文章编号: 1004-0609(2013)S1-s0418-06

不同热处理工艺对 TC4-DT 钛合金厚板组织和 力学性能的影响

雷文光^{1,2},毛小南²,杨冠军¹,韩 栋²,李 磊²

西北工业大学 材料科学与工程学院,西安 710012;
 西北有色金属研究院 钛合金研究所,西安 710016)

摘 要:研究几种不同热处理工艺对 TC4-DT 钛合金厚板显微组织和力学性能的影响。结果表明: TC4-DT 合金 在两相区固溶处理得到等轴或双态组织,其室温拉伸性能较好,而经过β相区固溶处理得到片层组织具有较好的 断裂韧性;通过控制β相区固溶处理时的冷却速度以及第二重热处理时的温度以及冷却速度,可以获得不同的α 片层组织,从而改善其断裂韧性。采用(1010 ℃,45 min,AC)+(965 ℃,1.5 h,AC)+(550 ℃,8 h,AC)多重热处理工 艺,可实现合金强度-塑性-韧性的较好匹配,获得优良的综合性能。

关键词: TC4-DT 钛合金; 板材; 多重热处理; 显微组织; 力学性能 中图分类号: TG294 **文献标志码:** A

Effects of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of TC4–DT titanium alloy plate

LEI Wen-guang^{1, 2}, MAO Xiao-nan², YANG Guan-jun¹, HAN Dong², LI Lei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710012, China;

2. Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The effects of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of TC4–DT alloy were discussed. The results show that the sample with equiaxed or duplex microstructure after two phase field heat treatment has better room temperature tensile properties, while the sample with lamellar microstructure after β phase field heat treatment has better fracture toughness. The different thicknesses of α lamellar are obtained by controlling the cooling rates from β phase field solution treatment, temperature and cooling rates of secondary heat treatment, which improves the fracture toughness. The excellent matching of strength, ductility and fracture toughness are obtained after multi heat treatment of (1 010 °C, 45 min, AC)+(965 °C, 1.5 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC).

Key words: TC4-DT titanium alloy; plate; multiple heat treatment; microstructure; mechanical properties

随着损伤容限思想在结构材料设计中的广泛应用,开发损伤容限型钛合金已成为各国争相研究的重点^[1],国内外先后开发了一批具有较高的断裂韧度和疲劳裂纹扩展抗力的损伤容限型钛合金,如美国的Ti-6Al-4V ELI^[2]、Ti-62222S^[3]以及中国自主研制的TC2I^[4]、TC4-DT^[5]等。将该类合金在两相区固溶加时

效处理得到等轴或双态组织,可以获得高强度、高塑 性以及优异的疲劳性能,但是抗疲劳裂纹扩展能力以 及断裂韧性较低,而经过β区热处理得到具有原始β 晶粒的片层组织,使合金具有优异的断裂韧性以及抗 裂纹扩展能力^[6],抗拉强度略低于等轴或双态组织, 但塑性较差,在一定程度上限制了β区固溶工艺参数

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划资助项目(2012KCT-23)

收稿日期: 2013-06-20; 修订日期: 2013-07-30

通信作者: 毛小南, 教授, 博士; 电话: 029-86250729; E-mail: xnmao1966@163.com

的应用^[7]。通过改善热处理工艺控制片层组织的参数, 解决片层组织的塑性问题实现强度-塑性-韧性的最 佳匹配一直是钛合金β热处理的技术难题^[8]。

TC4-DT 钛合金作为我国自主研制的一种损伤容 限型钛合金,对强度、塑性、断裂韧性和裂纹扩展速 率提出了更高的要求,有望成为飞机用整体隔框、梁、 以及直升机用传动部件等关键承力构件^[9-10]。本文作 者采用两相区固溶+时效、多重热处理,单相区固溶+ 时效的热处理工艺,研究不同热处理制度对 TC4-DT 钛合金显微组织和力学性能的影响,为获得该合金强 度-塑性-韧性最佳匹配的热处理工艺提供依据。

1 实验

实验材料为经3次真空自耗电弧熔炼制备的 d460 mmTC4-DT 钛合金铸锭,在β区开坯锻造后,并在两 相区加工成25 mm 厚的板材。合金的化学成分见表1, 用金相法测得合金的相变点为(975±5)℃。板材的原 始组织如图1 所示,为细小的等轴组织,无明显加工 流线,有部分细条状α相。

表1 TC4-DT 合金的化学成分

Table 1Chemical composition of TC4-DT alloy (massfraction, %)

