高压物理学报

动态载荷下CoCrFeNiMn高熵合金的压入行为

吴昆昆 刘聪 苏步云 邱吉 树学峰 康正东

Indentation Behavior of CoCrFeNiMn High-Entropy Alloys under Dynamic Loads

WU Kunkun, LIU Cong, SU Buyun, QIU Ji, SHU Xuefeng, KANG Zhengdong

引用本文:
吴昆昆, 刘聪, 苏步云, 等. 动态载荷下CoCrFeNiMn高熵合金的压入行为[J]. 高压物理学报, 2025, 39(4):044202. DOI: 10.11858/gywlxb.20251002
WU Kunkun, LIU Cong, SU Buyun, et al. Indentation Behavior of CoCrFeNiMn High-Entropy Alloys under Dynamic Loads[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(4):044202. DOI: 10.11858/gywlxb.20251002

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20251002

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

动态预压缩对CoCrFeNiMn高熵合金微尺度压入硬度的影响
Effect of Dynamic Pre-Compression on Micro-Scale Indentation Hardness of CoCrFeNiMn High-Entropy Alloy
高压物理学报. 2021, 35(6): 064101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210773

Al_xCoCrFeNi高熵合金力学性能的分子动力学模拟
Mechanical Properties of Al_xCoCrFeNi High-Entropy Alloy: A Molecular Dynamics Study
高压物理学报. 2021, 35(5): 052201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210730

高温高应变率下钛合金Ti6Al4V的动态力学行为及本构关系
Dynamic Behavior and Constitutive Relationship of Titanium Alloy Ti6Al4V under High Temperature and High Strain Rate
高压物理学报. 2024, 38(1): 014101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230743

时效温度对TB8钛合金动态力学性能的影响
Effect of Aging Temperature on Dynamic Mechanical Properties of TB8 Titanium Alloy
高压物理学报. 2022, 36(5): 054102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220528

冲击应力和脉宽对NbTiZr中熵合金层裂的影响
Effects of Shock Peak Stress and Pulse Duration on Spall Damage of NbTiZr Medium-Entropy Alloy
高压物理学报. 2024, 38(6): 064101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240771

基于原子力显微镜的压痕技术及其应用
Atomic Force Microscope Based Indentation Techniques and Their Applications
高压物理学报. 2023, 37(6): 060103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230694

DOI: 10.11858/gywlxb.20251002

动态载荷下 CoCrFeNiMn 高熵合金的压入行为

吴昆昆[1], 刘 聪[1], 苏步云[1], 邱 吉[1,2], 树学峰[1], 康正东[1]

（1. 太原理工大学航空航天学院应用力学研究所, 山西 太原 030024;
2. 山西省建设投资集团有限公司, 山西 太原 030032）

摘要: 为解决材料或结构在服役环境中的内部应力难以评估的问题，提出了一种有限元与微压入测试相结合的方法。以 CoCrFeNiMn 高熵合金为例，分别在不同加载速度下开展了压缩、剪切和微压入测试，并基于非对称初始屈服函数、Swift 硬化与关联流动法则，构建了该材料的弹塑性本构模型。利用应力积分算法将该本构模型程序化，并接入 ABAQUS 有限元软件中，通过对比分离式霍普金森压杆与压入模型的有限元模拟结果和实验结果，验证了模型的可靠性。基于分离式霍普金森压杆模型，进行了动态压缩实验的数值模拟，并将不同动态变形时刻的应力场作为初始应力场（内部应力）导入压入模型中，进行压入模拟分析。结果表明：加载阶段的初始应力场会显著降低相同压入深度下的压入载荷，且降低幅度随着初始应力的增加而增大；此外，初始应力场的存在会进一步减弱压入过程中的应力集中。通过对不同压缩量下的载荷-压入位移曲线进行定量分析，揭示了不同初始应力条件下材料的压入响应规律。研究结果为服役条件下材料或结构内部应力的评估提供了参考。

关键词: 分离式霍普金森压杆；本构方程；高熵合金；初始应力场；微压入

中图分类号: O521.2; O347.3 **文献标志码:** A

在现代工程应用中，许多结构和材料在高速加载条件下常常遭受极端工况，如火箭发射过程中发动机的结构件、高速列车运行时的车轮和底盘结构件、汽车碰撞等都涉及高速动态载荷作用[1−3]。在这些极端条件下，材料或结构的内部应力状态是决定其是否能够承受外部载荷、长期使用并保持安全的重要因素。因此，准确地判断材料在承载条件下的内部应力状态，对于避免因应力集中或不均匀分布而导致的破坏至关重要[4−5]。针对这些严苛工况，人们对材料性能提出了更高的要求。高熵合金是一种新型金属材料，具有出色的力学性能、优异的耐高温、耐高压、抗辐射和抗腐蚀性，在汽车、航空和核工业领域具有广阔的应用前景。例如：高熵合金正逐渐替代汽车中的结构板、座椅骨架、变速箱齿毂等部件；高熵合金有望成为下一代航空发动机涡轮叶片材料；高熵合金还有机会作为核反应堆的压力容器、第一壁材料和包层材料[6−8]。以高熵合金为研究对象，探索其在高速动态载荷作用下的内部应力评估方法，不仅具有重要的理论意义，同时可为极端工况下材料的设计和应用提供参考。

传统的应力测评方法，如钻孔法、切片法和环芯法等，虽然能提供有价值的数据，但通常会对材料或结构造成破坏。非破坏性应力检测技术，如 X 射线衍射、超声波检测，尽管在许多场景中能够实现较为精确的判断，但也存在一些局限性，例如：X 射线衍射法仅适用于某些晶体结构材料，并且空间分辨率通常较低；超声波检测法在应力与材料缺陷的区分上存在一定困难[9−10]。因此，开发一种既能评估材料内部应力，又能保持非破坏性测试的高效方法，成为当前材料内部应力判断领域的研究重点。

* **收稿日期:** 2025-01-02； **修回日期:** 2025-02-20
基金项目: 国家自然科学基金（12302477, 12272256）；山西省基础研究自由探索项目（202203021222081）
作者简介: 吴昆昆（2000—），男，硕士研究生，主要从事弹塑性力学研究. E-mail: wukunkun588@163.com
通信作者: 邱 吉（1992—），男，博士，副教授，主要从事弹塑性力学研究. E-mail: qiuji@tyut.edu.cn
树学峰（1964—），男，博士，教授，主要从事弹塑性力学研究. E-mail: shuxuefeng@tyut.edu.cn

