

加热与热处理

热处理对锻压 TA15 钛合金棒组织和性能的调控

齐 铭, 安 震, 张 凯, 孟广慧, 丁 旭

(西安航空学院 材料工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 对锻压 TA15 钛合金试样进行 700~820 ℃ 的退火处理, 保温 2 h 后空冷, 研究热处理工艺对锻压 TA15 钛合金的力学性能的影响。通过观察热处理后锻压 TA15 钛合金的显微组织变化, 统计初生 α 相的相对体积分数。结果发现, 在 700~820 ℃ 退火处理后, 锻压 TA15 钛合金的显微组织中主要存在初生 α 相和次生 α 相, 以及较少的基体 β 相; 随着退火温度的升高, 初生 α 相的含量逐渐减少, 相对体积分数由 70.35% 降至 46.42%, 次生 α 相的相对体积分数由 3.84% 升高至 18.26%。对比不同热处理温度下试样在室温和高温 (500 ℃) 条件下的拉伸性能, 820 ℃ 退火处理后的试样在室温时的抗拉强度为 986 MPa, 伸长率为 13.5%, 强度和塑性具有较好的性能匹配。

关键词: 热处理; 锻压 TA15 钛合金; 显微组织; 拉伸性能; 相转变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.029

中图分类号: TG156.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 08-0193-07

Regulation of heat treatment on microstructure and properties of forged TA15 titanium alloy bar

Qi Ming, An Zhen, Zhang Kai, Meng Guanghui, Ding Xu

(School of Materials Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The samples of forged TA15 titanium alloy were annealed at 700~820 ℃ and holding for 2 h and then air-cooled, and the influences of heat treatment process on the mechanical properties of forged TA15 titanium alloy were studied. Then, the microstructure changes of forged TA15 titanium alloy after heat treatment were observed, and the relative volume fraction of primary α phase was calculated. The results show that after annealing at 700~820 ℃, there are mainly primary α phase and secondary α phase, and a few matrix β phases in the microstructure of forged TA15 titanium alloy. With the increasing of annealing temperature, the content of primary α phase decreases gradually, the relative volume fraction decreases from 70.35% to 46.42%, and the relative volume fraction of secondary α phase increases from 3.84% to 18.26%. Comparing the tensile properties of the samples at room temperature and high temperature (500 ℃) under different heat treatment temperatures, the samples after annealing at 820 ℃ have the tensile strength of 986 MPa and the elongation rate of 13.5% at room temperature, and the strength and plasticity have good performance match.

Key words: heat treatment; forged TA15 titanium alloy; microstructures; tensile properties; phase transformation

随着航空航天技术的不断提高, 对生产制造航空器材料的要求越来越高, 钛合金在航空航天中具有广阔的使用前景^[1]。国内关于 $\alpha+\beta$ 两相钛合金的研究较多, 而关于 TA15 钛合金的研究相对较少,

TA15 钛合金是一种应用十分广泛的近 α 钛合金, 它的强度、热稳性和抗蠕变性均很好, 还是重要的损伤容限型钛合金^[2]。合金成分会影响 TA15 钛合金的力学性能, 研究发现, 合金中的主合金元素对合金性能的影响较大, 当初生 α 相的含量减少、次生 α 相片层的宽度较细时, 合金的强度提高, 塑性下降^[3-4]。在热处理过程中引入 H 元素, TA15 钛合金中 α 相和 β 相的相对含量也会随 H 含量的变化发生变化^[5]。随着退火温度的不断升高, TA15 钛合金晶粒的等轴化程度增大, 初生 α 相的含量逐渐减少^[6]。通过退火、固溶+时效和双重热处理等热处理工艺可以优化 TA15 钛合金的组织, 明显提高合

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-11-08

基金项目: 西安市科技计划项目 (2019217314GXRC009CG010-GXYD9.3); 2019 年教育部第二批产学研合作协同育人项目 (201902004015); 国家级大学生创新创业训练项目 (S202011736024)

作者简介: 齐 铭 (1983-), 男, 博士, 讲师

E-mail: 93771617@qq.com

通信作者: 安 震 (1985-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 347213010@qq.com

