

热处理对 TA15 钛合金高周疲劳性能的影响

赖运金^{1,2}, 张丰收², 杜予珏², 侯艳荣², 王永哲², 马文革², 刘向宏², 冯 勇², 张平祥^{1,2}

(1. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072; 2. 西部超导材料科技有限公司, 西安 710018)

摘 要: 以不同热加工工艺获得的 TA15 合金 $d18$ mm 规格棒材为例, 研究氧含量的变化和热处理制度以及初生 α 相对其高周疲劳强度的影响。结果表明: 热处理制度和氧含量的变化对 TA15 合金高周疲劳性能的影响不大, 初生 α 相相对高周疲劳性能的影响显著, 当初生 α 相的含量由 15%~20% 提高到 33%~40% 时, 疲劳强度可以提高 25% 左右。

关键词: TA15 钛合金; 高周疲劳; 显微组织

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effects of heat treatment on high cycle fatigue strength of TA15 alloy

LAI Yun-jin^{1,2}, ZHANG Feng-shou², DU Yu-xuan², HOU Yan-rong², WANG Yong-zhe²,
MA Wen-ge², LIU Xiang-hong², FENG Yong², ZHANG Ping-xiang^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The effects of content of O element, heat treatment and α phase of TA15 alloys on high cycle fatigue strength of TA15 alloy bar with $d18$ mm were studied. The results show that the effects of content of O element and heat treatment on high cycle fatigue strength of TA15 alloy are limit. But α phase of TA15 alloy bar has a remarkable effect on high cycle fatigue strength. The high cycle fatigue strength of TA15 alloy bar would be improved by 25% with increasing primary α phase content from 15%~20% to 33%~40%.

Key words: TA15 alloy; high cycle fatigue strength; microstructure

TA15 合金的名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V, 名义成分下的铝当量为 6.33, 钼当量为 1.67, 属高铝当量的近 α 型钛合金。TA15 合金与俄罗斯研制的 BT20 钛合金相似, 具有中等的室温强度和高温强度, 良好的热稳定性和焊接性能, 较高的比强度、抗蠕变性和耐腐蚀性^[1]。另外, TA15 合金还具有较好的工艺塑性, 可制成薄板、厚板、棒材、锻件、模锻件及型材等多种规格品种。该合金被广泛用于制造高性能飞机的重要结构件^[2-3]。与国内外广泛使用的 Ti-6Al-4V 合金相比, 当工作温度达到 450~500 °C 时, TA15 合金的强度优越性明显, 可高出 100~150 MPa^[4-8]。

在 TA15 合金的疲劳性能研究中发现, 采用不同加工工艺获得的相同规格棒材, 其高周疲劳性能波动

较大, 有时疲劳极限值相差 20%, 这对 TA15 合金棒材疲劳性能的考核带来了极大的不便。

本文作者通过对不同热加工工艺获得的 $d18$ mm 规格 TA15 合金小规格棒材进行光滑和缺口高周疲劳性能测试以及微观组织研究, 以考察显微组织对 TA15 合金小规格棒材的室温拉伸性能和高周疲劳性能的影响, 为今后 TA15 合金小规格棒材的生产提供理论依据。

1 实验

试验材料采用西部超导材料科技有限公司生产的

不同氧含量的 3 批 TA15 钛合金铸锭，通过热加工工艺 A 和 B 生产了编号为 1 号、2 号和 3 号的 3 批 $d18$ mm 规格 TA15 合金小规格棒材，分别采用 840℃，2 h，AC 和 800℃，1.5 h，AC 2 种热处理制度。3 种工艺对应的氧含量和热处理制度如表 1 所列。

热处理试验在西安航空发动机(集团)有限公司的 SX2 型箱式电阻炉内进行；疲劳试验在 K5BZ-100 高频疲劳实验机上测定，疲劳试样及其断口如图 1 所示。采用 LEICA MEF4A 倒立金相显微镜观察组织形貌并拍摄金相照片。

