

# TC4 棒材挤压织构的各向异性 及绝热剪切敏感性研究

符伟康<sup>1,2</sup>, 巩天元<sup>1,2</sup>, 李乙<sup>1,2</sup>, 郑辰星<sup>1,2</sup>, 董新龙<sup>1,2</sup>

(1 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

(2 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 钛合金加工过程产生的微观组织取向及织构会对其动态性能及绝热剪切特性产生影响。本研究采用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 对其挤压方向 (ED) 及横向 (TD) 高应变率下的压缩各向异性及绝热剪切特性开展实验研究, 通过数字图像相关法 (DIC) 及 EBSD 方法分析局域化演化特性及机制, 结果表明: 棒材中的  $\alpha$ -hcp 相具有轴向对称的柱面纤维织构特征, TD 方向的屈服强度明显高于 ED 方向, 但其绝热剪切敏感性更强, TD 方向 ASB 起始临界应变要较 ED 方向小 60%, 更易发生 ASB 破坏。EBSD 分析认为, 织构引起的特定晶体学取向是通过影响位错滑移系的 Schmid 因子来影响屈服, 导致性能的各向异性, 而多晶织构取向分布会影响绝热剪切局域化起始、演化。研究为理解取向织构对绝热剪切演化影响, 进而开展织构的工艺控制设计提供了重要参考。

**关键词:** TC4 棒材; 织构、动态性能、各向异性; 绝热剪切敏感性;

**中图分类号:** TG??? **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-185X

钛及钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性和高温性能, 用于航空航天、医疗应用以及家用设备等领域<sup>[1-4]</sup>。其中, TC4 (Ti-6Al-4V)  $\alpha+\beta$  型合金, 是目前应用最广泛的钛合金之一, 涉及航空、舰船结构甚至弹道装甲等极端冲击工况应用<sup>[3-4]</sup>, 因此其动态力学及破坏性能被广泛关注<sup>[5-7]</sup>。尤其, 钛合金是绝热剪切敏感材料, 其绝热剪切破坏特性及机制也一直是被关注的重点之一<sup>[8-10]</sup>。

由于  $\alpha$ -hcp (密排六方) 相晶体结构的固有各向异性, TC4 等  $\alpha+\beta$  类合金在成型、再结晶退火等制备过程会产生织构及微观结构变化<sup>[11,12]</sup>, 这些组织特征会使材料具有各向异性, 对材料的性能, 如强度、韧性、绝热剪切、疲劳及其裂纹扩展行为都有很强的影响<sup>[13-17]</sup>, 引起工程部门及学界的重视。Gu 等<sup>[16]</sup>的研究发现, 传统锻造态 TC4 表现出明显的力学各向异性: 沿锻造方向具有较高延性, 而垂直方向则更易发生绝热剪切带 (ASB) 诱发的失效。相比之下, 经热等静压 (HIP) 处理的等轴组织 (几乎无织构) 表现出力学各向同性, 但在高应变率加载下较早出现剪切局域化现象。因此, 研究成形材料织构的各向异性特征及对绝热剪切行为的影响, 对于在航空、航天等涉及冲击领域的应用至关重要。

已有研究从不同角度探讨钛合金织构对动态力学响应及绝热剪切的影响, 骆雨萌等<sup>[18]</sup>对 TC4 板材研究发现热轧过程中形成的基面织构使准静态及动态性能表现出各向异性, 沿轧向加载具有最高的塑性, 横向加载具有

最高屈服强度, 法向加载时塑性与强度介于轧向与横向之间。Gurao<sup>[11]</sup>、Panda<sup>[12]</sup>、Jong 等<sup>[19]</sup>研究了  $\alpha$  相纯钛轧制板材织构的屈服、塑性等的各向异性和相关机制, 认为不同方向加载时轧制织构引起的材料特定晶体学特征改变包括位错系滑移及孪晶的变形模式, 导致  $\alpha$  钛产生显著的屈服强度各向异性及应变硬化行为。另外,  $\alpha$ -Ti 中变形孪晶特征与加载方向及晶体取向相关, 而孪晶的形成导致的晶格重取向及孪晶界面强化共同影响材料的力学性能<sup>[19]</sup>。相比较, 钛合金织构取向对绝热剪切影响及机制的研究非常有限, 尽管人们已经发现晶粒尺寸、组织形态等微观结构对金属绝热剪切形成及 ASB 特征有明显作用<sup>[8-10, 17-20]</sup>。Zhang 等<sup>[20]</sup>基于位错滑移的晶体塑性有限元方法模拟了不同初始织构的  $\alpha$ -hcp 钛中 ASB 的形成, 旨在是否可以利用“好或坏的”织构控制或抑制 ASB 的形成, 为设计提供参考, 研究比较了 hcp 多晶体中的 c 轴分别沿 TD、ND 方向取向以及随机取向等 6 种织构模式, 发现 HCP 多晶体中的织构对 ASB 形成开始所需的临界应变有很大影响, 织构变化导致 ASB 形成时施加的宏观应变的差异可达 3%, 压缩时随机取向的多晶具有最大的 ASB 临界应变, 但研究没有对其影响机制进行分析。目前, 关于初始织构对剪切局域化的影响规律及机制还不清楚, 另外, 从工程应用角度出发, 也有必要对商用 TC4 型材的初始织构对动态冲击行为及绝热剪切带的影响进行系统研究, 以为钛合金部件的设计、加工时针对型材择优取向向下料提供参考依据。

