

化学成分及热处理工艺对 TA5 合金棒材力学性能的影响

王 媛,董 健,谢 力,赵民权

(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心,辽宁 抚顺 113001)

摘要:研究了化学成分和热处理工艺对 TA5 合金棒材力学性能的影响。结果表明,增加铝、氧、氮元素的含量,提高铝强度当量,TA5 合金棒材强度显著提高,塑性略有降低。在 700~800 ℃范围内升高退火温度,TA5 合金棒材的强度降低,塑性升高;在 740~780 ℃退火时,其强度和塑性匹配最佳。与空冷相比,采用炉冷+空冷的冷却方式时,TA5 合金棒材的强度降低,塑性显著升高。

关键词:TA5 合金棒材;化学成分;热处理;力学性能

中图分类号:TG166.5 文献标识码:A

Effect of Chemical Composition and Heat Treatment Process on Mechanical Properties of TA5 Alloy Bars

WANG Yuan, DONG Jian, XIE Li, ZHAO Minquan

(Technical Center, Fushun Special Steel Co. Ltd., Fushun 113001, China)

Abstract: The effects of chemical composition and heat treatment process on mechanical properties of TA5 alloy bars were investigated. The results showed that the strength of TA5 alloy bars increased obviously while the plasticity declined slightly by increasing the content of aluminum, oxygen and nitrogen elements to enhance aluminum equivalence. With increase of annealing temperature between 700 ℃ and 800 ℃, the strength declined and the plasticity rose. The strength and plasticity of TA5 alloy bars could best match when heat treatment temperature was between 740 ℃ and 780 ℃. Compared with air cooling, the strength of TA5 alloy bars declined and the plasticity rose evidently when combination of furnace cooling and then air cooling was adopted.

Keywords: TA5 alloy bars; chemical composition; heat treatment; mechanical properties

船舶与海洋工程材料要求耐海水、海洋大气的腐蚀,比强度高,塑韧性及加工工艺性好。钛质轻,具有高的比强度和耐蚀性,对盐水或海水和海洋大气环境的侵蚀有免疫能力,是优质轻型结构材料,被称为“海洋金属”,是重要的战略金属材料。钛在船舶与海洋工程中具有广泛的用途,适于做轻型海工装备,是海洋工程领域的新型关键材料之一。TA5 合金是一种全 α 型钛合金,含有 4% 铝、0.005% 硼,具有中等强度,塑性较差,焊接性能和耐海水腐蚀性能优良,可制作

成板材、棒材和锻件,是海水环境下的理想结构材料。该合金广泛应用于舰船等耐海水条件下的各类机械部件,也应用于各类兵器制造^[1~3]。

TA5 合金棒材的主要技术指标包括化学成分、力学性能、表面质量等。由于该合金强度中等,塑性较差,很容易造成棒材力学性能不稳定,达不到标准要求。目前,国内关于 TA5 合金板材和锻造棒材的研究报道较多,但很少有关于该合金轧制棒材的工艺及组织性能的研究报道。本研究通过研究 TA5 合金中铝、氧、氮元素的含

收稿日期:2020-06-05

作者简介:王媛,女,1983 年生,硕士,高级工程师,主要从事钛及钛合金研究。E-mail:wangyuan_4925@163.com

量的变化及研究其热处理工艺,分析该合金轧制棒材力学性能的变化规律,以期对今后 TA5 合金轧制棒材的化学成分及热处理工艺的选择提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

试验采用三次真空自耗熔炼的 TA5 合金 $\phi 610$ mm 铸锭,铸锭的化学成分满足 GB/T 3620.1—2007 要求。用金相法测定该合金的相变点为 980~1 010 °C。铸锭经 3 150 t 快锻机 β 单相区开坯和 1 800 t 径锻机 $\alpha+\beta$ 两相区开坯

表 1 TA5 合金棒材的化学成分
Table 1 Chemical compositions of TA5 alloy bars (w)

合金	Al	B	Fe	C	H	O	N	%
1	4.01	0.004	0.20	0.016	0.000 2	0.105	0.009 0	
	4.02	0.004	0.20	0.015				
2	4.28	0.004	0.20	0.015	0.000 3	0.118	0.009 0	
	4.29	0.004	0.19	0.016				
3	4.30	0.004	0.19	0.016	0.000 7	0.115	0.013 0	
	4.30	0.004	0.20	0.016				