金的力学性能^[7-9]。合适的形变工艺,可以细化 TA15 钛合金的晶粒,提高其综合性能^[10-12]。对热处理加工后的 TA15 钛合金进行退火,可以使 TA15 钛合金的力学性能获得最佳匹配^[13]。热处理工艺不同,TA15 钛合金中初生 α 相的含量和形状均会随之变化,进而影响合金的塑性^[14]。因此,TA15 钛合金需要经过一系列复杂的热处理,才能获得组织均匀、力学性能优异的半成品或零件,所以对 TA15 钛合金进行系统的热处理工艺研究以及优化是非常必要的。

本文通过对锻压 TA15 钛合金试样进行 700~820 ℃ 的退火处理,研究初生 α 相和次生 α 相间的转变规律,根据热处理后锻压 TA15 钛合金的微观组织和力学性能的变化情况,分析得到具有最佳性能匹配的热处理工艺。

1 试验材料与方法

试验所选取的材料为锻压 TA15 钛合金棒材,它的名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。该合金的实际化学成分如表 1 所示。

表 1 TA15 钛合金化学成分(%,质量分数)
Table 1 Chemical compositions of TA15 titanium alloy
(%, mass fraction)

Al	Zr	Mn	V	Si	Fe	Ti
5.5~ 7.0	1.5~ 2.5	0.2~ 2.0	0.8~ 2.5	≤0.15	≤0.25	余量

将锻压 TA15 钛合金试样棒材表面全部涂覆防氧化涂料后,先在箱式电阻炉中进行退火处理,再进行试样棒材切割、加工出标准试样。热处理制度为(700~820)℃×2 h,空冷(AC)(每隔 30 ℃ 设为一个热处理制度)。退火处理工艺如图 1 所示。

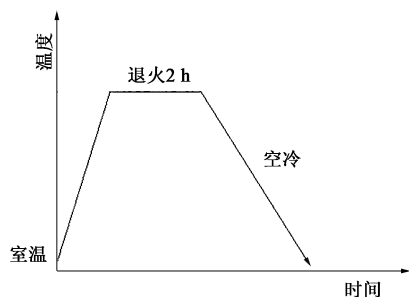


图 1 退火处理工艺图

Fig. 1 Diagram of annealing treatment process

不同温度退火处理后的锻压 TA15 钛合金试样通过 UTM5350 电子万能试验机进行高温和室温的拉

伸性能测试,设备载荷范围为 0~300 kN,载荷精度为 0.5%,加载速率为 0.5 mm·min⁻¹。拉伸试样根据 ASTM E8/E8M—2011^[15] 标准制备。按照 GB/T 229—2020^[16] 要求,在 JB-300 型摆锤式冲击试验机上进行冲击试验。采用 U 形缺口试样,尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。分别测出不同热处理条件下,室温时的抗拉强度 R_m 、屈服强度 R_{eL} 、断面收缩率 Z 、伸长率 A 、冲击功 A_{ku} 。锻压 TA15 钛合金高温(500 ℃)拉伸试样与室温条件下的试样相同,当设定温度稳定后保温 20 min 开始测试,分别测出锻压 TA15 钛合金高温时的抗拉强度、断面收缩率与伸长率。每种性能测试 3 组数据,求平均值,以减少试验所带来的误差。

利用 OLYMPUS-GX51 型倒置式光学显微镜对热处理后的锻压 TA15 钛合金金相组织进行观察,显微照片利用 Photo Shop 进行处理,将初生 α 相进行涂黑处理,处理后可观察到相的组成情况。通过显微镜自带的 QLYCIA m3 软件对处理后的金相组织进行分析,统计显微组织中各主要组成相的相对体积分数。QLYCIA m3 金相分析系统可以利用数学、光学等技术理论,对金相照片进行图像分析、面积形态分析和粒子计数分析等,被广泛应用于材料检测等科学和工程研究,为材料生产过程提供质量控制。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

图 2 为不同热处理制度下锻压 TA15 钛合金的金相组织,初生 α 相为等轴状,次生 α 相为片层状,热处理后等轴状初生 α 相分布均匀。图 2a 为 700 ℃ 退火后的显微组织,相组成主要为初生 α 相、部分次生 α 相、还有少量基体 β 相,初生 α 相所占比例最大;图 2b 和图 2c 分别为 730 和 760 ℃ 退火后的显微组织,相组成包括初生 α 相和次生 α 相,初生 α 相占绝大部分,但在 700 ℃ 退火后有所降低,说明初生 α 相随着温度的升高逐渐减少,次生 α 相随着温度的升高逐渐增加;图 2d 和图 2e 分别为 790 和 820 ℃ 退火后的显微组织,相组成包括初生 α 相和次生 α 相,次生 α 相随着温度的升高逐渐增多,初生 α 相的含量随着退火温度的升高而降低,基体 β 相的含量变化不大。

