

退火对高 Mo 当量大型 TA15 钛合金锻件组织与拉伸性能的影响

曾菁¹, 王晓巍², 余胜峰¹, 莫安军¹, 陈先国¹, 刘鹏茹¹

(1. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618013)

(2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 研究了退火温度和退火次数对经大变形量锻造成形的 TA15 钛合金锻件拉伸性能的影响。结果表明, 随着退火温度的升高, TA15 钛合金锻件拉伸强度呈现先下降后上升再下降的变化规律。先下降是由于回复再结晶软化起主导作用, 后上升是次生 α 相析出强化起主导作用, 再下降是由于次生 α 相的粗化及初生 α 相含量减少所致。经多次 800 °C/1 h/AC 重复退火处理, TA15 钛合金锻件拉伸强度降幅不超过 10 MPa, 塑性基本没有变化。

关键词: TA15 钛合金; 退火; 再结晶; 析出强化

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)06-024-04

Effect of Annealing on Microstructure and Tensile Properties of High Mo Equivalent Large TA15 Titanium Alloy Forging

Zeng Jing¹, Wang Xiaowei², Yu Shengfeng¹, Mo Anjun¹, Chen Xianguo¹, Liu Pengru¹

(1. China National Erzhong Group Deyang Wanhang Die Forging Co., Ltd., Deyang 618013, China)

(2. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China)

Abstract: The effect of annealing temperature and annealing times on the tensile properties of TA15 titanium alloy forging with large deformation was studied. The results show that the tensile strength of TA15 titanium forging decreases first, then increases and then decreases, with the increase of annealing temperature. The first decrease is due to the dominant role of recovery and recrystallization softening, the precipitation strengthening of secondary α phase leads to the strength rise, and the further decrease is caused by the coarsening of secondary α phase and the reduction of primary α phase content. After repeated annealing at 800 °C/1 h/AC for many times, the tensile strength of TA15 titanium alloy forgings decreases less than 10 MPa, and the plasticity has no significant change.

Key words: TA15 titanium alloy; annealing; recrystallization; precipitation hardening

TA15 钛合金对应俄罗斯 BT20 钛合金, 名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V, 是典型的近 α 型钛合金^[1]。与 TC4 钛合金相比, TA15 钛合金不仅具有良好的热稳定性和可焊性, 而且具有更高的室温和高温强度, 在航空航天发动机上得到了广泛应用^[2-3]。按名义成分计算, TA15 钛合金的 Mo 当量为 1.7, 工程生产时, 可根据不同产品的特定性能指标要求, 在成分上下限范围内, 适当调整 Mo 和 V 的含量, 故不同批次 TA15 钛合金材料的 Mo 当量有所差别。TA15 钛合金稳定状态时的 β 相含量较少, 热处理强化效

果极为有限, 因此对于普通应用的锻件产品, 工程上最为常用的热处理方式是普通退火^[1,4], 即通过回复再结晶作用消除残余应力, 稳定组织^[5]。增加 Mo 当量有助于提高热处理强化的效果。

我国 TA15 钛合金锻件国产化大致经历了消化、吸收及再创新的发展历程。根据用户对锻件重量、截面厚度及性能要求不同, 可灵活调控合金成分, 制定合适的热处理制度。对于强度要求较低的中小型锻件, 控制合金成分时采用较低的 Mo 当量, 并选用简单的普通退火工艺进行热处理。已有研究表明, 随着退火温度的升高, TA15 钛合金的拉伸强度呈下降趋势^[2]。但随着飞机结构锻件向大型化、整体化

发展,TA15 钛合金大型复杂结构锻件经常出现拉伸强度不达标的问题,因此,在成分控制时需适当增加 Mo 和 V 的含量来提升强度性能,实际成分的 Mo 当量往往超过 2.5。研究表明,采用小吨位压机及多次小变形方式成形的高 Mo 当量 TA15 钛合金锻件,随着退火温度的升高,拉伸强度呈增高趋势^[6]。

