

## $\beta$ 21S 超高强钛合金性能试验研究

张利军<sup>1</sup>, 田军强<sup>1</sup>, 常 辉<sup>1,3</sup>, 薛祥义<sup>1,3</sup>, 张丰收<sup>2</sup>

(1. 西安西工大超晶科技发展有限公司, 陕西 西安 710016)

(2. 西部超导材料科技有限公司, 陕西 西安 710016)

(3. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)



张利军

**摘 要:**  $\beta$  21S (名义成分 Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si) 钛合金是 Timet 公司针对美国航空航天飞机计划 NASP 对抗氧化金属及复合材料基体的需求而研制的一种亚稳定  $\beta$  型钛合金, 该合金具有优异的冷热加工性能、深的淬透性、抗蠕变性能、高的抗氧化性能和良好的抗腐蚀性能, 可用于制作有温度要求的飞机结构件或发动机部件紧固件和液压管、钣金件等, 已经用于制造波音 777 飞机发动机舱导风罩等部件。 $\beta$  21S 合金作为一种典型的亚稳定的  $\beta$  型钛合金, 通过适当的工艺热处理后, 可获得 1 300 MPa 以上超高抗拉强度及不小于 6% 的延伸率, 为了全面了解并掌握高强度热处理工艺处理后的  $\beta$  21S 钛合金性能, 我们对  $\beta$  21S 钛合金进行了全面性能试验研究。

**关键词:**  $\beta$  21S 钛合金; 热处理; 显微组织; 性能

**中图分类号:** TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)11-0046-04

## Performance Test of $\beta$ 21S Ultra-High Strength Titanium Alloy

ZHANG Lijun<sup>1</sup>, TIAN Junqiang<sup>1</sup>, CHANG Hui<sup>1,3</sup>, XUE Xiangyi<sup>1,3</sup>, ZHANG Fengshou<sup>2</sup>

(1. Xi'an Super crystal Sci-Tech Development Co., Ltd, Xi'an 710016, China)

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

(3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:**  $\beta$  21S (nominal composition Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si) titanium alloy is a metastable  $\beta$ -titanium alloy developed by Timet to serve the U. S. Air NASP space shuttle program for antioxidant and metal matrix composite materials. The alloy has excellent cold workability, deep hardenability, creep resistance, high oxidation resistance, and good corrosion resistance, and can be used to produce temperature-required aircraft structural parts or engine parts as well as hydraulic pipe fastener, sheet metal, etc. The alloy has already been used to manufacture wind guide of Boeing-777 engine compartment and other components. As a typical metastable  $\beta$ -titanium alloy,  $\beta$  21S alloy may obtain ultrahigh tensile strength, that is, 1 300 MPa or above, and elongation no less than 6% through appropriate heat treatment. In order to fully understand and master the performance of  $\beta$  21S titanium upon high-strength heat treatment process, we conducted a comprehensive performance test of titanium  $\beta$  21S.

**Key words:**  $\beta$  21S titanium alloy; heat treatment; microstructure; properties

### 1 前 言

钛合金是当代飞机和航空发动机的主要结构材料之一, 对于减轻飞机的重量, 提高飞机推重比, 增加飞行距离和减少燃料费用等都具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。随着航空航天事业的迅速发展, 飞行器紧固件、弹性元件及主要承力结构件对材料的要求更为突出地集中于耐蚀、轻质、高强、高韧等性能, 所以发展高强、高韧钛合金

材料及其加工工艺对我国航空航天工业的发展具有积极的推动作用。

航空航天标准件在其生产制造过程中要求材料具有良好的冷锻成型性能, 且在其热处理后要获得足够高的强度。 $\beta$  型钛合金由于在固溶状态下具有优异的冷成型性能, 且其在随后时效处理状态下可获得很高的强度, 故大量应用于高品质航空航天标准件的生产制造。列入我国《航空材料手册》的用于制造航空标准件的  $\beta$  型钛合金主要有 TB2, TB3, 这 2 种  $\beta$  型钛合金主要应用于 1 100 MPa 级标准件的制造。随着我国航空航天工业的迅速发展, 新一代标准件要求其强度水平达 1 300 MPa 级