近年来，微压入技术作为一种无损、高精度的小尺度测量方法，逐渐成为评估材料内部应力和强度的重要工具。通过微压入测试，可以量化材料在塑性变形过程中产生的堆积行为与应力之间的关系。相关研究表明，微压入法在判断材料应力时具有较高的灵敏度和准确性，并已成功应用于多种材料研究[11]。有限元方法可以有效地代替昂贵、费时和破坏性强的实际测试，其应用极大地促进了微压入法的发展，利用有限元模型计算内部应力已经成为当前新的研究方向。Sanguedolce等[12]采用微压入法，建立了一种能够计算加工过程中应力的数值模型。然而，现有的微压入模型大多局限于静态或低速载荷条件，尚未充分考虑材料在高速动态载荷作用下的应力响应。

为此，本研究将分离式霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar, SHPB）有限元模型与微压入模型相结合，旨在研究高熵合金在承受冲击载荷时的内部应力状态。首先，利用动、静态压缩和剪切实验对高熵合金的本构方程进行标定，编写专用的用户材料子程序，以提高模拟结果的准确性；然后，模拟高熵合金在冲击载荷下的应力状态，将其导入压入模型，实现对材料内部应力的非破坏性测量；通过考虑材料的本构关系，并结合数值模拟与实验验证，确保计算结果的可靠性和精确性[13]。

1　实验装置与试样

以 CoCrFeNiMn 高熵合金为研究对象，分别开展准静态和动态压缩及剪切实验，实验设备如图 1 所示。准静态加载使用 Instron 5969 万能材料试验机，力传感器的量程为 50 kN，加载方式为位移加载，加载速度为 0.02 mm/s，应变率为 2×10^{-3} s^{-1}。准静态压缩试件是尺寸为⌀8 mm×10 mm 的圆柱形试样，剪切试件为扁平帽形，详细尺寸如图 1[14] 所示。动态实验在 SHPB 上进行，加载速度为 9 m/s，应变率为 1.5×10^{3} s^{-1}。动态压缩试件是尺寸为⌀8 mm×5 mm 的圆柱形试件，动态剪切试件尺寸与准静态剪切试样一致。在动态剪切和压缩实验中，在入射杆和透射杆的端面涂抹凡士林，以减小试件与杆之间的摩擦，动态测试数据由应变片测得[15]。

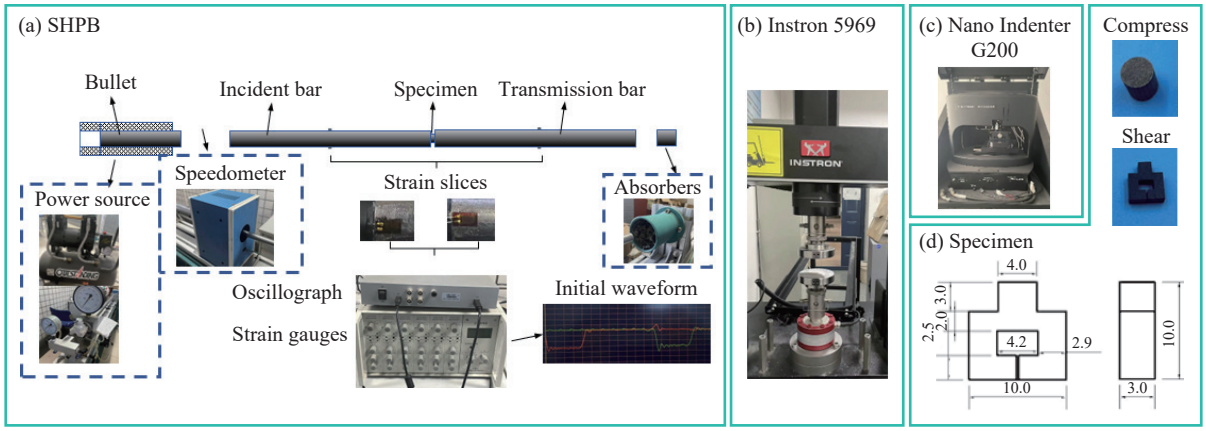


图 1　实验设备、试件及试件尺寸[14]（单位：mm）

Fig. 1　Experiment equipment, specimens and specimen dimensions[14] (Unit: mm)

采用 Nano Indenter G200 型压入仪开展微压入实验，其中，准静态测试在室温下进行，使用 Berkovich 压头，采用位移控制模式加载。热漂移修正和泊松比分别设置为 0.05 nm/s 和 0.30，最大压入深度设置为 1 500 nm，压入应变率为 0.05 s^{-1}，保载时间为 5 s。对试件进行 20 次压入测试，测点间距设置为 40 μm，以避免压痕之间的相互影响[16]。

2　CoCrFeNiMn 高熵合金的本构模型

研究表明，CoCrFeNiMn 高熵合金在不同初始应力状态下的应力-应变响应具有显著的差异，因此，经典的 Mises 屈服理论无法准确描述该类材料的屈服行为[17]。为了准确预测和模拟 CoCrFeNiMn 高熵合金在复杂工程应用中的行为，建立能够反映这一特性的本构模型尤为重要。对于静水压不敏感的金

属类材料，通常采用偏应力张量第三不变量来表征其拉压不对称性[18]。本研究采用 Cazacu 等[19] 提出的屈服准则，结合非线性硬化，推导本构模型。该准则通过构建应力分量(σ_{ij})的奇函数形式(f_{Y})实现对强度非对称性效应的表征，具体形式为

