

细晶粒 TC21 钛合金 TIG 焊成形研究

Studing on Appearance of Weld of Fine Grain TC21 Alloy in TIG

周水亮,陶 军,郭德伦

(北京航空制造工程研究所 航空连接重点实验室,北京 100024)

ZHO U Shui-liang,TAO Jun, GUO De-lun

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

摘要: 进行了 $2\mu\text{m}$ 及 $7\mu\text{m}$ 两种晶粒尺寸的细晶粒 TC21 钛合金常规 TIG 焊试验,研究了母材晶粒尺寸对钛合金焊缝成形的影响。结果表明, $2\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金的焊接参数范围比 $7\mu\text{m}$ 的 TC21 钛合金小,只有在一个很窄的电流参数范围内, $2\mu\text{m}$ 的细晶 TC21 钛合金才能得到优良的焊缝成形,脱离此范围,焊缝成形均比 $7\mu\text{m}$ 的钛合金差很多;所以细晶粒钛合金晶粒越细,进行 TIG 焊接时工艺控制越困难。讨论了与晶粒尺寸相关的热导率和比热等材料性能参数对热传递的作用,以此对焊缝成形规律作出了初步的解释。

关键词: 细晶粒钛合金;热导率;比热容;焊缝成形

中图分类号: TG477.781.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009) Suppl1-0069-04

Abstract: Fine grain TC21 alloy sheets with two different grain sizes were welded by conventional tungsten inert-gas arc welding (TIG) respectively. Appearance of welds of two alloys influenced by grain sizes were investigated. The results indicated that the range of welding current parameter of $2\mu\text{m}$ alloy was smaller than that of $7\mu\text{m}$ alloy, when the range of welding current parameter was wide, appearance of weld of $2\mu\text{m}$ alloy got worse. However, when the range of welding current parameters was narrow relatively, appearance of weld of $2\mu\text{m}$ alloy was better than that of $7\mu\text{m}$ alloy. While grain size of TC21 is smaller, the process control of TC21 in TIG turns more difficult. The effect of heat conductivity and specific heat as performance parameter of alloy on heat transfer during TIG were investigated, the rule of appearance of weld was preliminarily interpreted.

Key words: fine grain Ti alloy; heat conductivity; specific heat; appearance of weld

钛合金具有密度小、比刚度、比强度高,耐蚀性、耐热性好等一系列优点,在航空航天、军事、石油化工、海洋工程、汽车和医疗等领域得到了越来越广泛的应用^[1,2]。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^[3]。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 ($70\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 和较低的裂纹扩展速率 (da/dN) 等特点^[4,5]。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^[6,7]。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显得十分重要。

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^[8,9]。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提高。因此,细晶粒 TC21 钛合金的焊接问题受到了越来越多人的关注,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。为了推广高损伤容限型细晶 TC21 钛合金的应用,开展细晶粒 TC21 钛合金的 TIG 焊接成形性能研究具有非常重要的意义。

1 实验方法

本文采用的材料为 $2\mu\text{m}$ 及 $7\mu\text{m}$ 两种不同晶粒尺寸的细晶 TC21 钛合金,其微观组织如图 1 所示,名义成分(原子分数)为 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb-0.1Si,相变点温度为 $950\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。细晶粒 TC21 钛合

金板材为采用反复轧制的大塑性变形方法制得;板厚均为 2.5mm,规格为 150mm ×100mm,沿边长 100mm 的方向为轧制方向。

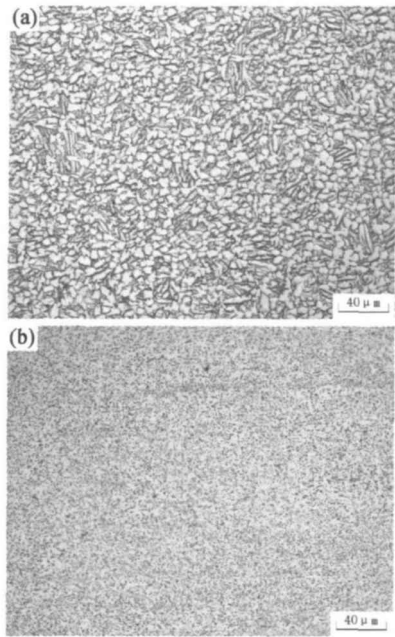


图 1 TC21 钛合金的微观组织
(a) 7μm TC21 钛合金;(b)2μm TC21 钛合金
Fig.1 Microstructure of TC21 alloy
(a) 7μm TC21 alloy; (b) 2μm TC21 alloy

