

锻造工艺对TA11钛合金棒材的性能改变研究

Research of Forging Processes on Microstructure and Mechanical Properties of TA11 Titanium Alloy Bar

供稿/段晓辉, 李渭清, 李峰丽, 李巍, 岳旭, 张伟, 宋蕊池 / DUAN Xiao-hui, LI Wei-qing, LI Feng-li, LI Wei, YUE Xu, ZHANG Wei, SONG Rui-chi

内

容 导 读

作为飞机重要部件主要原材料的TA11钛合金,自身性能的提高对于我国航天事业的发展具有重大意义。本文通过大量实验研究,发现锻造温度的升高,不仅能提高了棒材组织均匀性,得到良好的抗蠕变性能,还可提高棒材超声探伤水平。为TA11钛合金棒材的工业生产及工艺改进,提供了理论参考和数据支持。

TA11钛合金(Ti-8Al-1Mo-1V),是一种近 α 型耐热钛合金。它具有较高的室温高温强度、良好的热稳定性和高温蠕变性能等诸多优点,主要用于飞机发动机压气机盘、1~3级转子叶片等高速旋转部件^[1,2]。这些构件,长期在苛刻工作环境下使用,必须要具有良好的室温高温力学性能,尤其要具备较高的热稳定性和高温蠕变性能,因为这些性能不仅决定了合金的使用寿命更决定了发动机的安全可靠^[3],所以,对TA11合金材料的组织和性能关系的研究是十分必要的。

本文探讨了锻造工艺对TA11钛合金棒材显微组织及其力学性能的影响,对比分析了三种锻造工

艺的显微组织、力学性能以及超声波探伤水平,为TA11钛合金棒材的工业生产及工艺改进提供理论参考和依据。

实验用材及方法

实验用材

根据实验要求,我们选用了经真空自耗电弧炉三次熔炼而成的TA11钛合金铸锭(ϕ 720 mm),名义成分为Ti-8Al-1Mo-1V,经金相法测得 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变温度为1030~1040℃。铸锭经 β 相区多火次锻造和 $\alpha+\beta$ 两相区多火次锻造至 ϕ 70 mm棒坯,其显微组织如图1

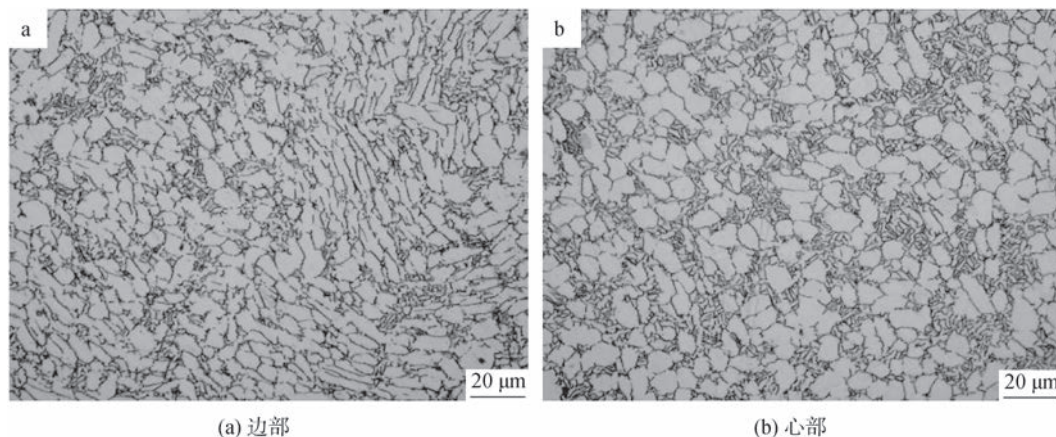


图1 φ70 mm棒坯高倍组织(R态)

