

退火处理对 Ti-55531 钛合金组织与性能的影响

李志燕^{1,2} 夏晓洁¹ 吴国清¹ 黄正¹

(1 北京航空材料研究院,北京 100095)

(2 北京航空航天大学,北京 100191)

文 摘 对退火处理后的 Ti-55531 钛合金 α 片层宽度、 β 晶粒尺寸、晶界 α 相不连续度和针状 α 相比比例等特征进行了定量表征和统计分析,探讨了随着退火温度的升高, Ti-55531 钛合金显微组织及其力学性能的相关性。结果表明,在 β 相区退火处理,退火温度的升高将引起晶内 α 片粗化长大,平均 β 晶粒尺寸从 86 μm 增大到 210 μm ,晶界不连续度降低,针状 α 相的相比比例先降低后升高。 β 晶粒尺寸与延伸率、静韧度、裂纹形成功负相关,与裂纹扩展功正相关;晶界不连续度与静韧度正相关;针状 α 相比比例与屈服强度正相关。

关键词 近 β 钛合金,退火,显微组织,统计

中图分类号: TG14

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.012

Effects of Annealing Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Ti-55531 Titanium Alloy

LI Zhiyan^{1,2} XIA Xiaojie¹ WU Guoqing¹ HUANG Zheng¹

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(2 School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract The relationships between microstructures and mechanical properties of Ti-55531 titanium alloy were investigated, by using statistic analysis on the microstructure characteristics, such as width of α platelet, β grain size, grain boundary α discontinuity and volume fraction of α phase. The results show that, with the increase of the temperature of annealing, the average β grain size increases from 86 μm to 210 μm , grain boundary α discontinuity decreases, the volume fraction of needle-like α phase decreases first and then increases. The extension rate, statics toughness and crack initiation energy decrease while the crack propagation energy increase with the growth of β grain size. Statics toughness is positive correlated with the grain boundary α discontinuity. There is a positive correlation between the volume fraction of α phase and yield strength.

Key words Near β titanium alloy, Annealing, Microstructure, Statistics

0 引言

Ti-55531 钛合金是法国 AIRBUS 公司和俄罗斯 VSMPO 公司共同开发的新型近 β 钛合金^[1-2],其名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr。该合金具有高比强度,良好的断裂韧性和强塑性匹配,已用于空客 A380 发动机挂架和机翼间的连接装置^[3-4]。与 Ti-1023 相比, Ti-55531 合金具有更好的淬透性,较宽的加工温度范围,不会产生明显的成分偏析^[5-6]。波音公司专利^[7]认为高强高韧钛合金在 β 相区退火加时效处理,可获得更好的强塑性匹配,并指出在相同条

件下,较低冷速能有效提高塑性与断裂韧性。付艳艳等^[8]研究冷却速度对 Ti-55531 钛合金组织和性能的影响,结果表明随冷却速度的降低,强度有降低趋势而塑性提高。而关于 Ti-55531 钛合金热处理工艺与显微组织特征、力学性能之间的定量关系尚未见诸报道。文献^[9]中指出连续晶界 α 相对力学性能有不利影响,导致合金塑性和冲击性能的降低。

本文针对钛合金 α 片层宽度、 β 晶粒尺寸和 α 相的相比比例等显微组织特征,采用不连续晶界 α 相长度与晶界总长度之比定义为晶界 α 相不连续度,

收稿日期:2015-03-30

作者简介:李志燕,1982 年出生,硕士,工程师,主要从事钛合金材料技术研究。E-mail: lizhiyan_2006@126.com

以表征不连续晶界 α 相的影响,探讨了退火温度与 Ti-55531 钛合金显微组织和力学性能的定量关系。

1 试验

1.1 材料及仪器设备

表 1 Ti-55531 钛合金化学成分

Tab.1 Chemical compositions of Ti-55531 titanium

											wt%
Ti	Al	Mo	V	Cr	Zr	Fe	Si	C	O	N	H
Bal.	5.18 ~ 5.24	5.00	4.91	2.74 ~ 2.78	1.10	0.39	0.06	0.01	0.10	0.007	<0.001