收到初稿日期:

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (编号: 12372362)

作者简介: 符伟康, 男, 2000 年生, 研究生, 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211, 电话: 15157241995, 2311090104@nbu.edu.cn

通讯作者: 董新龙, 男, 1964 年生, 教授, 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211, 电话: , dongxinlong@nbu.edu.cn

为此，本文特别选择了挤压成型的商用 TC4 棒材，对其结构特征进行表征，采用分离式 Hopkinson 压杆对其动态压缩各向异性特性开展研究，探讨其对绝热剪切带起始演化的影响。实验主要对 ED 和 TD 方向的特性进行了比较，通过对试样 DIC 局域化演化及 EBSD 分析，探讨了结构取向对 ASB 敏感性的影响，可为理解结构取向对各向异性的影响及挤压成型棒材在冲击工程中的应用提供参考。

## 1 实验方法

### 1.1 材料及组织结构

本研究选用中金研有限公司生产的直径为 20mm 的商用 TC4 钛合金棒材，该棒材经挤压工艺制备。TC4 钛合金的  $\beta$  转变温度位于 985-995 °C 之间，本材料采用 750 °C 退火 2 小时的热处理方式，温度低于其  $\beta$  相变点。同时，由于挤压过程中经历了严重塑性变形的累积作用，其晶粒较细，垂直棒材 ED 及 TD 方向的截面金相分析结果显示（以下分别称为 ED 面和 TD 面）：ED 面主要由无孪晶的细等轴晶粒组成，而 TD 面可见沿轴向被挤压拉长的晶粒（如图 1 所示）。

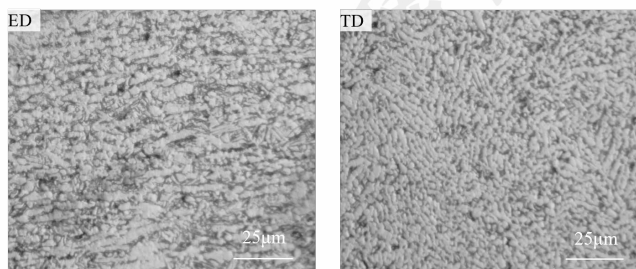


图 1 棒材 ED 面及 TD 面的金相组织

Fig.1 Metallographic microstructures on the ED plane and TD plane of the bar

图 2 为通过电子背散射衍射 (EBSD) 获得的样品微观结构特征，包括反极图、极图、相分布及晶粒尺寸分布。从图 2(a) 中 TD 面与 ED 面的  $\{0001\}$  和  $\{10-10\}$  极图分析可知： $\{0001\}$  极图的极点密集分布于横向 (TD) 方向，表明  $\alpha$ -hcp 相晶粒的 c 轴倾向于平行于棒材径向 (TD)。同时， $\{10-10\}$  极图在挤压方向 (ED) 上呈现出显著的强度集中，表明该柱面的法向倾向于平行于挤压方向 (ED)。以上结果表明，该棒材形成了典型的柱面纤维组织，其特征为 c 轴与 TD 方向一致并沿环向对称分布。从 EBSD 相分析结果可见该 TC4 棒材  $\alpha$  相的含量为 96.4%， $\beta$  相含量仅为 3.6%， $\beta$  相在  $\alpha$  相的晶间分布，如图 2 (b) 所示。ED 面等轴的平均晶粒尺寸约为 1.97  $\mu\text{m}$ ，TD 方向的平均为 1.6  $\mu\text{m}$ 。

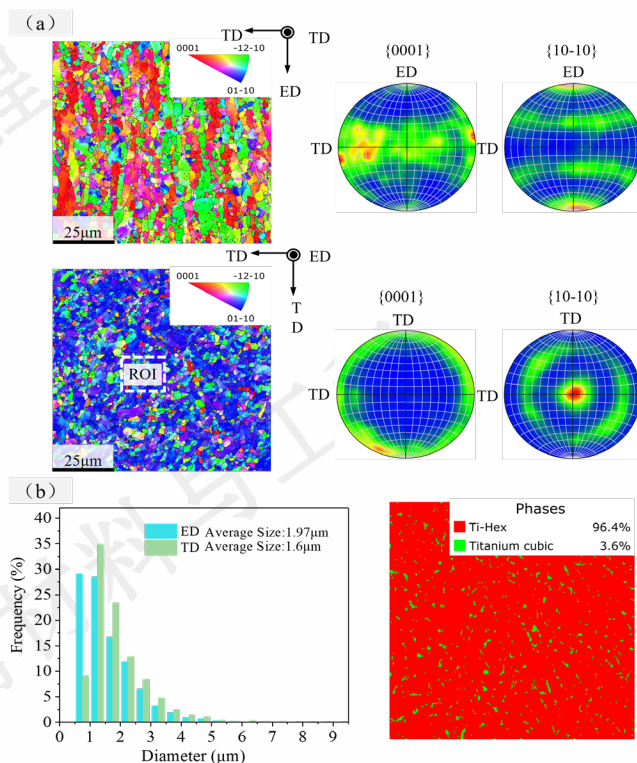


图 2 TD 及 ED 面的 EBSD 组织及相分析结果

Fig.2 EBSD texture and phase maps of the TD and ED planes: (a) Pole figures of the ED and TD specimen; (b) phase fraction and grain size distribution.

