DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.022

600 ℃高温钛合金的研究进展

郭举乐,田永武
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471003)

摘　要:钛合金具有比强度高、热强度高、耐腐蚀性能和高温性能好等优点,成为航空航天飞行器的主要结构材料之一。随着航空发动机性能的提升,对钛合金的使用温度提出了更高的要求。到目前为止,世界上成熟使用的高温钛合金的最高使用温度为 600 ℃,如美国的 Ti1100 合金,英国的 IMI829、IMI834 合金及俄罗斯的 BT18Y、BT36 合金等。重点介绍了国际上几种典型的高温钛合金的性能特点,以期为我国高温钛合金的研发和应用提供一些思路。

关键词:高温钛合金;热强性;热稳定性

中图分类号:TG27; TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)09-0894-03

Research and Development of 600 ℃ High Temperature Titanium Alloys

GUO Jule, TIAN Yongwu
(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471003, China)

Abstract: Titanium alloy has the advantages of high specific strength, high hot strength, favorable corrosion resistance and high thermal strength, etc. , Which has become one of the main structure material of aircraft material. With the continuous progress of aeroengines, higher-working-temperature titanium alloys have been demanded. Recently, the highest temperature of mature using high temperature titanium alloy is 600 ℃. such as Ti1100 (USA), IMI829 (UK), IMI834 (UK), BT18Y (Russia), BY36 (Russia), etc. Then property features at 600 ℃ for several typical high temperature titanium alloys were reviewed, and finally the key developing directions in the future are proposed.

Key words: high-temperature titanium alloy; hot strength; thermal stability

高温钛合金作为现代航空发动机的关键材料,被用作航空发动机的叶片、机盘、机匣等部件以减轻发动机的重量,来提高飞机的推重比。同时高温钛合金是一个国家钛合金研究水平和航空技术发展水平的重要标志,世界几个重要国家都对高温钛合金做了大量的研究工作,并建立了各自的高温钛合金体系。高温钛合金从出现到现今的六十多年间,人们通过对合金化、制造工艺、组织控制等的不断优化,取得了巨大的研究进展:其使用温度从 300 ℃提升到 600 ℃;抗拉强度从 300～400 MPa 提高到 1 100 MPa;从最初的 $\alpha+\beta$ 两相合金到高温性能更优异的近 α 型合金(近 α 型合金具有较高的高温强度和接近 $\alpha+\beta$ 两相合金的室温拉伸性能)。高温钛合金的研究一直致力于提高其使用温度,即提高热强性,同时须保持良好的热动力学稳定性。而 600 ℃被认为是传统钛基合金的"热障"温度,进一步提高其工作温度会受到蠕变、持久、表面抗氧化、组织稳定性、热盐应力腐蚀等性能的限制,成为了阻碍高温钛合金发展的主要障碍。目前国外几种典型 600 ℃高温钛合金有英国的 IMI834、美国的 Ti-1100、俄罗斯的 BT36 合金等,其中只有 IMI834 在航空发动机上成功获得批量应用,这几种 600 ℃高温钛合金均属于 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 系列,不同之处在于合金化含量以及加入其他 β 相稳定元素,如 IMI834 加 Nb 元素,BT36 加 W 元素。我国高温钛合金的研制工作始于 20 世纪 50 年代末,随着研究工作的推进,我国高温钛合金的使用温度不断提高:从最初使用温度 300~400 ℃的 TC4 到后来使用温度达到 600 ℃的 Ti60、Ti600 合金。

从最初以仿制英国和俄罗斯高温钛合金的研制工艺,到如今经过不断的探索逐步形成了以添加稀土元素为特色的近 α 型高温钛合金体系,典型的如 Ti55 合金。各国几种典型的 600 ℃高温钛合金汇总如表 1,性能特点及力学性能比较如表 2。

本文综述国内外几种典型 600 ℃高温钛合金的发展历程,简要分析这几种高温钛合金的发展状况、合金化、力学性能特点等,指出 600 ℃ 高温钛合金

收稿日期:2020-04-22
基金项目:郑洛新自创区专项资助(181200212500)
作者简介:郭举乐(1984-),河南洛阳人,工程师.主要从事钛及钛合金材料铸造研究方面的工作.电话:13598459429
通讯作者:田永武(1987-),河南洛阳人,硕士,工程师.主要从事钛及钛合金材料研究方面的工作.
电话:15290506191,E-mail:yongwutian@163.com

表1 国内外5种600 ℃高温钛合金及其基本特点

Tab.1 Basic characteristics of five type of 600 ℃ high-temperature titanium alloys in the world

