

TA15 钛合金显微组织与损伤容限性能的关系

何书林¹, 雷小军¹, 王小翔¹, 马英杰², 王希哲³, 王鼎春¹

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 宝鸡 721014;

2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016;

3. 北京有色金属研究总院, 北京 100016)

摘要: 研究组织形态与 TA15 钛合金损伤容限性能的关系。结果表明: 组织形态对 TA15 钛合金损伤容限性能的影响较大, 细片未变形魏氏组织、变形魏氏组织和网篮组织具有较高的断裂韧性和较低的疲劳裂纹扩展速率, 同时仍保持较高的塑性, 具有较好的损伤容限性能。

关键词: 显微组织; TA15 钛合金; 损伤容限性能

中图分类号: 146.2

文献标志码: A

Relationship between microstructure and damage tolerance of TA15 titanium alloy

HE Shu-lin¹, LEI Xiao-jun¹, WANG Xiao-xiang¹, MA Ying-jie², WANG Xi-zhe³, WANG Ding-chun¹

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100016, China)

Abstract: The relationship between microstructure and damage-tolerance property of TA15 titanium alloy was studied. The results show that the microstructure has a great effect on damage-tolerance property of TA15 titanium alloy. The undeformed Widmanstätten, deformed Widmanstätten and net structure have higher fracture toughness and lower fatigue crack-extending rate, while still maintain the performance of high plasticity and good damage-tolerance.

Key words: microstructure; TA15 titanium alloy; damage tolerance property

随着人们认识的深化和断裂力学的发展, 满足结构完整性要求的破坏——安全设计理念和损伤容限设计准则已在民用和军工宇航产品中得到广泛应用^[1-2]。紧随着损伤容限设计准则的发展及运用, 具有高断裂韧性和低裂纹扩展速率的钛合金得到了快速的发展, 在国外已经成功应用于飞机的结构件, 我国在具有高损伤容限性能方面钛合金的研究还不多。本文作者在此研究组织形态对 TA15 钛合金损伤容限性能的影响规律, 以期对 TA15 钛合金的应用提供一些建议。

1 实验

通过对 TA15 钛合金材料采用不同的工艺获得各种类型的显微组织, 包括细片未变形魏氏组织、粗片未变形魏氏组织、变形魏氏组织、网篮组织、混合组织、双态组织。对不同组织形态的 TA15 钛合金材料经简单退火热处理后, 测试其拉伸性能、断裂韧性和裂

纹扩展速率，然后分析总结各种组织形态对性能的影响规律。

2 结果与讨论

2.1 TA15 合金的典型组织特征

按照组织的类型，将 TA15 合金的组织分为细片未变形魏氏组织、粗片未变形魏氏组织、变形魏氏组织、网篮组织、混合组织、双态组织，组织形貌如图 1 所示。从图 1 可见，魏氏组织具有完整的原始 β 晶界，网篮组织由 α 片编织而成，双态组织由 β_k 基体上分布着双态 α 组织组成，混合组织既有等轴 α ，也有条状 α 。