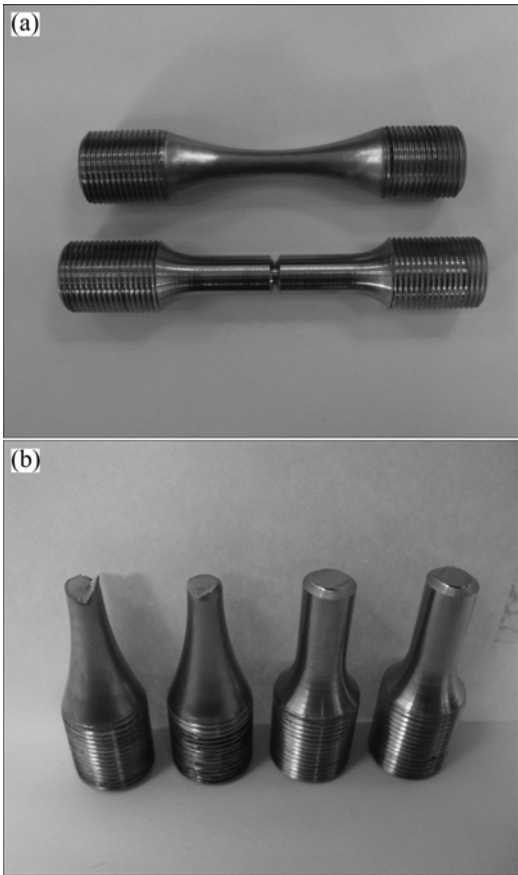


图 1 疲劳试样及断口照片

Fig.1 Photos of high cycle fatigue specimens and fatigue section

表 2 3 种工艺生产的 TA15 合金棒材的组织 and 性能

Table 2 Microstructures and properties of TA15 alloy bars by three kinds of processes

Sample No.	Process	$\varphi(\alpha)\%$	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	Fatigue strength ($N_f=10^7$)/MPa	
							$K_t=1$	$K_t=3$
1	A	15%~20%	993	927	17.2	53.4	587.5	223
2	A	15%~20%	1 030	960	22.5	49.5	567.5	229
3	B	33%~40%	1 040	960	17.5	54.0	724.5	285

表 1 3 种工艺对应的氧含量及热处理制度
Table 1 Contents of O element and heat treatments of three kinds of processes

Sample No.	Process	$w(\text{O})/\%$	Heat treatment
1	A	0.085	840℃，2 h，AC
2	A	0.14	800℃，1.5 h，AC
3	B	0.14	800℃，1.5 h，AC

2 结果与讨论

材料的屈服强度与疲劳极限之间有一定的关系。一般来说，材料的屈服强度越高，疲劳强度也越高。合金的化学成分和热处理制度都对材料的强度有影响。TA15 钛合金虽然属于近 α 型钛合金，但由于其合金元素含量较高，因此可以通过热处理强化，其显微组织和常规性能受热处理影响较大。本试验的方案设计主要是为了考察氧含量、热处理制度和显微组织对 TA15 合金高周疲劳性能的影响。3 批试样的试验结果如表 2 所列，采用工艺 A 获得的 TA15 小规格棒材 1 号和 2 号试样的显微组织非常相近，均为具有 15%~20% 的初生 α 含量的双态组织(见图 2(a)和(b))；采用工艺 B 获得的 3 号试样的显微组织则为典型的等轴组织，具有 33%~40% 的初生 α 含量(见图 2(c))，明显与工艺 A 获得的组织不同。3 批试样的室温拉伸性能基本处于同一水平，只是氧含量低的 1 号试样的强度略微低于氧含量高的 2 号和 3 号试样的，而塑性则没有明显区别。在室温高周疲劳性能方面，采用工艺 A 获得的 1 号和 2 号试样的疲劳强度基本处于同一水平，明显低于工艺 B 获得的棒材的疲劳强度，而且无论是光滑试样疲劳强度还是缺口试样疲劳强度，均很好地符合这一规律。