通过观察金相组织,发现不同热处理温度的试样中,初生 α 相、次生 α 相以及 β 相之间黏连在一起,不便于统计组织中各相的相对含量。利用 Photo

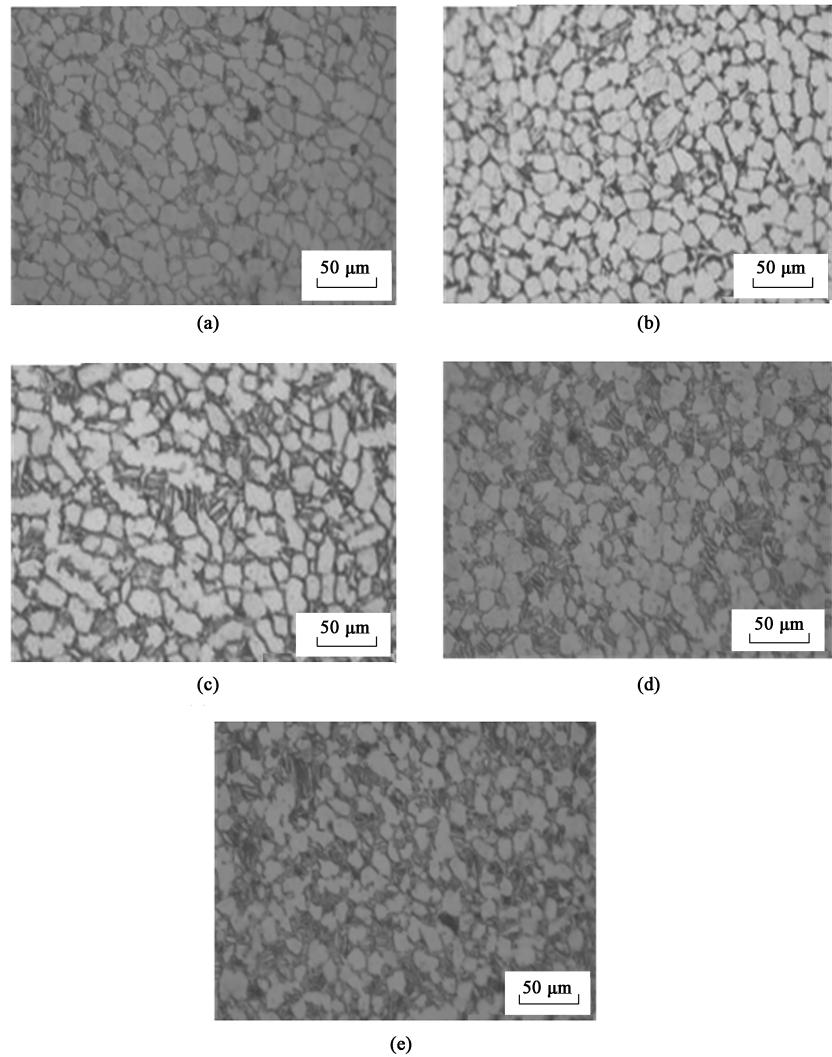


图 2 不同热处理制度下锻压 TA15 钛合金的金相组织
(a) 700 °C×2 h, AC (b) 730 °C×2 h, AC (c) 760 °C×2 h, AC (d) 790 °C×2 h, AC (e) 820 °C×2 h, AC
Fig. 2 Metallographic structures of forged TA15 titanium alloy under different heat treatment systems

Shop 软件对显微组织中的初生 α 相进行涂黑处理, 其余为次生 α 相以及基体 β 相。再通过 QLYCIA m3 金相分析系统处理涂黑的组织, 对各相进行体积分数统计, 取 3 组数据求平均值, 得到各相的相对体积分数。处理后的锻压 TA15 钛合金金相组织如图 3 所示, 图 3 中初生 α 相标注为深色, 其余为次生 α 相以及基体 β 相。

锻压 TA15 钛合金的塑性由次生 α 相与初生 α 相决定。提高初生 α 相的含量, 合金的塑性变大, 提高次生 α 相的含量, 合金的塑性降低。图 4 为不同热处理制度下锻压 TA15 钛合金中初生 α 相、次生 α 相的相对体积分数。退火温度为 700 °C 时, 初生 α 相的相对体积分数为 70.35%, 次生 α 相的相对体积分数为 3.84%。退火温度为 820 °C 时, 初生 α 相的相对体积分数为 46.94%, 次生 α 相的相对体

