

高强钛合金的发展与应用

王鼎春

(宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014)

摘 要: 介绍高强钛合金的发展与应用现状, 着重分析美国、俄罗斯高强钛合金的发展、现状及应用, 探讨高强钛合金的发展方向, 并对高强钛合金的发展趋势进行了展望。

关键词: 钛合金; 应用; 发展

中图法分类号: TG146.2

文献标志码: A

Development and application of high-strength titanium alloys

WANG Ding-chun

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

Abstract: The history of development and application of high-strength titanium alloys were reviewed with the emphases on the cases of the United States and Russia. The development trends of these alloys were discussed. And the future trends in high-strength research were proposed.

Key words: titanium alloys; application; development

钛及钛合金由于比强度高、耐腐蚀性好等特点, 在承力结构材料方面得到了越来越广泛的应用。20 世纪 50 年代初, 钛成功地应用在飞机上, 虽然当时每架飞机的用钛量只占飞机结构质量的 1%, 但是开拓了钛在宇航工业中应用的广阔前景。现在世界上各种高速飞行器(飞机、火箭等)都广泛采用高强钛合金作为结构材料, 尤其是在宇航结构件中的应用越来越多, 如战斗机中的钛比例已从最初的 1% 提高到现在的 41%。目前, 高强钛合金^[1-3]已成为钛合金发展和应用的主要方向之一。高强钛合金是指经热处理后室温强度大于 1 100 MPa 的钛合金, 它包括热处理强化马氏体 $\alpha+\beta$ 型合金、近亚稳 β 型钛合金和亚稳 β 型钛合金 3 种类型, 主要用来代替飞行器结构中常用的高强结构钢, 可使结构件质量减轻 30%~40%。如美国的 Ti-4Al-3Mo-1V, Ti-6222S, Ti-1023, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 和 β 21S 等合金; 俄罗斯的 BT14, BT15, BT16, BT22, BT23 和 BT35 等合金; 中国的 TB2, TB3, TB5, TB6, TB8,

Ti-62A, TC18, TC21 和 BTi-6554 等合金。

1 各国高强钛合金发展现状

单纯靠合金化强化的钛合金的室温拉伸强度一般不超过 1 100 MPa, 如果需要更高强度的结构钛合金, 则必须发展可热处理强化的钛合金。热处理强化钛合金, 在保持所需塑性的情况下, 有可能将室温拉伸强度提高到 1 500 MPa。40 余年来, 钛合金的发展取得了巨大成就, 其抗拉强度从 300~400 MPa 提高到 1 500 MPa 左右, 从而在航空工业上的应用迅速增加, 广泛应用于各种飞机和发动机上, 在 F-22 战斗机和 V2500 发动机上的用量分别占到结构质量的 41% 和 31%。可以说, 钛合金在现代飞机上的应用, 已经成为航空业发展的重要标志之一。

20 世纪 80 年代以来,为满足飞机结构用钛的需求,高强钛合金获得了长足发展,其中,对高强钛合金研究最广泛、生产量最大和应用量最多的应属美国和俄罗斯,已形成了各自发展且各具特色的局面。俄罗斯研究人员研究了 Mo 当量对钛合金拉伸强度的影响,如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着 Mo 当量增大到 10%~11%,退火钛合金的强度提高,这时,合金组织大致为相等数量的 α 和 β 相,然后强度下降。固溶时效钛合金的拉伸强度随着 Mo 当量增加到 12%~14%而提高,然后下降。这是因为,当 Mo 当量增加到临界浓度时,淬火时形成的亚稳定 β 相的数量增加。因此,为获得高强度钛合金,在合金设计时应通过计算其 Mo 当量,来优选合金成分。图 2 和图 3 所示分别为两相高强钛合金以及近亚稳 β 和亚稳 β 高强钛合金的 Mo 当量图。俄罗斯和美国从 20 世纪 50 年代就开始了高强钛合金的研究,经过 40 余年的研究,通过开展大量的合金化、加工工艺和热处理工艺等基础性研究和工艺试验,逐步形成了各自的高强钛合金牌号体系。表 1 所列为美国和俄罗斯的主要高强钛合金的化学成分和力学性能。