Ti	Al	V	Fe	С	Ν	Н	0
Bal	5.92	4.24	0.01	0.04	0.005	0.003	0.08



图 1 实验用 TC4-DT 合金原始显微组织

Fig. 1 Original microstructure of TC4–DT alloy for experiment

采用箱式电阻炉(控温精度为±5℃),分别对 TC4-DT 钛合金进行不同制度的热处理(见表 2),然后 在 Instron 1 185 万能力学试验机上进行室温拉伸性能 及断裂韧性测试,拉伸试样工作段直径为 5 mm,断 裂韧性试样为 *B*=25 mm 的 C(T)试样。用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜观察合金的显微组织,金相腐蚀剂 配比为 *V*(HF):*V*(HNO₃):*V*(H₂O)=1:3:7。

表2 TC4-DT 合金热处理制度

 Table 2
 Heat treatments of TC4–DT alloy

Sample No.	Heat treatment					
HT1	(930 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)					
HT2	(950 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)					
HT3	(965 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)					
нтл	(1 010 °C, 45 min, AC)+(930 °C, 1.5 h, AC)+					
1114	(550 °C, 8 h, AC)					
НТ5	(1 010 °C, 45 min, AC)+(950 °C, 1.5 h, AC)+					
1115	(550 °C, 8 h, AC)					
нт6	(1 010 °C, 45 min, AC)+(950 °C, 1.5 h, FC)+					
1110	(550 °C, 8 h, AC)					
	(1 010 °C, 45 min, AC)+(950 °C, 1.5 h, WQ)+					
111 /	(550 °C, 8 h, AC)					
ИТЯ	(1 010 °C, 45 min, WQ)+(930 °C, 1.5 h, AC)+					
1110	(550 °C, 8 h, AC)					
нто	(1 010 °C, 45 min, WQ)+(950 °C, 1.5 h, AC)+					
1119	(550 °C, 8 h, AC)					
HT10	(1 010 °C, 45 min, AC)+(730 °C, 3 h, AC)					

2 结果与分析

2.1 不同热处理对合金显微组织的影响

2.1.1 两相区固溶+时效对合金显微组织的影响

图 2(a)~(c)所示分别为 TC4-DT 钛合金在两相区 经不同温度固溶+时效处理后的显微组织。由图 2 可 见,合金组织为典型的双态组织,由初生 *a* 相+*β* 转变 组织组成。随着固溶温度的升高,初生 *a* 相含量逐渐 减少,*β*转变组织中的次生 *a* 相含量增多并有所粗化。 930 ℃固溶处理时的初生 *a* 相含量约为 50%左右,*a* 相被拉长成断续状,无明显晶界(见图 2(a));随着固溶 温度升高,初生 *a* 相向*β* 相基体溶解,950 ℃固溶处 理时的初生 *a* 相含量约为 30%左右,拉长的初生 *a* 相 发生球化,生成部分球状 *a*(见图 2(b));当固溶温度继 续升高至 965 ℃时,初生 *a* 相进一步球化,含量减少 至 10%左右,可看见连续清晰的晶界 *a* 相生成,晶粒 内析出的次生 *a* 片层增厚(见图 2(c))。



图 2 TC4-DT 合金两相区不同固溶温度下的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TC4–DT alloy after solution treatment at $\alpha+\beta$ phase field: (a) (930 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC); (b) (950 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC); (c) (965 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)

2.1.2 多重热处理对合金显微组织的影响

TC4-DT 钛合金经第一重热处理,空冷后得到魏 氏组织(见图 3(a)),将其在两相区经第二重热处理后得 到如图 4 所示的显微组织。由于第二重热处理在两相 区进行,部分α相将转变为β相,且第二重固温度越 高转变而成的β相越多,在随后的冷却过程中β相又 转变为细小的次生α相。未转变成β相的片层称为初 生α片层(见图 4(a)),初生α片层较粗大,初生α片 层之间分布有细小的次生α片层。对比图 4(a)和(b)可 以看出,在930 ℃进行第二重热处理时,由于只有少 量的α相转变为β相,所以空冷后的组织中没有出现 明显的次生 α 片层;随着第二重固溶温度提高到 950 ℃,次生α片层数量增多,且初生α片层有增厚 的趋势。图 4(c)所示为在 950 ℃进行第二重热处理后 的炉冷组织。由图 4(c)可见,在长条状初生α片层之 间分布数量较多的短粗状次生α片,由于冷却速度较 慢,初生α片层和次生α片层均增厚,且次生α片层 长度受到初生α片层间距的限制。图 4(d)所示为经过 第二重热处理后的水冷组织。由图 4(d)可见,由于冷 却速度较快,两相区固溶形成的β相转变为细小的针 状 α'相,显微组织与图 3(b)所示的马氏体组织类似, 但是 α'相含量较之更少。



