

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0051

## 超细晶 D6A 钢动态拉伸力学特性实验研究\*

杨泽洲<sup>1</sup>, 申勇峰<sup>2</sup>, 冯晓伟<sup>1</sup>, 薛文颖<sup>3</sup>, 谢若泽<sup>1</sup>, 胡艳辉<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

3. 东北大学轧制技术与连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为了推进超细晶 D6A 钢在半穿甲战斗部壳体上的应用, 研究了动态加载下其宏观力学行为和微观变形机理。运用旋转盘式 Hopkinson 拉杆技术, 开展了超细晶 D6A 低合金钢(平均晶粒尺寸为 510 nm)的动态拉伸实验, 获得了不同应变率(500~1000 s<sup>-1</sup>)下超细晶钢的应力-应变曲线。运用 TEM 观测微观形貌, 从细观层次研究了高应变率拉伸作用下超细晶钢的动态力学特性。结果表明, 超细晶 D6A 钢具有较高的动态拉伸强度和良好的延展性。并且, 晶粒细化和纳米析出相(渗碳体)是超细晶钢同时拥有高强度和较好韧性的重要因素; 在动态拉伸过程中析出的大量纳米级渗碳体, 与高密度晶界共同作用限制了位错运动, 从而产生额外的塑性变形抗力, 有效提升了超细晶钢的强度; 在塑性变形阶段超细晶钢出现的明显应力下降现象, 是可动位错密度增高的结果。

**关键词:** 超细晶 D6A 钢; 动态拉伸实验; 动态强韧化; 应力下降

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

## Investigation on dynamic tensile properties of an ultrafine grained D6A steel

YANG Zezhou<sup>1</sup>, SHEN Yongfeng<sup>2</sup>, FENG Xiaowei<sup>1</sup>, XUE Wenyong<sup>3</sup>, XIE Ruozhe<sup>1</sup>, HU Yanhui<sup>1</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;

3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to promote the application process of an ultrafine grained (UFG) D6A low-alloy medium-carbon steel in semi-armor-piercing warhead shells, mechanical behaviors and microscopic deformation mechanism of the UFG D6A steel under dynamic loading were studied. The UFG D6A steel ( $d = 510$  nm) was prepared by using inter-critical rolling and low temperature annealing process, whose microstructure features show that nanoscale spherical cementite grains are uniformly distributed in the equiaxed ferrite matrix. Dynamic tensile experiments were performed with a rotating Hopkinson bar apparatus at strain rates ranging from 500 s<sup>-1</sup> to 1000 s<sup>-1</sup>. Micromorphology of specimens before and after tensile loading was observed by transmission electron microscopy. Combined with these observations, the dynamic mechanical properties of the UFG steel under high strain rates were extensively studied. The results reveal that the UFG D6A steel achieves both excellent strength and well toughness simultaneously with a dynamic tensile strength of 2 200 MPa and an average dynamic fracture elongation of 13%. The dynamic tensile strength is obviously higher than the quasi-static tensile strength (approximately 2 times), while the toughness is lower than that under quasi-static conditions. It is observed that the cementite content increases dramatically during the dynamic tensile experiment process, which can effectively restrict the movement of dislocations to produce additional plastic deformation resistance. Consequently, grain refinement and the precipitation of nanosized carbides are considered to play key roles for strengthening the steel. The severe plastic deformation reduces the average grain size and

\* 收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-05-11

第一作者: 杨泽洲(1996—), 男, 硕士研究生, yangzezhou19@gscaep.ac.cn

通信作者: 冯晓伟(1984—), 男, 博士, 副研究员, 414fengxw@caep.cn

increases the density of grain boundaries within the material, which is considered to eventually lead to the decrease of dynamic fracture elongation of the UFG D6A steel. The drops of yield stress were observed apparently during dynamic tensile process, which is mainly due to the increase of the mobile dislocation density. These research results may give deeper insights into the relationship between material microstructure and mechanical behavior of UFG steels, and provide a significantly experimental and theoretical basis for the application of UFG D6A steels in the military equipment field.

**Keywords:** ultrafine grained D6A steel; dynamic tensile experiment; dynamic strengthening and toughening; yield drop

超细晶钢兼具高强度和高韧性等特性, 是制备攻坚战斗部壳体的理想材料之一。攻坚战斗部通常需侵入目标内部再爆炸以毁伤目标, 其壳体材料在侵彻过程中将经历高压、高应变率等严苛的力学环境。因此, 理解超细晶钢在高应变率下的动态力学响应, 对于推进它在攻坚战斗部上的应用具有关键作用。

目前, 针对超细晶材料的动态力学行为已开展了广泛研究, 并取得了一系列规律性认识。Jia 等<sup>[1]</sup>研究了超细晶铁的动态压缩力学行为, 指出晶粒细化能显著提高材料的屈服强度, 并发现随着晶粒减小, 塑性变形模式从均匀变化转为不均匀, 出现剪切局部化现象。Okitsu 等<sup>[2-3]</sup>研究了动态拉伸下不同晶粒尺寸超细晶低碳钢的动态力学行为, 同样发现晶粒细化能提升材料动态屈服强度, 但降低了材料的应变率敏感性。Hu 等<sup>[4]</sup>在研究超细晶金属性能时, 发现引入纳米弥散体能提高位错滑移所需的临界应力, 同时增强金属材料的强度, 有效解决强度与韧性间的冲突, 使材料在提升强度硬度的同时, 仍然保持良好的塑性。王鹏杰等<sup>[5]</sup>、Jia 等<sup>[6]</sup>和 Liang 等<sup>[7]</sup>利用两相区轧制退火技术, 制备了具有纳米级渗碳体的超细晶 D6A 低合金钢, 分析了晶粒尺寸和纳米析出相对超细晶钢强度和塑性的影响。

