

TWIP 钢的动态力学性能及变形机制研究

冯新畅, 刘希月, 唐宇, 白书欣, 朱利安

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用 Zwick/Roell Z100 万能材料试验机和 Hopkinson 拉杆对 TWIP 钢进行了准静态及动态力学性能的研究。基于力学实验结果, 修正了 Johnson-Cook 动态本构模型中应变硬化项以及应变强化项。采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)技术对 TWIP 钢拉伸变形前后的组织进行了观察与分析。结果表明: TWIP 钢在准静态加载下表现为负应变率敏感性, 动态加载时表现为正应变率敏感性。拉伸过程中, 孪生诱发塑性是 TWIP 钢的主要变形机制, 同时滑移也起到重要作用; 动态加载下 TWIP 钢中形变孪晶的起始应变和孪晶体积分数均小于准静态加载过程; 形变孪晶的生成以及孪晶相互作用导致的晶粒细化, 使 TWIP 钢兼具高强度、高塑性及高动态吸能性能, 在抗冲击、抗爆领域具有广泛的应用前景。

关键词: TWIP 钢; 动态力学性能; 变形机制; 形变孪晶; 动态本构模型

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)05-1695-13

孪生诱发塑性钢(twinning induced plasticity, TWIP), 强塑性可高达 50 000 MPa%, 是传统低碳钢的 4 到 5 倍^[1]。在保证其他各项性能的同时, TWIP 钢兼具成本低、轻质、高强度(900~1600 MPa)、高塑性等优点, 可以极大衰减碰撞过程中产生的冲击波, 并对撞击碎片具有良好的拦截能力。目前, TWIP 钢主要应用在汽车挡板、保险杠加强体等抗撞击部件^[2]。基于 TWIP 钢轻质高强、高动态吸能等特点, 使其有望应用于大型洞库、导弹发射井等战略目标防爆设施, 满足轻质高效的防护需求。

目前国内外关于 TWIP 钢的研究较为丰富, 但主要关注其在准静态加载时的力学性能。当汽车发生碰撞或结构发生爆炸时, 材料的变形速率可高达 10^3 s^{-1} ^[3], 因此还应关注 TWIP 钢在动态加载时的力学行为及变形过程中组织结构的微观演变。本实验利用 Zwick/Roell Z100 万能材料试验机和 Hopkinson 拉杆对 TWIP 钢进行不同应变率下力学性能的研究。优化 Johnson-Cook (J-C) 方程中的相关参数, 获得 TWIP 钢动态本构模型。同时对准静态 ($10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 及动态加载下 ($1000 \sim 6500 \text{ s}^{-1}$) 材料的微观变形机制进行系统分析, 为 TWIP 钢的进一步研究设计及其在抗冲击、防爆领域的应用提供理论依据。

1 实验

设计和加工制作 TWIP 钢和 Q345 钢 (作为对照) 2 种钢材型号的试样进行准静态及动态拉伸测试。2 种钢材的成分如表 1 和表 2 所示。

收稿日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (5217083298)

作者简介: 冯新畅, 女, 1998 年生, 硕士, 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073, E-mail: fengxinchang21@nudt.edu.cn

TWIP 钢的准静态拉伸实验(应变率 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} s^{-1}) 在 Zwick/Roell Z100 万能材料试验机上完成。采用线切割切取拉伸试样, 试样为长 200 mm, 宽 30 mm, 厚 2 mm, 平行段长 30 mm 宽 10 mm 的哑铃型拉伸试样, 试样详细尺寸及实物图如图 1a、1c 所示。室温动态拉伸实验在 Hopkinson 拉杆装置上进行, 应变率分别为 1000、3000、5000 及 6500 s^{-1} 。由于板状试样测试时需要采用胶粘连接方式, 胶水固化时间长且容易发生脱胶现象, 故将动态拉伸试样设计为圆棒型。试样总长为 38 mm, 平行段长 4 mm, 加持端采用标准螺纹头, 加持长度为 15 mm, 动态拉伸试样尺寸及实物图如图 1b、1d 所示。Q345 钢分别以 10^{-3} 、1000 和 5000 s^{-1} 的应变率进行拉伸测试, 试样尺寸与 TWIP 钢保持一

表 1 实验 TWIP 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of TWIP steel ($\omega/\%$)

Mn	C	Al	P	Si	Ti	Fe
18.400	0.480	1.420	0.015	0.090	0.096	Bal.

表 2 Q345 钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of Q345 steel ($\omega/\%$)

Mn	C	Al	P	Si	S	Fe
1.310	0.180	0.004	0.023	0.380	0.014	Bal.

致。每种拉伸测试需进行 3 次重复实验，至少保证 2 组有效数据。

为了比较准静态和动态加载过程中 TWIP 钢变形机制的差异，选取应变量为 15%、30%以及开始颈缩时进行准静态中断实验。对于动态拉伸实验，当应变率较高时，由于震动冲击影响较大，动态中断实验随机性较大，因此选取应变率为 1000 s⁻¹ 进行中断实验。由于该应变率下试样断裂延伸率仅为 16.5%，故选取应变率分别为 5%、10%以及 15%进行中断实验。

采用线切割在拉伸变形后试样的断口附近制取尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm 的样品，用于 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)分析。采用 400#~3000#的 SiC 砂纸依次对样品进行常规金相研磨用于 XRD 测试。常规金相研磨后对样品表面进行抛光获得平滑光亮的表面，再用 7% (体积分数) 的硝酸乙醇溶液对样品表面进行腐蚀用于 SEM 观察。用于 EBSD 观察的样品经过金相磨抛后，用 10%高氯酸乙醇溶液在 -10 °C 到 -20 °C 的条件下进行电解抛光。

2 结果与分析

2.1 力学性能

图 2a 和 2b 分别为 TWIP 钢在准静态和动态加载下拉伸变形前后的试样对比图。随着应变量的增加，

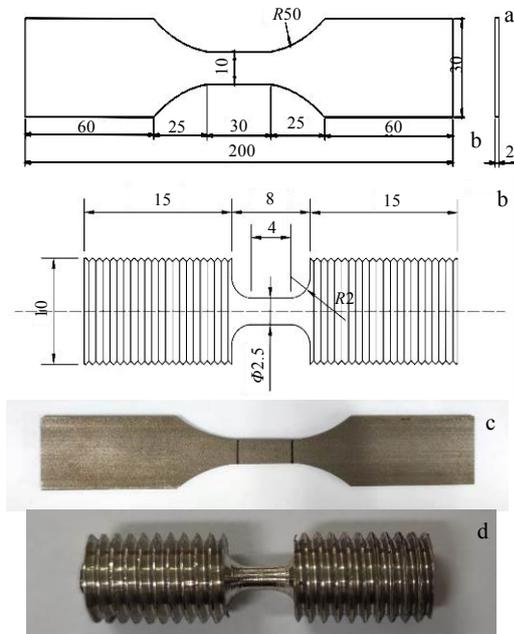


图 1 拉伸试样尺寸及实物图

Fig.1 Geometries (a, b) and photos (c, d) of specimens: (a, c) quasi-static tensile specimen and (b, d) dynamic tensile specimen

TWIP 钢在标距范围内发生了均匀的塑性变形，加持端的长度没有发生明显变化，并且断后试样几乎无颈缩现象。但是与图 2c 和 2d 对比，可以看出 Q345 钢断裂后标距段宽度变化不大，伸长率小于 TWIP 钢，并且颈缩现象比 TWIP 钢明显。

不同应变率下 TWIP 钢及 Q345 钢最接近平均水平的力学实验结果如表 3 和表 4 所示，并对实验结果做应力-应变曲线^[4]。不同应变率下 TWIP 钢和 Q345 钢的真实应力-应变曲线如图 3 所示，通过对比可以发现，在相同应变率下，TWIP 钢的抗拉强度、断裂延伸率以及均匀延伸率均大于 Q345 钢，具有较高的塑性和强度，并且 TWIP 钢的强塑积远远大于 Q345 钢，具有优异的动态吸能性能。在弹性阶段随着应变率的增加，TWIP 钢与 Q345 钢的弹性模量几乎没有发生变化。但是在塑性阶段，随着有应变率的增加，TWIP

