

钛合金叶片锻造组织与性能研究

刘俊, 权兆东, 邵海

中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司 江苏常州 213011

摘要: 结合DEFORM-3D数值模拟研究了TC4钛合金叶片锻造工艺, 分析了锻后不同部位的金相组织与力学性能。结果表明: 在最终状态下, 叶身处等效应变较大, 叶根、叶冠处等效应变较小, 叶身、叶冠和叶根的等效应力分布均匀。经该工艺条件下生产的TC4钛合金锻件满足技术条件的要求, 锻后整体力学性能较为均匀, 可获得性能良好的等轴初生 α 相和含针状 α 相转变 β 相的金相组织, 且叶身部位组织较叶根和叶冠处组织晶粒更加细小。

关键词: TC4钛合金; 锻造工艺; 金相组织; 力学性能

Study on microstructure and properties of titanium alloy forging

LIU Jun, QUAN Zhaodong, TAI Hai

CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China

Abstract: The forging process of TC4 titanium alloy blades is studied using DEFORM-3D numerical simulation, and the microstructure and mechanical properties of different sections after forging are analyzed. The results show that in the final state, the equivalent strain is higher in the blade body and lower in the blade root and shroud, while the equivalent stress distribution is uniform across the blade body, shroud, and root. The TC4 titanium alloy forgings produced under this process meet the technical requirements, exhibiting relatively uniform overall mechanical properties after forging. The microstructure primary equiaxial α phase and etypic β phase including acicular α phase is obtained, and the microstructure of the blade body is finer than that of the blade root and shroud.

Keywords: TC4 Titanium alloy; forging process; microstructure; properties

1 序言

钛合金同其他金属材料相比, 具有密度小、比强度高和耐蚀性良好等优点, 在石油化工、汽车工业、轨道交通及医药工程等领域中具有重要的应用价值^[1-3]。TC4 (Ti-6Al-4V) 合金是目前使用最广泛的一种 α 相+ β 相钛合金, 含有6% (质量分数) 的 α 相稳定元素Al和4%的 β 相稳定元素V, 具有良好的力学性能和工艺性能^[4-6]。

钛合金叶片与传统不锈钢叶片相比, 在性能方面能够替代不锈钢叶片, 且能够解决不锈钢叶片密度高、工作时离心力大等问题^[7]。叶片曲面形状复杂, 典型的叶片结构如图1所示。由于叶片成形精度和性能指标要求高, 因此对于叶片组织和性能的控制至关重要。本文研究TC4钛合金叶片模锻成形工艺, 以期通过合理的锻造工艺得到性能优异的组织结构, 满足锻件的使用要求。

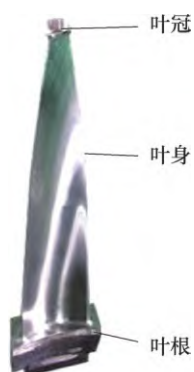


图1 典型的叶片结构

2 试验材料与方法

2.1 原材料

本试验用TC4钛合金加工棒材的主要化学成分见表1。从表1可知，其化学成分满足GB/T 3620.1—2016《钛及钛合金牌号和化学成分》的要求。TC4钛合金原始组织如图2所示。由图2可见，原始组织为典型的等轴组织，组织较均匀，主要由初生等轴 α 相和晶间 β 相构成。

表1 TC4合金的化学成分（质量分数）（%）

元素	Al	V	Fe	C
实测值	6.42	4.09	0.15	0.015
最大值	6.8	4.5	0.30	0.10
最小值	5.5	3.5	—	—
元素	N	H	O	Ti
实测	0.005	0.003	0.18	余量
最大值	0.05	0.0125	0.20	—
最小值	—	—	—	—