2012 年,中国第二重型机械集团有限公司建造并投产了 800 MN 模锻压机,可实现大型钛合金结构锻件少火次大变形的锻造成形。与小型锻件和小变形获得的锻件相比,此类高 Mo 当量、少火次大变形成形的大型锻件,初始组织的应变能和内应力更大,导致再结晶温度有所降低,退火过程中的组织演变更加复杂,而且高 Mo 当量还增强了热处理强化的效果。另外,大规格钛合金锻件的少火次大变形锻造,势必引起锻件内应力的增大,需要进行退火处理消除内应力。锻件经焊接、机械加工等工序后也会产生残余应力,需重复进行退火处理,但多次重复退火处理是否影响其组织与性能尚不清楚。

为了满足航空航天对高强、大规格锻件的需求,以高 Mo 当量、大变形的大型 TA15 钛合金结构锻件为对象,研究了退火温度、预先热处理及多次重复退火对锻件拉伸性能的影响规律,以期为制定和优化退火工艺参数提供依据。

1 实 验

实验材料为 $\phi 350$ mm TA15 钛合金棒材,其化学成分见表 1。根据当量计算公式^[7],该合金的 Mo 当量高达 3.46。经金相法测定,其 β 相转变温度(T_β)为 988 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 TA15 钛合金棒材的化学成分 (w/%)								
Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy bar								
Ti	Al	Zr	Mo	V	Fe	O	N	H
Bal.	6.64	2.09	1.72	2.16	0.1	0.1	0.007	0.0043

为了减小力学性能数据的分散性,模拟大变形锻件成形方式对棒材进行两火自由锻+两火模锻,得到规格为 1200 mm $\times$ 670 mm $\times$ 160 mm 的 TA15 钛合金锻件,总变形量为 30%~40%。从 TA15 钛合金锻件上切取 $\phi 20$ mm $\times$ 90 mm 试棒若干,对其进行不同制度热处理:① 分别在 700、750、800、840、880、930、950 $^{\circ}\text{C}$ 进行退火处理,保温 1 h,空冷;② 探索 2 次退火工艺的可行性,即先进行一次

800 $^{\circ}\text{C}$ /1 h/AC 预先热处理,然后进行不同温度的退火处理;③ 对锻件进行 5 次 800 $^{\circ}\text{C}$ /1 h/AC 重复退火处理。

将热处理后的试棒加工成标准拉伸试样,采用 Instron 4507 万能试验机进行室温拉伸性能测试。采用 FEI Quanta 600 扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织观察。

2 结果与分析

2.1 退火温度对组织与拉伸性能的影响

图 1 为大规格 TA15 钛合金锻件的室温拉伸性能随退火温度的变化曲线。从图 1 可以看出,随着退火温度的升高,TA15 钛合金锻件的拉伸强度呈现先降低后升高再降低的变化趋势,并在 880 $^{\circ}\text{C}$ 时抗拉强度达到最大,而塑性随退火温度的变化不明显。这与传统意义的 BT20 或 TA15 钛合金小规格锻件强度随退火温度升高而下降^[2],或大规格锻件强度随退火温度升高而升高的规律不同^[6]。这种不同与材料的化学成分、再结晶程度及次生相的析出有关^[8-9]。首先是化学成分的影响,通常小规格锻件的 β 稳定元素含量取中下限,反映在 Mo 当量上应小于 2.5,而该合金的 Mo 当量为 3.46,成分已属于 α + β 型两相钛合金范畴,存在通过热处理强化的可能性。

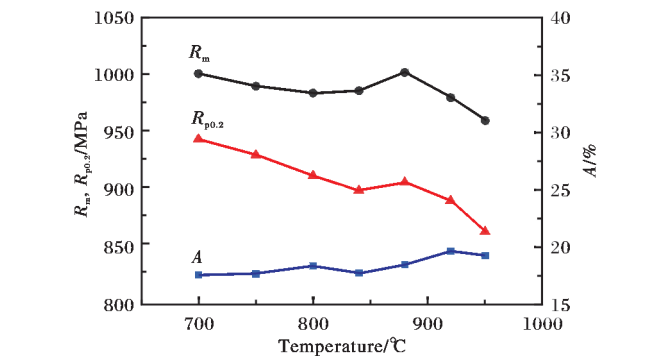


图 1 大规格 TA15 钛合金锻件室温拉伸性能随退火温度的变化曲线

Fig. 1 Various curves of room temperature tensile properties vs. annealing temperature of large TA15 titanium alloy forging

