

TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景

李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 储俊鹏, 马济民

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 总结分析了 TA15 合金的成分、组织、力学性能、工艺性能和相关使用性能。TA15 合金作为一种新型的近 α 型钛合金, 具有较好的综合力学性能以及优良的锻造、热处理和焊接工艺性能。TA15 合金可用来制造飞机隔板、壁板等工作温度较高、受力较复杂的重要结构零件。

关键词: TA15 合金; 飞机结构; 应用

钛及钛合金作为结构金属, 具有比强度高、抗腐蚀性好、耐高温等一系列突出的优点, 能够进行多种方式的压力加工成形、焊接和机械加工。随着钛合金研究和生产的发展, 飞机的用钛量越来越大, 美国最新一代战斗机 F-22 的用钛量已经占到飞机结构质量的 35%。钛合金使用量占飞机结构质量的百分比已成为衡量飞机先进性的一个重要标志。

我国现行飞机用钛量仅为 2%~3%, 与国外先进水平相比差距很大。为了扩大钛合金在我国飞机结构中的应用, 缩短与国外差距, 研制开发新型钛合金关系重大。TA15 合金作为一种新型的近 α 型中强度钛合金, 其半成品有薄板、厚板、棒材, 有着良好的工艺性能和使用性能。本文总结了 TA15 合金的成分、组织、力学性能、工艺性能和相关使用性能, 在此基

础上分析了该合金在飞机结构件中的应用前景。

1 TA15 合金的成分、组织及力学性能

TA15 合金的名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V。其主要的强化机制是通过 α 稳定元素 Al 的固溶强化。加入中性元素 Zr 和 β 稳定元素 Mo 和 V, 可以改善工艺性。该合金的 Al 当量为 6.58%, Mo 当量为 2.46%, 属于高 Al 当量的近 α 型钛合金。XJ/BS5157—1997 和 XJ/BS5158—1997 规定的化学成分见表 1^[1]。

不同品种、规格的 TA15 合金材料在退火状态下的室温拉伸性能见表 2。从表中可以看出, 该合金的

表 1 TA15 合金的化学成分

合金元素/%					杂质不大于/%						
Al	Zr	Mo	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	其他杂质总量
5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	余量	0.25	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15	0.3

表 2 TA15 合金的室温拉伸性能

品种	取样方向	E/GPa	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	K_{IC} /MPa \sqrt{m}
薄板厚度 2.5mm	L	102	1 019	925	15.3	—	—
	T	116	1 005	982	13.6	—	—
厚板厚度 45mm	L	—	937	875	14.2	36.2	—
	T	—	943	892	16.4	41.0	—
棒材 ϕ 16mm	L	108	1 036	1 006	15.9	52.0	—
	L	109	977	931	15.8	44.2	84.51 (T-L 方向取样)
	L	—	953	890	15.8	46.2	—

收稿日期: 2003-07-09

作者简介: 李兴无, 男, 1973 年生, 工程师, 北京航空材料研究院钛合金研究室, 电话: 010—62458116

抗拉强度在 930MPa~1 050MPa 之间, 属于中等强度钛合金, 随着材料规格的放大, 合金的强度逐渐降低。TA15 合金的室温抗拉强度比 TC4 合金高 30 MPa~50MPa。该合金具有良好的塑性。薄板的弹性模量和屈服强度存在较大差异, 这是由于板材在轧制过程中形成板织构造成的。研究发现^[2], 当冷轧变形量为 30% 经退火后, α 相在轧面上形成主要晶面为 $(\bar{1}2\bar{1}1)$ 、 $(\bar{1}2\bar{1}2)$ 、 $(\bar{1}2\bar{1}3)$ 面, 轧向上主要晶向为 $[10\bar{1}0]$ 方向, 横向上主要晶向为 $[0001]$ 方向为特征的板织构造。

已损伤材料的静强度通常以断裂韧性为表征, $\phi 70\text{mm}$ 棒材 T-L 方向的断裂韧性为 $84.51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 高于 TC4 合金手册数据水平(锻坯 T-L 方向 $64.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、L-T 方向 $74.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)^[3]。