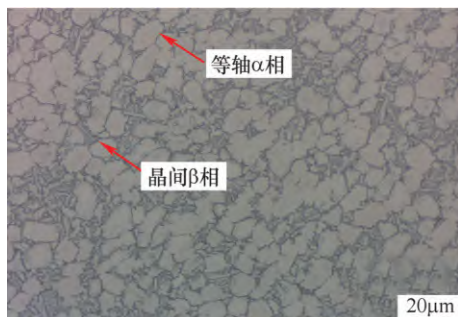


图2 TC4钛合金原始组织

2.2 试验方法

利用3D制图软件分别对上模、下模和坯料造型，并以stl格式文件导出，再导入到DEFORM-3D软件的前处理界面中进行模拟参数设定，利用

DEFORM-3D对叶片模锻过程进行数值模拟。有限元几何模型如图3所示。根据模拟结果选定合适的钛合金叶片锻造工艺并进行生产试制，利用电阻加热炉对模锻后的叶片进行热处理，观察TC4钛合金叶片自由锻坯和模锻后各部位的金相组织。为了检测力学性能的均匀性，在叶片各部位取样进行力学性能试验，综合评价该工艺对叶片产品性能及均匀性的作用。

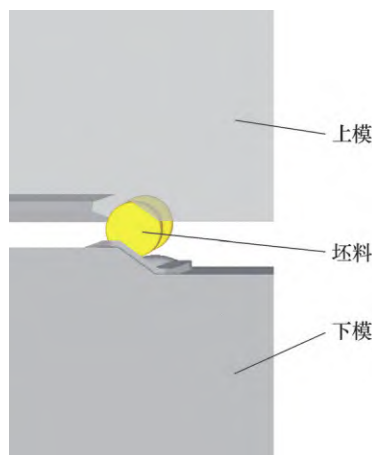


图3 有限元几何模型

3 结果与分析

3.1 叶片锻造数值模拟

根据以往项目经验，钛合金叶片采用“自由锻预制坯+敞开模终成形”锻造完成。

（1）预制坯形状确定 叶片预制坯的形状和尺寸直接影响到锻造工艺的成败，根据产品的结构特征及过往经验，进行了叶片锻件模型典型界面的截取（见图4），从而计算叶片预制坯各截面形状尺寸，设计了预制坯形状（见图5），坯料叶身部分采用矩形，叶根与叶冠按照旋转角度采用扁形。

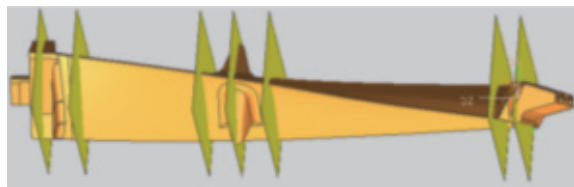


图4 叶片锻件典型截面的截取

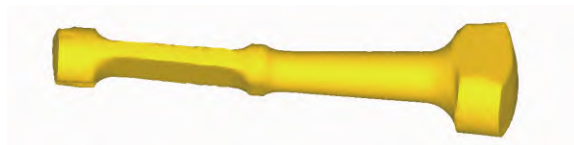
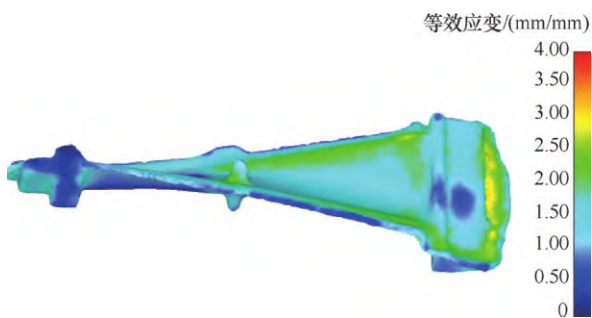