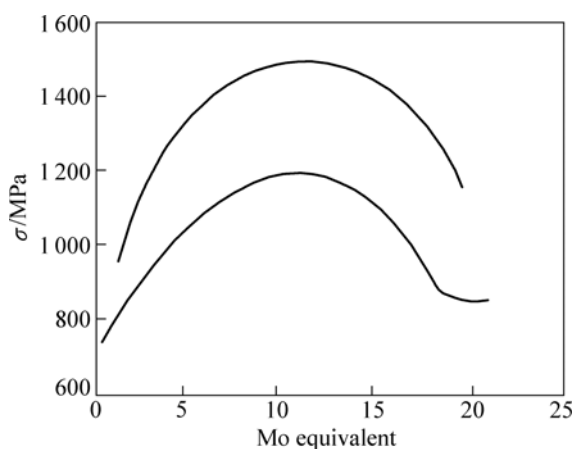


图 1 Mo 当量对钛合金拉伸强度的影响

Fig.1 Effect of Mo equivalent on strength of titanium alloy

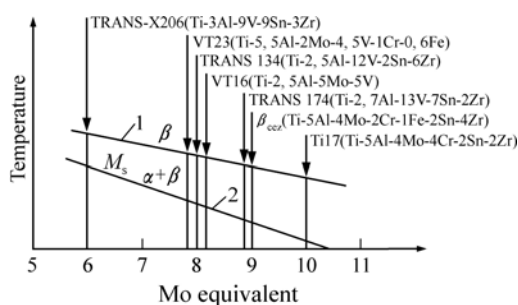


图 2 两相高强钛合金的 Mo 当量图

Fig.2 Mo equivalent of double phase high-strength titanium alloy

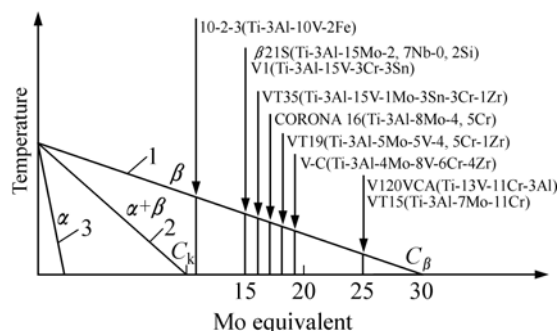


图 3 近亚稳 β 和亚稳 β 高强钛合金的 Mo 当量图

Fig.3 Mo equivalent of near second stationary and second stationary high-strength beta titanium alloy

2 几种典型高强钛合金的组织性能

就合金研究和应用的成熟性而言, Ti-1023 和 BT22 合金等是最具代表性的高强钛合金,已得到较广泛应用。Ti-62222S 钛合金是近年来开始应用且应用前景较好的新型高强钛合金。

2.1 Ti-1023(TB6)钛合金

Ti-10V-2Fe-3Al 属近亚稳 β 钛合金,具有比强度高、断裂韧性好、各向异性小、锻造温度低、抗应力腐蚀能力强、焊接性能良好等一系列优点,可通过热处理实现不同强度、塑性及韧性水平的配合,能够满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求。表 2 所列为 Ti-1023 合金大规格棒材不同热处理制度下的室温力学性能,图 4 所示为该合金棒材的显微组织。

