

Fe元素对TC4钛合金显微组织和力学性能的影响

白家元, 杨家典, 瞿兆银, 牟旭祥

贵州航宇科技发展股份有限公司 贵州贵阳 550081

摘要: 主要研究Fe含量对TC4钛合金显微组织和力学性能的影响。对比分析了添加 $w_{\text{Fe}}=0.05\%$ 的TC4试样1和添加 $w_{\text{Fe}}=0.23\%$ 的TC4试样2经过相同锻造及热处理后的室温拉伸、400℃高温拉伸、室温冲击试验结果及金相显微组织。结果表明: 增加 $w_{\text{Fe}}\approx 0.2\%$ 后, 初生 α 相含量降低约9%。次生 α 相片层厚度增加且呈交叉混乱排列。室温拉伸、室温冲击和400℃高温拉伸的强度显著提高, 室温抗拉强度和屈服强度增加约55MPa。400℃高温抗拉强度增加约30MPa。这是因为在拉伸过程中, 位错滑移过程中所遇到的阻碍增大, 导致大量位错塞积在弥散的强化相中; 同时随着Fe元素增加, 与钛合金形成固溶体时产生较大的晶格畸变, 也能提高钛合金的强度, 但对室温拉伸和400℃高温拉伸的塑性无明显影响。

关键词: TC4钛合金; 力学性能; Fe含量; 显微组织

The effect of Fe element on the microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy

BAI Jiayuan, YANG Jiadian, QU Zhaoyin, MU Xuxiang

Guizhou Aviation Technology Development Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China

Abstract: This article mainly studies the effect of Fe content on the microstructure and mechanical property of TC4 titanium alloy. Comparative analysis was conducted on the room temperature tension, 400℃ high temperature tension, room temperature impact, and metallographic microstructure of TC4 sample 1 with 0.05% Fe added and TC4 sample 2 with 0.23% Fe added after the same forging and heat treatment. The results indicate that increasing the Fe content (about 0.2%, mass fraction) is beneficial for primary growth α phase content decreased by about 9%. And secondary α phase thickness increases and they are arranged in a chaotic and intersecting manner. The strength of room temperature stretching, room temperature impact, and 400℃ high temperature stretching is significantly improved. The tensile strength and yield strength at room temperature increased by approximately 55MPa. The tensile strength increased by about 30MPa for 400℃ high-temperature stretching. This is because during the stretching process, the obstacles encountered during the slip of dislocations are enhanced, resulting in a large number of dislocations accumulating in the dispersed strengthening phase; At the same time, with the increase of Fe element, significant lattice distortion occurs when forming a solid solution with titanium alloy, which can also improve the strength of titanium alloy. But it has no significant effect on the plasticity of room temperature stretching and 400℃ high-temperature stretching.

Keywords: TC4 titanium alloy; mechanical property; Fe element content; microstructure

1 序言

TC4钛合金（名义化学成分为Ti-6Al-V）属于 $\alpha + \beta$ 型钛合金，具有密度小、比强度高、耐蚀性好及加工性能优异等优点，因此被广泛应用于航空航天、船舶、汽车及石油化工等领域。TC4钛合金主要用于制造发动机风扇、叶片等，随着航空航天飞行器正在向大型化、结构复杂化、一体化等方向发展^[1]，对航空航天发动机所用TC4材料锻件的性能提出了更高的要求。TC4钛合金其热处理方式分为固溶+时效（退火）和退火^[2]。TC4钛合金退火可获得好的韧性，改善加工性能，提高尺寸和组织稳定性；固溶+时效是为了提高其强度。TC4钛合金组织形态依据化学成分^[3]、热处理方式^[4]、热处理保温温度、锻造方式及锻造加热温度^[3]等分为4种：双态组织、等轴组织、魏氏组织和网篮组织。在普通退火条件下，TC4钛合金组织为双态组织，综合性能好。合金成分微调对其力学性能有着显著影响，如在TA15中添加 $w_{Fe}=0.20\%$ 时，由于Fe元素在 β 相内富集，起到固溶强化作用，从而提高合金的抗拉强度，但在500℃下的持久寿命显著降低^[5, 6]。研究表明，Fe元素是 α -Ti中的快扩散元素，使钛合金的扩散能力增强，导致蠕变过程位错攀移速率增加，降低高温蠕变抗力^[7-11]。Fe作为 β 稳定元素在 α 型钛合金中少量存在，导致 α 型钛合金中存在少量 β 相，提高合金强度^[12]。因此，为明确Fe含量对TC4钛合金组织和性能的影响，比较不同Fe含量的TC4钛合金组织和性能，研究Fe元素对TC4钛合金显微组织和力学性能的影响。