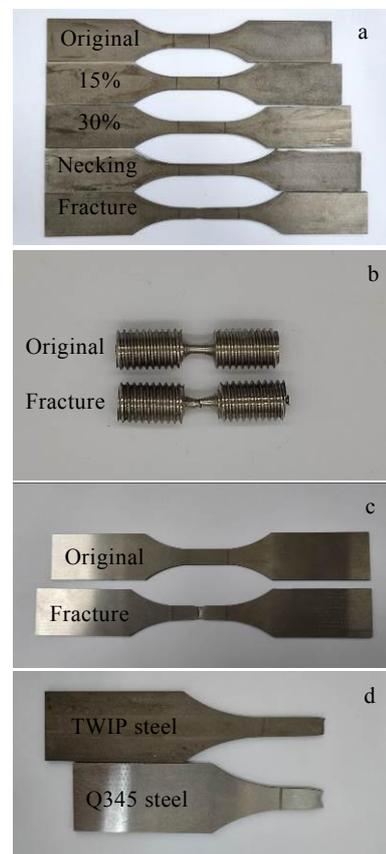


图 2 拉伸变形前后试样的宏观照片

Fig.2 Appearances of specimens before and after tensile deformation: (a) TWIP steel under quasi-static tensile deformation, (b) TWIP steel under dynamic tensile deformation, (c) Q345 steel under quasi-static tensile deformation, and (d) comparison of TWIP steel and Q345 steel after tensile fracture

表 3 TWIP 钢力学性能

Table 3 Mechanical properties of TWIP steel

Strain rate/ s ⁻¹	Yield strength, σ _s /MPa	Tensile strength, σ _b /MPa	Yield ratio, σ _s /σ _b	Uniform elongation, ε _b	Fracture elongation, ε _f	Product of strength and elongation/ MPa%
10 ⁻⁴	338	1355	0.25	0.47	0.48	65 040
10 ⁻³	342	1237	0.28	0.45	0.47	58 139
10 ⁻²	378	1161	0.36	0.43	0.45	52 245
1000	603	829	0.73	0.15	0.16	13 264
3000	589	855	0.69	0.21	0.31	26 505
5000	521	913	0.57	0.30	0.36	32 868
6500	659	1102	0.60	0.21	0.30	33 060

表 4 Q345 钢力学性能

Table 4 Mechanical properties of Q345 steel

Strain rate/ s ⁻¹	Yield strength, σ _s /MPa	Tensile strength, σ _b /MPa	Yield ratio, σ _s /σ _b	Uniform elongation, ε _b	Fracture elongation, ε _f	Product of strength and elongation/ MPa%
10 ⁻³	450	693	0.65	0.21	0.26	18 018
1000	506	538	0.94	0.08	0.18	9 684
5000	560	590	0.95	0.12	0.26	15 340

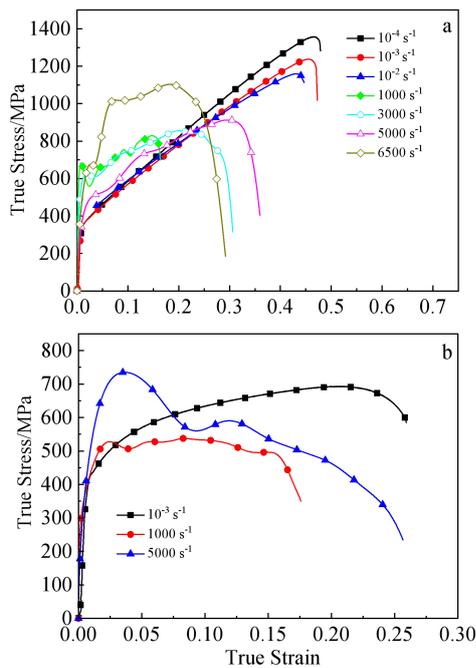


图 3 不同应变率下实验钢真实应力-应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of experimental steels at different strain rates: (a) TWIP steel and (b) Q345 steel

钢与 Q345 钢的屈服强度、抗拉强度以及伸长率等均发生显著变化, 可见应变率对 2 种实验钢的力学性能均具有显著影响^[5]。

图 4 展示了不同应变率下 TWIP 钢力学性能的变化趋势。由图 4a 可以看到, 当应变率处于准静态范围内(10⁻⁴~10⁻² s⁻¹), 随着应变率的增加, TWIP 钢的抗

拉强度逐渐降低; 而在动态加载下(1000~6500 s⁻¹), 随应变率的增加, 抗拉强度呈上升趋势。表明 TWIP 钢在准静态下表现为负的应变率敏感性(negative strain rate sensitivity, NSRS)^[6-8], 而在高应变率下表现为正的应变率敏感性(positive strain rate sensitivity, PSRS)^[9-10]。屈服强度随应变率增加的变化规律与抗拉强度不同, 在准静态范围内, 随着应变率的增加, 屈服强度呈上升趋势; 在动态加载下(1000~5000 s⁻¹), 随着应变率的增加, 屈服强度逐渐降低, 由应变率为 1000 s⁻¹ 时的 603 MPa 下降到应变率为 5000 s⁻¹ 时的 521 MPa; 而当应变率从 5000 s⁻¹ 增加到 6500 s⁻¹ 时, 屈服强度又迅速增加到 659 MPa。由此可见, 应变率 5000 s⁻¹ 是 TWIP 钢力学性能发生变化的转折点。实验 TWIP 钢的塑性指标可以由图 4b 获得, 随着应变率的增加, TWIP 钢断裂伸长率和均匀延伸率的变化趋势一致, 表现出良好的塑性。在准静态范围内, 随着应变率的增加, 断裂伸长率和均匀延伸率均逐渐减小, 而在 1000~5000 s⁻¹ 范围内逐渐增加。当应变率从 5000 s⁻¹ 增加到 6500 s⁻¹ 时, 断裂伸长率和均匀延伸率又开始下降。再次印证应变率 5000 s⁻¹ 是 TWIP 高强度钢力学性能发生变化的转折。

2.2 Johnson-Cook 模型构建

J-C 本构方程的具体形式如式(1) 所示:

$$\sigma = (A + B \epsilon^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, A 为参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 和参考温度 T_r 下材料的初始屈服应力, 即 $\sigma(\epsilon = 0, \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0, T = T_r)$ 时的值; B 和 n 分别为参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 和参考温度 T_r 下材料的应变硬化模量和硬化指数; C 为材料应变率强化参数;

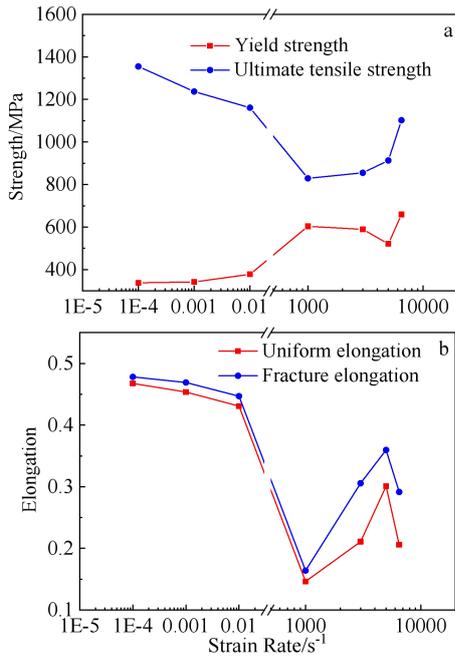


图 4 不同应变率下 TWIP 钢的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of TWIP steel under different strain rates: (a) strength and (b) elongation

m 为材料热软化参数; σ 为流动应力, ϵ 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}^*$ 为相对等效塑性应变率 ($\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率); $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T_r 为参考温度, 这里取为 293 K, T_m 为材料的熔点温度, T 为实验温度^[11]。方程(1)右边 3 项分别为应变硬化项、应变率强化项及温度软化项, 代表等效塑性应变, 应变率以及温度对流动应力的影响^[12]。

