

热加工工艺对叶片用 TC4 钛合金棒材组织与性能的影响

韩飞孝¹, 孙小平^{1,2}, 郑念庆^{1,2}, 菅申申¹, 史蒲英¹, 赵小花^{1,2}, 王凯旋¹

(1. 西部超导材料科技股份有限公司 特种钛合金材料制备技术国家地方联合工程实验室, 陕西 西安 710018)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 为优化发动机叶片用 TC4 钛合金棒材热加工工艺, 对比研究了相同条件下精锻和轧制工艺对棒材组织与性能的影响, 以及精锻温度和精锻变形量对棒材组织与性能的影响。结果表明: 与精锻相比, 轧制变形时间短、温升明显, 导致轧制棒材初生 α 相含量低, 室温强度和高温强度明显低于精锻棒材, 但组织更加均匀, 超声探伤杂波水平低。此外, 随着精锻温度的升高, 棒材初生 α 相含量减少, 室温强度和高温强度下降, 但超声探伤杂波水平降低; 随着精锻变形量的增大, 棒材变形不均匀性加剧, 室温强度和高温强度逐渐提高, 但超声探伤杂波水平增大。精锻温度为 940 °C 时, TC4 钛合金棒材的组织与性能匹配较好。

关键词: TC4 钛合金; 精锻; 组织; 性能; 超声探伤

中图分类号: TC316; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)06-007-06

Effect of Hot Working Processes on Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy Bar for Blade

Han Feixiao¹, Sun Xiaoping^{1,2}, Zheng Nianqing^{1,2}, Jian Shengsheng¹, Shi Puying¹, Zhao Xiaohua^{1,2}, Wang Kaixuan¹

(1. National & Local Joint Engineering Laboratory for Special Titanium Alloy Processing Technologies,

Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To optimize the hot working processes of TC4 titanium alloy bar for blade, the effect of precision forging and rolling processes on microstructure and properties under the same conditions were compared, and the influences of precision forging temperatures and deformation degrees on microstructure and properties were further analyzed. The results show that compared with the precision forging process, the rolling deformation time is shorter and the rise of temperature is obvious, resulting in a low volume fraction of primary α phase, and the strength at room and high temperature is significantly lower than that of the precision forging bar, but the microstructure is more uniform, the ultrasonic testing noise level is lower. In addition, with the increase of precision forging temperature, the volume fraction of primary α phase decreases, and the tensile strength at room and high temperature also decrease, but the ultrasonic testing noise level decreases. With the increase of precision forging deformation, the non-uniform deformation of forging bar is sharpened, and the tensile strength at room and high temperature are improved gradually, but the ultrasonic testing noise level increases. When the precision forging temperature is 940°C, the microstructure and properties of precision forging bar matches well.

Key words: TC4 titanium alloy; precision forging; microstructure; properties; ultrasonic testing

TC4 钛合金具有高比强度、较宽的工作温度范

围和优异的耐腐蚀性能, 是制造航空发动机压气机盘、叶片等的首选材料之一^[1]。航空发动机叶片的工作条件极为复杂和苛刻, 需承受巨大的气动应力、离心应力和温度负荷作用^[2], 因而对叶片用钛合金

收稿日期: 2022-06-23

基金项目: 陕西省技术创新引导专项(2019CGHJ-21)

通信作者: 韩飞孝(1990—), 男, 工程师。

棒材的显微组织和力学性能提出了很高的要求,如 GJB 494A—2008《航空发动机压气机叶片用钛合金棒材规范》要求叶片用 TC4 钛合金棒材的初生 α 相含量不低于 25%。