焊接之前进行必要的酸洗,然后采用钢丝刷去除

表 1 7μm 的 TC21 钛合金 TIG 焊接规范和焊缝成形

Table 1 Welding parameters and appearance of weld of 7μm TC21 alloy in TIG

Experimental number	welding current/ A	arc voltage/ V	welding speed/ (m · h ⁻¹)	Wire feeding rate/ (m · h ⁻¹)	Width of face of weld/ mm	Width of back of weld/ mm	Width of back of weld / width h of face of weld
1	140	13.4	11.6	11.5	5.95	4.70	0.791
2	150	14.7	11.6	16.1	6.52	5.22	0.803
3	160	15.7	11.6	16.1	7.20	6.22	0.864
4	170	16.3	11.7	23.2	8.34	7.02	0.842
5	180	16.8	11.7	28.9	9.53	7.38	0.775

在以上试验的基础上系统的进行了 2μm 的 TC21 钛合金不同焊接规范 TIG 焊接工艺试验,其焊接参数和焊缝全貌分别如表 2、图 4 所示。由表 2 可知:采用不同的焊接规范焊接 2μm 的细晶钛合金时,适中规范(电流 155~160A)所得到的焊缝正面宽度\背面宽度最大,焊缝成形最好,这与 7μm 的细晶钛合金的焊接相同;在能使焊缝熔透成形的焊接电流范围内(140~180A)焊接时,2μm 的细晶粒钛合金的焊缝正面宽度\背面宽度变化范围(0.55~0.91)大,说明 2μm 的细晶 TC21 钛合金对温度的敏感性大,当焊接

待焊区氧化膜,并用丙酮擦拭干净。对细晶粒钛合金进行平板对接 TIG 焊,试验在纵缝自动氩弧焊机上进行,焊接电源为美国 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。焊后按航空工业标准 HB5376 - 89 对焊接接头进行质量检验,并用游标卡尺测量焊缝的宽度,在试件正面、背面的不同部位分别至少测量三个数值,取其平均值,作为焊缝正面、背面的宽度;比较正面宽度/背面宽度的大小,分析晶粒尺寸对细晶钛合金焊接规范及焊缝成形性能的影响。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

本试验首先针对 7μm 的 TC21 钛合金材料,开展了不同焊接规范 TIG 焊接工艺试验,其焊接参数和焊缝全貌分别如表 1、图 2 所示。由表 1 可知:采用不同的焊接规范焊接 7μm 的细晶粒钛合金时,适中规范(电流 160~170A)所得到的焊缝正面宽度/背面宽度最大,焊缝成形最好;在能使焊缝熔透成形的焊接电流范围内(140~180A),7μm 的钛合金的焊缝正面宽度/背面宽度(如图 3)较大,变化范围较小(0.78~0.88),说明 7μm 的钛合金对焊接热输入不敏感,焊缝成形性能好。

参数在比较大的范围内变化时,焊缝成形没有 7μm 的钛合金的好;随着 TC21 钛合金晶粒尺寸的减小,得到优良的焊缝成形的焊接参数范围变窄。

对比表 1 和表 2,可知:采用相同的适中规范(电流 155~160A)焊接 2μm 及 7μm 的细晶粒 TC21 钛合金时,2μm 钛合金的焊缝正面宽度和背面宽度均比 7μm 钛合金的大,正宽/背宽也较大,说明在此适中规范下,2μm 细晶钛合金焊缝成形较 7μm 钛合金的充分,焊缝成形较好;而采用相同的软规范(电流 140A)和硬规范(电流 180A)时,2μm 钛合金的焊缝成形均

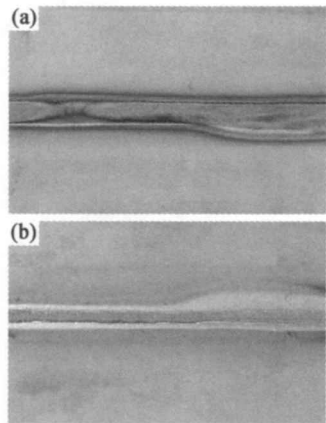


图 2 7 μm 的 TC21 钛合金适中规范 TIG 焊缝全貌
(a) 焊缝正面; (b) 焊缝背面
Fig. 2 Weld of 7 μm TC21 alloy in TIG
(a) face of weld; (b) back of weld