TA15 合金 $\phi 16$ 棒材的疲劳极限列于表 3。表 3 中同时还列出了 TC4 合金 $\phi 18$ 棒材的疲劳极限^[4]。在应力比较大、缺口系数较小的情况下, TA15 合金的疲劳极限明显高于 TC4 合金。随着应力比的减小和缺口系数的增加, 二者趋于一致。

TA15 作为一种近 α 合金, 在退火状态下, 其 β 相很少, 根据合金元素的含量不同, 为 5%~7%^[5], 这样即使产生共析分解, 也不致于使物理力学性能显著恶化, 因此具有高的热稳定性。

表 3 TA15 钛合金的室温轴向加载疲劳极限

K_t	R	σ_D (TA15, $\phi 16$)/MPa	σ_D (TC4, $\phi 18$)/MPa
1	0.5	934	714
	0.06	723	539
	-1	415	345
3	0.5	376	370
	0.06	291	258
	-1	127	148
5	0.5	199	172
	0.06	131	108
	-1	64	68

不同品种、规格的 TA15 合金材料的显微组织均为两相区变形组织(见图 1)。厚度为 2.5mm 的板材显微组织为等轴组织, β 相分布于 α 颗粒之间。厚为 8.0mm 的板材已明显保留了片状组织的特征。45mm 的厚板 α 相有较大幅度的球化, 厚板的表面、芯部以及沿轧制方向不同角度的显微组织均无明显差异。棒材的显微组织为等轴或双态组织, 随着棒材尺寸的增加, 由于变形量的减小, α 颗粒大小基本呈增加趋势, 其等轴化程度也降低。大规格棒材一般都需要进行后续的热压加工, 可以根据不同的需求选择合适的热工艺制度以获得满意的组织和性能。

