

文章编号: 1004-0609(2003)02-0448-06

片层晶粒体积分数对双态组织 γ -TiAl 基合金 室温力学性能的影响^①

郑瑞廷^{1,2}, 张永刚², 陈昌麒², 程国安¹

(1. 北京师范大学 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京航空航天大学 材料科学与工程系, 北京 100083)

摘 要: 对热等静压后的 Ti-46.5Al-2Cr-1.5Nb-1V 合金进行了热处理, 获得了一系列含有不同片层晶粒体积分数的双态组织。室温拉伸实验结果表明, 片层晶粒体积分数对双态组织 TiAl 合金的性能影响很大。在应变速率一定的情况下, 片层晶粒体积分数的增加会导致双态组织 TiAl 合金屈服强度的增加以及室温塑性的降低。在近 γ 组织中, 室温塑性随着应变速率的增加而增加, 原因主要是在应变速率较高时, 有较多的孪晶系开动。

关键词: γ -TiAl 基金属间化合物; 双态组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

尽管 γ -TiAl 基合金具有密度低、高温强度高、高温抗氧化能力强等特点, 但其在室温时的塑性低、断裂韧性差及成型能力差仍是这类合金实用化的最大障碍^[1]。有研究表明^[2], γ -TiAl 基合金的力学性能取决于化学成分及显微组织参数, 在所获得的 TiAl 基合金的 4 种显微组织中, 双态组织的强度和塑性均好于近 γ 及全片层组织, 但其断裂韧性和高温蠕变能力较全片层组织差。众所周知, 双态组织中片层及 γ 组织的体积分数及晶粒度的大小对合金的性能影响很大。很多研究者^[3~5]对双态组织的显微组织及力学性能进行了研究, 但得出的结论相差很大。Koeppe 等^[6]在双态组织 Ti-48Al-2Cr 合金中发现其系数 K_y 大约为 1.1, 随着成分的变化有一定的差距, 但大体都在 1 附近。这些研究也主要是集中在晶粒粒度与材料的屈服强度的关系上, 关于片层体积分数对合金常温性能影响的系统研究不多。Tognes 等^[7]曾经研究了 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金中双态组织中片层晶粒体积分数和氧含量与室温拉伸性能的关系, 发现在片层含量处于 30%~50% 之间时, 材料具有最好的室温塑性。但是关于片层晶粒体积分数对双态组织 TiAl 合金室温强度及塑性影响的研究结果中都包含晶粒尺度的影响, 而且双态组织中的晶粒大小极不均匀。其结果很难说明是片层晶粒体积分数的单一影响。

为了深入地探讨片层晶粒体积分数对双态组织

室温力学性能的影响, 本文作者采用 Ti-46.5Al-2Cr-1.5Nb-1V(摩尔分数)合金, 通过特定的热处理工艺^[8], 获得了一系列具有相同晶粒尺寸, 不同片层晶粒体积分数的双态组织。并在此基础上研究了不同的应变率下, 双态组织中片层晶粒体积分数对合金室温强度和塑性的影响。

1 实验

从热等静压后的 Ti-46.5Al-2Cr-1.5Nb-1V(摩尔分数, 下同)铸锭上用电火花线切割出若干尺寸为 12 mm × 12 mm × 60 mm 的立方体长条试样, 把试样用石英管真空封装后进行热处理, 热处理在 SiC 高温箱式炉中进行。本文作者采用特定的热处理工艺^[8]使这两种组织参数区分开来。热处理规范如表 1 所示。用电火花线切割的办法加工板状拉伸试样, 试样工作段的尺寸为 3 mm × 5 mm × 12 mm。对试样表面进行打磨、电解抛光(抛光液为 8% 的高氯酸+92% 的酒精)以降低试样表面粗糙度的影响和便于实验完后观测。室温拉伸实验在 MTS-880 上进行, 拉伸应变速率分别为 1.0×10^{-3} 、 1.0×10^{-4} 和 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。为了比较方便, 采用 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服强度。用读数显微镜测量每个试样的断后延伸率。每个试验点取 4 个试样中 3 个数据比较接近的试样的平均值。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59895150) 收稿日期: 2002-05-24 修订日期: 2002-09-27