### 1.2 实验方法及试样

材料动态压缩实验采用直径为 14.5mm 的分离式霍普金森压杆装置上进行，如图 2 所示，以  $10^3 \text{ s}^{-1}$  的加载应变率，分别沿 ED 和 TD 两个特征方向进行动态单轴压缩试验，以探讨棒材结构对其动态性能的影响。

为便于通过高速相机观测绝热剪切局域化过程，动态压缩实验采用 4 mm × 4 mm × 4 mm 的立方试样，考虑到挤压棒材的组织沿半径方向分布不均匀，加工试样时采用电火花切割从棒材心部取样，如图 2(a) 所示。压缩加载轴分别平行于 ED 和 TD 方向。需要说明的是：与圆柱试样相比，虽然矩形压缩试样的直角会对绝热剪切带的起始产生影响，但两者试样尺寸及边界条件都相同，因此，不会影响对绝热剪切敏感性的比较研究。

实验中，通过 SHPB 的子弹撞击入射杆自由端产生压缩应力波，该应力波沿入射杆传播至试样。通过调节撞击杆的速度，实现加载应变率的控制。当入射波沿入射杆传播到试样时，试样材料受到高应变率压缩载荷。入射波与试样相互作用后，一部分波被反射，另一部分被传递至透射杆。通过粘贴在入射杆与透射杆上的应变片，分别测量入射波、反射波和透射波信号，基于 SHPB 一维应力波分析原理，获得试样的动态压缩应力-应变曲线。同时，利用高速相机同步记录试样在动态压缩过

程中的全场变形行为,重点捕捉绝热剪切局域化(ASB)的萌生与扩展过程。结合高速相机记录的图像序列,

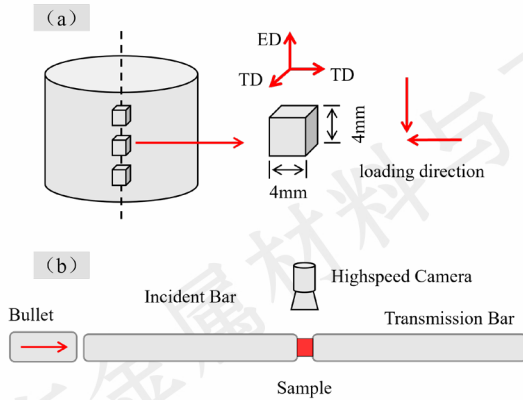


图3 取样与实验装置

Fig.3 Sampling and experimental setup: (a) Specimen orientation and loading direction;(b) Hopkinson bar experimental setup

采用数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术分析试样表面应变场分布及变形局域化演化特征。

实验后,对回收的变形试样进行金相观察及 CT 损伤扫描分析,以研究变形局域化与 ASB 形成及损伤破坏演化之间的关系。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 动态应力-应变曲线的各向异性

为保证实验结果的可靠性,每个方向的压缩试验在相同应变率条件下重复测试 2-3 次,结果具有较好的重复性。图 4 给出了 ED 和 TD 方向压缩加载测试得到的典型真应力-应变曲线及相应的应变硬化率曲线。从图中可以看出,材料在不同加载方向下的变形行为存在显著差异,表现出明显的变形各向异性。这可以从屈服强度以及屈服以后的应变硬化行为两个方面描述:(1) TD 方向的屈服强度为 1235MPa,大于 ED 方向的 1123 MPa,如图 4 (a);(2) 屈服后,实验材料 ED 和 TD 压缩加载方向上的应变硬化系数 ( $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ ) 的变化规律几乎完全相同(图 4 (b)),随应变发展,应变硬化系数不断减小,至应力最大点降为 0,随后随应变增加应力开始下降,应变硬化系数变为负值,出现软化现象。对于应变率相关的粘塑性材料,其流动应力受应变硬化、应变率硬化及热软化三种机制的共同作用,其影响将在下一节中进一步讨论。

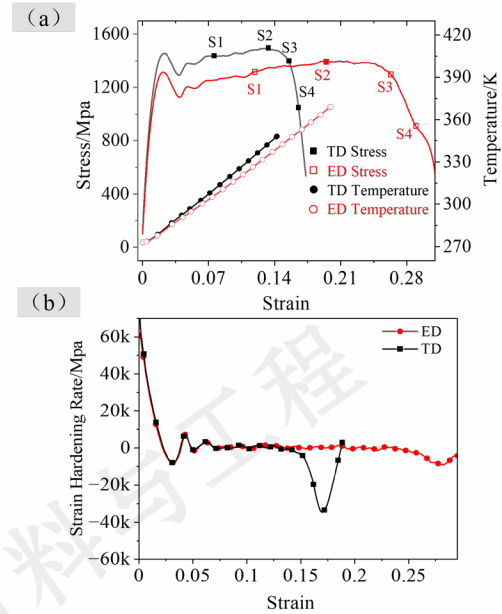


图4 应力应变及应变硬化率曲线

Fig.4 Stress-strain, temperature, and strain hardening rate curves: (a) True stress-true strain curves and the estimated temperature evolution for the TD and ED directions;(b) corresponding strain hardening rate curves.

