

冷却方式对 BT25y 钛合金显微组织和拉伸性能的影响

张 潇¹, 陈立佳¹, 赵子博², 刘建荣², 王清江²

(1. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 采用金相(OM)、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、透射电镜(TEM)等技术研究了固溶处理后的冷却方式对 BT25y 钛合金显微组织和拉伸性能的影响。结果表明, 950 °C 固溶处理后空冷得到的组织由 α 相与 β 转变组织组成, 水淬与油淬组织主要由等轴 α 相、针状 α' 相与羽毛状 α'' 马氏体相组成; 与油淬相比, 水淬得到的 α'' 相的晶格常数 a 值减小, b 值增大。经时效处理后, 固溶后空冷组织的相组成没有变化, 油淬与水淬组织中的马氏体相分解为稳定的 α 相与 β 相。室温拉伸结果表明: 相对于空冷组织, 油淬与水淬组织的屈服强度与抗拉强度明显升高, 而延伸率明显低于空冷组织, 该现象与原始 β 晶粒内析出的次生 α 相的弥散程度及界面密度有关。

关键词: BT25y 钛合金; 冷却方式; 相组成; 拉伸性能

中图分类号: TG166.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)01-0321-05

高温钛合金具有高比强度, 良好的热强性及抗氧化性, 广泛应用于航空发动机及航天高温结构件。半个多世纪以来, 世界各国均对高温钛合金的研发给予相当的重视。从美国研制的第一款高温钛合金 Ti-6Al-4V 起, 经过半个多世纪的发展, 使用温度已从最初的 300~350 °C 发展到目前的 600 °C。高温钛合金以近 α 与 $\alpha+\beta$ 型钛合金为主, 目前美国, 英国, 俄罗斯以及中国均研制出了综合性能优异的高温钛合金。目前国外先进航空发动机上高温钛合金的用量通常占发动机总重量的 1/4~1/3, 高温钛合金在航空发动机上应用的增加是高温钛合金发展的结果^[1-4]。

BT25y 是前苏联在 BT25 合金基础上调整 Al, Zr 和 Mo 的含量研制的一种 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-W-Si 系 $\alpha+\beta$ 型热强钛合金, 可在 550 °C 下长期服役^[5,6]。对于 BT25y 合金国外报道较少, 国内学者报道多集中于对其热稳定性^[7-9]与热处理温度对合金影响^[10,11]的研究。张翥^[7]等人的研究表明, BT25y 钛合金在 500~550 °C 长时间热暴露后仍具有较高的强度并且具有较好的塑性, BT25y 合金在此温度范围内具有良好的热稳定性; 王永^[11]等人的研究表明, BT25y 在二重与三重热处理后具有良好的拉伸性能。然而目前对于深入研究冷却方式对该合金组织和性能的影响鲜有见报。

通过改变冷却方式而改变冷却速率, 对于不同钛合金组织与性能的影响有较多的报道^[12-14]。孙峰^[12]等人研究表明, 在快速冷却的情况下 Ti60 合金中的 β 相完全转变为 α' 相, 而较低的冷却速度合金中的 β 相则完全转变为 α 相; Xu Lei^[13]等人的研究表明, 随冷却速度的升高 Ti-6Al-4V 合金强度上升而延展性却变化较小, 无论在油冷与水冷后时效均得到细小的组织, 然而这些组织中包含有亚稳的 β 相。

固溶处理后的冷却方式对钛合金的微观组织有显著影响^[14], 因此可通过改变冷却方式调控组织而改善钛合金性能^[15]。加入时效处理后, 亚稳相最终分解成稳态相, 稳态相形貌及尺寸也会对合金性能产生重要影响。本实验研究 BT25y 合金固溶处理后的冷却方式及加入时效处理对显微组织及拉伸性能的影响, 对 BT25y 合金显微组织与力学性能的关系进行分析讨论。

1 实 验

实验所用 BT25y 合金的名义成分为 Ti-6.5Al-4.0Mo-4.0Zr-2.0Sn-1.0W-0.2Si (质量分数, %), 铸锭采用 3 次真空自耗熔炼, 经 β 单相区开坯、 $\alpha+\beta$ 两相区的锻造、轧制, 得到直径为 20 mm 的棒材。利用金相法测得其相变点为 980 °C。采用表 1 热处理制度,