积分数为 18.26%。随着退火温度的逐渐升高, 初生 α 相的含量逐渐降低, 次生 α 相的含量逐渐增加, 基体相的含量基本不变。

2.2 退火处理对锻压 TA15 钛合金力学性能的影响

2.2.1 室温力学性能测试

锻压 TA15 钛合金退火处理后, 室温条件下的力学性能如图 5 所示。图 5a 为锻压 TA15 钛合金抗拉强度的变化曲线, 随着退火温度的升高, 抗拉强度逐渐增大, 退火温度为 820 °C 时, 不同取样方向下的试样的抗拉强度均达到最大值, 其中纵向抗拉强度达到 986 MPa; 图 5b 为锻压 TA15 钛合金屈服强度的变化曲线, 总体来说, 随着退火温度的升高, 与抗拉强度的变化规律相似, 在 820 °C 时纵向屈服强度达到最大值 882 MPa; 图 5c、图 5d 分别为锻压 TA15 钛合金伸长率和断面收缩率的变化曲线,

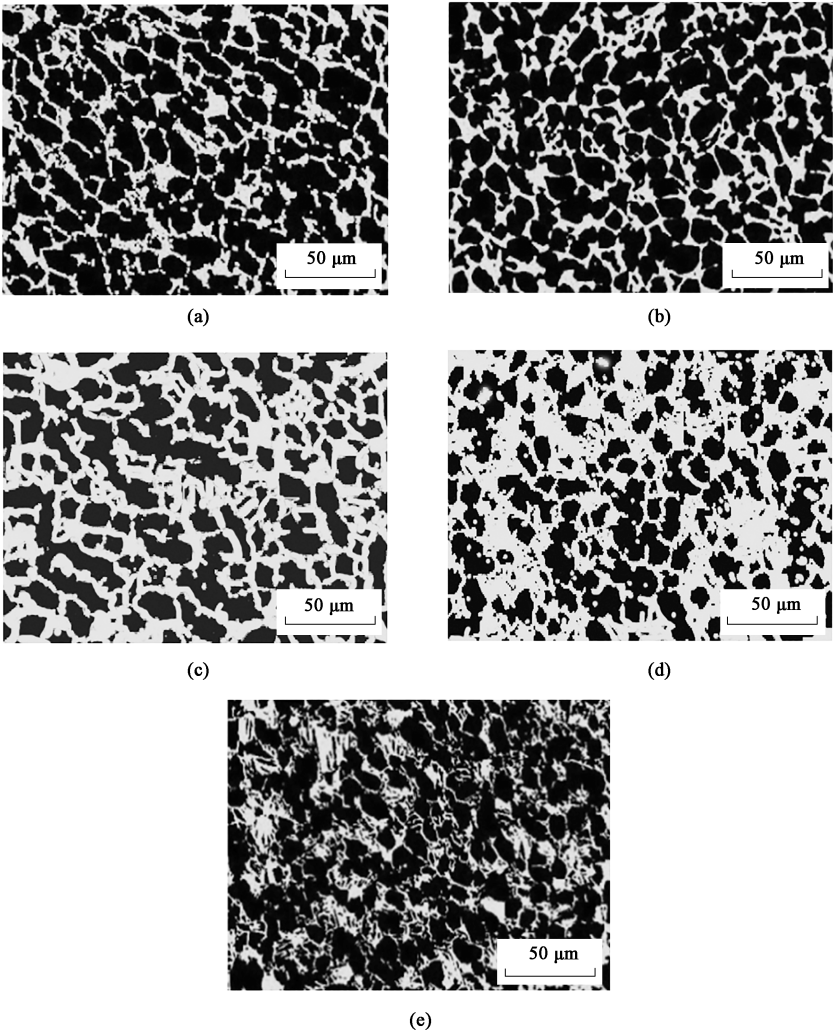


图 3 处理后的锻压 TA15 钛合金显微组织

(a) 700 °C × 2 h, AC (b) 730 °C × 2 h, AC (c) 760 °C × 2 h, AC (d) 790 °C × 2 h, AC (e) 820 °C × 2 h, AC

