

文章编号: 1000-6893(1999)04-0335-04

TiAl 合金 PST 晶体中 Ti_3Al 片层取向 对其蠕变性能的影响

林建国, 张永刚, 陈昌麒

(北京航空航天大学 材料科学与工程系, 北京 100083)

EFFECT OF Ti_3Al LAMELLAR ORIENTATION ON
THE CREEP BEHAVIOR OF TiAl PST CRYSTAL

LIN Jian-guo, ZHANG Yong-gang, CHEN Chang-qi

(Department of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 对 2 种硬取向($\leq 90^\circ$ 和 0° ; \angle 为外力轴与片层界面的夹角)的 TiAl 合金 PST 晶体试样的高温压缩性能及蠕变性能进行了测试, 并对其蠕变组织进行了观察。结果表明: 2 种取向试样的屈服强度及蠕变性能存在明显的差异; 在 $T = 800^\circ\text{C}$, $R = 350\text{MPa}$ 蠕变条件下, $\leq 90^\circ$ 试样过早出现蠕变失稳阶段, 这与该取向试样片层组织中 A_2 相在蠕变过程中发生球化及剪切带的形成有关。

关键词: TiAl 合金; PST 晶体; 蠕变性能

中图分类号: TG115.5, V252.2 **文献标识码:** A

Abstract: The yield strength and creep curves of TiAl PST crystals with two hard orientations (i.e., $\leq 90^\circ$ and 0° ; \angle is the angle between loading axis and lamellar boundaries) at high temperature have been measured and compared, and the deformation structures of the crept samples have been examined by using SEM and TEM. The results indicated that the yield strength and creep behavior were quite different between these two oriented samples; Under the condition of $T = 800^\circ\text{C}$ and $R = 350\text{MPa}$, the earlier onset of tertiary creep was found in the sample with $\leq 90^\circ$, which may be caused by the spheroidization of A_2 phase and the formation of shear band during creep.

Key words: TiAl alloy; PST crystal; creep behavior

C-TiAl 基金属间化合物具有低密度、优良的抗氧化及高温强度等优点, 成为极具吸引力的高温结构材料。而双相 (A + C) C-TiAl 基合金具有较好的塑性^[1], 因此更具有研究价值。在双相 C-TiAl 合金中最为常见的显微组织是片层组织 (lamellar structure), 它是由 C 片层和少量 A_2 片层组成, 而且 C 与 A_2 相之间具有一定的晶体学位向关系, 即 $\{111\}_C \parallel \{0001\}_{A_2}$ 和 $1\bar{1}0_C \parallel 11\bar{2}_0_{A_2}$ ^[2]。人们采用只含有单一片层取向的 PST 晶体 (Polysynthetically Twinned Crystal), 对这种片层组织的变形及断裂行为进行了系统的研究, 其结果表明 PST 晶体的变形行为存在强烈的各向异性^[3]。当片层外力轴垂直于或平行于片层界面时, PST 晶体具有较高的强度和较低的延伸率, 而这 2 种取向被称之为“硬取向”^[3]。特别是

当外力轴与片层界面垂直时, 该取向试样具有最高的强度, 而其延伸率几乎为 0^[3]。造成 PST 晶体性能强烈各向异性的原因不仅在于 PST 晶体 C 片层中变形模式的不同, 同时还与 A_2 片层变形模式有关。然而, 片层取向对该合金蠕变行为的影响机制还缺乏深入的研究。本文将对 2 种硬取向 PST 晶体试样的高温压缩及蠕变行为进行研究, 着重考察 A_2 相取向对其蠕变行为的影响。

1 实验方法

用磁悬浮区域熔炼的方法生长出成分约为 48at. % Al 的 TiAl 合金 PST 晶体。从该晶体切取 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ 压缩试样, 使片层界面分别与外力轴垂直和平行 (即: $\leq 90^\circ$ 和 0° ; \angle 为片层界面与外力轴的夹角)。在 MTS 材料试验机上, 对这 2 种取向试样温度为 800°C 时的压缩性能进行测试。2 种取向试样蠕变曲线在恒定载荷的压缩蠕变试验机上进行测试, 实验条件为 $T =$

800 °C, $R=350\text{MPa}$ 。对2种取向试样蠕变失稳阶段时的变形组织,在S-530扫描电镜的背散射电子成像模式下进行观察。变形组织的TEM观察在H-800型透射电镜下进行。

