

铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金 的室温力学性能

陈 晖^{1,2}, 苏彦庆¹, 骆良顺¹, 李新中¹, 郭景杰¹, 傅恒志¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 对具有柱状晶组织的铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金纵向和横向试样进行了室温拉伸、室温压缩和三点弯曲试验, 并对拉伸试样断口进行了分析。结果表明: 铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金力学性能存在强烈的各向异性。横向试样的拉伸性能和弯曲性能远远优于纵向试样, 但压缩屈服强度低。合金的力学性能取决于加载轴与片层界面的角度, 而不是柱状晶轴的方向。横向拉伸试样的拉应力与片层界面平行, α_2/γ 片层相界面对裂纹的阻碍作用对提高拉伸性能起到了重要作用。纵向压缩试样的压应力与片层界面垂直, 使片层间的微裂纹闭合不扩展, 压缩屈服强度较横向试样高。

关键词: TiAl 合金; 室温拉伸; 室温压缩; 全片层组织

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)02-0331-05

γ -TiAl 基合金作为高温结构材料受到广泛的关注, 由于具有较低的密度、优异的高温强度、较好的抗氧化性能和抗蠕变性能有望应用于航空航天和交通运输等行业中^[1-4]。研究发现 γ -TiAl 基合金的显微组织对力学性能有着极大的影响。4 种典型的组织中, 粗大的全片层组织具有良好的断裂韧性和抗蠕变性能, 但是塑性较差^[5,6]。近年来针对全片层 γ -TiAl 基合金研究发现, 片层界面与加载轴的角度对性能影响很大, 且片层方向一致的全片层 γ -TiAl 基合金在很大温度范围内具有较好的强度和塑性^[7-9]。

Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金是把已有的 Ti-46Al-2W-0.5Si 合金适当减少 W 含量用于发动机叶片材料的开发。它的力学性能如何有待研究。本实验采用真空水冷铜坩埚电磁感应熔炼炉(ISM)制备了 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金铸锭, 发现宏观组织是粗大的柱状晶粒, 显微组织主要由 α_2/γ 片层结构组成^[10]。由于大多数具有柱状晶组织的工程材料力学性能具有各向异性, 为了研究具有柱状晶组织的铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金力学性能的各向异性, 本实验通过对平行和垂直柱状晶轴两种取样方法获得的试样进行室温拉伸、室温压缩和三点弯曲试验, 研究合金两种方向的

室温力学性能。并对断裂的拉伸试样进行断口 SEM 观察, 分析铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金室温力学性能各向异性的原因。

1 实 验

实验用合金的名义成分为 Ti-46Al-0.5W-0.5Si (at%)。原材料为零级海绵钛、高纯铝块(Al \geq 99.99%, 质量分数, 下同)、高纯硅(Si \geq 99.9%)和铝钨中间合金(Al-55.92%W)。为了有利于难熔金属 W 的熔化以及减少 Al 元素的大量烧损挥发, 选取铝钨中间合金作为熔炼材料, 获取合金中所需的 W 元素。采用 ISM 制备方法获得直径为 Φ 112 mm, 高为 220 mm 的圆柱形合金铸锭。

用电火花线切割机沿着圆柱形铸锭的纵截面分别切取平行和垂直于柱状晶生长方向的纵向(Longitudinal direction, Type-LD)和横向(transverse direction, Type-TD)两种类型的拉伸试样、圆柱形压缩试样和三点弯曲试样。切取的纵向拉伸和三点弯曲试样的长度方向与柱状晶生长方向平行, 压缩试样轴线方向与柱状晶生长方向平行。切取的横向拉伸和三点弯曲试样的长度方向与柱状晶生长方向垂直, 压缩

收稿日期: 2012-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(50975060, 50901025); 国家“973”项目(2011CB610406); 中国博士后科学基金(201104420, 20090450840); 黑龙江省科技计划项目(GZ09A206); 中央高校人才基金(HIT.BRET1.2010008)

作者简介: 陈 晖, 女, 1974 年生, 博士生, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86418415, E-mail: chenhui_hit@163.com