Fig. 3 Metallographic structures of forged TA15 titanium alloy after treatment

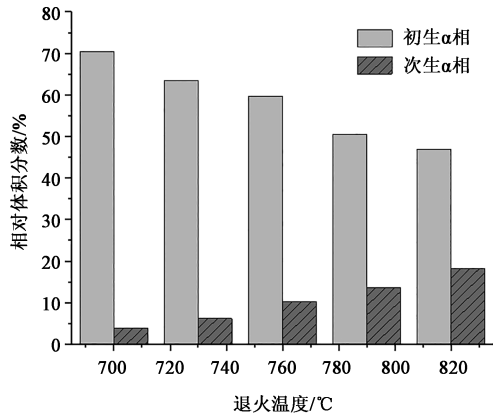


图 4 不同热处理制度下锻压 TA15 钛合金显微组织中初生 α 相、次生 α 相含量相对体积分数

Fig. 4 Relative volume fractions of primary and secondary α phases in microstructure of forged TA15 titanium alloy under different heat treatment systems

随退火温度的升高，相同取样方向的力学性能的变化趋势基本相同，820 °C 退火的样品，其纵向伸长率为 13.5%；图 5e 为锻压 TA15 钛合金冲击韧性的变化曲线，不同的取样方向，性能的变化规律也不同，随着退火温度的升高，横向取样时，冲击韧性呈“几”字形变化；纵向取样时，冲击韧性在 800 °C 时达到最大值后略有降低。

2. 2. 2 高温力学性能测试

锻压 TA15 钛合金退火处理后，高温（500 °C）力学性能如图 6 所示。图 6a 为锻压 TA15 钛合金抗拉强度的变化规律，横向抗拉强度在 820 °C 时达到最大值；图 6b 为锻压 TA15 钛合金伸长率的变化规律，随着退火温度的升高，横向伸长率在 760 °C 时达到最大值，纵向伸长率在 820 °C 时达到最大值；图 6c 为锻压 TA15 钛合金断面收缩率的变化规律，