### 2.2 应变局域化及绝热剪切破坏

材料的应力-应变曲线实际上反映试样从均匀变形到变形局域化直至损伤破坏整个过程的宏观力学响应。图 5 给出 DIC 分析得到的试样表面等效应变场的演化过程,其中图中 S1、S2、S3 及 S4 时刻分别对应图 4 (a) 中所标注的不同变形阶段,可见:在应变硬化阶段(S1 时刻),试样表面应变场基本是均匀的;当应力达到最大点时(S2 时刻),从立方试样角上开始发生应变局域化,变形局域化沿最大剪应力方向(约 45°)演化发展。值得注意的是:局域化演化并不是从角上起始后一维连续扩展的,而是先在剪切方向形成应变集中点(热点),随后,这些热点不断连接形成应变局域化带(见图 5 S2、S3 时刻)。当应力坍塌到 S4 时刻,局域化带贯穿,试样沿局域化带发生剪切断裂。

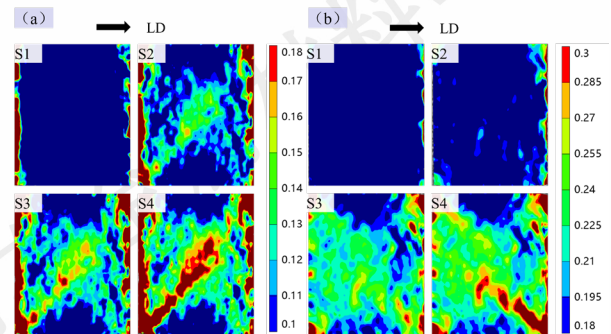


图5 应变场及应变局域化演化过程

Fig.5 Strain fields and the evolution of strain localization:(a)TD(b)ED

以上对图 5 应变场演化分析表明:应力-应变曲线最

大点 (S2) 为发生局域化起始的时刻, 随后的应力软化及塌陷反映了试样局域化演化及剪切破坏过程。ED 和 TD 方向局域化起始临界应变、断裂的名义应变分别为 0.238、0.302 和 0.143、0.186, TD 方向都小于 ED 方向, 表明 TD 方向压缩显著较 ED 方向压缩更容易发生局域化及剪切断裂。另外, 从应变局域化演化云图还发现: TD 方向压缩时的局域化发展比 ED 方向更加迅速且集中, 这与应力-应变曲线中 TD 方向的应力软化斜率更为陡峭、应力塌陷更快的特征一致, 进一步说明 TD 方向的局域化集中速度更快。这些结果表明 TD 方向较 ED 方向绝热剪切敏感性更大。

图 6 给出了动态压缩变形破坏回收试样轴向截面的金相, 表明 TD 和 ED 方向均发生了绝热剪切破坏, 绝热剪切带 (ASB) 沿压缩试样的应变局域化区演化, 为绝热剪切相变带 (白带)。剪切带与基体之间界面清晰, 沿剪切带存在微裂纹及拉长的椭圆形孔洞, 裂纹沿剪切带连接发展导致试样绝热剪切断裂。因此, 局域化起始及 ASB 形成是试样断裂的前兆和主要破坏特征。TD 试样的绝热剪切带宽度约为 4-15 $\mu\text{m}$ , 小于 ED 的 7-20 $\mu\text{m}$ , 与 TD 应变局域化集中演化更快的趋势一致。从细观角度反映了沿 TD 方向加载时, 材料具有更高的绝热剪切敏感性, 更易发生绝热剪切破坏。

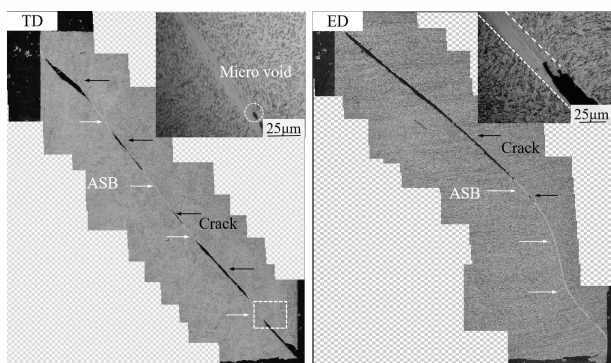


图 6 回收式样金相显示 TC4 合金为绝热剪切破坏

Fig.6 Metallographic image of the recovered TC4 specimen exhibiting adiabatic shear banding

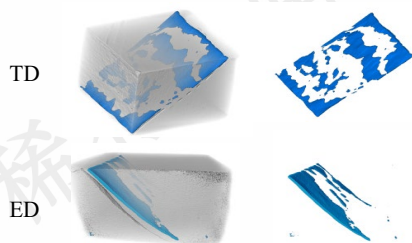


图 7 TD 与 ED 回收试样 CT 扫描的裂纹分布特征

Fig.7 Crack distribution characteristics from CT scans of the recovered TD and ED specimens