材料在准静态条件下的塑性变形过程可以认为是等温的^[5], 但是在高应变率的变形通常被认为是一种绝热或准绝热的过程, 会带来一定的温升。

绝热温升的计算公式如下:

$$\Delta T = \frac{h}{\rho C} \int \sigma d\epsilon \quad (2)$$

式中, σ 为真应变 ϵ 对应的真应力, $\int \sigma d\epsilon$ 为应力与应变曲线包围的积分面积, 即材料获得塑性功; ρ 是钢的密度, 取值为 7.8 g/cm³; $C=0.46$ kJ/(kg·K) 为 TWIP 钢的比热容, h 是塑性功与热能之间转变的系数, 一般取值为 0.9^[13]。

根据公式(2)以及真应力-应变曲线可以计算出 TWIP 钢在 1000、3000、5000 和 6500 s⁻¹ 应变率下对应的绝热温升 ΔT 值, 分别为 29、57、65 和 66 °C, 所有温升均小于 66 °C。相关研究表明当温度小于 200 °C^[14-15] 时, 可以忽略绝热温升对材料带来的影响。因此, 当应变率在 1000~6500 s⁻¹ 范围内, 钢的热软

化效应可以忽略, 以便简化分析^[14-16]。J-C 本构方程进一步简化为公式(3):

$$\sigma = (A + B \epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3)$$

式中, 参数 A 、 B 、 n 、 C 均可以通过实验结果获得。其中, A 为准静态拉伸实验的屈服应力, $A = \sigma_y = 350$ MPa。通过对公式(4)进行拟合可以确定参数 B 和 n , 其中 $B=1060$, $n=0.39$ 。

$$\sigma = (A + B \epsilon^n) \quad (4)$$

通过对不同应变率拉伸实验中各应变率对应的屈服应力进行拟合可以得到 C 值, 为 0.005。将得到的各个参数值代入公式(3)中, 便可以得到实验 TWIP 钢的 J-C 本构关系:

$$\sigma = (350 + 1060 \epsilon^{0.39})(1 + 0.005 \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (5)$$

J-C 模型拟合线 (红色) 与实验测试结果 (黑色) 之间的比较如图 5 所示, 可以明显地看出拟合效果较差, 无法通过拟合曲线获取 TWIP 钢真实的力学性能信息。通过对比拟合线与实验曲线, 可以发现 2 条曲线的斜率不一致。并且在不同应变率下, TWIP 钢的真应力-塑性应变曲线的斜率是不同的, 这说明 TWIP 钢的应变硬化与应变率有关, 因此参数 B 应被修正为与应变率有关的函数。修正后的 J-C 方程如式(6)和(7)所示, 采用修正后的 J-C 模型拟合曲线 (蓝色) 与实验所得的真应力-塑性应变曲线拟合效果良好, 可以更真实可靠地反映 TWIP 钢的力学性质以及其应变硬化随应变率的变化规律。

$$B = -49.47 \ln \dot{\epsilon} + 1292 \quad (6)$$

$$\sigma = (350 + B \epsilon^{0.353})(1 + 0.0041386 \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (7)$$

2.3 断裂模式

断口形貌分析是表征材料断裂模式的重要方法。图 6 分别为 TWIP 钢与 Q345 钢拉伸变形后断口的整体形貌, 可以看出 TWIP 钢的断裂截面几乎无收缩, 拉伸导致的局部应变很小, 颈缩现象不明显, 表明试样在拉伸过程中变形比较均匀。而 Q345 钢缩颈现象明显, 截面收缩率显著高于 TWIP 钢。这是由于 Q345 钢在拉伸过程中截面积持续下降, 承载能力下降, 与此同时材料发生加工硬化行为, 当加工硬化的能力不能抵消因截面收缩导致的承载力下降时, 就形成了颈缩^[17]。

对准静态加载下 TWIP 钢及 Q345 钢断口中白色实线框及白色虚线框的区域进行断口形貌分析。如图 7a 所示, TWIP 钢拉伸断裂产生的断口分布有大量韧窝并为等轴韧窝, 大小分布均匀且韧窝不深, 为典型的韧性断裂。韧窝是材料在微区范围内塑性变形产生的微观孔洞, 经过形核、生长、聚集, 最终相互连接变形产生断口后在表面留下的痕迹^[18]。断口边缘位置

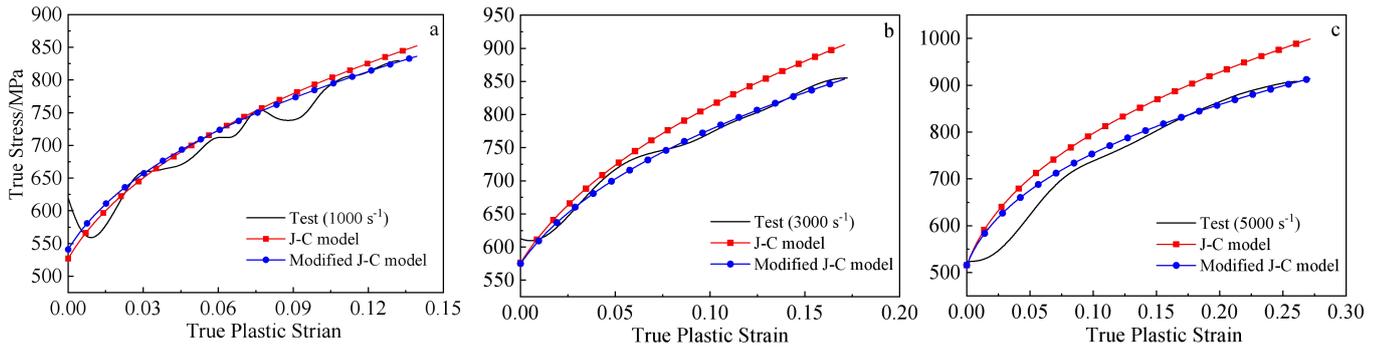


图 5 实验结果与 J-C 模型及修正 J-C 模型拟合对比

Fig.5 Fitting test results with the J-C model and the modified J-C model at the strain rate of 1000 s⁻¹ (a), 3000 s⁻¹ (b), and 5000 s⁻¹ (c)

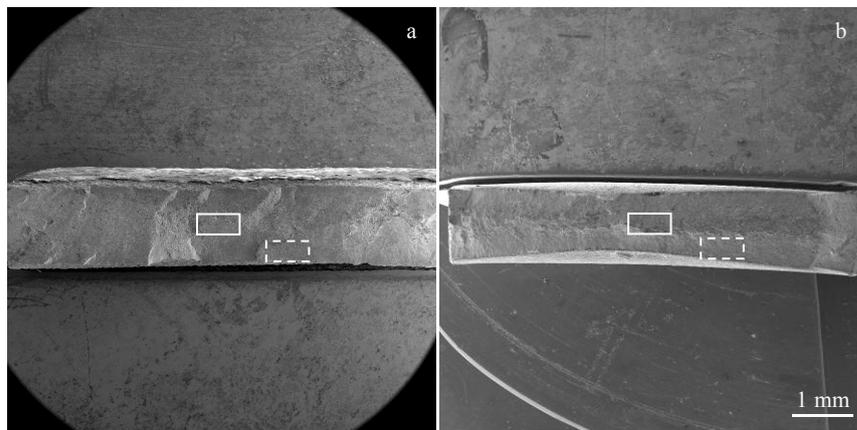


图 6 准静态拉伸断口宏观形貌

Fig.6 Macroscopic morphologies of fracture under quasi-static tensile deformation: (a) TWIP steel and (b) Q345 steel