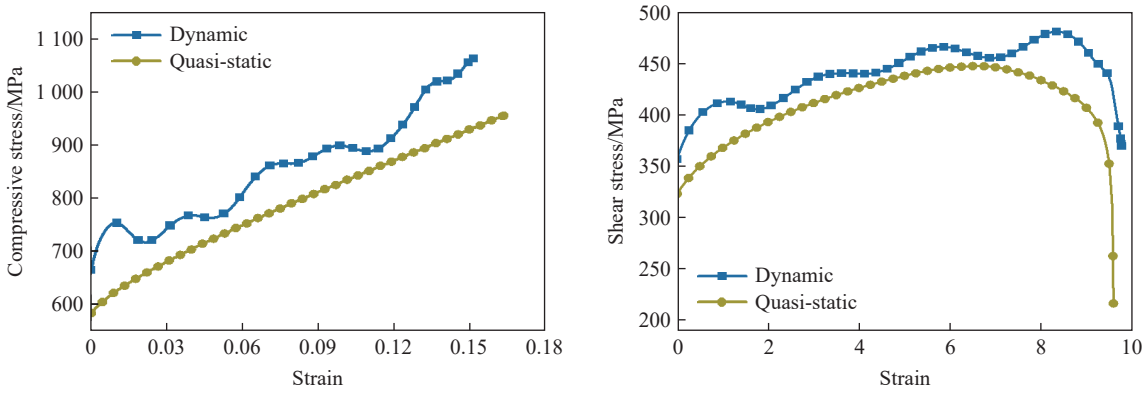
$$f_{\mathrm{Y}}(\sigma_{ij}) = J_2^{3/2} - cJ_3 = \tau_{\mathrm{Y}}^3 \tag{1}$$

式中：J_2为偏应力张量第二不变量，J_3为偏应力张量第三不变量，τ_{Y}为剪切屈服强度，c 为反映强度非对称性的材料参数。采用 Swift 硬化模型[20] 描述流动应力的变化，具体形式为

$$\sigma_{\mathrm{f}} = A(\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}} + \varepsilon_{\mathrm{s}})^n \tag{2}$$

式中：σ_{f}为流动应力，$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$为等效塑性应变，$A$ 为材料参数，ε_{s}为屈服应变，n 为硬化系数。

上述屈服模型及硬化方程中的材料参数通过不同应力、应变率条件下的实验结果获得。图 2 给出了准静态和动态加载条件下 CoCrFeNiMn 高熵合金的应力-应变曲线。可以看出：准静态加载条件下，其压缩屈服强度和剪切屈服强度分别为 585.23 和 326.04 MPa；动态加载条件下，压缩屈服强度和剪切屈服强度分别为 665.81 和 357.51 MPa。



(a) Dynamic and quasi-static compressive stress-strain curves　　(b) Dynamic and quasi-static shear stress-strain curves

图 2　CoCrFeNiMn 高熵合金的动态及准静态压缩和剪切应力-应变曲线

Fig. 2　Dynamic and quasi-static compressive and shear stress-strain curves of CoCrFeNiMn high-entropy alloy

将准静态和动态加载条件下不同应力下的初始屈服强度代入式 (1)，可获得初始屈服函数中的材料参数 c，分别为−0.14 和−0.27；然后，将剪切应力-应变曲线作为等效应力-应变曲线，用式 (2) 进行拟合，得到准静态硬化函数的参数 A 和 n，分别为 304.67 MPa 和 0.183 94，动态硬化函数的参数 A 和 n 分别为 413.16 MPa 和 0.060 15，详细参数如表 1 所示。

表 1　本构方程参数

Table 1　Constitutive equation parameters

Type	c	A/MPa	ε_{s}	n
Quasi-static	−0.14	304.67	1.463 00	0.183 94
Dynamic	−0.27	413.16	0.090 25	0.060 15

假设该材料为各向同性硬化，将硬化函数代入初始屈服函数中，则 CoCrFeNiMn 高熵合金的后继屈服准则表示为

$$F = f_{\mathrm{Y}}^{1/3} - \sigma_{\mathrm{f}} = (J_2^{3/2} - cJ_3)^{1/3} - A(\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}} + \varepsilon_{\mathrm{s}})^n = 0 \tag{3}$$

基于关联流动法则，将屈服函数作为塑性势函数，结合一致性条件和塑性功等效原理，可推导出塑性乘子 $\mathrm{d}\lambda$ 与一致性切线模量 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{ep}}$，其具体形式[21−24] 为

$$\mathrm{d}\lambda=\frac{\dfrac{\partial f_{\mathrm{Y}}(\sigma_{ij})}{\partial\sigma_{ij}}:\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}:\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}}{\dfrac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{f}}(\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}})}{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}}+\dfrac{\partial f_{\mathrm{Y}}(\sigma_{ij})}{\partial\sigma_{ij}}:\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}:\dfrac{\partial f_{\mathrm{Y}}(\sigma_{ij})}{\partial\sigma_{ij}}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{ep}}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}-\frac{\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}:\dfrac{\partial F}{\partial\sigma_{ij}}\otimes\dfrac{\partial F}{\partial\sigma_{ij}}:\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}}{\dfrac{\partial F}{\partial\sigma_{ij}}:\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}:\dfrac{\partial F}{\partial\sigma_{ij}}+\dfrac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}}} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}$ 为弹性模量张量，ε 为应变。

为便于本构模型在数值模拟中使用，分别基于显式应力积分算法（VUMAT）和隐式应力积分算法（UMAT），将该本构模型通过 Fortran 代码接入 ABAQUS 软件中。在后续模拟分析中，选用 VUMAT 进行 SHPB 模拟计算，而 UMAT 用于压入模拟分析[25–27]。

3　SHPB 与微压入有限元模型

3.1　SHPB 模型建立

SHPB 几何模型的尺寸与实验保持一致。为保证较高的计算效率，结合 SHPB 的对称性，在对称轴处施加对称性边界条件。假设压杆与试件之间的接触为光滑无摩擦的硬接触。材料属性选择用户自定义材料，并输入材料的密度、弹性模量 E、泊松比 ν 及 VUMAT 中包括的各个材料参数。为提高数值计算精度，并保证计算效率，对于试件压入测试区域，采用较为精细的网格，而其他部分以及入射杆和透射杆采用较粗的网格。所有单元采用 CAX4R 的四节点轴对称单元进行网格划分，入射杆、透射杆、子弹的网格单元尺寸为 1 mm，入射杆和透射杆的节点数为 40 020，网格数为 38 000；试件采用分区网格划分，压入区域的网格单元尺寸为 0.02 mm，其他区域的网格尺寸为 0.10 mm，节点数为 9 283，网格数为 9 179，如图 3 所示。该网格划分方法已得到验证[28]，本研究不再赘述。加载方式为速度加载，为确保数值模型与实验结果的一致性，应变率取 $1.5\times10^{3}\ \mathrm{s}^{-1}$，详细参数见表 2。