超声波探伤检验是航空航天领域钛合金原材料验收的基本要求,部分原材料订货标准中对探伤的要求也十分苛刻,如 GJB 494A—2008 要求转子叶片用棒材探伤杂波水平不大于 0.8 mm-12dB。国内学者对钛合金显微组织与超声探伤杂波的对应关系进行了研究^[3-7],发现探伤杂波的高低不仅与组织中 α 相和 β 相的含量及尺寸大小有关,还与组织的均匀性、织构等密切相关。因此,在钛合金研制和生产过程中,除组织和常规性能外,对超声探伤杂波水平也应重点关注。

目前,国内制造叶片用 TC4 钛合金棒材的热加工工艺主要有精锻和轧制,但对 2 种加工方式下 TC4 钛合金棒材组织和性能(包括超声探伤杂波)的综合对比研究较少。为此,对比分析了精锻和轧制 2 种加工方式下叶片用 TC4 钛合金棒材的组织与性能,并研究了精锻温度和变形量对棒材组织与性能的影响,以期优化热加工工艺,制备满足 GJB 494A—2008 要求的叶片用 TC4 钛合金棒材提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为经 3 次真空自耗电弧熔炼(VAR) + 多火次墩拔锻造制备的 $\phi 95$ mm TC4 钛合金棒坯。棒坯 β 相转变温度为 995 $^{\circ}\text{C}$,化学成分如表 1 所示。棒坯横向组织由初生等轴 α 相和 β 转变组织组成,为典型的双态组织,初生等轴 α 相含量超过 65%,如图 1 所示。

表 1 TC4 钛合金棒坯的化学成分(w/%)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy billet

Al	V	O	Fe	Si	C	N	H	Ti
6.0~	4.0~	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.05	0.003	Bal.
6.7	4.5							

1.2 方法与设备

将 $\phi 95$ mm TC4 钛合金棒坯切割成等长度的棒料,按照表 2 方案进行锻造试验:①在 940 $^{\circ}\text{C}$ 分别进行两火精锻、一火精锻+一火轧制和两火轧制,得

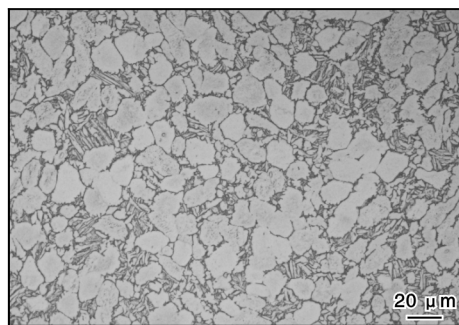


图 1 TC4 钛合金棒坯的横向显微组织

Fig. 1 Transverse microstructure of TC4 titanium alloy billet

到规格为 $\phi 30$ mm 的成品 TC4 钛合金棒材(中间道次规格均为 $\phi 55$ mm);②分别在 920、960 $^{\circ}\text{C}$ 进行两火精锻试验,得到规格为 $\phi 30$ mm 的成品 TC4 钛合金棒材;③分别在 920、940、960 $^{\circ}\text{C}$ 进行一火精锻试验,得到规格分别为 $\phi 50$ 、 $\phi 65$ mm 的成品 TC4 钛合金棒材。

表 2 TC4 钛合金棒材加工方案

Table 2 Processing methods of TC4 titanium alloy bar

No.	Specification /mm	Processing method	Forging temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Forging degree/%
1	$\phi 30$	Two pass forging	940	89
2	$\phi 30$	Forging + rolling	940	89
3	$\phi 30$	Two pass rolling	940	89
4	$\phi 30$	Two pass forging	920	89
5	$\phi 30$	Two pass forging	960	89
6	$\phi 50$	One pass forging	920	70
7	$\phi 50$	One pass forging	940	70
8	$\phi 50$	One pass forging	960	70
9	$\phi 65$	One pass forging	920	50
10	$\phi 65$	One pass forging	940	50
11	$\phi 65$	One pass forging	960	50