Wei 等<sup>[8]</sup>发现超细晶体心立方金属应力-应变曲线中出现了明显的动态流动软化, 认为这种软化是材料的动态变形机制从均匀的、稳定的塑性变形向不稳定的、绝热剪切局部化转变的结果。张世雄<sup>[9]</sup>则认为, 较高应变率变形产生的热量没有足够时间消散, 导致试件局部出现绝热温升, 从而引起流变应力下降趋势。刘晓燕等<sup>[10]</sup>研究超细晶纯钛变形行为时发现, 变形过程中的流动软化效应是由位错活动控制的, 高硬化率由细晶粒结构和高密度位错导致。Okitsu 等<sup>[3]</sup>研究超细晶铁的动态变形行为时发现, 试件中只观察到很少的初始位错, 高速拉伸后位错明显增多且随机分布。

综上所述, 超细晶材料的动态力学性能与其细观结构演化和加载条件等密切相关。本文中, 利用旋转盘式 Hopkinson 拉杆, 对平均晶粒尺寸 510 nm 的超细晶 D6A 钢进行动态拉伸实验, 探究应变率、细观结构等对材料动态力学性能的影响。结合显微观测结果, 进一步探讨超细晶钢的动态响应细观机理。

## 1 实验

### 1.1 材料

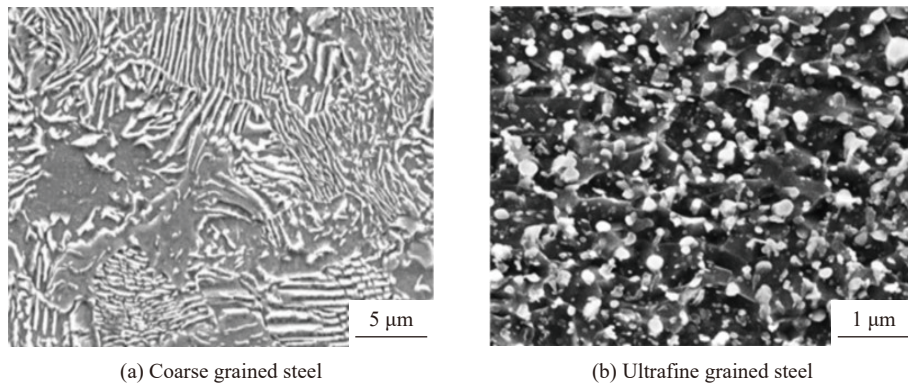
实验材料为平均晶粒尺寸 510 nm 的超细晶 D6A 低合金钢, 通过将平均晶粒尺寸 20  $\mu\text{m}$  的商用粗晶钢 (ultrafine grained steel, CG) 经过热轧和两相区连轧连退工艺处理获得<sup>[5]</sup>。钢中各元素含量见表 1。

表 1 超细晶 D6A 钢化学成分的质量分数

Table 1 Mass fractions of chemical compositions in the ultrafine grained D6A steel

w(C)/%	w(Si)/%	w(Mn)/%	w(Cr)/%	w(Mo)/%	w(Al)/%	w(Ni)/%	w(V)/%	w(Fe)/%
0.43	0.17	0.73	1.05	1.01	0.02	0.61	0.09	95.89

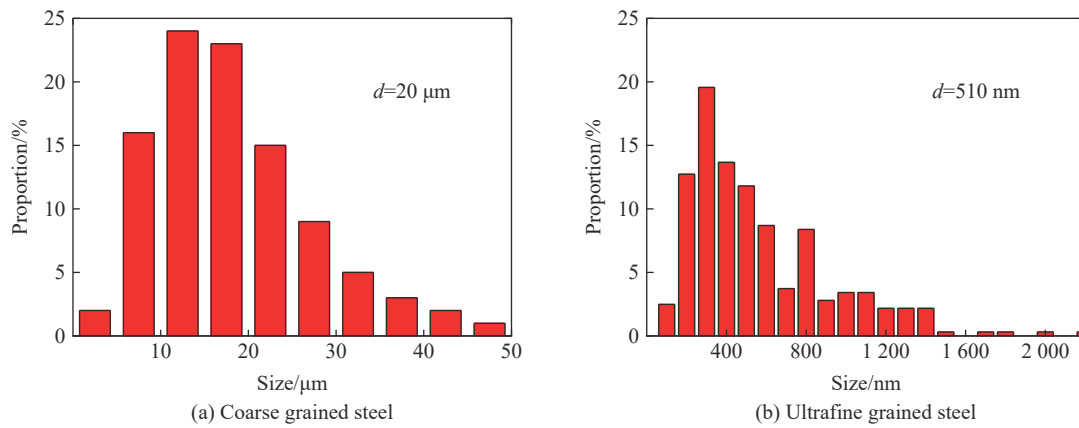
图 1 为粗晶钢和超细晶钢的 SEM (transmission electron microscope) 形貌。由图 1(a) 可见, 原始粗晶钢细观组织主要由铁素体 (灰色) 和纳米渗碳体 (白色) 组成, 渗碳体呈均匀分布的长条状; 由图 1(b) 可见, 超细晶钢以等轴状铁素体基体为主, 渗碳体变为粒状且含量明显降低, 说明高温处理出现了渗碳体的溶解现象。统计表明, 超细晶钢内渗碳体平均尺寸约为 140 nm。利用 IPP 软件获得了两类钢的晶粒尺寸柱状分布图, 如图 2 所示。可见, 细化后的 D6A 钢平均晶粒尺寸约为 510 nm。