2 试验材料及方案

2.1 试验材料

试验用TC4钛合金原材料采用经3次真空自耗电弧熔炼的圆棒，试样1相变点983℃，试样2相变点994℃。试样1： $w_{Fe}=0.05\%$ ，试样2： $w_{Fe}=0.23\%$ ，化学成分满足GB/T 3620.1—2016《钛及钛合金牌号和化学成分》规定，具体化学成分见表1。

表1 TC4钛合金化学成分（质量分数）（%）

元素	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
试样1	6.31	4.2	0.05	0.017	0.0038	0.0038	0.174	余量
试样2	6.37	4.23	0.23	0.013	0.004	0.003	0.175	余量
要求值	5.50~6.80	3.50~4.50	≤0.30	≤0.1	≤0.05	≤0.012	≤0.20	余量

2.2 试验方案

棒材经过相同锻造工艺成形后进行退火处理，锻造加热温度均为相变点下40℃。退火工艺为760℃×2h，退火处理完成后取样进行理化测试，理化测试项目：室温拉伸、400℃高温拉伸、室温冲击和高倍显微组织。高倍组织试样所用腐蚀剂为HF:HNO₃:H₂O=1:2:7，TC4组织演变采用DMI3000M金相显微镜进行观测，拉伸试验在CMT5105微机控制电子万能试验机上进行，室温拉伸和400℃高温拉伸试样尺寸均为：中间直径5mm，标距25mm，平行长度35mm，总长度71mm，夹持螺纹尺寸M12×1.75mm；室温拉伸测试条件：①温度25℃±5℃。②空气湿度≤80%。400℃高温拉伸测试条件：①到达温度400℃保温15min。②温度梯度±3℃，温度波动±3℃。屈服前室温拉伸速率为0.5mm/min，屈服后室温拉伸速度为2.5mm/min，高温拉伸速度为2.5mm/min。冲击试验在ZBC3302-B摆锤式冲击试验机进行。冲击试样尺寸为55.00mm（长）×10.00mm（宽）×10.00mm（高）×8.00mm（缺口底部高度），缺口半径R=1mm。冲击测试条件：温度25℃±5℃；空气湿度≤80%。

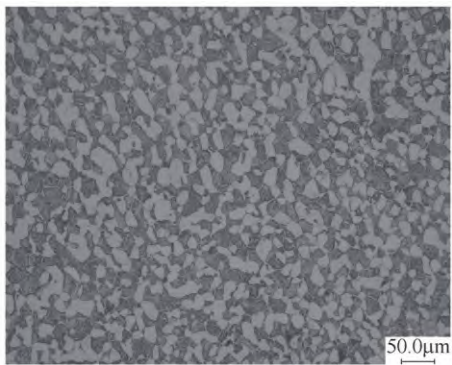
3 结果与分析

3.1 显微组织

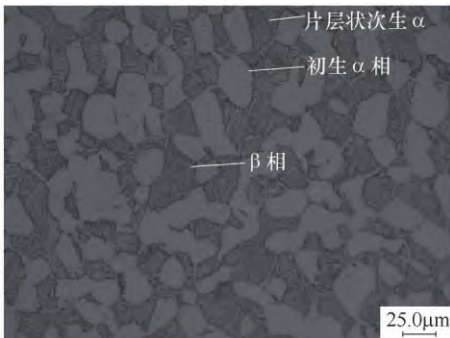
图1、图2所示分别为添加 $w_{Fe}=0.05\%$ 和添加 $w_{Fe}=0.23\%$ 的显微组织。从图1可看出，显微组织为 $\alpha + \beta$ 两相组织，其中白色组织为初生 α 相，初生 α 相呈球状、椭圆状、长条状等，组织形态较为不规则且存在连续分布，晶界位置有明显 α 相，与初生 α 相相连。灰色部分为 β 相， β 相中有次生 α 相析出，次生 α 相组织较为细小，且部分区域整齐排列。从图2可看出，显微组织同为 $\alpha + \beta$ 两相组织，但是初生 α 相与图1相比，较为等轴，大部分呈球状分布且不连续。 β 相中析出的次生 α 相较明显，片层厚度增加，呈短棒状交叉不均匀分布，且 β 相含量较多，其中的原因为：Fe作为 β 稳定元素，随着Fe含量增加，初生 α 相减少，而 β 相增加，图1中初生 α 相约为44%，图2中初生 α 相约为35%。

