

热处理对 TB9 合金力学性能及显微组织的影响

王 健¹, 黄鏊杰², 金 伟¹

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(2. 西部超导材料有限公司, 陕西 西安 710016)

摘 要: TB9 合金属于亚稳型 β 钛合金, 热处理强化效果明显, 抗腐蚀性强。本文研究了固溶处理、固溶+时效处理对 TB9 合金力学性能和显微组织的影响, 结果表明: 经过 800~900 °C 固溶处理后, TB9 合金强度随固溶温度提高逐渐下降, 塑性变化不明显; 超过 820 °C 固溶处理时, β 晶粒尺寸迅速长大; 800~900 °C 固溶处理后对时效态 TB9 合金强度影响不明显; 塑性随固溶温度上升明显下降, 延伸率从 15% 降低到 10%, 面缩率从 37.5% 下降到 20% 以下; 经过 820 °C /30 min、WQ+520 °C/8 h、AC 固溶时效处理后 α 相充分析出, 合金性能稳定。

关键词: TB9 合金; 热处理; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-129-05

TB9 钛合金 (名义成分 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr), 属于亚稳型 β 钛合金, 固溶处理后将体心立方的 β 相保留至室温, 因而具有良好的冷热加工性。该合金热处理强化明显, 抗腐蚀性强, 目前国外已经将 TB9 钛合金用于航空弹簧^[1]、天然气和石油钻井管道、紧固件^[2,3]等领域。通过固溶处理和时效处理相结合的热处理工艺可以使 TB9 合金获得良好的综合性能。本实验通过研究固溶处理、固溶时效处理对 TB9 合金显微组织及力学性能的影响, 以期为该合金的实际应用提供参考。

1 实 验

合金经 3 次真空自耗炉熔炼成铸锭, 对铸锭在 β 相区开坯、锻造、轧制后得到 $\Phi 13$ mm 的棒材。轧棒组织如图 1 所示, 由金相法测定合金相变温度在 740~750 °C 之间。采用 ZEISS Axiovert 200MAT 金相显微镜对 TB9 合金进行组织观察, 采用 D/Max-2500PC 型 X 射线衍射仪对 TB9 合金进行相组成分析。拉伸性能试验在 Shimadzu AG-100KN 电子万能拉伸试验机上进行。

图 1 显示, 合金轧制后具有很明显的加工态组织特征, 原始 β 晶粒被破碎、晶界发生畸变、断裂和相互缠绕, 晶粒已较难分辨而模糊不清; 原始 β 晶粒沿轧制方向被拉长, 晶界平直。

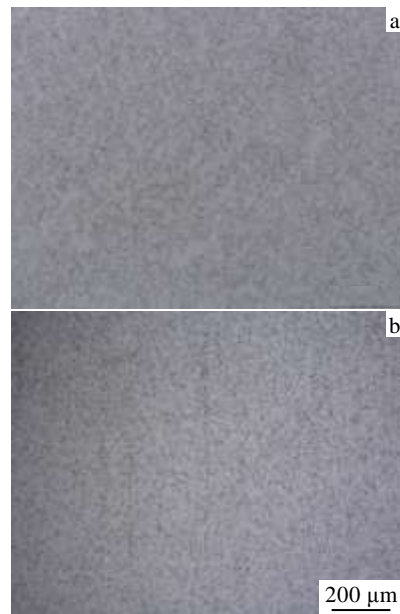


图 1 轧态 TB9 合金金相组织照片

Fig.1 Metallographic structure of as-rolled TB9 alloy:
(a) transverse and (b) longitudinal

2 结果与讨论

2.1 固溶制度对 TB9 合金力学性能和组织的影响
为研究固溶温度及时间对 TB9 合金力学性能及显

收稿日期: 2016-12-16

作者简介: 王 健, 男, 1976 年生, 硕士, 高级工程师, 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-23971956, E-mail: jianw@imr.ac.cn

微组织的影响，在相变点以上选取不同温度和时间对 TB9 合金进行固溶处理，固溶处理工艺如表 1。

经过不同固溶温度及时间处理后，TB9 合金室温拉伸性能和显微组织变化见图 2、图 3。可以看到，经过 800~900 °C/30 min、WQ 固溶处理后，合金抗拉强度随固溶温度提高呈下降趋势，由 944 MPa 降至 906 MPa。固溶温度升高过程中，抗拉强度出现两个明显下降的温度点，即 820 和 880 °C。而塑性受固溶温度影响较小，变化不明显，延伸率在保持在 25% 和 60% 附近。与 820 °C/30 min 固溶处理相比，延长固溶时间至 60 和 120 min 后，合金强度和塑性均略有下降。