沿成品 TC4 钛合金棒材横向 $R/2$ 处切取金相试样和力学性能试样。金相试样经磨抛后用腐蚀剂(HF、 HNO_3 、 H_2O 体积比为 1:3:6)浸蚀,采用蔡司 Axio Vert. A1 倒立式显微镜观察显微组织,利用 Image-Pro Plus 5.0 图像软件分析初生 α 相含量,每个试样至少观察 5 个视场,取平均值。力学性能试样经 800 $^{\circ}\text{C}/1.5$ h/AC 退火后,采用 Zwick Z330 试验机进行室温拉伸性能测试,采用 Zwick Z100 试验机进行高温拉伸性能测试,采用 Zwick RMT-D10

(100 kN)试验机进行高温持久性能和蠕变性能测试。采用 USPC7100 型探伤仪进行水浸超声探伤检验,探头为 ISS/G/C 10MHz, $\phi 0.8$ mm 平底孔。

2 结果与分析

2.1 精锻和轧制棒材的组织与性能对比

图2是在940℃分别进行两火精锻、一火精锻+一火轧制和两火轧制后得到的 $\phi 30$ mm TC4钛合金棒材的横、纵向显微组织。从图2可以看出,棒材均为典型的双态组织,但不同加工方式获得的棒材 α 相含量、形态、尺寸及分布存在一定差异。两火精锻棒材的初生 α 相含量约为65%,纵向 α 相拉长明显,精锻+轧制和两火轧制棒材的初生 α 相含量较低,分别约为55%和45%,但纵向等轴性更好。这是因为在相同的加热温度下,精锻棒材较轧制棒材变形时间长,锻造过程中发生了明显的温降,

而轧制棒材变形时间短、温升明显,实际变形温度高于精锻棒材,导致轧制棒材纵向初生 α 相的等轴化程度更高。此外,精锻棒材的次生 α 相多呈碎点状或扭曲的条状分布,而轧制棒材的次生 α 相多呈平直的长条状分布,这是由2种加工方式的特点决定的。精锻变形道次间的持续时间长,两道次变形间隙会析出少量的次生 α 相,次生 α 相在下一道次的锻造过程中会发生破碎,进而多呈碎点状或扭曲的条状分布,如图2a、2d所示。而轧制变形速度快,组织中的次生 α 相主要是在轧制变形结束后,在冷却过程中从 β 晶界、 α/β 相界或 β 晶粒内高能缺陷处形成的,且多呈平直的集束状分布,如图2b、2e所示。与精锻+轧制工艺相比,两火轧制工艺的温升更为明显,导致成品组织中初生等轴 α 相的含量较精锻+轧制工艺更少,但次生 α 相的厚度更大,如图2c、2f所示。

