文章编号：1004-0609(2010)S1-s0792-04

700 ℃时高温高强 BTi-6431S 合金的组织与力学性能

王小翔，王韦琪，马鸿海

(宝钛集团有限公司，宝鸡 721014)

摘 要：较全面地介绍一种 650~700 ℃时短时使用的新型高温高强钛合金 BTi-6431S 的组织和性能，包括该合金的室温和高温拉伸性能、短时蠕变和短时持久性能及显微组织。试验数据表明：该合金棒材、板材具有较高的室温强度和室温塑性，特别是在 650~700 ℃显示出比现有常规高温钛合金更高的高温强度以及大载荷持久和蠕变的良好匹配，可用于 650~700 ℃短时使用的宇航结构件。
关键词：BTi-6431S 合金；组织；力学性能
中图分类号：TG146 文献标志码：A

Microstructure and mechanical properties of high temperature and high strength BTi-6431S alloy at 700 ℃

WANG Xiao-xiang, WANG Wei-qi, MA Hong-hai

(Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties, such as room and elevated temperature tensile properties, instantaneous creep properties and rupture properties of an elevated temperature and high strength titanium alloy BTi-6431S at 650−700 ℃ were studied. The results show that BTi-6431S alloy has higher room and elevated temperature mechanical properties, and can be used as structure parts in aero-space industry at 650−700 ℃.
Key words: BTi-6431S alloy; microstructure; mechanical property

BTi-6431S 钛合金是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-W-Si 系高铝含量的$\alpha+\beta$型高温钛合金，它是我国自主设计研制开发的具有自主知识产权的 650~700 ℃短时高温钛合金。该合金通过高合金化和多元复合强化方式，在常用的高温钛合金 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 系的基础上同时加入一定量的 Nb 和 W 两种高熔点的β稳定元素，并适当将 Mo 元素含量调整到 3%左右，通过合金元素之间的合理匹配，使合金因细晶强化、固溶强化和第二相(α_2 相和硅化物)弥散强化等的共同作用，成为一种综合性能优异的多元复合强化的热强钛合金[1−4]，尤其是在 650~700 ℃的高温下具有很高的高温强度，并在大载荷下具有良好的持久和蠕变性能。

近年来，随着我国航天工业的快速发展，新型高性能飞行器的研制进入了关键阶段。由于其较高的飞行速度和较长的飞行距离，对壳体材料的耐高温性能提出了更高的要求。由于较高的飞行速度和较长的飞行距离，气体热效应造成的飞行器壳体表面温度达到 650~700 ℃，传统的 TC4 和 BT20 及现有成熟的高温钛合金已不能满足所需钛合金材料的技术指标要求。这是因为，虽然材料工作时间短，但其条件是十分苛刻的，即超出了目前常规钛合金的工作温度，又需要在大载荷下具有较好的持久和蠕变性能，以及材料成型时具有良好的工艺性能和焊接性能。为满足我国航天工业的需求，宝钛集团有限公司对该合金进行了多年的试验研究工作，先后完成小型试验、中型扩大试验和大型工业铸锭熔炼、棒材、饼环材、薄板和厚板加工和热处理等试验研究工作，已熔炼直径为 710 mm 大型工业铸锭，加工多种规格棒材(d12~150 mm)和板

通信作者：王小翔；电话：0917-3382401；E-mail: bjwangxx@163.com

材 ((1.0~30 mm)×(900~1 000 mm)×(2 000~3 000 mm))，经多个航天应用单位复验和使用表明，这些材料达到技术指标要求，制造的相关结构件的质量满足使用要求。目前，已形成该合金棒材、环材、薄板和厚板专用技术标准。

1　合金化学成分

BTi-6431S 钛合金是一种 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-W-Si 系多元复合强化的高温钛合金，它的成分(质量分数，%)：Al 6.0~7.2；Sn 2.5~3.5；Zr 2.5~3.5；Mo 1.0~3.2；Nb 1.0~3.2；W 0.3~1.2；Si 0.1~0.5，其余为钛和不可避免的杂质元素。BTi-6431S 钛合金含有足量的α稳定元素 Al 和中性元素 Sn、Zr 和一定量的 Mo、Nb 和 W 等β稳定元素，同时还含有 Si 等元素，使合金得到充分的固溶强化，又使合金获得金属间化合物(α_2)和硅化物弥散强化，由于各种合金元素的相互作用，使合金在 650~700 ℃具有较高的高温强度和良好的大应力短时持久和蠕变性能。