采用北京航空材料研究院的 SX3-10-13 型热处理炉进行退火试验,合金分别在 820、830、840、860、870、880、900 $^{\circ}$ C 下保温 1.5 h,随炉冷却至 580 $^{\circ}$ C,保温 8 h 后空冷至室温。

1.2 性能测试

按照 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》执行,按北京航空材料研究院标准 2591—S030 加工,拉伸试验在 CMT 系列微机控制电子万能试验机上完成,试样沿棒材长度方向切取,标距尺寸为 Φ 5 mm \times 25 mm,拉伸机夹头移动速率为 0.5 mm/min。冲击试验在 NI750C 型仪器化冲击试验机上进行,试验按照 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》执行,试样按北京航空材料研究院标准 2591—S039 加工成 10 mm \times 10 mm \times 55 mm 的 V 型缺口试样。利用示波冲击试验法将冲击功分为裂纹形成功和裂纹扩展功两部分。

在 OLYMPUS BX51M 光学显微镜和 S4800 场发射扫描电子显微镜上进行组织观察。试样腐蚀剂为:10 mL H₂O+3 mL HNO₃+1 mL HF。对每组热处理试样选取 15 张扫描电镜照片,使用图像分析软件 Image-Pro[®] Plus 6.0 对合金组织进行量化分析和表征。

对 α 片层宽度的统计方法如图 1 所示:在扫描照片中任取圆心画一个直径为 20 μ m 的圆,统计所有与圆周相交的 α 片层宽度,每种热处理状态下统计的 α 片数量不少于 300 个。对 β 晶粒尺寸的测量

Ti-55531 合金棒材,北京航空材料研究院, Φ 125 mm \times 550 mm。合金成分见表 1,原始组织为等轴组织,等轴 α 相的相比率为 43%。金相法测得合金相变点为(845 \pm 5) $^{\circ}$ C。

采用面积分析法:对低倍金相照片进行晶界描绘,将图像导入 Image-Pro Plus 图像处理软件,通过灰度处理、中值滤波等处理手段识别出金相磨面上各晶粒的面积。每种热处理状态下统计的 β 晶粒数量不少于 200 个。

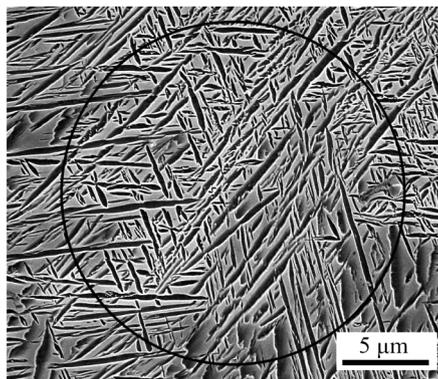


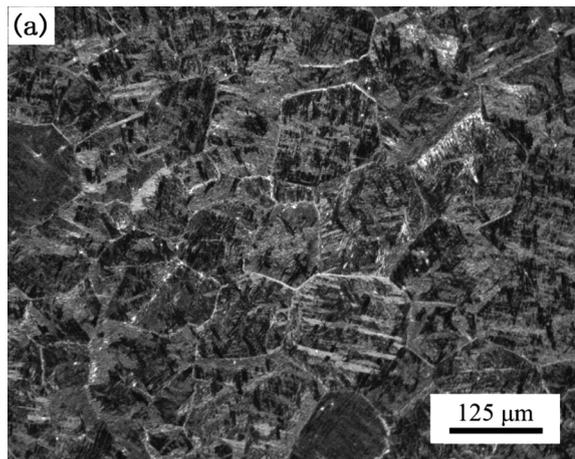
图 1 组织参数统计过程中 α 片的选取方法

Fig.1 Selection method of α platelet in the process of statistical microstructure parameters