观察固溶处理后显微组织发现，合金固溶处理过程中由于发生了再结晶，无畸变的等轴 β 晶粒取代了轧态的变形晶粒，前期热加工过程中由于变形不均匀、冷却速度不同等原因造成的组织不均匀现象得到明显

改善，晶粒尺寸分布较为均匀。

借助金相分析软件分析 TB9 合金经过不同固溶温度和时间处理后的平均晶粒尺寸，结果如图 4 所示。固溶温度在 800~820 °C 之间，晶粒长大缓慢，小于 25 μm ；固溶温度超过 820 °C 后晶粒迅速长大，900 °C 时已经达到 70 μm 。因此 TB9 合金在 820 °C 以上固溶处理时，晶粒尺寸对温度非常敏感；而 820 °C 固溶时间超过 30 min 后晶粒尺寸同样迅速长大，所以 TB9 合金固溶处理时为避免晶粒尺寸过于长大，温度不宜超过 820 °C，时间应低于 30 min。

2.2 固溶制度对时效态 TB9 合金力学性能和组织的影响

为研究不同固溶制度处理后时效对 TB9 合金力学

表 1 TB9 合金的固溶处理工艺

Table 1 Solution-treating processes of TB9 alloy	
Code	Solution-treating process
1	800 °C/30 min, WQ
2	820 °C/30 min, WQ
3	840 °C/30 min, WQ
4	860 °C/30 min, WQ
5	880 °C/30 min, WQ
6	900 °C/30 min, WQ
7	820 °C/60 min, WQ
8	820 °C/120 min, WQ