2　合金的部分物理性能

BTi-6431S 钛合金的密度：4.53×10^3 kg/m^3；相转变温度：(1 010±20) ℃；洛氏硬度：34.5~38.0(简单退火态)，40~41(双重热处理状态)。热性能和弹性性能等的曲线图和典型数据见图 1 和表 1。由图 1 可以看出，该合金的相转变温度在 1 000 ℃左右，室温弹性模量高达 121 GPa。

表 1　BTi-6431S 钛合金不同温度下的弹性模量

Table 1　Elastic modulus of BTi-6431S alloy at different temperatures

Specimen	δ/mm	Condition	Sample direction	θ/℃	E/GPa
Sheet	1.0	Anneal	T	20	121.00
				550	83.05
				600	74.20
				650	59.09

3　力学性能

3.1　常规力学性能

BTi-6431S 钛合金典型规格棒材、厚板和薄板的实测常规力学性能见表 2。由表 2 可以看出，BTi-6431S 钛合金在室温下具有较高强度和良好的塑性匹配。同时，随着棒材规格的增大，室温抗拉强度和塑性呈下降趋势。

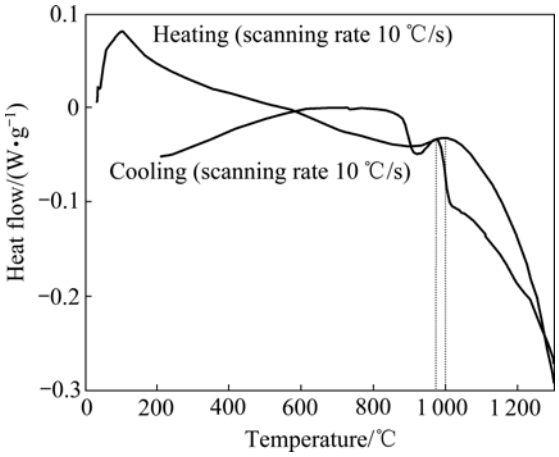

图 1　BTi-6431S 合金的 DSC 曲线

Fig.1　DSC curves of BTi-6431S alloy

表 2　BTi-6431S 钛合金典型规格产品的室温拉伸性能

Table 2　Room temperature tensile properties of typical BTi-6431S alloy products

Specimen	Specifications/mm	σ_b/GPa	$\sigma_{0.2}$/GPa	δ_5/%	ψ/%
Bar	d16	1.21	1.16	14.0	34.5
	d23	1.20	1.10	14.0	26.0
	d118	1.10	1.00	10.0	16.0
	d150	1.00	0.90	6.0	13.0
Sheet	δ30.0	1.10	1.00	8.0	20.0
	δ2.5	1.20	1.10	10.0	−
	δ2.0	1.10	1.00	11.0	−
	δ1.5	1.20	1.10	12.0	−
	δ1.0	1.20	1.10	7.5	−

3.2　不同温度下的拉伸性能

BTi-6431S 钛合金典型规格产品不同温度下的拉伸性能见表 3、图 2 和 3。图 2 所示为 BTi-6431S 钛合金与国内现有 500 ℃以上长时使用的钛合金的在 650 ℃高温拉伸强度的对比。由图 2 可以看出，BTi-6431S 在 650 ℃时的高温拉伸强度远远高于 TC11、Ti-6242S、Ti-55 和 BT25 等高温钛合金的高温拉伸强度。由图 3 可以看出，BT-6431S 钛合金薄板在 650 ℃的拉伸强度为 700 MPa 左右，700 ℃时为 550 MPa 左右，750 ℃时为 450 MPa 左右，在 650~700 ℃温度区间仍具有 550~700 MPa 的抗拉强度，屈服强度在 335~500 MPa 之间。

表 3 BTi-6431S 钛合金不同规格棒材的高温拉伸性能

Table 3 High temperature tensile properties of different BTi-6431S alloy bars

Species	Diameter/mm	Temperature/℃	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
Bar	*d*16	700	610	450	30.5	82.5
	*d*23	700	620	455	22.0	77.0
	*d*118	650	630	545	20.0	51.0
	*d*150	650	645	510	28.0	56.0