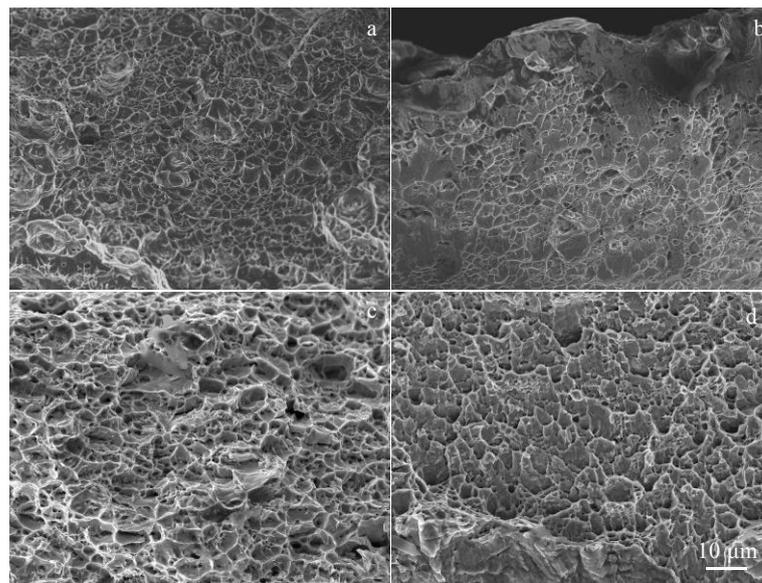


图 7 准静态拉伸断口微观形貌

Fig.7 Morphologies of fracture under quasi-static tensile deformation: (a) TWIP steel (the solid white frame in Fig.7a), (b) TWIP steel (the dotted white frame in Fig.7a), (c) Q345 steel (the solid white frame in Fig.7b), (d) Q345 steel (the dotted white frame in Fig.7b)

(图 7b)出现少量平滑区,为典型的剪切形貌,该区域的韧窝与中心位置的相比大小不均匀,且部分韧窝被拉长变形。图 7c 和 7d 分别为 Q345 钢在准静态加载下断口中心和边缘位置的形貌。断口中心位置可见尺寸不等的韧窝和撕裂棱,韧窝整体上较小、深度较浅,同样表现为韧性断裂的特征。但是断口边缘位置韧窝相对于 TWIP 钢不明显,说明 Q345 钢韧性相对较差。TWIP 钢动态拉伸断口形貌如图 8 所示。动态加载后产生的韧窝不同于准静态条件下的小而浅,断口中心出现少量大且深的韧窝,呈现出更好的韧性断裂特征。如图 8f 所示,部分韧窝中存在直径为 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,能谱分析表明,该颗粒物主要为锰、铁、铝的氧化物,拉伸时容易成为韧性断裂的起源。韧窝的大小和深度与材料的塑性成正比关系^[9],在 $1000\sim 5000\ \text{s}^{-1}$ 范围内,随着应变率的增加,断口中心位置大且深的韧窝逐渐增多,材料的断裂延伸率也逐渐增加。当应变率为 $6500\ \text{s}^{-1}$ 时,大且深的韧窝数量有所下降,材料的韧性在该应变率下也相对较差,与实验测试结果保持一致。如图 8e 所示,断口边缘处的韧窝相比于准静态取向更加明显,在剪切应力的作用下呈现为非等

轴韧窝,并且出现少量较深的韧窝,表明冲击过程中试样抵抗冲击变形的能力较强^[20]。

2.4 显微组织分析

2.4.1 XRD 分析

图 9 为 TWIP 钢以不同应变率拉伸变形前后的 XRD 图谱。实验所用 TWIP 钢拉伸变形前后的组织由单一 fcc 结构组成,没有发现马氏体衍射峰,说明 TWIP 钢在拉伸过程中没有发生马氏体相变,只发生了 TWIP 效应。随着应变量的增加,衍射峰的强度均逐渐减弱。其中主峰(111) γ 衍射峰减弱效果最明显,(200) γ , (220) γ , (311) γ 衍射峰变化较弱,(222) γ 衍射峰减弱直至消失。同时随着应变量的增加,衍射峰的宽度均有所增加,这是由于在拉伸过程中内应力不断增大,导致晶体发生畸变,使衍射峰强度减弱,宽度增加^[21]。

2.4.2 SEM 分析

图 10 为 TWIP 钢变形前的 SEM 照片,为单相奥氏体组织,并分布有一定数量的退火孪晶,如图中白色实线所示。单个奥氏体晶粒内部的孪晶取向一致,并且退火孪晶起始于晶粒边界,终止于晶粒的另一边界或晶粒内部。

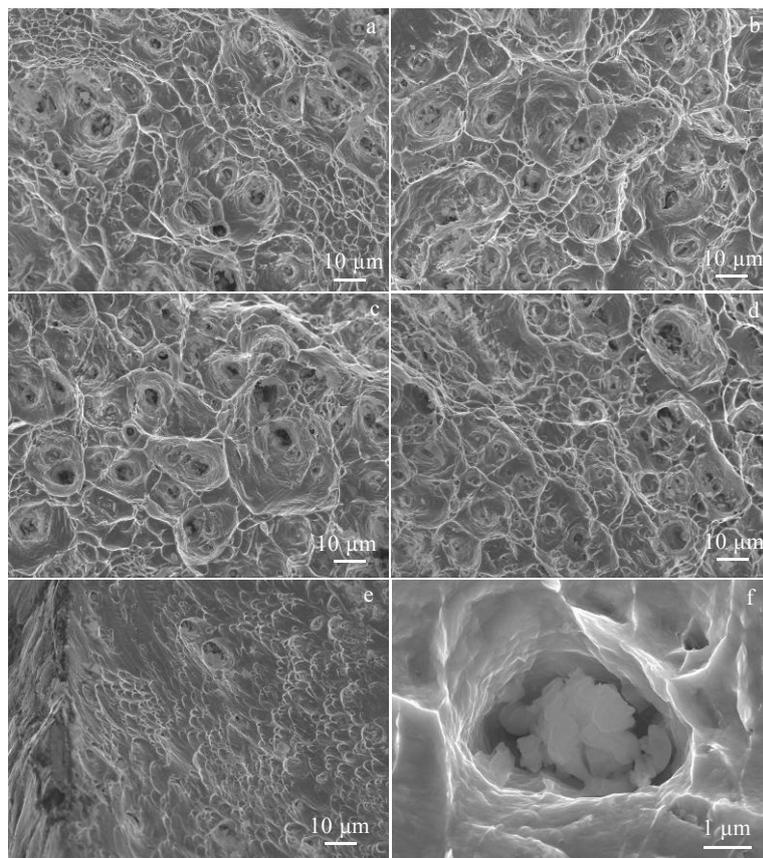


图 8 TWIP 钢动态拉伸断口形貌

Fig.8 Fracture morphologies of TWIP steel under dynamic tensile deformation: (a) strain rate of $1000\ \text{s}^{-1}$, (b) strain rate of $3000\ \text{s}^{-1}$, (c) strain rate of $5000\ \text{s}^{-1}$, (d) strain rate of $6500\ \text{s}^{-1}$, (e) location of fracture edge (strain rate of $5000\ \text{s}^{-1}$), and (f) partial enlargement