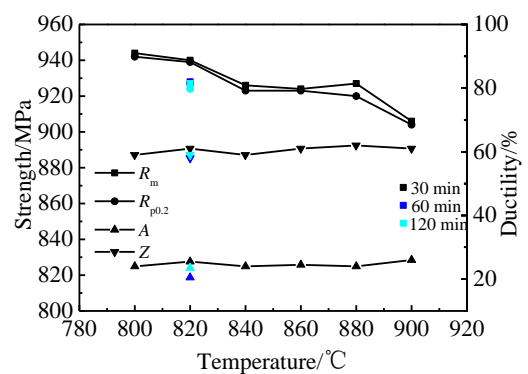


图 2 TB9 合金固溶处理后的室温拉伸性能

Fig.2 Room temperature tensile properties of solution treated TB9 alloy

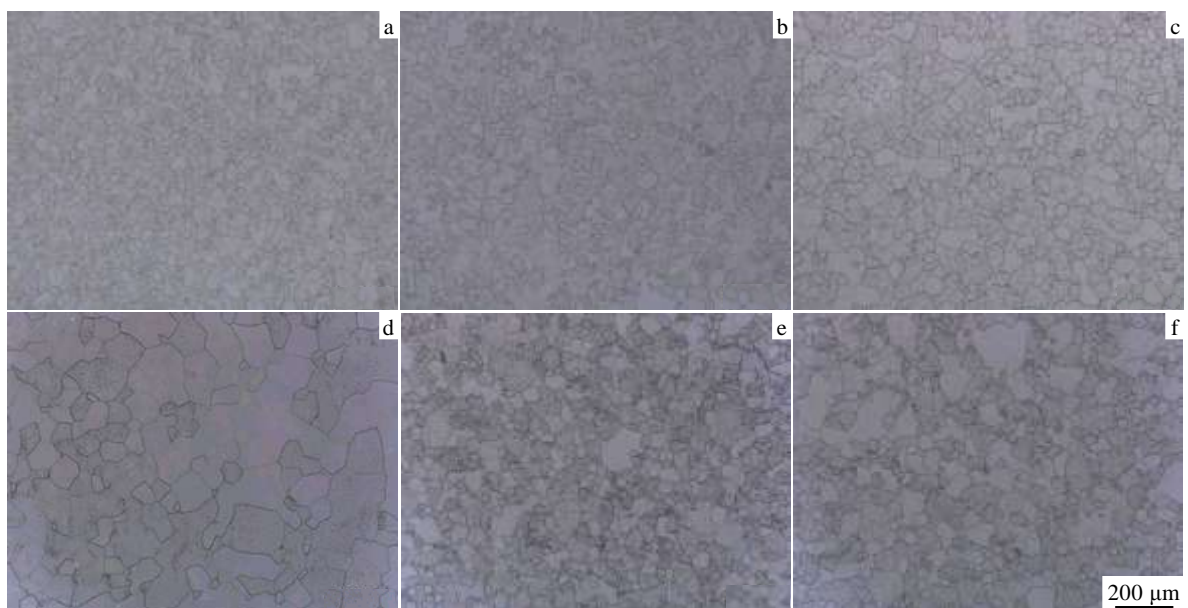


图 3 不同固溶处理后的 TB9 合金金相组织照片

Fig.3 Metallographic structure of TB9 alloy after different solution treatments: (a) 800 °C/30 min, WQ; (b) 820 °C/30 min, WQ; (c) 840 °C/30 min, WQ; (d) 900 °C/30 min, WQ; (e) 820 °C/60 min, WQ; (f) 820 °C/120 min, WQ

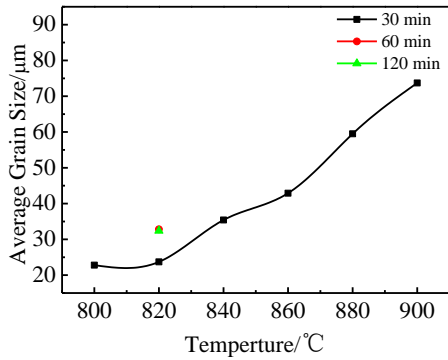


图 4 TB9 合金经不同固溶处理后的平均晶粒尺寸

Fig.4 Average grain size of TB9 alloy after different solution treatments

性能和显微组织的影响，在 800~900 °C 范围内，每 20 °C 取一个温度点做 30 min 固溶处理（在 820 °C 增加 60 和 120 min 两个时间点），随后在 540 °C 时效 8 h，空冷。合金室温拉伸性能如图 5 所示。

由图可知，固溶温度不超过 840 °C 时，时效态 TB9 合金抗拉强度随固溶温度上升略有增加；固溶温度超过 840 °C 后强度变化不明显；而固溶温度对时效态 TB9 合金塑性有显著影响，固溶温度上升，塑性恶化，延伸率从 15% 降低到接近 10%，面缩率从 37.5% 下降到 20% 以下。

固溶时间对时效态 TB9 合金拉伸性能的影响见图 6，可以看到固溶时间低于 60 min 时，随固溶时间增加，强度略有上升，塑性略有下降；固溶时间超过 60 min 后强度和塑性基本保持不变。

图 7 是 TB9 合金固溶+时效处理后的显微组织。固溶温度不超过 820 °C，合金晶粒尺寸较小（图 7a、

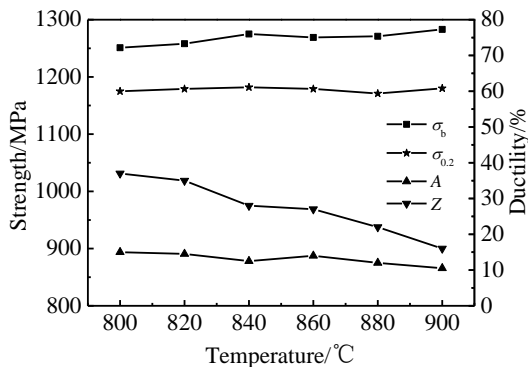


图 5 不同温度固溶处理后经 540 °C/8 h、AC 时效 TB9 合金的室温拉伸性能

Fig.5 Room temperature tensile properties of TB9 alloy after solution treatments at different temperatures and aging at 540 °C for 8 h

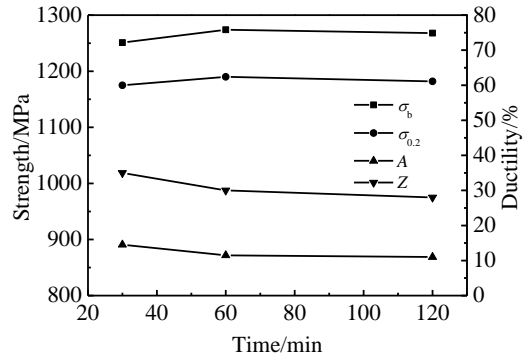


图 6 820 °C 不同时间固溶处理后经 540 °C/8 h、AC 时效的 TB9 合金室温拉伸性能

Fig.6 Room temperature tensile properties of TB9 alloy solution treated for different time at 820 °C and aged at 540 °C for 8 h