2 实验结果

图1是两取向试样($\phi=90^\circ$ 和 0°)在800 °C条件下的压缩曲线。不难看出, $\phi=90^\circ$ 试样的屈服强度要远大于 $\phi=0^\circ$ 试样的屈服强度,其值分别约为460MPa和285MPa。图2是这两种取向试样在800 °C条件下的蠕变曲线。很显然在相同蠕变条件下,

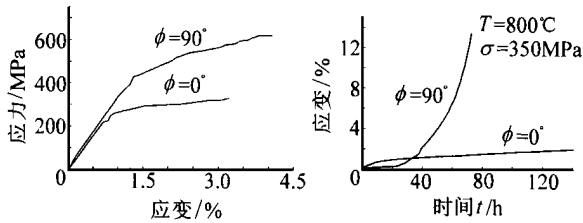


图1 2种取向PST晶体试样在800 °C条件下的压缩曲线

图2 2种取向PST晶体试样的蠕变曲线

下,其蠕变曲线也存在明显的差异。对于 $\phi=90^\circ$ 试样,虽然具有较小的初始阶段的蠕变量,但其蠕变过程却过早地出现了蠕变第3阶段,表现出较短的蠕变寿命,而此时的应力水平还远小于该取向试样的屈服强度。与之相比,对于 $\phi=0^\circ$ 试样,虽然外应力水平已高于该取向试样的屈服强度,但在其蠕变过程中,却表现出较长的稳态蠕变阶段。对这2种取向试样蠕变失稳后的变形组织的背散射电子像观察的结果表明,2种取向试样的蠕变失稳组织存在明显的不同,如图3所示(图中白亮线为 A_c 片层)。对于 $\phi=90^\circ$ 试样,其蠕变组织中出现有一条明显的剪切带,而且在该剪切带中, A_c 片层发生了断裂与球化,如图3(a)所示。而在试样的变形组织中,可以看到,其片层组织发生了严重的扭曲,其失稳方式与复合材料薄板中的“屈曲”类似,但可以看到 A_c 片层却仍然保持着连续,未见有断裂与球化现象的出现,如图3(b)所示。

3 分析与讨论

M. Yamaguchi 等人对PST晶体拉伸或压缩性能及变形组织作了较为深入和细致的研究,认为其变形主要是通过C片层中 $1/2[11\bar{2}]\{111\}$ 形变孪晶, $1/2[1\bar{1}0]\{111\}$ 普通型位错以及 $011[111]$ 超位错的开动而产生的,而且这些位错的开动取决于片层相对于外力轴取向和变形量的大小。由于A与C相之间结构不同,在变形过程

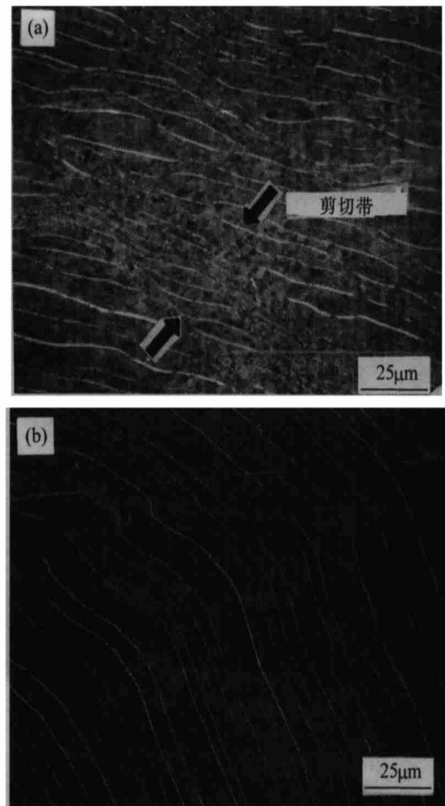


图3 蠕变失稳后,两种硬取向变形组织的背散射电子像(图中白亮线为 A_c 相)

(a) $\phi=90^\circ$, $R=350\text{MPa}$, $E=20\%$; (b) $\phi=0^\circ$, $R=350\text{MPa}$, $E=20\%$

