

考虑晶粒尺寸影响的金属铀的 Johnson-Cook 本构模型研究

董鹏, 肖大武*

(中国工程物理研究院材料研究所, 四川 绵阳 621907)

摘要: **目的** 获得晶粒尺寸对金属铀静态力学性能的影响规律, 为数值仿真研究提供基础数据。**方法** 采用铸造粗晶铀样品, 经单轴压缩或等径角挤压 (ECAP) 后再结晶处理, 制备得到不同晶粒尺寸的细晶铀样品, 对不同晶粒尺寸铀样品开展准静态压缩或者高应变率动态压缩试验, 得到不同应变率下金属铀的应力应变试验数据。处理试验数据, 得到不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 本构模型参数。假定金属铀的屈服强度与晶粒尺寸之间满足 Hall-Petch 关系, 拟合金属铀的屈服强度与晶粒尺寸之间的关系。**结果** 获得了不同晶粒尺寸金属铀的静态力学性能数据, 建立了考虑晶粒尺寸影响的金属铀的 Johnson-Cook 本构模型。**结论** 金属铀的晶粒尺寸对其静态力学性能的影响很大, 随着金属铀的晶粒尺寸减小, 屈服强度明显增大。在相同晶粒尺寸下, 随应变率提高, 屈服强度提高。金属铀的变形以孪晶变形为主。

关键词: 铀; 晶粒尺寸; 静态力学性能; Johnson-Cook 本构模型; Hall-Petch 关系

中图分类号: TG135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2025)04-0010-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.002

Johnson-Cook Constitutive Model of Uranium Considering the Effect of Grain Size

DONG Peng, XIAO Dawu*

(Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621907, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the effect of grain size on the static and dynamic mechanical properties of uranium, to provide basic data for numerical simulation research. Fine-grained uranium samples with different grain sizes were prepared by casting coarse-grained uranium samples by uniaxial compression or equal channel angular extrusion (ECAP) and then recrystallization, and the quasi-static compression or high strain rate dynamic compression tests were carried out on uranium samples with different grain sizes and finally the stress-strain experimental data of uranium metal at different strain rates were obtained. The experimental data were processed to obtain the Johnson-Cook constitutive model parameters of uranium with different grain sizes and it was assumed that the Hall-Petch relationship between the yield strength and grain size of uranium satisfied the Hall-Petch relationship and the relationship between the yield strength of uranium metal and grain size was fitted. The static and dynamic mechanical properties of uranium with different grain sizes were obtained, and the Johnson-Cook constitutive model of

收稿日期: 2024-11-25; 修订日期: 2025-02-18

Received: 2024-11-25; Revised: 2025-02-18

基金项目: 国家自然科学基金 (52394163)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52394163)

引文格式: 董鹏, 肖大武. 考虑晶粒尺寸影响的金属铀的 Johnson-Cook 本构模型研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 10-16.

DONG Peng, XIAO Dawu. Johnson-Cook Constitutive Model of Uranium Considering the Effect of Grain Size[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 10-16.

*通信作者 (Corresponding author)

uranium considering the effect of grain size was established. The grain size of uranium has a great effect on its static and dynamic mechanical properties, and the yield strength increases significantly with the decrease of the grain size of uranium. Under the same grain size, the yield strength increases with the increase of the strain rate. The deformation of uranium is dominated by twin deformation.

KEY WORDS: uranium; grain size; static and dynamic mechanical properties; Johnson-Cook constitutive model; Hall-Petch relationship

金属铀是一种高密度金属,常用作穿甲弹等动能武器,在使用过程中,会受到高应变率的动态冲击加载^[1-2]。为了对金属铀使用过程的动态冲击加载变形进行数值仿真,必须建立金属铀在高应变率动态冲击加载下的材料动态变形本构关系。国内外的大量试验研究均表明^[3-6],金属铀的静动态力学性能受多种因素的影响,包括杂质含量、热处理、晶粒尺寸、应变率和温度等。未合金化的金属铀晶粒粗大,织构明显,使得金属铀的静动态力学性能变化明显^[7]。Sherby 等^[8]对铀及合金的力学性能进行了研究,发现铀的力学性能主要受晶体结构和内部缺陷的影响。Kozlov 等^[9]对细晶金属铀爆炸加载前后的组织结构和力学性能进行了研究,发现铀在高应变率下主要为孪晶变形。当铀中杂质含量较高时,其断裂总在杂质处优先形核,使得杂质对金属铀力学性能的影响较大,晶粒尺寸的影响相对较小。何立峰等^[10]对 2 种不同晶粒尺寸的金属铀样品进行了静动态力学性能研究,发现晶粒尺寸对铀样品力学性能的影响明显,大晶粒铀样品的屈服强度在 200~400 MPa,小晶粒铀样品在 500~700 MPa,金属铀变形以孪晶变形为主,并针对小晶粒铀样品试验数据建立了材料本构关系。邹东利等^[11]采用等径角挤压 (ECAP) 和退火热处理相结合,制备得了到晶粒尺寸在 6.5~1 000 μm 的铀样品,并采用霍普金森杆 (SHPB) 研究了其动态力学性能。结果表明,在接近 2 000 s^{-1} 应变率下,金属铀的动态屈服强度由粗晶时的 135 MPa 增大到细晶时的 390 MPa。再根据对不同铀样品的晶粒尺寸测量,拟合得到了铀的动态屈服强度与晶粒尺寸之间的关系,发现它们之间满足良好的 Hall-Petch 关系,但仅研究了特定应变率下金属铀的力学性能,未对其他应变率下的力学性能进行研究。总体来看,目前国内外对金属铀的力学性能和变形机制进行了较多的研究,但尚未建立能够同时考虑晶粒尺寸和应变率影响的材料动态本构关系。

