

固溶温度和冷却速率对 TC11 钛合金组织和性能的影响

张晨辉^{1,2} 郭建忠³ 张利军^{1,2} 吴天栋^{1,2}
(1.西安超晶科技有限公司; 2.陕西省先进金属结构材料精确热成形重点实验室;
3.海装重大专项装备项目管理中心)

摘 要 研究了固溶温度和冷却速率对 TC11 钛合金显微组织、室温和高温力学性能的影响。结果表明,随着固溶温度、冷却速率提高,TC11 钛合金中的初生 α 相含量明显降低,随着冷却速率提高,次生 α 相细小且弥散分布。在相同的固溶温度下,随着冷却速率提高,合金的室温强度以及 500 °C 高温强度明显提高,塑性明显下降。在 950 °C 水冷处理再进行时效处理后合金的强度最高,可达 1 300 MPa 以上。

关键词 TC11 钛合金;固溶温度;冷却速率;力学性能

中图分类号 TG146.23;TG156.94 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Solution Temperature and Cooling Rate on Microstructure and Properties of TC11 Titanium Alloy

Zhang Chenhui^{1,2}, Guo Jianzhong³, Zhang Lijun^{1,2}, Wu Tiandong^{1,2}
(1.Xi'an Chaojing Technology Co., Ltd.; 2.Shannxi Key Laboratory of Advanced Metal Structural Materials Precision Thermoforming; 3.Project Management Center, Major Special Equipment of Marine Equipment)

Abstract: The effects of solution temperature and cooling rate on the microstructure, ambient and elevated mechanical properties of TC11 titanium alloy were investigated. The results indicate that with the increase of solution temperature and cooling rate, the content of primary α phase in TC11 titanium alloy is decreased obviously, and the secondary α phase becomes finer with more dispersed distribution. At the same solution temperature, the room temperature strength and 500 °C high temperature strength of the alloy are increased, and the plasticity is decreased significantly with the increase of cooling rate. After 950 °C water cooling treatment and aging, the strength of the alloy reaches over 1 300 MPa.

Key Words: TC11 Titanium Alloy, Solution Temperature, Cooling Rate, Mechanical Properties

钛合金因其比强度高、密度低、耐腐蚀性好和耐高温等特点,成为飞机和航空发动机的重要结构材料。TC11 钛合金(Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si)属于马氏体型 $\alpha+\beta$ 双相热强钛合金,可在 500 °C 下长期服役,目前已广泛用于生产航空关键部件以及飞机结构件^[1~4]。

随着航空事业的迅猛发展,对钛合金的性能提出了较高的要求,而钛合金的性能与其组织结构密切相关^[5]。钛合金的组织形态主要是通过锻造过程进行控制,但通过适当的热处理方法也可以形成不同的组织形貌^[6],从而获得满足使用要求的力学性能。本课题研究不同固溶温度和不同冷却速率对 TC11 钛合金显微组织和力学性能的影响,为 TC11 钛合金的应用提供参考。

1 试验材料及方法

试验采用 $\phi 50$ mm 的 TC11 钛合金棒材,其成分见表 1。合金经金相法测定相变温度为 1 010~1 015 °C,棒材热处理工艺见表 2,取样进行力学性能测试及显微组织观察。按照 GB/T 228 的要求加工标准 R7 试样,在 INSTRON 型电子万能试验机上测试室温和高温

表 1 TC11 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC11 titanium alloy %										
元素	ω_B									
	Al	Mo	Zr	Si	Fe	C	O	N	H	Ti
实测	6.52	3.42	1.67	0.31	0.017	0.056	0.14	0.015	0.001	余量
标准	5.8~7.0	2.8~3.8	0.8~2.0	0.20~0.35	≤ 0.25	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.012	≤ 0.15	余量

收稿日期:2020-09-30;修改稿收到日期:2021-01-27
第一作者简介:张晨辉,男,1989 年出生,工程师,西安(710200),E-mail:624143206@163.com
引用格式:张晨辉,郭建忠,张利军,等. 固溶温度和冷却速率对 TC11 钛合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 261-1 263.
ZHANG C H, GUO J Z, ZHANG L J, et al. Effects of solution temperature and cooling rate on microstructure and properties of TC11 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 261-1 263.