收稿日期: 2017-01-07

作者简介: 张 潇, 男, 1989 年生, 硕士生, 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870, 电话: 024-23978846, E-mail: seabreeze2010@hotmail.com

表 1 BT25y 钛合金热处理制度
Table 1 Heat treatments for BT25y alloy

No.	Heat treatment
1	950 °C, 1 h, AC
2	950 °C, 1 h, OQ
3	950 °C, 1 h, WQ
4	950 °C, 1 h, AC+550 °C, 6 h, AC
5	950 °C, 1 h, OQ+550 °C, 6 h, AC
6	950 °C, 1 h, WQ+550 °C, 6 h, AC

研究固溶后冷却方式对合金显微组织和拉伸性能影响。

试样经机械研磨、抛光与腐蚀后, 采用 Axiovert 200 MAT 金相显微镜(OM)与 S-3400N 扫描电子显微镜(SEM)观察显微组织。采用 D8 Discover X 射线衍射仪进行物相分析, 衍射条件为 Cu K α 辐射, 管电压 40 kV, 管电流 100 mA, 扫描速度为 5°/min。利用 Tecnai G² F30 透射电镜(TEM)观察分析马氏体相, 样品机械研磨至 0.05 mm 后双喷处理, 双喷液成分: 6%高氯酸, 35%正丁醇和 59%甲醇(体积分数)。采用直径为 5 mm、长 60 mm 的棒状拉伸试样在 Zwick Z050 电子拉伸试验机上进行室温拉伸试验。

2 结果与讨论

2.1 冷却方式对 BT25y 合金显微组织的影响

棒材纵剖面 and 横截面的锻态显微组织如图 1 所示。纵剖面显微组织(图 1a)由粗大拉长的 α 相、细碎的 α 相以及少量 β 相组成, 而横截面显微组织(图 1b)主要由等轴 α 相、细碎的 α 相以及少量 β 相组成。950 °C 固溶处理后不同冷却方式得到的显微组织如图 2 所示, 可见, 固溶处理后初生 α 相体积分数减少, 细碎 α 相消失。这是因为粗大的 α 相是棒材在热变形前在 $\alpha+\beta$ 两相区保温过程中遗留并且随热变形而沿棒材轴向拉长的初生 α 相, 其晶内 Al 当量相对较高; 而细碎 α 相是棒材在 $\alpha+\beta$ 两相区热变形过程中, 随棒材实际变形温度逐渐的降低, 析出的次生 α 相发生破碎产生的, 其晶内 Al 当量相对较低, 因此在 $\alpha+\beta$ 两相区固溶时最先发生 $\alpha\rightarrow\beta$ 转变。

图 2 为 950 °C, 1 h, AC 固溶后空冷得到的双态组织, 等轴初生 α 相含量约 14%, 比较均匀地镶嵌在原始 β 晶界上, 原始 β 晶粒内部为由 α 片层和片层间 β 相组成的 β 转变组织; 经 SEM 局部放大后(图 2a 左上角), 可以看到片层 α 相呈现长短、大小不同的两种状态: 在由交错排列的粗大片层 α 相围成的“网格”内部, 存在更细小的、长宽比较小的 α 相, 形成由粗大次生 α 片层集束和细小网篮状次生 α 片层组成的一种“混合组织”。这是因为 $\beta\rightarrow\alpha$ 转变是不连续析出的过程: 初期, 次生 α 相优先在初生 α 相或晶间 α 相与原始 β 相交界处形核, 因温度较高, 元素扩散较快, 易形成粗大的次生 α 相集束; 随着冷却过程温度的逐渐降低, 次生 α 相的体积分数逐渐增加, β 稳定元素在 β 基体内富集, 元素扩散速率也降低, 此时 α 相可在 β 基体内部粗大次生 α 相集束间形核, 形成细小的网篮状次生 α 相。金相条件下,

