

# 高纯钛压缩孪生行为研究

任毅, 张喜燕, 孙奇, 刘庆

(重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:** 利用背散射电子衍射 (EBSD) 技术对高纯钛变形组织中同一个晶粒内部出现的  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪生进行了研究。结果表明:  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶总是伴随  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶在同一晶粒中产生, 在变形组织中没有发现单独存在的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶; 这种极少出现的  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶主要由  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶与传统晶界或  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体之间交互作用改变了局部应力状态而诱发的。在同一个晶粒中, 由  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶诱发的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶更倾向于同其中一个  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体具有相同的转轴。此外, 根据晶体对称性及相同晶粒中  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶之间的取向关系,  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶之间可发生孪晶反应并形成 4 种不同类型的孪晶反应界面。

**关键词:** 高纯钛; 压缩孪晶; 取向关系; 孪晶反应

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)07-2061-06

同立方晶体相比, 六方金属具有较低的晶体对称性<sup>[1]</sup>。因此, 锥面  $\langle c+a \rangle$  滑移的开启或形变孪晶的激发对协调六方金属沿  $c$  轴的应变起着十分重要的作用<sup>[2,3]</sup>。相比镁及镁合金而言, 多种孪生模式的同时激发是六方结构金属钛拥有较好塑性的原因之一。传统轧制或静态压缩变形过程中,  $\{10\bar{1}2\}$ 、 $\{11\bar{2}1\}$  和  $\{11\bar{2}2\}$  孪生为其主要形变孪生模式<sup>[4]</sup>; 然而, 在低温或高应变速率变形条件下, 高纯钛的变形组织中发现  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪晶<sup>[5-8]</sup>, 且形成的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶总是与  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶共存于同一个晶粒中。 $\{11\bar{2}4\}$  和  $\{11\bar{2}2\}$  均为压缩孪晶, D. H. Hong 等<sup>[7]</sup>认为  $\{11\bar{2}4\}$  与  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪晶的这种共存现象是由于这 2 种孪晶具有相同的孪生剪切和原子拖曳系数。而在 F. Xu 等<sup>[5,6]</sup>的研究中, 高应变速率产生的高 Zener-Hollomon 因子 ( $Z$ ) 被认为是产生  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶的主要原因。以上结论均表明, 在同等变形条件下  $\{11\bar{2}4\}$  和  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪晶在同一个晶粒中形成的难易程度是一致的。但是, 实验结果显示  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶的形成数量要远远小于  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪晶<sup>[5,6]</sup>。由此可见,  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪生行为必然与其他因素有关。

事实上, 在多晶变形过程中, 孪晶的形核主要由其局部应力状态和晶界处的局部原子组态决定<sup>[9-11]</sup>。 $\{11\bar{2}4\}$  和  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪晶在同一个晶粒中共存的现象说明这 2 种孪晶之间存在某种必然的联系。由于  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶在一般变形条件 (如常温、低应变速率) 下很难产生且形成数量极少, 在研究过程中往往被忽略, 但这种罕见的孪生模式对金属钛在极端条件保持良好塑性具有重要作用<sup>[9]</sup>。因此,  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪生行

为及其与  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪晶之间的关系有待进一步研究。本工作主要对高纯钛在动态压缩过程中同一个晶粒内部形成的  $\{11\bar{2}4\}$  和  $\{11\bar{2}2\}$  2 种压缩孪晶进行详细的组织表征和取向分析; 同时, 结合晶体学相关原理和孪生理论, 研究同一晶粒内部发生的  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应及孪晶反应界面特征, 揭示高纯钛中  $\{11\bar{2}4\}$  与  $\{11\bar{2}2\}$  压缩孪生行为之间的本质联系。

## 1 实验

实验采用纯度为 99.995% 的高纯钛板材, 热轧退火态。原始显微组织由细小等轴的晶粒组成, 平均晶粒尺寸约 13  $\mu\text{m}$ , 如图 1a 所示。原始取向差为随机分布 (图 1b)。原始板材具有较强的基面织构, 板材大部分晶粒的  $[0001]$  方向平行于轧面的 ND 方向, 且向 TD 方向倾斜  $\pm 20^\circ \sim 30^\circ$ 。

