

钒钛材料与应用

双相钛合金 Ti-6Al-4V 拉伸行为的晶体塑性有限元研究

张 龙^{1,2}, 常 乐^{1,2*}, 林鸿运^{1,2}, 周昌玉^{1,2}

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 南京工业大学高端装备可靠性制造研究院, 江苏 南京 211816)

摘 要:通过晶体塑性有限元方法探究了 α/β 相含量和晶粒尺寸对 Ti-6Al-4V 双相钛合金拉伸力学性能的影响, 通过滑移相对分数定量评估不同滑移系对塑性变形的贡献。结果表明: Ti-6Al-4V 钛合金拉伸变形过程中应力应变分布不均匀, 应力集中在 β 相变体晶粒及晶界处, 应变集中在 α 相晶粒附近。随 β 相含量升高, 应力集中区域更多, 三叉晶界处越易产生应变集中, β 相{110}滑移系对塑性变形的贡献大幅提高。随着 α 相、 β 相或两相晶粒尺寸同时扩大, 塑性段应力应变曲线下降, 且初始变形都主要由柱面滑移系主导, 锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系贡献次之。增大 α 相晶粒尺寸, 锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系活性下降, 导致塑性阶段应力值降低。增大 β 相晶粒尺寸, 塑性阶段应力的降低与 β 相中{110}滑移系活性下降有关。同时增大 α 及 β 相晶粒尺寸时, 会同时影响柱面滑移系和{110}滑移系的相对分数, 应力值的下降与界面数量的显著下降有关。

关键词: Ti-6Al-4V; 拉伸行为; 晶体塑性; 应力应变; 滑移系; 有限元分析

中图分类号: TF823, TG115

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)06-0064-10

DOI: [10.7513/j.issn.1004-7638.2024.06.009](https://doi.org/10.7513/j.issn.1004-7638.2024.06.009)

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Crystal plasticity finite element study of tensile behavior of two-phase titanium alloy Ti-6Al-4V

Zhang Long^{1,2}, Chang Le^{1,2*}, Lin Hongyun^{1,2}, Zhou Changyu^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; 2. Institute of Reliability Centered Manufacturing, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: The influence of α/β volume fraction and grain size on the tensile mechanical properties of Ti-6Al-4V dual-phase titanium alloy was investigated in this study using the crystal plasticity finite element method. The contribution of different slip systems to plastic deformation was evaluated quantitatively by slip relative fraction. The results demonstrate that the stress-strain distribution during the tensile deformation of Ti-6Al-4V titanium alloy is non-uniform. The stress is primarily concentrated on the β phase grain and grain boundary, while the strain is concentrated on the α phase grain. Increasing the volume fraction of β phase leads to a larger stress concentration area, easier generation of strain concentration at the triple-junction of grain boundaries, and a significant increase in contribution from the β phase{110} slip system to the plasticity deformation. Increasing α , β or two-phase grain size results in

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51905260)。

作者简介: 张龙, 2000 年出生, 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事钛合金力学行为研究, E-mail: 1041444792@qq.com;

*通讯作者: 常乐, 1991 年出生, 男, 江苏泰兴人, 副研究员, 主要从事结构完整性研究, E-mail: Chellechang@163.com。

decreased stress-strain curve in the plastic region, where initial deformation is predominantly governed by prismatic slip system while pyramidal $\langle c+a \rangle$ slip system contribute slightly less. An increase in α -phase grain size leads to a decrease in the activity of pyramidal $\langle c+a \rangle$ slip system, resulting in reduced stress values in the plastic region. Increasing the β -phase grain size results in a reduction of stress during the plastic stage, which is attributed to the decreased activity of $\{110\}$ slip system within the β -phase. Simultaneously increasing the grain size of both the α and β phases will affect the activation fraction of prismatic and $\{110\}$ slip systems. The reduction in stress is associated with the significant decrease in the number of interfaces.

Key words: Ti-6Al-4V, tensile behaviors, crystal plasticity, stress-strain, slip system, finite element method

0 引言

钛合金中最常见的两种结构相为 α 相和 β 相, 大多数 $\alpha+\beta$ 型钛合金在室温下通常含有 4% ~ 20% 的 β 相, $\alpha+\beta$ 型钛合金的组织形态大致可分为等轴组织、网篮组织、魏氏体组织、双态组织四类^[1-2]。钛合金的机械性能主要由其组织形貌、晶粒尺寸及取向所决定^[3]。初生 α 相和 β 相变体作为两相钛合金中重要组成成分, 随着 α/β 相界面的变化, 晶粒及相界面与位错的交互阻碍作用致使材料强度会有所变化。

在研究微观组织特征对单轴宏观力学变形行为影响过程中, 已有诸多研究关注 α/β 相含量和晶粒尺寸因素的影响。李进元等^[4] 通过高温水冷处理使合金组织中的初生 α 含量减少, 由于晶间 β 组织对位错移动起到阻碍作用, 致使强度明显提高。高宇昊等人^[5-6] 研究发现初生 α 相含量增加, β 转变相含量减少, 导致强度降低, 塑性增加。针对 TC10、TC11、TC4 等钛合金力学性能的研究表明初生 α 相的含量和尺寸对钛合金的力学性能有显著影响, 晶粒粗化会造成钛合金强度降低^[7-13]。此外, α 相形貌对钛合金的力学性能也有显著影响。调节 β 变体组织中片层 α 相的长宽比尺寸, 会使位错滑移难以穿过界面, 钛合金强度及综合性能提升^[14-16]。

上述研究多利用试验方法, 初步研究了 α 及 β 相含量和晶粒尺寸对双相钛合金宏观力学性能的影响, 缺乏微观变形机理的定量化评估研究。位错滑移是双相钛合金的主要变形机制, 研究微观组织对位错滑移行为的影响有助于深入理解钛合金的微观变形机理^[17]。笔者基于晶体塑性有限元计算框架 PRISMS-Plasticity^[18], 以应用广泛的 Ti-6Al-4V 钛合金为例, 创建不同几何结构特征的代表性体积单元 (representative volume element, RVE) 模型, 定量化

研究不同 α 、 β 相体积分分数及晶粒尺寸大小对塑性变形行为和力学性能的影响, 关注空间应力应变分布特点, 揭示不同组织特征影响下的拉伸变形微观机制。

1 晶体塑性方法

1.1 率相关晶体塑性模型

塑性变形速度梯度 L_P ^[19] 可表示为:

$$L_P = \sum_{\alpha=1}^{n_s} \dot{\gamma}_{\alpha} S_0^{\alpha} \quad (1)$$

其中, n_s 为滑移系启动总数量; $\dot{\gamma}_{\alpha}$ 为 α 滑移系的剪切速率; S_0^{α} 为 α 滑移系滑移方向与滑移面法向的矩阵张量积。