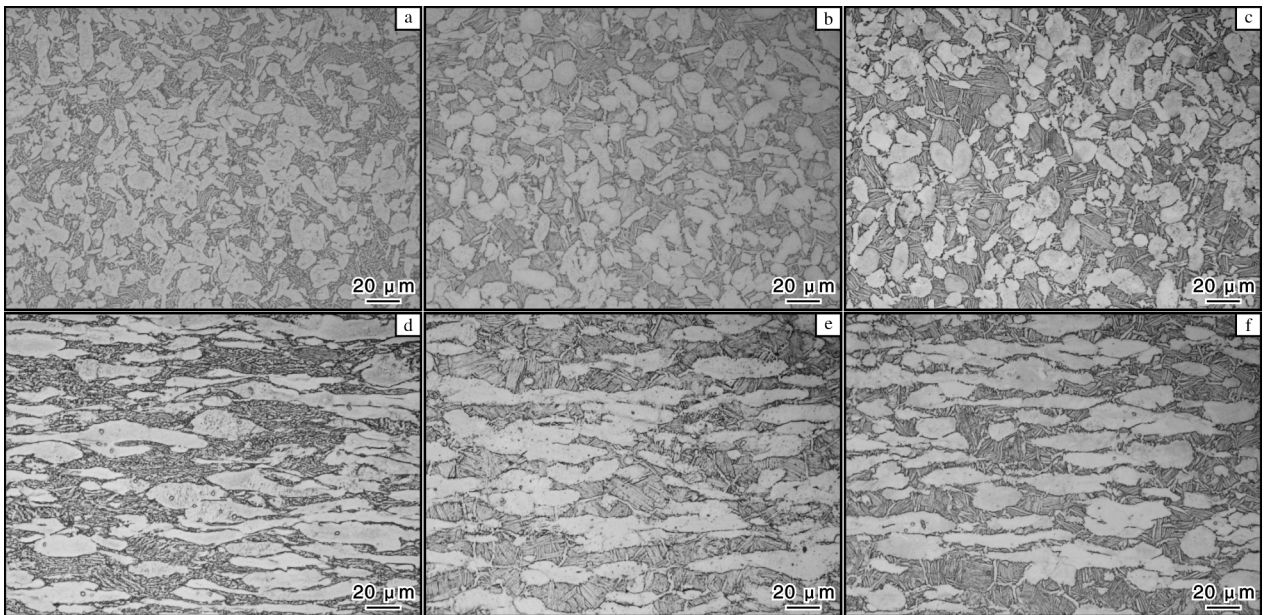


图2 不同加工方式制备的 $\phi 30$ mm TC4钛合金棒材的横、纵向显微组织

Fig. 2 Transverse and longitudinal microstructures of $\phi 30$ mm TC4 titanium alloy bar under different processing methods: (a) transverse, two pass forging; (b) transverse, forging + rolling; (c) transverse, two pass rolling; (d) longitudinal, two pass forging; (e) longitudinal, forging + rolling; (f) longitudinal, two pass rolling

两火精锻、一火精锻+一火轧制和两火轧制的 $\phi 30$ mm TC4钛合金棒材经800℃/1.5 h/AC退火后的室温拉伸、高温拉伸、高温持久和蠕变性能见表3。从表3可以看出,在相同热处理条件下,精锻和轧制棒材的室温拉伸塑性、高温持久和蠕变性能差异较小,但精锻棒材的室温强度和高温强度明显高于轧制棒材。这是因为精锻棒材的初生 α 相含量略

高于轧制棒材,且次生 α 相多呈碎点状或扭曲的条状分布,晶粒细小,阻碍了位错运动,起到了细晶强化的作用。

表4是在940℃分别进行两火精锻、一火精锻+一火轧制、两火轧制后得到的 $\phi 30$ mm TC4钛合金棒材的超声探伤杂波水平。从表4可以看出,两火精锻棒材的探伤杂波水平为 $\phi 0.8$ mm-(9~12)dB,

表 3 不同加工方式制备的 $\phi 30$ mm TC4 钛合金棒材力学性能

Table 3 Mechanical properties of TC4 titanium alloy bar with $\phi 30$ mm produced by different processing methods

No.	Processing method	Room temperature tensile properties				R_m (400 °C) /MPa	Durability (400 °C/ 570 MPa)/h	Creep (300 °C/ 530 MPa/100 h)/%
		R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%			
1	Two pass forging	1028	961	15	41	746	>101	0.133
		1039	967	14	40	722	>101	0.102
2	Forging + rolling	979	903	17	44	679	>101	0.152
		982	902	18	43	674	>101	0.130
3	Two pass rolling	994	908	17	44	702	>101	0.116
		992	910	14	46	703	>101	0.179

表 4 不同加工方式制备的 $\phi 30$ mm TC4 钛合金棒材超声探伤杂波水平

Table 4 Ultrasonic testing noise level of $\phi 30$ mm TC4 titanium alloy bar produced by different processing methods

No.	Processing method	Ultrasonic testing noise level
1	Two pass forging	$\phi 0.8$ mm-(9 ~ 12) dB
2	Forging + rolling	$\phi 0.8$ mm-(12 ~ 16) dB
3	Two pass rolling	$\phi 0.8$ mm-(12 ~ 16) dB