收稿日期: 2010-07-12

通信作者: 张利军, 男, 1981 年生, 助理工程师

以上, 所以我国材料工程技术人员当务之急是研究和开发 1 300 MPa 级以上的  $\beta$  型钛合金材料及其加工工艺。

对于冷加工成型性能优异的 1 300 MPa 级超高强度  $\beta$  型钛合金, 我国目前研究尚不十分成熟。国外资料显示:  $\beta$  21S 钛合金具有优异的冷加工成型性能及深的淬透性, 热处理后可获得很高的强度。 $\beta$  21S 钛合金是美国 Timet 公司在 1989 年研制开发的亚稳定  $\beta$  型钛合金, 该合金具有优异的冷热加工性能、深的淬透性、抗蠕变性能、高的抗氧化性能和良好的抗腐蚀性能<sup>[2-3]</sup>。我国在最新版 GB/T3620. 1-2007 中仅对该钛合金(我国仿制牌号 TB8)的化学成分进行了说明<sup>[4]</sup>, 对于该合金的加工工艺、组织、性能等数据无资料可查。鉴于此, 我公司开展了  $\beta$  21S 钛合金的仿制及应用技术研究工作, 对其性能进行了全面试验研究, 为其在航空工业中的应用提供设计参数。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试验用  $\beta$  21S 钛合金铸锭由西安西工大超晶科技发展有限公司采用 1 t 真空自耗电弧炉 3 次熔炼生产, 其化学成分如表 1 所示。铸锭经  $\beta$  区和  $(\alpha + \beta)$  区多次加热锻造为  $\phi 45$  mm 规格棒材, 然后在  $(\alpha + \beta)$  区加热轧制为  $\phi 16$  mm 规格小棒, 采用差热分析法测定该合金的相变点  $(\alpha + \beta/\beta)$  为 799  $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1  $\beta$  21S 钛合金化学成分 ( $\omega/\%$ )

Table 1 Chemical composition of  $\beta$  21S alloy ( $w/\%$ )

Position	Ti	Al	Mo	Nb	Si	O
Head	Base	3. 22	15. 35	2. 82	0. 20	0. 11
Middle	Base	3. 23	15. 32	2. 86	0. 20	0. 13
Trail	Base	3. 15	15. 45	2. 86	0. 20	0. 14

### 2.2 试验方法

通过对  $\beta$  21S 合金进行热处理工艺研究, 我们选择出了使该合金获得高强度的热处理工艺, 即:

固溶(ST): 800 ~ 830  $^{\circ}\text{C}$ , 0. 5 h, 空冷;

时效(A): 510 ~ 520  $^{\circ}\text{C}$ , 12 h, 空冷。

$\beta$  21S 钛合金棒材轧制完成后, 切取试样并按以上高强度热处理制度进行处理。处理后的  $\beta$  21S 钛合金, 可获得  $R_m \geq 1$  300 MPa、 $A_5 \geq 6\%$  的高强性能。

## 3 结果分析

### 3.1 $\beta$ 21S 钛合金显微组织

$\beta$  21S 钛合金固溶及固溶 + 时效后的显微组织如图 1 所示。

从图 1a 可以看出,  $\beta$  21S 钛合金在 800 ~ 830  $^{\circ}\text{C}$  固

溶处理后, 合金显微组织为单一的  $\beta$  晶粒, 晶粒度为 7 ~ 6 级。

从图 1b 可以看出,  $\beta$  21S 钛合金固溶并经 510 ~ 520  $^{\circ}\text{C}$  时效处理后, 合金显微组织中  $\beta$  晶界及晶粒内部均匀弥散析出大量的  $\alpha$  相, 这是  $\beta$  型钛合金单时效的典型组织。

