变形较小(如图 6a)。进一步对

断口的微观形貌进行观察可以发现,拉伸断口上分布着大小不等的圆形或椭圆形韧窝,所以为典型的韧窝-微孔聚集型延性断裂方式(如图 6b)。与母材的宏观断口相比,2 μ m 细晶粒 TC21 焊接接头拉伸宏观断口稍有起伏,断口颈缩很小,几乎没有宏观变形,呈脆性断裂的特征(如图 6c)。在只有微小塑性变形的情况下,宏观裂纹在粗晶区急速扩展,产生断裂。接头宏观断口呈小刻面特征,断口较平齐,与正应力相垂直。沿粗大 β 晶粒之间的晶界发生解理断裂,但由于各个晶粒解理面的不断变化,断裂表面在外观上呈现“颗粒状”(如图 6d)。



BM: base metal; TZ: transition zone; FHAZ: fine grain heat-affected zone; CHAZ: coarse grain heat-affected zone; FTZ: fine grain transition zone; FZ: fusion zone

图 5 不同焊接参数下不同晶粒尺寸细晶 TC21 焊接接头显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution of welded joint of fine grain TC21 with various parameters (a)2 μ m 180A; (b)2 μ m 160A; (c)7 μ m 180A; (d)7 μ m 160A

进一步对微观断口观察可以发现,在宏观裂纹沿 β 晶粒之间的晶界急速扩展时,粗大的 β 晶粒内部片状或针状 α' 相界面之间也有裂纹扩展,最终导

致高倍显微镜下观察到一种条状的韧窝特征,这实质上是试样在拉伸载荷下沿片状 α' 集束中的 α'/β 界面撕裂形成的(如图 6e,f)。在撕裂棱上布满了

大小不等的韧窝,这一特征与标准的解理断口微观形貌有明显的区别。所以细晶粒 TC21 钛合金焊接接头的拉伸断口呈准解理断裂特征。相同焊接规范下 7 μm 细晶粒 TC21 焊接接头拉伸断口形貌与 2 μm 细晶粒 TC21 焊接接头拉伸断口相似。只是宏观断

口起伏更大,微观上解理断裂的特征更为明显,有明显的解理小刻面及解理台阶,“舌”状花样也很明显(如图 6g,h)。每个解理小刻面上布满了大小不等的韧窝(如图 6i,k),只是与 2 μm 细晶粒钛合金焊接接头拉伸断口韧窝相比较小较浅,塑性较差。

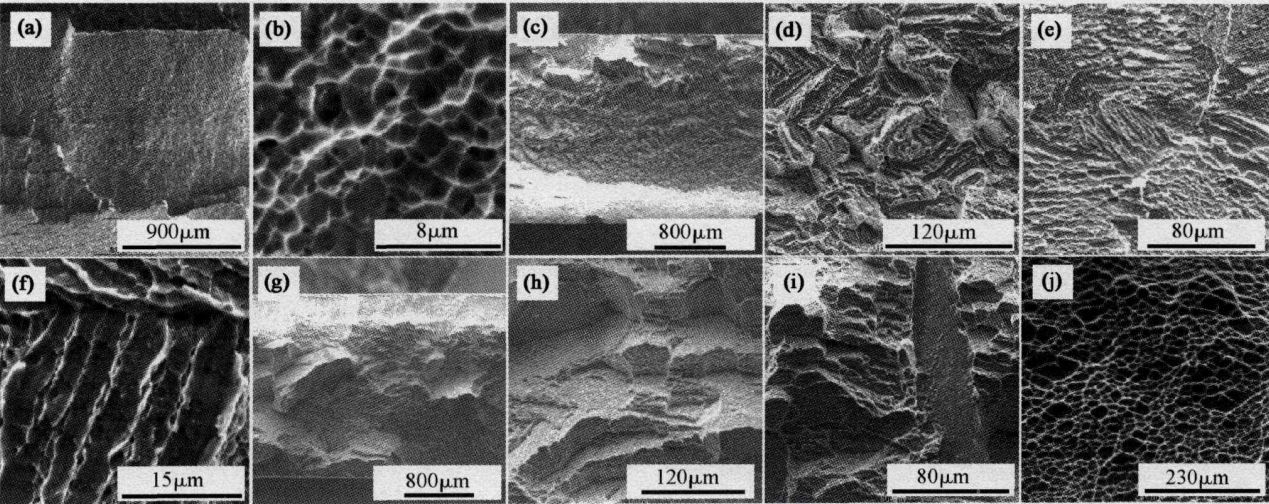


图 6 相同焊接规范(160A)下细晶 TC21 钛合金焊接接头拉伸试件断口形貌 (a)(b) 2 μm 的细晶粒 TC21 母材;
(c) ~ (f) 2 μm 的细晶 TC21 合金焊接接头;(g) ~ (k) 7 μm 的细晶 TC21 合金焊接接头
Fig. 6 Tensile fractographs of welded joint of fine grain TC21 with same parameters(160A)
(a)(b) 2 μm fine grain TC21 base metal;(c) ~ (f) welded joint of 2 μm base metal;(g)(k) welded
joint of 7 μm base metal