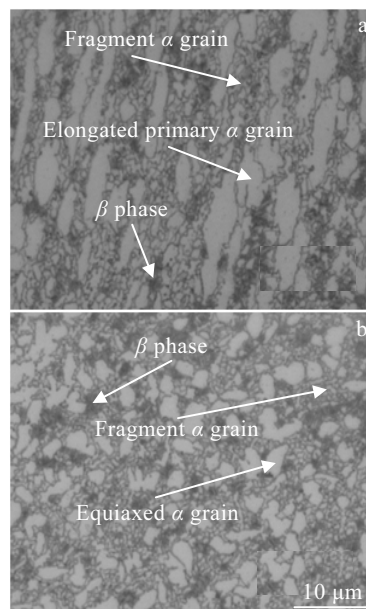


图 1 BT25y 棒材的锻态显微组织

Fig.1 Microstructures of as-forged BT25y bars in longitudinal (a) and cross (b) sections

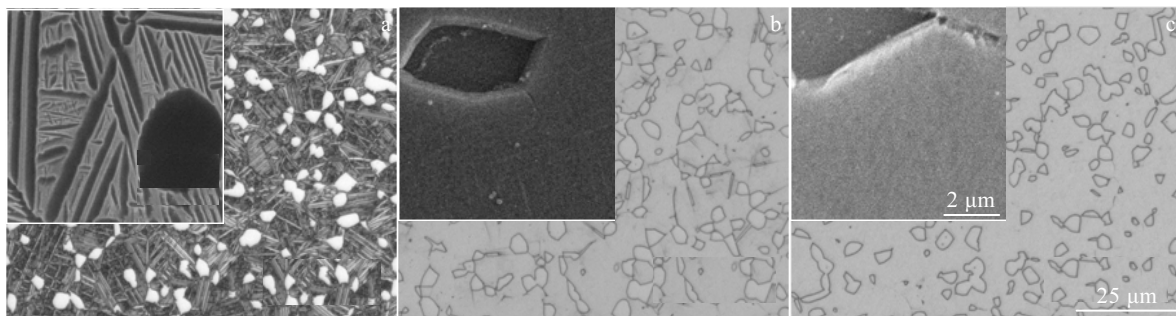


图 2 BT25y 棒材不同热处理制度的显微组织

Fig.2 Microstructures of BT25y bars at heat treatments of No.1 (a), No.2 (b), and No.3 (c)

油淬和水淬组织 β 基体内未发现析出相。

利用 XRD 分析了合金不同冷却方式后的相组成与晶格常数, 见图 3。可见, 空冷组织主要由 α 相与 β 相组成, 油淬与水淬组织主要由 α , α' 和 α'' 相组成。张岷等^[16]修正的 Ti- β 稳定元素二元系亚稳相图中存在 $\alpha+\alpha'+\alpha''$ 相区。淬火条件下 β 相变时, 如果 α' 和 α'' 马氏体相自由能曲线相交, β 相可同时转变为两种马氏体^[17,18]。采用 TEM 对油淬和水淬组织原始 β 晶粒内的析出相进行了观察, 两种组织原始 β 晶粒内均存在大量的针状 α' 相, 见图 4, 同时存在少量羽毛状 α'' 相分布于 α' 马氏体片间, 见图 5。本研究中羽毛状 α'' 相的出现可能缘于局部成分起伏。

通过 Maud 拟合并计算, 得到油淬后 α'' 的晶格常数 $a=0.30005$, $b=0.49702$ nm, $c=0.46523$ nm; 水淬后 α'' 相的晶格常数为 $a=0.29867$ nm, $b=0.50010$ nm, $c=0.46449$ nm。可见, 与油淬相比, 水淬后 α'' 相的晶格常数 a 值减小而 b 值增大, 这与 XRD 图谱中峰的移动相吻合。在 XRD 图谱中, 油淬 α'' 相的(020)峰相对水淬右移, d 值减小; (200)峰左移, d 值增大。根据正交晶系的晶面间距计算公式也可确定油淬样品中

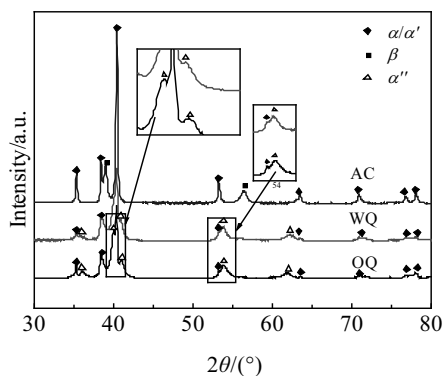


图3 BT25y 棒材固溶处理后不同冷却方式的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of BT25y bars corresponding to different cooling methods after solution treatment