所示,为不均匀 β 基体上分布着初生 α 相,初生 α 含量约在80%左右,边部组织与心部组织差异较大,边部为等轴加板条组织,心部为等轴组织,组织均匀性较差。

实验方法

利用Sxp-13精锻机,将 $\phi 70$ mm棒坯在三种锻造工艺下(见表1),多道次锻造后,机加得到 $\phi 40$ mm成品棒材。切取高倍试样,经磨制抛光后采用HF、 HNO_3 、 H_2O 混合液进行腐蚀,在OLYMPUS GX71型金相显微镜上观察显微组织。拉伸实验在德国的Zwick万能实验机上进行,蠕变性能在SANS-GWT105高温蠕变持久实验机上进行。三批棒材参照GJB494—88标准要求,使用USD155型探伤仪,5P $\phi 38$ mm探头,采用水浸法进行超声波无损检测。

表1 锻造工艺

工艺	锻造温度	保温时间
A	β -35~50 $^{\circ}\text{C}$	20~90 min
B	β -20~35 $^{\circ}\text{C}$	
C	β -5~20 $^{\circ}\text{C}$	

实验结果分析

显微组织分析

经三种工艺锻造后,我们可以清楚地看到锻造温度对TA11钛合金棒材显微组织的影响比较明显,详见图2。经工艺A锻造后,棒坯中的板条 α 基本转化

为等轴组织,但仍存在较多分布不均匀的长条 α 。初生 α 含量在80%左右, β 基体上分布有少量的颗粒状次生 α 。棒材边部与心部的组织差异性较棒坯有所改善。经工艺B锻造后,组织已基本等轴化,约占50%左右的初生 α 均匀的分布在 β 基体上,次生 α 相增多,且形态转变为局部取样一致的细针状,组织均匀性好,详见图2(b1)和(b2)。经工艺C锻造后,棒材组织转变为典型的双态组织,约占20%左右的颗粒状初生 α 均匀的分布在 β 基体上,析出的细针状次生 α 显著增加,边部与心部组织一致性好,组织均匀性高,详见图2(c1)和(c2)。

综上所述,棒材组织的性能与锻造温度呈正相关关系。锻造温度较低时,锻造过程中棒材变形抗力较大,锻透性差,棒坯组织得不到充分的变形,原坯料组织中的长条 α 不能完全被破碎和等轴化,锻后棒材组织不均匀。而且温度较低时,棒坯中的 α 在加热阶段溶解较少,造成锻后组织初生 α 含量高,初生 α 形态以短棒状或大块状为主, β 基体上分布的次生 α 析出较少。随着锻造温度的升高,棒材锻透性变好,棒材组织得到充分变形后均匀性显著提高。对比图1和图2就可发现,原坯料中的板条组织被完全破碎并转化为等轴组织或双态组织。同时,由于温度高,在加热阶段棒坯组织中 α 向 β 的相转变更易发生,使得锻后初生 α 的含量显著减少, β 相含量明显增加。在回复再结晶过程中析出的局部取向一致分布的细针状次生 α 也明显增多。