精锻 + 轧制、两火轧制棒材的探伤杂波水平均为 $\phi 0.8$ mm-(12 ~ 16) dB, 小于两火精锻棒材。这是因为轧制棒材初生 α 相含量低, 次生 α 相的集束尺寸增加, 相界面取向差减小, 组织更加均匀, 故探伤杂波水平低。从图 2 也可以看出, 精锻棒材的等轴 α 相分布不均匀, 存在 α 相聚集现象, 导致超声波信号散射加剧, 探伤杂波水平高于轧制棒材。

从以上组织、性能和超声探伤杂波水平的分析可知, 精锻和轧制方式制备的棒材各有特点, 除超声探伤杂波水平稍高外, 精锻棒材的室温强度和高温强度优势明显。因此, 为进一步提高 TC4 钛合金精锻棒材的组织与性能匹配, 开展了精锻温度和变形量对 TC4 钛合金棒材组织与性能的影响研究。

2.2 精锻温度和变形量对组织与性能的影响

图 3 是按照表 2 精锻方案, 在不同温度下精锻得到的 $\phi 30$ 、 $\phi 50$ 、 $\phi 65$ mm TC4 钛合金棒材的显微组织。从图 3 可以看出, 随着精锻温度的升高, 棒材初生 α 相含量从 920 °C 精锻时的约 80% 降低到 940 °C 精锻时的约 65%, 当精锻温度继续提高到 960 °C 时初生 α 相含量不足 50%, 但碎点状或扭曲的条状 α 相含量逐渐增多。这是因为精锻温度的升高加剧了初生 α 相转变^[8], 使锻造过程中形成的碎点状或扭曲的次生 α 相更多。从图 3 还可以看出,

对于相同规格的 TC4 钛合金棒材, 精锻温度越高, 初生 α 相的分布越均匀。相同变形温度下, 精锻变形量越大, 棒材组织越细小, α 相发生扭曲和聚集的不均匀现象也更为明显。

图 4 是在不同温度下精锻得到的不同规格 TC4 钛合金棒材经 800 °C/1.5 h/AC 退火后的室温拉伸和高温拉伸性能。从图 4a、4c 可以看出, 精锻温度越低、变形量越大, 棒材的室温拉伸和高温拉伸强度也越高, 这与组织中初生 α 相和次生 α 相的含量和形态有关。经 920 °C 精锻后的 $\phi 30$ mm 棒材, 初生 α 相含量高, 次生 α 相破碎明显且多呈碎点状分布, 其室温拉伸和高温拉伸强度最高。随着精锻温度的升高, 初生等轴 α 相的含量逐渐减少, 呈碎点状或扭曲条状的次生 α 相含量逐渐提高, 但在 800 °C/1.5 h/AC 退火条件下, 次生 α 相的形貌并未发生明显变化, 因此影响棒材室温拉伸和高温拉伸强度的主要因素还是初生等轴 α 相的含量。在相同的精锻温度下, 精锻变形量越大, 晶粒尺寸越小, 棒材累积的位错密度越高, 对应的强度也越高。此外, 精锻温度和变形量对 TC4 钛合金棒材的塑性影响并不明显, 如图 4b 所示。

表 5 是在不同温度下精锻得到的不同规格 TC4 钛合金棒材的超声探伤杂波水平。从表 5 可以看出, 920 ~ 960 °C 精锻的 $\phi 30$ mm TC4 钛合金棒材的探伤杂波水平为 $\phi 0.8$ mm-(9 ~ 12) dB, $\phi 50$ mm 棒材的探伤杂波水平为 $\phi 0.8$ mm-(12 ~ 16) dB, 可见相同精锻温度下 $\phi 50$ mm 棒材的探伤杂波水平低于 $\phi 30$ mm 棒材。920 °C 精锻的 $\phi 65$ mm TC4 钛合金棒材探伤杂波水平为 $\phi 0.8$ mm-(12 ~ 16) dB, 但当精锻温度提高到 940 °C 和 960 °C 时, 探伤杂波水平都降低到 $\phi 0.8$ mm-(16 ~ 20) dB, 说明相同规格的 TC4 钛合金棒材, 随着精锻温度的提高, 探伤杂波水平逐渐降低, 而