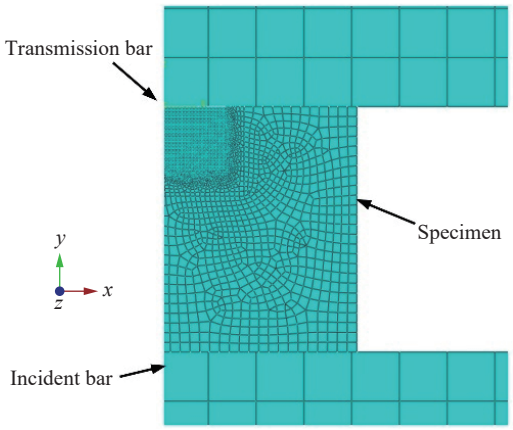


图 3　SHPB 的几何模型

Fig. 3　Geometric model of SHPB

为便于分析，编写 VUMAT 子程序时，在材料模块中定义一个可以存储 10 个状态变量的矩阵，并将该矩阵中的每个变量都赋予特定的物理意义，其中：变量 1～变量 4 存储弹性应变分量，描述试件在弹性变形阶段的应变状态；变量 5～变量 8 用于记录塑性应变分量，反映试件在塑性变形阶段产生的不可恢复变形；变量 9 存储等效塑性应变，表征试件在塑性变形过程中累积的塑性变形程度；变量 10 存储等效应力，表征试件的强度水平。基于 VUMAT 有限元模拟计算得到动态压缩应力-应变曲线，如图 4 所示。对比模拟结果与实验测量结果可以明显地看出，模拟结果与实验数据在整体变化趋势上高度一致。该结果不仅验证了所采用的数值模拟方法的有效性，而且证明了材料本构模型的精确性。

表 2　入射杆、透射杆和试件的材料及几何参数

Table 2　Material and geometric parameters of incident bar, transmission bar and the specimen

Component	Density/(g·cm^{-3})	E/GPa	ν	Diameter/mm	Length/mm
Incident/transmission bar	7.9	210	0.30	37	2 000
Specimen	8.0	183	0.25	8	5

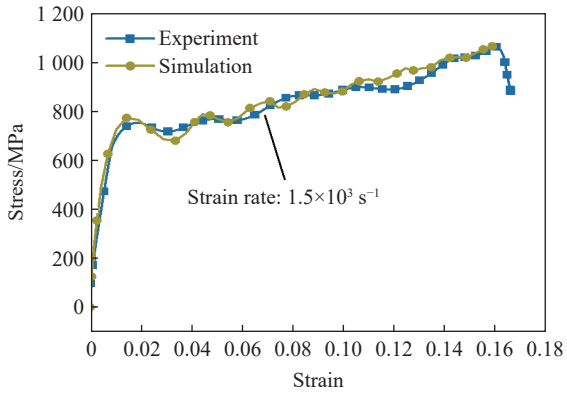


图 4　CoCrFeNiMn 高熵合金动态压缩实验与模拟得到的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves from dynamic compression experiments and simulations of CoCrFeNiMn high-entropy alloy

3.2　压入模型的建立

为便于分析初始应力场对压入行为的影响规律，对无初始应力场的微压入过程进行了数值模拟，并与压入实验进行对比验证。同样，为了提高计算效率，将压入数值计算模型简化为二维模型，如图 5 所示。压入模型主要包括压头和试件两部分，其中：圆锥形压头与试件表面的夹角设定为 19.68°，使其与实验中的 Berkovich 压头的力学响应达到同等效果[29]。最大压入深度设为 1 500 nm，试件的几何尺寸、材料属性与网格划分均与 SHPB 模型中的一致。压头材料选用金刚石，其弹性模量和泊松比分别为 1 100 GPa 和 0.07。锥形压头也采用 CAX4R 的四节点轴对称单元进行分区网格划分，压入接触区域的网格尺寸为 0.02 mm，其他区域的网格尺寸为 0.20 mm，节点数为 1 139，网格数为 1 083。经验证，该网格配置能够满足本研究所需的模拟精度要求。在 y 轴负方向施加位移载荷，以模拟压头的轴向位移，x 方向为固定边界条件。此外，压头与试件之间的接触类型设为面面接触，忽略摩擦效应[30]。

在 UMAT 子程序的实现过程中，同样采用用户自定义材料输入方式，定义一个存储 10 个状态变量的矩阵，以便灵活设置材料参数。各状态变量的含义与 3.1 节中相同，试件的弹性模量和泊松比与压杆模型保持一致。在模拟过程中，沿 y 轴负方向施加位移载荷，直至压入深度达到 1 500 nm。微压入模拟结果见图 6，模拟结果与实验数据在整体变化趋势上高度一致，验证了数值模拟方法及参数设置的合理性和准确性，为后续分析初始应力场对微压入行为的影响提供了有力支撑。

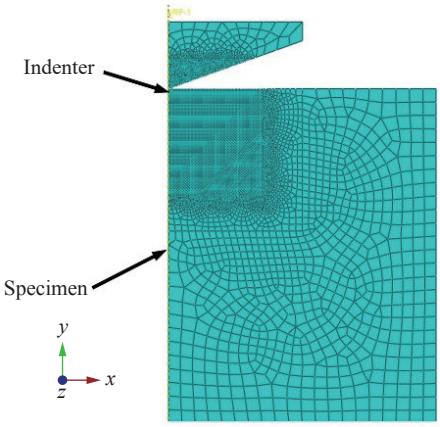


图 5　压入几何模型

Fig. 5　Indentation geometric model

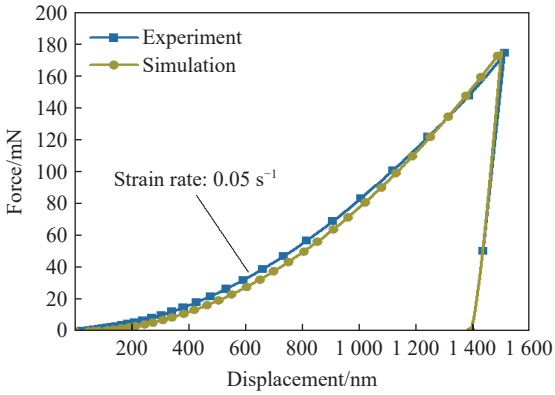


图 6　CoCrFeNiMn 高熵合金压入实验与数值模拟得到的载荷-位移曲线

Fig. 6　Force-displacement curves from indentation experiments and simulations of CoCrFeNiMn high-entropy alloy