试样轴线方向与柱状晶生长方向垂直。

拉伸试样为板状拉伸试样，标距部分的尺寸为 6 mm×2 mm×18 mm；压缩试样的尺寸为 $\Phi 4$ mm×6 mm；三点弯曲试样尺寸为 4 mm×3 mm×36 mm。电火花线切割获得的试样，经过丙酮清洗后，试样的表面和侧面均用水砂纸磨至 1000#，避免切割划痕对试验结果的不利影响。试验均在 Instron 5569 电子万能材料试验机上进行，应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。三点弯曲实验的跨距为 30 mm。采用 OLYMPUS-GX-71 金相显微镜对铸态组织进行分析，采用 FEI Quanta 200F 扫描电子显微镜对拉伸试样断口形貌进行观察。

2 实验结果

2.1 铸态合金的显微组织

图 1 所示为铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的金相组织，由相互平行的柱状晶粒组成^[10]。柱状晶区各晶粒朝中心液体生长时，由于其他方向的长大都受到阻碍，使树枝晶得不到充分的发展，树枝的分枝很少。因此结晶后的显微缩孔少，组织较致密。每个柱状晶内部是由相互平行的 $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ 相与 $\gamma(\text{TiAl})$ 相组成的层片结构，由于 γ/α_2 片层结构在固态相变过程中形成，析出的 γ 相与母相 α 相存在确定的晶向关系： $(111)_\gamma // (0001)_\alpha$ ，因而通过固态转变形成的 γ/α_2 片层的界面与 α 相的生长方向垂直，即与柱状晶生长方向垂直^[10-12]。

2.2 铸态 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的力学性能

表 1 所示为切取的纵向和横向拉伸试样、压缩试样和三点弯曲试样所受载荷的示意图。图中表明不同类型试样的片层方向与应力的关系。

由于合金的柱状晶内 α_2/γ 片层与柱状晶的生长方向近似垂直，因此平行于柱状晶的生长方向切取的纵向拉伸试样中，片层界面与拉应力方向垂直，而垂直于柱状晶的生长方向切取的横向拉伸试样的片层界面

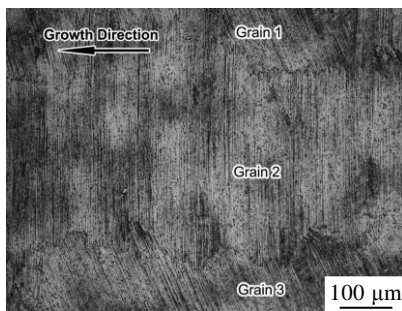


图 1 铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金显微组织

Fig.1 Microstructure of the as-cast full lamellar Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy

表 1 纵向和横向试样应力示意图

Table 1 Stress schematic diagrams of longitudinal and transverse specimens

Specimen	Tensile	Compression	Three point bending
Shape			
Type-LD			
Type-TD			

与拉应力方向平行^[10]。纵向压缩试样的压应力方向与片层界面垂直，而横向压缩试样压应力方向与片层界面平行。对于弯曲试样在三点弯曲试验机上测试时，在压缩载荷作用下，材料的内侧承受压应力，而外侧承受拉应力，也就是压缩载荷作用点试样下部的表面处承受最大拉应力，如示意图中双向箭头所示。那么纵向和横向弯曲试样下表面处的拉应力与片层界面的角度就与相应拉伸试样相近。

表 2 为纵向试样和横向试样室温拉伸和压缩性能数据。对比发现具有柱状晶的铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金力学性能存在各向异性。横向试样(垂直于柱状晶生长方向切取)的塑性和抗拉强度明显优于纵向试样(平行柱状晶生长方向切取)的塑性和抗拉强度。但是横向试样的压缩屈服应力和最大压缩应力低于纵向试样的压缩屈服应力和最大压缩应力。

图 2 为铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金纵向(LD)和横向(TD)试样的拉伸应力-应变曲线。图中曲线 1 所示为拉应力方向与片层界面垂直的纵向试样拉伸曲线，在直线早期阶段，远没有发生塑性变形就发生断裂。而拉应力方向与片层界面平行的横向试样拉伸曲线 2 在拉伸开始阶段呈现一段直线段之后出现屈服，表明试样在拉伸载荷作用下产生了一定的塑性变形后发生断裂。