3 结 论

(1)细晶粒 TC21 钛合金 TIG 焊焊接接头抗拉强度达到母材的 95% 左右,焊接接头正反面熔透性均较好,焊接性较好;但是焊接接头脆化严重,拉伸过程中无屈服阶段,伸长率和断面收缩率均较低。

(2)细晶粒 TC21 钛合金焊缝中心与热影响区组织相似,都由片状或针状 α' 马氏体组成。相同焊接规范下,2 μm 的细晶 TC21 合金焊缝及热影响区高温停留时间长,冷却速率较低, α' 马氏体持续生长,形成相互平行排列的针状 α' 组织;7 μm 的细晶 TC21 合金焊缝及热影响区高温停留时间短,冷却速率快, α' 马氏体来不及生长, α' 的尺寸较小且相互交错,形成编织状 α' 组织。

(3)细晶粒 TC21 钛合金靠近母材的热影响区细晶区存在一个软化区(过渡区(TZ)),此区域硬度明显低于热影响区的其他部分及焊缝区域的硬度;而焊缝中心与热影响区粗晶区分界处(细晶过渡区(FTZ))也存在硬度的下降,不过此区域下降幅度不大。相同焊接规范下随着母材晶粒度的增大,软化

区变宽,且硬度下降趋势减慢。

(4)细晶粒 TC21 钛合金 TIG 焊焊接接头的拉伸断口呈准解理断裂特征,相同焊接规范下随着晶粒度的增大,断口宏观起伏越大,焊接接头塑性越差,拉伸断口解理特征越明显。

参考文献:

[1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊): 4-11.

[2] 曲恒磊, 赵永庆, 朱知寿. 一种高强韧钛合金及其加工方法: 中国国防专利, 03105965. 1 [P]. 2003-09-30.

[3] 赵永庆, 曲恒磊, 冯亮, 等. 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制[J]. 钛工业进展, 2004, 21(1): 22-24.

[4] 王新南. 损伤容限型钛合金强韧化技术研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2006: 156-160.

[5] WEERTMAN J R. Hall-Petch strengthening in nanocrystalline metals [J]. Mater Sci Eng (A), 1993, 166: 161-167.

[6] MABUCHI M, HIGASHI K. The processing properties, and applications of high-strain-rate superplastic materials [J]. JOM, 1998, 6: 34-39.

[7] LIN Xin, YANG Haiou, CHEN Jing, et al. Acta Metallurg-

gica Sinica [J]. 2006, 42(4): 361 - 370.

的扫描热显微镜分析[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16

[8] 郭富安, 纪艳丽, TRANNOY N. 纯钛表面超细晶组织

(9): 1494 - 1499.

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Fine Grain TC21 Alloy in TIG

ZHOU Shui-liang, TAO Jun, GUO De-lun

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Fine grain TC21 alloy with various grain sizes were welded by conventional TIG welding. The mechanical properties of welded joint were investigated. The results showed that the tensile strength of welded joint of fine grain TC21 with various grain sizes was about 95% one of the base metal, the weldability of TC21 alloy was good by and large. But welded joint was seriously brittle, the specific elongation and reduction of cross section area of welded joint were more lower than that of the base metal. The microstructure of fusion zone (FZ) and heat-affected zone (HAZ) were similar, which were called α' martensites. With the same parameters, the microstructure of FZ and (HAZ) of 2 μm TC21 alloy were lamellar or long granular α' structures, whereas the microstructure of welded joint of 7 μm TC21 alloy was needle or small granular α' structure, which α' clusters was small and crossed. Hardness measurements showed there was a softened zone in fine grain heat-affected zone (FHAZ) near the base metal, the hardness of softened zone was the lowest. However, the boundaries between FZ and coarse grain heat-affected zone (CHAZ) of welded joint was another softened zone, but hardness decreased slightly in this zone. Tensile fractures of welded joint presented character of quasi-cleavage crack. Cleavage features of fractography of weld joint were more obvious with increasing grain size of the base metal.

Key words: fine grain TC21 alloy; TIG welding; microstructure; mechanical properties