2.2 BT22(TC18)钛合金

BT22 合金名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe,是前苏联航空材料研究院于 1974 年研制成功的,在退火或锻造状态下强度极限可达 1 080 MPa,并具有较好的伸长率、断面收缩率和冲击韧性,在强化热处理状态其强度高达 1 370 MPa。该合金可制成锻件、模锻件、棒材、型材、厚板和管材,尤其是可用它制成大型锻件和模锻件(质量达几 t)。合金半成品根据不同用途其强度分为 3 个等级,即:1) 强度 $\geq 1 078$ MPa; 2) 强度 $\geq 1 127$ MPa; 3) 强度 $\geq 1 275$ MPa。该合金具有高的塑性和很好的淬透性(可达 200 mm)。俄罗斯等对该合金的加工技术进行了深入研究,较好地掌握了其加工工艺技术。表 3 所列为 BT22 合金大规格棒材的室温力学性能,图 5 所示为该合金棒材的显微组织。

表 1 美国和俄罗斯主要高强钛合金化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of high-strength titanium alloy in American and Russian

合金类型	合金牌号	合金成分	Mo 当量	热处理	σ/MPa	$\delta/\%$
$\alpha+\beta$ 合金	Ti-431	Ti-4Al-3Mo-1V	3.7	淬火+时效	1 350	3~5
	BT14	Ti-5Al-3Mo-1V	3.7	淬火+时效	1 275	4~6
	Ti-62222S	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	5.3	退火	1 190	11.5
				淬火+时效	1 330	7.5
	Ti-6246	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	6.0	退火	1 162	10
				淬火+时效	1 214	13
	BT3-1	Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si	6.0	退火	1 105	12
				淬火+时效	1 270	7~12
	BT23	Ti-5Al-4.5V-2Mo-1Cr-0.6Fe	8.1	退火	1 150	7
				淬火+时效	1 460	≥ 5
	SP-700	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe	8.1	退火	1 007	18.4
				淬火+时效	1 377	12
近亚稳 β 合金	BT16	Ti-3Al-4.5V-5Mo	8.2	退火	890	≥ 14
				淬火+时效	1 100	14
	BT22M	Ti-5Al-5Mo-1V-1Cr-1Fe-1.5Sn-2Zr	9.4	退火	1 200	≥ 6
	β CEZ	Ti-5Al-4Mo-2Cr-1.2Fe-2Sn-4Zr	9.7	淬火+时效	1 506	13
	Ti-17	Ti-5Al-2Sn-4Mo-4Cr-2Zr	10.7	退火	1 160	10
				淬火+时效	1 300	13
	β	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	11.5	淬火+时效	1 413	7
	Ti-1023	Ti-10V-2Fe-3Al	11.1	淬火+时效	1 275	7.5
	BT22	Ti-5Al-4.75Mo-4.75V-1Cr-1Fe	11.8	退火	1 175	12
				淬火+时效	1 475	8
亚稳 β 合金	BT22H	Ti-3Al-5V-5Mo-1.2Cr-1.2Fe	13.0	退火	1 100	≥ 8
	Ti-2041	Ti-4Al-20V-1Sn	14.3	淬火+时效	1 530	6
	Ti-15-3	Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	15.7	淬火+时效	1 475	14
	β 21S	Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si	15.8	淬火+时效	1 260	4~5
	Timet LCB	Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al	15.8	淬火+时效	1 470	5~8
	BT35	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn-1Zr-1Mo	16.7	淬火+时效	1 275	≥ 8
	Ti-8823	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	17.7	淬火+时效	1 250	7~8
	BT32	Ti-8V-8Mo-1.5Cr-1.5Fe-3Al	19.2	淬火+时效	1 250	≥ 8
	β C	Ti-8V-6Cr-4Mo-4Zr-3Al	19.7	淬火+时效	1 117	18
	Ti-13-11-3	Ti-13V-11Cr-3Al	27.6	淬火+时效	1 400	6~8
				淬火+时效	1 400	6~8

表 2 Ti-1023 合金棒材不同热处理制度下的室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti-1023 alloy bar treated by different heat treatments

Heat treatment	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A_5/\%$	$Z/\%$	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1/2})$
I	1 232	1 180	14	46	66.5
	1 229	1 178	15	47	67.8
II	1 245	1 188	10	27	58.9
	1 252	1 193	9	26	57.8
III	1 266	1 214	6	15	56.3
	1 260	1 208	6	15	56.5