(500 ℃)力学性能试验。按照 GB/T 229 的要求加工 10 mm×10 mm 的标准冲击试样并开“U”型缺口,在 JBS-300B 冲击试验机上进行冲击试验。采用 OLYMPUS/PMG3 型光学显微镜进行显微组织观察。

表 2 TC11 钛合金热处理试验方案

Tab.2 Heat treatment schemes for TC11 titanium alloy		
编号	固溶工艺	时效工艺
1	950 ℃×1 h, AC	530 ℃×6 h, 空冷
2	950 ℃×1 h, OC	
3	950 ℃×1 h, WC	
4	970 ℃×1 h, AC	
5	970 ℃×1 h, OC	
6	970 ℃×1 h, WC	
7	990 ℃×1 h, AC	
8	990 ℃×1 h, OC	
9	990 ℃×1 h, WC	

注:AC 为空冷;OC 为油冷;WC 为水冷

2 试验结果分析

2.1 固溶温度和冷却速率对合金显微组织的影响

图 1 为 TC11 合金经不同固溶工艺+530 ℃×6 h 空冷处理后的金相组织。可以看出,在相同的固溶温度下,随着冷却速率提高,TC11 合金中的初生 α 相含量稍有降低。当固溶温度越低时,随着冷却速率的提高,合金中初生 α 相含量的降低越为明显,在空冷状态下可以看到在黑色的 β 基体上分布着针状的次生 α 相。但随着冷却速率增加,这种次生 α 相来不及析出或长大,在油冷状态下,可以看到少量的次生 α 相,在水冷状态下观察不到析出的次生 α 相。对比不同固溶温度下的合金显微组织可知,提高固溶温度,合金中的初生 α 相含量下降非常明显,在 950 ℃固溶处理时,合金显微组织中的初生 α 相含量为 50%,提高合金的固溶温度至 970 和 990 ℃,合金显微组织中的初生 α 相含量分别为 30% 和 5%。在空冷状态下提高固溶温度,合金中初生 α 相含量减少的同时,合金组织中的析出次生 α 相含量