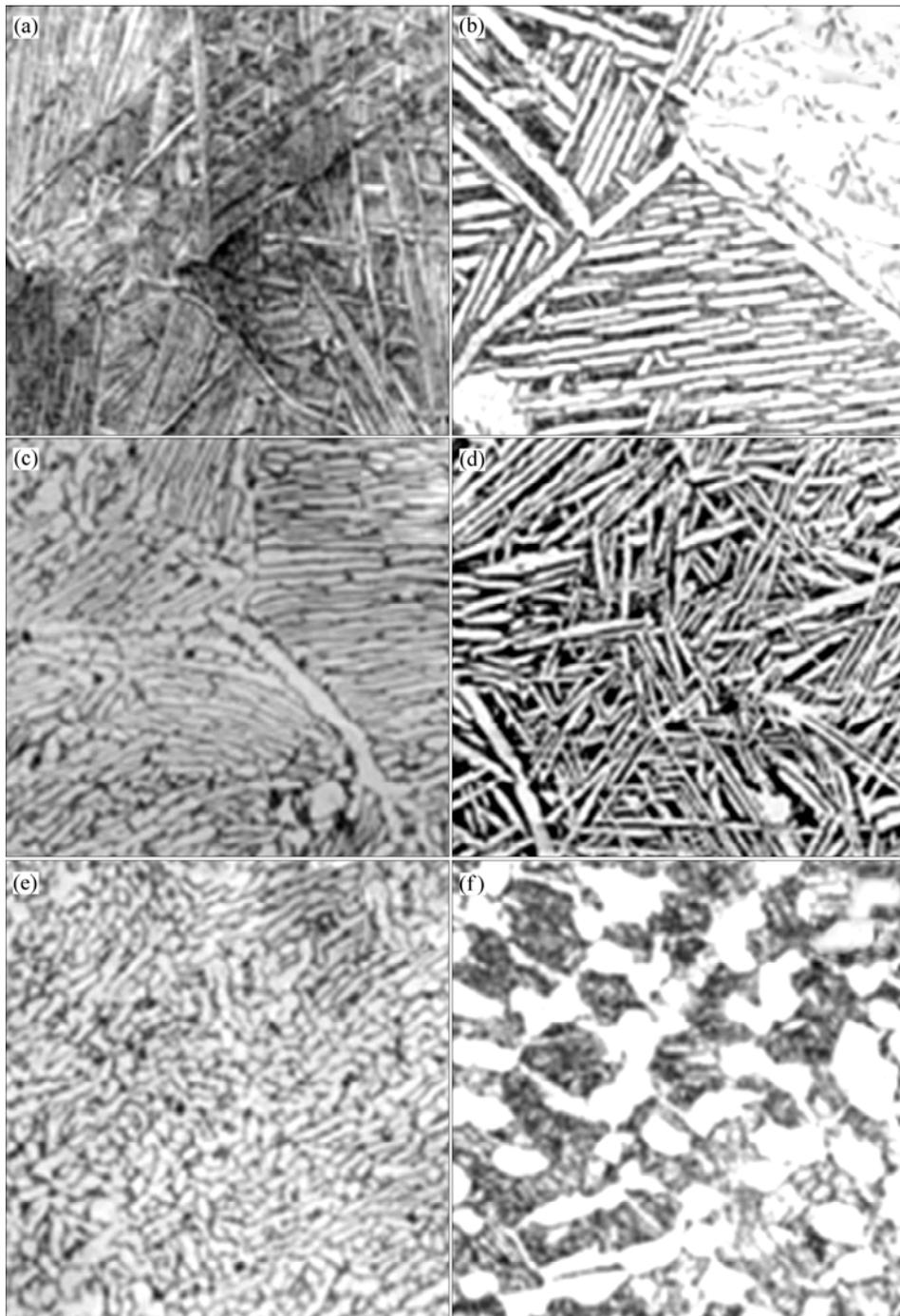


图 1 TA15 钛合金的典型组织

Fig.1 Typical microstructures of TA15 titanium alloys: (a) Undeformed Widmanstatten with small patches; (b) Undeformed Widmanstatten with thick patches; (c) Deformed Widmanstatten; (d) Net microstructure; (e) Strip microstructure; (f) Two-state microstructure

2.2 组织对合金塑性的影响

表1给出了不同组织对合金拉伸性能的影响。从表1可以看出,双态组织及条状组织的塑性最好,细片未变形魏氏组织及变形魏氏组织的次之,而粗片魏氏组织的塑性最差,尤其是断面收缩率极低。

表1 不同组织TA15合金的室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of TA15 titanium alloys with different microstructures at room temperature