表 3 BT22 合金棒材不同热处理制度下的室温力学性能

Table 3 Mechanical properties of BT22 alloy bar treated by different heat treatment

Heat treatment	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A_5/\%$	$Z/\%$	$\alpha_{KU}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1/2})$
I	1 170	1 110	20	56	41	28.7
	1 180	1 040	20	62	36	38.3
II	1 170	1 120	16	49	36	49.9
	1 210	1 140	12	33	35	51.5
III	1 220	1 110	5	8	34	62.6
	1 260	1 090	7	10	31	68.4

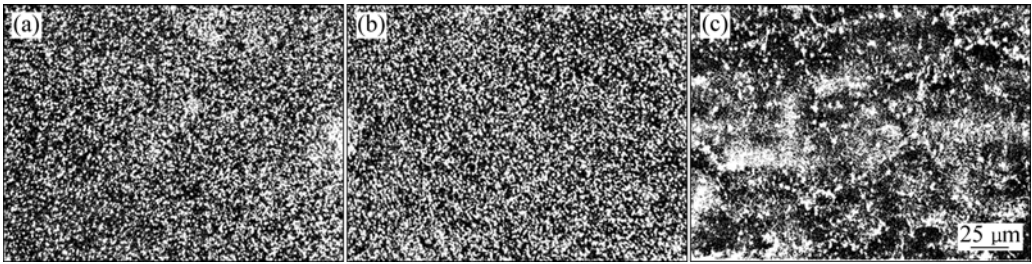


图 4 不同热处理制度下 Ti-1023 合金棒材的显微组织

Fig.4 Microstructure of Ti-1023 alloy bar treated by different heat treatments: (a) Heat treatment I; (b) Heat treatment II; (c) Heat treatment III

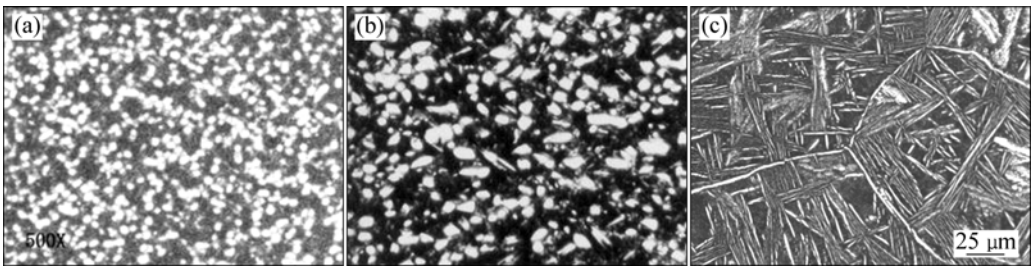


图 5 不同热处理制度下 BT22 合金棒材的显微组织

Fig.5 Microstructure of BT22 alloy bar treated by different heat treatments: (a) Heat treatment I; (b) Heat treatment II; (c) Heat treatment III

2.3 Ti-62222S 钛合金

Ti-62222S 合金是新型两相高强高韧钛合金。该合金主要具有匹配优良的强度、塑性、断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力，具有深淬透性，高弹性模量，中温有良好的抗蠕变性能，是一种应用前景十分广阔的钛合金。表 4 所示为 Ti-62222S 合金棒材的室温力学性能，图 6 所示为该合金棒材的显微组织。

表 4 Ti-62222S 合金棒材不同热处理制度下的室温力学性能

Table 4 Mechanical properties of Ti-62222S alloy bar treated by different heat treatments at room temperature

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%	α_{KU} /(J·cm ⁻²)	K_{IC} /(MPa·mm ^{-1/2})
I	1 185	1 060	10.0	15.5	52.5	/
	1 160	1 060	11.0	16.5	45.0	
II	1 180	1 090	9.0	18.5	51.3	77
	1 170	1 060	11.0	18.0	48.8	
III	1 190	1 070	9.0	12.0	33.8	67
	1 140	1 030	10.5	17.0	38.8	