中存在不协调性,这必然会对合金的性能产生影响,因此有必要考察不同取向 A_c 相的变形模式。 A_c 相为密排六方的 $D0_{19}$ 结构。对 A_c 单晶体压缩变形的研究表明,在该相中主要存在有3类滑移系:即 $\{1\bar{1}00\}$ $\bar{1}\bar{1}20$ 柱面滑移(prism slip system); (0001) $\bar{1}\bar{1}20$ 基面滑移系(basal slip)以及 $\{11\bar{2}1\}$ $\bar{1}\bar{1}26$ 锥面滑移系(pyramidal slip system),其中锥面滑移系具有较高的临界分切应力(CRSS),在室温条件下,该滑移系的临界分切应力值约为柱面滑移系的8倍^[5]。当外力轴与片层界面平行时($\phi=0^\circ$),片层中 A_c 相的 (0001) 基面与外力轴平行。这时的 A_c 相柱面滑移系可以开动。而当外力轴与片层界面垂直时,片层中 A_c 相的 (0001) 基面与外力轴垂直,此时, A_c 相的基面及柱面滑移系Schmid因子均为0,唯一能开动的滑移系只有 $\{11\bar{2}1\}$ $\bar{1}\bar{1}26$ 锥面滑移系。而该滑移系具有较高的临界分切应力,因此在片层界面与外力轴垂直的试样中, A_c 相更难于变形,也就是说,在 $\phi=90^\circ$ 的试样中, A_c 相对C片层组织中具有更大的阻碍作用。这必然导致 $\phi=0^\circ$ 和 90° 两种取向

向试样屈服强度的差异。这一点已被本文中压缩实验结果所证实。

值得注意的是, $\leq 90^\circ$ 试样虽具有较高的屈服强度,但在远低于其屈服强度的应力水平下,其蠕变过程却过早的出现了蠕变失稳阶段,而且在其蠕变组织中出现了剪切带以及 A_α 片层断裂与球化的现象。这也可以从该取向试样中 A_α 相的变形模式加以分析。如上所述,当压缩轴垂直于片层界面时($\leq 90^\circ$), A_α 相中 $\{11\bar{2}1\} \bar{1}\bar{1}26$ 滑移系具有较高的临界分切应力而难于开动,因此 A_α 和 C 片层变形存在严重的不协调性,这势必在 A/C 界面上产生较大的应力集中。图 4 是一形变孪晶在

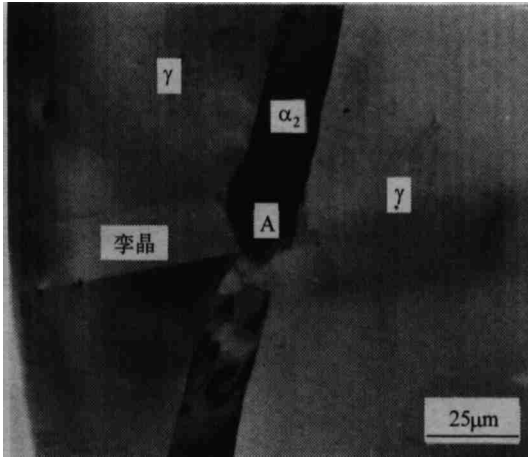


图 4 $\leq 90^\circ$ 试样蠕变组织的 TEM 照片

遇到 A_α 片层时,受阻于 A/C 界面的 TEM 照片。可以看出,由于形变孪晶受阻后造成的应力集中可使得 A/C 界面向内凹陷(图 4 中 A 所示)。在高温原子扩散的帮助下,凹陷会加深而引起 A_α 片层的断裂。图 5 是 A_α 相断裂及球化机制示意图。不

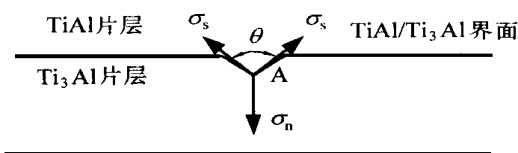


图 5 A_α 片层断裂机制示意图

妨假设,由于 C 相中的变形受阻于 A/C 界面,而产生一垂直于界面的应力 R_n ,该应力使得 A_α 片层产生变形,导致 A/C 界面在形变孪晶与 A_α 片层相交处(图 4 中 A 所示)向内凹陷。而 A/C 界面的表面张力 R_s 力图使界面变直,于是在界面凹陷处 R_n 与 R_s 达到平衡后,满足下列方程式