合金牌号	国家	研究时间	化学成分	B 相转变温度 /℃	合金类型
Ti-1100	USA	1988	Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si	1 015	近 α 型
BT36	Russia	1992	Ti-6.2Al-2Sn-3.6Zr-0.7Mo-0.15Si-5W	1 005~1 025	近 α 型
IMI834	UK	1984	Ti-5.5Al-4Sn-4Zr-0.3Mo-1Nb-0.5Si-0.06C	1 035~1 055	近 α 型
Ti60	China	1994	Ti-5.8Al-4.8Sn-2Zr-1Mo-0.35Si-0.85Nd	1 025	近 α 型
Ti600	China	1990	Ti-6Al-2.8Sn-4Zr-0.5Mo-0.4Si-0.1Y	1 010	近 α 型

表2 国内外5种600 ℃高温钛合金力学性能比较

Tab.2 Mechanical properties of five typical 600 ℃ high-temperature titanium alloys

合金牌号	室温拉伸性能				600 ℃拉伸性能				蠕变应变	持久强度
	R_m/MPa	R_p0.2/MPa	A(%)	Z(%)	R_m/MPa	R_p0.2/MPa	A(%)	Z(%)	ε_c(%)	σ_{100}^{600}/MPa
Ti-1100	960	860	11	18	630	530	14	30	0.1	300
BT36	1 080	-	10	15	640	-	-	-	0.2	335
IMI834	1 070	960	14	20	680	550	15	50	0.1	340
Ti60	1 100	1 030	11	18	700	580	14	27	0.076~0.114	350
Ti600	1 068	1 050	11	13	745	615	16	31	0.06~0.10	350

研制的技术瓶颈和难点，并指出了未来高温钛合金的重点发展方向。

1 国内外 600 ℃高温钛合金的发展状况

20 世纪 50 年代，美国研制出了第一种实用高温钛合金 Ti-6Al-4V，奠定了高温钛合金发展的基础。随后世界上几个主要国家均对其进行了仿制，如英国的 IMI318、俄罗斯的 BT6、中国的 TC4。而后随着其航空工业的发展，Ti-6Al-4V 的耐热性、冷加工性、疲劳强度等方面已无法满足需求。随后，美国开发了 Mo 含量较高的 Ti-6246 合金，将使用温度提高到 450 ℃，并具有更高的高温蠕变强度和瞬时强度。20 世纪 70 年代，美国活性金属公司通过在 Ti-6242 合金中添加 Si 元素开发了 Ti-6242S 合金，将高温钛合金的使用温度突破 500 ℃达到 520 ℃，并使其具有更好的高温使用性能和焊接性能。1988 年，美国再次对 Ti-6242S 合金中的 Sn、Mo、Si 元素进行调整，同时严格控制杂质元素含量，研发出了近 α 型 Ti-1100 高温钛合金，并采用 β 锻+直接时效的工艺使其

使用温度达到了 600 ℃，同时具有较低的韧性和较大的疲劳裂纹扩展速率，被用来制造高压压气机轮盘和低压涡轮叶片等零件。

英国在钛合金的研发初期就认识到了 Si 元素对合金的蠕变性能起到的重要作用，他们的设计思路是通过 α 相的固溶强化来提升合金的蠕变性能，因此可以看到英国的高温钛合金基本都含有 Si 元素，先后开发和应用主要的合金有 IMI318、IMI550、IMI679、IMI685、IMI829 和 IMI834 合金等。IMI834 合金是在 IMI685 基础上研制出来的，合金中加入了 0.5% Mo 与 0.7% Nb，在不损伤热稳定性的同时提高了合金的强度，IMI834 合金中还加入了 0.06% C 有效的控制了初生 α 相的含量，并通过适宜的热处理工艺有效的控制了初生 α 相、硅化物、α^2 相的尺寸和含量，使 IMI834 合金具有良好的室温强度、高的蠕变强度、良好的疲劳强度和焊接性能。IMI834 合金被广泛应用在 EJ200、Trent 系列、PW305、PW150、Trent700 等发动机上。

俄罗斯对高温钛合金的研究起步较早，形成了一套独立、完整的高温钛合金体系。先后研制出了 BT321、BT8、BT9、BT25、BT18Y 和 BT25Y 等，已在俄罗斯航空发动机上得到广泛应用。俄罗斯于 1992 年在 BT18Y 的基础上开发了新一代的 600℃高温钛合金 BT36，合金中含有 5% W 和约 0.1% Y 使得合金的热稳定性和热塑性大大改善。

我国高温钛合金的发展前期以仿制为主，如 TA11、TC17、TA19、TC19、TC6、TC11、TC25 等均可在国外的高温钛合金中找到相应的牌号。大多数合金存在性能数据不全、单一牌号生产量少、材质一致性均匀性稳定性不足等状况。后来我国也开始钛合金的自主研制，经过不断的探索在“八五”期间成功研制出 550 ℃高温钛合金的 Ti55。1994 年中国科学院金属研究所与宝钛集团有限公司在 Ti55 的基础上开发出了使用温度达到了 600 ℃的 Ti60 合金，之后西北有色金属研究院在美国 Ti1100 合金的基础上添加约了 0.1%Y 开发出了使用温度为 600 ℃的 Ti600 合金。