为了系统认识晶粒尺寸对金属铀静动态力学性能的影响规律,开展不同晶粒尺寸金属铀冲击加载过程的数值仿真研究,需要建立一种能够同时考虑金属铀晶粒尺寸和应变率影响的材料动态本构关系。Johnson-Cook 本构关系自从 20 世纪 80 年代提出以来^[12-13],因其表达形式简单和含义明确,能够综合考虑材料变形过程中塑性应变、应变率和温度的综合影响,在工程研究中已经得到了广泛的应用。本文先采用铸造粗晶铀

样品通过单轴压缩或等径角挤压后再结晶处理,制备得到不同晶粒尺寸的金属铀样品,然后开展不同晶粒尺寸铀样品的静动态压缩力学性能试验,利用试验数据建立考虑金属铀晶粒尺寸和应变率影响的 Johnson-Cook 本构关系。对回收样品进行金相分析,探讨晶粒尺寸对金属铀变形机制的影响。

1 试验

1.1 样品制备与试验方法

不同晶粒尺寸的金属铀样品采用铸造粗晶样品(晶粒尺寸为 400~800 μm)经过单轴压缩或等径角挤压 (ECAP) 后再结晶处理制备得到。试验表明^[11],经过多次单轴压缩和 3 次再结晶处理,可以将初始平均晶粒尺寸约 600 μm 的粗晶铀样品减小为 20~30 μm 细小等轴晶,但难以进一步降低。采用 3 次等径角挤压和 3 次退火,则可以将粗晶铀样品的晶粒尺寸最多减小至约 10 μm 。粗晶铀样品以及采用不同方法处理后制备得到细晶铀样品的电子束背散射 (EBSD) 观测图如图 1 所示,可见粗晶铀样品和细晶铀样品的晶粒尺寸明显不同,并且晶粒尺寸存在一定的变化范围。铀样品经过晶粒细化处理后,利用线切割机将其切割成若干 $\phi 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的圆柱状试样,供静态和动态压缩力学性能试验使用。

利用 CSS-44100 型材料试验机对铀样品进行准静态压缩试验,试验速度为 0.2 mm/min,应变率约 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。采用引伸计测量试样压缩过程的轴向变形,试验时在试样上下两端与试验机压头接触部位涂抹一定量的二硫化钼 (MoS_2),以降低试样在压制过程中由于摩擦引起的不均匀变形。利用直径为 $\phi 10 \text{ mm}$ 的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 进行动态压缩试验,试样两端仍然涂抹一定量的 MoS_2 ,以降低摩擦产生的应力波弥散。通过调节撞击杆的撞击速度,控制 SHPB 试验过程试样的平均应变率在 480~6 000 s^{-1} 。力学性能试验后,回收样品,沿样品加载方向研磨抛光,然后在 1:1 的 H_3PO_4 水溶液中浸蚀。最后利用金相显微镜分析试样的显微组织形貌。