在唯象粘塑性定律 (Phenomenological Viscoplastic Power Law)^[20] 本构关系中, 剪切速率可表示为:

$$\dot{\gamma}^{\alpha} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{|\tau^{\alpha} - \omega^{\alpha}|}{S^{\alpha}} \right)^m \text{sign}(\tau^{\alpha} - \omega^{\alpha}) \quad (2)$$

其中, $\dot{\gamma}_0$ 为初始剪切速率; τ^{α} 为滑移分切应力; ω^{α} 为背应力; S^{α} 为滑移阻力, 也称临界分切应力 (critical resolved shear stress, CRSS); m 为应变率敏感系数。

CRSS 值大小可由临界分切应力变化率 S'^{α} 表示:

$$S'^{\alpha} = \sum_{\beta} H_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{\beta}| = \sum_{\beta} q_{\alpha\beta} h_0 \left(1 - \frac{S^{\beta}}{S_s^{\beta}} \right)^a |\dot{\gamma}^{\beta}| \quad (3)$$

其中, $H_{\alpha\beta}$ 为硬化模量, $q_{\alpha\beta}$ 为不同滑移系之间的硬化系数, 常取 1; h_0 为初始硬化模量; S_s^{β} 为滑移系饱和分切应力; S^{β} 为滑移系启动阻力; $\dot{\gamma}^{\beta}$ 为 β 滑移系的剪切速率; a 为硬化指数。

1.2 晶体塑性模拟参数的确定和验证

针对轧制退火和 β 退火的 Ti-6Al-4V 钛合金, Kasemer 等^[21] 根据单轴拉伸试验, 确定了不同组织形态钛合金的宏观屈服强度及延展性。进一步根据试验数据建立了 β 退火态片层组织晶体塑性有限元

模型,探究 β 退火 Ti-6Al-4V 钛合金微观组织形态对屈服强度和延展性影响。然而,关于 α 、 β 相体积分数和晶粒尺寸对轧制退火 Ti-6Al-4V 钛合金性能的影响并未研究。因此,笔者根据 Kasemer 等^[21]提供的轧制退火 Ti-6Al-4V 合金拉伸应力应变曲线及相关材料信息,采用相同的晶体塑性有限元本构参数进行模拟,进一步探究 α 、 β 相体积分数和晶粒尺寸对轧制退火 Ti-6Al-4V 钛合金性能和变形机理的影响。

图 1(a)为基于初始材料信息建立的双相多晶体模型,RVE 模型采用 Dream3D^[22] 开源软件生成,其中蓝色代表 α 相,晶粒尺寸约为 10 μm ,体积分数

为 92%,红色代表 β 相,晶粒尺寸约为 5 μm ,体积分数为 8%,晶粒取向随机生成,整体模型大小采用 64×64×64 单元,大约含 180 个晶粒。晶体塑性模拟所用参数^[21]见表 1,其中 α 相 HCP 晶体考虑了基面 $\langle a \rangle$ 型滑移系、柱面 $\langle a \rangle$ 型滑移系和锥面 $\langle c+a \rangle$ 型滑移系, β 相 BCC 晶体考虑了 $\{110\}\langle 111 \rangle$ 滑移系。设置 α 及 β 相弹性常数^[21]见表 2。图 1(b)同时给出了单轴拉伸模拟结果与试验结果曲线。显然在原有晶体塑性参数下,红色模拟曲线与文献中轧制退火态 Ti-6Al-4V 钛合金拉伸试验数据重合度高,验证了基于本计算框架模拟的可行性和 Dream3D 创建 RVE 模型的可靠性,为后续模拟工作奠定基础。

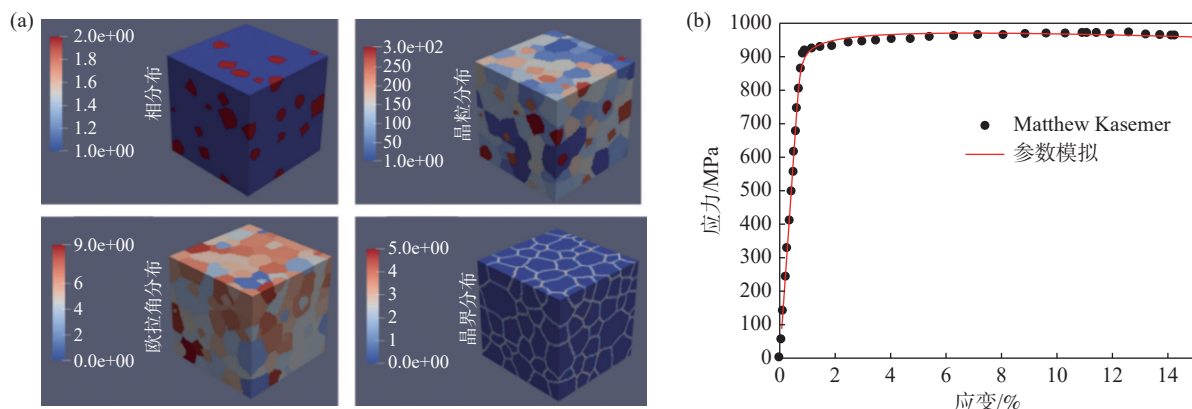


图 1 (a)Dream3D 微观结构中相、晶粒、欧拉角、晶界分布; (b) 单轴拉伸模拟与试验应力应变对比

Fig. 1 (a) Phase, grain, Euler Angle and grain boundary distribution in Dream3D microstructure, (b) stress-strain comparison between uniaxial tensile simulation and experiment

表 1 Ti-6Al-4V 晶体塑性参数^[21]

Table 1 Crystal plastic parameters of Ti-6Al-4V^[21]

滑移系	τ_0/MPa	m	$\dot{\gamma}_0/\text{s}^{-1}$	h_0/MPa	a
基面 $\langle a \rangle$	390	0.01	1.0	190	50
柱面 $\langle a \rangle$	390	0.01	1.0	190	50
锥面 $\langle c+a \rangle$	663	0.01	1.0	190	50
$\beta\{110\}\langle 111 \rangle$	390	0.01	1.0	190	50

表 2 α 和 β 相单晶弹性常数^[21]

Table 2 Elastic constants of single crystal α and β phase^[21]