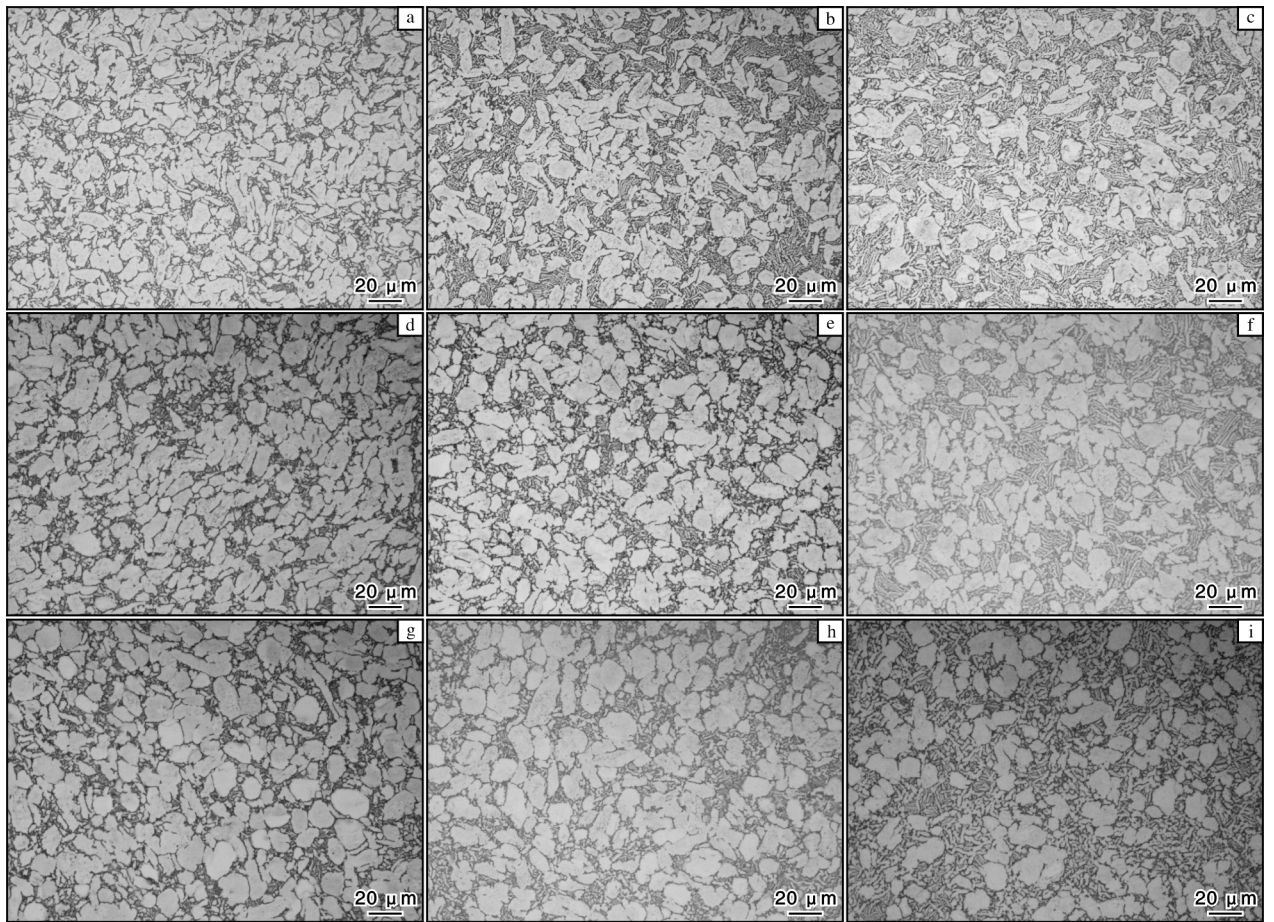


图 3 经不同温度精锻的不同规格 TC4 钛合金棒材的横向显微组织

Fig. 3 Transverse microstructures of TC4 titanium alloy bar with different specifications under different forging temperatures: (a) 920 °C/φ30 mm; (b) 940 °C/φ30 mm; (c) 960 °C/φ30 mm; (d) 920 °C/φ50 mm; (e) 940 °C/φ50 mm; (f) 960 °C/φ50 mm; (g) 920 °C/φ65 mm; (h) 940 °C/φ65 mm; (i) 960 °C/φ65 mm

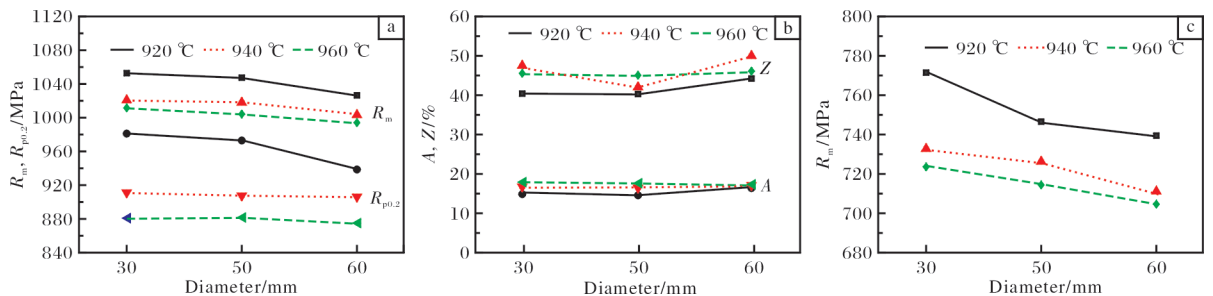


图 4 在不同温度下精锻的不同规格 TC4 钛合金棒材的拉伸性能

Fig. 4 Tensile properties of TC4 titanium alloy bar with different specifications under different forging temperatures: (a, b) room temperature; (c) high temperature ($T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)