作者简介: 郑瑞廷(1974-), 男, 博士后, 博士

通讯联系人: 郑瑞廷, 男, 博士; Tel: + 86-10-62205403; E-mail: Ruiting-zheng@sina.com

2 实验结果

2.1 显微组织

表 1 所列是在不同的热处理工艺下获得的不同显微组织参数。从表 1 可以看出: 通过表中所列的热处理工艺, 在控制晶粒尺度相近的情况下, 拉开了片层晶粒的体积分数。这使得进一步研究片层晶粒体积分数与材料室温力学性能之间的关系成为了可能。图 1 所示为这 3 种显微组织的金相照片。

2.2 片层晶粒体积分数对室温力学性能的影响

对不同显微组织的试样在不同的应变速率下进行一系列的室温拉伸实验, 结果如图 2 所示。从图

2 可以看出片层晶粒体积分数对于双态组织 TiAl 合金室温性能的影响的大致规律: 随着片层晶粒体积分数的增加, 屈服强度不断上升, 但是延伸率却持续下降。这个结果与文献[6, 9]的结果有所不同, 本文作者认为这是由于文献中没有考虑晶粒度的影响, 实际上晶粒度对材料力学性能的影响非常大^[10]。而且屈服强度和塑性延伸率的变化都不是线性的。随着应变率的变化, 近 α 组织的发生了一些与其他显微组织不同的室温力学响应。

2.3 应变速率对室温力学性能的影响

Jin 等^[11]发现屈服和流变应力的温度依赖性与应变速率有关。为此, 本文作者对室温下应变速率对 TiAl 合金性能的影响也进行了研究。图 3 所

表 1 热处理工艺和显微组织参数

Table 1 Heat treatment process and microstructure parameters

Sample No.	Heat treatment process	Grain size/ μm	Volume fraction of lamellar grain / %
D1	1 320 $^{\circ}\text{C}$, 10 min, OQ+ 1 260 $^{\circ}\text{C}$, 60 h, AC + 1 270 $^{\circ}\text{C}$, 5 h, fan cooled(Twice)	~ 51	~ 63
D2	1 320 $^{\circ}\text{C}$, 10 min, OQ+ 1 300 $^{\circ}\text{C}$, 1.5 h, fan cooled	~ 54	~ 95
D3	1 320 $^{\circ}\text{C}$, 10 min, OQ+ 1 180 $^{\circ}\text{C}$, 1.5 h, fan cooled	~ 48	~ 10