在室温下采用动态压缩变形获取  $\{11\bar{2}2\}$  及  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶, 动态压缩变形应变速率范围为  $4.1 \times 10^2 \sim 6.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。动态压缩试样为直径 8 mm、高度 9 mm 的圆柱形试样。通过模具控制试样的应变水平, 选取低应变量  $\varepsilon=0.05$  的样品进行微观组织分析。因为高应变速率进行大塑性变形, 容易使晶粒发生破碎, 并破坏形变孪晶的完整性。采用变形量小的样品既可以使变形后的晶粒基本保持原始形状, 又能使孪晶的完整形貌得以保留。

变形后的试样沿纵轴方向切割, 经机械抛光、电化学抛光后, 在 FEI Nova 400 场发射扫描电镜上进行电子背散射衍射 (EBSD) 观察。EBSD 实验采用的加

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51271208, 51421001)

作者简介: 任毅, 男, 1987 年生, 博士生, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, 电话: 023-65106024, E-mail: zsrenyi@163.com

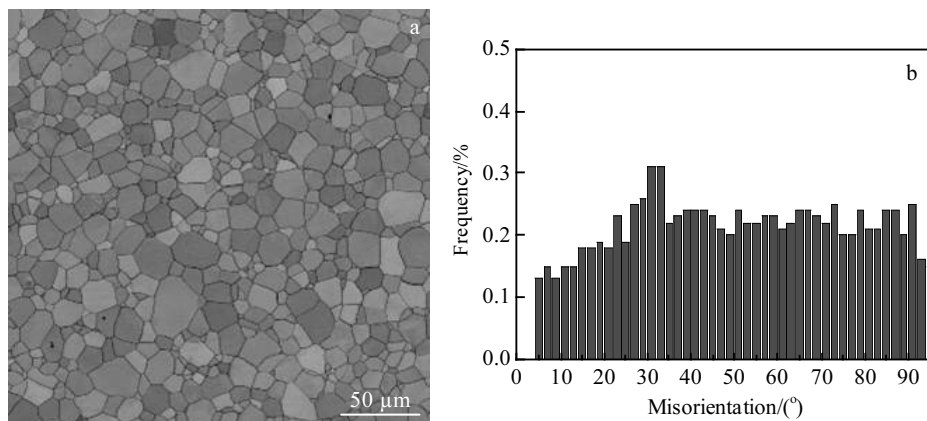


图 1 原始样品的微观组织形貌和取向差分布

Fig.1 Microstructure (a) and misorientation distribution (b) of the initial sample

速电压为 20 kV。EBSD 样品的电解抛光液为高氯酸和冰醋酸混合液，配比为 1:15；采用 20 V 的直流电压，电解抛光的温度和时间分别为 20 °C 和 90 s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观组织

图 2a 为高纯钛在应变  $\epsilon=0.05$  的动态压缩变形组织 EBSD 取向图，用欧拉角表示。从图中可以看出，在应变量为 0.05 的变形条件下，原始晶粒未发生明显的压缩变形，其形貌与初始晶粒基本一致 (图 1a)。压缩试样大部分晶粒内部出现呈凸透镜形状的形变孪晶。

为了说明图 2a 中的孪晶类型，与其对应的孪晶界衬度图，如图 2b 所示。图中，红色、蓝色、绿色和黄色细线分别表示  $\{10\bar{1}2\}$ 、 $\{11\bar{2}2\}$ 、 $\{11\bar{2}1\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  4 种孪晶界。这 4 种孪晶对应的取向差角/转轴，见表 1。从图 2b 中可知，在同一个晶粒中有多重孪晶的产生。多重孪晶主要分为 2 种情况：(1) 同一个孪生模式的不同孪生变体；(2) 2 种或 2 种以上的不同孪生模式。根据孪晶界的迹线可以判定同种孪晶的不同孪生变体，如图 2b 中的虚线白色圆圈所示，在同一个晶粒中可形成 2 个或 2 个以上的  $\{10\bar{1}2\}$  或  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体。 $\{10\bar{1}2\}$  和  $\{11\bar{2}2\}$  孪生是钛中孪生变形的 2 种主要变形模式，其孪生变体的选择目前大多选择斯密特因子 (Schmid Factor) 进行判定<sup>[12,13]</sup>。同时，注意到， $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶可在同一个晶粒中形成，没有单独的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶被发现。这一现象和 F. Xu 等<sup>[5]</sup>的实验观察一致。因此，根据实验观察，可以确定在高应变速率条件下  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶的形成总是伴随着  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶。