(a) Coarse grained steel (b) Ultrafine grained steel

图 1 钢退火组织的 SEM 形貌

Fig. 1 The SEM morphologies of annealing structures of the steels



(a) Coarse grained steel (b) Ultrafine grained steel

图 2 钢的晶粒尺寸分布

Fig. 2 Grain size distributions of the steels

### 1.2 装置

将超细晶 D6A 钢样品表面打磨光滑, 以便获得更精确的拉伸性能数据。将机械切割处理得到的片状拉伸试件, 与两个配有 M10 螺纹头的转接头焊接为一体, 保证夹头与试件在拉伸过程中不产生分离, 组合试件如图 3(a) 所示。



(a) Before tensile loading



(b) After tensile loading

图 3 超细晶 D6A 钢组合试件照片

Fig. 3 Photographs of the ultrafine grained D6A steel combined specimens

在旋转盘式霍普金森拉伸系统上进行动态实验, 图 4 为霍普金森拉杆系统。应变放大器为 LK2107A 型应变仪, 增益设为 400; 数字采集系统为拓普 NUXI-1 008 型, 采样频率为  $10^6 \text{ s}^{-1}$ 。分别采用直径 8、10 和 12 mm 的金属短杆, 以不同的应变率对试件进行加载, 从而获得超细晶 D6A 钢的动态拉伸应力-应变曲线。拉伸断裂的试件如图 3(b) 所示。

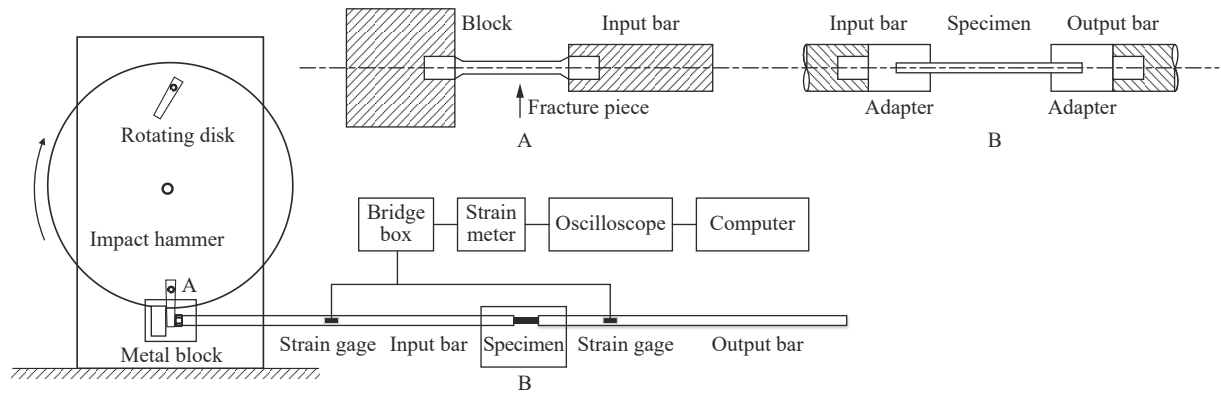


图 4 霍普金森拉杆系统

Fig. 4 The Hopkinson tension bar system

## 2 结果和讨论

### 2.1 静态拉伸实验结果

Liang 等<sup>[11]</sup>利用电子万能试验机开展了 510 nm 超细晶 D6A 钢的准静态拉伸实验, 结果见图 5 和表 2。原始粗晶钢的屈服强度、抗拉强度和断裂延伸率分别为 390 MPa、750 MPa 和 22%。室温条件下, 超细晶钢的准静态拉伸强度较粗晶钢明显提升, 不同应变率强度较接近, 分别为 1 110、1 115 和 1 120 MPa。准静态拉伸下, 材料韧性稳定, 断裂伸长率均为 25%。结果显示, 晶粒细化能够有效提升材料的强度和韧性。与粗晶钢相比, 超细晶钢的加工硬化能力较差。在弹性变形结束后开始的塑性变形过程中, 由于硬相珠光体对位错的钉扎作用, 粗晶材料的位错密度随变形量增加而不断增大, 不同方向的位错发生交互作用产生位错缠结, 阻碍位错的运动从而引起加工硬化。在进行准静态拉伸加载时, 由于晶粒尺寸减小至亚微米级别, 超细晶材料的位错源启动与位错运动都将被抑制, 位错很难在晶粒中增殖, 因而塑性变形的能力降低; 在弹性变形结束后, 超细晶材料的曲线很快达到峰值, 随后产生颈缩、直至断裂。Tsuji 等<sup>[12]</sup>已观察到超细晶 IF 钢中有同样的现象。