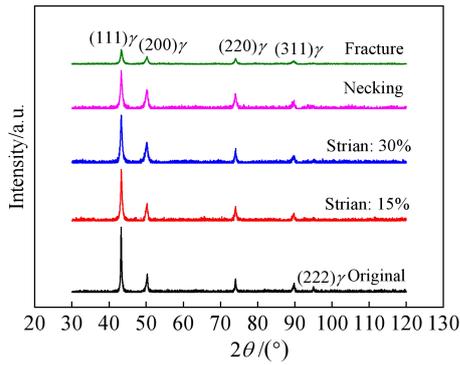


图9 TWIP 钢变形前后 XRD 图谱

Fig.9 XRD patterns of TWIP steel before and after deformation

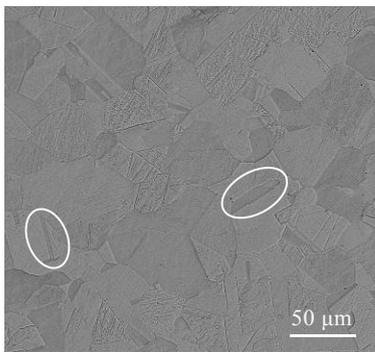


图10 TWIP 钢拉伸变形前的 SEM 照片

Fig.10 SEM image of TWIP steel before tensile deformation

图 11a~11d 为 TWIP 钢在应变率为 10^{-2} s^{-1} 条件下不同应变量的微观形貌。当应变较小时(15%), 如图 11a 中白色箭头所示, 可以看到少量形变孪晶, 说明拉伸过程中发生了 TWIP 效应。但是由于受到晶界势垒的作用, 晶粒内部的形变孪晶往往起始于晶粒边界, 终止于晶粒的另一边界甚至终止于晶粒内部。每一个晶粒内的孪晶取向一定, 说明一个晶粒内存在一个孪生系统。同时由于产生滑移所需的切应力较小, 组织中还分布有大量滑移带。随着应变增加到 30%, 形变孪晶的比例也在增加, 个别晶粒内部出现孪晶取向不同的交叉现象, 这说明初次孪晶和二次孪晶是先后被激活的。当试样开始颈缩时, 形变孪晶的数量进一步增加, 晶粒沿加载方向被拉长, 原奥氏体晶界开始变得模糊, 如图 11c 白色实线所示。同时出现大量条痕带状组织, 这是因为在孪生的作用下, 晶粒内部取向发生了变化, 形成了以孪晶界为对称面的切变, 导致晶粒内部呈现出凹凸立体感^[22-23]。对称面的形成改变了滑移系与外力的取向, 从而有利于滑移的进行, 使 TWIP 钢的塑性增强。由此可见, 随着应变量的增加, 需要更多的形变孪晶以及滑移带参与变形。

断裂后的试样中原奥氏体晶粒和一次形变孪晶发生严重畸变, 部分奥氏体晶粒内存在多个孪生系统。研究表明, 初次形变孪晶理论上可以诱发 40% 左右的应变, 当应变更大时, 起主要作用的是二次甚至多次孪晶^[24]。二次形变孪晶与成熟的一次形变孪晶相遇后相互交割, 将原奥氏体晶粒分割成多个亚结构。此时晶粒中形变孪晶分布有所差异, 变形不均匀。当应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, 拉断变形后的组织中, 部分孪晶穿过原奥氏体晶界。对于应变率为 10^{-4} s^{-1} 时, 几乎所有奥氏体晶粒内部均产生形变孪晶, 孪晶分布更加均匀, 晶粒细化效果更加明显, 该应变率下 TWIP 钢的抗拉强度以及断裂延伸率也更大, 与力学性能结果一致。

图 12 为 TWIP 钢在 1000 s^{-1} 应变率下以不同应变率拉伸变形后的 SEM 照片。如图 12a 所示, 当应变量为 5% 时, 几乎看不到形变孪晶。当应变量为 10% 时, 部分晶粒内部开始出现形变孪晶, 并且形变孪晶遗传了退火孪晶的取向, 每个晶粒内部存在一个孪生系统^[25]。当应变达到 15% 时, 形变孪晶的数量开始增多, 个别晶粒内部出现 2 个孪生系统。由此可见, 动态加载下试样中产生二次形变孪晶的起始应变小于准静态加载。断裂后组织中形变孪晶更加明显, 拥有多个孪生系统的晶粒数量增多。形变孪晶相互交割, 改变了晶粒内部亚晶结构取向, 有效缓解变形过程中的应力集中。

2.4.3 EBSD 分析

由于 SEM 对孪晶的识别具有局限性, 为了进一步研究 TWIP 钢在准静态和动态加载下的变形机制, 对 TWIP 钢进行 EBSD 测试分析。图 13a 为拉伸变形前 TWIP 钢的 IPF 图, 可以看到均匀分布的晶粒, 晶粒尺寸为 $40 \sim 50 \mu\text{m}$, 晶粒内部分布有一定量的退火孪晶, 退火孪晶的体积分数为 4%。在准静态加载条件下, 当应变量为 15% 时, 除退火孪晶外, 有少量形变孪晶生成, 此时 TWIP 钢中孪晶体积分数为 6.8%。当应变增加到 30%, 如黑色实线圈所示, 有大量形变孪晶生成, 部分形变孪晶贯穿整个晶粒, 孪晶体积分数增加到 12%。2 个或 2 个以上孪生系统在此时被激活, 如图 13c 中箭头所示, 二次孪晶和初始形变孪晶之间的夹角为 60° 左右, 将晶粒分割成多个小四边形。在动态加载的条件下, 当应变量为 5% 时, 如图 13d 所示, 晶粒中的孪晶数量与变形前的变化不大, 说明此时没有形变孪晶的生成。当应变量为 10% 时, 晶界附近开始有少量形变孪晶生成, 通过对孪晶定量计算可知此时孪晶体积分数为 6.3%。相较于准静态加载, 高应变率下生成形变孪晶所需要的应变更小。当应变增加

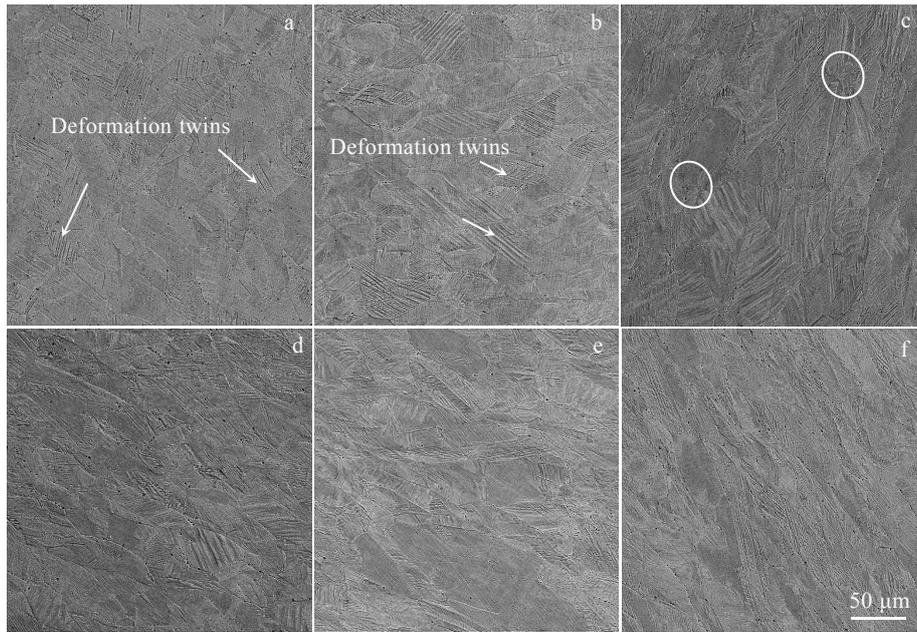


图 11 TWIP 钢在准静态加载下以不同应变率及不同应变率拉伸变形后的 SEM 照片

Fig.11 SEM images of TWIP steel after tensile deformation under quasi-static loading with different strains and different strain rates: (a) 15%, 10⁻² s⁻¹; (b) 30%, 10⁻² s⁻¹; (c) necking, 10⁻² s⁻¹; (d) fracture, 10⁻² s⁻¹; (e) fracture, 10⁻³ s⁻¹; (f) fracture, 10⁻⁴ s⁻¹