精锻温度一定时，变形量越大，TC4 钛合金棒材的探伤杂波水平越高。这是因为超声波探伤杂波的变化与 TC4 钛合金棒材组织中初生 α 相和次生 α 相的含量、尺寸和分布情况均有关。精锻温度越高，精锻变形量越小，TC4 钛合金棒材初生 α 相的含量低且等轴性好，次生 α 相的含量高且片层较平直，整

体组织均匀性越好，超声波探伤时信号散射越小，杂波水平越低。

从以上分析结果可知，随着精锻温度的升高，TC4 钛合金棒材的探伤杂波水平逐渐减小。但精锻温度的提高会导致初生 α 相含量降低(会对成品叶片的疲劳性能产生不利影响^[9])，室温拉伸和高温拉伸

表5 不同温度下精锻得到的 TC4 钛合金棒材的
超声探伤杂波水平

Table 5 Ultrasonic testing noise level of TC4 titanium alloy bar
under different forging temperatures

No.	Specification /mm	Temperature /°C	Ultrasonic testing noise level
1	φ30	920	φ0.8 mm-(9~12) dB
2	φ30	940	φ0.8 mm-(9~12) dB
3	φ30	960	φ0.8 mm-(9~12) dB
4	φ50	920	φ0.8 mm-(12~16) dB
5	φ50	940	φ0.8 mm-(12~16) dB
6	φ50	960	φ0.8 mm-(12~16) dB
7	φ65	920	φ0.8 mm-(12~16) dB
8	φ65	940	φ0.8 mm-(16~20) dB
9	φ65	960	φ0.8 mm-(16~20) dB