图 7 为回收试样 CT 探伤结果, 可见沿剪切带裂纹 (蓝色区域) 分布呈不连续特征, 这些裂纹是由不同部

位微孔洞的形核、长大、聚集连接形成的断续裂纹, 再通过连接, 扩展成宏观裂纹, 最终导致绝热剪切断裂。

### 3 进一步分析讨论

对商用挤压 TC4 棒材的动态压缩性能及微观组织演化分析表明: 由于 TC4 的 $\alpha$ 相具有柱面纤维织构特征, 沿挤压方向 (ED) 和横向方向 (TD) 的力学行为表现出明显各向异性, TD 方向的屈服强度显著高于 ED 方向。另外, 无论 ED 还是 TD 方向压缩都发生绝热剪切破坏, 但 TD 方向的绝热剪切敏感性明显大于 ED 方向, 并且局域化演化速度也比 ED 方向更快。

#### 3.1 织构对屈服应力各向异性的影响

众所周知, 晶体微观组织、取向及织构对材料力学性能有显著影响。本实验采用的 TC4 中的 $\alpha$ 相 (hcp 结构) 含量为 96.4%, 平均晶粒尺寸 TD 面为 1.6 $\mu\text{m}$ , ED 面为 1.97 $\mu\text{m}$ , 两个方向晶粒尺寸相差不大 (如图 1(c)), 因此晶粒尺寸的 Hall-Petch 强化效应对屈服应力影响作用相当。对于  $\beta$  相的影响, 由于实验材料 TD 和 ED 截面的  $\beta$  相形态相同, 且含量都很低, 分别为 3.6% 和 1.4%, 应该对屈服强度影响不大。但 TC4 中 $\alpha$ 相的六方密排晶格具有明显的塑性各向异性, 挤压加工过程中 $\alpha$ 相易形成特定取向的织构, 这种塑性加工形成的特定的取向即使经再结晶退火也难以完全消除<sup>[21]</sup>, 会影响其位错滑移系的 Schmid 因子 (SF), 从而影响材料的性能<sup>[12-19]</sup>。钛的  $\alpha$ -hcp 相最常见的激活滑移系包括柱面  $\langle a \rangle$  滑移系、基面  $\langle a \rangle$  滑移系和锥面  $\langle c+a \rangle$  滑移系。当试样在压缩应力  $\sigma$  作用下, 位错滑移系的启动受晶粒几何因素 (取向) 与材料本征因素共同控制, 其激活判据可表示为:

$$\tau^{\alpha} = \sigma m^{\alpha} \geq \text{CRSS} \quad (1)$$

其中,  $\tau^{\alpha}$  为 $\alpha$ 滑移系的分切应力,  $m^{\alpha}$  为相应的 Schmid 因子 (SF), 反映晶体取向对分切应力的几何贡献; CRSS 为相应滑移系发生滑移所需的临界剪应力, 是材料的本征物理参数, 与成分及位错密度演化等因素相关。因此, 滑移系是否被激活不仅取决于其 SF 的大小, 还取决于滑移系 CRSS 的大小。已有研究表明: 在这些滑移系中, 柱面  $\langle a \rangle$  滑移系的临界剪切应力 (CRSS) 最低, 基面  $\langle a \rangle$  滑移系次之, 而锥面滑移系的 CRSS 最高, 远大于柱面  $\langle a \rangle$  滑移系<sup>[22]</sup>; 无论压缩、拉伸及剪切应力状态下, 柱面  $\langle a \rangle$  和基面  $\langle a \rangle$  滑移系都对应变贡献最大, 即使晶粒取向不利时也主要通过柱面  $\langle a \rangle$  和基面  $\langle a \rangle$  滑移实现塑性变形; 而锥面  $\langle c+a \rangle$  滑移系只在局部被激活以满足变形连续性条件需要<sup>[23]</sup>。为此, 分别对 ED 和 TD 方向试样的潜在滑移系的 SF 进行了定量分析, 如图 8 所示。其中, 在图 8(a) 中以色条表示的 SF 值, 亮色 (高

值 0.5) 表示晶粒取向有利于该滑移系的激活, 而暗色表示不利于该滑移系激活的取向; 图 8(b) 为基于 EBSD-AZtec 软件分析得到的各滑移系的算术平均 SF; 图 8(c) 还分别给出了 TD 和 ED 试样各晶粒对塑性变形起主要贡献的柱面和基面主滑移系的 SF 的晶粒分布比例。可见: ED 方向压缩时, 柱面、基面主滑移系的平均 SF 为 0.42 和 0.19 (图 8 (b)), 大多数晶粒的柱面  $\langle a \rangle$  滑移系 Schmid 因子大于 0.4 (图 8 (c)), 因此沿 ED 方向加载时, CRSS 较小的柱面  $\langle a \rangle$  滑移系在压缩作用容易被激活启动, 因此其屈服强度较小。TD 方向压缩试样柱