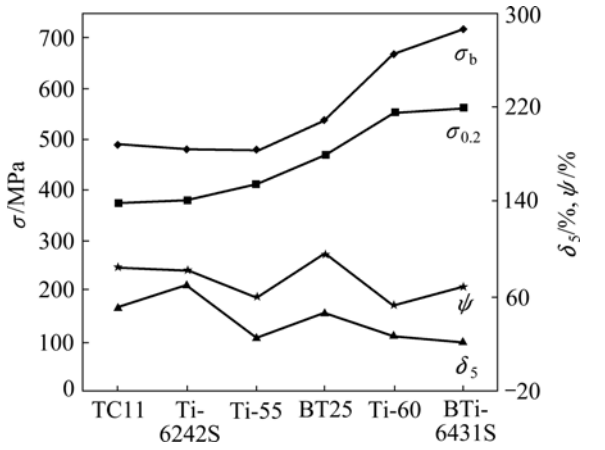

图 2 几种常用高温钛合金在 650 ℃的高温拉伸性能

Fig.2 Tensile properties for elevated temperature and common alloys at 650 ℃

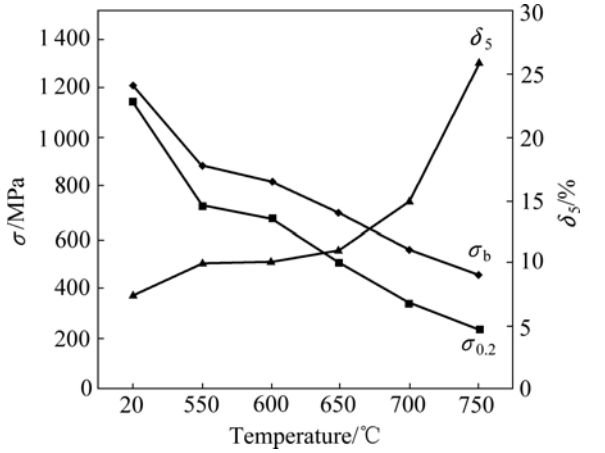

图 3 BTi-6431S 钛合金薄板不同温度下的拉伸性能

Fig.3 Tensile properties of BTi-6431S titanium alloy sheets at different temperatures

3.3 短时高温持久和蠕变性能

BTi-6431S 钛合金及与其他国内现有 500 ℃以上长时使用的钛合金在 650 ℃，500 MPa 条件下的持久和蠕变性能见图 4 和 5(均为棒样)。由图 4 可以看出，在 650 ℃，500 MPa 条件下，现有常规高温钛合金中只有 BT25 和 Ti-60 钛合金在加载完后持续了 6~8 min 断裂，其余均在 5 min 以下断裂，而 BTi-6431S 钛合金在 650 ℃，500 MPa 条件下，30 min 仍未断裂，显示出很高的高温大应力持久性能；相对来说，Ti-60 和 BTi-6431S 钛合金的塑性伸长率最小，分别为 10% 和 2%，其余高温合金的塑性伸长率均在 15%以上。

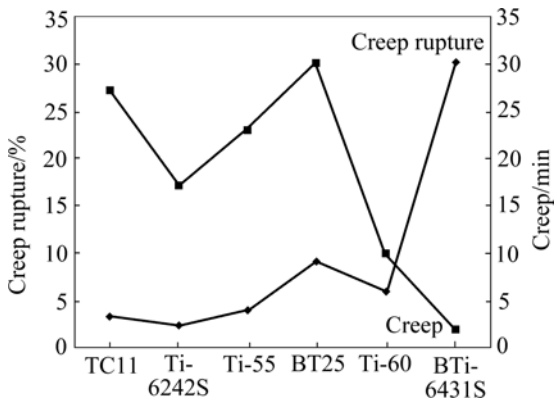

图 4 BTi-6431S 和几种高温钛合金在 650 ℃持久蠕变性能

Fig.4 Creep and creep rupture properties of BTi-6431S and other common high temperature titanium alloy at 650 ℃

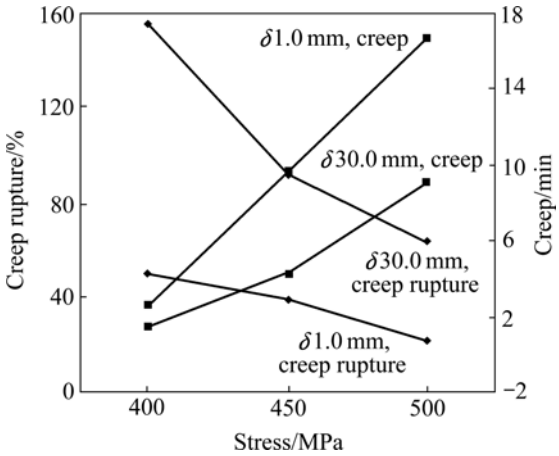

图 5 δ1.0 mm 和δ30 mm 厚板的持久蠕变

Fig.5 Creep and creep rupture properties of δ1.0 mm and δ30 mm BTi-6431S alloy sheets