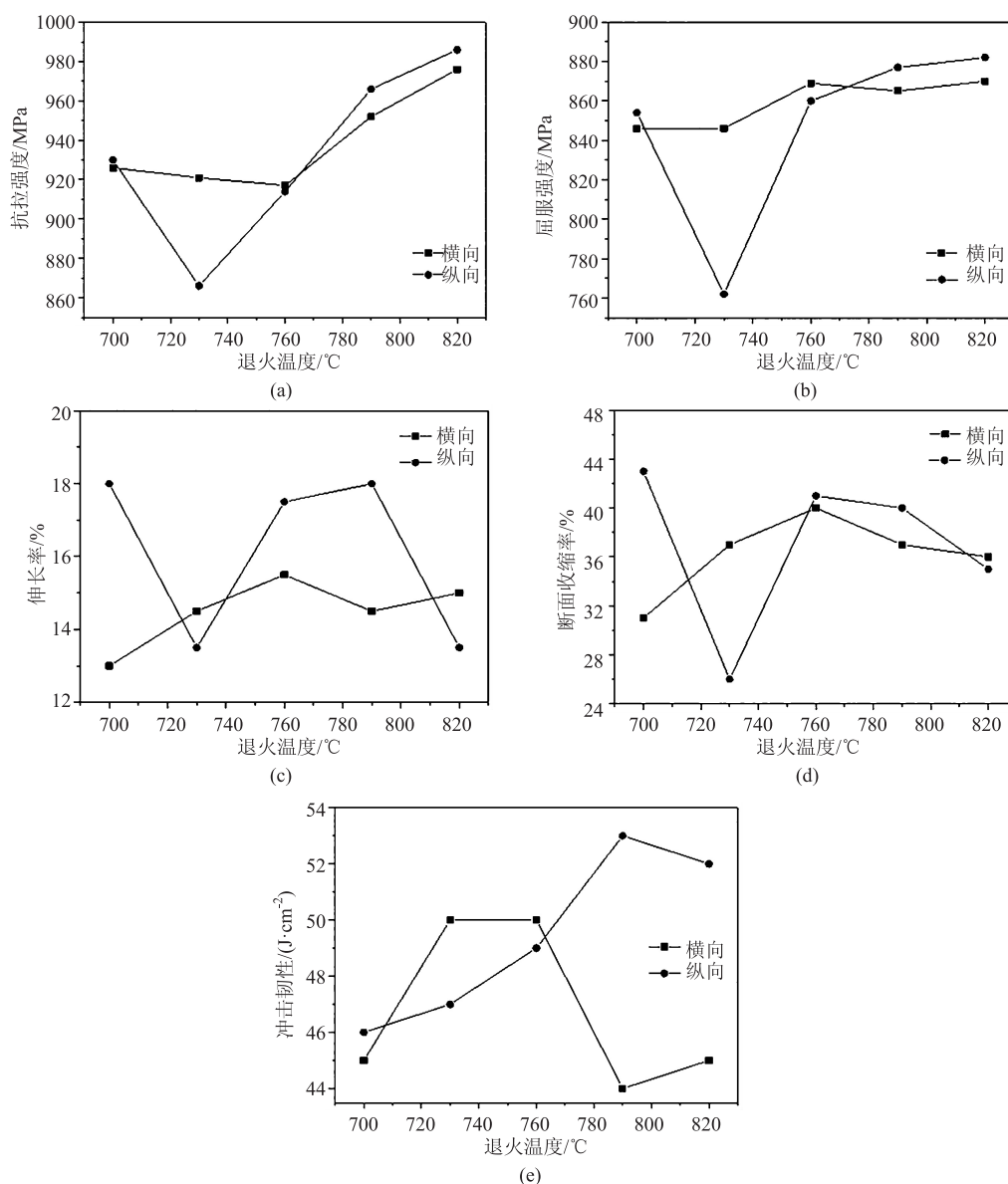


图5 不同温度下退火处理后锻压 TA15 钛合金室温时的力学性能

(a) 抗拉强度 (b) 屈服强度 (c) 伸长率 (d) 断面收缩率 (e) 冲击韧性

Fig. 5 Mechanical properties of forged TA15 titanium alloy at room temperature after annealing at different temperatures

(a) Tensile strength (b) Yield strength (c) Elongation (d) Reduction of area (e) Impact toughness

横向断面收缩率在 760 °C 时达到最大值 58%，纵向断面收缩率在 820 °C 时达到最大值 63%。

2.3 退火处理后锻压 TA15 钛合金的显微组织与力学性能的关系

由以上结果可以看出，锻压 TA15 钛合金的显微组织对热处理工艺参数十分敏感，采用不同的退火温度可以得到不同的显微组织，而合金的力学性能又取决于合金组织中各组成相的形态、相对体积分数和大小尺寸等因素。锻压 TA15 钛合金的显微组织在 700~820 °C 的退火温度范围内，金相组织主要包括初生 α 相、次生 α 相以及基体 β 相。随着退

火温度的逐渐升高，初生 α 相的含量减少，次生 α 相的含量增多，在 820 °C 时初生 α 相的含量最少，次生 α 相的含量最多，基体 β 相的含量基本没有变化。退火后锻压 TA15 钛合金的力学性能发生明显变化，随着退火温度的升高，锻压 TA15 钛合金的抗拉强度和屈服强度的变化趋势基本一致，在 820 °C 时达到最大值；伸长率、断面收缩率、冲击韧性随着退火温度的升高并未单调的下降，在不同的退火温度下也会出现最大值。这是因为：在双态组织中，随着初生等轴 α 相的减少， β 基体、次生片层 α 相的相界面增多，会使钛合金的强度提高，