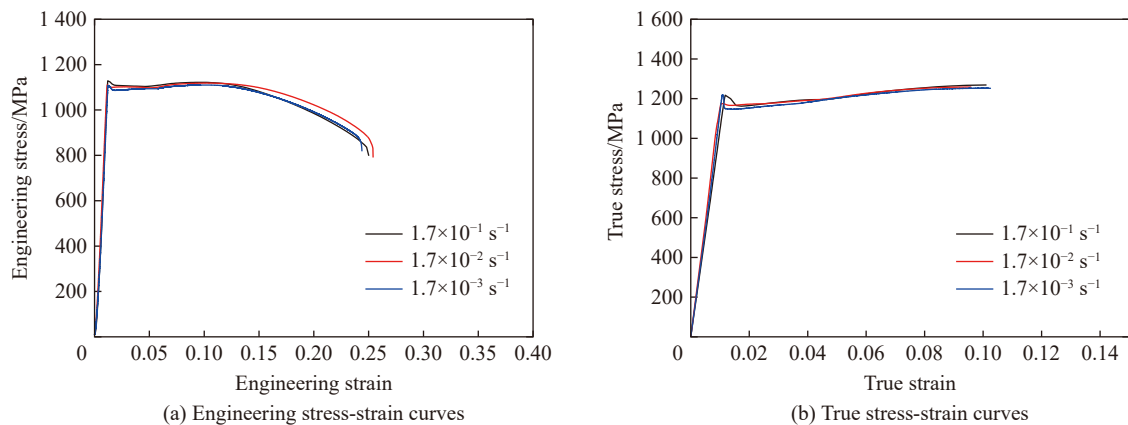
图 5 不同应变速率下超细晶 D6A 钢的工程应力-应变曲线和真实应力-应变曲线<sup>[11]</sup>Fig. 5 Engineering and true stress-strain curves of the ultrafine grained D6A steels at different strain rates<sup>[11]</sup>

表 2 室温下超细晶 D6A 钢的准静态拉伸力学参数<sup>[11]</sup>Table 2 Quasi-static tensile mechanical parameters of the ultrafine grained D6A steels at room temperature<sup>[11]</sup>

温度/℃	应变率/s <sup>-1</sup>	屈服强度/MPa		拉伸强度/MPa		工程伸长率/%
		工程	真实	工程	真实	
25	1.7×10 <sup>-1</sup>	1110	1120	1120	1250	25
25	1.7×10 <sup>-2</sup>	1100	1115	1115	1245	25
25	1.7×10 <sup>-3</sup>	1095	1110	1110	1240	25

## 2.2 动态拉伸实验结果

室温下,对 510 nm 钢试件进行了 6 发高速拉伸实验,应变率分别为 560、580、620、910、920 和 1 030 s<sup>-1</sup>,高应变率中一般取峰值应力作为材料强度(见表 3),实验钢工程应力-应变曲线如图 6 所示。超细晶 D6A 钢的动态应力-应变曲线均呈现相似特征:变形初始阶段,流动应力快速升高到达峰值后,立即出现应力下降,这个现象与准静态拉伸实验曲线有较大差异;动态拉伸时,流动应力快速下降至约一半峰值后,出现一段较稳定的应力平台;末尾阶段应力下降较快,并伴随着钢试件的断裂或失效。

如图 7(a)所示,与准静态结果相比,动态条件下抗拉强度呈现出应变率强化效应。这个现象可用位错运动解释,有 Orowan 公式<sup>[13]</sup>:

$$\dot{\epsilon} = Nbv/M \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率, $M$ 为取向因子, $N$ 为可动位错密度, $v$ 为位错速度, $b$ 为 Burgers 矢量的模。在高应变率下,位错运动速度更高。由文献[14-17],快速移动的位错可以产生大量的热量,并将金属设定为与位错有关的牛顿黏性材料。因此,位错运动过程中受到的黏滞阻力,主要来自位错与热振动(声子阻力)及电子(电子黏性)的相互作用,最终导致了高应变率下具有明显的应变率敏感性。如图 7(b)所示,高速拉伸断裂延伸率波动较小,表现出轻微的下落趋势,相较于准静态实验则明显降低。

## 2.3 超细晶 D6A 钢的强度、韧性分析

由图 7 可见,510 nm 钢的动态强度集中在 1 950~2 240 MPa,远高于其准静态拉伸强度(约 2 倍),在应变率跨数量级变化时,表现了明显的应变率强化效应。Jia 等<sup>[1]</sup>在研究体心立方结构超细晶铁的尺寸效应及本构关系时发现,在各晶粒尺寸(80 nm~20 μm)下,流动应力对应变速率的敏感性均较低。然而,在本文中超细晶钢表现了明显的应变率效应,值得进一步分析。