1.2 数据处理

对不同晶粒尺寸的金属铀样品开展准静态压缩试验,可以获得力-位移曲线,SHPB 试验可以获得应

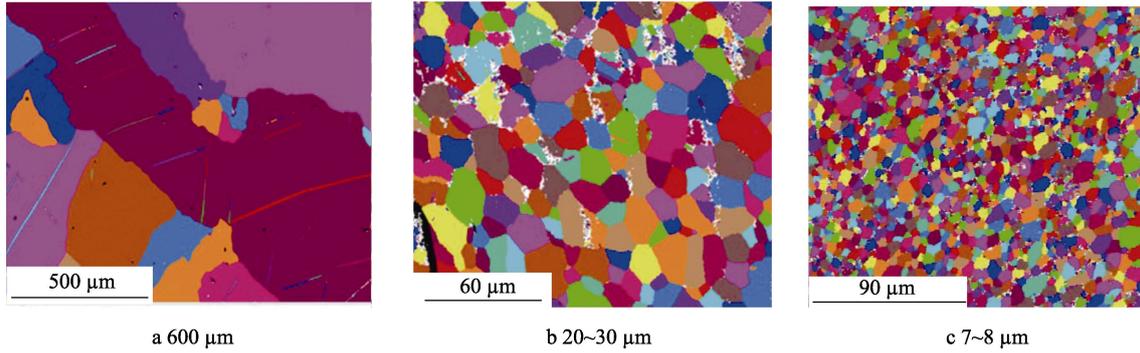


图1 不同尺度晶粒尺寸对比

Fig.1 Comparison of grain sizes of different scales

力波形。以这些试验数据为基础,可以计算出不同晶粒尺寸金属铀在不同应变率下的工程应力-应变曲线 ($\sigma_{\text{eng}}-\varepsilon_{\text{eng}}$),然后将其转化为真应力-真应变曲线 ($\sigma-\varepsilon$),转化方法如下^[14]:

$$\sigma = \sigma_{\text{eng}} (1 + \varepsilon_{\text{eng}}) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{\text{eng}}) \quad (2)$$

利用不同晶粒尺寸铀样品在不同应变率下的真应力-真应变曲线,可以拟合得到不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 本构模型参数。Johnson-Cook 本构模型广泛用于材料动态变形的数值仿真,该模型为经验性本构模型,假定材料各向同性变形,塑性流动应力由应变强化、应变率强化和温度软化 3 部分组成,其表达式为^[15,16]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) [1 - (t^*)^m] \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 和 m 分别为屈服应力、硬化模量、应变率敏感系数、硬化指数和温度软化指数; ε_p 为塑性应变; $\varepsilon^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, 其中 $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $t^* = (t - t_r) / (t_m - t_r)$, 其中 t 为温度, t_m 为熔点, t_r 为参考温度。当不考虑温度影响时,式(3)可以简化为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (4)$$

式(4)中,第一项表示室温及参考应变率下的 $\sigma-\varepsilon$ 关系,利用室温 $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ 、应变率为 $\dot{\varepsilon}=1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时试验获得的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线来确定参数 A 、 B 和 n , 具体确定方法如下^[17-19]。

1) 参数 A 的确定。在 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 参考应变率(准静态)下,式(4)可简化为:

$$\sigma = A + B\varepsilon_p^n \quad (5)$$

取金属铀应变达到 0.2% 时的应力作为屈服应力,即为参数 A 的值。

2) 参数 B 和 n 的确定。将式(5)两边同时取对数,并将参数 A 回代得到:

$$\ln(\sigma - A) = n \ln \varepsilon + \ln B \quad (6)$$

令 $y = \ln(\sigma - A)$, $x = \ln \varepsilon$, 对 $x-y$ 曲线进行线性

拟合,得到曲线的斜率为 n ,截距为 $\ln B$,据此计算出参数 B 和 n 的值。

3) 参数 C 的确定。对比相同晶粒尺寸在不同应变率下的应力应变试验数据,可以得到参数 C 的值。室温下,金属铀的塑性流动应力和应变率的关系为:

$$\sigma = A'(1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (7)$$

式中: A' 为准静态下的塑性流动应力。通过 SHPB 试验,得到常温下金属铀动态变形的塑性流动应力 σ 和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系。利用 A' 对 σ 进行归一化处理,并令 $y = \frac{\sigma}{A'} - 1$, $x = \ln \varepsilon^*$, 对 $x-y$ 曲线进行线性拟合,

得到的曲线斜率,即为参数 C 值。在获得不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 本构模型参数之后,认为金属铀的屈服应力与晶粒尺寸之间满足 Hall-Petch 关系^[20-21],对二者之间关系进行线性拟合,就能够得到考虑晶粒尺寸影响的金属铀 Johnson-Cook 本构模型。