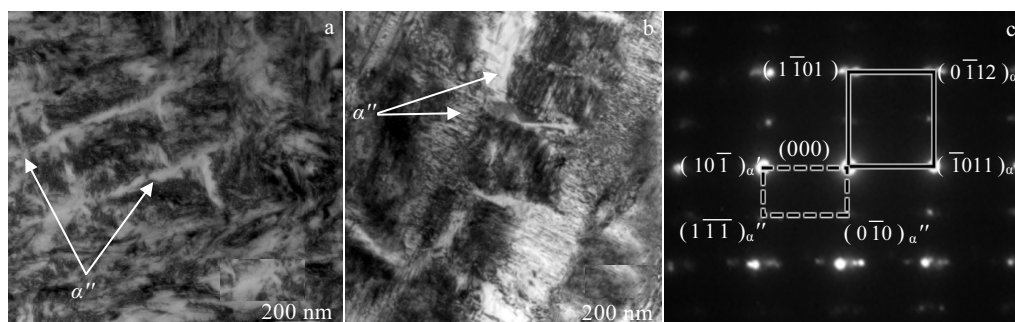


图5 α'' 相形貌与衍射斑

Fig.5 Morphologies of α'' after 950 °C, 1 h, OQ (a) and after 950 °C, 1 h, WQ (b) and SAED pattern (c) of α'' after 950 °C, 1 h, WQ

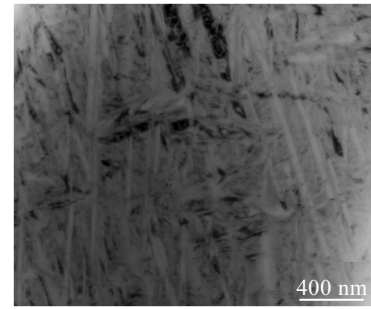


图4 油淬后棒材的 TEM 照片

Fig.4 TEM image of microstructure of BT25y bar after 950 °C, 1 h, OQ

α'' 相的 b 值较小, a 值较大。

固溶热处理后经 550 °C, 6 h, AC 时效的显微组织见图 6。图 6a 为空冷后时效组织, 等轴 α 相的尺寸与数量与时效前相比 (图 2a) 未见差别, 粗大片层 α 相尺寸和形态也没有明显变化而细小片层 α 相尺寸有所增加; 油淬和空冷组织中, 等轴 α 相的尺寸略有增加, 数量略有减少; 原始 β 晶粒内析出细小的次生 α 相。XRD 结果 (图 7) 表明, 时效热处理后, 油淬和水淬过程中产生的 α'' 马氏体相消失, 相组成均为 α 相和少量 β 相。马氏体相是在快速冷却条件下由无扩散相变所形成的亚稳相, 在热力学上不稳定, 在 300 °C 以上 α' 与 α'' 相即可发生分解反应, 最终形成稳定的 α 相与 β 相^[19,20]。

2.2 室温拉伸性能

图 8 为不同热处理条件下 BT25y 合金棒材的室温拉伸性能。空冷后时效的 BT25y 棒材, 其屈服和抗拉强度分别可达 1066 和 1234.5 MPa, 延伸率为 16%; 同样时效条件下, 油淬与水淬后棒材的屈服与抗拉强度与空冷相比均有较大幅度的提升, 屈服和抗拉强度可分别达 1330.5, 1519.5 和 1407.5, 1616 MPa, 但延伸率与空冷相比有大幅度下降, 分别为 6.5% 和 5.75%。