图 3 TC4-DT 合金经单相区固溶后在不同冷却条件下的显微组织

Fig. 3 Microstructures of TC4–DT alloy by different cooling rates after β heat-treatment: (a) 1 010 °C, 45 min, AC; (b) 1 010 °C, 45 min, WQ

水冷后的马氏体组织(见图 3(b))在两相区经第二 重热处理后空冷得到如图 5(a)和(b)所示的显微组织。 由图 5(a)和(b)可以看出,水冷得到的马氏体组织在两 相区保温后形成粗大的α片层组织,粗大的α片层厚 度大约为 8 μm,明显大于图 4(a)和(b)中α片层厚度。 在两相区第二重热处理时,只有少量α相发生转变, 并不能形成大量的β相,且空冷时冷却较快,α相来 不及扩散并长大。因此,图 5(a)和(b)中粗大的α片层 应该是由第一重热处理生成的马氏体直接分解而成的,



图 4 空冷后得到的片层组织经两相区不同热处理得到的显微组织

Fig. 4 Microstructures of air-cooled lamellar after secondary treatment at $\alpha+\beta$ phase field: (a) 930 °C, 1 h, AC; (b) 950 °C, 1 h, AC; (c) 950 °C, 1 h, FC; (d) 950 °C, 1 h, WQ



图 5 水冷后得到的马氏体组织经两相区不同热处理得到的显微组织

Fig. 5 Microstructures of water-quenched martensite after secondary treatment at $\alpha+\beta$ phase field: (a) 930 °C, 1 h, AC; (b) 950 °C, 1 h, AC

而不是由马氏体转变为 β 相再由 β 相转变而成的,与 图 4(a)和(b)中生成的组织形成机理不同。

2.1.3 单相区固溶+时效对合金显微组织的影响

β 区固溶后的魏氏组织不经过两相区第二重热处 理,而直接进行(730 ℃,3h,AC)的时效处理,消除固 溶时产生的高密度位错并使组织均匀化,最终得到细 小片层组织。如图 6 所示,α片层尺寸在 1~3 μm 左右, 取向相同的相邻 α 片层并行排列成 α 集束。



图 6 TC4-DT 钛合金经单相区固溶+时效得到的显微组织 Fig. 6 Microstructure of TC4-DT alloy obtained by (1 010 ℃, 1 h, AC)+(730 ℃, 3 h, AC)

中国有色金属学报

Table 3 Tensile and fracture toughness of TC4-DT alloy under different heat-treatments

Sanple No.	Heat treatment	<i>R</i> _m /MPa	R _{p0.2} /MPa	A/%	Z/%	$K_q/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
HT1	(930 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	916	816	16.5	56	85
HT2	(950 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	933	830	16.0	52	93
HT3	(965 °C, 1 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	946	859	15.0	50	96.5
HT4	(1 010 °C, 45 min, AC)+(930 °C, 1.5 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	917	825	10.0	27	102
HT5	(1 010 °C, 45 min, AC)+(950 °C, 1.5 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	930	829	12.0	28	104
HT6	(1 010 °C, 45 min, AC)+(950 °C, 1.5 h, FC)+(550 °C, 8 h, AC)	876	783	12.5	28	110
HT7	(1 010 °C, 45 min, AC)+(950 °C, 1.5 h, WQ)+(550 °C, 8 h, AC)	1109	991	7.5	11	98
HT8	(1 010 °C, 45 min, WQ)+(930 °C, 1.5 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	923	820	13.5	25	113
HT9	(1 010 °C, 45 min, WQ)+(950 °C, 1.5 h, AC)+(550 °C, 8 h, AC)	930	823	12.5	20	117
HT10	(1 010 °C, 45 min, AC)+(730 °C, 3 h, AC)	919	826	9.0	22	101

2.2 不同热处理对合金力学性能的影响

表 3 所列为 TC4-DT 钛合金在不同热处理制度下 的力学性能。由表 3 可知,两相区固溶+时效强化效 果较好,随着两相区固溶温度的升高,合金的强度以 及断裂韧性逐渐增加,而塑性有所降低。这主要是由 于随着固溶温度的升高,初生α相含量减少,导致合 金塑性有所降低,而β转变组织中的次生α相含量增 加,有利于提高合金的强度和断裂韧性。

单相区固溶空冷得到的魏氏组织在两相区进行第 二重固溶时,随着固溶温度的升高,合金的强度、塑 性以及断裂韧性均有增加趋势。这主要是由于随着第 二重固溶温度的提高,次生α片层数量增多,导致初 生α片层增厚。而在第二重固溶时,随着冷却速度的 提高,合金的强度急剧增加,塑性显著下降,断裂韧 性也呈下降趋势。这主要是由于水冷时生成的细针状 α'马氏体经过时效处理后,强化效果明显,导致强度 较高。而炉冷生成的α片层变成短粗状,发生一定程 度的等轴化,合金变形协调能力有所增强,从而使合 金的塑性和断裂韧性得到改善,而强度损失较大。