2 结果和讨论

2.1 应力应变曲线

在准静态压缩和动态冲击过程中,样品均先发生线弹性变形,当变形增大到一定程度,发生塑性变形^[22-23]。从最大弹性变形刚开始发生塑性变形(应变约 0.2%)时的应力为屈服应力,拟合塑性变形阶段应力和塑性应变之间的关系,可以得到硬化模量和硬化指数^[24]。试验得到的 4 种不同晶粒尺寸铀样品在不同应变率下的真应力真应变曲线如图 2 所示。其中,图 2a~d 采用铀样品的晶粒尺寸依次增大,各图中黑色曲线的应变率为 0.001 s^{-1} ,为准静态压缩曲线,其他曲线为 SHPB 动态压缩曲线。可见,随着铀样品晶粒尺寸的增大,准静态压缩的屈服应力逐渐降低,由最小晶粒时的约 850 MPa 逐渐降低到最粗晶粒时的约 180 MPa,说明铀的晶粒尺寸对其屈服应力有非常明显的影响。对于同种晶粒尺寸的铀样品,随动态压缩的应变率增加,铀的屈服应力增大,但在不同应变率下,硬化模量的变化规律并不明显。不同应变率下,细晶铀样品的应力应变曲线稳定,试验数据的波动较

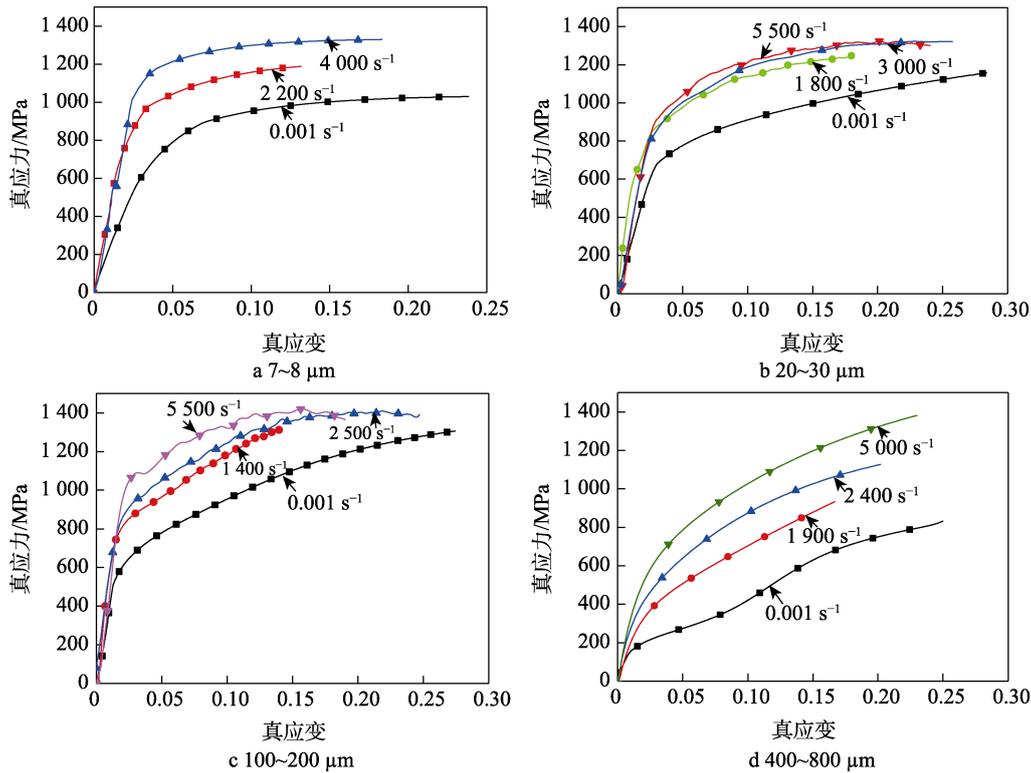


图 2 不同晶粒尺寸铀的应力应变关系

Fig.2 Stress-strain relationship of uranium with different grain sizes

小, 曲线的重复性较好, 但随着铀样品晶粒尺寸的增大, 铀样品的应力应变曲线逐渐不稳定, 试验数据的波动增大, 曲线重复性变差。此外, 对不同晶粒尺寸的铀样品, 随着铀样品的晶粒尺寸增大, 其硬化模量有逐渐增大的趋势。

2.2 Johnson-Cook 模型参数拟合结果

对图 2 中不同晶粒尺寸金属铀的应力应变曲线分别进行数据处理并拟合, 可以得到不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 本构模型参数 A 、 B 、 n 和 C 。对于参数 A , 实质为金属铀的屈服应力, 以不同晶粒尺寸金属铀应力应变曲线在 0.2% 应变时的应力值作为参数 A 的取值, 该参数可以直接从图 2 曲线读取。对于参数 B 、 n 和 C , 则采用 1.2 节方法对应力应变