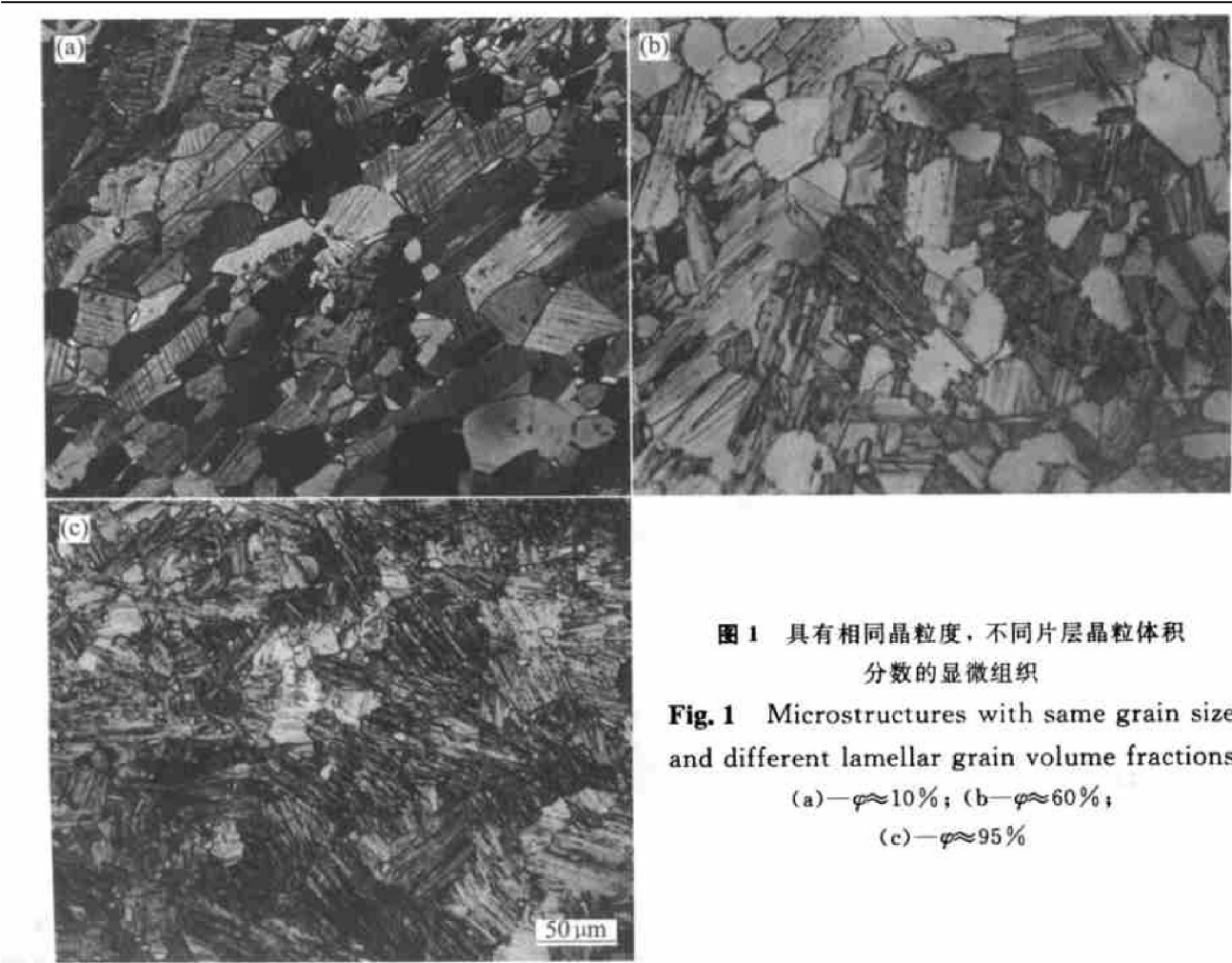


图 1 具有相同晶粒度, 不同片层晶粒体积分数的显微组织

Fig. 1 Microstructures with same grain size and different lamellar grain volume fractions

(a)— $\varphi \approx 10\%$; (b)— $\varphi \approx 60\%$;
(c)— $\varphi \approx 95\%$

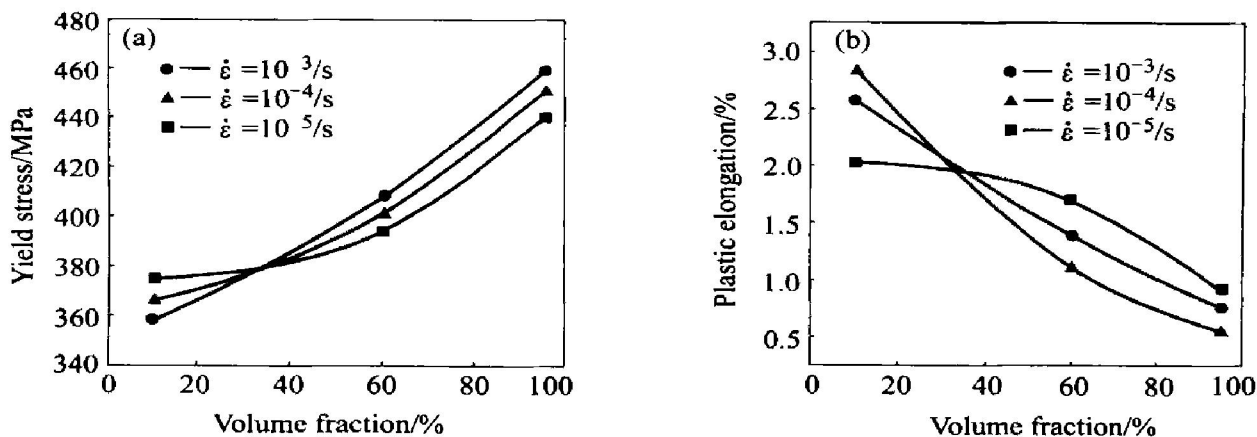


图 2 片层晶粒体积分数对于双态组织 TiAl 合金室温力学性能的影响(晶粒直径约 50 μ m)