面、基面滑移系的平均 SF 为 0.29 和 0.34, 且分布差异不大, 难以判断主要滑移系。假设柱面及基面  $\langle a \rangle$  滑移系 CRSS 近似相同, 对 TD 方向取 SF 较大的基面滑移系为主滑移系, 按 (1) 式评估 ED 和 TD 方向主滑移系被激活所需的压应力比为 0.81。因此, 从 SF 角度分析, ED 屈服强度比 TD 方向较低, 与实验结果趋势一致。织构引起的特定晶体学特征会通过影响位错滑移系统 SF 来影响屈服, 导致变形各向异性。

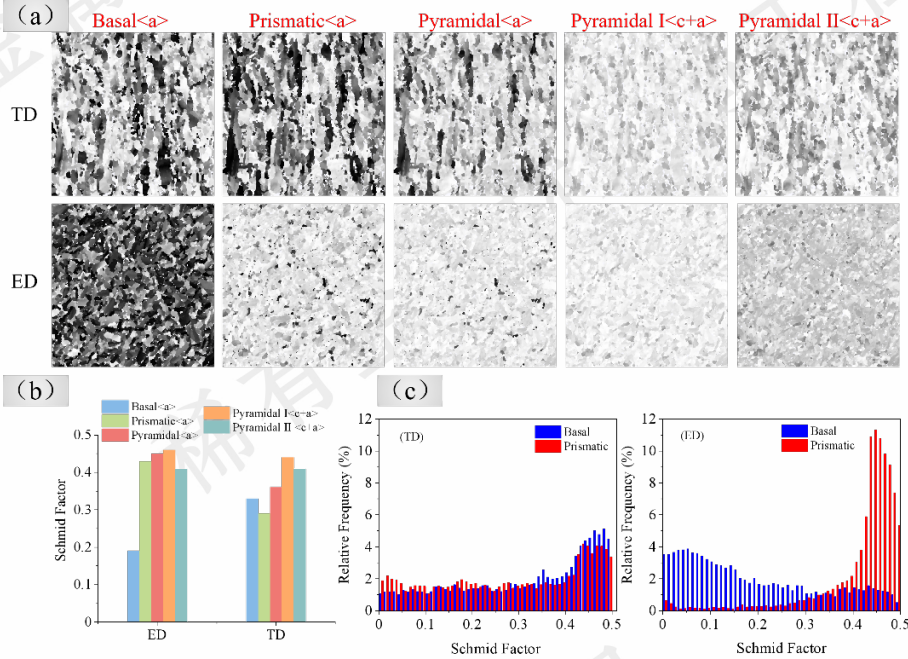


图 8 TD 与 ED 潜在滑移系的 Schmid 因子 (SF) 分布及统计

Fig.8 Schmid factor distribution and statistics of potential slip systems in the TD and ED directions: (a) Schmid factor distribution of all potential slip systems;(b) average Schmid factors of all slip systems;(c) statistical distribution of Schmid factors for basal and prismatic slip systems.

### 3.2 对绝热剪切敏感性的影响

金属绝热剪切一般归因于绝热温升所致的热软化大于塑性应变硬化的一种本构失稳现象<sup>[9]</sup>, 将稳定塑性变形( $\partial\tau/\partial\gamma > 0$ )与非稳定塑性变形( $\partial\tau/\partial\gamma < 0$ )的分界点(即应力极大点)表征绝热剪切的宏观临界条件, 即  $d\tau/d\gamma = 0$ 。在高应变率动态压缩条件下, 变形过程近似可认为绝热, 塑性功引起的温升可用方程 (1) 估算:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{\beta}{\rho C_v} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (2)$$

这里  $\rho$  与  $C_v$  分别为材料的密度与比热容;  $\sigma$  与  $\epsilon$  分别为真应力与真应变,  $\beta$  为 Taylor - Quinney 系数, 取  $\beta=0.9$ 。图 4(a) 给出了按应力-应变曲线计算得到的局域化发生前试样平均的绝热温升随应变的变化, 可见: 在相同应变率下, 由于 TD 方向加载, 流动应力高, 有更大的塑性功累积, 温升较大, 会导致更强的热软化效应, 可能导致 TD 更容易达到绝热剪切的软化条件, 使得 TD 绝

热剪切敏感性较 ED 方向大。Yang 等<sup>[24]</sup>研究了 TC4 钛合金增材制造过程形成的取向对 ASB 破坏的影响, 也发现当沿  $\alpha$  相  $c$  轴方向加载时, 绝热剪切敏感性更高, 与本文趋势一致, 认为是由于沿  $\alpha$  相  $c$  轴加载, 剪切过程中基底和棱柱  $\langle a \rangle$  滑移系较难激活, 只有具有更高 CRSS 的锥体  $\langle a \rangle$  滑移系可以被激活, 增加了材料的流动应力并增强了热软化效应, 从而导致绝热剪切敏感性更高。

值得注意的是: TD 和 ED 最大应力 S2 时刻对应的塑性温升分别为 52°C 和 67°C, 与 Rittel 等人<sup>[25]</sup>采用高速红外阵列测试得到的 TC4 压剪 ASB 起始温升 80°C 相近, 可见发生应力软化的绝对温升并不大。这也是目前关于绝热剪切软化机制争论的焦点, 认为这么低的温升不足以使金属产生热软化, 因此温升可能不是绝热剪切产生的原因而是剪切局域化后导致的结果<sup>[26]</sup>。Rittel 等分析认为可能是旋转再结晶引起的软化<sup>[27]</sup>。抛开软化机制的争论, 有一点是明确的, ASB 形成还与合金的细观