2 600 ℃高温钛合金的技术难点

航空航天工业的不断发展对高温钛合金的性能提出了越来越高的要求，既要满足高的强度指标，同时也要求钛合金在高温下长时间暴露仍能保持良好的塑性和韧性。钛合金 α 相具有密排六方(HCP)结构相较于体心立方(BCC)结构的 β 相晶体致密度更高，原子更不易扩散，因此，600 ℃高温钛合金设计以 α 相为主，配以少量的 β 相，使其具有更好的抗氧化能力、高的热强性以及高的比强度。一般在 Ti 基体中加入较高含量的 Al、Zr、Sn 等元素，同时尽可能的减少对蠕变有害的 β 相稳定元素如 Mo、Nb、Fe、Cr、Ni 等元素的含量，来尽可能提高钛合金蠕变性能的同时保证其较高的热稳定性。而多元复杂的合金化，一是给大型工业铸锭成分均匀化及杂质含量的控制带来一定的难度，二是这些合金元素的加入在实现强化的同时往往会带来不同程度的负面影响，如 Al 在钛合金中通过形成置换固溶体实现固溶强化，但当 Al 含量超过 8%时，钛合金在高温下很容易析出 α_2 脆性相，在塑性变形过程中，当位错切过 α_2 相时会破坏原来的有序结构，阻碍位错的继续滑移，同时，析出的 α_2 相会促进位错的平面滑移，抑制交滑移，引起塑性变形不均匀，致使合金的热稳定性严重下降；而 Sn、Zr 等中性元素可以在双相钛合金中无限固溶，一定程度上起到强化作用，但长时间高温下的析出相也会使合金变脆，尤其在 600~650 ℃以上时这种现象表现得更为明显。此外，在 600 ℃以上合金表面将发生严重氧化，使得合金表面不稳定，性能进一步恶化。

3 结语

从最初英国研发的第 1 个高温钛合金 IMI834合金到现在的 30 多年时间里，国际上仍未有成熟稳定的 600 ℃以上高温钛合金出现。经过上述分析，600 ℃高温钛合金从合金化、热处理工艺等角度来大幅提高热强性的潜力很小，研究工作重心应放在合金成分的精细控制、热加工工艺优化等方面。如通过合理调控锻造温度、锻后冷却方式，将组织与性能结合起来，进一步探究温度、时间及组织之间的对应关系，以期实现合金最佳综合性能匹配。设计选材方面，不再是一味追求高的抗拉强度、塑性指标等，更应重视在实际使用条件下使用性能的研究以及材料、锻件、零件的冶金质量控制、组织均匀性控制、残余应力控制等。

参考文献：

[1] 赵永庆. 高温钛合金研究[J]. 钛工业进展. 2001(1):33.
[2] Weiss I, Semiatin S L. Thermo mechanical processing of alpha titanium alloys-an overview[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, A263(2):243-256.
[3] Semiatin S L, Weiss I, Seetharaman V. Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys-an overview [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243(1/2):1-24.
[4] Doorbar P, Dixon M, Chatterjee A. Aero-engine titanium from alloys to composites [J]. Materials Science Forum, 2009, 618 /619 (1):127 -134.
[5] Krishna V G. Hot-deformation mechanisms in near-alpha titanium alloy 685 [J]. JOM, 1996, 48(10) : 56-59.
[6] Weiss I, Semiatin S L. Thermo mechanical processing of alpha titanium alloys-an overview[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, A263(2):243-256.
[7] Rosenberger A H, Madsen A, Ghonem H. Aging effects on the creep behavior of the near-alpha titanium alloy Ti-1100[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1995, 4(2):182-187.
[8] Wanjara P, Jahazi M, Monajati H. Hot working behavior of near-α alloy IMI834[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, A396 (1/2):50- 60.
[9] Eylon D, Seagle S R. Titanium technology in the USA-an overview [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2001, 17 (4): 439-443.
[10] 蔡建明，曹春晓. 新一代 600 ℃高温钛合金材料的合金设计及应用展望[J]. 航空材料学报，2014，34(4):27-36.
[11] 刘莹莹，陈子勇，金头男，等. 600 ℃高温钛合金发展现状与展望[J]. 材料导报，2018(11):1869.
[12] 蔡建明，李臻熙，马济民，等. 航空发动机用 600 ℃高温钛合金的研究与发展[J]. 材料导报，2005，19(1):50-53.
[13] 曾立英，赵永庆，洪权，等. 600 ℃高温钛合金的研发[J]. 钛工业进展，2012,10(29):1-5.
[14] 许国栋，王凤娥. 高温钛合金的发展和应用 [J]. 稀有金属，2008，32(6):774-780.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628