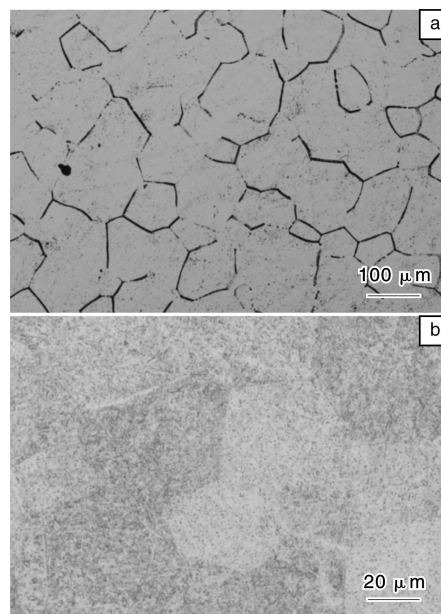


图 1  $\beta$  21S 合金显微组织: (a)ST, (b)STA

Fig. 1 Microstructures of  $\beta$  21S titanium alloy

### 3.2 $\beta$ 21S 钛合金拉伸性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶及固溶时效处理后, 室温、200  $^{\circ}\text{C}$ 、350  $^{\circ}\text{C}$  拉伸性能试验结果见表 2。

表 2  $\beta$  21S 钛合金拉伸性能

Table 2 Mechanical properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	$R_m/\text{MPa}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A_5/\%$	$Z/\%$
ST	Room temperature	910	905	21. 0	69. 0
		925	925	21. 0	68. 5
STA	Room temperature	1 320	1 240	11. 0	29. 5
		1 320	1 220	10. 5	39. 0
STA	200 $^{\circ}\text{C}$	1 250	1 150	11. 5	40. 5
		1 160	1 020	17. 5	44. 5
STA	350 $^{\circ}\text{C}$	1 160	1 040	15. 0	42. 5
		1 140	1 010	12. 5	45. 0

由表 2 试验数据可知,  $\beta$  21S 钛合金在相变点上固溶处理后, 可获得高的室温抗拉强度和非常优异的塑性。固溶并时效后, 在获得 1 300 MPa 以上超高温抗拉强度的同时保持了延伸率大于 10% 良好塑性;  $\beta$  21S 钛合金 200, 350  $^{\circ}\text{C}$  高温拉伸强度也非常好, 完全达到并超过 TB2, TB3 钛合金相应性能。可以看出  $\beta$  21S 钛合

金具有优异的室温、高温力学性能。

### 3.3 $\beta$ 21S 钛合金硬度及冲击性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶及固溶时效处理后, 硬度及冲击性能试验结果见表 3。

表 3  $\beta$  21S 钛合金硬度及冲击性能

Table 3 Rigidity and impinge properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	HB/d	$a_{ku}/J \cdot cm^{-2}$
ST	Room temperture	3. 70	35. 0
		3. 68	35. 0
STA	Room temperature	2. 94	22. 5
		2. 95	20. 0

### 3.4 $\beta$ 21S 钛合金剪切性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶及固溶时效处理后, 剪切性能试验结果见表 4。

表 4  $\beta$  21S 钛合金剪切性能

Table 4 Cut properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	$\tau/MPa$
ST	Room temperature	685
		680
STA	Room temperature	895
		885

### 3.5 $\beta$ 21S 钛合金扭转性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶及固溶时效处理后, 扭转性能试验结果见表 5。

表 5  $\beta$  21S 钛合金扭转性能

Table 5 Torsion properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	$\tau_b/MPa$	$\tau_p/MPa$
ST	Room temperature	810	736
		791	744
STA	Room temperature	1 257	987
		1 218	958

### 3.6 $\beta$ 21S 钛合金应力集中性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶及固溶时效处理后, 室温、350  $^{\circ}C$  缺口拉伸性能及应力集中试验结果见表 6。

表 6  $\beta$  21S 钛合金缺口拉伸性能

Table 6 Indentation mechanical properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	$\sigma_{bH}/MPa$	$R_m/MPa$	$\sigma_{bH}/R_m$	R
ST	Room temperature	1 425	910	1. 57	0. 25
		1 410	925	1. 52	0. 25
STA	Room temperature	1 640	1 320	1. 24	0. 25
		1 630	1 320	1. 23	0. 25
STA	350	1 610	1 160	1. 39	0. 25
		1 570	1 140	1. 38	0. 25