Microstructure	Tensile properties at room temperature			
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Undeformed	912	757	12.0	27.0
Widmanstatten with small patches	913	793	12.0	20.0
	980	826	12.0	15.0
Undeformed Widmanstatten with thick patches	975	875	8.0	13.5
	975	865	7.5	8.5
Deformed Widmanstatten	895	860	13.0	25.5
	895	865	15.0	34.0
Net microstructure	950	850	13.0	38.0
Strip microstructure	935	900	13.5	37.5
	930	895	12.5	38.5
Two-state microstructure	960	880	14.5	37.0
	960	880	15.0	41.0

这种差别主要是由于双态组织与魏氏组织(也叫片状组织)变形机理的不同造成的,球状 α 相试样的变形是在个别 α 相的个别晶粒中以滑移的方式开始的。每个晶粒中的滑移线主要是方向不同的连续滑移细线,随着变形率的增大,滑移线的密度及滑距增加,滑移占据越来越多的 α 晶粒,并扩展到 β 相中,激活次生滑移系。由于某些晶粒使得其变形不均匀,还会发生晶间变形,个别滑移线的滑距甚至在断裂的后期阶段也较小。在变形的各显微区域的衔接处、在断裂区会出现杂乱分布的微孔和空洞,微孔和空洞在晶粒之间沿着滑移带发生合并,形成细晶的曲折裂纹,使合金表现出宏观的较好塑性。

魏氏组织变形的表现在变形的早期滑移带较

长,可以无阻碍地穿过整个平行的 α 集束,其特点是垂直滑距很大。这种粗滑移带实际上是在变形早期阶段对金属致密性明显的局部破坏,其发展的动力学会使组织缺陷迅速地增加和合并,从而导致试样过早断裂^[3];细小网篮状组织的变形介于片状组织和双态组织之间,其宏观拉伸性能也介于片状组织和双态组织之间,保持了双态组织较好的塑性。

2.3 组织对合金损伤容限性能的影响

表2给出了不同组织对合金损伤容限性能的影响。从表2可以看出,粗片魏氏组织具有较高的断裂韧性,双态组织具有较低的断裂韧性;随着组织由双态组织变为粗片状组织,断裂韧性逐渐提高。在 $\Delta K=55$ MPa·m^{1/2}时,细片未变形魏氏组织具有较低的疲劳裂纹扩展速率,双态组织具有较高的疲劳裂纹扩展速率。组织对裂纹扩展速率的影响规律与组织对断裂韧性的影响规律有相同处,也有不同之处。细片未变形魏氏组织虽然断裂韧性不如粗片未变形魏氏组织,但是其具有较低的疲劳裂纹扩展速率。从图2可以看出,裂纹在双态组织中扩展时,路径比较平直,在片层组织中扩展时, α 集束和 α 片对阻碍裂纹扩展和裂纹发生偏转起到很好的阻碍作用。

表2 不同组织TA15合金的损伤容限性能

Table 2 Damage-tolerance properties of TA15 titanium alloys with different microstructures

Microstructure	K_{IC} /(MPa·m ^{1/2})	$(da/dN)^{1/2}$ /(mm·cycle ⁻¹)
Undeformed Widmanstatten with small patches	100.0	
	102.0	1.54×10^{-3}
	113.0	
Undeformed Widmanstatten with thick patches	145.0	
	138.0	3.54×10^{-3}
deformed Widmanstatten	113.9	3.70×10^{-3}
Net microstructure	118.0	/
Hybrid microstructure	113.0	5.10×10^{-3}
Two-state microstructure	93.6	6.70×10^{-3}