7b)，存在大量小于 10 μm 的小尺寸晶粒。900 °C/30 min 固溶处理后（图 7d），晶粒尺寸显著增大，小尺寸晶粒基本消失。与图 7b 相比，固溶时间超过 30 min 后，晶粒明显长大（图 7e、7f），同样影响到时效态晶粒尺寸进而影响 TB9 合金力学性能。时效过程中， α 相会在晶界析出形成晶界 α 相 (α_{GB})， α_{GB} 是一种软相，对强度影响不大，但是变形过程中容易在 α_{GB} 片层内先滑动^[4,5]。当晶界 α 相为连续的长片状时，易发生长距离滑移，导致开裂；所以 β 晶粒尺寸越大，塑性越差。因此固溶温度升高、固溶时间延长，时效态 TB9 合金强度变化不明显，塑性显著下降。

2.3 时效温度对 TB9 合金力学性能和组织的影响

对 TB9 合金做 820 °C/30 min、WQ 固溶处理后，在 440~580 °C 每隔 20 °C 为一个温度点，进行 8 h，空冷时效处理，研究时效温度对力学性能及显微组织的影响，室温拉伸性能结果如图 8 所示。可以看出在 440~580 °C 之间，随时效温度升高，合金强度先升后降，塑性则先降后升，在 460 °C 时分别达到最大值和最小值。抗拉强度最大值为 1438 MPa，最小值在 580 °C 出现，为 1135 MPa，两者相差 303 MPa，而延伸率从 460 °C 的 6.8% 升高到 580 °C 的 17.3%，这说明 TB9 合金的力学性能对时效温度非常敏感。固溶处理后可以调整时效处理温度来实现强度和塑性的良好匹配。

时效态 TB9 合金显微组织如图 9 所示，460 °C 时效处理后，晶界处存在明显的无 α 相析出带，这可能是时效温度较低时，晶内形核驱动力大， α 相首先在晶内形核析出，晶界附近形核相对较慢，因此出现明显的无 α 相析出带。随着时效温度的升高，与晶界相比，晶内的形核优势降低， α 相在晶界处析出量增加，