曲线数据进行线性拟合得到, 不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 本构模型中参数 B 、 n 以及参数 C 的拟合曲线如图 3 所示, 可见各曲线具有较好的线性关系。其中, 晶粒尺寸在 400~800 μm 的金属铀的曲线较其他 3 种尺寸晶粒金属铀的曲线存在一定差异, 主要由于该晶粒尺寸金属铀在准静态下的屈服应力较低。根据拟合曲线的斜率和截距, 得到不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 本构模型参数的拟合结果, 见表 1。由于每组铀样品的晶粒尺寸均在一定范围内变化, 表中取每组铀样品晶粒尺寸的中值 d 作为该组样品晶粒尺寸的特征值。可见, 金属铀的屈服应力 (A) 随晶粒尺寸增大逐渐减小, 硬化模量 (B) 和硬化指数 (n) 也基本随晶粒尺寸增大有所增大, 但不同晶粒尺寸金属铀的硬化常数 (C) 变化规律不太明显。

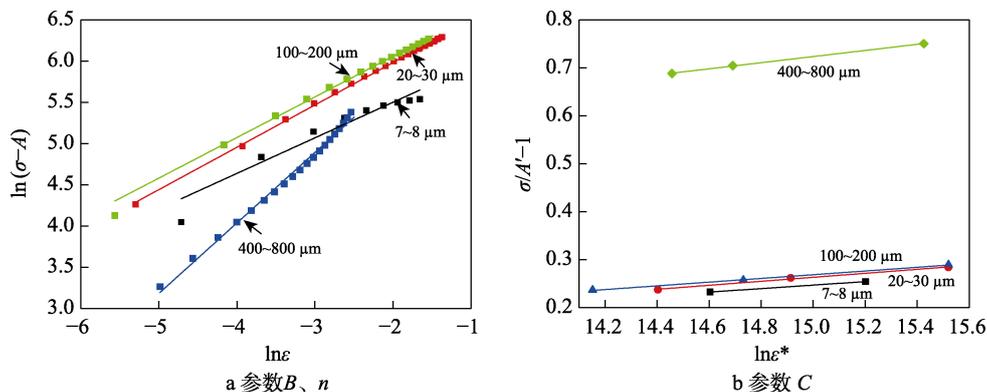


图 3 不同晶粒尺寸铀的 J-C 模型参数拟合

Fig.3 J-C model parameter fitting for uranium with different grain sizes: a) parameter B and n ; b) parameter C

表 1 不同晶粒尺寸 (d) 金属铀的 J-C 本构模型参数拟合结果

Tab.1 Fitting results of J-C constitutive parameters of uranium with different grain sizes

$d/\mu\text{m}$	$d_{\text{middle}}/\mu\text{m}$	A/MPa	B/MPa	n	C
7~8	7.5	860.0	679.0	0.43	0.036
20~30	25	612.5	1 107.6	0.51	0.041
100~200	150	382.0	1 141.4	0.50	0.039
400~800	600	180.0	1 635.0	0.75	0.063

大量的试验研究表明^[25-26], 金属材料的屈服应力与晶粒尺寸之间均满足 Hall-Petch 关系, 即屈服应力 (σ_y) 与晶粒尺寸平方根的倒数 ($d^{-1/2}$) 之间呈线性关系。前期邹东利等^[11]对金属铀的动态屈服应力研究也得到了类似结果。为了建立不同晶粒尺寸金属铀统一表达形式的 Johnson-Cook 本构模型, 适应对不同晶粒尺寸金属铀动态变形的数值预测, 对金属铀准静态下的屈服应力 (表 1 中 A 值) 与 $d^{-1/2}$ 之间的关系进行线性拟合, 结果如图 4 所示。可见, 二者也具有较好的线性关系, 其表达式为:

$$\sigma_y = 169.1 + \frac{1975.0}{\sqrt{d}} \quad (8)$$

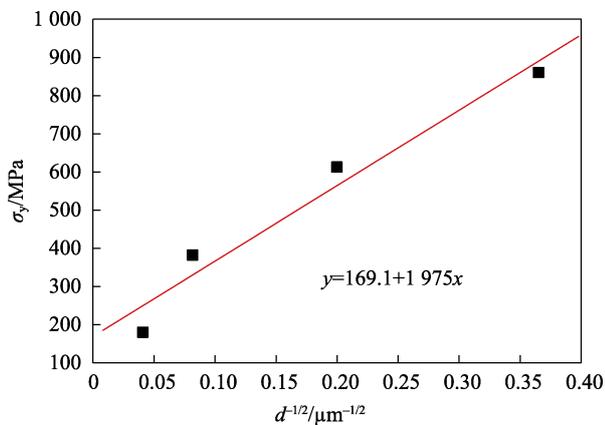


图 4 金属铀屈服应力与晶粒尺寸 Hall-Petch 关系拟合
Fig.4 Hall-Petch relationship fitting between yield stress and grain size of uranium