4 工艺性能

4.1 弯曲性能

BTi-6431S 钛合金薄板的室温弯曲性能见表 4。由表 4 可以看出，BTi-6431S 钛合金薄板在室温下具有

表 4 BTi-6431S 钛合金薄板的室温弯曲性能

Table 4 Room temperature bend properties of BTi-6431S alloy sheet

Diameter/mm	Bend factor	Bend angle/(°)
2.0	12T	90
1.0	12T	50

良好的工艺性能。

4.2　焊接性能

BTi-6431S 钛合金薄板(δ1.5 mm)的电子束焊接头室温拉伸性能见表 5。从表 5 可以看出，BTi-6431S 钛合金薄板电子束焊接后，室温塑性下降不大，说明其焊接性能良好。

表 5　BTi-6431S 钛合金薄板的电子束焊接性能

Table 5　Electron beam welding characteristics of BTi-6431S alloy sheets

Specimen	σ_b/GPa	$\sigma_{0.2}$/GPa	δ_5/%
Base metal	1.17	1.14	9
Weld joint	1.21	1.19	7

5　显微组织

图 6 所示为 BTi-6431S 钛合金几种典型规格产品的显微组织。其中图 6(a)所示为 d23 mm 轧制棒材简单退火的显微组织；图 6(b)为 30 mm 厚板经β轧制后的显微组织；图 6(c)~(f)为 2.0 mm 薄板在不同轧制工艺下的显微组织。

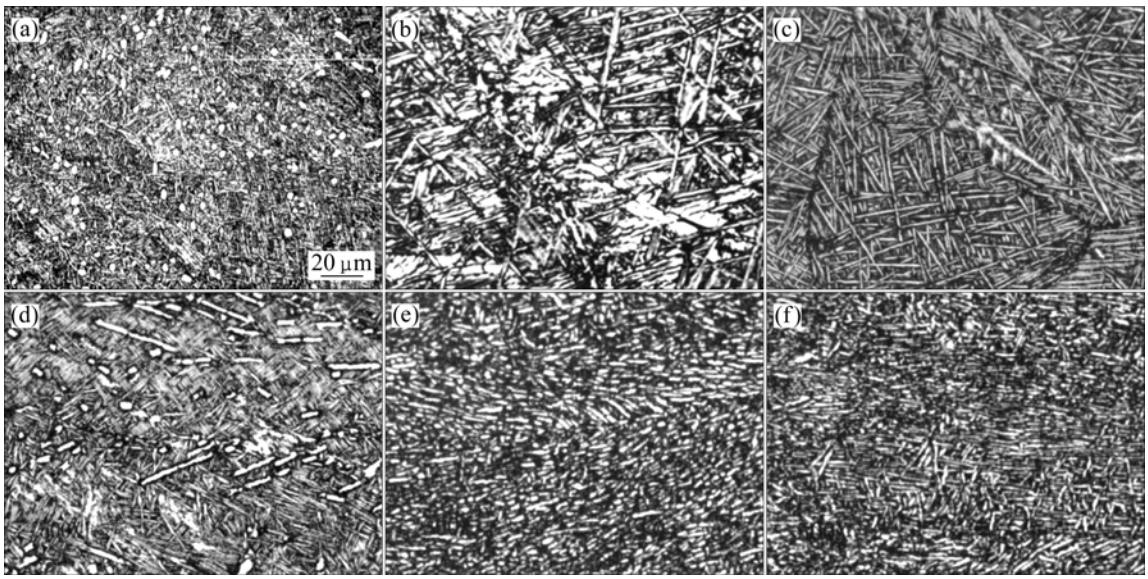

图 6　BTi-6431S 钛合金几种典型规格产品的显微组织

Fig.6　Microstructures of typical BTi-6431S alloy products: (a) d23 mm, bar; (b) δ30 mm, sheet; (c) δ2.0 mm, sheet; (d) δ2.0 mm, sheet; (e) δ2.0 mm, sheet; (f) δ2.0 mm, sheet

6　结论

1) BTi-6431S 具有优异的综合性能，特别是在 650~700 ℃高温下具有较高的拉伸强度和良好的大应力条件下的持久和蠕变性能。

2) BTi-6431S 合金未来有望在航天高速飞行器的高温结构件上获得应用。

REFERENCES

[1]　王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 110−120.
WANG Jin-you, GE Zhi-ming, ZHOU Yan-bang. Aeronautical titanium alloys[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 110−120.

[2]　张　均, 李　冬. 高温钛合金中的α_2相[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002: 174−175.
ZHANG Jun, LI Dong. α_2 ordered phase in high temperature titanium alloys[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2002: 174−175.

[3]　C. 莱茵斯, M. 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 26−27.
LYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy[M]. CHEN Zhen-hua, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 26−27.

[4]　张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 27−28.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and application[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005: 27−28.

(编辑　杨幼平)