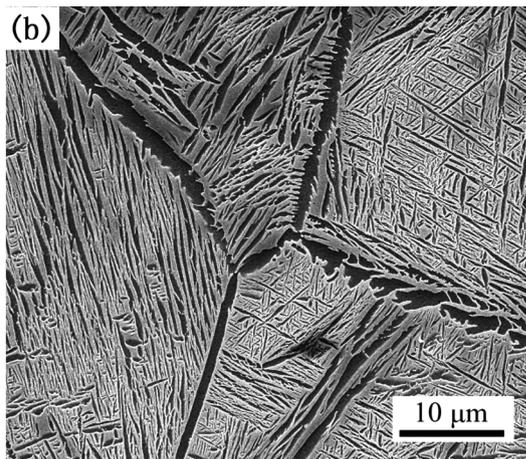
2 结果与讨论

2.1 退火处理对合金组织的影响

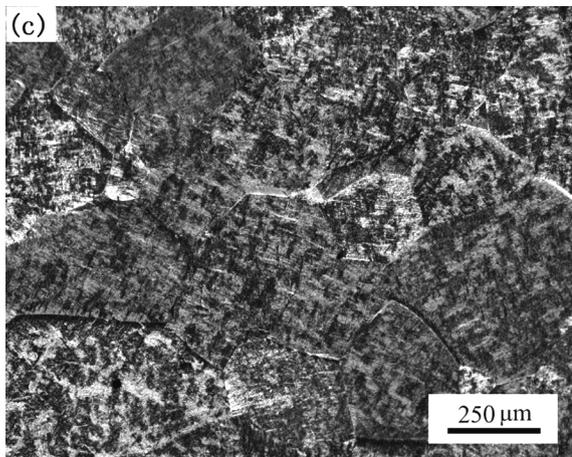
图 2 给出了 Ti-55531 合金经不同退火处理后的典型组织照片。可以看出,合金在 840 $^{\circ}$ C 退火处理后,生成了含粗大 β 晶粒(20 ~ 500 μ m)的魏氏组织[图 2(a)]。在原 β 晶界上有 α 相不连续析出;晶内分布着短杆状和针状 α 相。退火温度由 840 $^{\circ}$ C 升高至 900 $^{\circ}$ C, β 晶粒有长大趋势[图 2(a)、图 2(c)]。



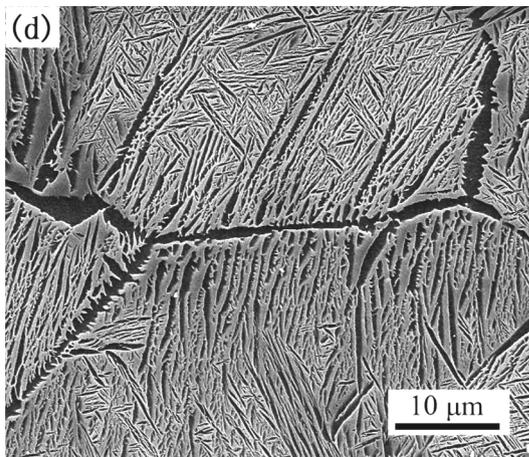
(a) OM(840 $^{\circ}$ C)



(b) SEM(840 $^{\circ}$ C)



(c) OM(900°C)



(d) SEM(900°C)

图2 Ti-55531 钛合金不同温度退火处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructure of Ti-55531 at different annealing temperature

对 Ti-55531 钛合金分别在 840 和 900°C 退火处理后的 α 片宽度进一步分析,对其概率密度进行数值拟合,结果见图 3。退火时效处理后的 α 片层宽度的概率密度分布均符合对数正态分布:

$$f(x) = f_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi\omega x}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\omega^2}\right]$$

式中, μ 与 ω 分别是变量对数的平均值与标准差。可以看出,840°C 退火处理时,合金中 α 片层宽度分布较均匀,近似正态分布;当退火温度升至 900°C 时, α 片层宽度变化范围由 [0.1, 0.5] 扩展为 [0.1, 0.7]; 概率密度曲线的峰值向左偏斜,说明 900°C 退火处理后合金组织中 α 片宽度的分布呈现趋向不均匀趋势,出现了少量 α 片层的粗化。从数量上看大部分 α 片的宽度小于其各自的平均值。有少数的参数值要高于甚至远高于其平均值,而这部分宽度高于平均值的少量 α 片在变形过程中可能与其他晶粒之间出现变形不协调的现象,影响其变形性能。