相	C11/GPa	C12/GPa	C13/GPa	C44/GPa
α	169.66	88.66	61.66	42.5
β	133.10	95.10		42.7

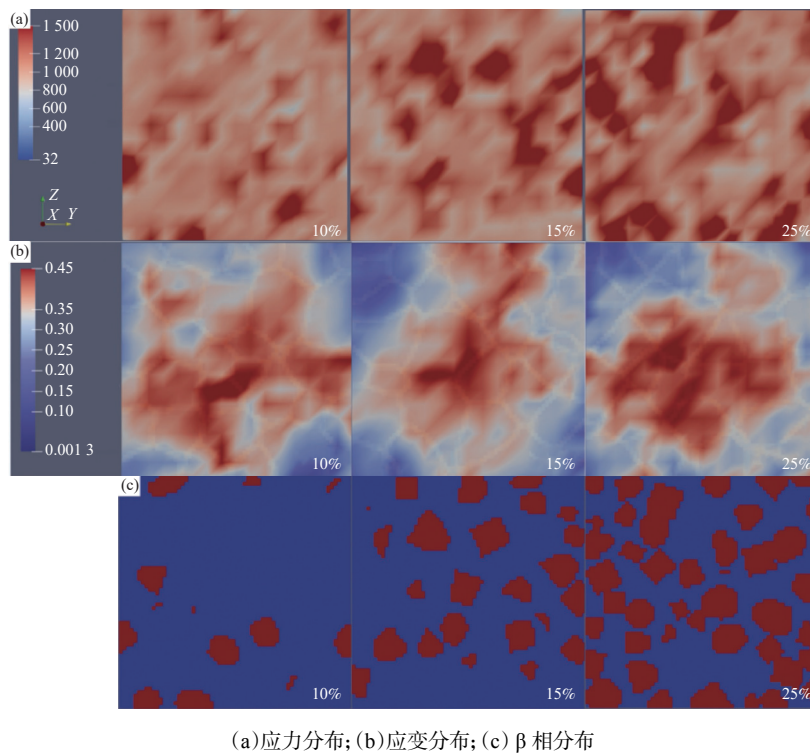
2 计算结果比较与讨论

2.1 β 相体积分数的影响

研究表明,通过固溶和固溶时效处理可改变 Ti-6Al-4V 合金中等轴 α 组织和 β 相基体转变组织的

数量,从而影响钛合金材料的抗拉强度、屈服强度、断裂韧性及抵抗裂纹扩展能力等^[23]。本节构建 4 种不同 β 相体积分数的两相 RVE 模型,分析两相体积分数变化对其性能的影响。图 2 从左至右分别表示 10%、15% 和 25% β 相体积分数下拉伸 15% 后的应力应变云图,晶界分布和相分布。

从图 2(a)中可看出整体应力分布呈现出明显不均匀现象,应力多集中在 β 相变体晶粒上及晶界处,且随 β 相含量升高,应力集中区域变得更多,分布更扩散。从图 2(b)中可看出应变主要集中在 α 相晶粒附近,且随 β 相含量升高,在三叉晶界处越容易产生应变集中。因为在相同变形条件下 β 相晶粒屈服点比 α 相高,而 α 相内滑移系优先激活,导致 α 晶粒区域应变集中现象产生,且室温下晶界强晶粒弱,晶粒内部易发生滑移,而晶界会阻碍晶粒内部滑移,产生位错累积,阻碍应力应变的传递分配,致使 α 及 β 相晶粒之间应力应变分布不一致^[24-25]。



(a)应力分布; (b)应变分布; (c) β 相分布
图 2 不同 β 相体积分数下拉伸模拟结果

Fig. 2 Tensile simulation results with different β -phase volume fractions

25% β 相含量下拉伸 15% 应变后的颈缩变形情况如图 3 所示。不同 β 相体积分数下拉伸变形大致相同, 仅颈缩收缩程度有细微差别, 都在颈缩区域几何表面呈现出“橘皮状”不均匀变形, 且从拉伸方向看, 近表面区域形状变形扭曲程度比内部要大。“橘皮状”表面的形成是拉伸过程中晶粒在空间中发生转动, 较有利取向的晶粒受周围晶粒约束较小, 各晶粒产生变形差异, 且不易传递到相邻晶粒, 同时晶粒中心区滑移量大于边缘区(晶界附近区域), 致使两者滑移台阶高低不同, 造成宏观上不均匀现象, 且晶粒越粗大橘皮组织越严重^[26]。

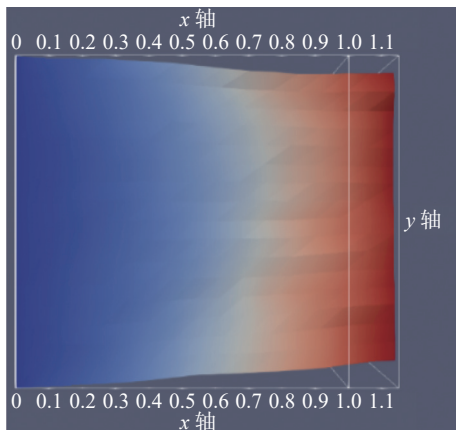


图 3 25% β 相含量下拉伸 15% 应变后变形情况

Fig. 3 Deformation of 15% strain at 25% β -phase volume fraction

不同 β 相体积分数下模拟所得拉伸应力应变曲线如图 4 所示。在不同 β 相含量下, 尽管两相模量设置不同, 但曲线在弹性阶段几乎没有差别, 塑性阶段应力会随着 β 相含量的增加而增加, 塑性阶段加工硬化率低, 变化不明显。李学雄等^[25] 和唐斌等^[27] 对 $\alpha+\beta$ 双相钛合金的拉伸行为进行晶体塑性模拟研究, 结果同样表明微观组织的变化对弹性段几乎没影响。据前述分析知, 在 β 相晶粒区域会发生应力集中, 而 β 相含量增加意味着 β 相晶粒及界面增多, 局部应力集中现象更显著, 造成塑性变形阶段应力值随着 β 相体积分数升高而不断增加。