2.1 热处理制度对疲劳性能的影响

图 3 所示为高氧含量 2 号试样采用不同热处理获

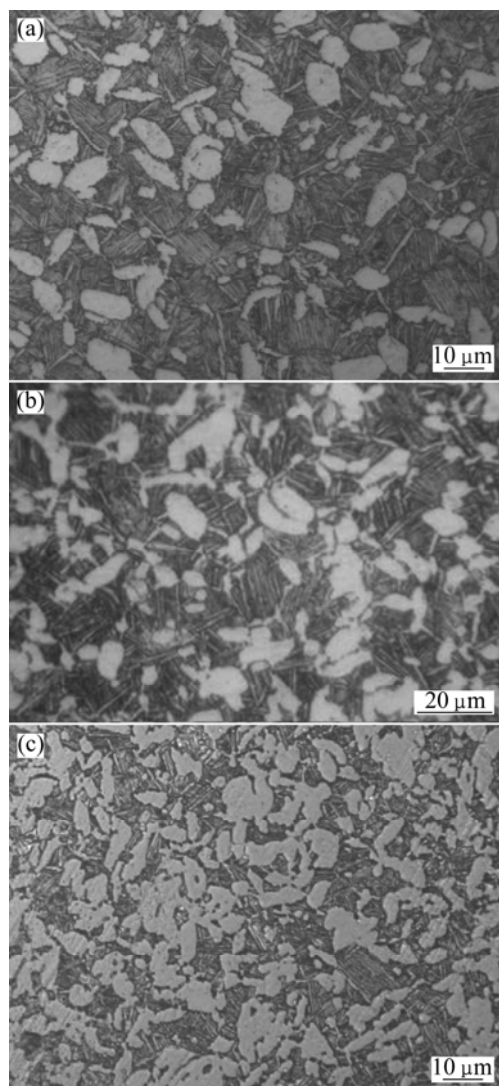


图2 不同工艺获得的TA15合金的显微组织

Fig.2 Microstructures of TA15 alloys: (a) Sample No.1; (b) Sample No.2; (c) Sample No.3

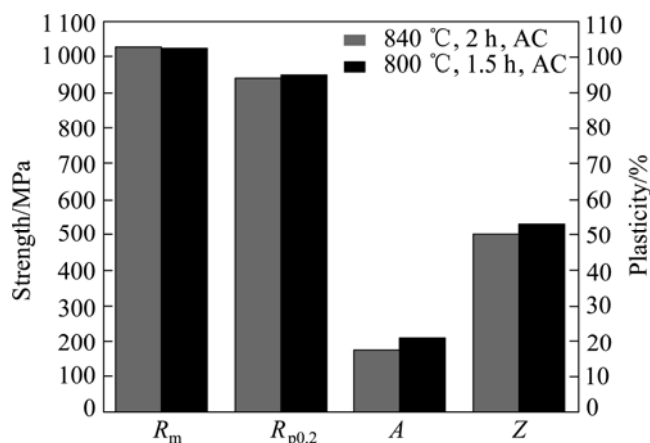


图3 热处理制度对TA15合金室温拉伸性能的影响

Fig.3 Effects of heat treatments on room temperature tensile properties of TA15 alloy

得的室温拉伸性能(每种条件重复测试3次,数据取平均值)。由图3可以看出,在相同热加工工艺条件下,采用800 °C, 1.5 h, AC和840 °C, 2 h, AC 2种热处理制度,其室温拉伸强度和塑性变化不大,说明这2种热处理制度对 $d18$ mm规格TA15合金小棒材的性能室温拉伸性能影响不大,也可以由此推断这2种热处理制度对其室温高周疲劳强度的影响有限。而且通过观察2种热处理制度下的显微组织,发现其变化不明显,如图2(a)和(b)所示,初生 α 含量均为33%~40%,这也从侧面反映该热处理制度范围不足以对高周疲劳强度起决定性作用。

2.2 氧含量对疲劳性能的影响

以往的研究表明杂质元素的含量会降低钛合金的疲劳性能,尤其是氧元素。但表2中的数据显示,与高氧含量的3号试样相比,低氧含量的1号试样并没有获得较高的疲劳强度,相反,明显低于3号试样的疲劳强度;说明在本试验条件下,氧含量的波动对TA15合金小规格棒材的室温高周疲劳性能的影响不明显。

