

锻造与热处理工艺对TC11合金显微组织和力学性能的影响

魏丽, 李晓婷, 封嗣虎, 仲惟光, 杨恩超

摘要: 研究了不同锻造加热温度、热处理温度对TC11合金显微组织和力学性能的影响。结果表明, $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造 ($T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$, 100min, 风冷+ 530°C , 360min, 空冷) 热处理后可获得等轴 α 相含量为5%~10%的双态组织, 这种组织具有较好的综合力学性能, 室温抗拉强度达1105MPa, 断后伸长率达15%, 冲击初度达45J。

关键词: TC11合金; 锻造; 热处理; 显微组织; 性能

TC11钛合金属于马氏体型 ($\alpha + \beta$) 两相热强钛合金, 是一种重要的航空和宇航材料, 通常采用 $\beta / (\alpha + \beta)$ 转变点以下 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 加热变形的常规锻造。航天用某TC11钛合金锻件技术条件中规定, 锻件的室温抗拉强度不小于1060MPa。而常规锻造生产的TC11钛合金锻件达到一定尺寸后, 整体热处理获得的室温抗拉强度很难满足该指标要求, 从而致使无法向客户交付合格的锻件。鉴于此, 本文研究近 β 锻造加热温度、退火—热处理温度对TC11钛合金组织和室温力学性能的影响, 研究成果可用于指导航天用TC11钛合金锻件的最佳锻造和热处理工艺的制订。

的锻件把关仍需加强, 锻件对产品的质量至关重要。建议从源头冶炼开始控制, 如对炉料烘烤、冶炼时充分沸腾、采用真空除气技术; 锻造过程严格把关, 比如高温下锻造加快扩散过程、增加

一、试验材料与内容

1. 试验材料

试验采用西部钛业提供的 $\phi 145\text{mm}$ TC11合金棒材, 其化学成分 (质量分数, %) 如表1所示, 用金相法测得的合金相变点温度为 1000°C 。棒材经常规锻

造成尺寸为 $\phi 265\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的试验用中间饼坯。

2. 试验内容

(1) 锻造 将试验用的2件中间饼坯 (尺寸均为 $\phi 265\text{mm} \times 100\text{mm}$) 在40MN螺旋压力机上分别按表2中的锻造

表1 棒材化学成分 (质量分数) (%)

元素	Al	Mo	Zr	Si	杂质				
					Fe	C	N	H	O
含量	6.58	3.42	1.62	0.23	0.03	0.018	0.00831	0.00378	0.112

表2 锻造工艺参数

试样编号	1	2
锻造加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\beta}-10$	$T_{\beta}-20$
变形程度 (%)	30	30
锻后冷却方式	水冷	水冷
锻后饼材尺寸/mm	$\phi 316 \times 70$	$\phi 316 \times 70$

锻粗工序提高锻造比、锻后及时装炉退火; 严格把关锻件超声波检测等。通过严格控制提高产品质量、减少损失。

参考文献

[1] 张彦敏. 锻造工工作手册[M].

北京: 化学工业出版社, 2009.

作者简介: 朱杰, 太原重型机械股份有限公司。

工艺进行近 β 锻造。

(2) 热处理 采用线切割将近 β 锻造后的饼材分别沿轴向等分为二, 试样编号分别加刻标记1、2。分料后的4个半圆饼材分别按表3所示进行双重退火热处理。

(3) 理化性能检测 在热处理后的4个半圆饼材的 $R/2$ 处厚度中心分别取样检测其显微组织、室温拉伸性能和室温冲击性能, 试验方法分别为: GB/T 5168、GB/T 228、GB/T 229。

二、试验结果与分析

1. 锻造与热处理工艺对TC11合金显微组织的影响

TC11合金中间饼坯的锻态显微组织如图1所示。可看出, 在金相组织中, 显微组织是由等轴 α 相和 β 相组成的等轴组织, 其中, 等轴 α 相的体积分数约为40%。

图2是TC11合金饼坯经不同锻造和热处理工艺后的显微组织。可看出, 4个半圆饼材均为双态组织。随着锻造温度的增加, 等轴 α 含量减少, 短条状或细长片状 α 含量增加; 锻造温度为 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 时, 等轴 α 相含量为25%~30%; 锻造温度为 $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 时, 等轴 α 相含量为5%~10%。锻造温度为 $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 或 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 时, $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ 与 $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ 的退火一处理温度对热处理后饼材中等轴 α 相的含量和尺寸无显著影响。

航天用TC11钛合金锻件的技术条件要求等轴 α 相含量为15%~50%。由此可知, $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造时, 等轴 α 相含量不能够满足航天用TC11钛合金锻件的技术

条件要求; $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造时, 饼材中等轴 α 相的含量能够满足航天用TC11钛合金锻件的技术条件要求。

2. 锻造与热处理工艺对TC11合金力学性能的影响

表4是TC11合金饼坯经不同锻造和热处理工艺后的室温拉伸性能和冲击性能。

由表4可看出, 1-1的室温抗拉强度和冲击吸收能量均比2-1高, 1-1的断面收缩率略低于2-1, 而两者的断后伸长率相当; 1-2和2-2相比, 也存在相同的规律。由此可知, 当热处理工

艺相同时, $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材的室温抗拉强度和冲击吸收能量比 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材高, 断面收缩率比 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材略低, 而断后伸长率相当。