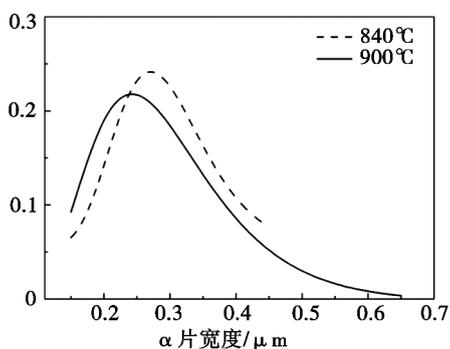
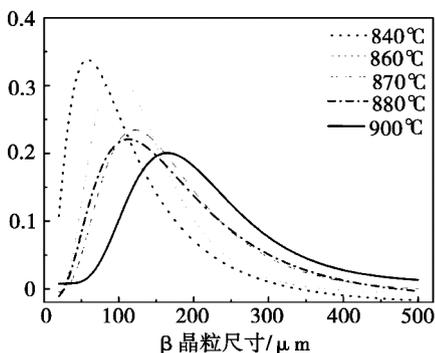


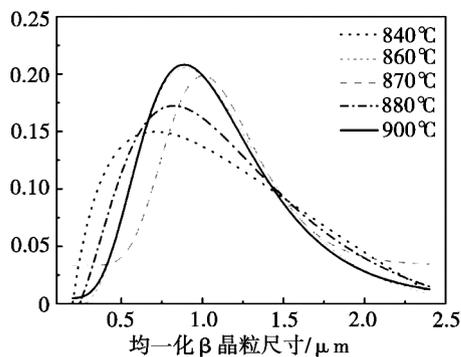
图3 退火温度对 Ti-55531 钛合金 α 片宽度的影响

Fig. 3 Effects of annealing treatment on width of α platelet of Ti-55531 titanium alloy

对不同退火处理后的 β 晶粒尺寸进行统计分析,拟合得到概率密度分布曲线,结果见图 4(a)。随退火温度由 840°C 升高至 900°C,曲线峰值向右偏移,峰值变小,出现峰的宽化,说明随退火温度升高, β 晶粒呈现整体长大的趋势,较小的 β 晶粒的长大程度较大, β 晶粒尺寸分布趋于均匀。



(a) β 晶粒尺寸



(b) 均一化 β 晶粒尺寸

图4 退火温度对 Ti-55531 钛合金 β 晶粒尺寸分布的影响

Fig. 4 Effects of annealing treatment on distribution of β grain size of Ti-55531 titanium alloy

对 β 晶粒尺寸进行归一化(单个参数值/该工艺下该参数的平均值)处理,拟合得到概率分布曲线,结果见图 4(b)。随退火温度由 840°C 升高到 870°C,

β 晶粒大小的概率密度曲线峰值向右偏移;在 870°C 退火时,其分布接近正态分布;退火温度由 870°C 升高至 900°C 时,曲线峰值向左偏移。即在 840 ~ 870°C

退火处理时,β晶粒尺寸分布由不均匀向均匀化转变,当退火温度过高(870~900℃)时,部分晶粒剧烈长大,β晶粒尺寸不均匀程度加大。

不同温度退火处理后合金的力学性能统计结果

表2 不同退火处理后合金组织参数的定量统计与力学性能测试结果

Tab. 2 Results of microstructures by using statistic analysis and mechanical properties

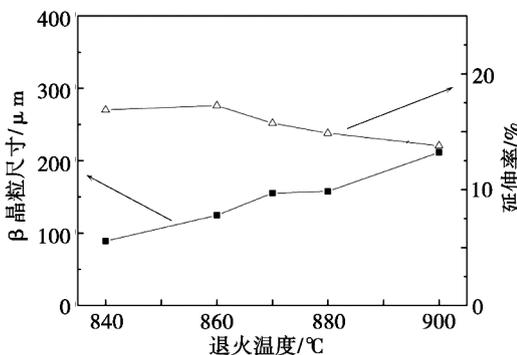
退火温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	静韧度/MJ·m ⁻³	冲击总功/J	裂纹形成功/J	裂纹扩展功/J
840	1154	1088	16.9	236.4	26.9	17.2	9.7
860	1158	1082	17.3	210.2	24.6	15.4	9.2
870	1156	1059	15.7	212.4	25.5	14.8	10.7
880	1150	1066	14.9	202.9	25.2	15.1	10.1
900	1176	1078	13.8	177.4	23.6	12.6	11.1