3.3　包含不同初始应力场的压入模型

为深入探究初始应力场对压入行为的作用机制与影响规律，构建了涵盖多种不同初始应力场的压入模型。基于 SHPB 模拟，将试件在不同冲击载荷下的变形量对应的应力状态作为压入过程的初始应力条件。

施加初始应力场时，选取 5 个特定时刻进行分析，即 3 个加载时刻和 2 个卸载时刻，如图 7 所示。对于加载阶段，考虑了材料在不同应变下的应力响应，具体而言：选取加载初期压缩量 ε_c=5.00% 的时刻，获得加载初期材料的应力状态；选取加载中期 ε_c=15.00% 的时刻，反映材料在加载中期的应力场；选取 ε_c=33.26% 的时刻为加载结束阶段，可以得到接近最大载荷时材料的应力分布。对于卸载阶段：选择卸载初期 ε_c=33.22% 的时刻，以研究卸载开始时的应力变化；选择卸载结束 ε_c=33.08% 的时刻，以获取卸载后试样的应力状态。

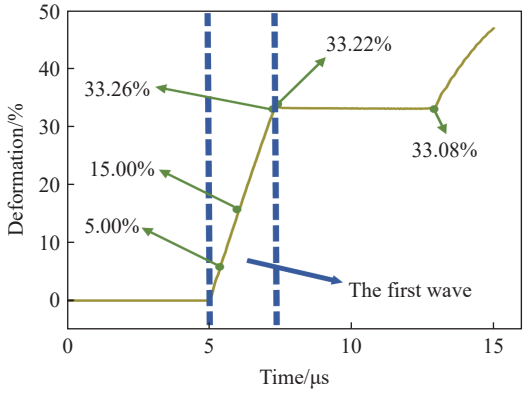


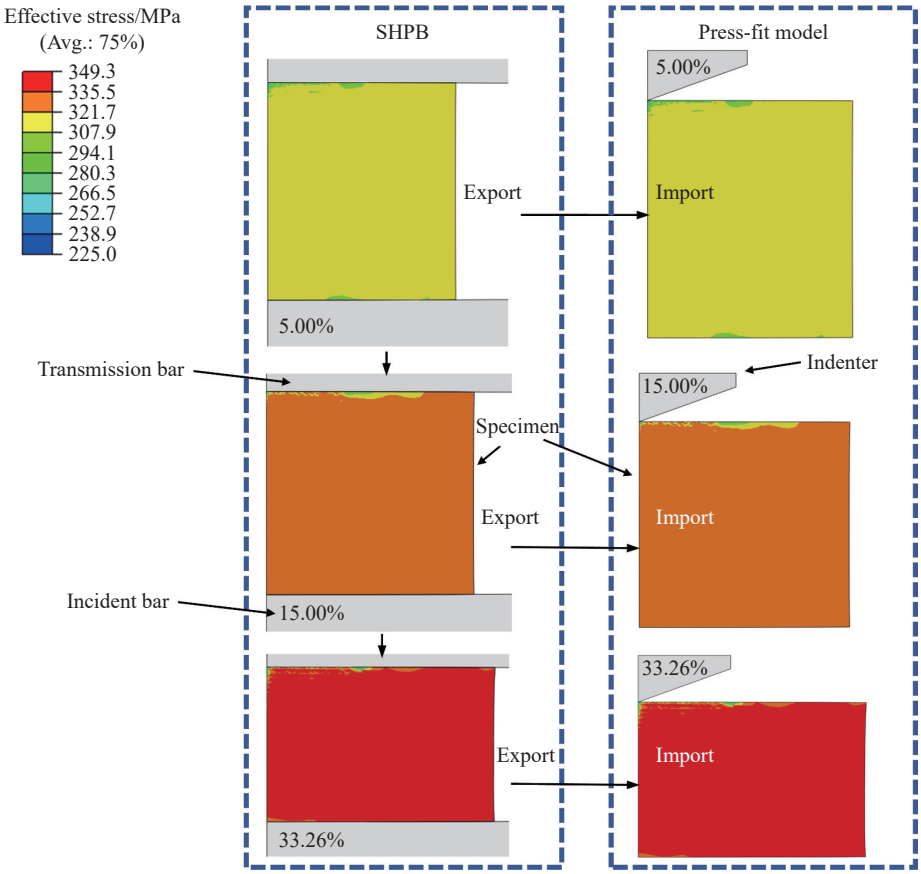
图 7　动态加载过程中 CoCrFeNiMn 高熵合金的变形历程

Fig. 7　Deformation history of CoCrFeNiMn high-entropy alloy during dynamic loading

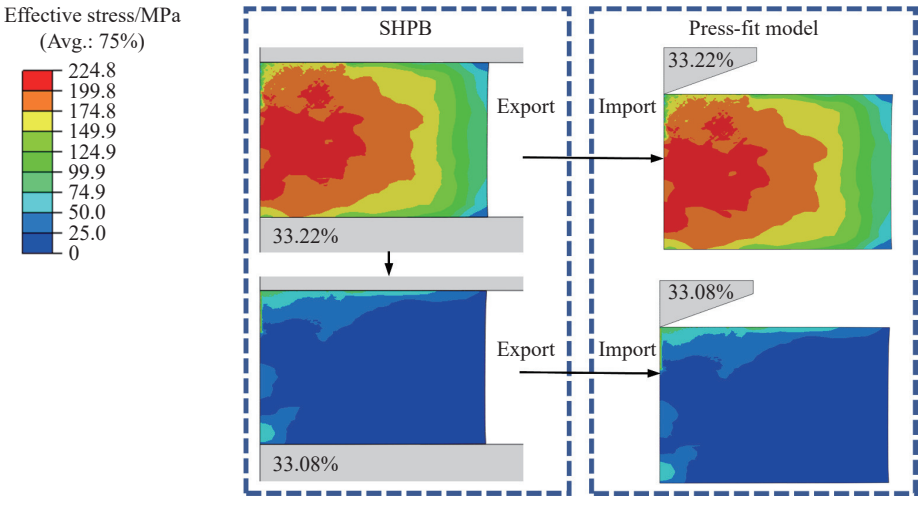
上述应力状态均由 SHPB 模拟的后处理数据获取。具体操作中，依据 SHPB 模型后处理导出的位移数据，在加载阶段选取 3 个特定时刻，在卸载阶段选定 2 个特定时刻。ε_c 为 5.00%、15.00%、33.26%、33.22%、33.08% 时，最大等效应力（$\bar{\sigma}_{max}$）分别为 318.4、333.2、345.6、212.5 和 18.6 MPa，与之对应的帧数分别为 179、201、246、251 和 421，这些帧数代表了试件在不同压缩量的冲击载荷下达到相应内部应力水平的时刻。其中，当 ε_c=33.26% 时，加载结束，此刻试件内部应力达到峰值，随后逐步进入卸载阶段，并在 ε_c=33.08% 时应力降至最低水平。