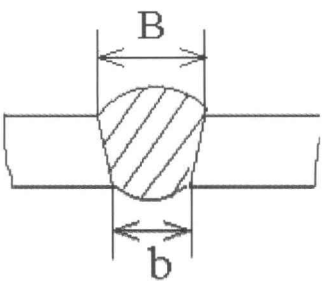
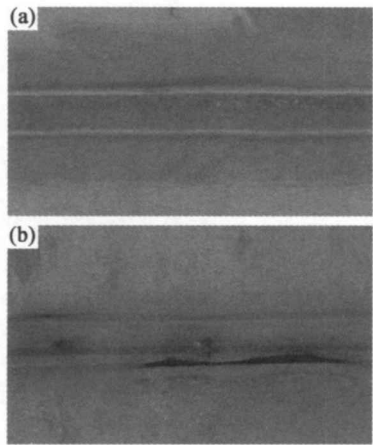


图 3 焊缝背面宽度/正面宽度示意图
Fig. 3 The sketch of width of back of weld / width of face of weld

没有 7 μm 钛合金的好。
2. 2 分析讨论
采用相同的焊接规范 (电流 155~160A) 焊接 2, 7 μm 的细晶粒 TC21 钛合金时, 影响焊缝成形的热量

表 2 2 μm 的 TC21 钛合金 TIG 焊接规范和焊缝成形
Table 2 Welding parameters and appearance of weld of 2 μm TC21 alloy in TIG

Experimental number	Welding current/ A	Arc voltage/ V	Welding speed/ (m · h ⁻¹)	Wire feeding rate/ (m · h ⁻¹)	Width of face of weld/ mm	Width of back of weld/ mm	Width of back of weld / Width of face of weld
1	140	13. 4	11. 6	11. 2	5. 15	2. 81	0. 545
2	150	14. 7	11. 6	11. 2	6. 63	5. 10	0. 771
3	155	15. 2	11. 6	11. 2	7. 55	6. 89	0. 913
4	160	15. 7	11. 7	16. 2	7. 53	6. 36	0. 844
5	170	16. 3	11. 7	23. 2	7. 95	5. 97	0. 753
6	180	16. 8	11. 7	28. 7	8. 30	4. 80	0. 578



(a) 焊缝正面; (b) 焊缝背面
图 4 2 μm 的 TC21 钛合金适中规范 TIG 焊缝全貌
Fig. 4 Weld of 2 μm TC21 alloy in TIG
(a) face of weld; (b) back of weld

晶粒尺寸变小时, 该组织中有效电子浓度也变小, 热导率随着电子浓度的降低而减小; 其次当晶粒尺寸变小时, 在具有小晶粒的组织中, 晶界占的比例较大, 晶界处的原子排序也比较混乱。这些能引起强烈的声子与电子的散射, 从而降低组织的热导率。
由于细晶钛合金晶粒细化, 晶界增多, 而使热导率减小 (如图 5)。对于热影响区来说, 焊接过程中温度较高, 热影响区组织发生了晶粒再结晶, 晶粒长大; 由于细晶钛合金晶粒细小, 晶界的增多导致焊接加热过程中稳定性热变差, 其界面能的降低为晶粒的长大提供了更大的驱动力^[13], 所以再结晶晶粒的长大趋势明显大于常规钛合金, 再结晶晶粒迅速长大, 最终比常规钛合金热影响区晶粒还粗大 (如图 6), 晶界的减少速度加快, 晶界阻碍热传导作用变小, 热量加快散失。
其次, 由于晶粒细化导致比热容减小 (图 7), 且减小幅度明显大于热导率。对于不同晶粒度钛合金, 在距离焊缝中心相同距离处, 虽然 2 μm 的钛合金 (由于热导率的降低) 热传导到此处的热量较少, 但是比热容的大幅降低反而使此处的温度较高 (如图 8), 这就使焊接电弧热量在熔池及热影响区中聚集而无法快速的

传递与散失主要与以下几个方面有关:
首先, 文献[10 - 12]指出: 固体材料中的热传导是由电子传导和声子传导来完成的。一般来说, 在纯金属及合金, 对热导率的贡献主要来自于电子传热。当