3 高强钛合金的应用

高强钛合金因其优异的综合性能，在宇航工业中得到了越来越广泛的应用，特别是在商用客机、战斗机、运输机、直升机和发动机的用量比例越来越大。由于其他太空飞行器的结构质量减轻比飞机的质量减轻更为重要，因此，高强钛合金也在火箭、卫星、宇宙飞船、导弹等飞行器上也得到了应用。随着钛合金在宇航工业的成功应用，高强钛合金的应用逐渐拓展到海洋工程、汽车工业、日常生活用品等民用行业。

3.1 在飞机结构件上的应用

高强钛合金主要用于飞机起落架、飞机框架、翼梁、机尾支撑架、蒙皮、标准紧固件、燃料容器、复合材料的加强组元；直升机的主转动体及控制系统构件(主转动体轮毂，尾部轮毂，枢轴，夹钳，主轴铰链体等)。图 7~9 所示为高强钛合金在飞机的应用实例。

3.2 在航空发动机上的应用

高强钛合金主要用于制作飞机发动机舱隔板、直升机发动机的叶片主转子头部件等。图 10 所示为高强

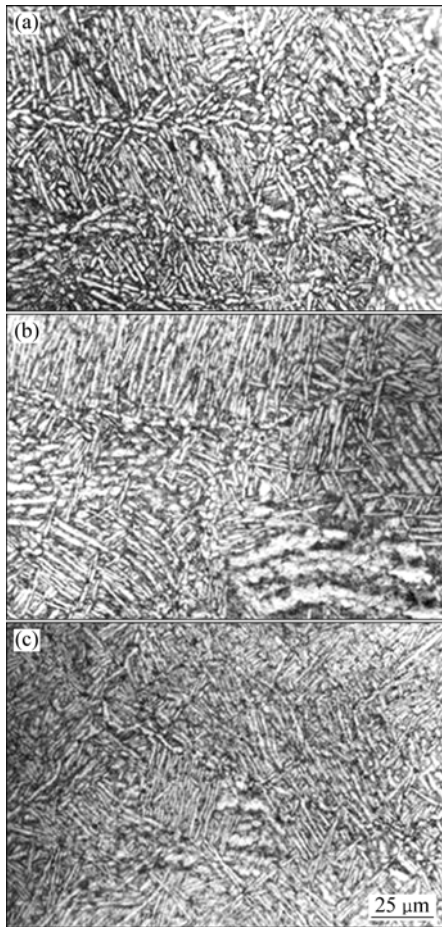


图 6 不同热处理制度下 Ti-6222S 合金棒材的显微组织

Fig.6 Microstructures of Ti-6222S alloy bar treated by different heat treatments: (a) Heat treatment I; (b) Heat treatment II; (c) Heat treatment III

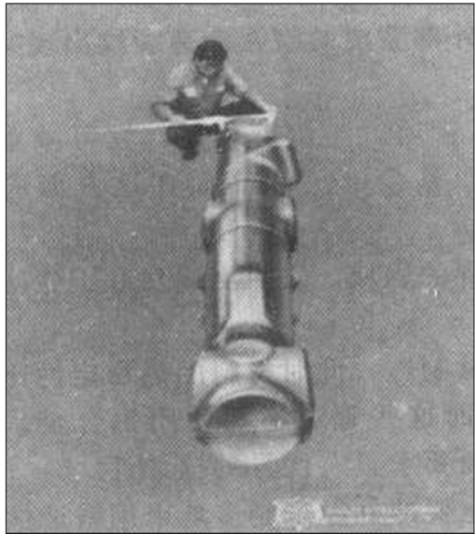
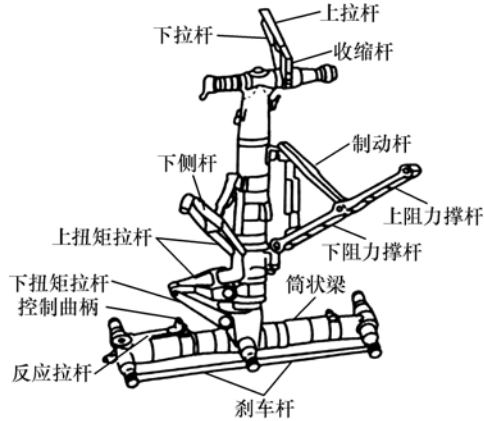