强度下降。因此,针对叶片用 TC4 钛合金棒材,当精锻温度为 940 °C 时,棒材的探伤杂波水平可以达到 φ0.8 mm-9dB 以下,初生 α 相含量可以达到 65% 左右,性能保持在较高水平,整体组织、性能匹配较好。

3 结 论

(1) 与轧制工艺相比,精锻工艺制备的 TC4 钛合金棒材室温拉伸和高温拉伸强度优势明显,但超声探伤杂波水平稍高。

(2) 随着精锻温度升高,TC4 钛合金棒材的初生等轴 α 相含量逐渐减少,室温拉伸和高温拉伸强度下降,但超声探伤杂波水平逐渐减小。随着精锻

变形量增大,棒材晶粒尺寸逐渐减小,室温拉伸和高温拉伸强度逐渐提高,但组织均匀性变差,超声探伤杂波水平增大。

(3) 精锻温度选用 940 °C 时,TC4 钛合金棒材的组织 and 性能匹配较好。

参考文献 References

- [1] 陶春虎,刘庆琼,刘昌奎,等.航空用钛合金的失效及其预防[M].2版.北京:国防工业出版社,2013.
- [2] 蔡建明,曹春晓.航空发动机钛合金材料与应用技术[M].北京:冶金工业出版社,2021.
- [3] 张永红,李永春,曹凯.TC4 钛合金板材双晶探头超声波检测[J].宇航材料工艺,2012,42(5):72-75.
- [4] 宋韦韦,李本江,宋增金,等.TA15 钛合金显微组织对超声探伤底波衰减的影响[J].钛工业进展,2021,38(3):35-40.
- [5] 佟健,邵文彬,党永丰,等.钛合金棒材典型冶金次生缺陷超声波探伤波形特征分析[J].钛工业进展,2018,35(4):40-43.
- [6] 李华,马英杰,邱建科,等.TC4 钛合金显微组织对超声波探伤杂波水平的影响[J].稀有金属材料与工程,2013,42(9):1859-1863.
- [7] 郭凯,杜博生,周中波,等.热处理对 TC11 钛合金棒材超声波探伤的影响[J].热加工工艺,2018,47(14):152-154.
- [8] Sun S D, Zong Y Y, Shan D B, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC4 titanium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2181-2184.
- [9] 刘庆琼.航空发动机钛合金叶片制造技术及失效分析[M].北京:航空工业出版社,2018.

专利信息

一种高均匀性 650 °C 用高温钛合金大尺寸细晶整体叶盘的制备工艺

申请号: CN202210956813.2

申请日: 20220810

公开(公告)日: 20221220

公开(公告)号: CN115488277A

申请(专利权)人: 中国科学院金属研究所

摘要: 本发明公开了一种高均匀性 650 °C 用高温钛合金大尺寸细晶整体叶盘的制备工艺,其具体过程为:将合金铸锭在 1150~1250 °C 开坯锻造,然后将所得坯料在 β 相变点以上 10~30 °C 进行锻拔变形,锻后水冷,再将坯料加热至 850~870 °C 保温 12~20 h 后随炉升温至 990~1000 °C 进行锻拔变形,然后加热至相变点以上 10~30 °C 进行锻拔变形,锻后水冷,再加热至 850~870 °C 保温 12~20 h 后随炉升温至 990~1000 °C 进行锻拔变形,然后在 β 相变点以下 50~35 °C 进行锻拔变形,最后在 β 相变点以下 50~40 °C 锻造成形,得到锻坯;对锻坯进行固溶+时效热处理,最终获得整体叶盘锻件毛坯。该工艺适用于制备外径 600~1000 mm、高度 60~100 mm 的整体叶盘锻件,锻件的组织均匀性和性能优于传统工艺。