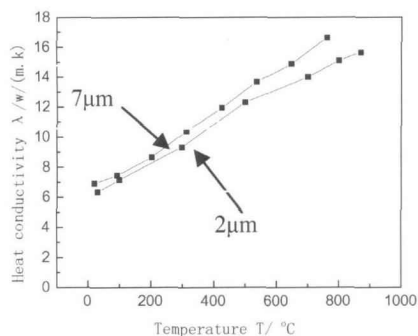


图 5 细晶粒 TC21 钛合金热导率

Fig. 5 Heat conductivity of fine grain TC21 alloy

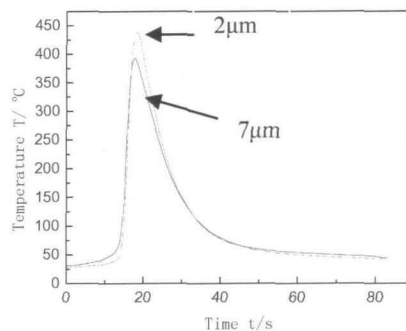


图 8 相同焊接规范下距离焊缝为 7mm 处热循环

Fig. 8 Thermal cycling in 7mm from weld

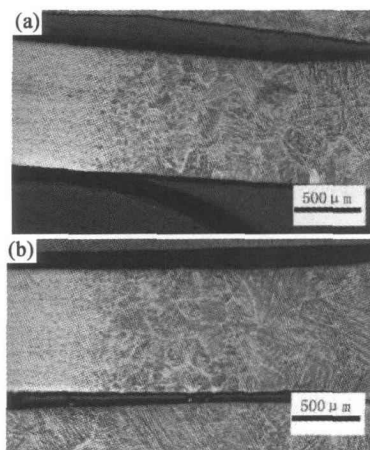


图 6 细晶粒 TC21 钛合金焊缝热影响区晶粒大小分布

(a) 2μm 的 TC21 钛合金; (b) 7μm 的 TC21 钛合金

Fig. 6 Grain size distribution of HAZ of fine grain TC21 alloy

(a) 2μm TC21 alloy (b) 7μm TC21 alloy

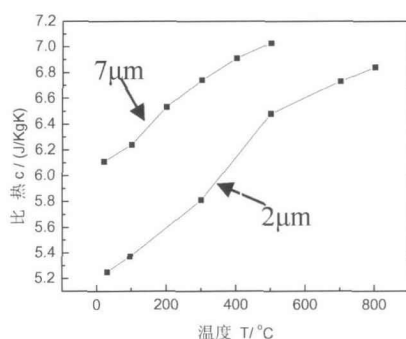


图 7 细晶粒 TC21 钛合金比热容

Fig. 7 Specific heat of fine grain TC21 alloy

散失,热量越聚越多,焊缝越来越宽。

另一方面,由于焊缝背面用铜垫板保护,而铜的热导率远远大于 TC21 钛合金从而导致热量在焊缝厚度方向的热传明显大于焊缝宽度方向上的热传,熔池聚集的热量必然会优先向上传输,在向上传输的同时热量也向垂直于焊缝的方向传递,所以最终导致熔池也越来越宽,冷却后焊缝正面宽度和背面宽度都明显比

7μm 钛合金时大,正宽/背宽也较大,焊缝成形比 7μm 钛合金的好。

总之,采用适中规范(电流 155~160A) TIG 焊接细晶粒钛合金过程中,由于晶界的阻碍保留下来的热量更多,这就导致适中规范焊接时 2μm 的细晶钛合金焊缝正面宽度、背面宽度均大于 7μm 的钛合金,正宽/背宽也较大,焊缝成形较好。所以 2μm 细晶粒钛合金要想获得优良的焊缝成形,应该在能使 7μm 钛合金得到优良焊缝成形的焊接电流基础上适当减小电流 3~6A,这能确保全得到优良的焊缝成形。

3 结论

(1) 采用常规 TIG 焊接不同晶粒尺寸的细晶粒 TC21 钛合金时,随着母材晶粒尺寸减小,细晶钛合金焊接参数范围变窄。

(2) 但是在这个很窄的参数范围内,较细晶粒钛合金的焊缝成形性能优于较粗晶粒度钛合金,除此之外焊缝成形均比较粗晶粒钛合金差很多。

(3) 细晶粒钛合金母材晶粒越细,进行 TIG 焊接时焊接参数调解范围越小,工艺控制越困难。

参考文献

- [1] VASSEL A, GUEDOU J Y. Aero-engines applications present and future[R]. St Preterburg, Russia: 9th world Conf on Titanium, 1999, 123 - 128.
- [2] LINEBERGER L. Advanced Materials & Process[J]. ASM International, Materials Park, 1998, 5: 45.
- [3] 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.
- [4] 曲恒磊, 赵永庆, 朱知寿. 一种高强韧钛合金及其加工方法[P]. 中国国防专利: 申请号 03105965.1, 2003-09-30.
- [5] 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.