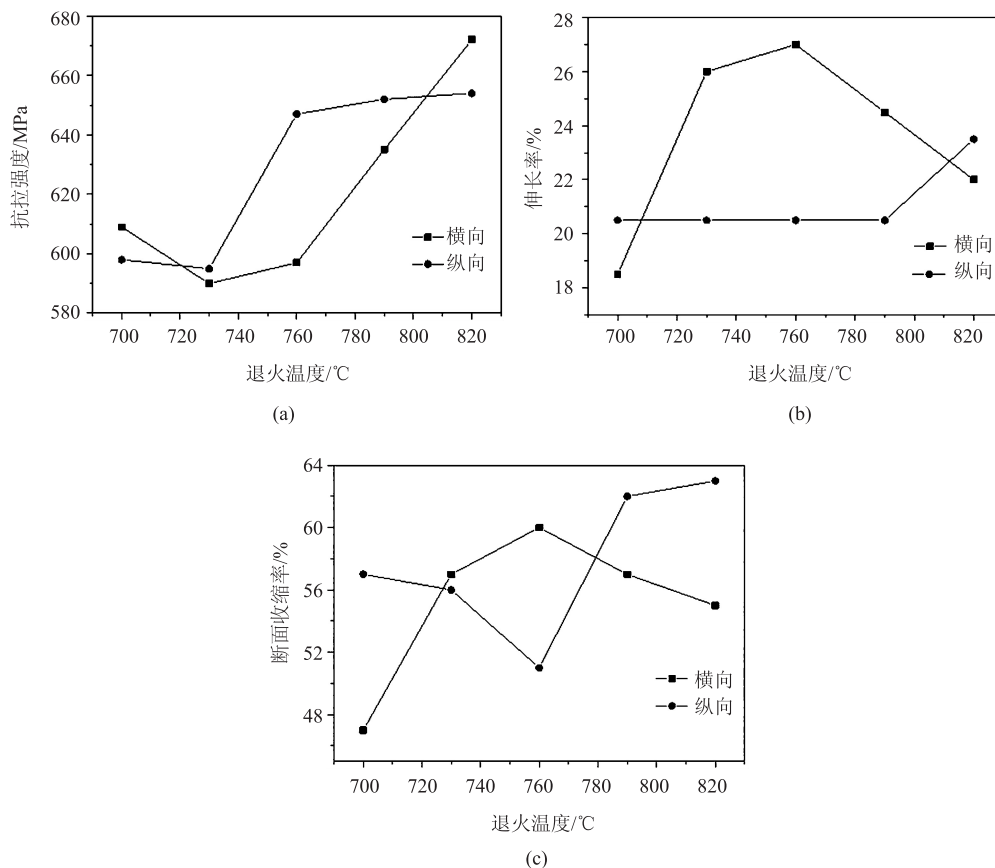


图 6 不同温度下退火处理后锻压 TA15 钛合金高温 (500 °C) 时的拉伸强度 (a)、伸长率 (b) 和断面收缩率 (c)

Fig. 6 Tensile strength (a), elongation (b) and reduction of area (c) of forged TA15 titanium alloy at high temperature (500 °C) after annealing at different temperatures

伸长率降低, 而 α 相和原始 β 相晶粒尺寸的减小有利于提高钛合金的塑性。锻压 TA15 钛合金在相变点温度以下进行热处理, 820 °C 时的组织和性能匹配最佳。

3 结论

(1) 锻压 TA15 钛合金在 700~820 °C 退火处理后, 显微组织中主要由初生等轴 α 相、基体 β 相以及次生片层状 α 相组成。

(2) 随着退火温度的升高, 初生 α 相的含量逐渐降低, 相对体积分数由 70.35% 降至 46.42%, 次生 α 相的相对体积分数由 3.84% 升高至 18.26%。

(3) 锻压 TA15 钛合金的力学性能与取样方向有关, 室温和高温 (500 °C) 条件下的力学性能受不同热处理制度的影响较大。且随着退火温度的升高, 锻压 TA15 钛合金强度先降低后升高, 塑性先增高后降低。

(4) 对比不同热处理温度下样品的室温和高温

(500 °C) 条件下的拉伸性能, 在 820 °C 退火的样品, 其抗拉强度最高为 986 MPa, 伸长率为 13.5%, 强度和塑性匹配较好。

参考文献:

- [1] 陈国琳, 吴鹏炜, 王自东. 钛合金的发展现状及应用前景 [J]. 舰船科学技术, 2009, 31 (12): 110-113.
Chen G L, Wu P W, Wang Z D. The development prospect and current status of titanium alloys [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31 (12): 110-113.
- [2] Qian G L, Song X Y, Ye W J, et al. Effects of ultrasonic impact treatment on the residual stress and microstructure of TA15 welded joint [J]. Materials Science Forum, 2017, 898 (13): 1056-1062.
- [3] 隋楠, 曹京霞, 黄旭, 等. 合金成分对 TA15 钛合金组织及力学性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2019, 39 (1): 48-54.
Sui N, Cao J X, Huang X, et al. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39 (1): 48-54.
- [4] 史莹莹, 刘钊, 陈峰, 等. $\Phi 1040$ mm 规格 TA15 钛合金铸锭生产工艺研究 [J]. 世界有色金属, 2018, 16 (23): 9-12.
Shi Y Y, Liu Z, Chen F, et al. Preparation technology research