3.2 力学性能试验结果

不同Fe含量对TC4钛合金室温力学性能的影响

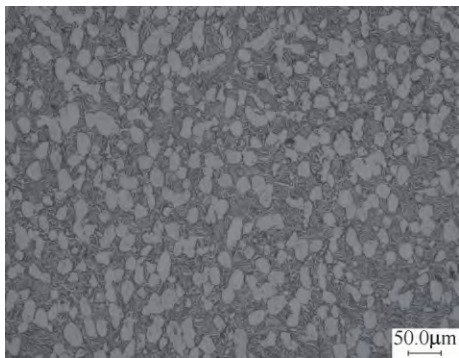


a) 200 ×

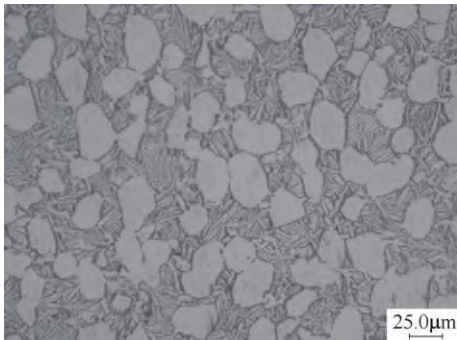


b) 400 ×

图1 试样1的退火态金相显微组织



a) 200 ×



b) 400 ×

图2 试样2的退火态金相显微组织

见表2, 对400℃高温拉伸性能的影响见表3。试样1和试样2室温拉伸应力-应变曲线分别如图3、图4所示。

示, 试样1和试样2的400℃高温拉伸应力-应变曲线如图5、图6所示。

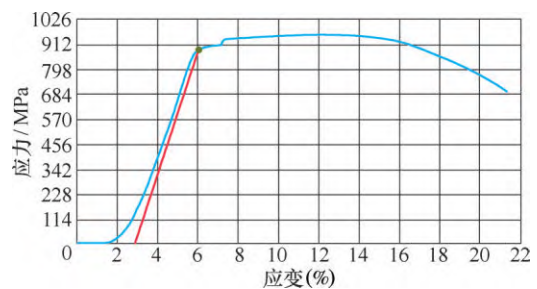
表2 室温力学性能

棒材编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	室温冲击吸收能量/J
试样1	889、889	825、827	16、14	42、38	29、30
试样2	953、939	890、868	13、15	44、44	34、32

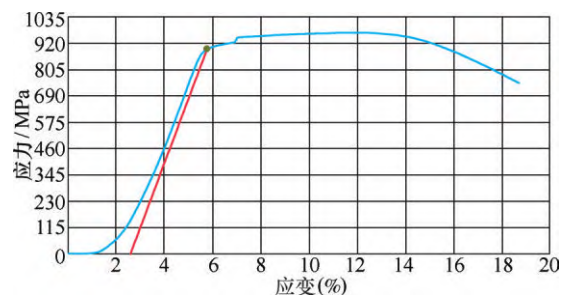
表3 400℃高温力学性能

棒材编号	R_m /MPa	A (%)	Z (%)
试样1	583、592	22、20	60、61
试样2	630、625	17.5、18	62、62

从表2、表3可看出, Fe元素含量增加, 室温抗拉强度、屈服强度都得到大幅度提高, 但是塑性变化不明显。这是因为Fe作为钛合金β稳定元素, 随着Fe含量增加, 降低了β相转变温度, 导致β相增加, 可以显著提高退火态的强度。另外, Fe元素作为共析反应型元素与钛形成了共析反应系统。随着Fe元素增加, 与钛合金形成固溶体时产生较大的晶格畸变, 也能提高钛合金的强度。从图2b可看到, 次生α排列交叉排列, 混乱度增加, 起到了弥散强化的作用^[13]; 在拉伸过程中, 位错的滑移过程中所遇到的阻碍增强, 导致大量位错塞积在弥散的强化