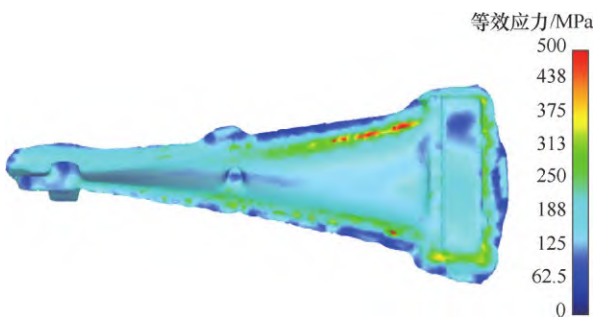
图5 设计的预制坯仿真模型

利用DEFORM-3D软件进行有限元分析。根据材料特性,始锻温度设为960℃,将毛坯属性设为塑性体,材料选择钛合金“Ti-6Al-4V”,并对其划分有限元网格单元,由于叶片变形量较大,所以坯料的网格划分应以较多为宜,网格数量为100000个。模具设置属性为刚性体,预热温度为400℃,摩擦系数为0.3,上模速度为260mm/s。数值模拟开始时上模与下模的距离 $D=206\text{mm}$,根据飞边桥部厚度为5mm的设计要求,上下模合模后的距离应为15mm,即上模压下量为191mm。由模拟结果可知,设计的预制坯较为理想,模拟充型情况良好,未出现折叠缺陷。

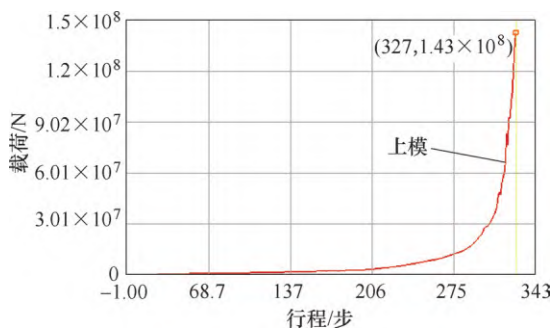
(2) 模拟结果分析 在上述工艺参数下,预制坯模锻模拟结果如图6所示。图6a所示为等效应变场



a) 等效应变场的分布情况



b) 等效应力场的分布情况



c) 锻造模拟过程载荷-行程曲线

图6 预制坯模锻模拟结果

的分布情况,图6b所示为等效应力场的分布情况,图6c所示为锻造模拟过程载荷-行程曲线。在最终成形状态下,叶身处等效应变仿真模拟颜色大部分呈绿色,叶根和叶冠处蓝色居多(见图6a),表明叶身处等效应变整体最大,叶根、叶冠处等效应变较小;且叶身、叶冠和叶根处等效应变都呈现中间部位最小,边缘部位逐渐递增。这是由于等效应变的大小主要与变形量有关,叶根、叶冠变形量较叶身变形量小,以及中间部位比边缘变形量小所致。

由图6b可见,最终状态下,叶身、叶冠和叶根3个部位的等效应力仿真模拟颜色接近,表明等效应力分布较均匀,各部位间变形抗力大致相等。这是因为在变形过程中随着变形量增大,位错密度越大,产生加工硬化,合金变形抗力越高,但同时产生的变形热增大,高温软化和再结晶时金属流动性增强,变形抗力较小,等效应力随之减小,所以叶身、叶冠和叶根之间的等效应力差别不大,整个飞边处变形抗力较大。由图6c可见,最终成形载荷为 $143 \times 10^8 \text{N}$,现有设备额定载荷 $1800 \times 10^8 \text{N}$ 可满足成形载荷的需求。

(3) 锻造工艺路线 结合锻造数值模拟结果,确定钛合金叶片锻造工艺路线为:原材料复验→加热→自由锻预制坯→加热→模锻成形→热切边→检验、清理→热处理→理化性能→表面质量、尺寸检查→入库。

3.2 生产试验

根据确定的锻造工艺路线进行现场试验验证。

(1) 自由锻预制坯 采用空气锤进行自由锻预制坯,始锻温度为960℃。一方面,通过自由锻使圆棒料加工成预制坯尺寸,便于后续终锻成形;另一方面,通过自由锻增大原材料的锻造比,使其获得更好的组织。通过自由锻预制坯的TC4钛合金叶片坯料如图7所示。



图7 TC4钛合金叶片坯料

(2) 模锻成形 采用电动螺旋压力机进行模锻,该工序为叶片锻坯最终成形工序,始锻温度相同,经尺寸检测,叶片锻件满足尺寸要求,外观质量好。

3.3 金相组织分析

(1) 自由锻坯金相组织 任意选取一根自由锻预制坯之后的钛合金坯料,分别在叶根、叶身、叶冠处取样进行金相检验。图8所示为自由锻预制坯后TC4钛合金各部位的金相组织。对比原材料金相组织(见图2)可知,经过自由锻出坯后,材料的 β 相组织形态已发生变化,转变为含等轴初生 α 相和含针状 α 相的转变 β 相组织。对比叶根、叶身和叶冠各部