- of $\Phi 1040$ mm TA15 titanium alloy ingot [J]. World Nonferrous Metals, 2018, 16 (23): 9-12.
- [5] 梁培新, 朱卫东, 杨刚, 等. 渗氢工艺对 TA15 钛合金氢含量和显微组织的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 190-194.
- Liang P X, Zhu W D, Yang G, et al. Influence of hydrogen permeation process on hydrogen content and microstructure of TA15 titanium alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 190-194.
- [6] 侯艳荣, 赖运金, 杜予晖, 等. 热处理对 TA15 钛合金棒材冲击性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (2): 182-183.
- Hou Y R, Lai Y J, Du Y X, et al. Effect of heat treatment process on impact property of TA15 alloy [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (2): 182-183.
- [7] 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.
- Lu K K, Zhou L P, Duan Q H, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy bars [J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35 (4): 35-39.
- [8] 卢凯凯, 周立鹏, 李敏娜, 等. 强韧化热处理对 TA15 钛合金组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (1): 44-49.
- Lu K K, Zhou L P, Li M N, et al. Effect of strengthening and toughening heat treatment on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (1): 44-49.
- [9] 刘航, 李伟, 张镜斌. TA15 钛合金双重热处理三态组织中的片层 α 尺寸研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (14): 142-145, 149.
- Liu H, Li W, Zhang J B. Study on size of lamellar α in tri-modal microstructure of TA15 Ti-alloy during dual heat treatment [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (14): 142-145, 149.
- [10] 檀雯, 都海刚, 杨军, 等. TA15 钛合金厚板热轧变形规律研究 [J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41 (4): 17-23.
- Tan W, Du H G, Yang J, et al. Study on deformation mechanisms of TA15 titanium alloy plate during hot rolling [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2020, 41 (4): 17-23.
- [11] 纪小虎, 李萍, 时迎宾, 等. TA15 钛合金等温多向锻造晶粒细化机理与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (11): 2515-2523.
- Ji X H, Li P, Shi Y B, et al. Grain refinement mechanism and mechanical properties of TA15 alloy during multi-directional isothermal forging [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (11): 2515-2523.
- [12] 李建伟, 刘浏, 邹宗树. 不同等温锻 TA15 钛合金试验件的组织与力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (1): 151-157.
- Li J W, Liu L, Zou Z S. Study of microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy test parts with different isothermal forging processes [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (1): 151-157.
- [13] 谢英杰, 付文杰, 王蕊宁, 等. 热处理对 TA15 钛合金中厚板材组织及力学性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2013, 30 (6): 26-29.
- Xie Y J, Fu W J, Wang R N, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TA15 plates [J]. Titanium Industry Progress, 2013, 30 (6): 26-29.
- [14] 尤中源, 刘文言, 陈荣, 等. α 相含量对新型亚稳 β 钛合金动态力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (7): 891-896.
- You Z Y, Liu W Y, Chen R, et al. Dynamic mechanical properties of new type of metastable titanium alloy with different α phase content [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (7): 891-896.
- [15] ASTM E8/E8M—2011, 金属材料拉伸试验方法 [S].
- ASTM E8/E8M—2011, Standard test methods for tension testing of metallic materials [S].
- [16] GB/T 229—2020, 金属材料夏比摆锤冲击试验方法 [S].
- GB/T 229—2020, Metallic materials Charpy pendulum impact test method [S].

(上接第 162 页)

- Li Y T, Qi H P, Fu J H, et al. Theoretical and process analysis on the cast-blank rolling forming of 42CrMo bearing rings [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (2): 77-85.
- [9] Li L Y, Yang H, Guo L G, et al. A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205 (1-3): 99-110.
- [10] Han X H, Hua L. Plastic deformation behaviors and mechanical properties of rolled rings of 20CrMnTi alloy in combined radial and axial ring rolling [J]. Materials & Design, 2014, (58): 508-517.
- [11] 郭良刚, 王凤琪, 梁磊, 等. 高性能环件辗轧成形智能仿真优化新思路与研究进展 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (4): 1-11.
- Guo L G, Wang F Q, Liang L, et al. New idea and advances in intelligent simulation and optimization of high-performance ring rolling process [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (4): 1-11.
- [12] Wang C, Boogaard T V D, Omperspahic E, et al. Influence of feed rate on damage development in hot ring rolling [J]. Procedia Engineering, 2014, (81): 292-297.
- [13] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- Shi Y P, Zhou Y R. Detailed Explanation of ABAQUS Finite Element Analysis Example [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.