

# $\beta$ 21S 钛合金的组织 and 性能研究

## The Research on Microstructure and Mechanical Properties of $\beta$ 21S Titanium Alloy

陈玉文 (北京航空材料研究院)

Chen Yuwen (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要]  $\beta$ 21S 是一种亚稳定  $\beta$  型钛合金, 最初是针对美国国家航空航天飞机用金属基复合材料的可轧制带材的抗氧化基体合金而研制的。然而, 该合金具有极好的综合性能, 航空、航天工业部门正在考虑广泛应用该合金。本文测定了  $\beta$ 21S 的相变点, 进行了超声检验, 初步研究了棒材不同热处理状态下的力学性能及显微组织。结果表明,  $\beta$ 21S 合金具有优异的力学性能, 其显微组织类似于其它贫  $\beta$  的亚稳定  $\beta$  钛合金的显微组织。

关键词  $\beta$ 21S 钛合金 热处理 显微组织 力学性能

[Abstract]  $\beta$ 21S is a metastable beta titanium alloy. It was originally developed as a strip producible, oxidation resistant matrix material for the metal matrix composites of the American National Aerospace Plane (NASP). Its unique set of properties, however, have led to its being considered for a variety of aerospace industrial applications. In this article, the transformation temperature of  $\beta$ 21S has been determined, ultrasonic inspection has been done, mechanical properties and microstructure of  $\beta$ 21S alloy bars on various heat treatment conditions have been studied. Results show that  $\beta$ 21S has excellent mechanical properties and its microstructure is similar to those of other metastable  $\beta$  Titanium alloys with poor  $\beta$

**Keywords**  $\beta$ 21S titanium alloy heat treatment microstructure mechanical properties

### 1 前言

航空、航天工业的发展对钛合金结构材料提出了越来越高的要求, 更高强度级别的钛合金可以制造受力更大的构件, 提高结构效益。未来的飞行器设计需要钛基复合材料, 这就要求钛合金能用传统的工艺轧制成箔材, 并且具有良好的高温性能。美国70年代后期发展的 Ti-1023 (Ti-10V-2Fe-3Al) 和 Ti-15-3 (Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn) 两种  $\beta$  型合金, 提高了钛合金损伤容限设计的能力, 为飞机结构减重开拓了新的途径。其中 Ti-15-3 合金是一种可冷成形亚稳定  $\beta$  型钛合金, 可作为复合材料的基体, 但该合金高温抗氧化性差。这两种合金是属于中高等级强度水平 (拉伸强度水平均在 1100MPa 左右, 断裂韧性在 60MPa $\sqrt{\text{m}}$  左右) 的钛合金。

针对宇航工业中金属基复合材料对高温抗氧化钛合金的需求, 近年来, 美国钛金属公司 (TIMET) 研制了  $\beta$ -21S (Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si) 合金<sup>[1]</sup>。在研制

的初期提出了以下几点目标: (1) 815 $^{\circ}\text{C}$  以下的抗氧化性能优于 Ti-15-3 合金; (2) 冷轧能力大致与 Ti-15-3 合金相当, 以降低箔材生产的费用; (3) 可时效强化<sup>[2]</sup>。该合金具有以下特点: (1) 强度高, 塑性好; (2) 强度-韧性匹配性好; (3) 可以用适合于钛合金的任何焊接方法进行焊接; (4) 冷、热加工性能优良, 可制成 0.064mm 箔材, 冷轧变形量达 72% ~ 85%, 不需要中间退火; (5) 抗氧化性、抗腐蚀性优良, 815 $^{\circ}\text{C}$  / 48h 暴露, 氧化率仅为 Ti-15-3 合金的 1%; (6) 高温性能优于其它  $\beta$  型钛合金, 抗蠕变性能优于 Ti-6Al-4V; (7) 直到 590 $^{\circ}\text{C}$ , 该合金具有优异的热稳定性。

$\beta$ 21S 可用于制作有温度要求的飞机或发动机结构件、蜂窝、紧固件和液压管材等, 还可用作金属基复合材料的基体、铸件等。 $\beta$ 21S 填补了抗氧化、抗腐蚀的高强钛合金的空白, 也引起了非宇航工业的广泛关注<sup>[3]</sup>。

本文对  $\beta$ 21S 的组织 and 性能进行了初步研究。

2 材料及试验方法

所用材料为3kg的小锭(1<sup>#</sup>)以及400kg半工业锭(2<sup>#</sup>)。表1和表2分别是1<sup>#</sup>锭和2<sup>#</sup>锭的化学成分分析结果。

表1 1<sup>#</sup> 锭的化学成分分析结果 (wt%)