图 2 为大规格 TA15 钛合金锻件经不同温度退火处理后的显微组织。从图 2 可以看出,经 800 $^{\circ}\text{C}$ 退火后, β 转变组织中的 β 相内部无析出物;经 840 $^{\circ}\text{C}$ 退火后, β 相中局部析出细小的次生 α 相,但由于次生 α 相较少,强化作用较弱;经 880 $^{\circ}\text{C}$ 退火后, β

相中析出大量细小的次生 α 相, 强化效果显著; 退火温度进一步升高至 950 $^{\circ}\text{C}$ 时, β 相中析出的次生 α 相粗化, 初生 α 相含量减少, 导致强化效果减弱, 强度有所下降。

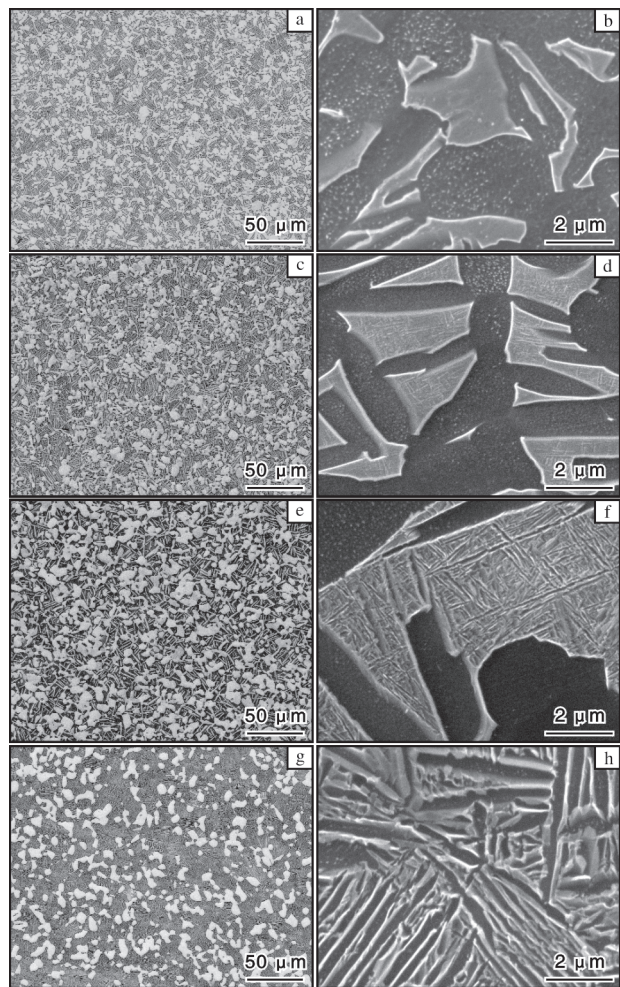


图2 大规格 TA15 钛合金锻件经不同温度退火处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of large TA15 titanium alloy forging after annealing at different temperatures: (a, b) 800 $^{\circ}\text{C}$; (c, d) 840 $^{\circ}\text{C}$; (e, f) 880 $^{\circ}\text{C}$; (g, h) 950 $^{\circ}\text{C}$

化学成分因素是导致该合金出现热处理强化的前提, 而退火过程中出现的再结晶软化与析出强化是出现上述规律的根本原因。不论是再结晶还是形成析出相均是热激活过程, 需要能量作为驱动力。退火温度由 700 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 840 $^{\circ}\text{C}$ 时, 再结晶软化起主导作用, 因而强度呈降低趋势; 退火温度为 840 ~ 880 $^{\circ}\text{C}$ 时, 析出次生 α 相的强化起主导作用, 再结晶软化起次要作用, 因而强度增大; 退火温度超过 880 $^{\circ}\text{C}$ 后, 再结晶软化起主导作用(析出的过时效也