图 3 为合金纵向和横向试样的压缩曲线。图中曲线 1 和曲线 2 分别为压应力方向与片层界面垂直和平行的压缩曲线，压应力方向与片层界面垂直时具有更

表 2 纵向和横向试样室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of longitudinal and transverse specimens at room temperature

Sample	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	σ_{sc}/MPa	σ_{bc}/MPa
Type-LD	—	164.9	0.01	595.05	2518.49
Type-TD	508.8	533.7	0.48	469.92	1837.07

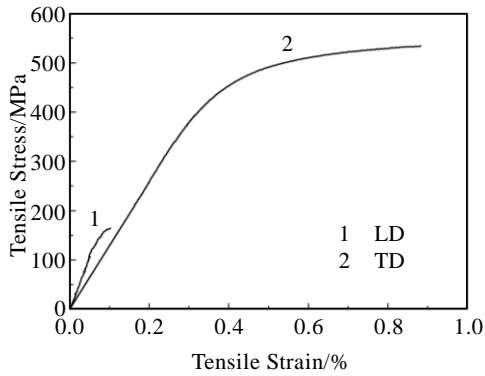


图 2 铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Tensile stress-strain curves of the as-cast full lamellar Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy

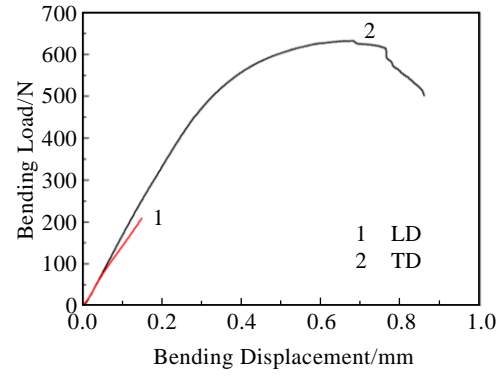


图 4 铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的弯曲载荷-位移曲线

Fig.4 Bending load-displacement curves of the as-cast full lamellar Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy

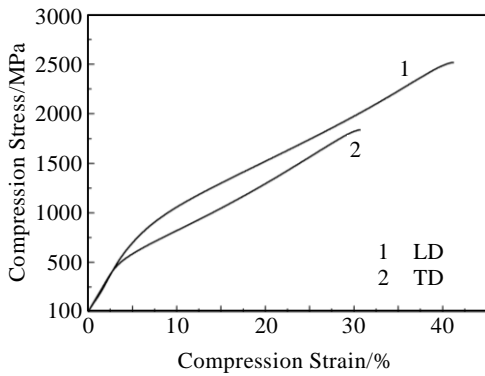


图 3 铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的压缩应力-应变曲线

Fig.3 Compressions stress-strain curves of the as-cast full lamellar Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy

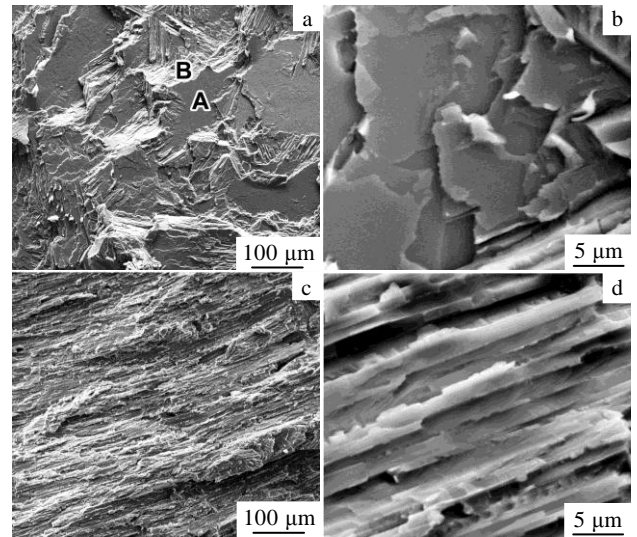


图 5 拉伸试样的断口形貌

Fig.5 Fracture morphologies of tensile specimens: (a) tensile stress being perpendicular to lamellar interface; (b) high magnification of Fig.5a; (c) tensile stress being parallel to lamellar interface; (d) high magnification of Fig.5c