由此,我们对TA11试样进行热处理,图3即为经

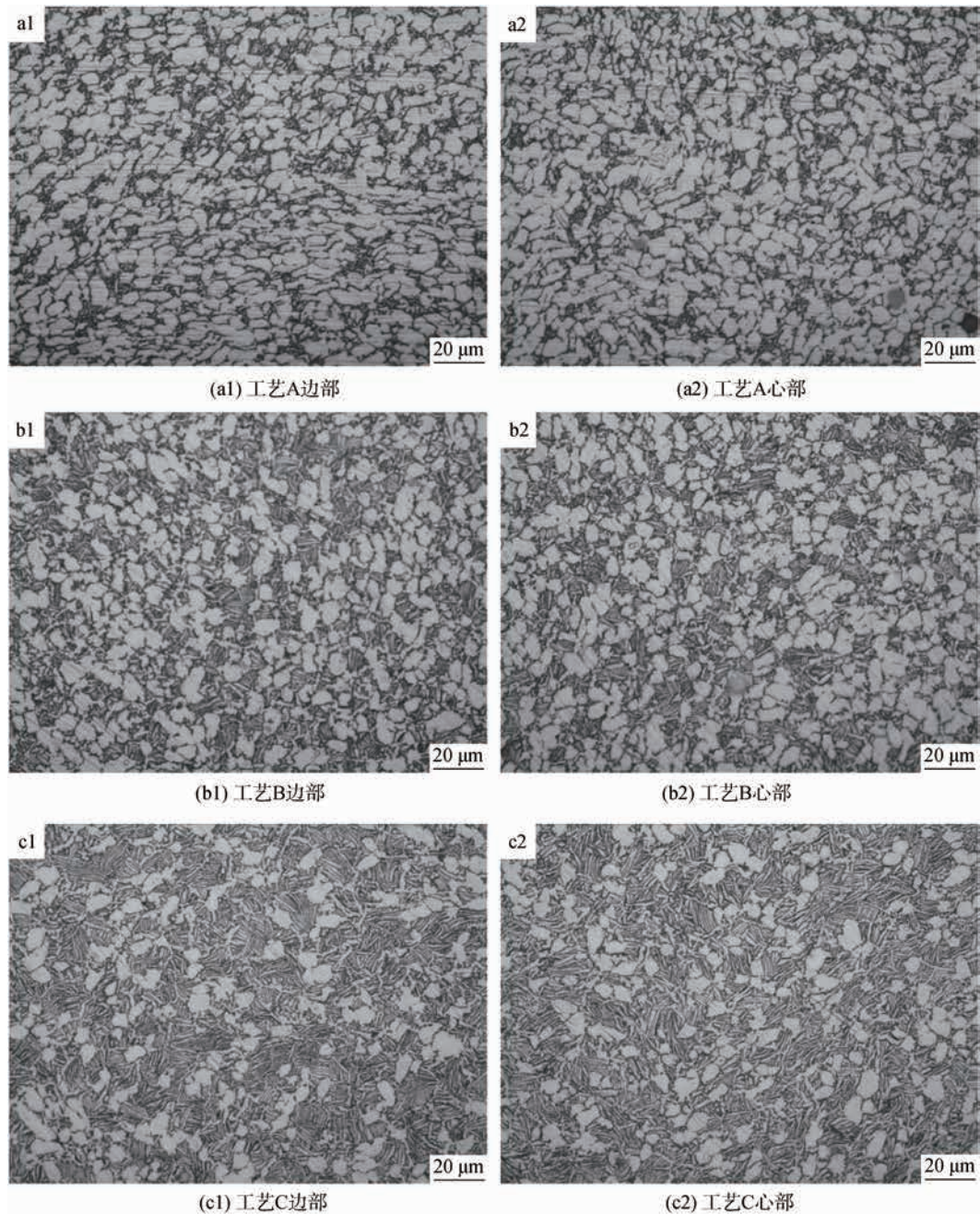


图2 TA11钛合金棒材不同部位的锻态显微组织

(900~925℃/保温1h·AC)+(565~595℃/保温8h·AC)热处理后三种工艺的显微组织图片。

对比图2和图3可以看到，在上述热处理制度下对TA11试样进行固溶时效后，其显微组织与对应的锻态显微组织区别不明显，初生 α 含量与形态均与锻态组织相似， β 基体上分布的次生 α 含量及形态也基本无变化。这说明TA11钛合金在远离相变点温

度固溶时效时，显微组织构成与形态变化较小。

力学性能分析

对每批TA11钛合金棒材分别任取四支样棒，在样棒上切取试样后，经(900~925℃/保温1h·AC)+(565~595℃/保温8h·AC)热处理，对其力学性能进行分析，详见表2。