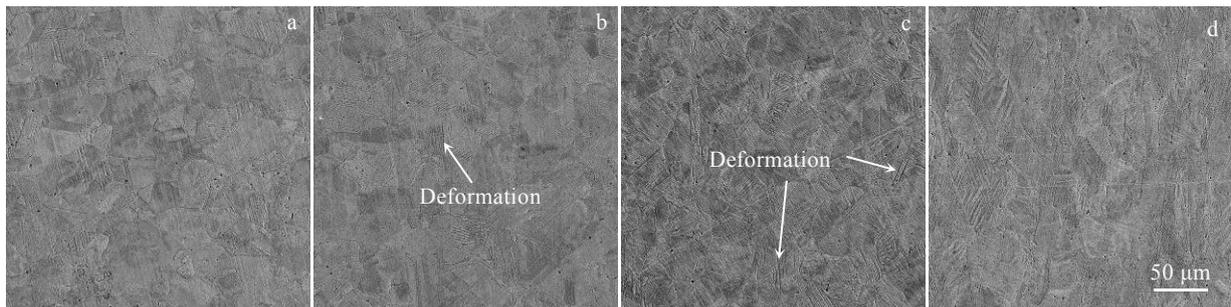


图 12 TWIP 钢动态拉伸(1000 s⁻¹)变形后的 SEM 照片

Fig.12 SEM images of TWIP steel after dynamic tension deformation (1000 s⁻¹): (a) 5%, (b) 10%, (c)15%, and (d) fracture

到 15%时, 孪晶体积分数增加到 7.6%, 同时出现少量贯穿晶粒的形变孪晶。

图 14 为不同应变率下 TWIP 钢拉伸断裂后的 IPF 图。准静态加载条件下, 部分形变孪晶穿过原奥氏体晶粒, 相互交割的孪晶将晶粒分割成多个小块, 细化了晶粒, 此时的孪晶体积分数为 24.9%。晶体结构在准静态拉伸过程中变形严重, 如图中白色实线所示, 部分晶粒之间的界面是模糊的, 这可能与高密度位错有关。密集的界面相互交错缠绕, 钉扎位错滑移加剧局部应力集中, 从而导致微裂纹的萌生^[26]。当应变率为 1000 s⁻¹时, 晶体结构保存相对完整, 形变孪晶尺寸较小并且分布不均匀, 此时孪晶体积分数为 15.4%。随着应变率增加到 5000 s⁻¹, 形变孪晶的尺寸开始变大,

孪晶体积分数增加到 20.1%。当应变率为 6500 s⁻¹时, 二次孪晶的比例开始增加, 细小的二次孪晶与初始形变孪晶相交, 二者之间的夹角均处于 57°~70°之间, 这与 Pang^[27]等人的测量结果是一致的, 此时的孪晶体积分数进一步增加至 21.3%。

为了更好地区分变形后 TWIP 钢中形成的板条组织, 将准静态拉伸变形后 TWIP 钢的晶粒分布灰度图和 IPF 图进行对比。如图 15a 所示, 晶粒内部分布着大量板条组织。图 15b 是图 15a 对应的 IPF 图, 部分晶粒中也分布着与图 15a 相似的板条组织, 如白色虚线框所示。但是部分板条组织在图 15a 中清晰可见, 在图 15b 中却消失, 如白色实线框所示, 说明该类板条组织的取向差较小, 在 IPF 图中无法被分辨^[28]。孪

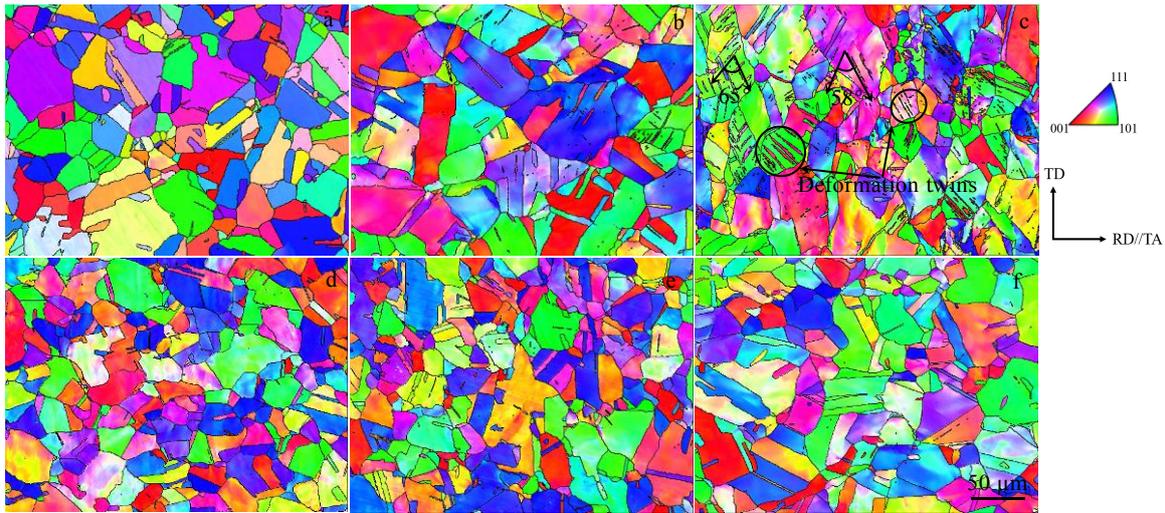


图 13 TWIP 钢在准静态及动态加载下以不同应变拉伸后的 IPF 图

Fig.13 IPFs for TWIP steel at different strains: (a) original, (b) 10^{-4} s^{-1} , 15%, (c) 10^{-4} s^{-1} , 30%, (d) 1000 s^{-1} , 5%, (e) 1000 s^{-1} , 10%, and (f) 1000 s^{-1} , 15%

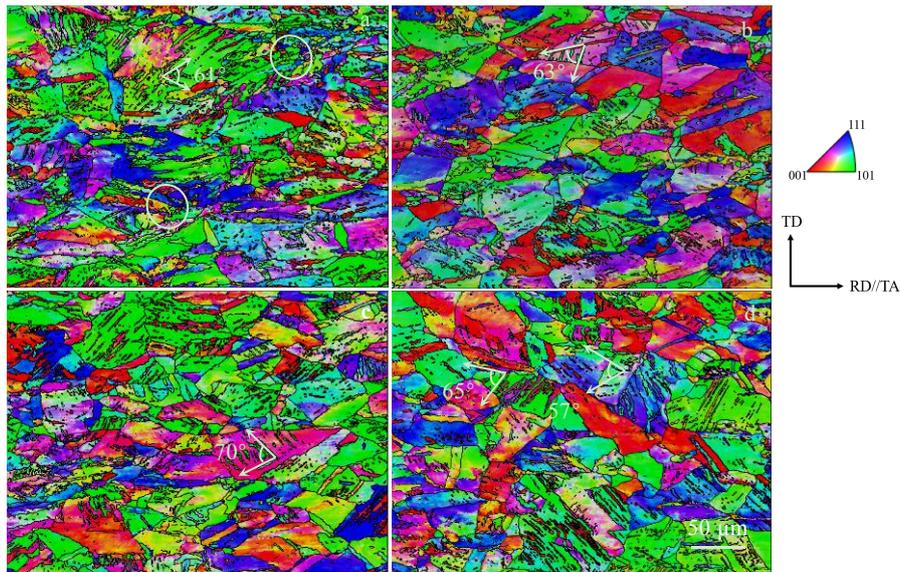


图 14 不同应变率下 TWIP 钢拉伸断裂后的 IPF 图

Fig.14 IPFs of TWIP steel after tensile fracture at different strain rates: (a) 10^{-4} s^{-1} , (b) 1000 s^{-1} , (c) 5000 s^{-1} , and (d) 6500 s^{-1}

生一般不会产生小角度晶界，奥氏体中孪晶晶界取向差为 60° ，而滑移会产生大量的小角度晶界^[25]。因此，对白色虚线框和白色实线框所划定的区域进行局部取向差定量分析，取向差统计结果分别对应图 15(c)和图 15d。白色虚线框中板条组织的取向差为 60° ，为形变孪晶，而白色实线框中板条组织的取向差处于 $2^\circ \sim 6^\circ$ 之间，为滑移带。说明 TWIP 钢在变形过程中，不仅有形变孪晶的生成，滑移也起到了一定作用。通过孪