由表 6 试验数据可知,  $\beta$  21S 钛合金在相变点以上固溶处理及固溶 + 时效处理后,  $\sigma_{bH}/R_m$  均大于 1。可以看出  $\beta$  21S 钛合金的缺口敏感性是比较小的。

### 3.7 $\beta$ 21S 钛合金热稳定性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶时效处理并进行热暴露后, 室

温拉伸性能试验结果见表 7。

表 7  $\beta$  21S 钛合金热暴露后室温拉伸性能

Table 7 Hot stabilization properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Hot emerge condition	$R_m/MPa$	$R_{p0.2}/MPa$	$A_5/\%$	$Z/\%$
STA	350 $^{\circ}C \times 100$ h	1 460	1 390	8. 5	19. 5
		1 400	1 320	9. 5	23. 0
STA	350 $^{\circ}C \times 300$ h	1 470	1 400	13. 0	17. 0
		1 440	1 380	10. 5	16. 6

由表 7 试验数据可知, 固溶 + 时效处理后的  $\beta$  21S 钛合金, 在 350  $^{\circ}C$  高温大气环境下长时间热暴露后, 进行室温拉伸试验时, 在获得超高强度的同时, 仍保持了较好的延伸率。可以看出  $\beta$  21S 钛合金具有良好的热稳定性能。

### 3.8 $\beta$ 21S 钛合金持久性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶时效处理后, 室温、高温缺口 ( $R=0.25$ ) 持久性能试验结果见表 8。

表 8  $\beta$  21S 钛合金缺口持久性能

Table 8 Stand properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	Strain /MPa	Stand time/h	Remark
STA	Room temperature	1 380	> 158. 5	Samples not ruptured
		1 380	> 158. 5	
STA	350 $^{\circ}C$	1 165	> 120. 0	Samples not ruptured
		1 165	> 120. 0	
STA	350 $^{\circ}C$	1 070	> 260. 0	Samples not ruptured
		1 070	> 260. 0	

由表 8 可知, 固溶 + 时效处理后的  $\beta$  21S 钛合金, 在高应力状态下进行室温及 350  $^{\circ}C$  高温持久试验时, 上百小时后试样仍未拉断。可以看出  $\beta$  21S 钛合金的持久性能是非常优异的。

### 3.9 $\beta$ 21S 钛合金高温蠕变性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶时效处理后, 高温蠕变性能试验结果见表 9。

表 9  $\beta$  21S 钛合金高温蠕变性能

Table 9 Hot wriggle properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	Strain /MPa	Stand time/h	Remains transmutation
STA	350 $^{\circ}C$	950	100	0. 364%
		950	100	0. 246%

由表 9 可知, 固溶 + 时效处理后的  $\beta$  21S 钛合金, 在高应力状态下进行 350  $^{\circ}C$  高温蠕变试验时, 到达规定时间后, 残余变形非常小。可以看出  $\beta$  21S 钛合金的抗高温蠕变性能同样非常优异的。

### 3.10 $\beta$ 21S 钛合金疲劳性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶时效处理后, 高周疲劳性能试验结果见表 10。

表 10  $\beta$  21S 钛合金高周疲劳性能  
Table 10 Fatigue properties of  $\beta$  21S titanium alloy

State	Test temperature	$K_t$	R	$f$ /Hz	Strain /MPa	N /Circulates
STA	Room temperature	1	0.1	92	1 028	107

由表 10 可知, 固溶 + 时效处理后的  $\beta$  21S 钛合金, 具有非常的高周疲劳强度, 可以看出  $\beta$  21S 钛合金的高周疲劳性能也是非常优异的。

### 3.11 $\beta$ 21S 钛合金工艺性能

$\beta$  21S 钛合金经固溶处理后, 进行室温顶锻试验, 顶锻试样加工成  $\phi 14 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$  的标准试样, 顶锻高度比锻前: 锻后 = 3 : 1 时, 在不同试验温度下, 固溶试样周边均未见任何裂纹。