由文献[18],位错速度的应力依赖性满足幂律关系:

$$v = A\tau^m \quad (2)$$

式中: $v$ 为位错速度, $\tau$ 为位错所受剪切应力, $A$ 和 $m$ 均为材料常数。在冲击载荷作用下,作用于位错上的

表 3 室温下超细晶 D6A 钢的动态拉伸力学参数

Table 3 Dynamic tensile mechanical parameters of the ultrafine grained D6A steel at room temperature

温度/℃	应变率/s <sup>-1</sup>	强度/MPa	伸长率/%
25	560	1960	12.72
25	580	1950	13.42
25	620	1980	13.48
25	910	2210	12.43
25	920	1980	13.53
25	1030	2240	12.37

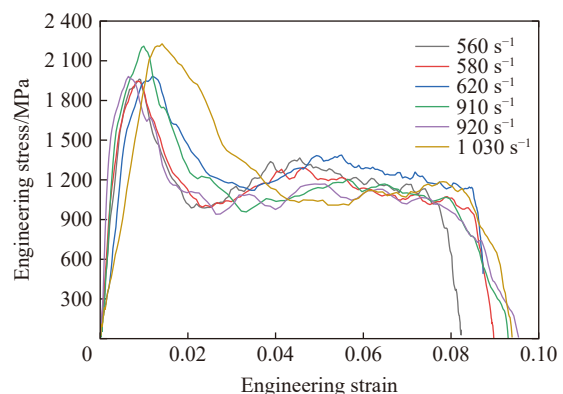


图 6 超细晶 D6A 钢的高应变率应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of the ultrafine grained D6A steel at high strain rates

瞬间应力相当高,造成位错运动速率的升高。而位错运动速率直接影响位错宽度及其能量,运动速率越高,能量越大,宽度越小。因此,运动速率的升高将增大位错滑移所需的派纳力,最终导致位错滑移临界切应力增大,金属产生附加强化,从而在跨应变率范围时表现出明显的应变率强化效应。

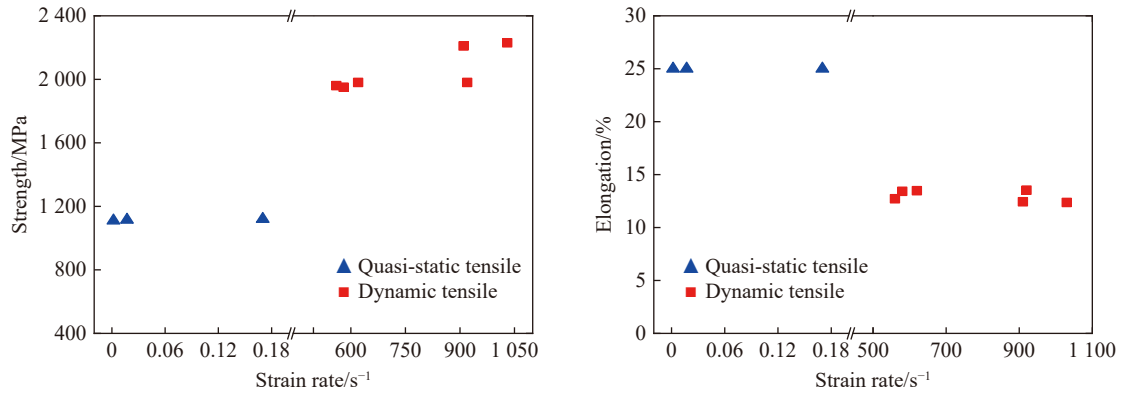


图 7 超细晶 D6A 钢在不同应变率下的强度和延伸率

Fig. 7 Strengths and elongations of the ultrafine grained D6A steel at different strain rates

另外,利用 TEM 技术观测了准静态和动态拉伸断裂前后试件的微观形貌,如图 8 所示。相较于原始试件,准静态加载后试件内析出了少量的纳米级渗碳体 Fe<sub>3</sub>C,而在高应变率拉伸时析出了大量的纳米级渗碳体。由文献 [7] 可知,纳米析出相也可有效提升材料强度,即析出强化效应。析出强化的效果与析出相的体积分数、颗粒大小直接相关, Gladman 等<sup>[19]</sup> 给出了强度增量与析出相体积分数和颗粒尺寸的关系:

