

杂质元素 N、O、Fe 对 TA15 钛合金性能和组织的影响

张捷频, 闵新华

(宝钢特种材料有限公司, 上海 200940)

摘 要: 本文主要研究了杂质元素 N、O、Fe 含量对 TA15 钛合金力学性能的影响, 并通过光学显微镜、透射电镜等实验手段对不同杂质成分的微观组织进行了研究分析。研究结果表明: 随着杂质 N、O、Fe 含量的增加, TA15 钛合金的室温拉伸、高温持久均得到提高。在微观组织上, 不同杂质含量的组织形貌、结构有一定的差别。

关键词: TA15 钛合金; 杂质元素; 组织; 性能

中图分类号: TG 146.2 **文献标识码:** A

Effects of Elements N, O and Fe on Microstructure and Property of TA15 Titanium Alloy

ZHANG Jie-pin, MIN Xin-hua

(Baosteel Special Metals Co Ltd, Shanghai 200940, China)

Abstract: The effects of impure elements N, O and Fe on microstructure and property of TA15 titanium alloy were investigated by means of microscope and TEM. The results show that the increase of impurities N, O and Fe improves tensile properties of the alloy and stress rupture properties of the alloy and the microstructure depends on the impurities and their content.

Keywords: TA15 titanium alloy; impurities; microstructure; properties

钛合金中含有 Al、Mo、V、Zr 等合金元素和主要 Fe、N、O 杂质元素, 控制这些元素的一定含量和组合可以得到综合性能良好的半成品, 为最终在航空、航天、石油、化工等重要行业用的零件提供优质的加工坯料。

TA15 是前苏联在本世纪 60 年代初研制的近 α 型钛合金, 它的名义化学成分是 Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr, 兼有 α 型和 ($\alpha + \beta$) 型钛合金的优点, 具有良好的热稳定性, 长时间工作温度可达 500 $^{\circ}\text{C}$ 。同时 TA15 钛合金的焊接性和工艺塑性良好, 可制成板材、棒材、锻件等多种规格产品, 广泛应用于飞机发动机及机身结构件^[1]。

TA15 钛合金采用的是普通退火制度 (700 $^{\circ}\text{C}$ ~ 850 $^{\circ}\text{C}$, 1 h ~ 4 h 空冷), 因此合金元素和杂质元素的成分、热加工工艺的控制是强化性能的关键。本文主要研究了 TA15 钛合金的杂质元素 Fe、N、O 的含量对力学性能影响, 并通过光学显

微镜和扫描电镜对 TA15 不同杂质成分的微观组织进行了观察和分析, 从而揭示 TA15 钛合金中杂质元素强化性能的机理。

1 试验材料和方法

试验采用 3 炉杂质成分不同的材料制成 $\phi 14$ mm 棒材。这 3 炉棒材是采用相同冶炼工艺、相同的热加工工艺得到的。实验过程如下: 先采用相同热处理制度将 3 炉试样退火, 测试室温拉伸、高温拉伸、持久、冲击性能, 并利用光学显微镜、透射电镜对试样的微观组织结构进行观察分析。

2 试验结果和分析

2.1 化学成分

将主要合金元素控制在中限, 然后设计了成

收稿日期: 2012-10-18

作者简介: 张捷频, 1968 年生, 女, 工程师, 主要从事标准化管理。E-mail: zhangjiepin@baosteel.com。

分 1: 主要杂质元素 N、O、Fe 均为海绵钛中带入, 的含量。而成分 3: 则在前 2 种成分的基础上又不另外配。成分 2: 在成分 1 的基础上提高 O、Fe 提高了 N 的含量。测试结果见表 1。

表 1 3 种试样的杂质及合金成分

Table 1 Impurities and main alloyed elements(*w*)