位晶粒大小可知,叶身部位晶粒更为细小,叶根与叶冠部位晶粒相对较大。这是因为自由锻过程中各部位变形程度不同所致,叶身部位变形程度最大,原始晶界更加细化,因此晶粒更加细小。

(2) 模锻件金相组织 图9所示为经过模锻成形及热处理后钛合金叶片各部位金相组织。由图9可看出,叶片模锻件各部位组织比较均匀,均为含等轴初生 α 相和含针状 α 相的转变 β 相组织,叶身处由于变形程度较大,因此晶粒最为细小。对比图8可看出,经过模锻后,整个叶片的晶粒更加细小,等轴初生 α 相的含量较模锻前减少,转变 β 相组织增多。这是因为再经过一次模锻加热过程,原始晶界被进

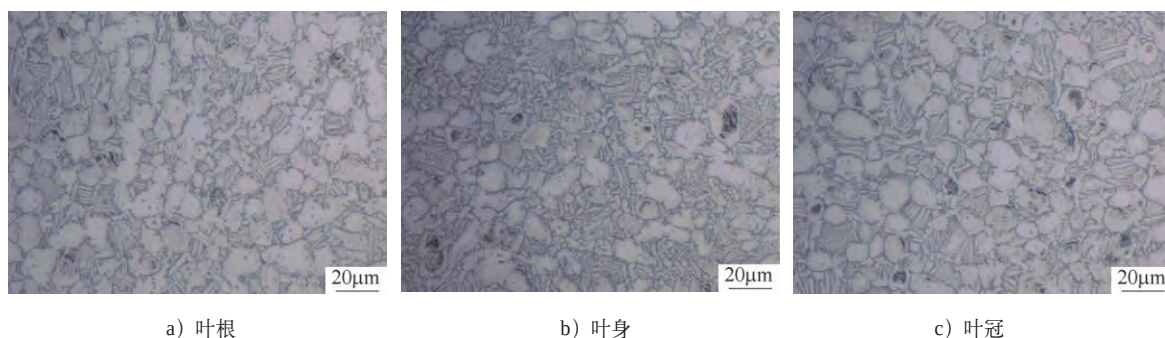


图8 自由锻预制坯后各部位金相组织

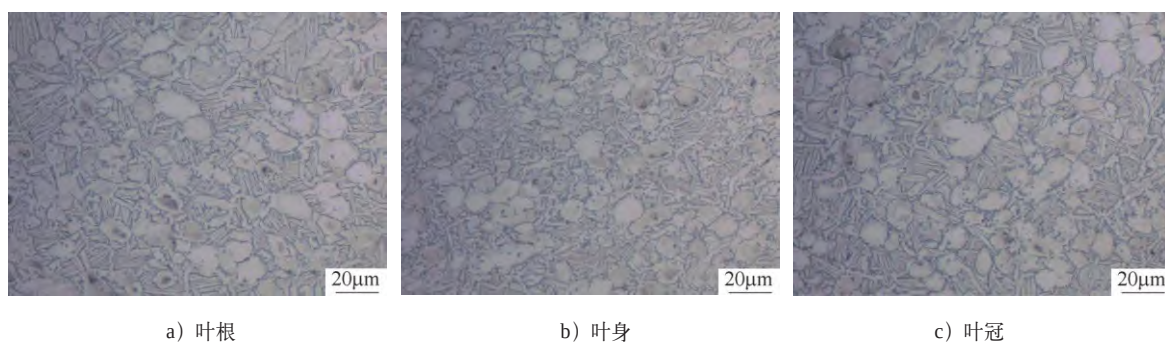


图9 叶片模锻件各部位金相组织

一步打碎,在冷却过程中析出的 α 相可在 β 相晶界上形核,也可在原来的 α 相晶界上形核,组织进一步得到细化。

3.4 力学性能试验

模锻叶片性能热处理后各部位的力学性能试验结果及技术要求见表2。由表2可知,整个叶片模锻件各部位力学性能均匀,叶身部位强度略高于叶根和叶冠部位,塑性指标各部位数值基本相同。并且均满足技术条件的要求,说明执行该工艺可以锻造出符合要求的钛合金叶片锻件。