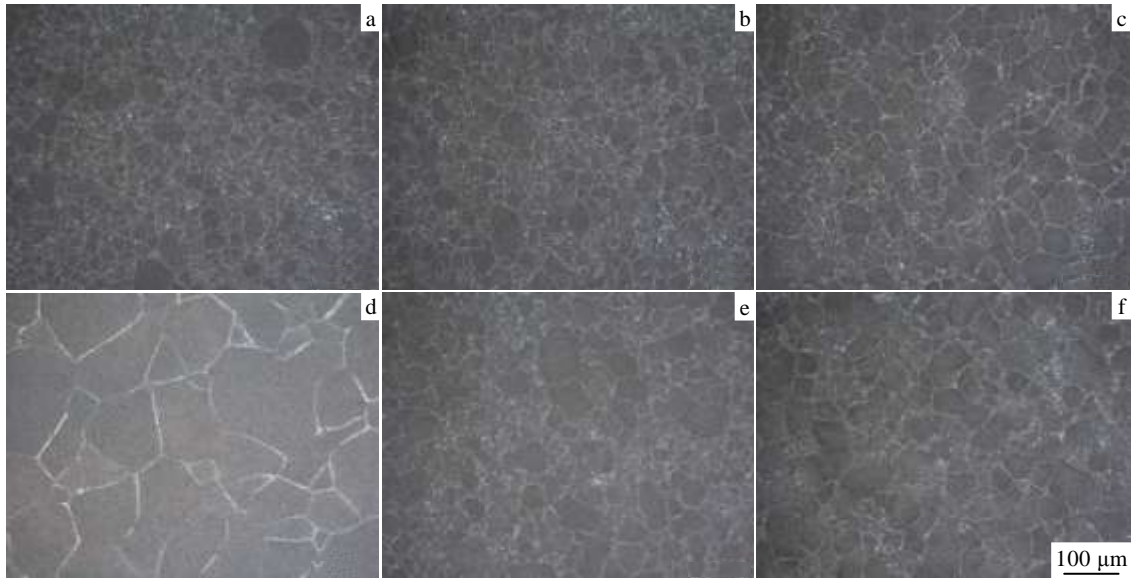


图 7 不同固溶处理后经 540 °C/8 h、AC 时效的 TB9 合金金相组织

Fig.7 Metallographic structure of TB9 alloy after different solution treatments followed by aging at 540 °C for 8 h and air cooling: (a) 800 °C/30 min, WQ+540 °C/8 h, AC; (b) 820 °C/30 min, WQ+540 °C/8 h, AC; (c) 840 °C/30 min, WQ+540 °C/8 h, AC; (d) 900 °C/30 min, WQ+540 °C/8 h, AC; (e) 820 °C/60 min, WQ+540 °C/8 h, AC; (f) 820 °C/120 min, WQ+540 °C/8 h, AC

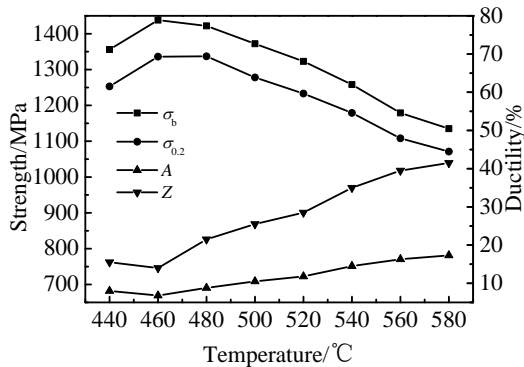


图 8 不同时效温度对 TB9 合金室温拉伸性能的影响

Fig.8 Room temperature tensile properties of TB9 alloy aged at different temperatures for 8 h after solution treatment at 820 °C for 30 min and water quenching

因此晶界无 α 相析出带逐渐模糊。

2.4 时效时间对 TB9 合金力学性能和组织的影响

时间是时效处理工艺中的另一个重要参数，直接影响第二相的析出量，进而影响合金的力学性能。图 10 是 520 °C 不同时效时间处理后 TB9 合金的室温拉伸性能。由图可知，时效时间少于 1 h，合金强度与固溶态相当，而面缩率急剧降低，从固溶态的 60% 降至 37.5%。时效时间超过 1 h 后强度随时效时间的增加迅速升高，塑性下降趋势变缓。时效时间超过 8 h 后 TB9 合金的强度和塑性趋于稳定，说明 α 相已经充分析出，

含量不随时间的延长而进一步增加；这也从后面 X 射线衍射分析结果得到了证实。

TB9 合金经 520 °C 不同时间时效处理后的 X 射线衍射分析结果显示。时效时间小于 1 h，在 X 射线衍射图谱中未检测到 α 相的存在。进一步延长时效时间， α 相峰逐渐明显。时效时间达到 8 h 后 α 相已经充分析

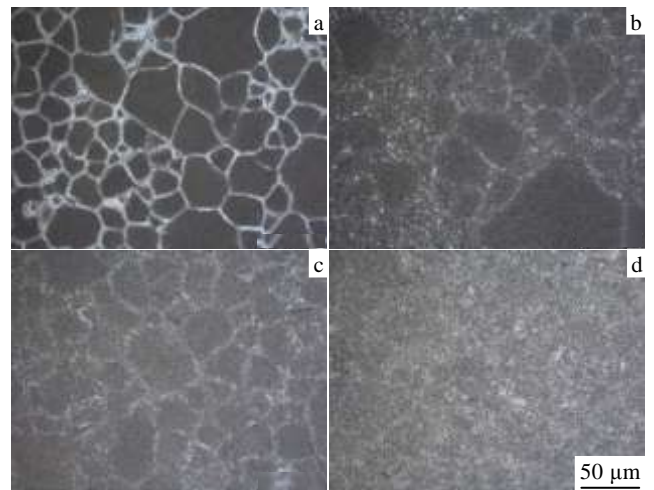


图 9 820 °C/30 min, WQ 固溶后不同温度时效 8 h 的 TB9 合金显微组织

Fig.9 Microstructure of TB9 alloy followed by aging at different temperatures for 8 h after solution treatment at 820 °C for 30 min and water quenching: (a) 460 °C, (b) 500 °C, (c) 540 °C, and (d) 580 °C