大的压缩屈服应力。此外，由于试样进入屈服后，试样的塑性变形有较大的增长，压缩试样高度减小，横截面积增加，因而承受的载荷也随之增大。

图 4 为合金纵向和横向三点弯曲试样的弯曲载荷-位移曲线。曲线 1 为纵向试样的弯曲载荷-位移曲线，在弹性变形阶段就发生断裂。曲线 2 为横向试样的弯曲载荷-位移曲线，外表面处拉应力方向与片层界面平行时，试样发生塑性变形，并能承受较大的弯曲载荷，远远高于拉应力方向与片层界面垂直的纵向试样的最大弯曲载荷。

2.3 室温拉伸试样断口形貌

图 5 所示为不同放大倍数下纵向和横向两种室温拉伸试样断裂后的断口形貌。图 5a 所示为拉应力与片层界面垂直的纵向试样断口形貌，由大部分的平整片层平面(A 处所示)和少量的台阶(B 处所示)组成。

图 5b 高倍组织中大的平面表明断裂时沿着 α_2/γ 片层界面(inter-lamellar)开裂，个别地方会出现穿越层片断裂的方式。图 5c 所示为拉应力与片层界面平行的横向拉伸试样的断口，很难看到大片平整的片层平面。图 5d 的高倍数照片清楚的看到近于平行的层片的断面，表明横向试样主要是以穿越 α_2/γ 片层界面(trans-lamellar)开裂。

3 分析与讨论

由于大多数具有柱状晶组织的工程材料力学性能

具有各向异性, 通常的情况下, 沿着柱状晶生长方向(纵向)的强度很高, 但是垂直于柱状晶生长方向(即近于平行的柱状晶粒之间的横向)强度却很低, 柱状晶界是脆弱结合面。而本实验铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的纵向和横向力学性能对比却与之相反。

图 5b 所示纵向试样拉伸加载轴与片层界面垂直时, 由于 α_2 片层和 γ 片层界面是组织中的脆弱结合面^[10-12], 在较小的载荷作用下裂纹就会沿平坦的片层相界面扩展, 因而纵向试样所能承受拉伸载荷较小, 具有较低的塑性和抗拉强度值。图 5d 所示横向试样拉伸载荷与 α_2/γ 片层界面平行时, α_2/γ 的片层相界面可以有效地阻碍微小裂纹的扩展, 裂纹穿过大量的片层相界面扩展时需要较大的载荷, 对于提高横向试样的塑性和抗拉强度起到了重要的作用。研究表明, γ -TiAl 合金片层界面与加载方向角度不同时, 合金的断裂行为具有各向异性^[13-15]。本实验切取的纵向和横向试样的拉伸加载方向与片层界面的角度不同, 获得合金拉伸性能具有严重的各向异性。对于铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金, 严重的拉伸性能各向异性不是取决于拉伸加载轴和柱状晶轴的角度, 而是取决于拉伸加载轴与片层界面的角度。

对于纵向室温压缩试样, 由于压应力方向与片层界面垂直, 压应力会使片层界面间存在的微小裂纹闭合, 削弱了微小裂纹对组织的割裂作用, 减少了沿片层界面开裂的可能, 因而合金可以承受很大的应力。而横向压缩试样, 由于压应力与片层界面平行, 在切应力的作用下, 压缩试样会沿着片层界面发生剪断破坏^[16]。因而纵向室温压缩试样的压缩性能比横向室温压缩试样的压缩性能好, 这与该合金拉伸性能的各向异性不同。

对于弯曲试样在三点弯曲试验中, 由于试样外侧表面处承受拉应力, 纵向和横向弯曲试样所受拉应力与片层界面的角度与相应拉伸试样相近, 因而力学性能的各向异性与拉伸试样相同, 即横向弯曲试样断裂前所能承受的最大载荷高于纵向弯曲试样, 表现为较好的抗弯性能。