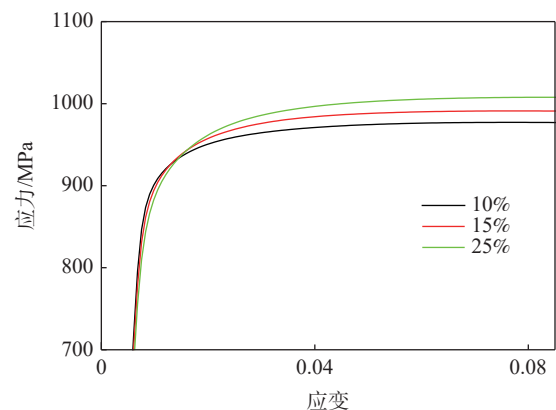
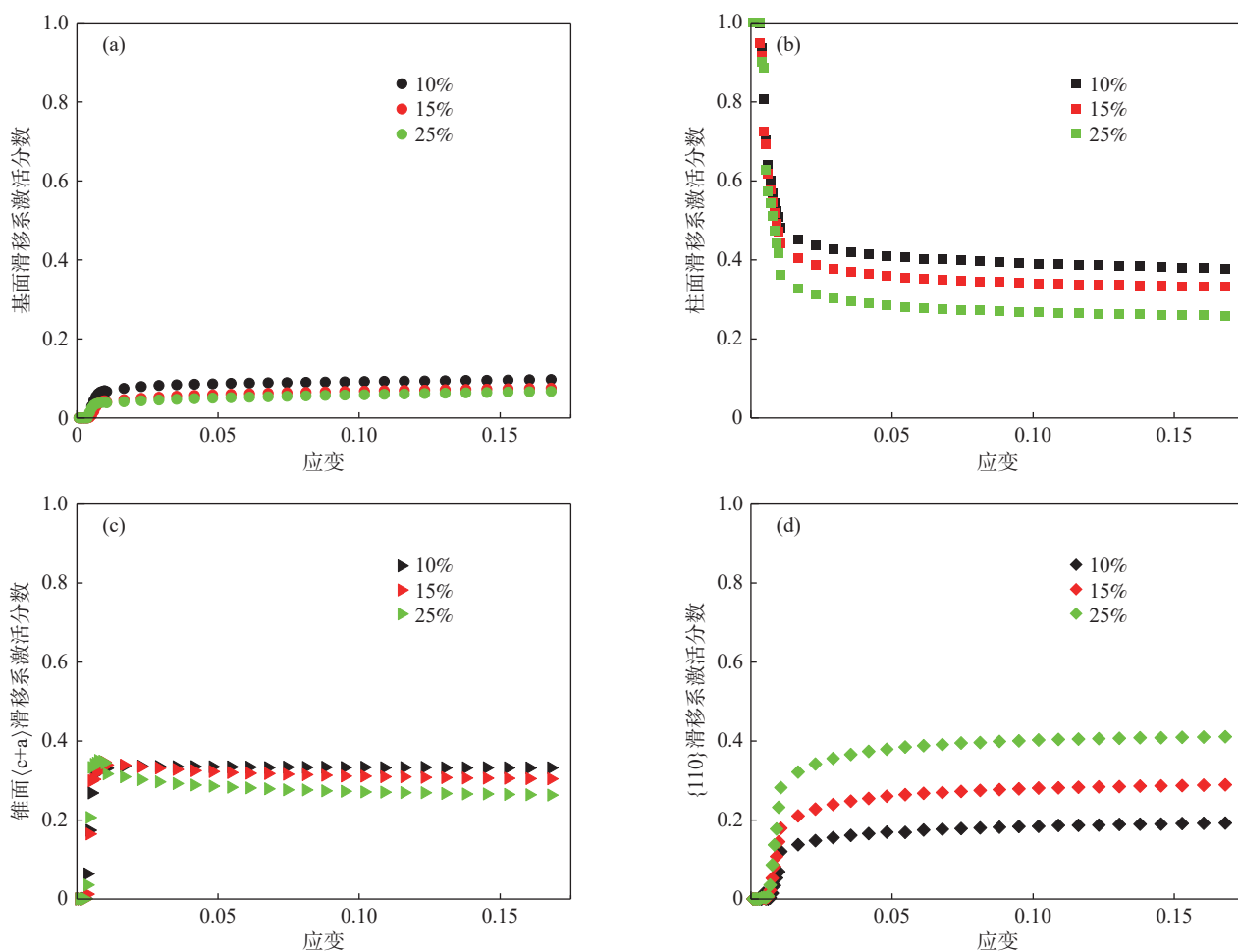


图 4 不同 β 相体积分数下应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves with different β -phase volume fractions

为深入探究变形过程中 β 相含量对不同滑移系激活比例的影响,图5作出了各滑移系激活相对分

数。 β 相中 $\{110\}$ 滑移系的CRSS值与 α 相中柱面及基面滑移系CRSS值相同。



(a)基面滑移; (b)柱面滑移; (c)锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移; (d) $\{110\}$ 滑移

图5 不同 β 相体积分数下滑移活性分析

Fig. 5 Slip activity analysis under different β -phase volume fractions

对比不同滑移系相对分数可以看出, α 相中柱面滑移系最先激活,随后 β 相中 $\{110\}$ 滑移系激活,并随着应变的增加,柱面滑移占据主导地位,柱面滑移系的相对分数先迅速下降而后缓慢下降, β 相中 $\{110\}$ 滑移系的相对分数先迅速增加而后缓慢增加。尽管 β 相含量远低于 α 相,但是 β 相含量的变化会对 α 相中不同滑移系的相对分数产生显著影响。随着 β 相含量的增加, α 相内的基面、柱面、锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系激活量下降, β 相中 $\{110\}$ 滑移系的相对贡献增加。25% β 相体积分数下, $\{110\}$ 滑移系的相对分数接近0.4,超过柱面和锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系的相对分数。因此, β 相基体一定程度上会产生滑移阻力效用阻碍 α 相内晶粒产生滑移,进而在 α/β 相区域形成应力应变集中现象。