$$R_n = 2R_s \cos \frac{H}{2} \quad (1)$$

式中: H 角为两 R 之间的夹角,如图 5 所示。

根据 Gibbs-Thomson 方程可知,原子的化学位的大小与曲面的曲率半径成反比^[6],于是凹陷处的原子会向两侧扩散,力图使得曲面逐渐变直。这样便破坏了方程(1)中应力之间的平衡关系。为达到新的平衡, R_n 会使得凹陷加深,如此往复,最终使得 A_α 相断裂和球化。当 A_α 相断裂后, C 片层中的变形便容易在其间进行,导致剪切带的形成,从而引起蠕变失稳。与之相比,在 $\leq 0^\circ$ 试样中,由于此时 A_α 相的 $\{0001\}$ 基面平行于外力轴,其 $11\bar{2}0 \{10\bar{1}0\}$ 滑移系 Schmid 因子不为 0,而且该滑移系具有较小的临界分切应力,当 C 片中变形在 A_α/C 界面受阻时, A_α 片层可以通过该滑移系的可动以协调 C 片的变形,从而减轻 A/C 界面上的应力集中。因此,在 $\leq 0^\circ$ 取向的试样中,未发现有 A_α 相的球化及剪切带的形成。综上所述, $\leq 90^\circ$ 试样虽具有较高的强度,但在蠕变过程中,由于 A/C 界面上应力集中导致了 A_α 片层的球化及剪切带的形成,这也是该取向试样过早地出现蠕变第 3 阶段原因。

4 结 论

(1) 在 $\leq 0^\circ$ 和 90° 试样中,由于 A_α 相取向的不同,使得 $\leq 90^\circ$ 试样屈服强度要高于 $\leq 0^\circ$ 试样的屈服强度,但在远低于 $\leq 90^\circ$ 试样屈服强度的应力水平下,该取向试样的蠕变过程却过早的出现蠕变失稳阶段。

(2) 在 $\leq 90^\circ$ 试样中,由于 A/C 界面存在较大的应力集中,导致 A_α 相在蠕变过程中发生断裂与球化,从而导致剪切带的形成,这也是该取向试样过早出现蠕变失稳的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Kim Y W. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminide[J]. JOM, 1989, 41(7): 24 ~ 30.
- [2] Inui H, Oh M H, Nakamura A, et al. Ordered domains in TiAl coexisting with Ti₃Al in the lamellar structure of Ti-Rich TiAl compounds[J]. Phil Mag A, 1992, 66(10): 539 ~ 555.
- [3] Inui H, Nakamura A, Oh M H, et al. Deformation structure in Ti-Rich TiAl polysynthetically twinned crystals[J]. Phil Mag A, 1992, 66(10): 557 ~ 573.
- [4] Inui H, Kizaki K, Kobayashi M, et al. Temperature dependence of yield stress, tensile elongation and deformation structures in polysynthetically twinned crystals of Ti-Al[J]. Phil Mag A, 1995, 72(6): 1609 ~ 1631.
- [5] Minonishi Y, Otsuka M, Tanaka K. Orientation and temperature dependence of deformation of Ti₃Al single

crystals[A]. In: Izumi O Ed. Intermetallic Compounds-Structure and Mechanical Properties [C]. Sendai: The Japan Institute of Metals, 1991. 543 ~ 547.

- [6] Verhoeven J D. Fundamentals of Physical Metallurgy[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975. 204.

作者简介:



林建国 男, 1965年10月出生, 出生于湖南湘潭。1996年于北京航空航天大学材料科学与工程系获博士学位。现在北京航空航天大学航空与宇航技术博士后流动站从事博士后研究工作。主要研究工作有铝锂合金的真空熔炼技术以及显微组织与性能, 钛铝金属间化合物的组织与性能研究等, 已在国内外学术刊物及会议上发表论文 20 余篇。



张永刚 1954年4月出生, 教授, 博士生导师。毕业于英国伯明翰大学冶金及材料系, 获博士学位, 曾在加拿大马尼托巴大学, 荷兰代尔夫特工业大学以及法国国立高等工程技术学院作访问教授。从事过材料粒子辐射损伤和相稳定性研究, 铝合金变形剪切带的微观结构研究和铝锂合金研究, 主要从事

TiAl 基金属及金属间化合物研究。先后在国内外学术刊物及会议上发表学术论文 80 余篇。



陈昌麒 教授, 博士生导师。1957年北航研究生毕业, 1979~1981年为英国剑桥大学与材料系访问科学家。1981年4~8月为挪威ASV铝公司访问科学家。1989年4~9月为法国高等材料和机械学院访问教授。现任校学术委员会副主任, 航空工业总公司科技委员会委员。长期从事轻合金组织与性能关系、形变断裂机制等方面研究。