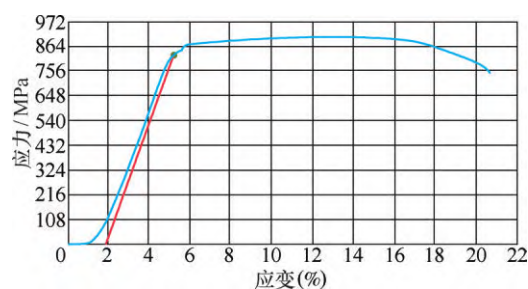


a) 室温拉伸试样1-1

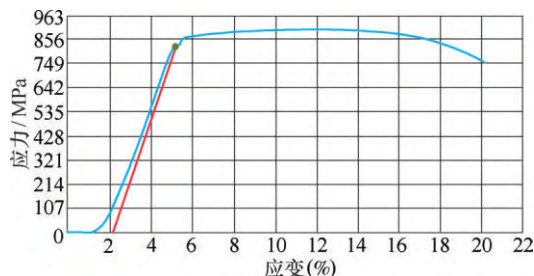


b) 室温拉伸试样1-2

图3 试样1的室温拉伸应力-应变曲线

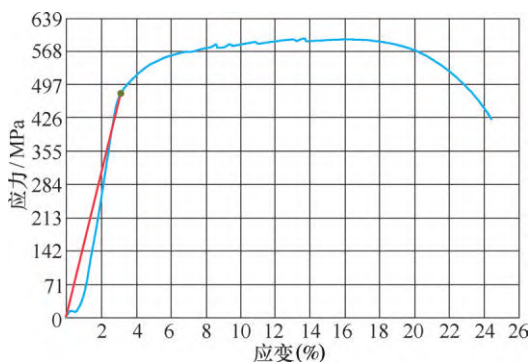


a) 室温拉伸试样2-1

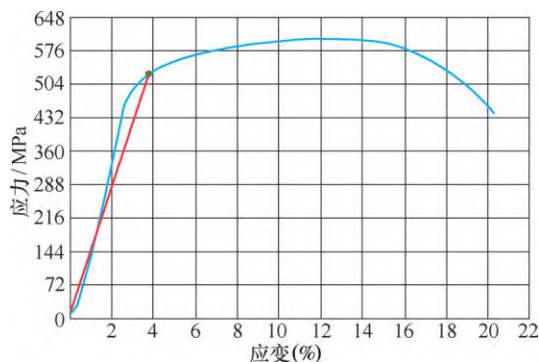


b) 室温拉伸试样2-2

图4 试样2的室温拉伸应力-应变曲线



a) 400°C高温拉伸试样1-1

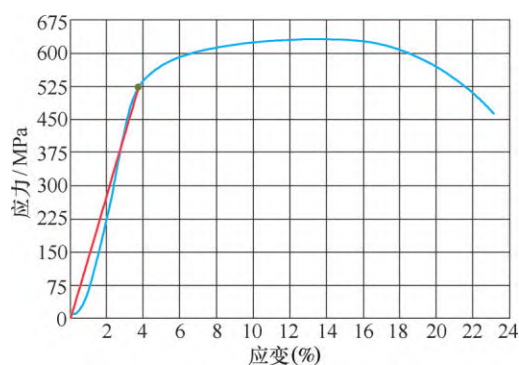


b) 400°C高温拉伸试样1-2

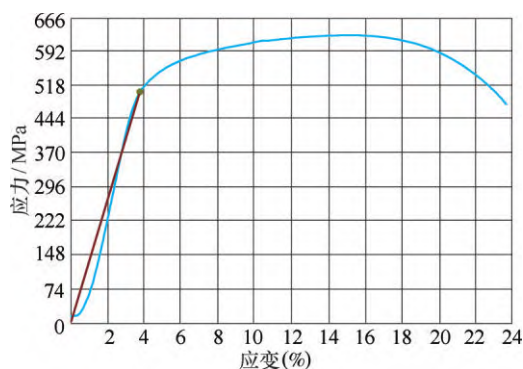
图5 试样1的400°C高温拉伸应力-应变曲线

相中, 因此强度增加^[14]。

从表2可看出, 随着Fe元素含量增加, 室温冲击有所提高。这是因为在合金的临界应变率范围内,



a) 400°C高温拉伸试样2-1



b) 400°C高温拉伸试样2-2

图6 试样2的400°C高温拉伸应力-应变曲线

随着主合金元素含量的提高, 合金的临界应变率提高, 平均动态流变应力、均匀动态塑性应变和冲击吸收能有所增加^[15]。从图2b还可看出, 次生 α 相片层厚度较厚, 从而有利于提高冲击性能。