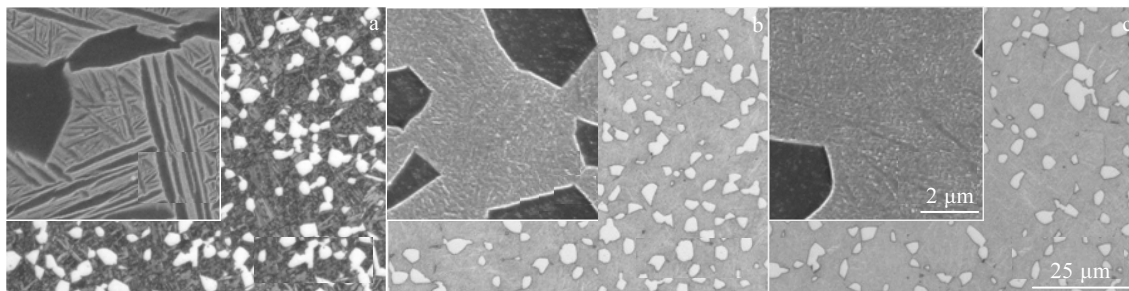


图 6 BT25y 棒材不同热处理制度的显微组织

Fig.6 Microstructures BT25y bars at heat treatments of No.4 (a), No.5 (b), and No.6 (c)

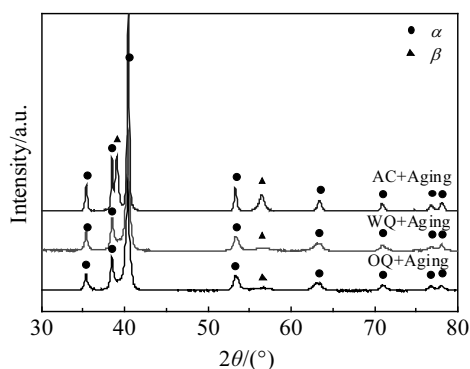


图 7 BT25y 棒材不同热处理后的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of BT25y bars after solution treatments and aging treatments (550 °C, 6 h, AC)

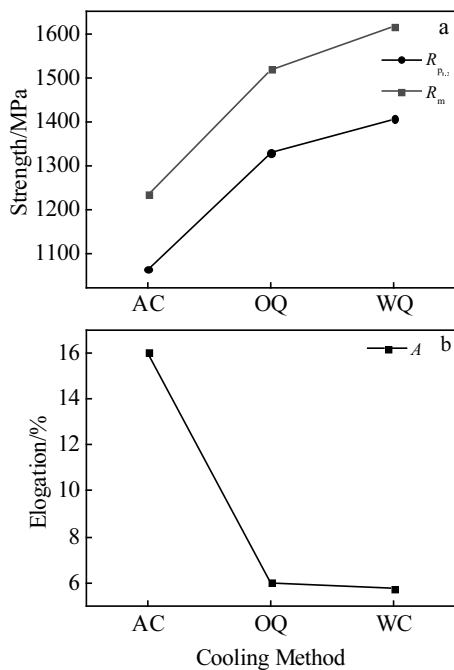


图 8 不同固溶冷却方式后 BT25y 棒材室温拉伸性能

Fig.8 Room temperature tensile strength (a) and elongation (b) of BT25y alloy bars after different cooling methods (after aging treatment of 550 °C, 6 h, AC)

在快冷条件下, 原始 β 相以无扩散的切变方式转变成淬火马氏体 α' 和少量 α'' 相, 时效处理后分解成为细小针状 α 相, 使得最终组织中只留有 α 与 β 相^[21], 因此影响组织性能的因素主要为两相的尺寸与含量^[22]。由于油淬与水淬后次生 α 相非常细小, 相比于粗片层, 细小的片层组织具有高密度的相界, 位错穿过较细的片层组织界面时需要更多的能量, 变形会更难发生, 因此具有细小片层组织的棒材具有更高的强度^[23]。由于粗大次生 α 相的 α/β 相界面密度低, 同时由于空冷时冷却较慢, α 相倾向于沿着初生 α 相边界析出, 初生 α 相的尺寸较油淬和水淬粗化, 导致塑性高于水淬与油淬样品^[24]。水淬冷却速度大于油淬, 得到更为细小的二次 α 相, 因此其强度略高于、塑性略低于油淬棒材。

3 结 论

1) 经过 950 °C/1 h 固溶处理的 BT25y 合金, 空冷后所得到的组织为由 α 和 β 相组成的双态组织; 水淬与油淬组织主要由 α 相、 α' 相和 α'' 相构成。经过 550 °C, 6 h 时效处理后, 均得到由 α 和 β 相组成的双相组织。

2) 与油淬相比, 水淬后得到的 α' 相的晶格常数 a 值减小, b 值增大。

3) 室温拉伸强度变化趋势为水淬最高, 油淬次之, 空冷最低; 但油淬与水淬后棒材的室温塑性显著低于空冷, 该现象与原始 β 晶粒内析出的次生 α 相的弥散程度及界面密度有关。