Fig. 2 Effect of lamellar grain volume fraction (LGVF) on ambient temperature mechanical behaviors of duplex TiAl alloys

(a) —Relationship between yield strength and LGVF; (b) —Relationship between plastic elongation and LGVF

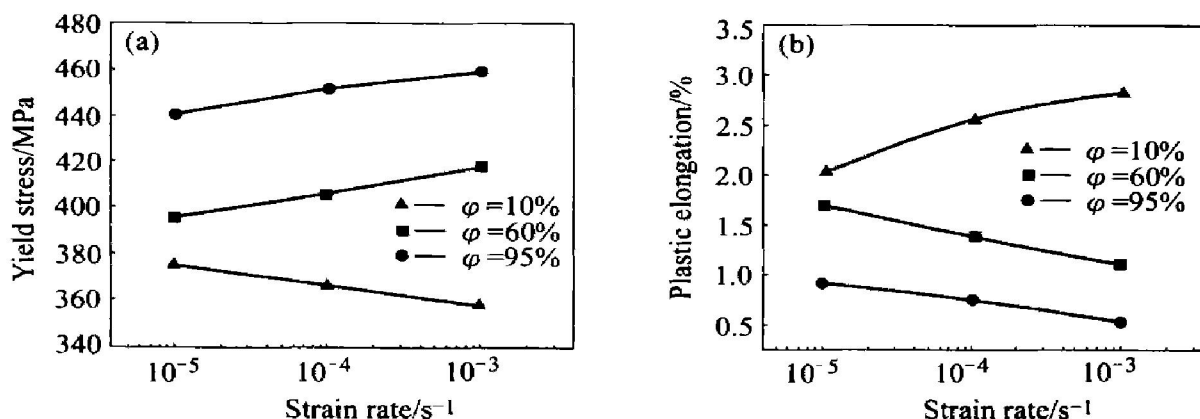


图 3 双态组织 TiAl 合金室温力学性能与应变速率的关系

Fig. 3 Relationship between strain rate and ambient mechanical behavior of duplex TiAl alloys

(a) —Relationship between yield strength and strain rate;

(b) —Relationship between plastic elongation and strain rate

示为应变速率对双态组织室温变形行为的影响。从图 3 可以看到,当片层晶粒体积分数不同时,应变速率对双态组织室温变形行为的影响不同。片层晶粒含量较高时,应变速率对双态组织室温变形行为的影响与对全片层组织的影响相似,都是室温强度随着应变速率的提高而增大,室温延伸率随着应变速率的提高而降低。当片层晶粒含量降低到大约 30% 以后,显微组织已经由典型的双态组织向近 γ 组织变化,应变速率对室温变形行为的影响也发生了变化。其室温强度随着应变速率的提高而降低,而室温延伸率随着应变速率的提高而增大。在本研究的应变速率范围内,这些变化关系基本上呈线形。

3 分析与讨论

由实验结果可以看到:在控制了显微组织的情况下,片层晶粒体积分数和应变速率对双态组织 TiAl 合金室温强度及塑性的影响具有一定的规律性。

双态组织一般具有细小均匀的显微组织,细小的晶粒可以缩短滑移面,减少同一滑移面上位错运动长度和位错堆积,降低滑移面交截处和晶界的应力集中,不利于裂纹形核,所以双态组织具有较高的断裂强度和塑性,其最大断裂强度和室温塑性都要明显强于全片层组织 TiAl 合金。

片层晶粒中密集的片层界面阻碍了位错的滑移,所以随着片层含量的增高,材料的屈服强度增加,同时也使得延伸率不断下降。

片层晶粒具有严重的各向异性,不但使自己的变形受到限制,而且也限制了周围晶粒的变形。从含有不同片层晶粒体积分数的试样断口的二次电子相上也可以看出其塑性是逐渐递减的。在近 γ 组织中(见图 4(a)),断口非常均匀, γ 晶粒内部都是解理的河流状花纹,晶界上变形比较大,出现了一些韧窝状的形貌。双态组织中(见图 4(b)) γ 晶粒的变形明显要小一些。在片层晶粒内部以及片层晶粒的

晶界上, 由于严重的应力集中, 导致了微裂纹的产生。近片层组织(见图 4(c))的断口几乎看不到塑性变形的痕迹, 沿片层和穿片层解理是其主要特征。穿片层断面上存在一些沿孪晶面解理的痕迹。