2.2 α 相晶粒尺寸的影响

图6给出了 α 相晶粒尺寸为10、20、40 μm 时

的拉伸应力应变曲线。从图6可以看出,随着 α 相晶粒尺寸变大,应力应变曲线下降,塑性阶段硬化率几乎不变。

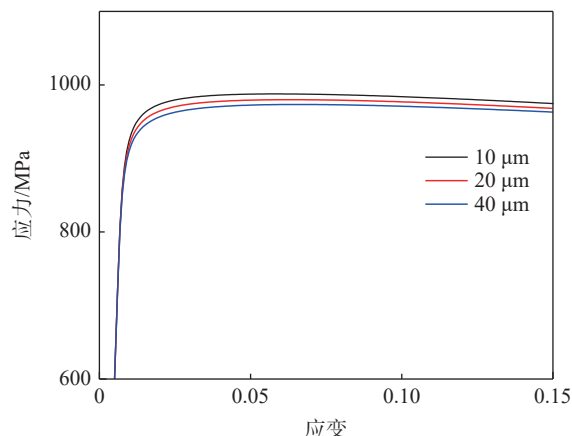
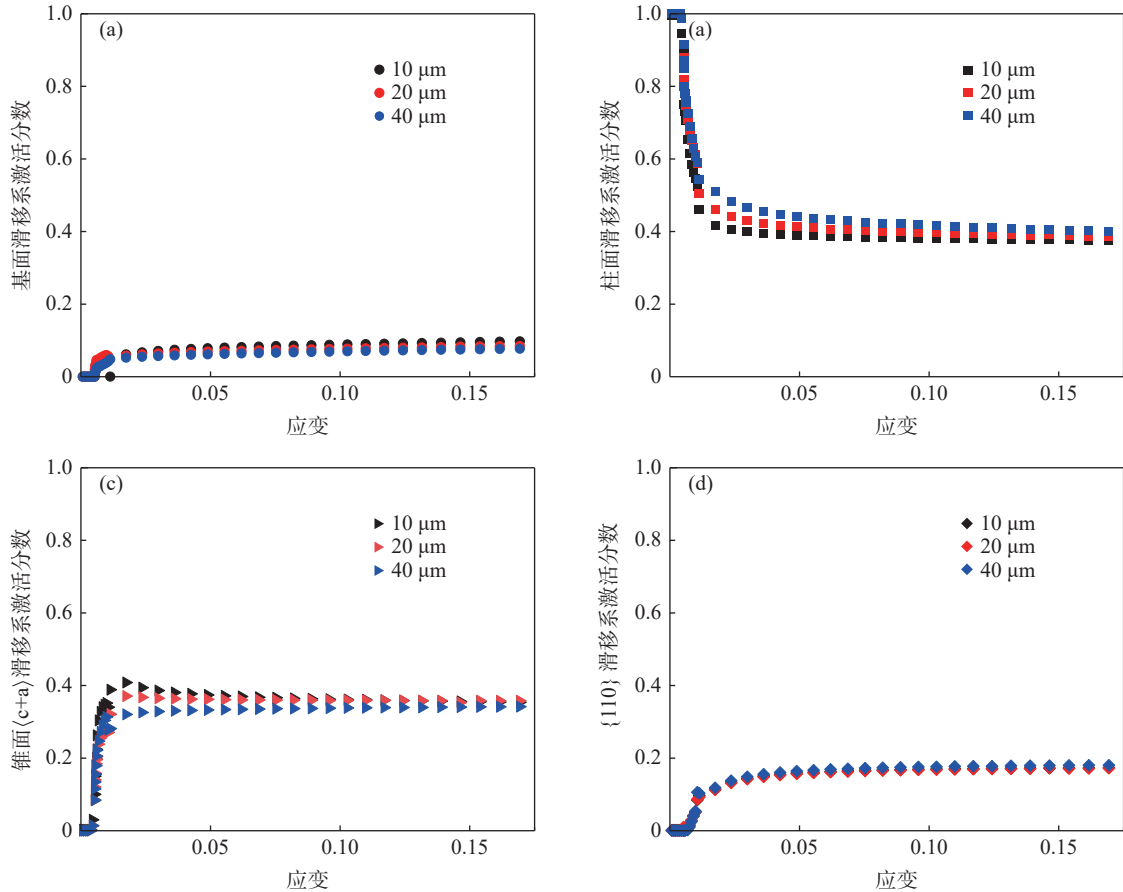


图6 不同 α 相晶粒尺寸下应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves for different α -phase grain sizes

图7给出了 α 相晶粒尺寸为10、20、40 μm 时拉伸变形过程中不同滑移系的相对分数变化。从图7可以看出,初始变形由柱面滑移主导,2%应变后锥面 $\langle c+a \rangle$ 对滑移贡献接近柱面滑移,而基面滑移和 $\{110\}$ 滑移激活相对分数较低。随着 α 相晶粒尺寸增加,图7(b)中柱面滑移激活相对分数增加,

图7(a)及(c)中基面和锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移激活相对分数降低,而图7(d)中 $\{110\}$ 滑移系激活量几乎无变化。随着 α 相晶粒尺寸增加,尽管柱面滑移系激活比例增加,由于锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系临界分切应力明显高于柱面滑移系,锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系相对分数下降会导致塑性阶段应力值降低。



(a)基面滑移; (b)柱面滑移; (c)锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移; (d) $\{110\}$ 滑移

图7 不同 α 相晶粒尺寸下滑移活性分析

Fig. 7 Slip activity analysis under different α -phase grain sizes

2.3 β 相晶粒尺寸的影响

图8给出了 β 相晶粒尺寸为5、10、20 μm 时的拉伸应力应变曲线。从图8可以看出,随着 β 相晶粒尺寸增加,应力应变曲线下降。

图9给出了 β 相变体晶粒尺寸为5、10、20 μm 时拉伸变形中基面、柱面、锥面 $\langle c+a \rangle$ 和 $\{110\}$ 滑移系的激活贡献比例。初始变形主要由柱面滑移主导,2%应变后锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系相对分数接近0.4,基面滑移系对变形整体贡献比例最低。随着 β 相晶粒尺寸的增大,基面、柱面和锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系的相对分数变化不大,而 $\{110\}$ 滑移系相对贡献呈明显下降趋势。因此,随 β 相晶粒尺寸的增加,塑性阶段应力的降低与 β 相中 $\{110\}$ 滑移系激活相对分数下降有关。