2.2 组织参数与拉伸性能的相关性

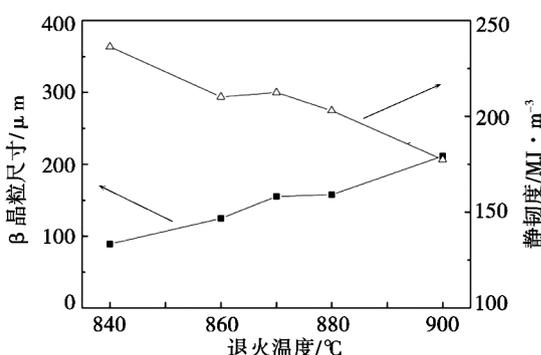
由图5(c)(d)可以看出,随着退火温度的升高,晶界α相不连续度呈降低的趋势,在退火温度高于860℃时这种趋势变缓;针状α相的相比比例先减小后增大,变化范围较小。

针状α相比比例与合金的屈服强度呈正相关,如

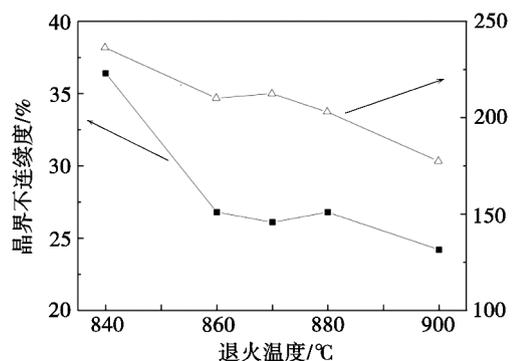
图5(d)所示。钛合金中α相和β相的强度都很低,而弥散分布的针状α相可增大α-β相界面,对位错运动起到阻碍作用,从而提高合金强度。在α片宽度变化较小时,针状α相的相比比例增大,相界面强化效果更好,合金屈服强度提高,因此针状α相的相比比例与屈服强度正相关。



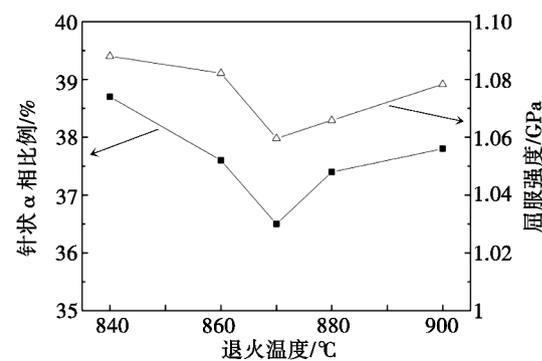
(a) β晶粒尺寸与延伸率



(b) β晶粒尺寸与静韧度



(c) 晶界α相不连续度与静韧度



(d) 针状α相比比例与屈服强度

图5 Ti-55531钛合金组织参量与拉伸性能的相关性

Fig. 5 Relationships of microstructure parameters and tensile properties

β晶粒尺寸与合金延伸率负相关[图5(a)]。合金组织为等轴β晶粒,晶内存在取向各异的α束域,在拉伸载荷下,此种组织的晶粒难以协调变形,在晶界处和不同位向的α束域交界处易发生滑移堵塞,出现应力集中。β晶粒尺寸越粗大,晶粒协调变

形能力越差,在宏观应变较小的情况下即可因为局部的应力集中而产生破坏,因而合金延伸率较低。退火温度由840℃升高至860℃时,β晶粒尺寸由89.1 μm升高至124.8 μm,而合金延伸率无明显变化,这可能是由于β晶粒尺寸分布趋向均匀,晶界处的应

力分布更为均匀,在一定程度上提高了延伸率。

β 晶粒尺寸与静韧度负相关[图 5(b)],晶界 α 相不连续度与静韧度正相关[图 5(c)]。静力韧度为材料强度和塑性的综合指标,反映了材料从变形到断裂所吸收的功。由于 β 基底与晶界 α 相的强度不匹配,在拉伸载荷作用下,晶界处会产生较高的应力集中并形成空洞,导致在较低的宏观应变下三叉晶界处即可萌生裂纹,裂纹沿晶界扩展,发生沿晶脆断。当 β 晶粒尺寸细小时,三叉晶界数目较多,可有效分散应力,在断裂前合金有较大的塑性变形,静力韧度值较大。晶界 α 相不连续析出时,在拉伸载荷作用下裂纹可在晶界处和晶内扩展,增大了穿晶韧断的可能,合金变形需要更多的能量,故而提高了合金的静力韧度。