表 2 不同化学成分的 TA5 合金棒材力学性能

Table 2 Mechanical properties of TA5 alloy bars with different chemical compositions

合金	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
1	709	611	20.5	47
2	749	664	18.5	45
3	762	675	17.0	44

2.2 化学成分对 TA5 合金棒材力学性能的影响

TA5 合金是一种全 α 型合金,含有大量的 α 稳定元素,包含主元素铝、硼和杂质元素氧、氮、碳,均能固溶于 α 钛中,对合金产生固溶强化的作用。当合金中铝、氧、氮、碳含量(质量分数)分别在 7%、0.15%、0.05%、0.1% 以下时,随着其含量的增加,合金的强度提高,而塑性无明显降低。从表 1 和表 2 可知,合金 2 与合金 1 相比,铝、氧含量增加,合金强度显著升高,升高了 40~50 MPa,塑性稍有降低。铝是最重要的固溶强化元素,与钛形成替代式固溶体使合金强化;而氧是间隙元素,与钛形成间隙固溶体,能够使固溶体的晶格发生畸变,阻止滑移面上位错的运动,从

后,再经 500 轧机在 $\alpha+\beta$ 两相区轧制成 $\phi 26$ mm 棒材。不同化学成分的棒材经热处理后进行室温力学性能测试和纵向显微组织观察,分析化学成分及热处理工艺对 TA5 合金棒材力学性能的影响。

2 结果与分析

2.1 TA5 合金棒材的化学成分和力学性能

TA5 合金棒材的化学成分如表 1 所示。不同化学成分的棒材经 740 °C \times 1.5 h、空冷热处理后,棒材的力学性能如表 2 所示。

而使合金显著强化。因此,合金 2 的强度明显高于合金 1 的。合金 3 与合金 2 比较,氮含量增加 40×10^{-6} ,氧含量降低 30×10^{-6} 。氮的强化机理与氧相同,即与钛形成间隙固溶体。文献资料显示^[4],氮含量每增加 100×10^{-6} ,室温强度便提高 20~25 MPa;而氧含量每增加 100×10^{-6} ,室温强度可提高 10 MPa 左右,通过对比,氮元素的强化作用明显大于氧元素的,因此,合金 3 比合金 2 强度有所提高,塑性略有降低。

钛合金中合金元素对力学性能的影响主要通过对铝、钼当量的影体现。而对于全 α 型 TA5 合金的力学性能是由铝当量决定的。铝当量的计算见式(1), $[Al]_{eq}$ 、 $[Mo]_{eq}$ 与室温拉伸强度关系见式(2)。