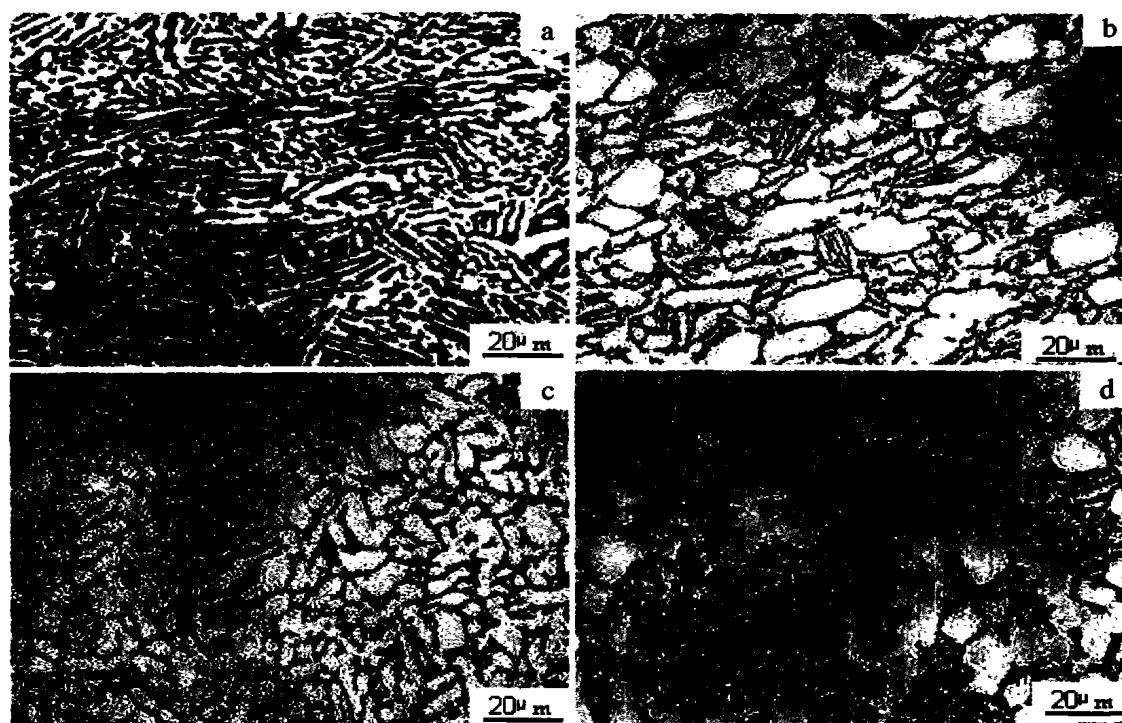


图 1 不同品种、规格的 TA15 合金材料的显微组织
a 板厚 8.0mm; b 板厚 45mm; c $\phi 70\text{mm}$; d $\phi 180\text{mm}$

2 TA15 合金的工艺性能

2.1 锻造工艺性能

TA15 合金具有良好的锻造工艺性能^[6-7]。高温拉伸试验结果如图 2 所示。TA15 合金在 900℃ 以下的变形抗力比 TC4 稍高, 900℃ 以上两者基本一致, 这表明 TA15 合金具有良好的锻造工艺性能。并已成功地研制出大型模锻件^[8], 其不同部位的室温力学性能为: σ_b 935 MPa~980 MPa, $\sigma_{0.2}$ 865 MPa~905 MPa, δ_5 14%~16%, ψ 39%~46%; 500℃ 拉伸性能为: σ_b 645 MPa~660 MPa, $\sigma_{0.2}$ 495 MPa~545 MPa 断裂韧性为: K_{IC} 84.4 MPa \sqrt{m} ~97.7 MPa \sqrt{m} 。锻件组织均匀细小, 为双态组织 (见图 3)。

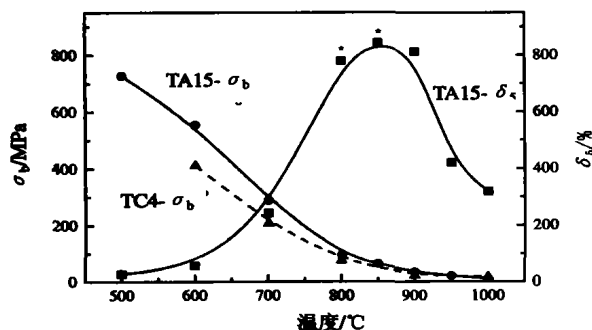


图2 TA15, TC4 钛合金工艺塑性 (*表示未拉断)

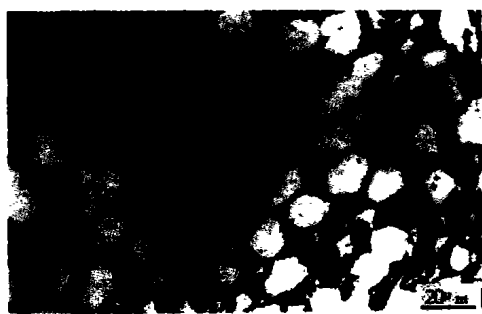


图3 TA15 钛合金大型锻件显微组织

2.2 热处理工艺性能

TA15 作为一种近 α 合金, 热处理工艺简单易行。一般在普通退火状态下使用, 退火温度为 700℃~850℃。随着退火温度的升高和退火时间的延长, 合金抗拉强度降低, 塑性升高, 如图 4 所示^[9]。普通退火的目的主要是通过回复和再结晶消除冷热加工硬化产生的内应力, 但对大规格加工材性能改变非常有限 (见图 5)^[9]。

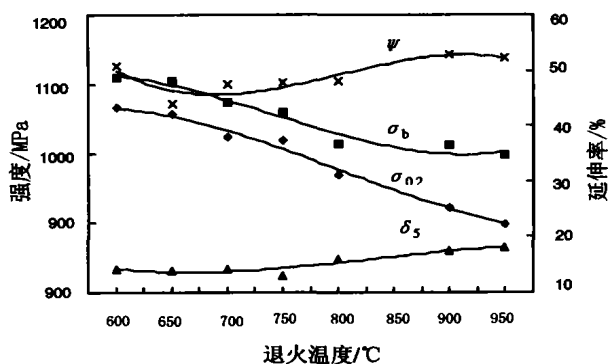


图4 退火温度对TA15合金 ϕ 18mm棒材性能的影响(保温 1h, AC)