随着片层晶粒体积分数的增加, 存在这样一个明显的规律: 屈服强度不断上升, 延伸率持续下降。但是图 2 中有一现象引起了我们的注意: 随着应变率的变化, 双态组织和近全片层组织的变化趋势都是一样的, 即随着应变率的降低, 延伸率增加而屈服强度下降。这是由于在室温下, 合金内部的短程应力场只受应变率影响的缘故^[12]。应变率较高时, 可动位错数目较少, 位错滑移的距离短。故而在此情况下, TiAl 合金的屈服强度较高而塑性较低。

不过近 γ 组织中情况却与上述规律正好相反, 对于近 γ 组织的这种反常的力学响应, 在此作进一步的探讨。

对近 γ 组织拉伸试样的表面进行轻微腐蚀后, 在光学显微镜下进行观察发现, 随着应变率的增加, 试样表面的滑移模式发生了变化(见图 5)。随着应变率从 10^{-5}s^{-1} 增加到 10^{-3}s^{-1} , 试样表面具有滑移线的晶粒数目从 30% 增加到 80%, 而且晶粒

内部滑移系的数目从一个增加到两个。而且明显可以看到滑移线从一个晶粒传递到另一个晶粒的数量大大增加。这就说明随着应变率的增加, 滑移系数目有了较大的增加。

在应变速率较低的时候, 近 γ 组织拉伸试样中的机械孪晶相对较少^[13], 滑移面也不多。当位错从晶界上发射出来以后容易沿着已有的滑移面滑动, 从而在晶粒内部形成位错堆积。当位错的堆积达到一定程度, 微裂纹的形核和扩展使得试样的塑性较低。当应变速率较高时, 近 γ 组织拉伸试样中的机械孪晶的密度相对较高。位错滑动到晶界堆积以后, 使得临近晶粒中的孪晶开动, 由于多个变形系统的共同作用, 使得合金的变形能力有了较大的增长, 但同时使得其屈服强度有所下降。

同样在 10^{-3}s^{-1} 的应变速率下, 含有片层晶粒 60% 左右的双态组织拉伸试样的表面经过腐蚀以后就没有发现交滑移的存在。这就说明尽管在室温高应变速率下会有较多的孪晶系开动, 但是片层晶粒的存在抑制了穿片层滑移系的开动。从而使其塑性变形收到限制。从这一点上也可以看出为什么近 γ 组织的塑性最好。