Table 1 Chemical composition of the No. 1 ingot

材料	Al	Mo	Nb	Si	O	Ti
1 <sup>#</sup> 锭	3.16	14.4	2.38	0.16	0.1	余量

表2 2<sup>#</sup> 锭化学成分分析结果 (wt%)

Table 2 Chemical composition of the No. 2 ingot

	Fe	Si	C	N	O	H	Mo	Nb	Al
头	0.08	0.21	0.03	0.011	0.10	0.001	15.1	2.9	2.9
上	-	-	-	-	-	-	14.8	2.8	3.0
中	0.08	0.18	0.04	0.011	0.10	-	15.1	2.9	2.7
下	-	-	-	-	-	-	15.8	2.9	2.8
底	0.08	0.18	0.03	0.011	0.10	-	15.9	3.0	2.9

拉伸试验利用  $\phi 16\text{mm}$  的棒材,按 HB5154-80进行。超声波探伤参照有关飞机用 Ti-1023 钛合金锻件的超声波检验方法进行。

3 试验结果及讨论

3.1 相变点测定

$\beta 21\text{S}$  属于亚稳定  $\beta$  钛合金,可以通过热处理来调整合金的显微组织,从而引起力学性能的变化,以满足不同要求。所以,相变点的确定,对合金热处理温度的选择是至关重要的。本研究采用金相法测定了铸锭的相变点。 $\beta 21\text{S}$  合金的相变点大约在815 左右。

3.2 超声波探伤

弄清钛合金的加工工艺、组织和超声波水平之间的确切对应关系,一直是钛合金领域研究的重点之一。该合金富含难熔的 Mo、Nb 元素,避免偏析的出现,获得成分均匀的铸锭,以及锻件应用中的大规格棒材组织、性能均匀性等等,是该合金研究过程中的关键问题。本文利用2<sup>#</sup> 锭锻坯进行了超声波探伤初步研究。锻坯尺寸为55mm×25mm×740mm,探伤用试样尺寸为55mm×50mm×25mm。利用5MHz V109型探头,T C4作标准试块,平底孔直径0.8。共观察了9块试块,均无缺陷,其杂波水平见表3。从表3可以看出,锻坯的组织均匀性很好。

3.3 不同热处理制度下室温拉伸性能和组织

固溶处理可在  $\beta$  转变点以上( $\beta$  固溶处理)或低于  $\beta$  转变点( $\alpha$ - $\beta$  固溶处理)进行。 $\beta$  固溶处理导致最小的基体稳定性,在随后的淬火和时效过程中为分解提供最大

的动力。 $\alpha$ - $\beta$  固溶处理过程中,  $\beta$  基体中析出  $\alpha$ , 导致  $\beta$  基体富集  $\beta$  稳定元素和贫化  $\alpha$  稳定元素。 $\alpha$  析出物牵制晶界,阻碍晶粒长大。

表3 2<sup>#</sup> 锭锻坯超声波探伤试验结果

Table 3 ultrasonic wave examination results of the billet of No. 2 ingot

试块编号	热处理制度	杂波水平, dB
K01	800 , 30min, WQ+ 520 , 10h, AC	- 12
K02		- 16 ~ - 32
K03		- 14
K04	800 , 30min, WQ+ 540 , 10h, AC	- 24
K05		- 24 ~ - 32
K06		- 18
K07	800 , 30min, WQ+ 560 , 10h, AC	- 18
K08		- 24
K09		- 24 ~ - 32

3.3.1 固溶状态下的组织、性能

在本试验进行过程中,同时测试了 BT 22的固溶状态拉伸性能。BT 22合金的相变点为830 。围绕相变点,与  $\beta 21\text{S}$  合金的性能作了对比试验,如表4所示。

表4  $\beta 21\text{S}$  与 BT -22合金固溶状态拉伸性能的比较

Table 4 Mechanical properties comparison between  $\beta 21\text{S}$  and BT-22 alloy after solution treatment

固溶温度	材料	$\sigma_s$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta_5$ %	$\psi$ %
$\beta$ 转变点以下30	$\beta 21\text{S}$	962	929	18.7	59.5
	BT-22	993	939	11.9	27.1
$\beta$ 转变点以下15	$\beta 21\text{S}$	962	931	19.5	62.0
	BT-22	977	911	11.9	24.8
$\beta$ 转变点	$\beta 21\text{S}$	954	924	18.5	60.3
	BT-22	924	804	9.2	20.2
$\beta$ 转变点以上30	$\beta 21\text{S}$	907	866	20.5	68.8
	BT-22	898	735	13.7	37.3
$\beta$ 转变点以上45	$\beta 21\text{S}$	900	868	20.0	69.9
	BT-22	857	759	15.7	38.4