单相区固溶水冷得到的马氏体组织在两相区进行 第二重处理时,随着固溶温度的升高,合金的强度以 及断裂韧性增加,塑性有所下降。与 HT4 及 HT5 相 比,HT8 和 HT9 都不同程度地提高了合金的抗拉强度 以及伸长率,特别是断裂韧性得到显著提高。这主要 是由于马氏体分解生成的α片层厚度较大,使得裂纹 扩展路径更加曲折,抵抗裂纹穿过片层的能力增加, 从而具有较高的断裂韧性。 单相区固溶+时效处理得到的片层组织的强度和 断裂韧性较好,与 HT4 处理的合金性能相当。这主要 由于组织中细小的α片层和集束有利于提高合金的断 裂韧性,但在单相区固溶时β晶粒发生长大并形成连 续晶界α,裂纹容易沿晶界扩展,使得合金的变性协 调能力下降,所以塑性较差。

3 结论

在两相区进行固溶+时效处理,得到等轴或双态组织,可以使TC4-DT合金获得较高的强度和塑性,随着固溶温度的升高,初生等轴α相含量减少,次生片层α相含量增多,合金的强度和断裂韧性增加,塑性有所降低。

2) 控制多重热处理中第一重热处理的冷却速度 和第二重热处理的温度以及冷却速度,可以有效控制 片层组织的尺寸,单相区固溶后空冷得到的魏氏组织 经过两相区第二重固溶处理,水冷获得细针状α'相, 炉冷获得粗大的α片层;单相区固溶水冷得到马氏体 组织,在两相区第二重固溶时,马氏体直接分解生成 粗大的α片层组织。

3) 多重热处理可以调节 TC4-DT 合金的综合力 学性能匹配,选择适当的多重热处理可以调整组织, 显著提高合金的断裂韧性,TC4-DT 合金经(1010 ℃, 45 min, WQ)+(950 ℃, 1.5 h, AC)+(550 ℃, 8 h, AC)多 重热处理,可以得到粗细兼备的双片层组织,具备强 度-塑性-断裂韧性的较好匹配。

REFERENCES

- [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(z1): 4-6.
 CAO Chun-xiao. Change of material selection criterion and development of high damage tolerant titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Science, 2002, 38(z1): 4-6.
- VENKATESH B D, CHEN D L, BHOLE S D. Effect of heat treatment on mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 506(1): 117–124.
- [3] WILSON A W, HOWE J M. Microstructural evaluation of Ti-6-22-22 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 29(6): 1585–1592.
- [4] 费玉环,周 廉,曲恒磊,赵永庆,冯 亮.两相区热处理对 TC21 钛合金显微结构的影响[J].稀有金属材料与工程,2007, 36(11): 1928-1932.

FEI Yu-huan, ZHOU Lian, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang. Effects of heat-treatments on microstructures of TC21 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(11): 1928–1932.

[5] 李 辉,赵永庆,曲恒磊,曾卫东.损伤容限型TC4-DT合金 疲劳裂纹扩展行为研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(6): 963-967.

LI Hui, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, ZENG Wei-dong. Fatigue crack growth behavior of TC4-DT alloy in damage tolerance type[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(6): 963–967.

- [6] YODER G R, COOLEY L A, BOYER R R. Microstructure fracture toughness and fatigue crack growth rate in titanium alloys[M]. Denver, Colorado: ATMS-AIME, 1987: 209.
- [7] LEYEUS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 15.
- [8] 祝力伟,王新南,朱知寿.不同热处理工艺下 TC4-DT 钛合 金的显微组织及力学性能[J]. 钛工业进展,2012,29(2):9-12.
 ZHU Li-wei, WANG Xin-nan, ZHU Zhi-shou. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4-DT alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(2): 9-12.
- [9] 刘 青,薛祥义,付宝全,王一川. TC4-DT 钛合金的热变形 行为研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(12): 43-44.
 LIU Qing, XUE Xiang-yi, FU Bao-quan, WANG Yi-chuan.
 Study on hot deformation behavior of TC4-DT titanium alloy[J].
 Hot Working Technology, 2009, 38(12): 43-44.
- [10] 吕逸帆,张 毅,景宝全,吕建军.固溶时效对 TC4ELI 钛合 金组织和性能的影响[J].中国有色金属学报,2010,20(S1): s616-s619.

LÜ Yi-fan, ZHANG Yi, JING Bao-quan, LÜ Jian-jun. Effects of solution treatment on microstructure and properties of TC4ELI titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s616–s619.

(编辑 何学锋)