$$\Delta\sigma = 5.9f^{1/2}/x \cdot \ln(x/(2.5 \times 10^{-4})) \quad (3)$$

式中:  $D$  为析出粒子直径,  $x=(2/3)^{1/2}D$ ,  $f$  为渗碳体析出相粒子的体积分数。由式 (3) 可知,体积分数越高,

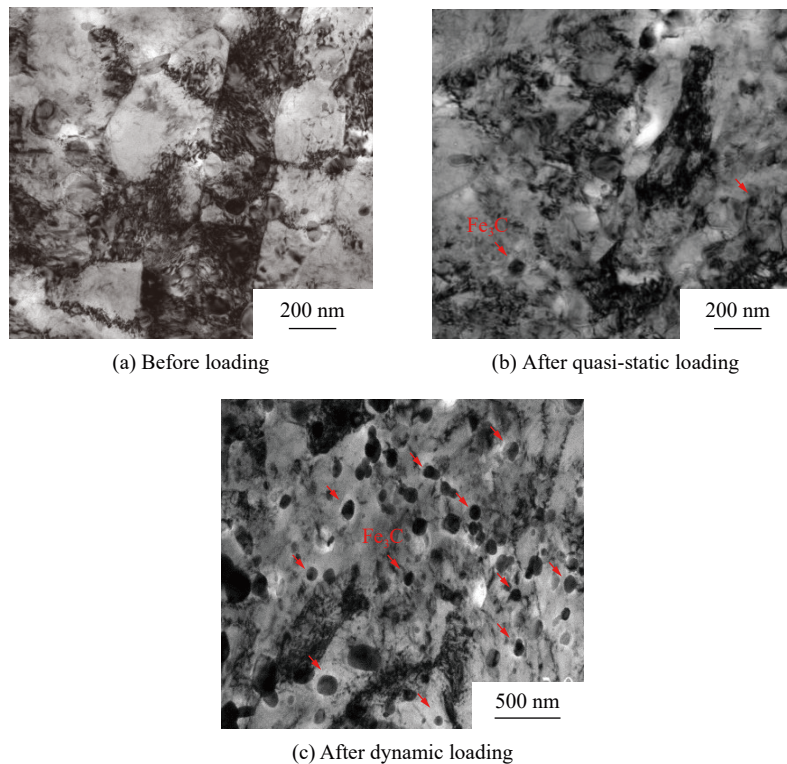


图 8 超细晶 D6A 钢加载前后的 TEM 形貌

Fig. 8 The SEM morphologies of the ultrafine grained D6A steel before and after loading

其带来的强度增量越多。Zhou 等<sup>[20]</sup>结合力学实验、细观观察和第一性原理, 计算验证了析出强化能大幅提升材料强度。

动态拉伸塑性变形过程中, 纳米级渗碳体的含量增加, 基体和渗碳体间的相互作用增强, 加剧了位错运动所受阻碍作用, 从而产生额外的塑性变形抗力。由于纳米级渗碳体尺寸很小, 弥散强化以 Orowan 绕过机制为主导, 即位错线移动既要克服渗碳体的阻碍作用, 又要克服渗碳体周围位错环的反作用力。纳米渗碳体在动态加载条件下的析出行为, 是超细晶 D6A 钢动态强度进一步提升的另一个主要原因, 也是超细晶钢呈现应变率效应的重要原因之一。

采用数字式小型显微镜对动态拉伸试件断口长度进行测量, 510 nm 超细晶 D6A 钢平均延伸率为 12.75% (见表 3), 相较于准静态延伸率(25%)明显下降。对断口处的微观形貌进行观察, 如图 9 所示。在准静态拉伸时, 断口分布着较多均匀细小的韧窝, 此时韧窝平均尺寸约 0.5  $\mu\text{m}$  (见图 9(a)), 这表明超细晶钢发生了韧性断裂, 并且拥有良好的塑性。在动态拉伸时, 拉伸断口的韧窝数量明显降低 (见图 9(b)), 这表明在断裂过程中超细晶钢吸收了更少的能量, 表现出更低的塑韧性, 这也是动态加载时超细晶钢塑性降低的原因之一。此外, 在动态加载的剧烈塑性变形下, 材料内部晶格发生挤压扭曲导致晶粒破碎, 纳米级渗碳体提供了足够多的形核位点, 材料出现再结晶行为, 并生成细小均匀的等轴晶粒。随着晶粒尺寸降低, 超细晶 D6A 钢内部晶界密度持续升高, 最终导致材料延伸率的降低。