组织结构特征有关<sup>[9]</sup>，但关于织构对绝热剪切影响机制的研究目前相对较少，没有被广泛接受的解释。Zhang 等<sup>[20]</sup>通过基于位错滑移的晶体塑性模型模拟了 $\alpha$ -hcp 纯钛典型织构在压缩和剪切下的局域化响应，研究表明：如果晶粒的织构取向与柱面〈a〉主滑移方向对齐“软模态响应”时，应变局域化通过晶粒的能量吸收降低，变形比较均匀，预计局域化及 ASB 会不容易起始；但一旦形成，ASB 更容易扩展。而如果相邻晶粒存在软、硬晶粒变形模式的高度各向异性，ASB 就比较容易起始，但会被取向不良的晶粒偏转。当沿 ED 方向加载时各晶粒 Schmid 因子较主要分布在 0.4-0.5 之间（图 8（c）），平均为 0.42（如图 8（b）），表明取向与柱面〈a〉主滑移系一致，使得晶粒间变形更趋于均匀，ASB 不易起始，因此在局域化起始应变较大，应变集中“热点”分散，集中较慢，导致 ED 的绝热剪切敏感性明显小于 TD。但局域化起始后，ASB 带是在 TD 面沿剪切方向扩展，由于 TD 面晶粒取向差大（图 8（c）），ASB 不易扩展、轨迹弯曲（图 6），软化曲线下降较 TD 方向更缓慢，断裂能增大。表明多晶间取向分布及织构会影响 ASB 的演化。

综上，对于 $\alpha$ -hcp 占比很高的 TC4 钛合金，其微观组织的取向及织构对加工过程（如塑性工艺、再结晶工艺等）非常敏感。而微观组织取向及织构会对材料的力学性能各向异性及绝热剪切起始、演化产生影响。有必要针对不同载荷工况开展进一步研究，以厘清影响规律，这对于工程设计应用有重要意义。如针对 $\alpha/\beta$  基钛合金弹道极限设计，可以通过有目的引入“有益”的取向或织构，控制靶板的各向异性来增强抵抗 ASB 侵彻的能力等。因此，本研究可为理解取向织构对绝热剪切演化影响，进而进行织构的工艺控制设计提供了重要参考。当然，本工作是只在压缩工况下对其绝热剪切敏感性开展分析，有必要对加载模式（如剪切、压剪等）的影响开展更系统研究。

## 4 结论

通过 SHPB 动态压缩实验结合 DIC 应变场局域化演化及微观分析对经挤压退火的商用 TC4 棒材各向异性及其绝热剪切敏感性开展研究，得到了包括试样 ASB 起始、破坏演化行为。对 ED 和 TD 方向试样的实验结果表明：挤压、轧制等织构对材料动态压缩性能各向异性及绝热剪切敏感性有显著影响，主要结果包括：

（1）挤压 TC4 棒材组织为 $\alpha+\beta$  结构， $\beta$  存在于 $\alpha$  晶粒间，其中 $\alpha$ -hcp 相存在典型的轴对称柱面纤维织构特征。

（2）棒材 TD 方向的屈服强度 1235 MPa 显著高于 ED 方向的 1123 MPa，但屈服后的应变硬化变化特性相

同；分析认为轧制织构引起的特定晶体学特征通过影响位错滑移系统的 Schmid 因子来影响屈服，从而导致变形各向异性。

（3）试样变形局域化及 ASB 演化起始发生在名义压缩应力—应变曲线最大应力处，其对应的临界应变 TD 方向加载时为 0.143，小于 ED 方向的 0.238，相差达 60%，表明 TD 方向的绝热剪切失稳敏感性显著大于 ED；TD 方向的变形集中演化也较 ED 方向更快，导致应力塌陷更迅速，软化曲线更陡。

（4）分析认为多晶间取向分布及织构会影响 ASB 的演化，ED 方向晶粒间柱面〈a〉主滑移系 Schmid 因子分布较为一致，晶粒取向差小，变形更趋均匀，不利于局域化集中，导致 ASB 敏感性较 TD 小。而局域化起始后，在 TD 面沿剪切方向扩展，晶粒取向差大，不易扩展，因此，软化曲线下降较 TD 缓慢，断裂能增大。

## 参考文献 References

- [1] Najafzadeh M, Yazdi S, Bozorg M, et al. Classification and applications of titanium and its alloys: A review[J]. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 2024, 3: 100019.
- [2] Williams J C, Boyer R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. *Metals*, 2020, 10(6): 705.
- [3] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章, 等. 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S2): 538-544.
- [4] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 213(1-2): 103-114.
- [5] 张磊, 郭萍, 王欢, 等. 细晶 tc4 合金板材超塑性行为及组织演变研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(12): 3422-3427.
- [6] 刘涛, 邵博, 雷经发, 等. 固溶温度对 tc4 钛合金微观组织和动态拉伸力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(12): 4133-4140.
- [7] Macdougall D A S, Harding J. A constitutive relation and failure criterion for Ti6Al4V alloy at impact rates of strain[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1999, 47(5): 1157-1185.
- [8] Wright T W, Batra R C. The initiation and growth of adiabatic shear bands[J]. *International Journal of Plasticity*, 1985, 1(3): 205-212.
- [9] Bai Y long, Dodd B. Adiabatic shear localization: occurrence, theories and applications[C]. 1992.
- [10] Guan X, Qu S, Wang H, et al. Adiabatic shear localization in metallic materials: Review[J]. *Materials*, 2024, 17(21): 5365.
- [11] Gurao N P. Deformation behaviour of commercially pure titanium at extreme strain rates[J]. *Acta Materialia*: 0-16.
- [12] Panda S. Orientation dependent mechanical properties of