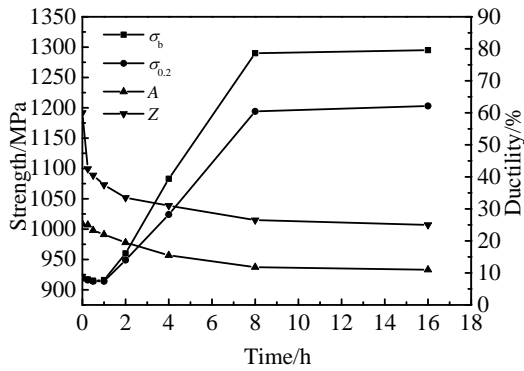


图 10 经 820 °C/30 min, WQ 固溶后 520 °C 时效不同时间的 TB9 合金室温拉伸性能

Fig.10 Room temperature tensile properties of TB9 alloy aged at 520 °C for different time followed by solution treatment at 820 °C for 30 min and water quenching

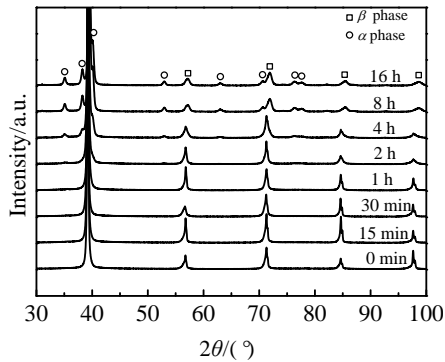


图 11 TB9 合金在 520 °C 经不同时间时效的 XRD 谱图

Fig.11 XRD patterns of TB9 alloy aged at 520 °C for different time

出, 时效时间继续增加, α 相峰基本没有变化。

3 结 论

1) 经过 800~900 °C/30 min、WQ 固溶处理后, TB9 合金强度随固溶温度提高呈下降趋势, 塑性变化不明显。820 °C 以上固溶处理时, 晶粒尺寸对温度非常敏感, 所以为了避免晶粒尺寸过于长大, 固溶温度不宜超过 820 °C。

2) 800~900 °C 固溶处理后对时效态 TB9 合金强度影响不明显; 而塑性随固溶温度上升呈明显下降趋势, 延伸率从 15% 降至 10% 附近, 面缩率从 37.5% 下降至 20% 以下。

3) 820 °C/30 min、WQ 固溶处理后, 时效温度在 440~580 °C 之间, TB9 合金强度峰值出现 460 °C 附近, 此时对应的塑性最低; 520 °C 时效时间超过 8 h 后, α 相充分析出, 合金性能趋于稳定。

参考文献 References

- [1] Boyer R, Welsch G, Collings E W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*[M]. America: ASM International, 1994: 797
- [2] Russo P A, Wood J R, Bhagot R B *et al.* In: Koss D A eds. *Beta Titanium Alloys in the 1990's*[C], Warrendale: TMS, 1993: 361
- [3] Dunlap D C, Schutz R W. In: Koss D A eds. *Beta Titanium Alloys in the 1990's*[C], Warrendale: TMS, 1993: 347
- [4] Bhattacharjee A, Joshi V A, Gogia A K. *Titanium'99: Science and Technology*[C], 2000: 529
- [5] Kawabe Y, Muneki S. In: Koss D A eds. *Beta Titanium Alloys in the 1990's*[C], Warrendale: TMS, 1993: 187

Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of TB9 Alloy

Wang Jian¹, Huang Liujie², Jin Wei¹

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

(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd, Xi'an 710016, China)

Abstract: TB9 alloy has superior strength effect through heat treatment and high corrosion resistance as metastable β titanium alloy. The effects of solution treatment and solution followed by aging treatment on mechanical properties and microstructure of TB9 alloy were studied. The results indicate that the strength gradually decreases and the change of ductility is not obvious after solution treatment between 800 and 900 °C. The β grain size quickly increases with the solution treatment above 820 °C. The influence of solution treatment on strength of aged TB9 alloy is not distinct between 800 and 900 °C, while the ductility obviously drops with the solution treatment temperature increasing, the elongation declines from 15% to 10% and the reduction in area decreases from 37.5% to below 20%. The α phase adequately precipitates and the mechanical properties are steady after solution and aging treatment (820 °C/30 min, WQ+520 °C/8 h, AC)

Key words: TB9 alloy; heat treatment; mechanical properties; microstructure

Corresponding author: Wang Jian, Master, Senior Engineer, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-23971956, E-mail: jianw@imr.ac.cn