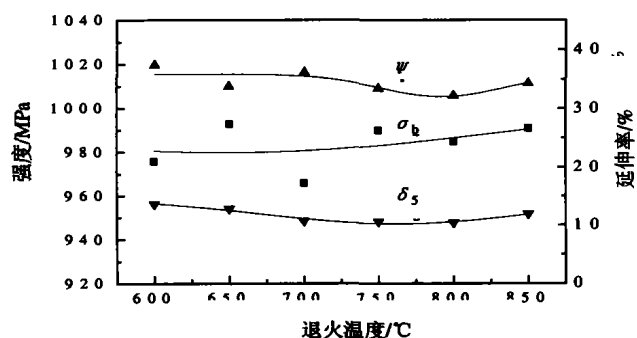


图5 退火温度对 δ 15mm板材性能的影响(保温 1h, AC)

2.3 焊接工艺性能

TA15 合金作为一种近 α 合金, 具有比两相合金更好的焊接性能。焊接后, 在熔合区和加热温度高于 $T_{\text{临界}}$ 的过渡区, 其组织中含有或多或少 α' 组织。由于 TA15 合金所含 β 稳定元素不高, α' 组织中的 β 稳定元素不显著富化, 焊接接头的强度不会发生明显的提高和塑性的大幅度降低。因此, 焊后不必进行用以稳定组织的特殊热处理, 只需进行 600℃~650℃ 不完全退火以消除残余应力。

TA15 合金可以用电阻点焊、氩弧焊、电子束焊等多种方式进行焊接, 焊接接头的强度系数达 90%~95%。氩弧焊采用的焊丝有三种, 一种是纯钛焊丝 TA0-1, 另外两种是 TA15-1 (Ti-2.5Al-1.5Zr-1Mo-1V) 和 TA15-2 (Ti-4Al-1.5Zr-1Mo-1V), 前者用于焊接厚度为 3mm~7mm 的零件, 后者则用于焊接厚度大于 7mm 的零件。

表 4 给出了 TA15 合金锻棒电子束焊接并经去应力退火后的室温拉伸性能。由表 4 可知, 焊接接头的抗拉强度显著提高, 而合金的塑性并没有明显降低, 尤其是断面收缩率和基体相当。

表4 TA15 锻棒电子束焊室温拉伸性能

锻棒厚度/mm	焊接接头/基体	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
24	焊接接头	1040	978	11.1	42.2
	基体	999	985	15.6	47.8
64	焊接接头	1038	985	10.3	39.1
	基体	985	-	13.7	40.3

3 TA15 合金的使用性能

3.1 抗应力腐蚀能力

现在的飞机设计,从传统的安全设计逐步过渡到损伤容限设计。因此,仅有传统的临界断裂应力和一些定性的试验是远远不够的。而使用预制裂纹试样所取得的应力腐蚀数据 K_{ISCC} 成为飞机设计的重要定量参数。与 Ti-8Al-1Mo-1V 和 Ti-6Al-4V 比较,在中性氯化钠溶液中 TA15 合金具有较好的抗应力腐蚀性能,其应力腐蚀断口主要形貌为穿晶解理断裂,部分有韧窝,并且有腐蚀产物。

表5 几种钛合金在 3.5% NaCl 溶液中的 K_{ISCC}

材料	取样方向	K_{ISCC} /MPa \sqrt{m}
TA15	T—L	46.4
	L—T	65.8
Ti-6Al-4V	L—T	39±10
	L—S	45±8
Ti-8Al-1Mo-1V	T—S	25
	L—S	31