明显提高,且随着固溶温度的提高次生 α 相逐渐粗化。

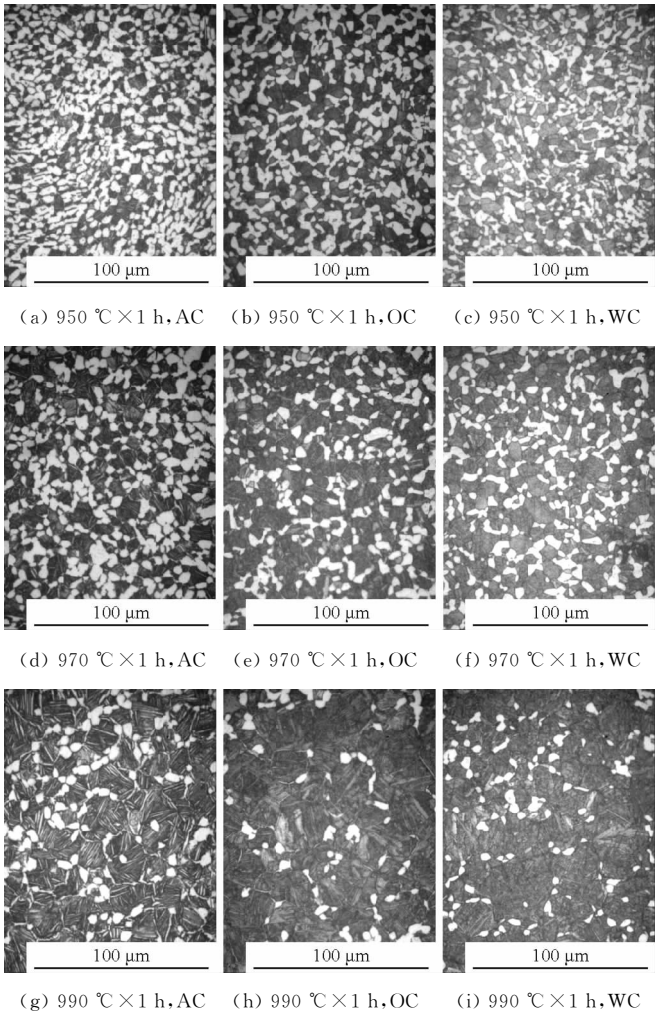


图 1 不同固溶工艺下 TC11 钛合金的显微组织
Fig.1 Microstructure of TC11 titanium alloy during various solution processes

2.2 固溶温度和冷却速率对合金力学性能的影响

图 2 为不同固溶温度和冷却速率下 TC11 钛合金的力学性能。可以看出,在相同固溶温度下,随着冷却速率的提高,合金的室温抗拉强度明显提高,在 950 ℃固溶水冷时,合金的抗拉强度可以达到 1 300 MPa 以

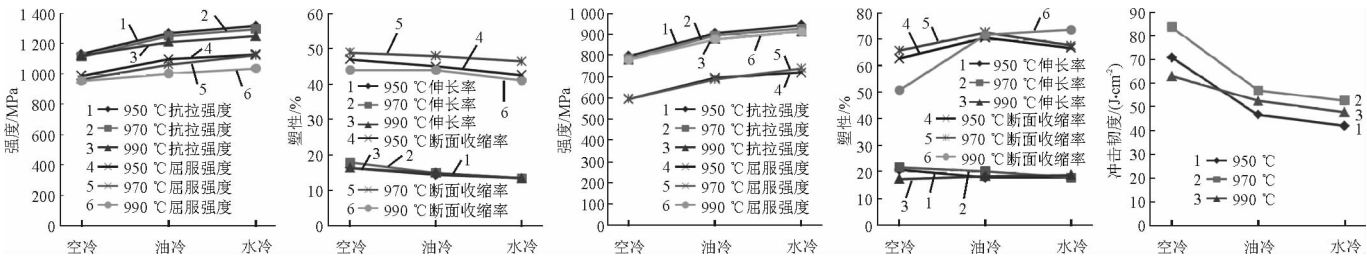


图 2 不同固溶温度和冷却速率下 TC11 钛合金的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of TC11 titanium alloy under various solution temperature and cooling rates

上,但合金的伸长率和断面收缩率有所下降,同时合金的冲击韧度略微下降。3 种冷却方式下,提高合金的固

溶温度,合金的室温抗拉强度均下降,冷却速率越快,这种下降趋势越明显。

3 讨论与分析

TC11 钛合金在 950~990 °C 内固溶处理时,由于此温度范围已经处于近 β 相区,当进行固溶处理时,会发生初生 α 相 $\rightarrow\beta$ 相的转变^[7],相的转变主要受温度和保温时间影响。在相同的保温时间下,随着固溶温度提高,提供的相变驱动力逐渐增加,这样加快了初生 α 相的转变,残余的初生 α 相含量会随着固溶温度的提高而明显下降^[8,9],同时合金组织中的 β 相含量明显增加。在固溶处理过程中发生了 α 相 $\rightarrow\beta$ 相的转变,而在随后的冷却过程中,发生的却是 β 相 $\rightarrow\alpha$ 相的转变。由于在相变过程中同时发生了合金元素的重新分配,在随后的冷却过程中,过饱和的 β 相的晶界和晶内析出片层状的次生 α 相。

冷却速率对 TC11 钛合金的显微组织也有着重要的影响^[10]。空冷时,合金有一定时间析出次生 α 相,同时这些次生 α 相有一定的时间长大粗化。而随着冷却速率提高,次生 α 相来不及析出及长大,在水冷后的组织中基本上观察不到片层状的次生 α 相,在油冷后的组织中可以观察到少量的片层状的次生 α 相^[11]。