图 3 表示图 2 中的取向分布情况。取向分布图能对组织中的孪晶特性提供更加准确的定量分析。图中的反极图表示这 4 种孪晶特征取向差的转轴的分布。统计发现，在变形过程中  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶界的含量最高，

表明  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶为其最主要的孪生变形模式，这与  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  转轴在 60°~70° 出现频率最多相一致。其次为  $\{10\bar{1}2\}$  孪晶， $\{11\bar{2}1\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶含量最少。在 76 个包含  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶的晶粒中，有 6 个晶粒出现  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶，如图 2a 黑色方框 (a~f) 所示。虽然实验中观察到的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶的个数非常有限，但可以预见，这种罕见的孪生模式在极端变形条件 (如低温和高应变速率变形) 下对协调局部塑性变形有重要作用。

### 2.2 $\{11\bar{2}4\}$ 压缩孪晶的形成

根据上述  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶的形成特点，将图 2a 变形组织中同时包含  $\{11\bar{2}2\}$  及  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶的晶粒 (a~f) 单独截取出来并进行放大观察，研究  $\{11\bar{2}2\}$  与  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶之间的本质联系。

图 4 为  $\{11\bar{2}2\}$  与  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶的放大照片，图 4a~4f 分别对应图 2a 中 a~f 白方框区域。与图 2b 类似，图 4 中  $\{11\bar{2}2\}$  与  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶界分别由蓝色和黄色细线表示。图 4 清晰显示  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶同时存在于 1 个晶粒中。这些晶粒中由这 2 种孪晶分割而成的各个区域的取向和对应的孪晶界取向差角及特定转轴也一并标出。 $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶的取向差角均小幅偏离其理论取向差角 (见表 1)，这是由于位错滑移与孪晶界的交互作用导致<sup>[14]</sup>。

观察发现，图 4 中同一个晶粒中可存在多个  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体，但每个晶粒中却只有 1 个  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶产生。图 4a~4c 和 4f 中，均为 2 个  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体与 1 个  $\{11\bar{2}4\}$  变体在同 1 个晶粒中共存；图 2a 中 d 和 e，分别只有 1 个  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶同时存在。同时，注意到  $\{11\bar{2}4\}$  总是在  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体的交互作用区域 (图 4f) 或  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶与晶界的反应处 (图 4a~4d) 形成。因此，推测  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体之间或  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶与晶界交互作用，使交互作用区域的局部应力状态发生改变，从而诱发  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶。

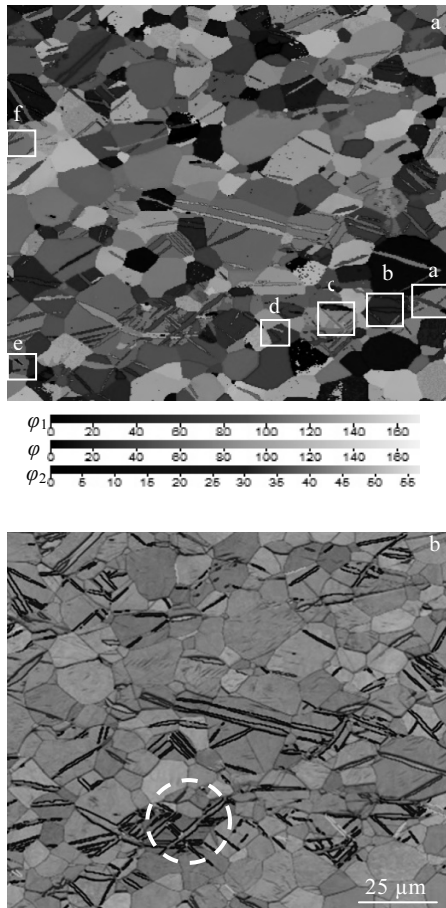


图 2 应变量为 0.05 的变形样品微观结构

Fig.2 Microstructures of the deformed sample with a strain of 0.05: (a) Euler angle map and (b) EBSD band contrast map highlighting the four different types of twin boundaries