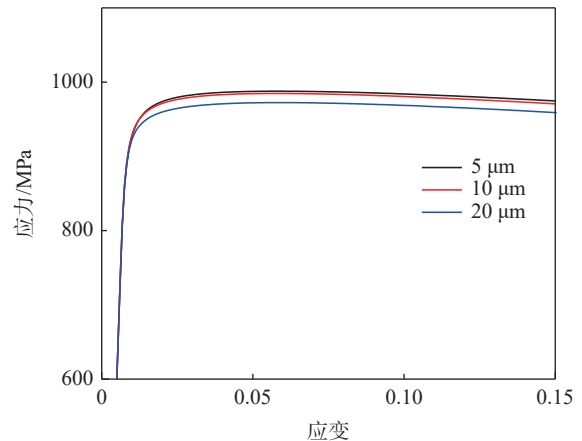


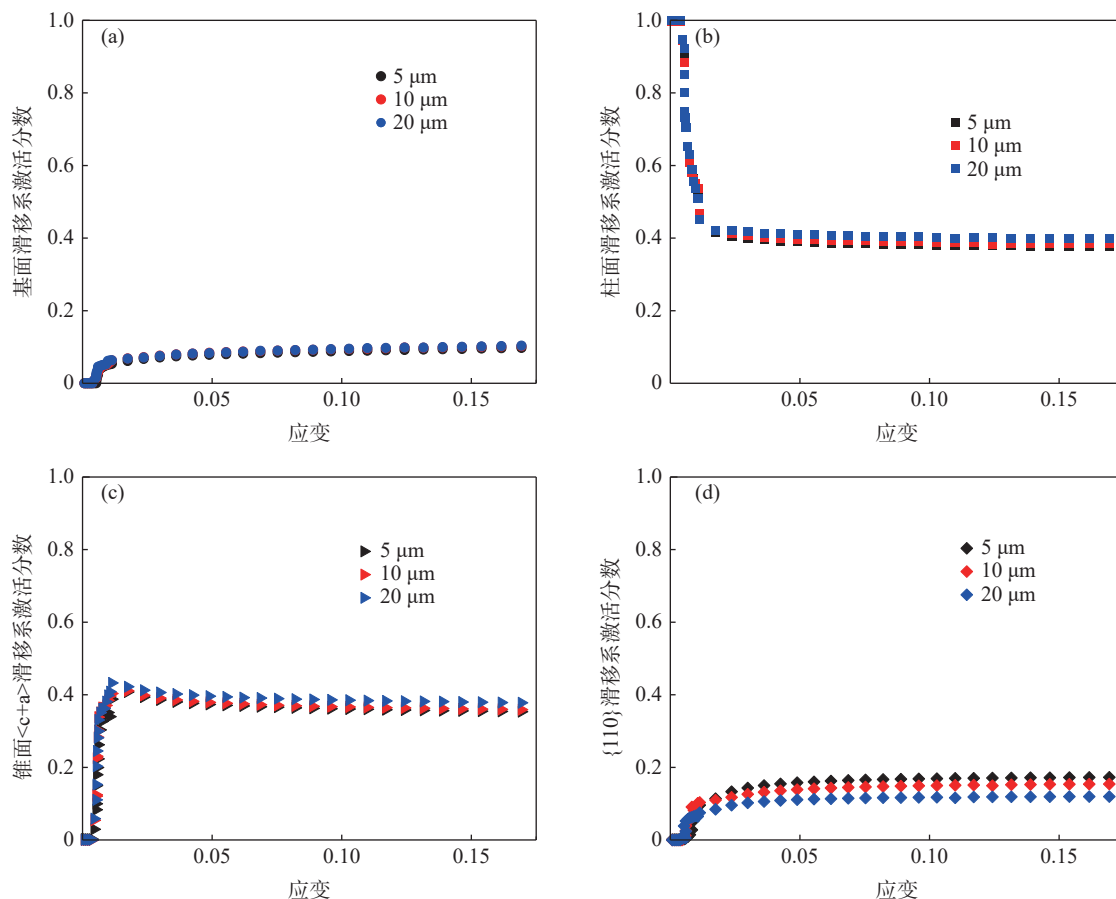
图8 不同 β 相晶粒尺寸下应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves for different β -phase grain sizes

2.4 α 及 β 相晶粒尺寸的影响

图 10 给出了 α 相晶粒尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 及 β 晶粒尺寸为 $5\ \mu\text{m}$ 、 α 相晶粒尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 及 β 晶粒尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 、 α 相晶粒尺寸为 $40\ \mu\text{m}$ 及 β 晶粒尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 时的应力应变曲线, 为方便表达, 使用 D_α 和

D_β 表示两相晶粒尺寸。从中可以看出, 同时增大 α 及 β 相晶粒尺寸后, 应力应变曲线显著下降。与图 6 和图 8 相对比, 同时增大 α 和 β 相晶粒尺寸导致的应力下降值略高于仅增大单相晶粒尺寸。



(a) 基面滑移; (b) 柱面滑移; (c) 锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移; (d) $\{110\}$ 滑移

图 9 不同 β 相晶粒尺寸下滑移活性分析

Fig. 9 Slip activity analysis under different β -phase grain sizes

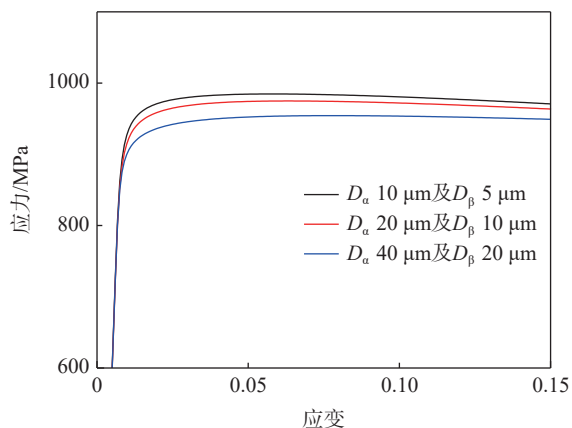
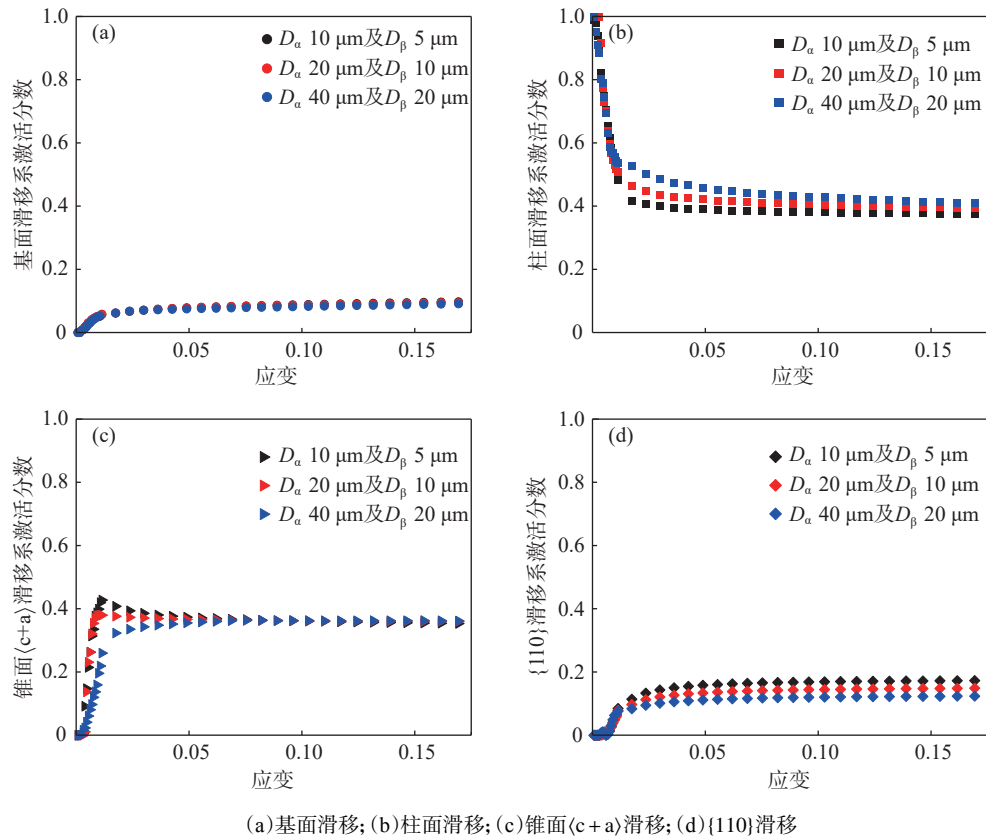
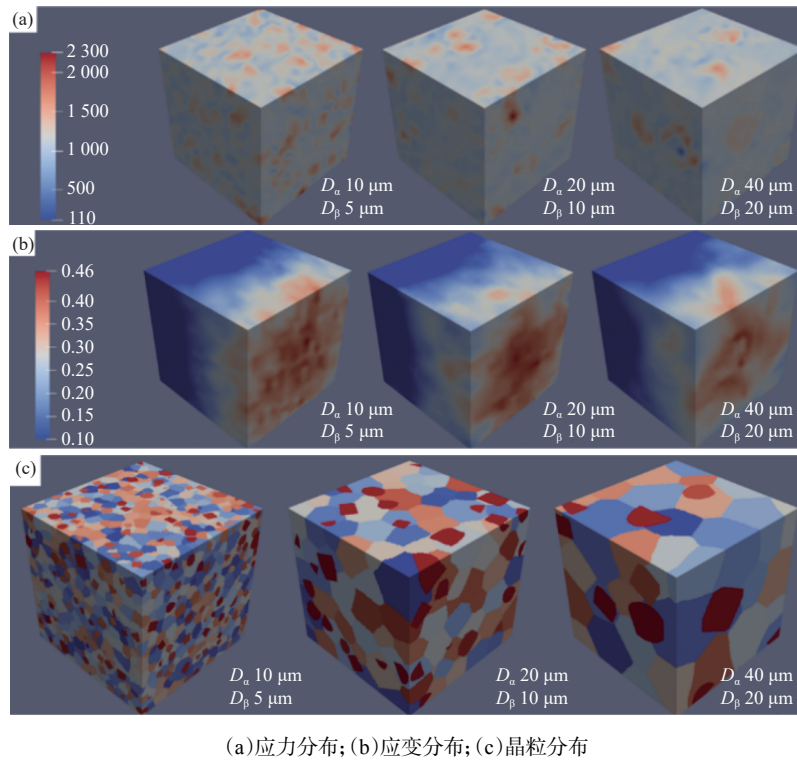