Sample	O	N	Fe	Al	V	Mo	Si	Zr	Transition point/℃
1	0.09	0.015	0.10	upper limit	upper limit	midvalue	0.06	midvalue	990
2	0.12	0.017	0.15	upper limit	upper limit	midvalue	0.06	midvalue	1 000
3	0.13	0.038	0.15	upper limit	upper limit	midvalue	0.06	midvalue	1 020
GB/T3620.1-2007	≤0.15	≤0.05	≤0.25	5.5~7.1	0.8~2.5	0.5~2.0	≤0.15	1.5~2.5	

2.2 相变点

由于 O、N 是 α 稳定元素, 提高相变点; Fe 是 β 稳定元素, 降低相变点, 因此, 不同 O、N、Fe 含量的成分得到的相变点会不一样(见表 1)。成分 2 由于增加了 O、Fe, 因此相变点比成分 1 略高一些, 而成分 3 的 N 增加较多, 相变点要高出成分 1、成分 2 近 20℃~30℃。

2.3 力学性能

3 种成分的试样得到的力学性能见表 2。可以看到 3 种成分得到的力学性能有较大的差别。(1) 室温拉伸强度: 屈服强度和抗拉强度随着 O、N、Fe 含量的增加而逐渐提高, 而成分 3 的断面收缩率要比成分 1 和成分 2 低 20% 左右。(2) 500℃ 的拉伸强度: 成分 1 的屈服强度和抗拉强度低于后两种成分, 但成分 2 和成分 3 的屈服强度和抗拉强度相差不大; 断面收缩率的变化趋势与室温一样。(3) 500℃ 持久强度: 成分 2、3 持久强度的性能指标明显优于成分 1。

(4) 室温冲击: 随着 O、N、Fe 含量的增加室温冲击值逐渐降低。

2.4 微观组织

3 种成分的试样退火后的微观组织见图 1a、1b、1c 和图 2a、2b、2c。它们均为两相双态组织, 由等轴或球状的初生 α 相和 β 转变组织组成。从光学显微镜得到的 500 倍图片和高倍率的扫描照片来看: 不同成分的组织中, 初生 α 相的含量、尺寸以及 β 转变基体上次生 α 相的含量、长短都有差异。成分 1 的初生 α 相的含量最多, 但大小不均匀, 有大有小; 成分 2 的初生 α 相的尺寸最小, 并且比较均匀。而成分 1 的次生 α 相既有长条状, 也有短棒状, 尺寸也比较宽, (见图 2a); 成分 2 中的黑色 β 转变基体较多(见图 1b), 但分布其中的条状次生 α 相比较均匀, 均为短棒状; 成分 3 的试样组织中, 球状的初生 α 相颗粒比较均匀, 而分布在 β 转变基体上的条状次生 α 相也比较细。

表 2 不同杂质成分 TA15 钛合金棒材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TA15 alloy bars with different impurities

Sample	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%	Creep ¹⁾ rupture/h	a / $J \cdot cm^{-2}$
	at room temperature				at 500℃					
1	940	980	17	56	555	665	22.5	68	46.17	79.7
	945	980	17.5	55	560	665	21	66.5	29.00	77.7
2	990	1010	19	56.5	595	705	20	67.5	65.29	65.5
	990	1030	15.5	50.5	585	700	22	70.5	69.00	66.1
3	1040	1070	15.5	45	590	700	19.5	54	102.38	40.8
	1030	1070	19	48	595	705	21	55	101.31	42.5
Standard	≥885	≥930	≥10	≥27	—	≥470	—	—	≥50	≥32

Note: 1) Rupture time at 500℃ under 470 MPa.