表 1 钛中的孪生模式及其取向差角和转轴

Table 1 Twinning modes in titanium and their misorientation angles and rotation axes

Twins	Misorientation angle/(°)	Rotation axis	Label
{10 $\bar{1}2$ }	84.8	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	——
{11 $\bar{2}2$ }	64.6	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$	——
{11 $\bar{2}1$ }	35.1	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$	——
{11 $\bar{2}4$ }	76.7	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$	——

首先，{11 $\bar{2}2$ }与{11 $\bar{2}4$ }均为压缩孪晶，根据经典孪生理论<sup>[15]</sup>，它们具有相同的孪生剪切(twinning shear,  $\gamma=0.22$ )和 shuffle 因子。从这个角度来讲，{11 $\bar{2}2$ }和{11 $\bar{2}4$ }压缩孪晶形成的难易程度是一致的。但是，诸多实验结果显示{11 $\bar{2}2$ }孪晶的形成数量要远远大于{11 $\bar{2}4$ }孪晶，有的甚至没有发生{11 $\bar{2}4$ }孪生行为，说明{11 $\bar{2}4$ }孪生行为并不是六方结构金属钛的一种主要孪生变形模式。其次，{11 $\bar{2}4$ }孪晶总是在极端变形条

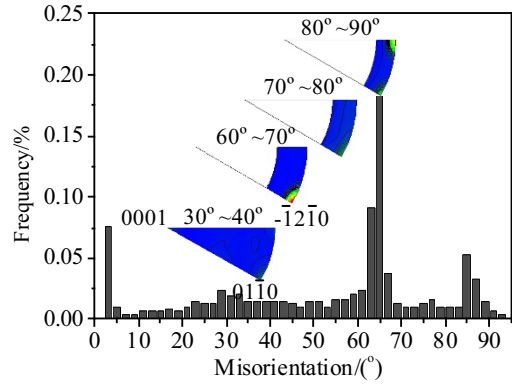


图 3 对应图 2 中变形样品取向分布图

Fig.3 Correlated misorientation distribution of the deformed sample in Fig.2. The inverse pole figures show the distribution of the rotation axis for characteristic angular ranges

件下产生，如低温和高应变速率塑性变形条件下。在高应变速率变形过程中，晶体在极短的时间内完成变形过程，导致变形组织中内聚能急剧增长。{11 $\bar{2}4$ }孪晶形成能为 815.4 mJ/m<sup>2</sup><sup>[16]</sup>，根据能量趋小原则，形成{11 $\bar{2}4$ }孪晶能快速有效地降低晶体内部的能量。最后，孪晶的形成具有方向性。也就是说，只有当压应力加载方向平行于  $c$  轴或拉应力方向垂直于  $c$  轴时，才能发生压缩孪生行为，反之产生拉伸孪晶。{11 $\bar{2}2$ }作为钛中最主要的孪生模式，能大量产生。因此，{11 $\bar{2}2$ }孪生变体之间或{11 $\bar{2}2$ }孪晶与晶界具有大量发生交互作用的可能性，从而使交互作用区域的局部应力状态发生改变，当这种局部应力状态满足{11 $\bar{2}4$ }孪晶局部应力形成的条件时，可诱发{11 $\bar{2}4$ }孪晶。尽管如此，本实验中大量{11 $\bar{2}2$ }孪生并没有激发更多的{11 $\bar{2}4$ }孪晶，这是由多晶材料中复杂的应力状态决定的。在变形过程中，变形区域的局部应力状态各不相同<sup>[17,18]</sup>，所以，这也是图 2 中不是所有产生{11 $\bar{2}2$ }孪晶的晶粒都能使{11 $\bar{2}4$ }孪晶形核的根本原因。此外，图 4e 中{11 $\bar{2}4$ }孪晶的形核位置远离{11 $\bar{2}2$ }孪晶与传统晶界的交互作用区。这种{11 $\bar{2}4$ }孪晶的形成原因可能是三叉晶界处的局部应力状态和局部原子组态有利于{11 $\bar{2}4$ }孪晶形核。