参考文献 References

- [1] Huang Xu(黄旭), Li Zhenxi(李臻熙), Huang Hao(黄浩). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2011(06): 21
- [2] Wang Qingjiang(王清江), Liu Jianrong(刘建荣), Yang Rui(杨锐). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2014(04): 1

- [3] Xu Guodong(许国栋), Wang Feng'e(王凤娥). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2008, 32(06): 774
- [4] Huang Xu(黄 旭), Li Zhenxi(李臻熙), Gao Fan(高 帆) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2014(07): 70
- [5] Han Ruxu(韩如旭). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2012(02): 32
- [6] Wei Shouyong(魏寿庸), Wang Qingjiang(王青江), He Yu(何 瑜) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2013(04): 9
- [7] Zhang Zhu(张 翥), Yu Yang(于 洋), Hui Songxiao(惠松晓). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2008, 32(06): 758
- [8] Lu Gang(路 纲), Zhang Zhu(张 翥), Hui Songxiao(惠松晓). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(S): 206
- [9] Hui Songxiao(惠松晓), Yu Yang(于 洋), Zhang Zhu(张 翥) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(S3): 95
- [10] Yang Huili(杨慧丽), Wei Shouyong(魏寿庸), He Shulin(何书林) *et al. Rare Metals Letters*(稀有金属快报)[J], 2007(7): 39
- [11] Wang Yong(王 永), Lu Bin(卢 斌), Zhang Jun(张 钧). *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2009, 34(4): 64
- [12] Sun Feng(孙 峰), Li Jinshan(李金山), Kou Hongchao(寇宏超) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(4): 848
- [13] Xu Lei, Guo Ruipeng, Bai Chunguang *et al. J Mater Sci Technol*, 2014, 30(12): 1289
- [14] Haghighi S E, Lu H B, Jian G Y *et al. Materials & Design*[J], 2015, 76: 4
- [15] Wang Z, Cai H, Hui S. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 640: 253
- [16] Zhang Min(张 岷), Yang Yi(杨 义), Li Changfu(李长富) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2008(01): 68
- [17] Peng P W, Ou K L, Chao C Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 490(1-2): 661
- [18] Li Changfu(李长福). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[M]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, 2011
- [19] Wang G, Hui S, Ye W *et al. Rare Met*[J], 2012, 31(6): 531
- [20] Deng Anhua(邓安华). *Shanghai Nonferrous Metals*(上海有色金属)[J], 1999(04): 193
- [21] Zeng Weidong(曾卫东), Zhou Yigang(周义刚). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(12): 1273
- [22] Song Miao(宋 淼), Ma Yingjie(马英杰), Wu Jun(邬 军) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 565
- [23] Zhang W J, Song X Y, Hui S X, Ye W J *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2014, 595: 159
- [24] Wang Guo(王 国), Hui Songxiao(惠松晓), Ye Wenjun(叶文君) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(11): 3015

Influence of Cooling Method on Microstructure and Tensile Properties of BT25y Titanium Alloy

Zhang Xiao¹, Chen Lijia¹, Zhao Zibo², Liu Jianrong², Wang Qingjiang²

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The effect of cooling method on microstructure and tensile properties of BT25y titanium alloy were studied using OM, SEM, XRD, and TEM. The results indicate that the microstructure of the air-cooled specimen consists of α and β transformed phase, while in oil- and water-quenched microstructure, α , α' and α'' martensite phase are found. Lattice parameters of α'' phase obtained by XRD analysis show that a is shorter, b is longer in water-quenched microstructure than in oil-quenched one. After aging treatment at 550 °C/6 h followed by air cooling, the phase component is the same with its unaged counterpart in air-cooled condition; martensite phase is decomposed into stable α and β phase in oil- and water-quenched conditions. Room temperature tensile properties after aging treatment were tested. Compared with the air-cooled sample, tensile and yield strength of the sample after oil and water quenching are much higher, accompanied with much lower elongation. The phenomenon is thought to be related to the shape and size of secondary α phase.

Key words: BT25y titanium alloy; cooling method; phase component; tensile properties