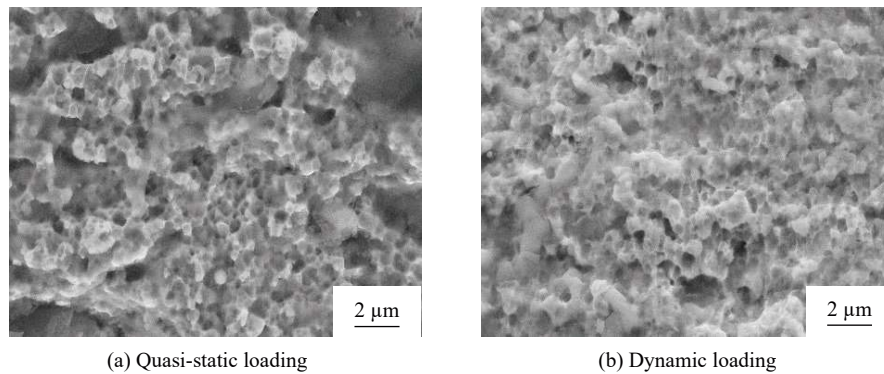


图 9 超细晶 D6A 钢拉伸断口形貌

Fig. 9 The tensile fracture morphology of the ultrafine grained D6A steel

## 2.4 应力下降现象分析

超细晶钢的动态拉伸曲线 (见图 6) 呈现了应力快速下降现象。这个现象在其他的超细晶材料中也广泛存在。目前, 研究结论多集中在热软化和绝热剪切破坏方面。Wei 等<sup>[8]</sup>通过细观观测发现, 绝热剪切局部化是超细晶金属塑性失稳的一种主要形式, 经过一定均匀应变后, 绝热剪切带触发并始终伴随局部绝热温升。在体心立方超细晶金属中, 沿绝热剪切带的继续开裂将会成为主要的动态破坏机制。Zener 等<sup>[21]</sup>提出了本构热塑失稳的概念, 认为屈服下降是热软化效应超过应变硬化和应变率硬化效果, 从而触发绝热剪切带导致的结果。然而, 在钛合金的动态力学行为研究中, 只有当应变和应变率达到临界值时, 才能观察到剪切带的出现, 绝热剪切带的触发应同时考虑应变和应变率两个因素<sup>[22]</sup>。显然, 本文中未达到宏观绝热剪切带形成的临界值, 从超细晶钢拉伸口形貌 (见图 9) 中也没有观察到剪切带的存在。至此, 可以认为, 导致 510 nm 超细晶 D6A 钢试件破坏的本质并非热软化触发绝热剪切破坏。

位错密度是控制金属力学性能的决定因素<sup>[23-24]</sup>。金属塑性变形伴随着大量位错的滑移运动, 位错数量及其运动学特征深刻影响着材料宏观力学性能。从物理角度分析, 屈服下降是可动位错密度升高的结果<sup>[25]</sup>。该理论要求, 材料在塑性变形前应具有较低的可动位错密度, 以确保有足够的新生位错的增殖空间。经过分析认为, 超细晶 D6A 钢满足基本条件, 原因如下: (1) 超细晶 D6A 钢由原始粗晶钢经过九道次轧制获得, Barmouz 等<sup>[26]</sup>已经证实多道次加工的金属材料相较于单道次有着更低的可动位错密度; (2) 超细晶钢的制备材料长期处于高温环境, 温度越高位错回复速率越快, 加热及恒温过程可以消除可动

位错; (3) 根据 Cottrell 位错钉扎理论, 钢中高密度晶界和溶质原子(如 C、N)会生成柯氏气团对剩余位错进行束缚, 导致其可流动性降低。

由文献 [27] 可知, 动态拉伸过程中可动位错密度升高的原因可以归为两部分。(1) 原始位错解锁: 当超细晶钢内部应力足够大时, 初始固定位错便可挣脱钉扎束缚自由滑移甚至拖动柯氏气团一起运动, 此时便形成可动位错。(2) 新生位错增殖: 当应力足够大时材料进入塑性变形模式, 此时纳米渗碳体及晶界又成为位错形核的源, 位错增殖是塑性变形传播的重要形式。

### 3 结 论

运用旋转盘式 Hopkinson 拉伸实验系统, 开展了 510 nm 超细晶 D6A 低合金钢的动态拉伸实验, 获得了不同应变率下超细晶 D6A 钢的应力-应变曲线, 并结合 TEM 细观观测技术, 研究了超细晶钢在动态拉伸作用下的力学行为特性及细观机理。通过分析实验结果, 可得到以下结论。

(1) 超细晶 D6A 钢在跨应变率加载作用下, 呈现明显的应变率强化效应。在准静态加载下, 拉伸强度为 1 100~1 120 MPa, 而在高应变率拉伸下可提高至 1 950~2 240 MPa。高应变率作用下, 位错运动速率升高导致的临界滑移切应力增大以及纳米渗碳体析出强化, 是超细晶 D6A 钢拉伸动态强度显著提升的主要因素。

(2) 超细晶 D6A 钢的延伸率从静态变形的 25% 降低至动态变形的约 13%。断口形貌微观观测显示, 相较于准静态拉伸, 动态加载试件韧窝数量较少, 塑性降低; 剧烈塑性变形下, 超细晶钢的平均晶粒尺寸减小, 材料内部晶界密度持续升高, 最终导致超细晶 D6A 钢动态加载延伸率的降低。

(3) 在动态拉伸时, 应力到达峰值后出现应力下降现象。这个现象由可动位错密度的升高导致, 可动位错密度改变是原始位错解锁和新生位错增殖共同作用的结果。

### 参考文献:

- [1] JIA D, RAMESH K T, MA E. Effects of nanocrystalline and ultrafine grain sizes on constitutive behavior and shear bands in iron [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(12): 3495–3509. DOI: 10.1016/s1359-6454(03)00169-1.
- [2] OKITSU Y, TAKATA N, TSUJI N. Mechanical properties of ultrafine grained ferritic steel sheets fabricated by rolling and annealing of duplex microstructure [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(23/24): 7391–7396. DOI: 10.1007/s10853-008-2971-9.
- [3] OKITSU Y, TAKATA N, TSUJI N. Dynamic deformation behavior of ultrafine-grained iron produced by ultrahigh strain deformation and annealing [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 64(9): 896–899. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.01.026.
- [4] HU Y S, YU Z Y, FAN G L, et al. Simultaneous enhancement of strength and ductility with nano dispersoids in nano and ultrafine grain metals: a brief review [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2020, 59(1): 352–360. DOI: 10.1515/rams-2020-0028.
- [5] 王鹏杰, 申勇峰, 冯晓伟, 等. 轧制-退火工艺制备超细晶 D6A 钢的微观组织与织构 [J]. *钢铁研究学报*, 2016, 28(9): 54–59. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20160042.  
WANG P J, SHEN Y F, FENG X W, et al. Microstructures and textures of ultrafine grained D6A steel by using rolling and annealing [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2016, 28(9): 54–59. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20160042.
- [6] JIA N, SHEN Y F, LIANG J W, et al. Nanoscale spheroidized cementite induced ultrahigh strength-ductility combination in innovatively processed ultrafine-grained low alloy medium-carbon steel [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2679. DOI: 10.1038/s41598-017-02920-9.
- [7] LIANG J W, SHEN Y F, ZHANG C S, et al. In situ neutron diffraction in quantifying deformation behaviors of nano-sized carbide strengthened UFG ferritic steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 726: 298–308. DOI: 10.1016/j.msea.2018.04.094.
- [8] WEI Q, SCHUSTER B E, MATHAUDHU S N, et al. Dynamic behaviors of body-centered cubic metals with ultrafine grained and nanocrystalline microstructures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 493(1/2): 58–64. DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.126.