图 9 波音 777 主起落架为 Ti-1023 合金锻造部件

Fig.9 Landing gear from alloy Ti-1023 for B777

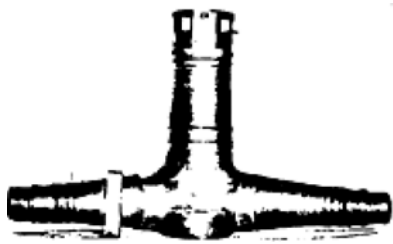


图 7 用 BT22 合金制造的 IL76 客机起落架横梁

Fig.7 Landing gear beam from alloy BT22 for IL76 airliner



图 8 用 BT22 合金制造的 IL76 客机的前起落架部件

Fig.8 Nose landing gear unit for IL76 airliner (mass of 130 kg)

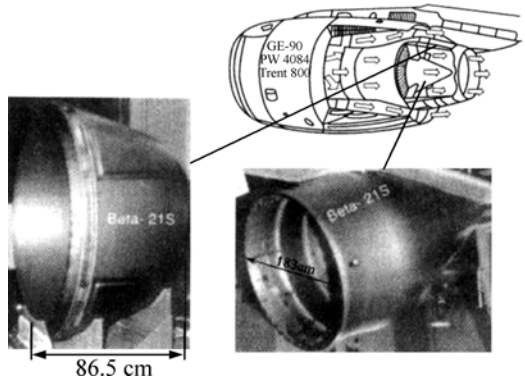


图 10 β 21S 合金在波音 777 喷嘴区域的应用

Fig.10 Muzzle unit from alloy β 21S for B777

钛合金在发动机上的应用实例。

3.3 在航天工业中的应用

高强钛合金主要用于制作多级火箭上的固体燃料和液体推进火箭发动机、外壳、黑火药发动机外套、(火箭的)节管状结构、各种组件，特别是高压气瓶、扣件

等。图 11~12 所示为高强钛合金在航天工业的应用实例。



图 11 用 BT22 钛合金制造的改进型固体发动机

Fig.11 Improved solid engine from alloy BT22



图 12 Ti-15-3 半球形壳体

Fig.12 Hemispherical shell of alloy Ti-15-3

4 结语

高强钛合金将成为今后钛合金的主要研究和发展方向之一，我国钛合金的科研人员应重点从以下几个方面开展工作，以确立我国的高强钛合金体系，并加强推广应用工作。

- 1) 研究钛合金的多元合金化理论，研制具有 α 和 β 固溶体的临界强化合金；
- 2) 开发新的强化热处理工艺、新的热加工和热塑性处理工艺；
- 3) 研究高强度和高韧性、低裂纹扩展速率匹配的加工工艺和热处理工艺；
- 4) 研究高强钛合金大规格棒材和大型锻件的加工、整体热处理工艺。

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: 103-107.
WANG Jin-you, GE Zhi-ming, ZHOU Yan-bang. Aeronautical titanium alloys[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 103-107.
- [2] 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: 20.
LYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy[M]. CHEN Zhen-hua, Trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 20.
- [3] MOISEYEV V N. Titanium alloys, Russian aircraft and aerospace applications[M]. London: Taylor&Francis Group, 2006: 84-87.

(编辑 赵俊)