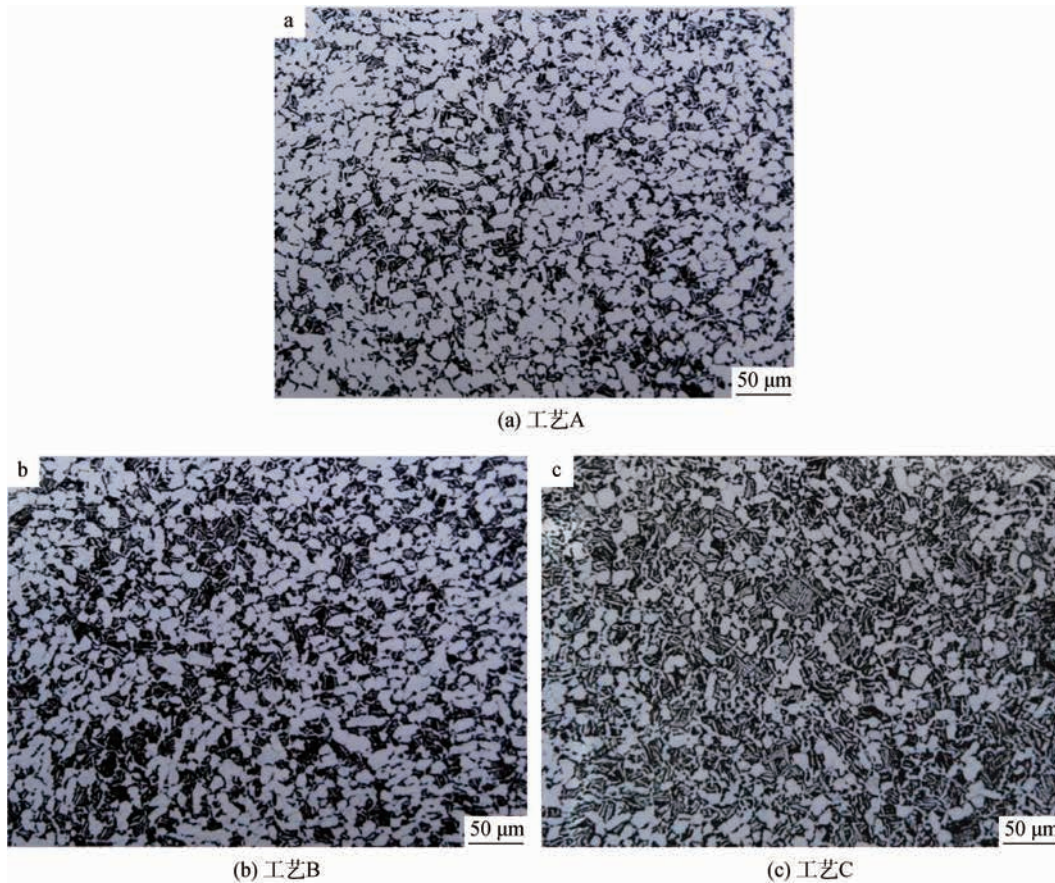


图3 TA11钛合金棒材退火态显微组织

表2 TA11钛合金棒材的力学性能

工艺方案	室温力学性能				热稳定(425℃, 100 h热暴露后)				高温蠕变(425℃, 410 MPa, 100 h)/%
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%	
A	955	888	18	40	940	894	19.0	42	0.232
B	948	881	20.5	43	948	902	19.0	41	0.187
C	942	883	21	45	945	890	19.5	43	0.131
标准值	895	825	10	20	895	825	9	18	≤ 0.2

通过实验数据分析我们可以看到,三种工艺下TA11钛合金棒材的室温拉伸性能差异较小,强度区别不大,均满足标准要求。因等轴组织和双态组织的TA11钛合金棒材均具有良好的热稳定性^[4],所以经400℃, 100 h热暴露后的热稳定性能也差异较小,但A工艺的蠕变性能大于0.2%,不满足产品标准的要求。而工艺B和C蠕变性能均小于0.2%,可满足产品标准要求,且工艺C表现出更好的高温蠕变性能。结合图2和图3分析认为,TA11钛合金棒材锻后组织中初生 α 和次生 α 的相对含量,以及次生 α 的形态对其