- commercially pure (cp) titanium[J]. *Materials Characterization*: 0-9.
- [13] Britton T B, Dunne F P E, Wilkinson A J. On the mechanistic basis of deformation at the microscale in hexagonal close-packed metals[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 471(2178): 20140881.
- [14] Bache M. A review of dwell sensitive fatigue in titanium alloys: The role of microstructure, texture and operating conditions[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(9-11): 1079-1087.
- [15] Zhang Z, Dunne F P E. Microstructural heterogeneity in rate-dependent plasticity of multiphase titanium alloys[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 103: 199-220.
- [16] Gu Y, Nesterenko V F. Dynamic behavior of HIPed ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(4): 771-783.
- [17] Chen H, Zeng W, Luo H, et al. The texture evolution near the shear band and corresponding impact on the microvoid nucleation and crack propagation of Ti6242s alloys under high strain rates[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2024, 915: 147243.
- [18] 骆雨萌, 刘金旭, 李树奎, 等. 热轧 tc4 钛合金力学性能各向异性及影响因素分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(11): 2692-2696.
- [19] Won J W, Park C H, Hong S G, et al. Deformation anisotropy and associated mechanisms in rolling textured high purity titanium[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 651: 245-254.
- [20] Zhang Z, Eakins D E, Dunne F P E. On the formation of adiabatic shear bands in textured HCP polycrystals[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 79: 196-216.
- [21] Schoenfeld S, Kad B. Texture effects on shear response in ti-6Al-4V plates[J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18(4): 461-486.
- [22] Gong J, Wilkinson A J. Anisotropy in the plastic flow properties of single-crystal  $\alpha$  titanium determined from micro-cantilever beams[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(19): 5693-5705.
- [23] Lee M S, Hyun Y T, Jun T S. Global and local strain rate sensitivity of commercially pure titanium[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 803: 711-720.
- [24] Yang Y, He J, Huang J. Effect of heat treatment on adiabatic shear susceptibility of ti-6Al-4V titanium alloy manufactured by selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 851: 143647.
- [25] Rittel D, Wang Z G. Thermo-mechanical aspects of adiabatic shear failure of AM50 and Ti6Al4V alloys[J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40(8): 629-635.
- [26] Guo Y, Ruan Q, Zhu S, et al. Dynamic failure of titanium: Temperature rise and adiabatic shear band formation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 135: 103811.
- [27] Rittel D, Landau P, Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(16): 165501.

## Study on Anisotropy and Adiabatic Shear Sensitivity of The Texture for Extruded TC4 Alloy Bar

Weikang Fu<sup>1,2</sup>, Tianyuan Gong<sup>1,2</sup>, Yi Li<sup>1,2</sup>, Chenxing Zheng<sup>1,2</sup>, Xinlong Dong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(2. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** The microstructural orientation and texture generated during the thermomechanical processing of titanium alloys have significant influences on their dynamic mechanical properties and adiabatic shear characteristics. In this study, a split Hopkinson pressure bar (SHPB) system was employed to experimentally investigate the compression anisotropy and adiabatic shear behaviour of extruded Ti-6Al-4V bar along the extrusion direction (ED) and the transverse direction (TD) under high strain rates. The digital image correlation (DIC) technique and electron backscatter diffraction (EBSD) method were used to analyse the features and mechanisms of localization initiation and evolution. The results show that the  $\alpha$ -hcp phase in the bar exhibits an axially symmetric prismatic fibre texture. The yield strength in the TD is markedly higher than that in the ED, while the adiabatic shear sensitivity is stronger in the TD. The critical strain for ASB initiation in the TD is approximately 60% lower than that in the ED, making ASB-induced failure more likely to occur. EBSD analyses indicate that the specific crystallographic orientations caused by texture affect yielding through the Schmid factors of dislocation slip systems, leading to mechanical anisotropy, and that the orientation distribution of polycrystalline texture governs the initiation and subsequent evolution of adiabatic shear localization. This work provides an important reference for understanding the effect of orientation texture on ASB evolution and for further developing texture-controlled process design and engineering applications.

**Key words:** TC4 alloy bar; texture; dynamic mechanical properties; anisotropy; adiabatic shear band sensitivity

---

Corresponding author: Dong Xinlong, Ph. D., Professor, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, P. R. China, Tel: 0086-574-87600497, E-mail: dongxinlong@nbu.edu.cn

稀有金属材料与工程  
稀有金属材料与工程  
稀有金属材料与工程  
稀有金属材料与工程