图 10 不同 α 及 β 相晶粒尺寸下应力应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves for different grain sizes of α and β phases

图 11 给出了 D_α 为 $10\ \mu\text{m}$ 及 D_β 为 $5\ \mu\text{m}$ 、 D_α 为 $20\ \mu\text{m}$ 及 D_β 为 $10\ \mu\text{m}$ 、 D_α 为 $40\ \mu\text{m}$ 及 D_β 为 $20\ \mu\text{m}$ 时拉伸变形过程中各滑移系激活相对分数。初始变形依然由柱面滑移系主导, 2% 应变后锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系对变形的贡献比例增加, 逐渐接近于柱面滑移系。同时增大 α 及 β 相晶粒尺寸时, 主要影响柱面滑移系和 $\{110\}$ 滑移系的激活贡献。图 12 为不同 α 及 β 晶粒尺寸下拉伸模拟得到的应力应变云图、晶粒分布结果。从中可以看出, 同时增加 α 相和 β 相晶粒尺寸, 会使得相同模型尺寸下, α/β 相晶粒和 α/β 相界面数量急剧下降, 界面对位错滑移的阻碍作用下降, 应力应变集中现象变得不明显, 从而导致模型整体的应力应变曲线下下降更显著。

图 11 不同 α 和 β 尺寸下滑移活性分析Fig. 11 Slip activity analysis under different grain sizes of α and β phases图 12 不同 α 及 β 相晶粒尺寸下拉伸模拟结果Fig. 12 Distributions of stress and strain under different grain sizes of α and β phase

3 结论

研究了不同 α/β 相体积分数及晶粒尺寸大小对塑性变形行为和力学性能的影响,揭示了不同组织特征影响下 Ti-6Al-4V 钛合金拉伸变形机制,通过滑移相对分数定量化评估不同滑移系对变形的贡献,主要结论如下:

1) Ti-6Al-4V 钛合金拉伸变形过程中应力应变分布不均匀,应力集中在 β 相变体晶粒及晶界处,应变集中在 α 相晶粒附近。随着 β 相含量升高,应力集中区域更多,三叉晶界处越易发生应变集中, β 相{110}滑移系对变形贡献大幅提高,而 α 相内滑移系激活比例下降。

2) 随着 α 相、 β 相或两相晶粒尺寸同时增大,会造成塑性变形阶段的应力应变曲线有不同程度下降,且初始变形都主要由柱面滑移系主导,2%应变后锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系激活相对分数接近柱面滑移系。

3) 随着 α 相晶粒尺寸增大,锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移系活性下降会导致塑性阶段应力值降低。随着 β 相晶粒尺寸增大,塑性阶段应力的降低与 β 相中{110}滑移系活性下降有关。同时增大 α 及 β 相晶粒尺寸时,主要会影响柱面滑移系和{110}滑移系的相对分数, α 和 β 相界面数量的显著下降导致应力下降更明显。