文献研究表明^[27-29], Johnson-Cook 本构模型中的硬化模量和硬化指数参量主要受金属变形过程中位错密度的数量影响, 而金属的塑性变形和晶粒尺寸等对位错密度都有影响, 增大塑性变形和减小晶粒尺寸, 都能够增加金属塑性变形过程的位错密度, 使金属的硬化模量和硬化指数增大, 但目前还未能建立起硬化模量和硬化指数与晶粒尺寸之间的定量数学模型。因此, 本文研究暂不考虑 Johnson-Cook 模型中 B 、 n 和 C 值与晶粒尺寸之间的关系, 在最终的 Johnson-Cook 模型中取不同晶粒尺寸金属铀对应参数的平均值, 得到: $B=1\ 140.8\ \text{MPa}$, $n=0.55$, $C=0.045$ 。综合

以上研究, 得到考虑金属铀的晶粒尺寸变化而不考虑温度效应的 Johnson-Cook 本构模型:

$$\sigma_y = \left[\left(169.1 + \frac{1975.0}{\sqrt{d}} \right) + 1\ 140.8 \varepsilon_p^{0.55} \right] \left[1 + 0.045 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \quad (9)$$

其中, 取 $\dot{\varepsilon}_0 = 0.001\ \text{s}^{-1}$ 。

2.3 晶粒尺寸对金属铀的变形机制影响初步探讨

本文试验表明, 大晶粒金属铀的屈服强度要远低于小晶粒金属铀, 说明晶粒尺寸对金属铀的力学性能影响很大。对不同晶粒尺寸金属铀样品进行准静态压缩和动态冲击试验后, 回收试验样品, 制备成金相样品, 并利用激光共聚焦显微镜金相观察, 探讨晶粒尺寸对金属铀变形机制的影响。小晶粒铀样品准静态和动态压缩后回收样品的金相组织如图 5 所示, 可见, 小晶粒样品变形前后的晶粒尺寸变化不大, 但变形后孪晶组织增多, 且由于晶粒细小, 变形孪晶只能在很小空间内形成。变形过程中, 小晶粒内的孪晶转动和晶间协调较容易, 孪晶的形成方向与压缩方向没有明显相关性。大晶粒样品准静态和动态变形后回收样品的金相组织如图 6 所示, 可见大晶粒样品在准静态和动态变形后也产生了变形孪晶, 但部分晶粒破碎形成新的亚结构, 这可能与大晶粒样品晶粒粗大, 晶间转动和晶间协调困难有关。大晶粒样品形成的变形孪晶穿过亚结构, 这些亚结构与晶格之间有一定关联。大晶粒样品准静态压缩产生的变形孪晶与小晶粒样品形成的变形孪晶相似, 与压缩方向没有关联, 但动态冲击产生的变形孪晶, 在与加载方向约 45° 的最大切应力方向形成。这可能是由于准静态变形速率慢, 孪晶有足够时间形成, 而动态冲击的变形速率很快, 大晶粒晶间转动和晶间协调困难, 当主要孪晶启动后, 次要孪晶启动困难, 很难形成大量的孪晶变形。因此, 大晶粒样品的动态变形以主要孪晶系的变形为主, 启动的孪晶系很少。

综合应力应变曲线和金相分析结果, 初步认为金属铀塑性变形阶段以孪晶变形为主。对粗晶铀样品, 当孪晶变形增大到一定程度后, 晶间协调困难, 导致晶间只能发生错动而非转动, 使得晶粒破碎。大晶粒动态冲击产生的变形孪晶在与加载方向约 45° 方向形成。应变率越高, 变形速率越快, 启动孪晶系越少。虽然大晶粒样品孪晶变形困难, 但晶粒数量少, 使得屈服应力相对较小。细晶铀样品的晶粒细小, 变形孪晶多, 晶间转动和协调较容易, 准静态和动态压缩形成的变形孪晶方向与压缩方向无明显关联, 细晶粒样品的晶粒数量多, 使得屈服应力升高。