- [9] 张世雄. 超细晶/纳米晶纯钛的制备及动态力学性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 43–50.
- [10] 刘晓燕, 张琪, 杨西荣, 等. 超细晶工业纯钛的变形、应变速率敏感性和激活体积 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 1867–1872.  
LIU X Y, ZHANG Q, YANG X R, et al. Deformation, strain rate sensitivity and activation volume of ultrafine-grained commercially pure Ti [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(6): 1867–1872.
- [11] LIANG J W, SHEN Y F, MISRA R D K, et al. High strength-superplasticity combination of ultrafine-grained ferritic steel: the significant role of nanoscale carbides [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2021, 83: 131–144. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.11.078.
- [12] TSUJI N, ITO Y, SAITO Y, et al. Strength and ductility of ultrafine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47(12): 893–899. DOI: 10.1016/S1359-6462(02)00282-8.
- [13] ZAISER M. Scale invariance in plastic flow of crystalline solids [J]. *Advances in Physics*, 2006, 55(1/2): 185–245. DOI: 10.1080/00018730600583514.
- [14] ZHANG T W, JIAO Z M, WANG Z H, et al. Dynamic deformation behaviors and constitutive relations of an AlCoCr<sub>1.5</sub>Fe<sub>1.5</sub>NiTi<sub>0.5</sub> high-entropy alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 136: 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.03.039.
- [15] ZHANG T W, MA S G, ZHAO D, et al. Simultaneous enhancement of strength and ductility in a NiCoCrFe high-entropy alloy upon dynamic tension: micromechanism and constitutive modeling [J]. *International Journal of Plasticity*, 2020, 124: 226–246. DOI: 10.1016/j.ijplas.2019.08.013.
- [16] MEYERS M A. *Dynamic behavior of materials* [M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 1994: 345–349. DOI: 10.1002/9780470172278.
- [17] DE HOSSON J T M, ROOS A, HOSSON E D. Temperature rise due to fast-moving dislocations [J]. *Philosophical Magazine A*, 2001, 81(5): 1099–1120. DOI: 10.1080/01418610108214431.
- [18] QIN K, YANG L M, HU S S. Mechanism of strain rate effect based on dislocation theory [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(3): 036103. DOI: 10.1088/0256-307X/26/3/036103.
- [19] GLADMAN T. Second phase particle distribution and secondary recrystallisation [J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1992, 27(11): 1569–1573. DOI: 10.1016/0956-716X(92)90146-6.
- [20] ZHOU B C, YANG T, ZHOU G, et al. Mechanisms for suppressing discontinuous precipitation and improving mechanical properties of NiAl-strengthened steels through nanoscale Cu partitioning [J]. *Acta Materialia*, 2021, 205: 116561. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.116561.
- [21] ZENER C, HOLLomon J H. Plastic flow and rupture of metals [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1944, 33: 163–235.
- [22] 徐永波, 白以龙. 动态载荷下剪切变形局部化、微结构演化与剪切断裂研究进展 [J]. *力学进展*, 2007, 37(4): 496–516. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2007.04.002.  
XU Y B, BAI Y L. Shear localization, microstructure evolution and fracture under high-strain rate [J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(4): 496–516. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2007.04.002.
- [23] SWADENER J G, MISRA A, HOAGLAND R G, et al. A mechanistic description of combined hardening and size effects [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47(5): 343–348. DOI: 10.1016/S1359-6462(02)00156-2.
- [24] GRAÇA S, COLAÇO R, VILAR R. Indentation size effect in nickel and cobalt laser clad coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202(3): 538–548. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.031.
- [25] REZAEE M, ZAREI-HANZAKI A, MOHAMADIZADEH A, et al. High-temperature flow characterization and microstructural evolution of Ti6242 alloy: yield drop phenomenon [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 673: 346–354. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.043.
- [26] BARMOUZ M, ABRINIA K, KHOSRAVI J. Using hardness measurement for dislocation densities determination in FSPed metal in order to evaluation of strain rate effect on the tensile behavior [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 559: 917–919. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.086.
- [27] FAN J K, KOU H C, LAI M J, et al. High temperature discontinuous yielding in a new near  $\beta$  titanium alloy Ti-7333 [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(4): 808–812. DOI: 10.1016/S1875-5372(14)60089-8.

(责任编辑 丁峰)