4 结束语

1) 增加Fe含量 ($w_{Fe} \approx 0.2\%$), 可明显提高TC4钛合金的室温和400°C高温拉伸性能。室温抗拉强度增加约55MPa, 屈服强度增加约55MPa, 400°C高温抗拉强度增加约30MPa。但对室温拉伸和高温拉伸的塑性无明显影响。

2) 增加Fe含量 ($w_{Fe} \approx 0.2\%$) 可以提高TC4钛合金的冲击性能, 增加约2J。

3) 增加Fe含量 ($w_{Fe} \approx 0.2\%$), 可降低初生 α 相含量, 降低约9%。次生 α 排列交叉排列, 混乱度增加, 同时片层厚度增加。

参考文献:

- [1] 康少酺, 李壮, 于欢欢, 等. 水冷温度对TC4钛合金组织演变的影响[J]. 航空制造技术, 2017 (1): 103-105.
- [2] 郭凯, 何忞铸, 和蓉. TC4钛合金热处理工艺的研究

- 现状及进展[J]. 世界有色金属, 2021 (7) : 16-17.
- [3] 王博涵, 程礼, 崔文斌, 等. 锻造工艺对TC4钛合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50 (23) : 17-21.
- [4] 甘章华, 梁宇, 王锦林, 等. 热处理工艺对TC4钛合金组织及硬度的影响[J]. 金属热处理, 2014 (9) : 36-40.
- [5] 李明强, 奚正平, 李长亮, 等. 成分微调对中强钛合金组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36 (3) : 480-483.
- [6] 陈冬梅, 黄森森, 贺飞, 等. Fe元素对TA15钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2017, 34 (2) : 14-18.
- [7] 蔡建明, 马济民, 黄旭, 等. 高温钛合金中杂质元素Fe的扩散行为及其对蠕变抗力的损害作用[J]. 材料工程, 2009 (8) : 84-88.
- [8] MISHIN Y, HERZIG C. Diffusion in the Ti-Al system[J]. Acta Materialia, 2000, 48 (3) : 589-623.
- [9] VISWANATHAN G B, KART HIKEYAN S, HAYES R W, et al. Creep behaviour of T-i6A-l2Sn-4Zr-2Mo; II. Mechanisms of Deformation[J]. Acta Mater., 2002, 50: 4965-4980.
- [10] MISHRA H, GHOSAL P, NANDY T K, et al. Influence of Fe and Ni on creep of near α -Ti alloy IMI834[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, A399(1/2): 222-231.
- [11] KULKOVA S E, BAZHANOV D I. Point defects and mechanical behavior of titanium alloys and intermetallic compounds[J]. Journal of Physics Conference Series, 2005. DOI: 10.1088/1742-6596/29/1/042.
- [12] 美国金属学会手册编委会. 美国金属学会热处理手册 (E卷): 非铁合金的热处理[M]. 时卫平, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [13] 吴欢, 赵永庆, 葛鹏, 等. β 稳定元素对钛合金 α 相强化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41 (5) : 805-810.
- [14] AHMED T, RACK H J. Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243 (1) : 206-211.
- [15] 隋楠, 曹京霞, 黄旭, 等. 合金成分对TA15钛合金组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2019, 39 (1) : 48-54.

MW 20240221

《金属加工（热加工）》2024年第7期广告目次

单位名称	查询编号	位置	单位名称	查询编号	位置
深圳市瑞凌实业股份有限公司	1254	封面	盐城高周波热炼有限公司	5326	前彩 2
易孚迪感应设备（上海）有限公司	1492	封二	易格斯（上海）拖链系统有限公司	1298	前彩 3
昆山京群焊材科技有限公司	5123	封三	公益广告	8000	前彩 4
北京金威焊材有限公司	1468	封底	中国锻压协会	5699	V
南通振康焊接机电有限公司	1362	前彩 1			