4 结 论

1) 具有柱状晶的铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金力学性能有强烈的各向异性, 垂直于柱状晶生长方向的横向试样的塑性、抗拉强度和抗弯性能远远优于平行于柱状晶生长方向的纵向试样的性能, 但是横

向试样的压缩屈服强度比纵向试样低。铸态全片层 Ti-46Al-0.5W-0.5Si 合金的室温力学性能强烈依赖于加载轴与柱状晶内片层界面的角度, 而不是柱状晶的生长方向。

2) 拉伸和弯曲试验中, 纵向试样拉应力与片层界面近似垂直, 性能极差。而横向试样拉应力与片层界面近似平行, α_2/γ 的片层相界面可以有效地阻碍裂纹的扩展, 对于提高横向试样的拉伸性能起到了重要的作用。

3) 压缩试验中的纵向试样, 压应力与片层界面垂直, 压应力可以使 α_2/γ 的片层相界面处的微裂纹闭合, 减小了微裂纹的割裂作用, 对于提高纵向试样的压缩性能有利。

参考文献 References

- [1] Yan Ru(闫茹), Xu Zhengfang(许正芳), Lin Junpin(林均品) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(6): 1041
- [2] Yamaguchi, Inui M H. *Acta Materialia*[J], 2000, 48(1): 307
- [3] Cai Lihua(柴丽华), Liu Zhiguang(刘志光), Chen Yuyong(陈玉勇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(S3): 484
- [4] Hu D, Jiang H, Wu X. *Intermetallics*[J], 2009, 17: 744
- [5] Qin G W. *Intermetallics*[J], 2001, 9: 173
- [6] Mastuo T, Nozaki T, Asai T et al. *Intermetallics*[J], 1998, 6: 695
- [7] Yokoshima S, Yamaguchi M. *Acta Materialia*[J], 1996, 44: 873
- [8] David R Johnson, Haruyuki Inui, Yamaguchi M. *Acta Materialia*[J], 2006, 54: 1077
- [9] Johnson D R, Inui H. *Acta Mater*[J], 1995, 44: 2523
- [10] Chen Hui, Su Yanqing, Luo Liangshun et al. *China Foundry* [J], 2012, 9: 64
- [11] Rengen Ding, Ian P Jones, Yulung Chiu et al. *Intermetallics* [J], 2012, 20: 123
- [12] Nakano T, Kawanaka T, Yasuda H Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 1995, 194: 43
- [13] Wang P, Bhate N. *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 1573
- [14] Nakano T, Kawanaka T, Yasuda H Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 1995, 194: 43
- [15] Chen J H, Cao R, Zhang J et al. *Mater Sci*[J], 2007, 42: 2820
- [16] Cao R, Li L, Chen J H et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527: 2468

Mechanical Properties of As-Cast Full Lamellar Ti-46Al-0.5W-0.5Si Alloy at Room Temperature

Chen Hui^{1,2}, Su Yanqing¹, Luo Liangshun¹, Li Xinzhong¹, Guo Jingjie¹, Fu Hengzhi¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Tensile tests, compression tests and three point bending tests have been conducted on longitudinal and transverse specimens of as-cast full lamellar Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy with columnar grains at room temperature. The fracture surfaces of tensile samples have been investigated to analysis the reason of different mechanical properties. Results show that the alloy exhibits mechanical property anisotropy, the tensile and bending properties of transverse specimens are much better than those of longitudinal specimens, but the compression yield strength is lower. The mechanical properties of the alloy strongly depend on the angle between the loading axis and the lamellar interface, do not depend on the growth direction of columnar grains. When the tensile stress of the transverse specimen is parallel to the lamellar interface, the interface of α_2/γ lamellar can effectively block the crack growth, which plays an important role on improving their tensile properties. When the compression stress of the longitudinal specimens is perpendicular to the lamellar interface, the microcracks between lamellae can close up, without any more growing, resulting in obtaining higher compression yield strength.

Key words: TiAl alloy; tensile test at room temperature; compression test at room temperature; fully lamellar structure

Corresponding author: Chen Hui, Candidate for Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 15001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418415, E-mail: chenhui_hit@163.com