从表4可以看出,随着固溶温度的升高,强度逐渐降低,延伸率稳中有升,断面收缩率有所提高。相变点以下固溶处理,  $\beta 21\text{S}$  合金的强度稍低于 BT 22合金,但塑性明显优于 BT 22;相变点以上固溶处理,  $\beta 21\text{S}$  合金的强度比 BT 22合金的要高,且塑性明显优于 BT 22,断面收缩率指标尤为明显。对  $\beta 21\text{S}$  合金棒材来说,采用 800 固溶处理,可以得到强度-塑性的良好匹配。

图1和图2分别是2<sup>#</sup> 锭  $\phi 16$  棒材经800 和845 固溶处理后的显微组织。可见,相变点以下固溶处理的显

微组织为明显的两相区组织；相变点以上固溶，发生明显的再结晶，晶粒非常细小，大约7.5级。



图1 2# 锭 φ16棒材800 固溶处理后的显微组织 100 ×  
Fig. 1 Microstructure of φ16 bars of No. 2 ingot after a solution treatment of 800 100 ×

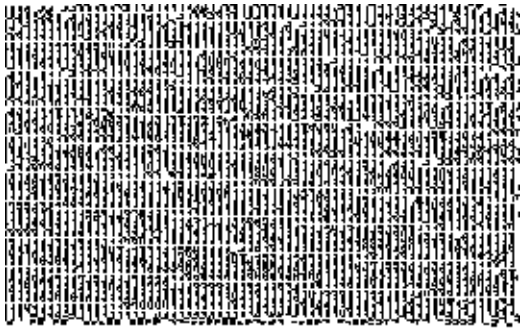


图2 2# 锭 φ16棒材845 固溶处理后的显微组织 100 ×  
Fig. 2 Microstructure of φ16 bars of No. 2 ingot after a solution treatment of 845 100 ×

3. 3. 2 固溶时效状态下的组织、性能

β21S 是时效强化合金。在美国波音公司，β21S 用于两种热处理状态<sup>[4]</sup>。STA 状态（最小拉伸强度1035MPa），用于高达大约480 的环境；STOA 状态（最小拉伸强度860MPa），用于更高的温度。STOA 状态用热处理降低强度，是为了加强高温下合金的热稳定性。本文较详细研究了800 及845 固溶处理后的时效性能，结果分别列于表5和表6。

从表5和表6可以看出，无论是800 固溶处理还是845 固溶处理，随着时效温度的升高，强度都逐渐降低，而塑性都有所提高。β21S 合金具有较好的强度- 塑性匹配关系，在保持良好塑性的情况下，β21S 仍具有很高的强度，且强度达到了很高的级别。相同温度时效处理，采用800 固溶处理得到的塑性比845 固溶处理得到的数值更好。也就是说，采用800 固溶处理和520 时效可以得到较理想的强度-塑性匹配。

表5 β-21S 棒材800 固溶不同时效  
温度下的室温拉伸性能

Table 5 Room temperature mechanical properties of β-21S bars at different aging temperature after a solution treatment of 800

热 处 理 制 度	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta_5$ %	$\psi$ %
800 , 10min, WQ+ 480 , 10h, AC	1604	1528	7.8	27.5
800 , 10min, WQ+ 500 , 10h, AC	1563	1510	9.6	35.2
800 , 10min, WQ+ 520 , 10h, AC	1522	1470	10.6	43.4
800 , 10min, WQ+ 540 , 10h, AC	1411	1362	13.6	49.6
800 , 10min, WQ+ 560 , 10h, AC	1357	1314	13.6	50.3
800 , 10min, WQ+ 580 , 10h, AC	1314	1281	14.2	50.5
800 , 10min, WQ+ 600 , 10h, AC	1220	1188	15.9	53.3

表6 β-21S 棒材845 固溶不同时效  
温度下的室温拉伸性能

Table 6 Room temperature mechanical properties of β-21s bass at different aging temperature after a solution treatment of 845

热 处 理 制 度	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta_5$ %	$\psi$ %
845 , 10min, WQ+ 480 , 10h, AC	1669	1626	5.0	13.2
845 , 10min, WQ+ 500 , 10h, AC	1576	1532	7.5	15.9
845 , 10min, WQ+ 520 , 10h, AC	1512	1468	8.1	19.8
845 , 10min, WQ+ 540 , 10h, AC	1489	1431	7.1	19.1
845 , 10min, WQ+ 560 , 10h, AC	1379	1323	8.1	23.4
845 , 10min, WQ+ 580 , 10h, AC	1345	1289	9.1	23.9
845 , 10min, WQ+ 600 , 10h, AC	1261	1206	9.6	27.6