在拉应力作用下, 当外加应力大于位错开动的临界应力时, 位错便开始运动。在位错运动



图1 中间饼坯锻造试验前的原始组织



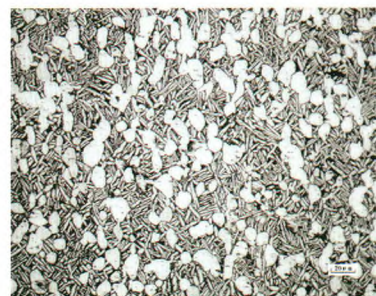
(a) 1-1 ($T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ 退火一热处理)



(b) 1-2 ($T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ 退火一热处理)



(c) 2-1 ($T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ 退火一热处理)



(d) 2-2 ($T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ 退火一热处理)

图2 TC11合金在不同锻造和热处理工艺下的显微组织

表3 热处理工艺参数

试样编号	1-1、2-1	1-2、2-2
退火一热处理	$T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$, 100min, 风冷 (accelerate air cooling, ACC)	$T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$, 100min, ACC
退火二热处理	530 $^{\circ}\text{C}$, 360min, 空冷 (air cooling, AC)	

的过程中,组织中等 α 相、短条状或细长条 α 相含量不同, α 界面阻碍位错运动的能力不同。由于 $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材中的短条状或细长条 α 相含量大于 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材,即前者的 α 界面多,位错运动的阻力大,所以宏观上表现为前者的强度高。在裂纹扩展过程中,往往会沿着与某一 α 集束扩展,当裂纹扩展至集束的界面时,将会被迫改变原扩展方向,向有利的方向扩展,纵横交错的短条状或细长条 α 相含量多的组织可以不断改变裂纹扩展的方向,增加裂纹扩展的路径,从而使断裂过程所需的能量增加。由于 $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材中的短条状或细长条 α 相含量大于 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材,裂纹扩展的路径曲折,消耗的能量大,所以宏观上表现为前者的断裂韧度高。

航天用TC11钛合金锻件的技术条件要求室温抗拉强度为

1060~1230MPa。由此可知, $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 或 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造时,室温抗拉强度均能够满足航天用TC11钛合金锻件的技术条件要求。 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造时,室温抗拉强度富裕量不大,约为5MPa。

上述结果表明, $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ (锻后水冷)加热锻造, ($T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$, 100min, 风冷+530 $^{\circ}\text{C}$, 360min, 空冷)热处理后可获得等轴 α 相含量为5%~10%的双态组织,这种组织具有较好的综合性能,室温抗拉强度达1105MPa,断后伸长率达15%,冲击吸收能量达45J。为了满足航天用TC11钛合金锻件的显微组织和力学性能要求;且考虑到工厂生产时,近 β 锻造温度越高,对料温的控制要求越严;故建议航天用TC11钛合金锻件的近 β 锻造加热温度选用 $T_{\beta}-15^{\circ}\text{C}$,退火一热处理温度选用 $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$,推测经上述锻造温度和热处理温度生产的锻件可获得满足规范要求的组织和性能。

等轴 α 相含量分别为25%~30%、5%~10%;锻造温度为 $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 或 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 时, $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ 或 $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ 的退火一处理温度对热处理后饼材中等轴 α 相的含量和尺寸无显著影响。

当热处理工艺相同时, $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材的室温抗拉强度和冲击功比 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材高,断面收缩率比 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造的饼材略低,而断后伸长率相当。

$T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ (锻后水冷)加热锻造, ($T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$, 100min, 风冷+530 $^{\circ}\text{C}$, 360min, 空冷)热处理后可获得等轴 α 相含量为5%~10%的双态组织,这种组织具有较好的综合力学性能,室温抗拉强度达1105MPa,断后伸长率达15%,冲击吸收能量达45J。

参考文献

- [1] EA鲍丽索娃. 钛合金金相学[M]. 陈石卿译. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [2] 朱红, 廖鸿. 锻造温度对TC11钛合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 128-130.
- [3] 白晓环, 冯永琦, 王韦琪, 等. 飞机结构用TC11钛合金异型锻件的组织与性能[J]. 钛工业进展, 2005, 22(5): 37-40.
- [4] 李晓芹. 锻造加热温度对TC11合金组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 1999(3): 30-32.

作者简介: 魏丽、李晓婷、封嗣虎、仲惟光、杨思超, 无锡透平叶片有限公司。

表4 TC11合金在不同锻造和热处理工艺下的力学性能

试样编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	A_{KV} /J
1-1 ($T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ 退火—热处理)	1106	1009	15.0	36	46
	1105	1009	14.0	37	43
1-2 ($T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ 退火—热处理)	1071	968	14.0	41	45
	1075	971	14.0	39	47
2-1 ($T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ 退火—热处理)	1062	973	14.0	43	45
	1065	975	13.5	45	38
2-2 ($T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 锻造, $T_{\beta}-50^{\circ}\text{C}$ 退火—热处理)	1067	982	15.0	46	36
	1061	976	14.5	45	36
航天用TC11钛合金锻件的技术条件要求	1060~1230	≥ 910	≥ 8	≥ 23	≥ 23.5

三、结语

随着锻造温度的增加,显微

组织中等轴 α 含量减少;锻造温度分别为 $T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$ 时,