(下转第 76 页)

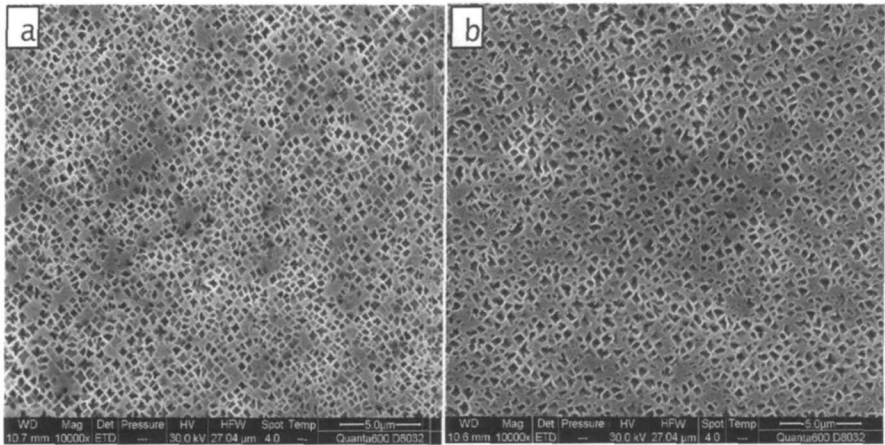


图 6 K447 合金 γ' 相组织形貌 (a) 定向柱晶;(b) 等轴晶
Fig. 6 SEM micro graph of γ' phase in alloy K447 (a) direction solidified micro structure; (b) equiaxial microstructure

表 2 K447 合金等轴晶状态的持久性能
Table 2 Stress rupture properties of equiaxial grain in K447 alloy

State	θ / °C	σ / MPa	Rupture life/ h
Direction solidified grain	760	724	331
	980	207	113. 9
	1040	127	146. 4
Equiaxial grain	760	620	424
	980	186	120

3 结论

(1) K447 合金偏析小,组织稳定性好。

(2) 由于 K447 合金材料在铸造凝固过程中容易产生偏析,形成较多的共晶相,需要通过热处理来消除偏析,调整碳化物和 γ 相的数量和形态。

参考文献

[1] 西姆斯 C T. 高温合金[M]. 大连:大连理工大学出版社,1991. 1 - 50.
收稿日期:2008-10-15;修订日期:2009-02-20
作者简介:李爱兰(1976 →),女,硕士,工程师,主要研究方向:高温合金及精密铸造工艺,联系地址:北京 81 信箱 1 分箱(100095),E-mail:ailanlimater@126.com

(上接第 72 页)

[6] 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.
[7] 《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,2005,131 - 134.
[8] J. R. WEERTMAN. Hall-Petch strengthening in nanocrystalline metals[J]. Mater. Sci. Eng,1993, A166 :161 - 167.
[9] MABUCHI M, HIGASHI K. The processing properties, and applications of high-strain-rate superplastic materials [J]. JOM, 1998, 6 :34 - 39.
[10] 郭富安, 纪艳丽, TRANNOYN. 纯钛表面超细晶组织的扫描热显微镜分析[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16 (9) :1494 - 1499.
[11] DORLOT J M, BACLON J P, MASOUNAVE J, et al. Deuxième édition revue et augmentée [A]. Presses Internationales de l'Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

[C]. Montreuil[sn]. 1999,246 - 266.
[12] HOFFMANN H, VANCEAJ. Critical assessment of thickness dependent conductivity of thin metal films[J]. Thin Solid Films, 1981, 85 :147 - 167.
[13] 吴巍, 高洪明, 吴林. 细晶粒钛合金粗晶区组织及接头力学性能分析[J]. 焊接学报, 2008,29 (1) :61 - 64.

基金项目:国家重大基础研究项目子课题(20060948)
收稿日期:2008-10-15;修订日期:2009-02-20
作者简介:周水亮(1981 →),男,硕士,主要从事钛合金、高温合金等材料的工艺研究,联系地址:北京市朝阳区八里桥北东军庄 1 号北京航空制造工程研究所 102 室(北京市 340 信箱 102 室),E-mail:pippozl@yahoo.cn