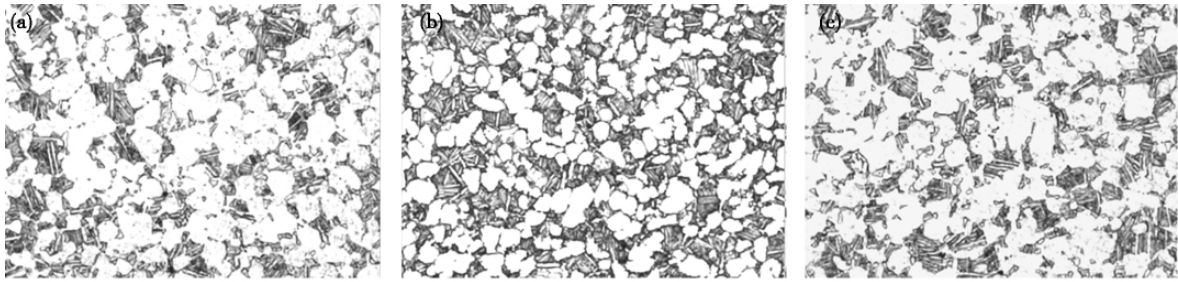


图 1 光学显微镜获取的显微组织

Fig. 1 Microstructure under optical microscope: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

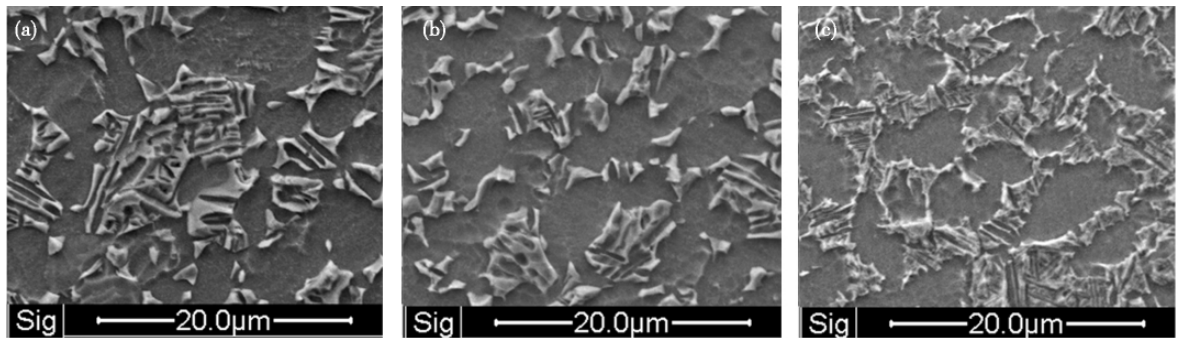


图 2 透射电镜获取的显微组织

Fig. 2 Microstructure under TEM: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

3 讨论

3.1 杂质含量对性能的影响

据文献介绍,除了 Al、Mo、V、Zr 等合金元素外,钛合金中杂质含量对性能的影响很大,杂质含量增多可提高钛合金的强度而降低其塑性^[2]。O、N、C、Fe 是钛合金中经常存在的杂质,Fe 在有些牌号中还是主要强化元素。其中, N 对性能的影响最大, O 居中, C 最小。文献[2]中列出了 N、O 含量对钛机械性能的影响(见表 3、表 4)。从表 3 中可以看到:当钛中随着 N 含量的增加,室温拉伸强度逐渐增加,并且增加幅度明显,当钛中含 0.23% N 时,拉伸强度可以提高到 92 MPa,塑性下降,但不厉害;从表 4 中可以看到:钛中 O 的含量增加,也使室温强度增加,但是含量在 0.25% 以下时,增加幅度不大。钛中 O 的含量每提高 0.1% 就使其强度约升高 15 MPa,但是 O 对断裂韧性影响较大,因此 O 在钛合金中的含量要低,一般技术要求在 0.15% 以下。

表 3 N 含量对钛室温拉伸性能的影响

Table 3 Effect of N on tensile properties of titanium content

$w(\text{N})/\%$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$
0.05	40.8	21.4	51
0.134	79.5	14.7	—
0.157	84.5	—	46
0.236	92	15.9	36

表 4 O 含量对钛室温拉伸性能的影响

Table 4 Effect of O on tensile properties of titanium content

$w(\text{O})/\%$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$
0.04	38.5	37.7	72.6
0.10	39.4	32.5	71.7
0.25	54.2	20.8	46.1
0.46	70	19.4	34.6