因此，可以看出这种由局部应力状态发生改变而形成的{11 $\bar{2}4$ }压缩孪晶，可视为钛中塑性变形机制的额外补充变形模式。它的形成能有效降低极端非平衡变形过程中的内能，释放局部应力集中，避免裂纹和孔洞的形成，提高金属钛在极端条件下的塑性变形能力。

### 2.3 {11 $\bar{2}2$ }和{11 $\bar{2}4$ }压缩孪晶的取向关系

图 5 采用极图的形式表示图 4 中{11 $\bar{2}2$ }和{11 $\bar{2}4$ }孪晶取向关系。图中，黑色实心圆、空心方框、空心三角形和空心五角星分别表示原始晶粒、{11 $\bar{2}2$ }、{11 $\bar{2}4$ }和另一个{11 $\bar{2}2$ }孪生变体。由图可知，由局部应力状态

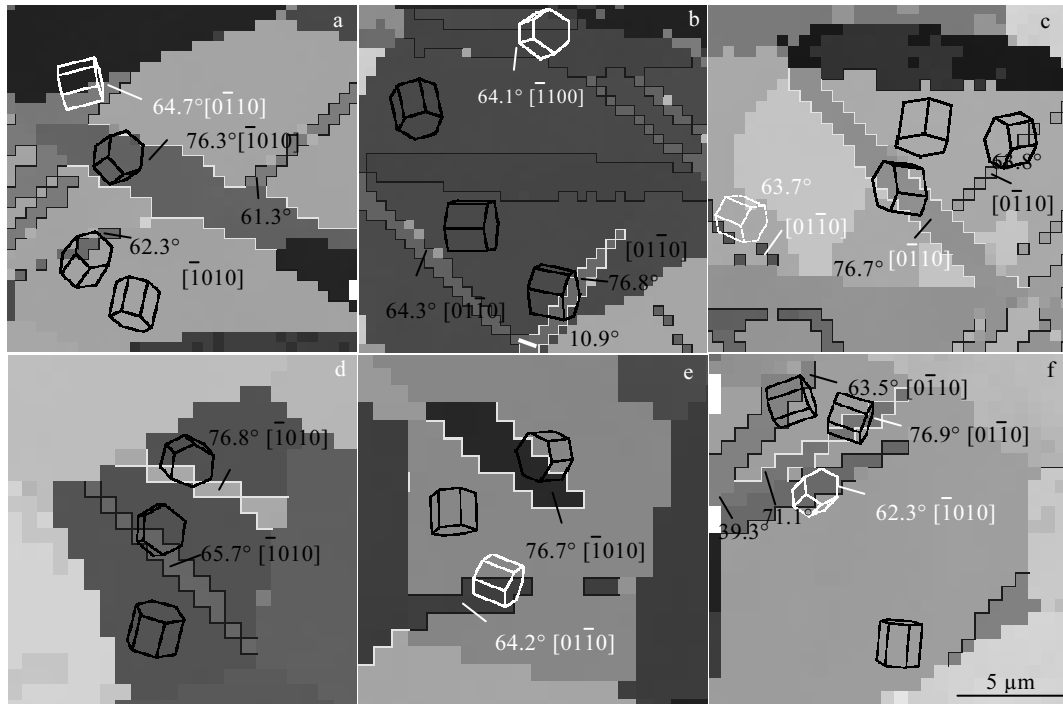


图 4 对应图 2a 中黑色方框的放大照片

Fig.4 Enlarged images corresponding to the black box in Fig.2a,  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  twins with superimposed hcp unit cells, angle and axis of these twin boundaries: (a~d)  $\{11\bar{2}4\}$  twin nucleated at a junction of  $\{11\bar{2}2\}$  twin and grain boundary; (e)  $\{11\bar{2}4\}$  twin occurring in a triple junction of grain boundary; (f)  $\{11\bar{2}4\}$  twin formed from  $\{11\bar{2}2\}$  -  $\{11\bar{2}2\}$  junction