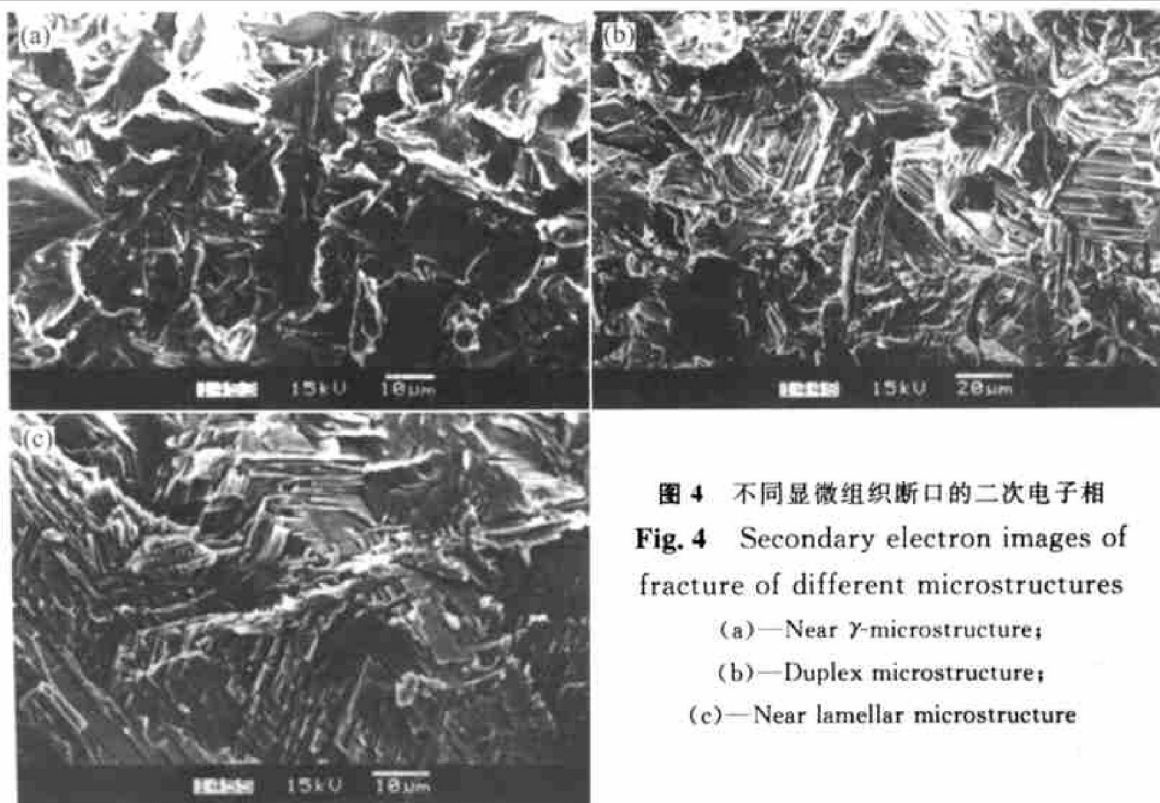


图 4 不同显微组织断口的二次电子相
Fig. 4 Secondary electron images of fracture of different microstructures
(a)—Near γ -microstructure;
(b)—Duplex microstructure;
(c)—Near lamellar microstructure

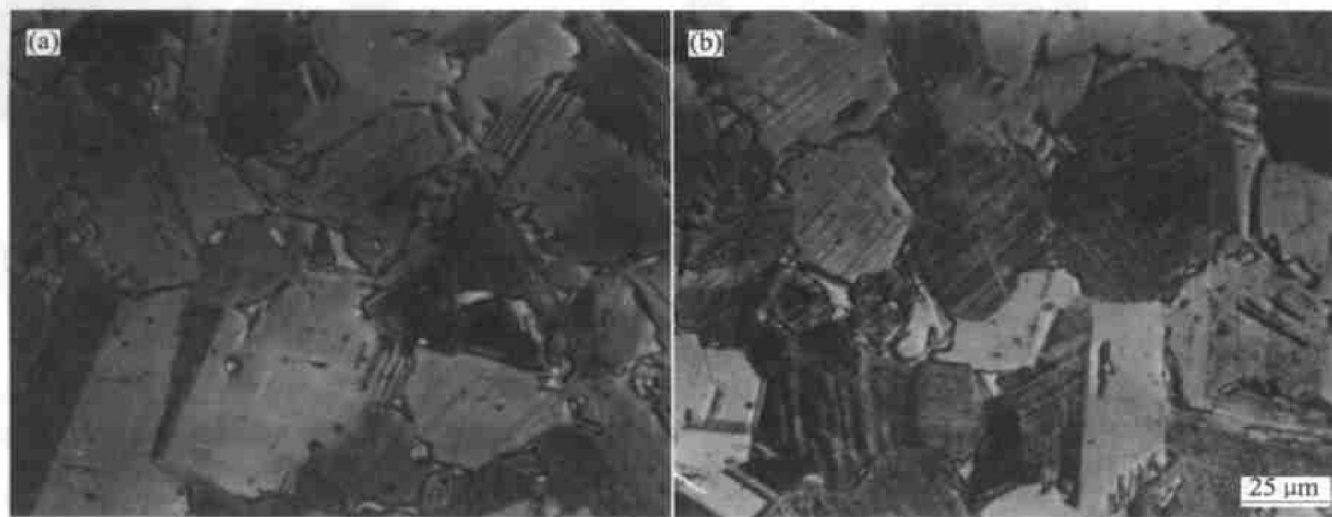


图 5 不同应变率下近 γ 组织拉伸试样表面的滑移线

Fig. 5 Slip lines on surface of near γ -microstructure TiAl alloy specimens tensioned at different strain rates