1) $\Delta K=55$ MPa·m^{1/2}

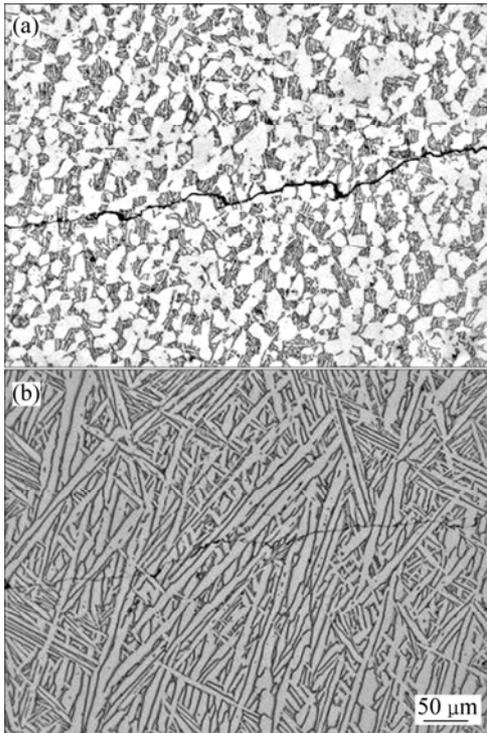


图2 TA15钛合金的典型组织裂纹扩展特征
Fig.2 Crack-extending characteristics of typical microstructures of titanium alloy

不同组织的疲劳裂纹扩展速率可用下式(不适合裂纹快速扩展区)进行解释:

$$da/dN = B(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \quad (1)$$

式中: B 为疲劳裂纹扩展系数; ΔK 为应力强度因子; ΔK_{th} 疲劳裂纹扩展门槛值, 一般指 da/dN 为 $(1\sim 3) \times 10^{-7}$ 时对应的 ΔK 。

从式(1)可以看出, 疲劳裂纹扩展速率主要与应力强度因子、疲劳裂纹扩展门槛值有关, 在 ΔK 不变的情况下, 当疲劳裂纹扩展系数减小时, 疲劳裂纹扩展门槛值增大, 疲劳裂纹扩展速率减小; 反之, 疲劳裂纹扩展速率增大。典型的疲劳裂纹扩展曲线见图3, 分为 I、II、III 区; 而对于 TA15 钛合金, TA15 钛合金裂纹扩展的门槛值较低, 其稳态疲劳裂纹扩展曲线见图3。从图4可判断, 疲劳裂纹扩展门槛值由大到小的顺序为细片未变形魏氏组织的 ΔK_{th} , 粗片未变形魏氏组织 ΔK_{th} , 双态组织 ΔK_{th} 。同时, 从表1也看出, 这3类组织塑性均较好, B 值可用式(2)估算, 也初步说明3种组织的疲劳裂纹扩展系数 B 相当。

$$B = 15.9/E^2 \quad (2)$$

综合分析不同组织的疲劳裂纹扩展系数 B 、疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} , 也可初步说明 $\Delta K = 55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