3.2 热盐应力腐蚀开裂

由于飞机长期在海洋或沿海上空飞行,海水蒸发导致大气中不可避免地含有少量盐分,具备产生热盐应力腐蚀的卤盐、高温、应力和湿气等条件。TA15 合金作为一种新型钛合金,评估其抗热盐应力腐蚀开裂的能力,对其在飞机结构件中的应用具有重要的现实意义。研究表明^[10],热暴露时产生的氢是发生热盐应力腐蚀的重要因素。温度低于 300℃ 时 TA15 合金对热盐应力腐蚀不敏感,温度高于 300℃ 时 TA15 合金有热盐应力腐蚀倾向,热盐应力腐蚀临界应力低于高温断裂强度,成为影响材料应用的限制因素。

4 TA15 合金在飞机结构中的应用前景

由以上分析可知,TA15 合金具有较好的综合力学性能和工艺性能,尤其是焊接性能优异。因此,

TA15 合金可作为飞机结构的主要用材,用来制造飞机隔框、壁板等工作温度较高,受力较复杂的重要结构零件,在飞机结构中有广阔的应用前景。

TA15 合金锻件可以用来制造飞机隔框等承力构件。现代飞机的主承力结构件逐渐由采用机械连接结构件转向整体锻件,以提高使用性能和减轻质量。如 C-17 的 Pylon Panel 模锻件投影面积为 25 806cm²,质量达 785kg。F-22 战斗机也应用了大量的钛合金整体锻件。但是,制造这些整体锻件的锻造设备吨位很高,C-17 的 Pylon Panel 模锻件即在 5×10⁴t 水压机上锻造而成。TA15 作为一种中等强度高铝当量近 α 型钛合金,既有较高的强度,又有良好的焊接性能,可以将几个由 TA15 合金模锻件制成的零件焊接在一起,代替整体模锻件。这样可在满足使用性能的前提下,显著降低所需模锻设备的吨位和提高材料的利用率。

由于 TA15 合金 Al 当量较高,板材冲压成形性能不如 Al 当量较低的 TC1、TC2 合金,可以用 TA15 合金板材采用热成型的方法制造形状简单的钣金零件。TA15 合金板材还可以通过焊接方式用来制造带筋壁板等零件。

5 结 论

(1) TA15 合金作为一种新型的近 α 型钛合金,具有较好的综合力学性能。该合金的强度、断裂韧性、疲劳极限均略高于 TC4 合金。

(2) TA15 合金具有较好的锻造工艺性能,热处理工艺简单易行,焊接性能优良。

(3) TA15 合金抗应力腐蚀能力优于 Ti-6Al-4V 和 Ti-8Al-1Mo-1V 合金。温度低于 300℃ 时对热盐应力腐蚀不敏感。

(4) TA15 合金可作为飞机结构钛合金用材,用来制造飞机隔框、壁板等工作温度较高、受力较复杂的重要结构零件,在飞机结构中有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 马济民等. 中国航空材料手册, 第 4 卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 74
- [2] 王俭等. 金属学报[J], 2002, 38(增刊): 411~413
- [3] 马济民等. 中国航空材料手册, 第 4 卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 126
- [4] 马济民等. 中国航空材料手册, 第 4 卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 116
- [5] E.A.鲍利索娃等著. 陈石卿译. 钛合金金相学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [6] 张庆玲等. 金属学报[J], 2002, 38(增刊): 161~163
- [7] 沙爱学等. 金属学报[J], 2002, 38(增刊): 183~185
- [8] 王宝善等. 金属学报[J] 2002, 38(增刊): 385~388
- [9] 储俊鹏等. 金属学报[J], 2002, 38(增刊): 81~83
- [10] 刘羽寅等. 金属学报[J], 2002, 38(增刊): 298~301

TA15 Titanium Alloy and Its Applying Prospects on Airframe

Li Xingwu, Sha Aixue, Zhang Wangfeng, Chu Junpeng, Ma Jimin
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The chemical composition, microstructure, mechanical properties, processing properties and relative applying properties of TA15 alloy are studied and summarized. TA15 alloy, a near- α titanium alloy, has good comprehensive mechanical properties and processing properties such as forging, heat treatment and welding. TA15 alloy can be used in the frame, siding and other key components of airframe operating at with high temperature and complicated stressed state.

Key words: TA15 alloy; airframe; application