2.3 对初生 α 相合金疲劳性能的影响

从表2中的数据可以看出,初生 α 相含量对TA15合金高周疲劳性能的影响显著。以高氧含量的2号和3号试样为例,当初生 α 相的含量由15%~20%提高到33%~40%时,光滑试样疲劳强度由567.5 MPa增加到724.5 MPa,提高了27.7%;而缺口试样的疲劳强度由229 MPa增加到285 MPa,提高了24.5%;与低氧含量的1号试样相比,提高的幅度也基本相当。因此,说明显微组织对TA15钛合金疲劳性能起主要作用,初生 α 相比例的增大有助于提高TA15合金的高周疲劳强度。其原因可能与等轴初生 α 在变形过程中相互协调性较好,不容易产生孔洞,进而很难形成裂纹源有关。

国外对Ti-6Al-4V的研究表明,当等轴初生 α 相由40%下降到10%时,疲劳极限下降40 MPa左右。这与本试验获得的结果完全吻合。

3 结论

1) 热处理制度和氧含量的波动对TA15合金高周疲劳性能的影响有限。

2) 初生 α 含量对TA15合金高周疲劳性能的影响显著,当初生 α 含量由15%~20%提高到33%~40%时,

疲劳强度提高25%左右。

REFERENCES

- [1] 沙爱学, 李兴无, 储俊鹏. TA15 钛合金的普通退火[J]. 稀有金属, 2003, 27(1): 213-215.
SHA Ai-xue, LI Xing-wu, CHU Jun-peng. Common annealing of TA15 alloy[J]. Chinese Journal Rare Metals, 2003, 27(1): 213-215.
- [2] CHEN Li, GONG Shui-li, YAO Wei, HU Lun-ji. Effect of laser characteristics on the weld shape and properties of penetration laser weld of BT20 titanium alloy[J]. China Welding, 2004, 13(1):1-6.
- [3] 曹京霞, 方波, 黄旭, 李臻熙. 微观组织对TA15钛合金力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2004, 28(2): 362-364.
CAO Jing-xia, FANG Bo, HUANG Xu, LI Zhen-xi. Effects of microstructure on properties of TA15 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(2): 362-364.
- [4] 刘瑞民, 李兴无, 沙爱学. TA15 合金板材的组织 and 性能研究[J]. 材料开发与应用, 2005, 20(4): 23-26.
LIU Rui-min, LI Xing-wu, SHA Ai-xue. The study of the microstructure and properties of TA15 titanium alloy plate[J]. Development and Application of Materials, 2005, 20(4): 23-26.
- [5] 李兴无, 张庆玲, 沙爱学, 储俊鹏, 马济民. 变形温度对TA15合金组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2004(1): 8-11.
LI Xing-wu, ZHANG Qing-ling, SHA Ai-xue, CHU Jun-peng, MA Ji-min. Effect of deformation temperature on microstructure and properties of TA15 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(1): 8-11.
- [6] 李淼泉, 李晓丽, 尤丽, 许广兴, 于浩, 迟彩楼, 温国华. TA15 合金的热变形行为及加工图[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(9): 1354-1358.
LI Miao-quan, LI Xiao-li, YOU Li, XU Guang-xing, YU Hao, CHI Cai-lou, WEN Guo-hua. Deformation behavior and processing map of high temperature deformation of TA15 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(9): 1354-1358.
- [7] 王斌, 郭鸿镇, 姚泽坤, 陈金科, 李蓬川. 热压参数对TA15合金流动应力及显微组织的影响[J]. 锻压技术, 2006(6): 106-109.
WANG Bin, GUO Hong-zhen, YAO Ze-kun, CHEN Jin-ke, LI Peng-chuan. Influence of hot compression parameters on flow stress and microstructure of TA15 alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2006(6): 106-109.
- [8] 张晶宇, 杨延清, 陈彦, 温力, 周义刚. 退火对TA15钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2003, 28(3): 46-48.
ZHANG Jing-yu, YANG Yan-qing, CHEN Yan, WEN Li, ZHOU Yi-gang. Effect of annealing on the structure and properties of TA15 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(3): 46-48.

(编辑 杨华)