是软化的原因), 初生 α 相比比例减少也是强度下降的原因之一。

2.2 预先热处理对拉伸性能的影响

图3为大规格 TA15 钛合金锻件经预先热处理 + 普通退火后的室温拉伸性能。图中曲线 1 为普通退火, 曲线 2 为预先热处理 + 普通退火。与普通退火工艺相比, 第 2 次退火温度低于 840 $^{\circ}\text{C}$ 时, 再结晶软化起主要作用, 强度略有下降; 当第 2 次退火温度升至 840 ~ 880 $^{\circ}\text{C}$, 由于预先热处理而使强化效果增强, 强度略有增加。

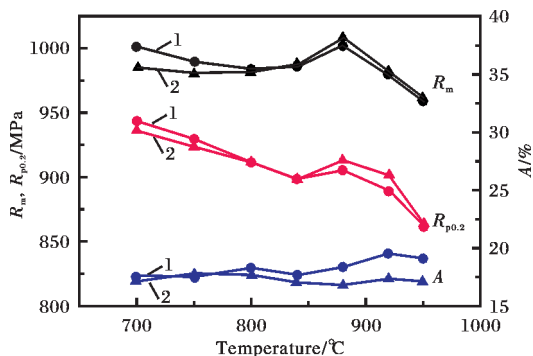


图3 预先热处理对大规格 TA15 钛合金锻件室温拉伸性能的影响

Fig. 3 Effect of pre-heat treatment on room temperature tensile properties of large TA15 titanium alloy forging

2.3 退火次数对组织与拉伸性能的影响

图4为大规格 TA15 钛合金锻件经多次 800 $^{\circ}\text{C}$ / 1 h/AC 重复退火后的室温拉伸性能。从图4可以看出, 随着退火次数的增加, 强度仅略有下降, 其中抗拉强度降幅不超过 10 MPa, 且小于 1%, 而塑性无

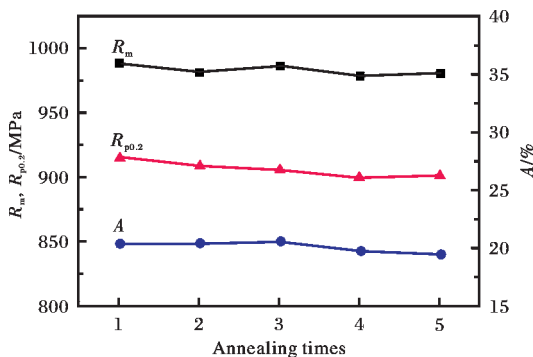


图4 重复退火(800 $^{\circ}\text{C}$ / 1 h/AC)对大规格 TA15 钛合金锻件室温拉伸性能的影响

Fig. 4 Effect of repeat annealing (800 $^{\circ}\text{C}$ / 1 h/AC) on room temperature tensile properties of large TA15 titanium alloy forging