将 SHPB 模拟中不同加载阶段的试件应力场导入 ABAQUS 模拟环境中，以建立包含不同初始应力场的压入模型。具体操作步骤如下：首先，在新的 ABAQUS 模型中，通过 IMPORT 功能将 SHPB 后处理模型中与不同压缩量相对应的帧数的试件部件导入，并且确保材料参数、边界条件以及网格模型与无初始应力场时的压入模型一致；然后，使用 ABAQUS 中的 INITIAL CONDITIONS 功能，在 LOAD 模块下使用 INITIAL STATE 导入 SHPB 后处理模型中指定帧数的应力场，从而模拟不同加载阶段的应力状态。

图 8(a) 和图 8(b)展示了 ε_c 分别为 5.00%、15.00%、33.26%、33.22% 和 33.08% 时，通过 SHPB 模拟获得的应力云图以及导入初始应力场后的压入模型。完成初始应力场的导入后，采用位移控制进行压入有限元模拟，研究不同初始应力场作用下试件压入行为的变化规律。通过对比分析不同内部应力条件下模拟计算的位移-载荷曲线、应力分布、塑性变形等结果，进一步揭示初始应力场对试件压入行为的影响，以及应力场与压入过程之间的内在关系。



(a) Load (ε_c=5.00%, 15.00%, 33.26%)



(b) Unload (ε_c=33.22%, 33.08%)

图 8　初始应力压入模型的实现方法

Fig. 8　Implementation method of initial stress indentation model

4　结果与分析

对 ε_c 分别为 5.00%、15.00%、33.26%、33.22% 和 33.08% 的试件，以及作为对比的初始未压缩试件进行数值模拟，结果如图 9 所示。可以清晰地看出，试件受到冲击载荷后，其压入行为发生了显著变化。在加载阶段 3 种压缩量的载荷-压入深度（F-h）曲线中，相同压入深度下的载荷随着压缩量的增加而逐渐降低。具体而言，对于初始未压缩试件，h=1 500 nm 时的载荷为 175.59 mN；而 ε_c 增至 5.00%、

15.00% 和 33.26% 时，相同压入深度对应的载荷依次降为 164.91、163.99 和 162.23 mN。显然，试件受冲击载荷初期载荷下降幅度最大，随着压缩量的增大，相同深度对应的载荷以较小幅度逐渐降低。在卸载过程中，从 2 种压缩量的载荷-压入深度曲线中可以看出，相同深度对应的载荷逐渐增大，并在卸载的最后时刻超越初始未压缩试件的载荷值。ε_c 为 33.22% 和 33.08% 时，h=1 500 nm 对应的载荷分别为 171.98 和 180.38 mN。在 SHPB 模型中，试件经历轴向压缩，y 轴方向的应力 σ_{22} 较其他 2 个方向的应力要大很多，σ_{22} 的正、负分别表示应力方向沿 y 轴的正方向或负方向。在加载阶段，σ_{22} 的值为负，表示应力沿 y 轴负方向；在卸载阶段，σ_{22} 的值逐渐转变为正，表示应力方向沿 y 轴正方向。在加载阶段，初始应力场的方向与压入方向一致，且均沿 y 轴负方向，因此，会降低材料抵抗压入变形的能力，导致相同压入深度下的载荷显著降低；而在卸载阶段，初始应力场的方向与压入方向相反，增强了材料对压入过程的抵抗，相同压入深度下的载荷逐渐升高。

进一步观察载荷-压入深度曲线，可以发现，同一压缩量下，随着压入深度的增加，载荷增加的幅度出现逐渐增大趋势，且在不同压缩量下，增加幅度并不相同。通过提取施加不同初始应力场压入模型后处理的载荷-压入深度曲线，并分别与原始压入模型中相同压入深度的载荷求差，得到压入深度与对应的载荷差值(ΔF)，结果如图 10 所示。ε_c 分别为 5.00%、15.00%、33.26% 时，ΔF 随 h 的增加而增大，其中 ε_c=33.26% 时 ΔF 最大，ε_c=5.00% 时 ΔF 最小；卸载(ε_c=33.22%, 33.08%)时，虽然 ΔF 也随 h 的增加而增大，但增幅均比加载时小。具体而言，载荷增加的幅度与试件的应力状态有关：在加载阶段，σ_{22} 沿 y 轴负方向，且 σ_{22} 逐渐增大；卸载过程中，σ_{22} 先沿 y 轴负方向逐渐减小到零，并在最后阶段方向变为 y 轴正方向，且值逐渐增大。由于加载阶段应力的绝对值始终高于卸载阶段，因此，加载阶段的应力状态对载荷增加幅度的影响更大，而在卸载阶段影响更小。

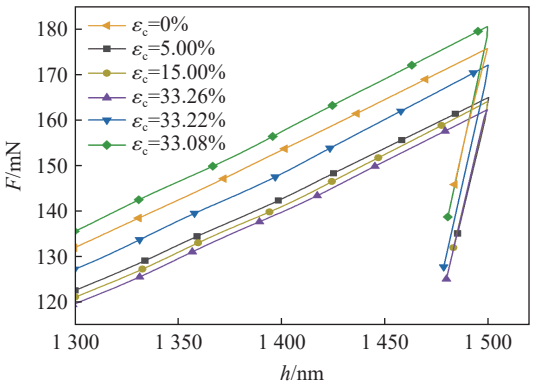


图 9　不同初始应力下的载荷-压入深度曲线

Fig. 9　Force-indentation displacement curves under different initial stress conditions