2.3 组织参数与冲击性能的相关性

β 晶粒尺寸与裂纹形成功负相关,与裂纹扩展功正相关,冲击总功的变化主要体现在裂纹扩展功的变化上(图 6)。冲击试样在经摆锤打击发生断裂时,其断裂过程是裂纹萌生和裂纹扩展过程,裂纹形成功主要消耗于试样的弹性、塑性变形以及微裂纹的形成,而裂纹扩展功主要消耗于裂纹前沿微观塑性变形及裂纹的扩展。 β 晶粒尺寸的细化可提高合金的塑性变形能力,在裂纹扩展前可进行一定程度的塑性变形,提高了合金的裂纹形成功。随着退火温度升高, β 晶粒尺寸增大,晶内 α 片出现部分粗化的现象。 α 片宽度增大后,裂纹扩展与之相遇,要产生一定的塑性变形,增大了裂纹扩展所需能量; β 晶粒尺寸较大时,裂纹沿晶界扩展在晶界处发生大角度偏转,使裂纹扩展途径曲折,吸收的能量也越多,所以合金的裂纹扩展功增大。

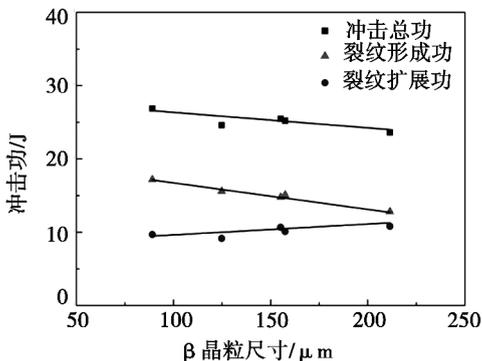


图 6 β 晶粒尺寸与冲击功的相关性

Fig. 6 Relationships of β grain size and ballistic work

3 结论

(1) 在单相区等温退火处理, Ti-55531 合金为具有粗大 β 晶粒魏氏组织, 在原 β 晶界有 α 相不连续析出。随着退火温度的升高, 少量的晶内 α 片粗化长大, β 晶粒尺寸明显增大(86 ~ 210 μm), 晶界不连续度降低, 针状 α 相的相比比例先降低后升高。

(2) 退火温度对合金强度影响较小。随着退火温度的升高, 合金延伸率、静韧度、冲击总功和裂纹形成功均呈降低的趋势。

(3) 合金针状 α 相比比例与屈服强度正相关, β 晶粒尺寸与延伸率、静韧度及裂纹形成功负相关, 与裂纹扩展功正相关; 晶界不连续度与静韧度负相关。

参考文献

[1] Duret N. Titanium for damage tolerance applications on A 380[A]. Ti-2003 Science and Technology. Hamburg: DGM, 2003

[2] Warchomicka F, Poletti C, Stockinger M. Study of the hot deformation behaviour in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(28): 8277-8285

[3] Tetyukhin V V, Zakharov J I, Levin I V. Titanium-based alloy and method of heat treatment of large-sized semifinished items of this alloy: U. S. Patent 7,332,043[P]. 2008-2-19

[4] Pora J. A380 结构的先进材料和技术——未来发展的技术平台[J]. 航空维修与工程, 2003(6): 50-52

[5] Maeda T, Shirai Y. Superplasticity in the Aerospace Titanium Alloy Ti-5553 [C] // Materials Science Forum., 2013, 735: 140-145

[6] Boyer R R, Briggs R D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685

[7] Robert D. Briggs, Auburn. Tough, high-strength titanium alloys; methods of heat treating titanium alloys; U. S. Patent 7,785,429[P]. 2010-8-31

[8] 付艳艳, 惠松骁, 叶文君, 等. 冷却速度对 VST55531 钛合金的显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 685-689

[9] 葛鹏, 赵永庆, 周廉. 热处理对 1 种新型亚稳定 β 钛合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(9): 968-971

(编辑 吴坚)