本研究中得到的性能均符合 ASTM -B -348 -95（钛及钛合金棒材及锻坯标准）中规定的纵截面 76mm，最大面积为64. 5cm<sup>2</sup>时的拉伸性能保证值要求。

观察了所采用的各种热处理制度下的显微组织。图3是2# 锭 φ16棒材800 固溶经520 （a）、580 （b）时效处理后的显微组织。图4是经845 固溶540 （a）、600 （b）时效处理后的显微组织。可以看出，晶内及晶界均存在析出的α相，且随时效温度的升高，析出的α相的数量也增多，由开始的比较弥散的分布到逐步聚集，成团状分布。依赖于特殊的热处理，β21S 合金中会形成一些相，包括α、ω和硅化物。用热分析方法确定硅化物的溶解温度接近1025 。就显微组织而言，β21S 合金类似于其它贫溶质、亚稳定β钛合金。低温时效相变为β β+ ω+ α β+ α，高温时效相变为β β+ α。



图3 2# 锆  $\phi 6$ mm 棒材经800 固溶520 (a)、580 (b) 时效处理后的显微组织 100  $\times$

Fig. 3 Microstructure of  $\phi 6$  bars of No. 2 ingot after solution treated at 800 and aged at 520 (a), 580 (b)

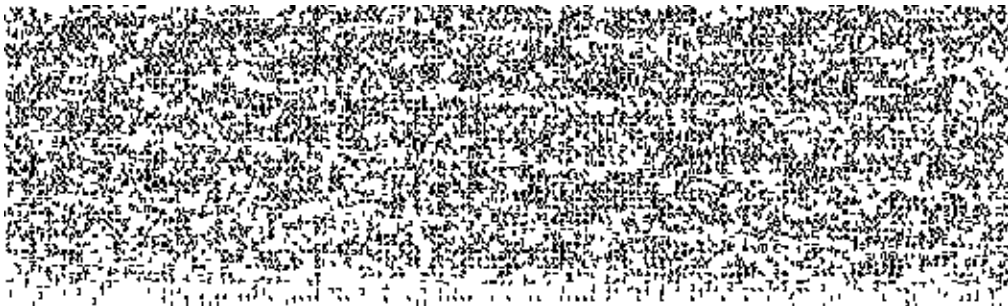


图4 2# 锆  $\phi 6$ mm 棒材经845 固溶540 (a)、600 (b) 时效处理后的显微组织 100  $\times$

Fig. 4 Microstructure of  $\phi 6$  bars of No. 2 ingot after solution treated at 845 and aged at 540 (a), 600 (b)

## 4 结论

## 参考文献

(1) 采用金相法测定的  $\beta 21S$  合金相变点大约为 815 。

(2) 宽55mm  $\times$  高25mm 的锻坯超声波探伤试验结果理想, 组织均匀性很好。

(3)  $\beta 21S$  合金具有很好的强度-塑性匹配关系, 且达到了很高的强度级别。对棒材来说, 相比845 固溶处理, 采用800 固溶, 可以得到更好的综合性能。采用800 固溶, 500 ~ 600 时效, 其拉伸性能均满足 ASTM-B-348-95的技术要求。

(4) 相变点以下固溶,  $\beta 21S$  合金强度稍低于 BT 22, 但塑性明显优于 BT 22; 相变点以上固溶,  $\beta 21S$  合金的强度比 BT 22合金的高, 且塑性明显好于 BT 22。

(5)  $\beta 21S$  合金的显微组织类似于其它贫  $\beta$  的亚稳定  $\beta$  钛合金。

- 1 P. J. Bania and W. M. Parris. Beta 21S: A High Temperature Metastable Beta Alloy. Presented at the 119th TMS Annual Meeting, Anaheim, CA, Feb. 1990
- 2 P. J. Bania. Next Generation Titanium Alloys for Elevated Temperature Service. ISIJ International, 1991, 31(8): 840 ~ 847
- 3 J. S. Grauman. Corrosion Behavior of Timetel 21S for Non-aerospace Applications. Titanium 92: Science and Technology, TMS, 1993, 2737 ~ 2742
- 4 R. R. Boyer. Aerospace Applications of Beta Titanium Alloys. JOM, 1994, (7): 20 ~ 23

稿件收到日期: 1997. 7. 18.

陈玉文, 女, 1965年4月生, 北京航空材料研究院工程师, 联系地址: 北京市81信箱15分箱 (邮编100095)。