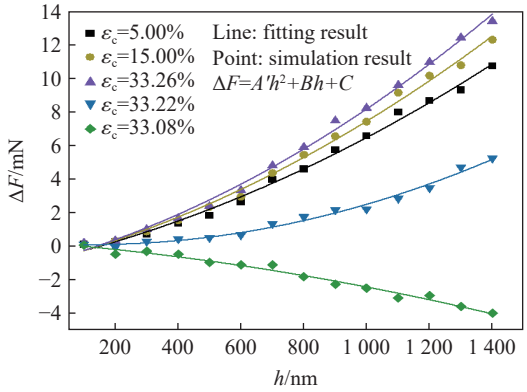


图 10　不同初始应力下 ΔF-h 曲线

Fig. 10　ΔF-h curves under different initial stress conditions

为进一步定量分析初始应力场对载荷-压入深度的影响，用二次多项式对 ΔF-h 曲线进行拟合，得到

$$\Delta F = A'h^2 + Bh + C \tag{6}$$

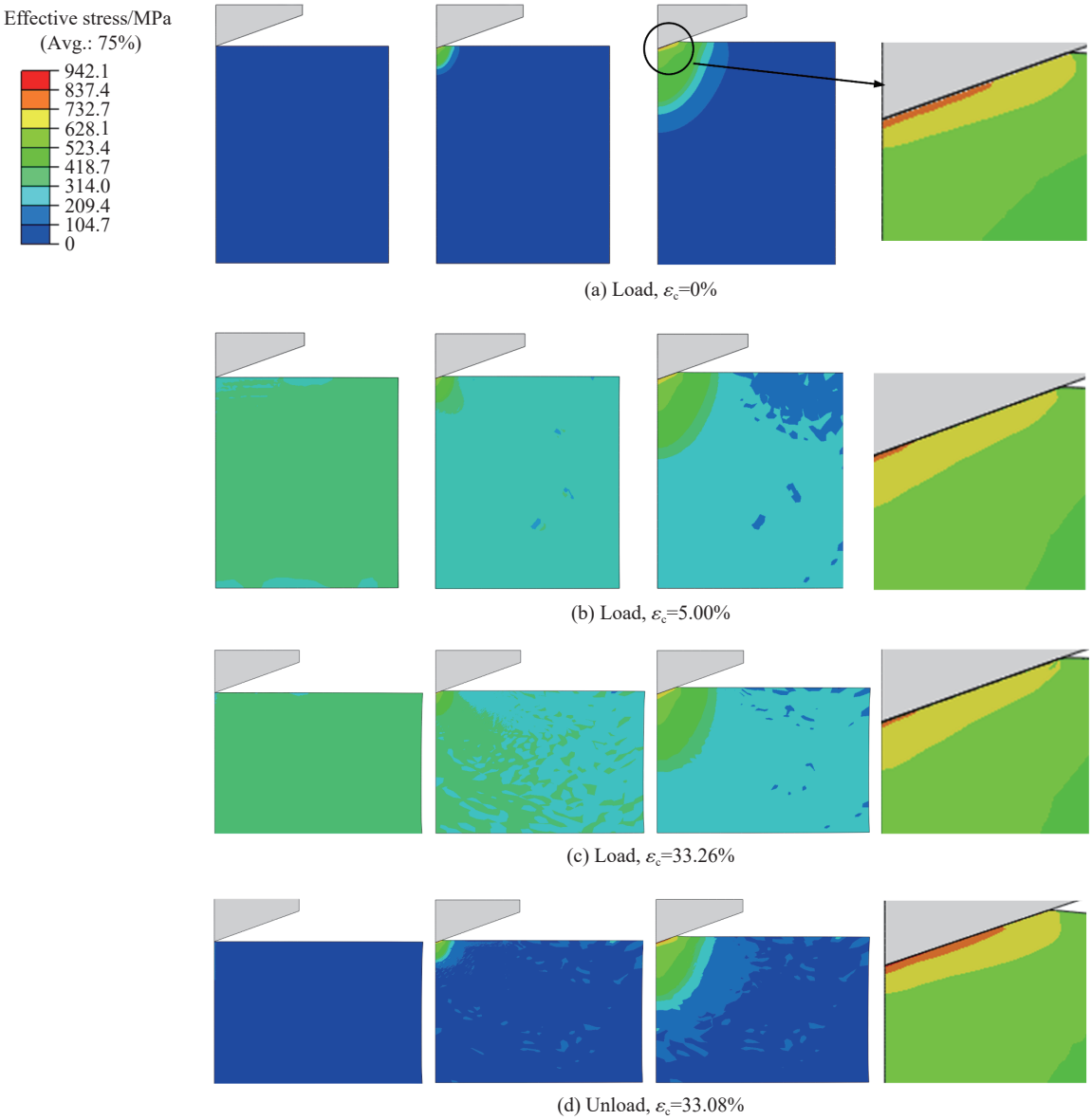
式中：ΔF 的单位为 mN；h 的单位为 nm；A'、B 和 C 为拟合参数，拟合结果如表 3 所示，其中 R^2 为拟合相关系数。从表 3 可以看出：在动态加载阶段，A'和 B 均大于零，且随着内部应力的增大呈逐渐增大趋势，C 为负值，且随着内部应力的增大呈逐渐减小趋势；在动态卸载阶段，B 均小于零，且随着内部应力的降低呈逐渐减小趋势，C 均为正值，且随着内部应力的降低呈逐渐增大趋势。

为深入探讨初始应力场对压入行为的影响机制，对后处理的应力云图进行分析，比较了 2 种模型在压入过程中的应力分布特征。图 11 展示了不同初始应力条件下的等效应力云图。