明显变化。这表明按现行工艺对大规格 TA15 钛合金锻件进行重复退火, 不会引起拉伸性能的明显变化。

图 5 为大规格 TA15 钛合金锻件经多次 800 °C/1 h/AC 重复退火后的显微组织。从图 5 可以看出,

随着退火次数的增加, 锻件组织形貌未发生明显变化, 均为典型的双态组织。这表明大规格 TA15 钛合金锻件组织稳定, 多次重复退火对其显微组织影响不大。

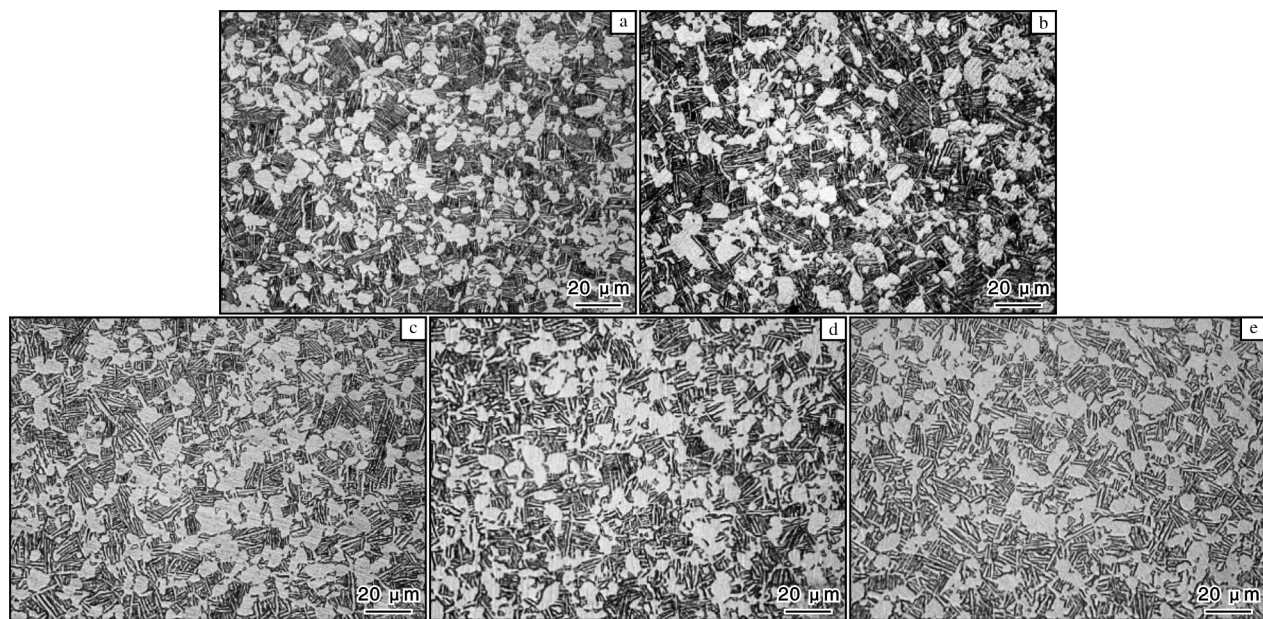


图 5 多次重复退火后大规格 TA15 钛合金锻件的显微组织

Fig. 5 Microstructures of large TA15 titanium alloy forging after repeated annealing: (a) once; (b) twice; (c) three times; (d) four times; (e) five times

3 结 论

(1) 随着退火温度的升高, 高 Mo 当量、大规格 TA15 钛合金锻件的强度呈现先降低后升高再降低的变化趋势, 并在 880 °C 时抗拉强度达到最大, 而塑性随退火温度变化不明显。

(2) TA15 钛合金锻件经 800 °C 退火后, β 转变组织中的 β 相内部无析出物, 回复再结晶起主导作用, 强度降低; 经 840 °C 退火后, β 相中局部析出细小的次生 α 相, 但由于次生 α 相较少, 强化作用较弱; 经 880 °C 退火后, β 相中析出大量细小的次生 α 相, 强化效果显著; 退火温度进一步升高至 950 °C 时, β 相中析出的次生 α 相粗化, 初生 α 相含量减少, 导致强化效果减弱, 强度有所下降。

(3) TA15 钛合金锻件组织稳定, 多次 800 °C/1 h/AC 重复退火对其显微组织影响不大。

参考文献

[1] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 67-69.

- [2] 王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 208.
- [3] 闵新华, 纪仁峰. 锻造工艺对 TA15 钛合金扁坯组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(6): 36-39.
- [4] 卢凯凯, 周立鹏, 段启辉, 等. 热处理工艺对 TA15 钛合金棒材组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(4): 35-39.
- [5] 卢政, 袁武华, 齐占福, 等. TA15 钛合金锻件热处理过程残余应力演变研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(10): 227-230.
- [6] 张晶宇, 杨延清, 陈彦, 等. 退火对 TA15 钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2003, 28(3): 46-48.
- [7] 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: 32.
- [8] Filip R, Kubiak K, Ziajia W. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1/2): 84-59.
- [9] Lütjering G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243(1/2): 32-35.