$$[Al]_{eq} = w(Al) + w(Sn)/3 + w(Zr)/6 + 10(w(O) + 8w(N) + w(C)) \quad (1)$$

$$R_m = 235 + 60[Al]_{eq} + 50[Mo]_{eq} \quad (2)$$

根据式(1)和(2)可知,合金 1、合金 2、合金 3 的铝当量分别为 5.40、5.79、5.81,铝当量高,合金强度也就越高。另外从再结晶角度分析,铝当

量的提高会使合金的再结晶温度升高,因此铝当量越高,同一退火及冷却过程中越容易获得细小的再结晶晶粒,合金强度越高,塑性不发生明显降低^[5]。

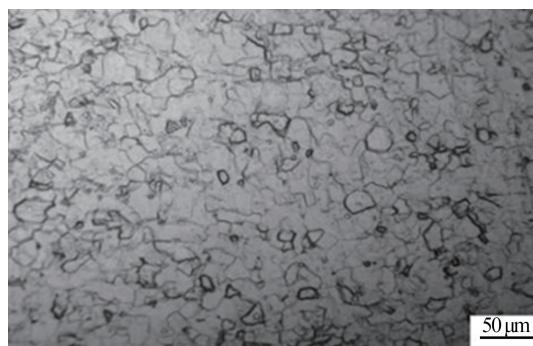
2.2 退火温度对TA5合金棒材力学性能的影响

合金3经不同工艺热处理后的力学性能如表3所示,纵向显微组织如图1所示。

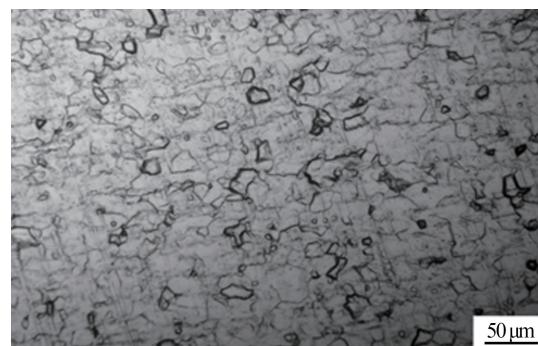
表3 不同热处理工艺的TA5合金棒材力学性能

Table 3 Mechanical properties of TA5 alloy bars of different heat treatment processes

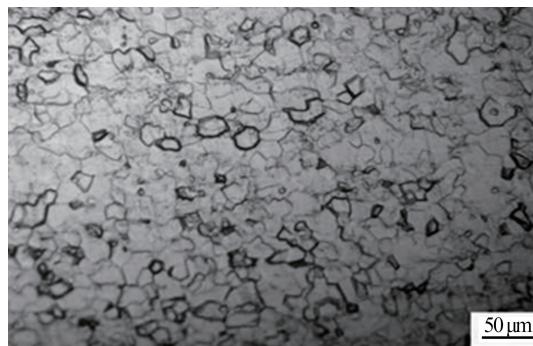
工艺编号	退火工艺	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
1	700 °C×1.5 h, 空冷	777	683	17.5	42
2	720 °C×1.5 h, 空冷	762	666	18.0	43
3	740 °C×1.5 h, 空冷	754	652	19.5	45
4	760 °C×1.5 h, 空冷	746	644	20.5	46
5	780 °C×1.5 h, 空冷	735	638	21.0	47
6	780 °C×1.5 h, 炉冷到670 °C, 空冷	702	603	24.5	54
7	800 °C×1.5 h, 空冷	713	622	22.0	49