蠕变性能有较大的影响。初生 α 含量较低时蠕变性能优于初生 α 含量较高时,分布在 β 基体上的次生 α 呈局部取向一致的细针状时蠕变性能更好。这是因为,显微组织中的条状 α 相比等轴 α 的抗蠕变能力较好。在缓慢的蠕变过程中,等轴组织的滑移变形是从个别 α 晶粒中开始的,随着应变增加,滑移占据较多的 α 晶粒后向周围的 β 晶粒扩展,所以蠕变空洞形核较迟,但一旦形成空洞,即可迅速扩展而形成准解理断裂^[3]。而双态组织中混乱交织分布的细针状次生 α ,则对蠕变滑移起到了较好的阻碍作用,即使空洞

已经形成其扩展也较困难,因而较等轴组织表现出更好的抗蠕变性能。

超声波探伤特性

探伤杂波的产生来源于组织对声波的散射,所以杂波水平是合金组织不均匀性的反应^[5, 6]。从三批实验材料的超声波检测结果(详见表3)可以看出,工艺A的探伤杂波水平高于工艺B与C,说明其组织的均匀性较B、C差。这从图2也可以看出来,A的组织中存在长条或大块 α ,且边部与心部的组织存在一定差异。

表3 杂波水平检测结果

工艺方案	杂波水平
A	$\phi 0.8-6\sim-9\text{dB}$
B	$\phi 0.8-10\sim-12\text{dB}$
C	$\phi 0.8-12\text{dB}$

而通过工艺C得到的棒材在超声检测时杂波水平在 $\phi 0.8-12\text{dB}$,完全可满足叶片用TA11钛合金棒材的产品标准要求。这也表明了提升TA11钛合金棒材的锻造温度,减小变形抗力增加棒材的锻透性,可有效提高其组织均匀性,提高其探伤水平。

结论

通过三种锻造工艺试验,综合比较分析不同工艺下TA11钛合金棒材在显微组织、力学性能以及超声波探伤水平上的试验数据,我们得出了以下结论:

1) 锻造温度对TA11钛合金棒材显微组织影响比较明显,温度较低时,棒材组织中初生 α 含量较高,析出次生 α 相较少;适当提高锻造温度后,初生 α 含量显著降低,析出细针状次生 α 相增加。

2) 初生 α 含量和分布于 β 基体上的次生 α 形态对蠕变性能有较大影响,较少的初生 α 加细针状次生 α 组织可得到良好的抗蠕变性能。

3) 锻造温度升高,增加了TA11钛合金棒材的锻透性,长条或大块 α 被完全破碎后组织更加均匀,从而提高了超声波探伤水平。

参考文献

- [1] 朱康英,赵永庆,李佐臣,等. Ti811合金在不同温度和时间下的蠕变性能. 中国有色金属学报, 1998, 8(增刊2): 76-79.
- [2] 陶春虎,刘庆泉,曹春晓,等. 航空用钛合金的失效及预防. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] 王敏敏,赵永庆,周廉. 影响钛合金蠕变行为的因素分析. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(2): 135-139.
- [4] 赵永庆,朱康英,李佐臣,等. Ti811合金的热稳定性. 稀有金属材料与工程, 1997, 26(3): 35-39.
- [5] 赵爱国,史亦伟,张卫方,等. TA11钛合金棒材特性对比研究. 材料工程, 2003(增刊): 184-186.
- [6] 马小怀,张延生,刘京州. 钛合金超声波检测中杂波产生原因分析. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 677-679.

作者简介:段晓辉(1984—),男,陕西宝鸡人,助理工程师,毕业于郑州大学材料科学与工程学院,硕士研究生,现就职于宝鸡钛业股份有限公司锻造厂技术科。通信地址:陕西省宝鸡市渭滨区宝鸡钛业股份有限公司锻造厂技术科,721000。E-mail: tuandd08@163.com。

北京国际高技术中心

核心技术支撑 知本和资本汇聚 创新模式引领

地址:北京市海淀区学院路30号 北京科技大学办公楼224 E-mail: ihtc@ustb.edu.cn