钛合金组织中存在大量的等轴 α 相且原始 β 晶粒细小时,当试样进行塑性变形时,滑移首先在个别位向因子较大的 α 晶粒内开动,若初生 α 相数量多,变形能很快分散到许多晶粒中去,而不至于在个别晶粒中引起应力集中而开裂,因此等轴初生 α 相多的组织有利于较大变形进行,宏观上表现为较好的塑性,强度较低。而片层状的次生 α 相,条间界面能够阻碍滑移的进行,使变形更加困难,合金的强度提高,塑性下降^[12]。因此,片层状的次生 α 相越细小,分布越弥散,合金的强度越高。所以随着冷却速率提高,合金中的次生 α 相来不及长大,细小弥散分布在基体上,使合金的强度明显提高,塑性下降。

在固溶过程中,钛合金中的初生 α 相向 β 相转变,随着固溶温度提高,相变驱动力增加,使转变的 β 相越稳定,在随后的时效过程中 β 相越稳定,其析出的次生 α 相含量越少,对合金的强化效果越弱。在较快冷却速率下这种现象更为明显,因此油冷和水冷时,随着固溶温度的提高合金的强度有所下降^[13]。

4 结 论

(1)随着固溶温度提高以及冷却速率增加,TC11 钛合金中的初生 α 相含量明显降低,合金显微组织主要由初生 α 相、片层状的次生 α 相以及 β 基体组成。随着

冷却速率提高,次生 α 相越细小,分布越弥散。

(2)在相同的固溶温度下,随着冷却速率提高,钛合金的强度明显提高,在 950 °C 固溶水冷处理再进行二次退火后合金的强度最高,可以达到 1 300 MPa 以上。

(3)在空冷状态下,在 950~990 °C 间随着固溶温度提高,钛合金的强度略有提高,但变化不大。在油冷和水冷状态下,固溶温度提高,转变的 β 相越稳定,在随后的时效过程中析出的次生 α 相含量越少,对合金的强化效果减弱,在 950~990 °C,随着固溶温度提高,合金的强度有所下降。

参 考 文 献

- [1] 曹晓卿. 显微组织对 TC11 钛合金机械性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(1): 61-63.
- [2] 姜丽华, 田军强, 张利军, 等. 热处理对 TC11 钛合金室温力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(4): 38-43.
- [3] 唐光昕, 朱张校. TC11 钛合金在不同热处理条件下的组织分析[J]. 稀有金属, 2002, 26(2): 146-148.
- [4] 赵民权, 董健. 固溶温度对 TC11 合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(4): 139-141.
- [5] 陈学伟, 张士宏, 王忠堂, 等. 热处理工艺对 TC11 钛合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(10): 48-51.
- [6] GUO W M, SUN M X, QIU R, et al. Research progress on corrosion and aging of materials in deep-sea environment[J]. Corrosion Science & Protection Technology, 2017, 24(8): 125-135.
- [7] 谢文芳, 郭雷明, 张森斐, 等. 固溶时效温度对 Ti-6Al-4V-0.5Si 合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 449-452.
- [8] 费玉环, 周廉, 曲恒磊, 等. 两相区热处理对 TC21 钛合金显微结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(11): 1 928-1 932.
- [9] 朱知寿, 王新南, 童路, 等. 新型 TC21 钛合金热处理工艺参数与显微组织演变的关系研究[J]. 钛工业进展, 2006, 23(6): 24-27.
- [10] 党薇, 薛祥义, 寇宏超, 等. TC21 钛合金慢速冷却过程中的相组成及组织演化[J]. 航空材料学报, 2010, 30(3): 19-23.
- [11] 王义红, 寇宏超, 朱知寿, 等. 冷却速率对 TC21 钛合金相变行为的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(1): 6-10.
- [12] 史亚鸣, 吴晓明, 王富鑫, 等. 时效对 Ti6Al2.5V 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(6): 675-678.
- [13] 张利军, 王幸运, 常辉, 等. 固溶温度对 TB8 钛合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(6): 83-85.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com