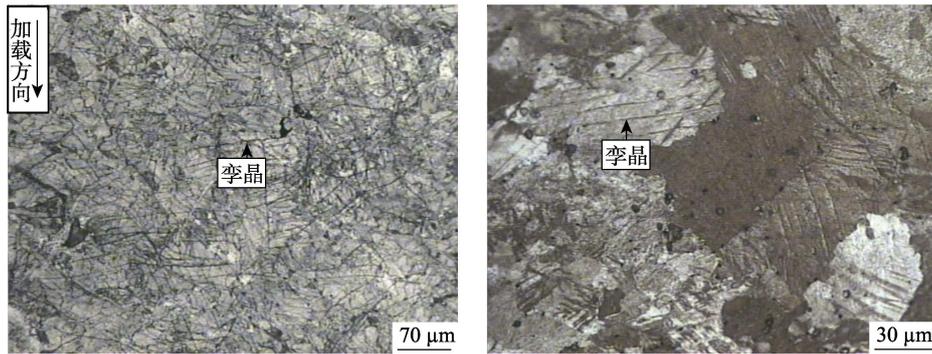
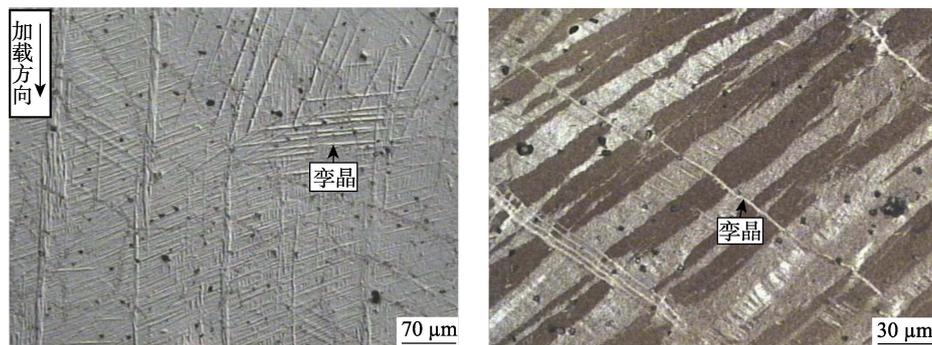
图 5 小晶粒金属铀在准静态和 $3\ 800\ \text{s}^{-1}$ 应变率压缩后的金相组织Fig.5 Metallographic structure of fine-grained uranium after quasi-static and $3\ 800\ \text{s}^{-1}$ strain rate compression

图 6 大晶粒金属铀准静态和动态变形后的金相组织

Fig.6 Metallographic structure of coarse-grained uranium after quasi-static and dynamic deformation

3 结论

1) 金属铀的晶粒尺寸对静态和动态力学性能都有很大影响, 随着铀样品的晶粒尺寸增大, 金属铀的屈服强度明显降低, 二者较好符合 Hall-Petch 关系。此外, 金属铀的晶粒尺寸对硬化模量和硬化指数也有一定的影响。在相同晶粒尺寸下, 随着试验应变率的提高, 金属铀的屈服强度明显增加。

2) 通过不同晶粒尺寸金属铀的应力应变试验数据, 拟合得到了不同晶粒尺寸金属铀的 Johnson-Cook 模型参数, 并进一步建立得到了考虑晶粒尺寸影响的金属铀的 Johnson-Cook 本构模型。

3) 金属铀的变形以孪晶变形为主, 对细晶铀样品, 孪晶尺寸小, 数量多, 晶间转动和错动协调相对容易, 变形过程中应力应变稳定, 但对粗晶铀样品, 参与孪晶变形的晶粒少。当孪晶变形增大到一定程度后, 晶间协调困难, 主要发生晶间错动, 变形过程中的应力应变易波动。

参考文献:

- [1] ZHU F L, CHEN Y, ZHU G L. Numerical Simulation Study on Penetration Performance of Depleted Uranium (DU) Alloy Fragments[J]. Defence Technology, 2021, 17(1): 50-55.
- [2] ZHU F L, CHEN Y, CUI W C, et al. Study on Impact Initiation of Composition B by DU Alloy Fragment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 69-72.
- [3] ADDESSIO F L, ZUO Q H, MASON T A, et al. Model for High-Strain-Rate Deformation of Uranium-Niobium Alloys[J]. 2003, 93(12): 9644-9654.
- [4] ZUBELEWICZ A, ADDESSIO F L, CADY C M. A Constitutive Model for a Uranium-Niobium Alloy[J]. 2006, 100(1): 013523.
- [5] ZHANG J Z, HACKENBERG R E, WATKINS E B, et al. The Lattice Parameter-Composition Relationship of the Body Centered Cubic Uranium-Niobium Alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, 542: 152493.
- [6] WU A S, BROWN D W, CLAUSEN B, et al. The Influence of Impurities on the Crystal Structure and Mechanical Properties of Additive Manufactured U-14at.% Nb[J]. Scripta Materialia, 2017, 130: 59-63.
- [7] DONG Z, MICHAEL T B, KUN Y, et al. Grain Growth Kinetics of the Gamma Phase Metallic Uranium—Grain Size Impact[J]. Journal of Nuclear Materials, 2022, 574: 154185.
- [8] SHERBY O, BLY D, WOOD D H. Plastic Flow and Strength of Uranium and Its Alloys[R]. UCRL-75395, 1974.
- [9] KOZLOV E A, BONDARCHUK S V, ZUEV Y N, et al. Mechanisms of High-Strain-Rate Deformation and Fracture of Fine-Grained Unalloyed Uranium Upon Explosive