## 4 结 论

(1)  $\beta$  21S 钛合金在  $(\alpha + \beta)/\beta$  转变温度以上 0 ~ 30  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内固溶后, 获得的组织为单一的等轴  $\beta$  晶粒, 这种组织具有较高的强度及优异的塑性, 非常有利于材料的冷加工成型。

(2)  $\beta$  21S 钛合金固溶 + 时效处理后, 可获得抗拉强度 > 1 300 MPa、延伸率 > 6% 的优异综合室温拉伸性能, 同时合金的室温冲击、剪切、扭转等性能也很高。

(3)  $\beta$  21S 钛合金固溶 + 时效处理后, 可获得优异的高温综合力学性能, 包括高的持久性能、蠕变性能、热稳定性能。

(4)  $\beta$  21S 钛合金固溶 + 时效处理后, 具有优异高周疲劳性能, 其高周疲劳强度可达 1 028 MPa。

(5)  $\beta$  21S 钛合金是一种综合性能非常优异的  $\beta$  型钛合金, 非常适用于航空航天高强标准件、结构件的生产制造。

## 参考文献 References

- [1] Zhang Lijun(张利军), Tian Junqiang(田军强), Zhou Zhongbo(周中波), *et al.* Effects of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Performances of TC21 Titanium Alloy forgings [J]. *Materials China*(中国材料进展), 2009, 28(9-10): 84-87.
- [2] Zhu Zhishou(朱知寿), Zhong Ming(钟 鸣), Chu Junpeng(储俊鹏), *et al.* Heat Treatment and Cold Forming Properties of  $\beta$  21S Titanium Sheet[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2000, 29(1): 50-52.
- [3] Zhong Ming(钟 鸣), Chen Yuwen(陈玉文), Zhu Zhishou(朱知寿). Microstructure of the Alloy Ti-Mo-Nb-Al after Solution Treatment[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2000, 29(2): 118-120.
- [4] GB/T3620.1-2007. Designation and Composition of Titanium and Titanium Alloy[S].

## “2011 海峡两岸生物医用材料研讨会”在郑州召开

2011 年 10 月 15 ~ 20 日, 由郑州大学主办, 中科院金属所和台湾阳明大学协办的“2011 海峡两岸生物医用材料研讨会”在河南郑州举行。本次会议由郑州大学校长申长雨院士担任名誉主席, 郑州大学关绍康教授、中科院金属所杨柯研究员、台湾阳明大学黄何雄教授担任会议主席。本次大会得到国家科技部、国家自然科学基金委、医用镁合金产业联盟理事长单位—东莞宜安科技股份、许昌震华模具压铸有限公司、维恩克镁基材料有限公司等部门与企业的关注和大力支持。

本届研讨会设邀请报告 21 篇, 另设张贴报告 21 篇, 评选出 8 篇优秀墙报。来自中科院金属研究所、郑州大学、台湾阳明大学、北京大学、四川大学、上海交通大学、重庆大学、华南理工大学、西安交通大学、中国医科大学、西北有色金属研究院、中国科学理化研究所、中山大学第一附属医院、台湾高雄医学大学、台湾成功大学、台湾中兴大学、台湾金属工业研究发展中心等多所著名高校和研究院所的 100 余名代表参加了此次论坛。

本着促进海峡两岸生物医用材料领域的学术与技术交流, 共同探讨未来的发展方向的主旨, “第一届海峡两岸生物医用材料研讨会”于 2010 年在台湾阳明大学成功举办。本届研讨会以“新型生物医用材料的热点及前沿科学问题”为主题, 围绕钛合金、镁合金、不锈钢等生物材料微观结构改性、表面处理与生物性能相关性方面的最新研究进展进行了深入探讨和交流, 对拓宽视野, 激发创新激情, 进一步推动生物医用材料的学术研究和产业化进程将起到积极的作用。

(本刊通讯员)