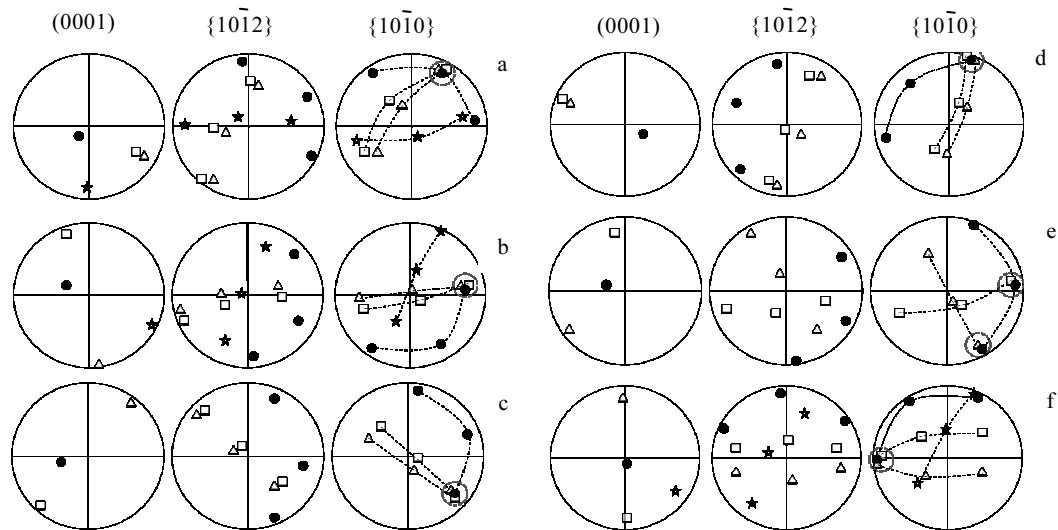


图 5 (0001),  $\{10\bar{1}2\}$  和  $\{10\bar{1}0\}$  极图表示图 4 中  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶的取向关系

Fig.5 Orientation relationships of the  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  twins in Fig.4 shown by (0001),  $\{10\bar{1}2\}$  and  $\{10\bar{1}0\}$  pole figures; the filled dark circles represent the orientation of the matrix, the open triangles represent the orientation of  $\{11\bar{2}4\}$  twins, the open squares represent the orientation of  $\{11\bar{2}2\}$  twins and the open stars represent orientation of  $\{11\bar{2}2\}$  twin variants; the common rotation axis is denoted as a dashed blue circle on  $\{10\bar{1}0\}$  pole figures: (a~d)  $\{11\bar{2}4\}$  twin shares the same zone axis with one of  $\{11\bar{2}2\}$  twin variants; (e)  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  have different zone axes in a grain; (f)  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  twin variants have a common rotation axis

的改变而激发的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶总是与原始晶粒和  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶（其中 1 个  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体）具有相同的转轴，如图 5a~5d 和 5f 所示。图中蓝色虚线圆圈表示同一转轴。需要指出的是， $[0\bar{1}10]$  和  $[01\bar{1}0]$  转轴的物理意义不一样，但在晶体学上是等效的，因此可视为同一转轴。同理， $[10\bar{1}0]$  和  $[\bar{1}010]$ 、 $[1\bar{1}00]$  和  $[\bar{1}100]$  转轴。由此可知，由  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶诱发的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶总是与其中 1 个  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体具有同一转轴。

图 4e 中  $\{11\bar{2}2\}$  沿  $[01\bar{1}0]$  轴旋转  $64.2^\circ$ ，而  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶沿  $[\bar{1}010]$  轴旋转  $76.7^\circ$ 。说明图 4e 中的  $\{11\bar{2}2\}$  与  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶沿着 2 个不同的  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  轴旋转。 $[01\bar{1}0]$  和  $[\bar{1}010]$  两轴之间相差  $120^\circ$ 。图 5e 中  $\{10\bar{1}0\}$  极图进一步证实该  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶沿 2 个不同的转轴旋转，2 个不同转轴分别用虚线圆圈在图 5e 中标出。

### 2.4 $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$ 压缩孪晶反应

根据孪生理论， $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶各自具有 6 个不同孪生变体<sup>[19]</sup>，所以，理论上  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶之间可具有 36 种不同取向关系。因此， $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶在形核及长大过程中，可在晶粒内部发生交互作用，即  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应。由于晶体的对称性， $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应可形成 4 种不同类型的孪晶反应界面，如图 6 所示。图中，黑色实心圆圈、方框和三角形分别表示原始晶粒、 $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪生变体。4 种  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应界面如图 6 中单位六方晶胞所示，其中蓝色和黄色方框分别表示  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪生面。