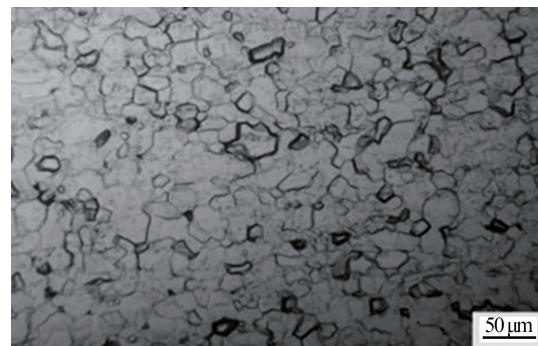
(a) 700 °C×1.5 h, AC



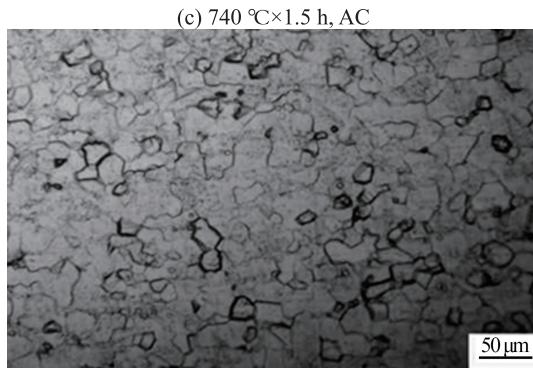
(b) 720 °C×1.5 h, AC



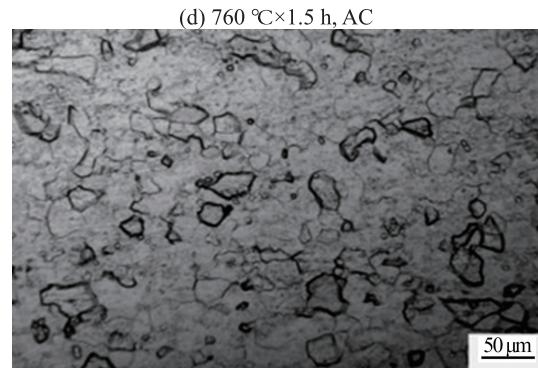
(c) 740 °C×1.5 h, AC



(d) 760 °C×1.5 h, AC



(e) 780 °C×1.5 h, AC



(f) 780 °C×1.5 h, FC to 670 °C, At

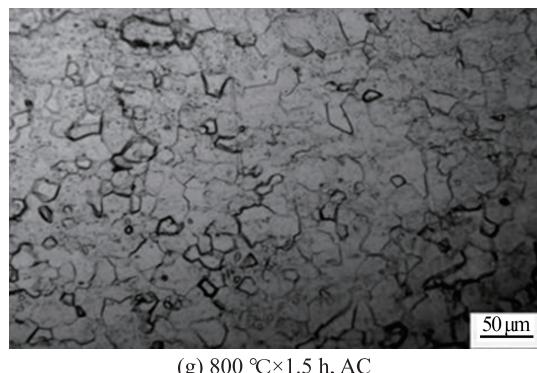


图 1 不同热处理工艺的 TA5 合金棒材显微组织

Fig. 1 Microstructures of TA5 alloy bars by different heat treatment processes

由表 3 可知,在 700~800 °C 范围内升高退火温度,其强度降低而塑性升高;退火温度超过 780 °C 时,其拉伸强度和屈服强度均有较明显的下降趋势;但在整个温度范围内,棒材的拉伸强度均超过 700 MPa,屈服强度均超过 600 MPa,伸长率大于 15%,断面收缩率大于 40%。退火温度在 740~780 °C 时,TA5 合金棒材的强度和塑性匹配最佳。

TA5 合金棒材的力学性能的变化归根结底是由显微组织决定的。由图 1 可知,在 700~800 °C 范围内,随着退火温度的升高,α 相逐渐球化长大。退火温度升高到 740 °C 时,显微组织由杂乱的多边形组织转变为均匀的等轴组织,并且 α 相刚刚开始出现长大趋势;退火温度升高到 760 °C 时,组织进一步均匀球化,α 相并未发生明显粗化长大;退火温度继续升高到 780 °C 时,α 相长大趋势仍然不是很明显;当退火温度达到 800 °C 时,形成较粗大的等轴 α 组织。通过以上分析可知,700~800 °C 范围内升高退火温度可使 α 相逐渐长大,并进一步均匀等轴化,组织中的残余应力逐渐得到释放,使得棒材的强度降低,塑性升高;740~780 °C 退火时,棒材已经形成均匀的等轴组织,并且 α 相未发生明显粗化长大,因此强度和塑性匹配最佳。

2.2 冷却方式对 TA5 合金棒材力学性能的影响

TA5 合金棒材分别采用表 3 中工艺 5 和工艺 6 进行热处理。不同冷却方式下力学性能的变化见表 3。工艺 6 与工艺 5 相比,冷却速度降低,使得棒材强度降低,塑性明显升高。这是由于在缓慢冷却过程中,显微组织中的 α 相进一步球化长大,并且长大趋势明显,如图 1(e)、(f) 所

示,因此,降低冷却速度,可使棒材强度降低,塑性明显升高^[6]。

3 结论

(1) 通过增加 TA5 合金中铝、氧、氮元素的含量,来提高铝强度当量,使其棒材的强度明显升高,塑性略有降低。

(2) 在 700~800 °C 范围内升高退火温度,TA5 合金棒材的强度降低,塑性升高;而在 740~780 °C 退火时,棒材已经形成均匀的等轴组织,并且 α 相未发生明显粗化长大,因此强度和塑性匹配最佳。

(3) 与空冷相比,TA5 合金棒材采用炉冷+空冷的冷却方式时,冷却速度降低,α 相明显球化长大,因此,棒材强度降低,塑性显著升高。

参考文献:

- [1] 稀有金属材料加工手册编写组. 稀有金属材料加工手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 471-479.
- [2] 孙建科. 我国船用钛合金研究、应用与发展 [J]. 金属学报, 2002, 38(9): 33-36.
- [3] 沈立华, 朱宝辉, 马超, 等. 热处理工艺对 TA5 钛合金棒材显微组织及性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2014, 31(2): 20-23.
- [4] 吴英彦, 罗月新, 闵新华. 氧、氮等杂质元素对 TC11 钛合金的影响及控制 [J]. 上海钢研, 2006(3): 12-14.
- [5] 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: 48-50.
- [6] 张娟娟, 张杰. 化学成分及冷却方式对 TC4 钛合金性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(8): 192-193.