(a) —At strain rate of 10^{-5} s^{-1} ; (b) —At strain rate of 10^{-3} s^{-1}

4 结论

1) 在应变速率一定的情况下, 片层晶粒体积分数的增加会导致双态组织 TiAl 合金屈服强度的增加以及室温塑性的降低。

2) 在不同的显微组织下, 应变率的变化, 造成的力学响应不同。片层晶粒体积分数较高时, 应变率的降低会导致双态组织 TiAl 合金屈服强度的降低和室温塑性的增加; 片层晶粒体积分数较低时, 应变率的降低会导致双态组织 TiAl 合金屈服强度的增加和室温塑性的降低。

3) 在近 γ 组织中, 室温塑性随着应变速率的增加而增加, 主要是由于在应变速率较高时, 有较多的孪晶系开动的原因。

REFERENCES

- [1] Huang S C, Chesnutt J C. Gamma TiAl and its alloys [A]. Intermetallic Compound [C]. New York: John Wiley & Sons, 1990. 73 - 90.
- [2] Kim Y W. Progress in the understanding of gamma titanium aluminides [J]. JOM, 1991, 43: 40 - 47.
- [3] CHU Wu-yang, Thompson A W. Effect of grain size on yield strength in TiAl [J]. Scripta Metall, 1991, 25: 641 - 644.
- [4] Vasudevan V K, Court S A, Kurath P, et al. Effect of grain size and temperature on the yield stress of the intermetallic compound TiAl [J]. Scripta Metall, 1989, 23: 467 - 469.
- [5] Gnanamoorthy R, Mutoh Y, Mizuhara Y. Flexural strength of gamma basic titanium aluminides at room and elevated temperature [J]. Mater Sci Eng A, 1995, A197: 69 - 77.
- [6] Koeppe C, et al. General aspects of the thermomechanical treatment of two-phase intermetallic TiAl compounds [J]. Metall Mater Trans A, 1993, 24A: 1795 - 1806.
- [7] T 9 nnes C, R 9 sler J, Baumann R, et al. Influence of microstructure on the tensile and creep properties of titanium aluminides processed by powder metallurgy [A]. Structural Intermetallics [C]. Warrendale, PA: TMS, 1993. 241 - 245.
- [8] 郑瑞廷, 张永刚, 陈昌麒. 双态组织 TiAl 合金中显微组织的控制 [J]. 热处理学报, 待发表.
ZHENG Rui-ting, ZHANG Yong-gang, CHEN Chang-qi. Duplex microstructure control in a TiAl-based alloy [J]. Journal of Heat Treatment of Metal, (In press).
- [9] Godfrey A, Hu D, Loretto M H. Properties and microstructure of TiAl-based alloys [J]. Mater Sci Eng R, 1997, R40: 559 - 563.
- [10] Liu C T, Maziasz P J. Microstructural control and mechanical properties of dual-phase TiAl alloys [J]. Intermetallics, 1998: 653 - 661.
- [11] Jin Z, Cady C, Gray III G T, et al. Mechanical behavior of a fine-grained duplex γ -TiAl alloy [J]. Metall Mater Trans A, 2000, 31A: 1007 - 1016.
- [12] Appel F, Wagner R. Microstructure and deformation of two-phase γ -titanium aluminides [J]. Mater Sci Eng R, 1998, R22: 185 - 262.
- [13] Imayev R, Salishchev G, Imayev V, et al. Structure and ductility of TiAl [A]. Gamma Titanium Aluminides [C].

Warrendale, PA: TMS, 1995. 665 - 678.

Effects of volume fraction of lamellar grain and strain rate on mechanical properties of duplex TiAl-Based Alloy

ZHENG Rui-ting^{1, 2}, ZHANG Yong-gang², CHEN Chang-qi², CHENG Guo-an¹

(1. Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification for Ministry of Education,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautic & Astronautic,
Beijing 100083, China)

Abstract: A special heat treatment process was employed to produce a series of fine duplex microstructures with different lamellar grain volume fractions. Tensile tests were carried out at ambient temperature. It is found that the mechanical properties of the duplex alloys closely depend on their microstructures. At the same strain rate, with the increase of lamellar grains volume fraction, the yield strength of alloys increases and their plastic elongation decreases. In the alloys with near γ microstructures, ambient temperature ductility increases with the increase of strain rate. It mainly comes from the activation of more twin deformation systems.

Key words: γ -TiAl based alloy; duplex microstructure; mechanical property

(编辑 何学锋)