生使晶体位向发生改变，原本不利于变形的滑移系具有新的取向，从而有利于激发滑移，使孪生与滑移交替进行，实现无颈缩延伸，TWIP 钢的塑性得到提高。

为研究位错滑移在 TWIP 钢变形过程中的重要作用，对比了不同应变率及不同应变下 TWIP 钢拉伸变形后的几何必须位错密度(GND)图，如图 16 所示。图中颜色越红的地方表明材料应变程度越大，应力更集中，位错密度更大^[29]。随着应变量的增加，位错密

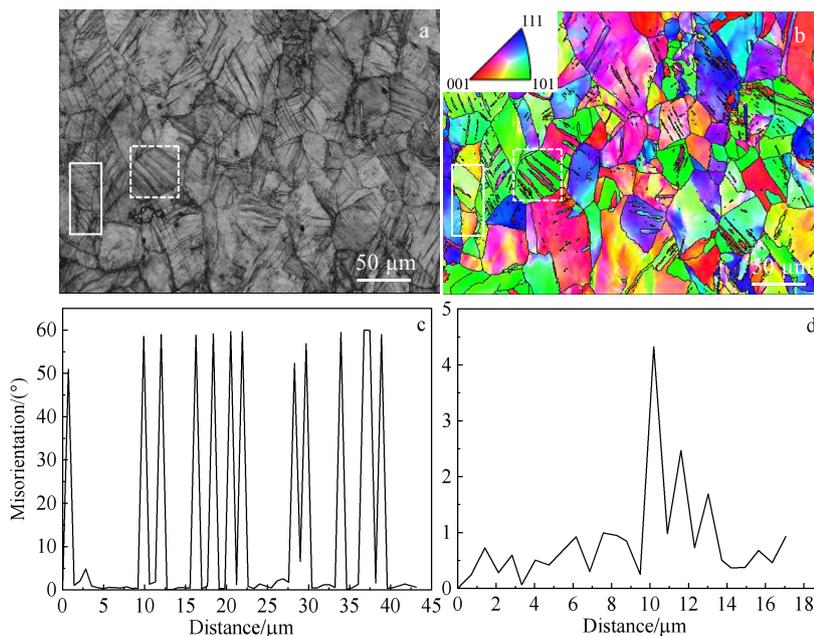


图 15 变形前后 TWIP 钢的 IPF 图及晶粒取向分布

Fig. 15 Grain orientation distribution of TWIP steel before and after deformation: (a) diffraction quality diagram after tensile deformation, (b) EBSD-IPF after tensile deformation, (c) statistical diagram of orientation difference for dotted white frame in Fig. 15a, and (d) statistical diagram of orientation difference for solid white frame in Fig. 15a

度逐渐增加, 说明位错滑移在 TWIP 钢塑性变形过程中起到重要作用, 并且位错主要集中在晶界附近。根据 Hall-Petch 效应可知^[30], 晶界阻碍位错的进行, 位错的平均自由程减小使位错塞积, 局部应力集中达到孪生的临界应力, 最终导致孪晶的形核和生长。通过比较准静态加载及动态加载下试样断裂后的 GND 图可以发现, 动态拉伸试样中的位错密度要高于准静态加载的试样。这是因为在动态加载下, 试样出现孪晶的起始应变较小, 并且孪晶之间的相互作用更加强烈。此外, 高密度位错会导致晶界附近出现模糊区, 这可能会导致动态拉伸试样的伸长率较低^[31]。

3 讨论

TWIP 钢在变形过程中受到形变孪晶、晶界以及位错滑移的共同影响^[32], 相关研究表明孪生所需要的临界应力远远大于滑移^[33]。变形初期, 位错滑移起主导作用, 当遇到晶界时, 滑动会受阻, 在晶界处产生大量的位错塞积^[34]。随着应变量的增加, 位错塞积严重导致应力集中, 当达到生成形变孪晶的临界应力时引发 TWIP 效应。形变孪晶的数量随着应变量的增加而不断增加, 相互交错的孪晶细化了晶粒, 对位错起到阻碍作用, 使组织中出现高密度位错区域^[25], 导致 TWIP 钢发生变形时需要克服更大的阻力, 强度得到

提高^[35]。同时, 形变孪晶的生成可以改变晶粒位向, 使原本不利于滑移的方向转动至有利方向, 缓解应力集中, 使变形更加均匀, 有效提高材料的塑性。随着应变量的增加, 晶粒取向不断被改变, 应力集中不断被转移, 直至各个孪晶相互交割限制, 取向无法再改变, 最终在高密度位错区域引起不均匀变形和微裂纹形核, 使材料发生断裂。与准静态相比, 高应变率下产生形变孪晶的起始应变较小, 说明在动态加载的条件下, 孪晶更加活泼, 这与 Cai^[36]和 Park^[33]等人的研究结果一致。同时, 在相同应变率下, 动态加载产生的形变孪晶较少。说明应变率较低时, TWIP 钢有充分的时间进行孪生。在较高的应变率下, 由于变形时间较短, 孪生无法充分进行, 导致变形后的孪晶组织不明显。这也是高应变率下 TWIP 钢的抗拉强度以及断裂延伸率小于准静态的原因。

在动态加载条件下, 随着应变率的升高, 形变孪晶的比例逐渐增加, 同时有大量二次形变孪晶生成。这是因为在动态加载过程中, 变形时间短, 应力集中较高, 位错没有足够的时间迁移并在一次孪晶周围堆积, 使一次孪晶周围的局部应力增加, 多个孪生系统被激活, 促使二次形变孪晶的生成, 缓解局部应力集中^[37]。孪晶比例的不断增加使 TWIP 钢的抗拉强度逐渐提高, 当应变率处于 $1000 \sim 5000 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 断裂

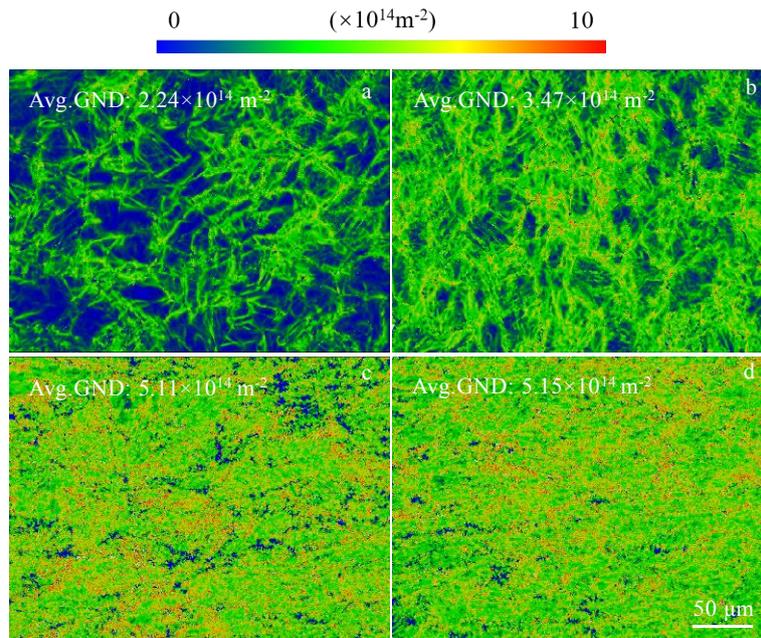


图 16 不同应变率及不同应变率下 TWIP 钢拉伸变形后的 GND 图

Fig.16 GND diagram of TWIP steel after tensile deformation under different strains and different strain rates: (a) 15%, (b) 30%, (c) fracture, 10^{-4} s^{-1} , and (d) fracture, 5000 s^{-1}

伸长率也逐渐增加。但是当应变率大于 5000 s^{-1} 时，断裂伸长率随应变率的增加反而下降，这是因为此时材料拉伸变形速率较大，形变孪晶的生长速率较慢无法与之匹配，几乎没有新的形变孪晶生成，导致 TWIP 钢的塑性降低。

4 结 论

1) TWIP 钢在准静态下表现为负的应变率敏感性，在高应变率下表现为正的应变率敏感性，应变率为 5000 s^{-1} 时是 TWIP 高强钢力学性能发生变化的转折点。