同一个晶粒中， $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶具有同一转轴时，形成 2 种  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应界面：Type 1 和 Type 2。 $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶均沿相同的旋转方向（顺时针）旋转并发生交互作用，形成 Type 1；反之，形成 Type 2。结合图 4 中 EBSD 测试结果，对这 2 种反应界面的取向差角进行了测量。结果显示，Type 1 和 Type 2 的取向差角分别为  $10.9^\circ$  和  $39.3^\circ$ （图 4b 和 4f）。理论上，这 2 种孪晶交叉点处的取向差角分别为  $12.4^\circ$  和  $38.7^\circ$ 。测量值和理论值之间的差异，说明在  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应界面处存在明显局部应力集中使晶格发生畸变<sup>[20,21]</sup>。同样地，具有不同转轴的  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶发生孪晶反应也可形成 2 种不同的孪晶反应界面（Type 3 和 Type 4）。在晶体学上，这 2 个反应界面的不同转轴之间相差的角度分别为  $60^\circ$  和  $120^\circ$ 。EBSD 测量结果显示，Type 3 和 Type 4 的取向差角分别为  $61.3^\circ$  和  $71.1^\circ$ （图 4a 和 4f）。需要特别指出的是，只有当  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  沿着同一个转轴及相同旋转方向时， $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应界面（Type 1）为小角度界面（ $<15^\circ$ ）。其余 3 种反应界面皆为大角度晶界。新形成的大角度晶界能阻碍位错滑移，使六方结构金属钛的加工硬化速率上升<sup>[22]</sup>。

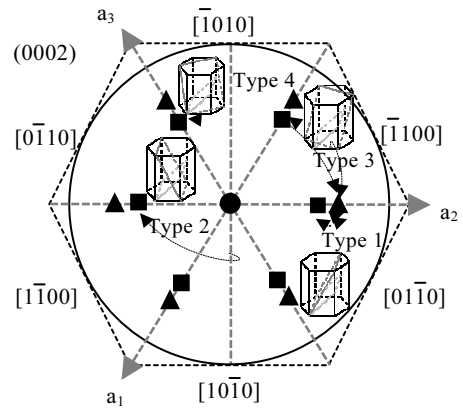


图 6 晶体参考坐标系中 (0002) 极图显示  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  的 6 种孪生变体及 4 种  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应界面

Fig.6 Orientation of each twin variant of  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  within the matrix grain reference frame, and four different types of  $\{11\bar{2}4\}$ - $\{11\bar{2}2\}$  twin junctions shown in (0002) PF; the matrix is represented by a filled black circle, and the variants of  $\{11\bar{2}4\}$  and  $\{11\bar{2}2\}$  twin are represented by filled black squares and triangles, respectively

本研究详细表征和分析了  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  2 种不同类型的压缩孪晶在同 1 个晶粒内部形成的特征，对理解六方结构金属钛在动态载荷下的压缩形变孪生机理提供新的认识。晶粒内部的  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶及其交互作用，将原始晶粒细分成不同的区域，细化原始晶粒。从形变强化的角度来看，如果能在低应变塑性变形条件下诱发更多的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶，可有效提高金属钛的力学性能，而原始材料的宏观形貌不产生较大改变。

### 3 结 论

- 1) 高纯钛动态压缩变形过程中， $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶总是伴随着  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶，没有单独存在的  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶。
- 2)  $\{11\bar{2}4\}$  压缩孪晶的形成是由于晶粒内部局部应力状态发生改变而诱发的。这种局部应力状态发生改变主要由  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体或  $\{11\bar{2}2\}$  孪晶与晶界发生交互作用引起的。 $\{11\bar{2}4\}$  孪晶具有高的形成能，它的产生能快速降低形变材料的内能，提高六方结构钛金属的塑性变形能力。
- 3) 由  $\{11\bar{2}2\}$  孪生诱发的  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶与相同晶粒中的其中 1 个  $\{11\bar{2}2\}$  孪生变体具有相同的转轴。
- 4) 根据晶体对称性及相同晶粒中  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  孪晶之间的取向关系， $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应可形成 4 种不同类型的孪晶反应界面。仅当  $\{11\bar{2}2\}$  和  $\{11\bar{2}4\}$  沿