- Loading[J]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, 111(4): 410-420.
- [10] 何立峰, 马策, 肖大武, 等. 晶粒尺寸及应变率对金属轴压缩行为的影响[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(6): 758-763.
- HE L F, MA C, XIAO D W, et al. Effects of Grain Size and Strain Rate on Compressive Behavior for Depleted Uranium[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(6): 758-763.
- [11] ZOU D L, HE L F, XIAO D W, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Fine Grained Uranium Prepared by ECAP and Subsequent Intermediate Heat Treatment[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(10): 2749-2756.
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [13] KUMAR REDDY SIRIGIRI V, YADAV GUDIGA V, SHANKAR GATTU U, et al. A Review on Johnson Cook Material Model[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 3450-3456.
- [14] 吉昌兵, 刘嘉伟, 巩秀芳, 等. 浅谈金属材料的真应力-应变测试及曲线拟合[J]. *大型铸锻件*, 2023(1): 40-43.
- JI C B, LIU J W, GONG X F, et al. Discussion on True Stress-Strain Test and Curve Fitting of Metal Materials[J]. *Heavy Casting and Forging*, 2023(1): 40-43.
- [15] STEDEN J, THIMM B. A Comprehensive Sensitivity Analysis of Johnson-Cook Plasticity Parameters on Orthogonal Cutting Simulations[J]. *Procedia CIRP*, 2021, 102: 423-428.
- [16] WANG Y T, ZENG X G, CHEN H Y, et al. Modified Johnson-Cook Constitutive Model of Metallic Materials under a Wide Range of Temperatures and Strain Rates[J]. *Results in Physics*, 2021, 27: 104498.
- [17] 赵士忠, 冯超, 车全伟, 等. 6008 铝合金冲击实验及其动态本构模型[J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(4): 339-345.
- ZHAO S Z, FENG C, CHE Q W, et al. Impact Experiment and Dynamic Constitutive Model of 6008 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2019, 38(4): 339-345.
- [18] 张子群, 姜兆亮, 魏清月. 2219 铝合金动态力学性能及其本构关系[J]. *材料工程*, 2017, 45(10): 47-51.
- ZHANG Z Q, JIANG Z L, WEI Q Y. Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Equations of 2219 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(10): 47-51.
- [19] 王晨宇, 许进升, 李辉, 等. 高强 2A12 铝合金修正 Johnson-Cook 本构模型[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(1): 78-87.
- WANG C Y, XU J S, LI H, et al. Modified Johnson-Cook Constitutive Model of High Strength 2A12 Aluminum Alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(1): 78-87.
- [20] HANSEN N. Hall-Petch Relation and Boundary Strengthening[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(8): 801-806.
- [21] CORDERO Z C, KNIGHT B E, SCHUH C A. Six Decades of the Hall-Petch Effect—a Survey of Grain-Size Strengthening Studies on Pure Metals[J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(8): 495-512.
- [22] 戚承志, 钱七虎. 材料变形及损伤演化的微观物理动力机理[J]. *固体力学学报*, 2002, 23(3): 312-317.
- QI C Z, QIAN Q H. Physical Kinetic Mechanism of Evolution of Deformation and Damage of Materials[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2002, 23(3): 312-317.
- [23] 刘鸿文. *材料力学- II* [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- LIU H W. *Mechanics of Materials- II* [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.
- [24] 赵朋飞, 王育红, 张新运, 等. 含疏松缺陷的 ZL205A 合金力学性能研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(8): 88-94.
- ZHAO P F, WANG Y H, ZHANG X Y, et al. Mechanical Properties of the ZL205A Alloy of Porosity Defect[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(8): 88-94.
- [25] ARMSTRONG R W. 60 Years of Hall-Petch: Past to Present Nano-Scale Connections[J]. *Materials Transactions*, 2014, 55(1): 2-12.
- [26] KATO M. Hall-Petch Relationship and Dislocation Model for Deformation of Ultrafine-Grained and Nanocrystalline Metals[J]. *Materials Transactions*, 2014, 55(1): 19-24.
- [27] WANG P, YIN T H, QU S X. On the Grain Size Dependent Working Hardening Behaviors of Severe Plastic Deformation Processed Metals[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 178: 171-175.
- [28] CAO Y, NI S, LIAO X Z, et al. Structural Evolutions of Metallic Materials Processed by Severe Plastic Deformation[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2018, 133: 1-59.
- [29] LIU W, WANG R Q, ZHOU H B, et al. Modeling of Cryo-Deformation Based on Grain Size-Dependent Dislocation Evolution[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 285: 109813.