那么从本实验中得到:TA15 钛合金中 O 从 0.09% 增加到 0.12% ~ 0.13%, Fe 从 0.10% 增

加到 0.15% 后,室温、500℃ 拉伸强度均提高了约 40 MPa,从文献[2]统计数据来看,室温拉伸、500℃ 拉伸强度的提高应该是 O 的贡献,Fe 含量的增加对强度贡献不明显。O、Fe 含量的增加对塑性的影响不大,成分 1 和成分 2 的实验结果基本相近;而持久强度的提高可能是 O、Fe 提高的共同作用。再看成分 3 中 N 含量增加后,室温拉伸强度进一步提高,高温拉伸强度却没有增加;而室温和高温的断面收缩率、室温冲击均下降。

3.2 杂质含量对微观组织的影响

按照常规的钛合金微观组织的分类方法,本实验中不同杂质成分的 TA15 钛合金试样的微观组织均是双态组织,即包括球状和片状混合的组织类型,而描述这类组织的主要参数有初生 α 相(等轴球状)的颗粒尺寸,次生 α 相的片层厚度(粗细)和不同形貌的体积分数。本实验没有研究三种成分不同相的体积分数,但一定程度上从初生 α 相、次生 α 相上反映了杂质含量对显微组织的影响。

热加工工艺参数对最终成品的组织形貌起决定性作用。本试验的热加工工艺是一样的,均是在相变点以下 40℃ 终轧。根据有关资料介绍,在热加工工艺一致的情况下, β 晶粒的尺寸、 α 片状的厚度还与合金的成分、含量有关^[2]。从本实验的结果来看,增加 O、Fe 含量,初生 α 相的颗粒变得均匀、细小,短棒状的次生 α 相增多,这样的组织有利于拉伸强度、持久强度的提高^[3],而塑性没有下降。根据室温强度的经验公式^[2]:

$$\sigma_b = 156 - 0.005D - 1.0d - 15b$$

其中 D 是原始 β 晶粒平均直径; d 是片状 α 集团的平均直径; b 是片状 α 的厚度。

在本实验中假设原始 β 晶粒平均直径看作是相等,那么从光学显微镜的组织照片和透射电镜照片来看:随着 O、Fe 含量的增加,短棒片状 α 增加,说明片状 α 集团的平均直径减少,同时片状 α 的厚度也变薄,造成了 σ_b 提高。另外,初生 α 相的颗粒变得均匀、细小也使得 σ_b 提高。而

随着 N 含量的增加,片状 α 变得细、更短,使得 σ_b 进一步提高,但是,成分 3 得到的组织形态较之成分 1 和成分 2 有很大的差别,因此对塑性和冲击造成了下降的影响。具体的机理有待做更深入的研究。

4 结 论

(1) 在标准范围内,适当增加主要杂质元素 O、Fe 的含量,有利于提高 TA15 钛合金的室温和高温拉伸强度,对塑性和冲击韧性影响不大;同时也提高了 500℃ 的持久强度。

(2) 在增加 O、Fe 的含量的基础上,进一步增加 N 含量,TA15 钛合金室温拉伸强度继续提高,但 500℃ 高温强度变化不大,而塑性和室温冲击韧性下降。

(3) 从本实验结果来看:对于近 α 钛合金 TA15 来说,若想取得良好的综合性能,杂质元素 O、Fe 控制在尽量高一些,分别在 0.12% 和 0.15% 左右;而 N 的含量控制在 0.02% 左右即可。

参考文献:

- [1] 曹京霞,方波. 微观组织对 TA15 钛合金力学性能的影响[J]. 稀有金属,2004,28(2): 页码. 35—36.
Cao J X, Fang B. Effects of microstructure on properties of TA15 titanium alloy [J]. Rare Metals, 2004, 28(2): 35—36.
- [2] 王金友,葛志明,周邦彦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科技出版社,1985: 233—249.
Wang J Y, Ge Z M, Zhou B Y. Aeronautical titanium alloys [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 233—249.
- [3] Lutjering G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of $\alpha + \beta$ titanium alloys [J]. Mat Sci Eng, 1998, A243: 32—36.

(编辑: 段玉琴)