2) 结合 TWIP 钢在高应变率下拉伸的实验数据，修正拟合了 J-C 模型中的各个参数。TWIP 钢的应变硬化项与应变率有关，参数 B 是与应变率有关的函数。修正后的 J-C 方程拟合曲线与实验结果吻合效果良好，在 $1000 \sim 5000 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内具有一定普适性和预测性。

3) 基于对拉伸变形前后 TWIP 钢的金相观察及 EBSD 结果分析表明孪生诱发塑性是 TWIP 钢的主要变形机制，同时滑移也起到了重要作用。晶界势垒阻碍位错的进行，使位错主要集中在晶界附近。动态加载时，孪晶体积分数随应变率的增加而增加，但试样中的孪晶体积分数均小于准静态加载过程，这也是动态拉伸过程中 TWIP 钢的抗拉强度与断裂伸长率均小于准静态拉伸过程的原因。

参考文献 References

- [1] Gao Yonglaing (高永亮), Hu Shilian(胡士廉), Chen Wei(陈巍) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报) [J], 2015, 36(9): 119
- [2] Feng Xinchang(冯新畅), Liu Xiyue(刘希月), Bai Shuxin(白书欣) *et al.* *The 22nd National Symposium on Modern Structural Engineering*(第 22 届全国现代结构工程学术研讨会)[C]. Xuzhou: Industrial Construction, 2022: 015 578
- [3] Masaaki Itabashi, Kozo Kawata. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2000, 24(2): 117
- [4] Tang Jie, He Manchao, Qiao Yafei *et al.* *Construction and Building Materials* [J], 2021, 304(12): 124 606
- [5] Mi Zhenli(米振莉), Yang Yonggang(杨永刚), Xu Mei(徐梅) *et al.* *2018 National Steel Rolling Production Technology Conference*(2018 年全国轧钢生产技术会议)[C]. Handan: The Chinese Society for Metals, 2018: 209
- [6] Xu Shanqing, Ruan Dong, Beynon John H *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 573: 132
- [7] Canadinc D, Efstathiou C, Sehitoglu H. *Scripta Materialia*[J], 2008, 59(10): 1103
- [8] Ma Xinkai, Li Fuguo, Cao Jun *et al.* *Materials Science and Engineering A* [J], 2018, 710: 1
- [9] Benzing J T, Poling W A, Pierce D T *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 711: 78

- [10] Allain S, Bouaziz O, Chateau J P. *Scripta Materialia*[J], 2010, 62(7): 500
- [11] Gao Yongliang(高永亮), Hu Shilian(胡士廉), Chen Wei(陈巍) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2019, 48(16): 5
- [12] Lin Li(林莉), Zhi Xudong(支旭东), Fan Feng(范锋) et al. *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2014, 33(9): 153
- [13] Bai Y, Dodd B. *Adiabatic Shear Localization: Occurrence, Theories and Applications*[M]. New York: Pergamon Press, 1992
- [14] American Institution of Steel Construction (AISC). *Specification For Structural Steel Buildings, AISC 360-16*[S]. 2016
- [15] European Committee for Standardization. *Eurocode 3-Design of Steel Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design, EN 1993-1-2*[S]. 2005
- [16] Chen Jun, Young Ben, Uy Brain. *Journal of Structural Engineering*[J], 2006, 132(12): 1948
- [17] Wang Hongwei(王宏伟), Li Wentao(李文涛), Bai Hong(白虹) et al. *Metal World*(金属世界)[J], 2013(6): 25
- [18] Lee Juseung S, Lee Dongyun, Lee Myungjin et al. *Steel Research International*[J], 2017, 88(11): e201700016.
- [19] Geng Cheng(耿城), Dong Ruihua(董瑞华). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2016, 37(9): 1831
- [20] Wei Yu, Qian Yajun, Wu Huibin et al. *Journal of Iron and Steel Research*[J], 2011, 18(2): 64
- [21] Du Pengliang(杜棚梁). *Microstructure of Fe-Mn-Si-Al TWIP steel during deformation at different strain rates and performance studies* (Fe-Mn-Si-Al 系 TWIP 钢不同应变速率变形过程中组织和性能的研究)[D]. Shanxi: North University of China, 2022
- [22] Zhang Wangfeng(张旺峰), Chen Yumei(陈瑜眉), Zhu Jinhua(朱金华). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2000(2): 4
- [23] Zhang Jinyong(张金勇), Li Jinshan(李金山), Chen Zheng(陈正) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(9): 2787
- [24] Yu Yongning(余永宁). *Principles of Metallography*(金属学原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000
- [25] Mi Zhenli(米振莉), Tang Di(唐荻), Jiang Haitao(江海涛) et al. *Chinese Journal of Engineering*(工程科学学报)[J], 2007, 29(12): 1200
- [26] Chen Guanfang(陈冠方), Zhang Jinyong(张金勇), Zhong Yi(钟艺) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(1): 7
- [27] Pang Qihang, Xu Mei, Guo Jing et al. *ISIJ International*[J], 2020, 60: 2068
- [28] Chen Ya(陈亚). *Researches on Fatigue Properties and Impact Resistance Ability of Fe-Mn-Al-Si TRIP/TWIP Steel* (Fe-Mn-Al-Si 系 TRIP/TWIP 钢抗疲劳和抗冲击性能的研究)[D]. Hunan: Hunan University, 2015
- [29] Lin Chao(林超). *Investigations on Deformation Mechanism and Microstructure-Mechanical Property of Fe-Mn-Si-Al TWIP Steels under Dynamic Loading Conditions* (Fe-Mn-Si-Al 系 TWIP 钢在动态加载条件下的变形机制和组织性能研究)[D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2018
- [30] Lu Ke(卢柯), Liu Xuedong(刘学东), Hu Zhuanglin(胡壮麟). *Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 1994, 8(5): 385
- [31] Wang Chunhui, Cai Wang, Sun Chaoyang et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 835: 142 673
- [32] Li K, Yu B, Misra R D K et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 742: 116
- [33] Park Jaeyeong, Kang Minju, Sohn Seok Su et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 684: 54
- [34] Bouaziz O, Allain S, Scott C P et al. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*[J], 2011, 15(4): 141
- [35] Mi Zhenli(米振莉), Jing Haitao(靖海涛), Jiang Haitao(江海涛) et al. *Chinese Journal of Engineering*(工程科学学报)[J], 2013, 35(4): 465
- [36] Cai Wang, Wang Chunhui, Sun Chaoyang et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 851: 143 657
- [37] Lee Young Kook. *Scripta Materialia*[J], 2012, 66(12): 1002

Dynamic Mechanical Properties and Deformation Mechanism of TWIP Steel

Feng Xinchang, Liu Xiyue, Tang Yu, Bai Shuxin, Zhu Li'an

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The quasi-static and dynamic mechanical properties of TWIP steel were investigated by Zwick/Roell Z100 universal testing machine and Hopkinson tensile bar. The strain hardening and strain strengthening in Johnson-Cook dynamic constitutive model were modified based on mechanical test results. The microstructure of TWIP steel before and after tensile deformation were analyzed by XRD, SEM and EBSD. The results demonstrate that TWIP steel exhibits negative strain rate sensitivity when it exhibits quasi-static loads, while it exhibits positive strain rate sensitivity when subjected to dynamic loads. Twinning induced plasticity is the primary deformation mechanism of TWIP steel during tensile process, and slip also plays a significant role. The initial strain of twins in TWIP steel under dynamic loading is less than that under quasi-static loading, and the dislocation density is higher than that under quasi-static loading. TWIP steel has exceptional strength and plasticity because deformation twins and the grain refinement brought on by twin contact, implying that it has a broad application in the fields of impact resistance and anti-explosion.

Key words: TWIP steel; dynamic mechanical properties; deformation mechanism; deformation twin; dynamic constitutive model

Corresponding author: Liu Xiyue, Ph. D., Associate Professor, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, P. R. China, E-mail: liuxy85722@163.com