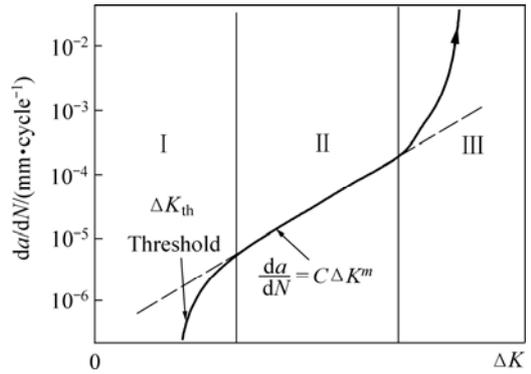


图3 TA15合金的典型疲劳裂纹扩展曲线
Fig.3 Typical fatigue crack-extending curves of TA15 alloy

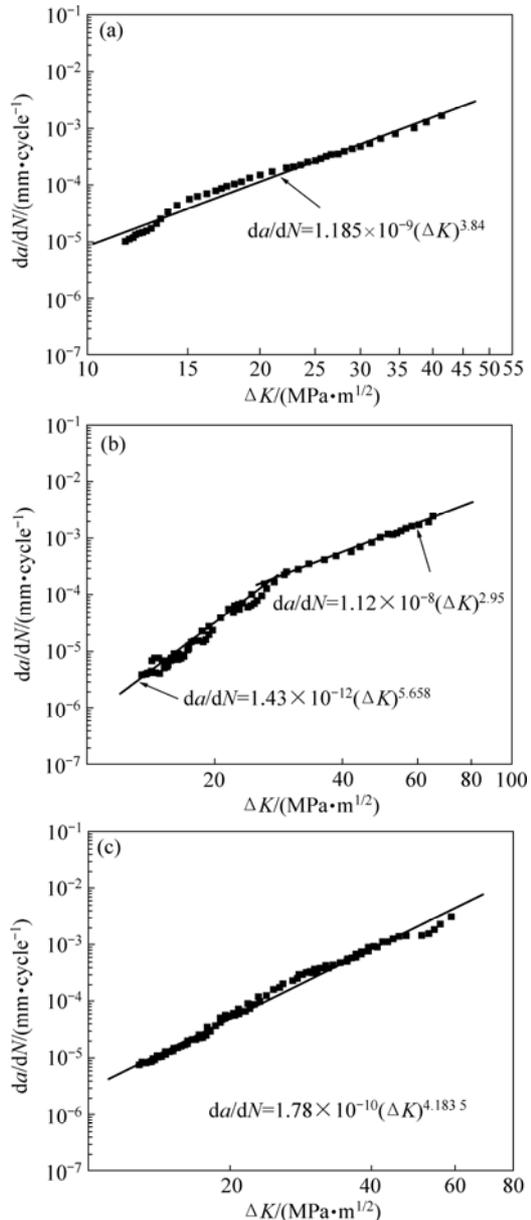


图4 不同组织 TA15 钛合金的疲劳裂纹扩展曲线
Fig.4 Fatigue crack-extending curves of TA15 titanium alloys with different microstructures: (a) Two-state microstructure; (b) Undeformed Widmanstatten with small patches; (c) Undeformed Widmanstatten with thick patches

时不同组织的疲劳裂纹扩展速率的差异。

2.4 不同组织对合金综合性能的影响的评价

结合美国损伤容限性钛合金—— β 退火Ti-6Al-4V板材标准(AMS4905C)对性能指标的要求,对不同组织的合金性能进行分析,可知魏氏组织具有较高的断裂韧性和较低的裂纹扩展速率,但粗片未变形魏氏组织塑性较差;变形魏氏组织和网篮组织具有较好的塑性及损伤容限性能,但对于加工来说,控制较难。

因此,对于具有较高的损伤容限性能同时兼顾合金塑性时,应当将TA15钛合金材料的组织通过控制 β 热处理后片层厚度或者采用 β 区热加工的工艺措施控制终轧温度,得到变形魏氏组织和网篮组织,在保持材料具有较好塑性的同时,提高材料损伤容限。

3 结论

组织形态对TA15钛合金损伤容限性能影响较大,细片未变形魏氏组织、变形魏氏组织和网篮组织具有较高的断裂韧性和较低的疲劳裂纹扩展速率,同时仍

保持了较高的塑性。

REFERENCES

- [1] 曹春晓. 损伤容限型钛合金设计及判据[J]. 金属学报, 2002, 38: 338-342.
CAO Chun-xiao. Design of damage and criteria for titanium alloy[J]. Metal Technology, 2002, 38: 338-342.
- [2] 鲍利索娃 E A. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986.
EOPNCOBA E A. Titanium metal[M]. CHEN Shi-qing, transl. Beijing: National Defence Industry Press, 1986.
- [3] 郑修麟. 材料的力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
ZHENG Xiu-ling. Mechanical properties[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001.
- [4] B K 亚力山大, 等. 钛合金半成品加工[M]. 宁兴龙, 译. 西安: 稀有金属材料工程杂志社.
ALEXANDER B K, et al. Alloy semi-finished products processing[M]. NING Xing-long, transl. Xi'an: Rare Metal Materials Engineering Press.

(编辑 杨 华)