表2 钛合金叶片锻件力学性能试验结果及技术要求

取样部位	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率A (%)	断面收缩率Z (%)
叶根	948	987	12	50
叶根	943	986	14	55
叶身	955	993	13	53
叶身	956	992	14	54
叶冠	948	987	13	51
叶冠	947	985	15	55
技术要求	≥ 815	≥ 890	≥ 10	≥ 25

4 结束语

1) 仿真数据显示,在最终状态下,叶身处等效应变较大,叶根、叶冠处等效应变较小,叶身、叶冠和叶根的等效应力分布均匀。

2) 经自由锻和模锻后,叶身部位组织相比叶根和叶冠处组织晶粒更加细小,这是因叶身部位变形程度较大所致。

3) 在该工艺条件下生产的TC4钛合金锻件可获得性能良好的等轴初生 α 相和含针状 α 相转变 β 相的金相组织。

4) 该工艺条件下生产的TC4钛合金叶片锻件满足技术条件的要求,且整体力学性能较为均匀,叶身部位强度比叶根和叶冠部位稍高,塑性水平各部位基本相同。

参考文献:

[1] 王亚光,张明玉,豆成斌,等. 固溶温度对TC19钛合金组织与力学性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2023(1): 55-58.

- [2] 王庆娟,田云飞,高贝特,等. 工业纯钛TA1的双道次热压缩变形及软化行为[J]. 金属热处理, 2022, 47(4): 75-80.
- [3] 李尚霖,王珂娜,何伟,等. Gr.37钛合金相变点的测定与分析[J]. 新疆有色金属, 2021(6): 109-110.
- [4] 余世伦,张孝军,孔玢,等. 退火工艺对冷轧工业纯钛带卷各向异性的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 82-87.
- [5] 周俊,汪宏斌,徐雨浩,等. 固溶处理对TC4钛合金组织和力学性能的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(6): 47-54.
- [6] 禹东,乔柳平,邹楠,等. 热处理工艺对Ti-6Al-4V等离子弧熔丝增材钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2023(11): 1-6.
- [7] 潘洪泗,揭念柱,方旭. TC4钛合金叶片等温成形多塑性变形机制模拟分析[J]. 热力透平, 2014, 43(3): 227-230.

(收稿日期: 20250310)

(上接第137页)

- [16] CUI X P, LIU H F, MENG J, et al. Microstructure and mechanical properties of die-cast AZ91D magnesium alloy by Pr additions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 435-438.
- [17] 王敏,王海东,徐学东. 稀土Pr对AZ91D镁合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 19-21.
- [18] 武波涛,马雷,武运卓. 稀土元素Y对汽车用AZ81镁合金铸造性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(5): 62-64.
- [19] 张诗昌,魏伯康,林汉同. 钇对Mg-9Al-1Zn合金铸态组织及时效特性的影响[J]. 金属热处理学报, 2003(3): 23-26, 91-92.
- [20] 杨明波,潘复生,程仁菊,等. Y对Mg-3Al-1Zn镁合金铸态组织的影响[J]. 轻合金加工技术, 2007, (7): 13-15.
- [21] TONG G D, LIU H F, LIU Y H. Effect of rare

earth additions on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 336-340.

- [22] WANG F, WANG Y, MAO P L, et al. Effects of combined addition of Y and Ca on microstructure and mechanical properties of die casting AZ91 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 311-317.
- [23] 李向平,李元,孙亚肖,等. AZ61+x%Gd镁合金铸态组织及性能研究[J]. 机车车辆工艺, 2022(5): 14-16.
- [24] ZHANG S, HU M, WANG Y, et al. Microstructural evolution mechanism and mechanical properties of La and Gd on AZ91 alloy: Experiments and first-principles calculations[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176667.

(收稿日期: 20241225)