参考文献

- [1] Chen Wei, Liu Yunxi, Li Zhiqiang. Research status and development trends of high strength β -titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 63-76.
(陈玮, 刘运玺, 李志强. 高强 β 钛合金的研究现状与发展趋势[J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 63-76.)
- [2] Liu Yuzhou, Duan Xiaohui, Yang Yaming, *et al.* Effect of different microstructure types on mechanical properties of TC11 Ti-alloy[J]. Forging and Metalforming, 2023(15): 59-61.
(刘宇舟, 段晓辉, 杨亚明, 等. 不同显微组织类型对 TC11 钛合金饼材力学性能的影响[J]. 锻造与冲压, 2023(15): 59-61.)
- [3] Moore J A, Barton N R, Florando J, *et al.* Crystal plasticity modeling of β phase deformation in Ti-6Al-4V[J]. Modelling and Simulation in Materials Science Engineering, 2017, 25(7): 075007.
- [4] Li Jinyuan, Zhang Zhi, Hou Peng, *et al.* Effect of heat treatment process on the structure and properties of large TC4 titanium alloy bar[J]. Special Steel Technology, 2018, 24(1): 22-24, 29
(李进元, 张智, 侯鹏, 等. 热处理工艺对 TC4 钛合金大规格棒材组织及性能的影响[J]. 特钢技术, 2018, 24(1): 22-24, 29.)
- [5] Gao Yuhao, Zhang Xianfeng, Liu Xilin, *et al.* The fatigue contrast test on TC4ELI titanium alloy secondary annealed[J]. Development and Application of Material, 2018, 33(5): 20-27.
(高宇昊, 张先锋, 刘希林, 等. TC4ELI 钛合金二次退火后的疲劳对比试验[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(5): 20-27.)
- [6] Lei Wenguang, Mao Xiaonan, Lu Yafeng. Effects of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(9): 102-105.
(雷文光, 毛小南, 卢亚锋. 热处理工艺对 TC4-DT 钛合金厚板组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(9): 102-105.)
- [7] Zhang Mingyu, Yun Xinbing, Fu Hongwang. Effect of different heat treatment processes on microstructure and properties of TC10 titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(12): 237-245.
(张明玉, 运新兵, 伏洪旺. 不同热处理工艺对 TC10 钛合金组织及性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(12): 237-245.)
- [8] Qi Yunlian, Du Yu, Liu Wei, *et al.* Study on microstructure and properties of high aluminum dual phase steel 980DH with high formability[J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(5): 31-33.
(戚运莲, 杜宇, 刘伟, 等. 热处理温度对 TC10 钛合金棒材组织与性能的影响[J]. 钛工业进展, 2011, 28(5): 31-33.)
- [9] Yun Pengfei, Yang Pei, Liu Dazhe, *et al.* Effects of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of TC11 titanium alloy forging[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(12): 210-212.
(负鹏飞, 杨佩, 刘大喆, 等. 热处理工艺对 TC11 锻件显微组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(12): 210-212.)
- [10] Zhai Dajun, Shui Yue, Yuan Man, *et al.* Effects of content and morphology of α phase on microstructure and mechanical properties of TC4 allo[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(10): 129-134.

- (翟大军, 税玥, 袁满, 等. α 相含量及形态对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(10): 129-134.)
- [11] Mao Jianghong, Yang Xiaokang, Luo Binli, *et al.* Effect of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of TC4ELI alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(2): 166-174.
(毛江虹, 杨晓康, 罗斌莉, 等. 热处理温度对 TC4ELI 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(2): 166-174.)
- [12] Nayan N, Singh G, Prabhu T A, *et al.* Cryogenic mechanical properties of warm multi-pass caliber-rolled fine-grained titanium alloys: Ti-6Al-4V (normal and ELI grades) and VT14[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(1): 128-146.
- [13] Tong Xiaole, Zhang Mingyu, Yu Chengquan, *et al.* Microstructure and properties of TC4 titanium alloy sheets with different rolling thicknesses[J]. Forging and Stamping Technology, 2022, 47(6): 153-159.
(同晓乐, 张明玉, 于成泉, 等. 不同轧制厚度 TC4 钛合金板材的组织与性能[J]. 锻压技术, 2022, 47(6): 153-159.)
- [14] Dong Xiaofeng, Zhang Mingyu, Zhou Jiangshan, *et al.* Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 ELI titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(24): 142-146.
(董晓峰, 张明玉, 周江山, 等. 热处理对 TC4 ELI 钛合金显微组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24): 142-146.)
- [15] Guo Ping, Zhao Yongqing, Zeng Weidong, *et al.* The effect of microstructure on the mechanical properties of TC4-DT titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 563: 106-111.
- [16] Wang Wenjie. Effect of quasi-beta heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(1): 23-27.
(王文杰. 准 β 热处理工艺对 TC4-DT 钛合金组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(1): 23-27.)
- [17] Li Xuexiong, Xu Dongsheng, Yang Rui, *et al.* CPFEM study of high temperature tensile behavior of duplex titanium alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(4): 241-253.
(李学雄, 徐东生, 杨锐, 等. 钛合金双态组织高温拉伸行为的晶体塑性有限元研究[J]. 材料研究学报, 2019, 33(4): 241-253.)
- [18] Yaghoobi M, Ganesan S, Sundar S, *et al.* PRISMS-plasticity: An open-source crystal plasticity finite element software[J]. Computational Materials Science, 2019, 169: 109078.
- [19] Asaro R J, Rice J R. Strain localization in ductile single crystals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1977, 25(5): 309-338.
- [20] Kalidindi S R. Incorporation of deformation twinning in crystal plasticity models[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(2): 267-290.
- [21] Kasemer M, Quey R, Dawson P. The influence of mechanical constraints introduced by β annealed microstructures on the yield strength and ductility of Ti-6Al-4V[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 103: 179-198.
- [22] Groeber M A, Jackson M A. DREAM 3D: A digital representation environment for the analysis of microstructure in 3D[J]. Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 2014, 3(1): 56-72.
- [23] Wan Mingpan, Wu Yujiao, Sun Jie, *et al.* Effect of solution temperature on microstructure and mechanical properties of TC4ELI titanium alloy[J]. Material and Heat Treatment, 2012, 41(20): 145-147.
(万明攀, 伍玉娇, 孙捷, 等. 固溶温度对 TC4ELI 钛合金组织和性能的影响[J]. 热处理技术, 2012, 41(20): 145-147.)
- [24] Mayeur J R, McDowell D L. A three-dimensional crystal plasticity model for duplex Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23: 1457-1485.
- [25] Li Xuexiong, Xu Dongsheng, Yang Rui. Crystal plasticity finite element method investigation of the high temperature deformation consistency in dual-phase titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(7): 928-938.
(李学雄, 徐东生, 杨锐. 双相钛合金高温变形协调性的 CPFEM 研究[J]. 金属学报, 2019, 55(7): 928-938.)
- [26] Ma Mingtu, Yang Hongya, Wu Emei, *et al.* Research progress of the cause for orange peel of aluminum alloy sheet during tensile deformation[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(1): 4-13.
(马鸣图, 杨红亚, 吴娥梅, 等. 铝合金板材拉伸变形时橘皮成因的研究进展[J]. 中国工程科学, 2014, 16(1): 4-13.)
- [27] Tang Bin, Xie Shao, Liu Yi, *et al.* Crystal plasticity finite element study of incompatible deformation behavior in two phase microstructure in near β titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(3): 532-537.
(唐斌, 谢韶, 刘毅, 等. 近 β 钛合金中两相组织不协调变形行为的晶体塑性有限元研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3): 532-537.)