着同一个转轴及相同旋转方向时,  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  孪晶反应界面为小角度界面, 其界面的取向差角约为  $12.4^\circ$ 。

#### 参考文献 References

- [1] Xiao Lin(肖林). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1995, 24(6): 21
- [2] Salem A A, Kalidindi S, Doherty R *et al. Metallurgical Materials Transactions A*[J], 2006, 37: 259
- [3] Partridge P G. *International Materials Reviews*[J], 1967, 12: 169
- [4] Chun Y B, Yu S H, Semiatin S L *et al. Material Science and Engineering A*[J], 2005, 398: 209
- [5] Xu F, Zhang X Y, Ni H T *et al. Material Science and Engineering A*[J], 2013, 564: 22
- [6] Xu Feng(许峰), Zhang Xiyan(张喜燕), Chen Youming(陈佑铭). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(7): 1730
- [7] Hong D H, Hwang S K. *Material Science and Engineering A*[J], 2012, 555: 106
- [8] Wang T B, Li B L, Li M *et al. Materials Characterization*[J], 2015, 106: 218
- [9] Lainé S J, Knowles K M. *Philosophical Magazine*[J], 2015, 95: 2153
- [10] Tomé C N, Beyerlein I J, Wang J *et al. JOM*[J], 2011, 63: 19
- [11] Wang L, Eisenlohr P, Yang Y *et al. Scripta Materialia*[J], 2010, 63: 827
- [12] Zhong Y, Yin F X, Nagai K. *Journal of Materials Research*[J], 2011, 23: 2954
- [13] Qin H, Jonas J J, Yu H B *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 71: 293
- [14] Chen Y J, Li Y J, Xu X J *et al. Materials Letters*[J], 2014, 117: 195
- [15] Christian J W, Mahajan S. *Progress in Materials Science*[J], 1995, 39: 1
- [16] Wang J, Beyerlein I J. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43A: 3556
- [17] Beyerlein I J, Capolungo L, Marshall P E *et al. Philosophical Magazine*[J], 2010, 90: 2161
- [18] Bao L, Zhang Y D, Schuman C *et al. Journal of Applied Crystallography*[J], 2013, 46: 1397
- [19] Fernández A, Jérusalem A, Gutiérrez-Urrutia I *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 61: 7679
- [20] Yu Q, Wang J, Jiang Y Y *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 77: 28
- [21] Juan P A, Pradalier C, Berbenni S *et al. Acta Materialia*[J], 2015, 95: 399
- [22] Kadiri H E, Kapil J, Oppedal A L *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 61: 3549

## Compressive Twinning Behavior in High-purity Titanium

Ren Yi, Zhang Xiyan, Sun Qi, Liu Qing  
(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Compressive twinning behavior in high-purity titanium was studied by back scattered electron diffraction (EBSD) techniques. The results show that  $\{11\bar{2}4\}$  twins are always accompanied with  $\{11\bar{2}2\}$  twins in some specific grains, and individual  $\{11\bar{2}4\}$  twin is not observed in the deformed sample. The formation of  $\{11\bar{2}4\}$  twin is attributed to the changes of local stress states, which is induced by the interaction of  $\{11\bar{2}2\}$  with  $\{11\bar{2}2\}$  twin variants or  $\{11\bar{2}2\}$  twin with the grain boundaries. The  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  twins tend to share the same axis of rotation as one of the  $\{11\bar{2}2\}$  twin variant within an initial grain. In addition, due to the crystal symmetry and the orientation relationship between  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  twins, interactions between  $\{11\bar{2}2\}$  and  $\{11\bar{2}4\}$  twins can inevitably occur, which results in four different types of  $\{11\bar{2}2\}$ - $\{11\bar{2}4\}$  twin junctions.

**Key words:** high-purity titanium; compressive twinning; orientation relationship; twin-twin interaction

Corresponding author: Zhang Xiyan, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65112154, E-mail: kehen888@163.com