表 3　二次多项式拟合参数

Table 3　Quadratic polynomial fitting parameters

ε_c/%	A'/(mN·nm^{-2})	B/(mN·nm^{-1})	C/mN	R^2	$\bar{\sigma}_{max}$/MPa
5.00	2.656×10^{-6}	0.0046	−0.7647	0.9946	318.4
15.00	3.159×10^{-6}	0.0051	−0.8223	0.9954	333.2
33.26	3.654×10^{-6}	0.0054	−0.8409	0.9961	345.6
33.22	3.103×10^{-6}	−0.0008	0.1249	0.9874	212.5
33.08	-1.003×10^{-6}	−0.0016	0.1498	0.9813	18.6



(a) Load, ε_c=0%

(b) Load, ε_c=5.00%

(c) Load, ε_c=33.26%

(d) Unload, ε_c=33.08%

图 11　不同初始应力下压入过程的等效应力云图

Fig. 11　Equivalent stress nephogram during indentation process under different initial stresses

无初始应力场时，压头下方的高应力影响区域（见图 11 中红色和橙色区域）较广，最大应力达 942.1 MPa，影响区域外的应力接近零。随着压头的进一步压入，应力从接触点向周围扩展，应力呈梯度分布。与无初始应力场相比，在 ε_c=5.00% 和 ε_c=33.26% 的初始应力场模型中，压头下方高应力影响区域

明显缩小，接触点处的应力也有所降低，最大应力分别为 835.1 和 824.7 MPa。随着压入过程的推进，试件内部的应力梯度逐渐减小，应力整体呈下降趋势，但未达到完全释放的程度。该过程中，材料内部发生了复杂的应力重分布和塑性变形累积，导致材料在压入加载过程中的力学响应发生变化。换言之，初始应力场的引入降低了材料对外部载荷的抵抗力。初始应力场使试件在相同压入深度下所需载荷逐渐减小；同时，随着内部应力的增加，最大载荷的降低幅度也有所增大。

在 ε_c=33.08% 的初始应力场模型中，压头下方的高应力区域大于 ε_c=5.00% 和 ε_c=33.26% 时的初始应力场模型，且与无初始应力场模型相似，应力梯度相近，最大应力也为 942.1 MPa，但应力影响范围显著增大。与 ε_c=5.00% 和 ε_c=33.26% 的初始应力场模型的结果相反，施加卸载后形成的初始应力场使材料在压入过程中的力学响应发生了变化。这些内应力导致相同压入深度下所需的载荷增加。具体而言，随着初始应力场的增强，载荷-压入深度曲线呈现更陡峭的增长趋势，表明材料对外部载荷的抵抗能力增强。

综上所述，冲击载荷产生的不同初始应力场对材料的压入行为产生显著的影响，而且加载阶段的应力场与卸载阶段的应力场对压入行为的影响不同，主要表现为：在加载阶段，初始应力场的引入降低了材料对外部载荷的抵抗力，相同压入深度下所需载荷逐渐减小；在卸载阶段，初始应力场使材料在相同压入深度下所需载荷增加；初始应力场的引入使材料的高应力区域、应力值以及应力梯度发生变化。因此，可以基于初始应力场对压入行为的影响反向评估材料内部的应力水平，进而助力无损检测、应力测量等领域的发展。

5　结　论

以 CoCrFeNiMn 高熵合金为研究对象，分别在准静态和动态加载条件下开展了单轴压缩和剪切实验。基于 Cazacu 等[19] 提出的拉压不对称屈服准则和非线性 Swift 硬化模型，构建了该材料的宏观弹塑性本构关系，并将其接入 ABAQUS 有限元软件中，以研究 CoCrFeNiMn 高熵合金在承受高速载荷时的内部应力，得到如下主要结论：

(1) 基于 CoCrFeNiMn 高熵合金的本构模型和应力积分算法构建了精确的 SHPB、微压入和内置不同初始应力场微压入的有限元模型；

(2) 揭示了动态加载过程中不同加载和卸载时刻产生的应力场对 CoCrFeNiMn 高熵合金压入过程中载荷-压入深度曲线的影响规律；

(3) 探明了不同加载和卸载时刻应力场对压入过程中应力分布规律的影响，并提供了一种有限元模拟结合微压入测试用于材料受冲击后其内部应力水平评估的全新思路。

研究结果不仅能够用于判断材料在高速载荷作用下的内部应力，也为相关领域的安全评估提供了非破坏性测量的研究思路。

参考文献：

[1] 朱浩霖, 张天辉, 刘志芳. 重复冲击载荷下泡沫铝夹芯壳的动态响应 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(5): 054205.
ZHU H L, ZHANG T H, LIU Z F. Dynamic responses of aluminum foam sandwich shells under repeated impact loadings [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5): 054205.

[2] 鲁渴伟, 敬霖. 道砟冲击下高速列车设备舱底板的动态响应 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(4): 044203.
LU K W, JING L. Dynamic response of equipment cabin bottom plate of high-speed train subjected to ballast impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(4): 044203.

[3] 李巧歌, 梁增友, 王春光, 等. 碳纤维复合靶板抗破片冲击性能研究 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(4): 044103.
LI Q G, LIANG Z Y, WANG C G, et al. Study on anti-fragment impact performance of carbon fiber reinforced plastics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(4): 044103.

[4] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components [J]. Materials &

Design, 2012, 35: 572–588.

[5] ANAWA E M, OLABI A G. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1/2/3): 22–33.

[6] 李龙丰, 郭威, 赵觅, 等. 低活化中/高熵合金的研究进展与展望 [J/OL]. 中国有色金属学报 (2025-01-06)[2025-01-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20250106.1411.002.html.
LI L F, GUO W, ZHAO M, et al. Research progress and prospect of low activation medium/high entropy alloys [J/OL]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (2025-01-06) [2025-01-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20250106.1411.002.html.

[7] 李天昕, 王书道, 卢一平, 等. 高熵合金材料研究进展与展望 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 170–181.
LI T X, WANG S D, LU Y P, et al. Research progress and prospect of high-entropy alloy materials [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 170–181.

[8] POULIA A, GEORGATIS E, LEKATOU A, et al. Microstructure and wear behavior of a refractory high entropy alloy [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 57: 50–63.

[9] HUANG X F, LIU Z W, XIE H M. Recent progress in residual stress measurement techniques [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2013, 26(6): 570–583.

[10] GUO J, FU H Y, PAN B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: a review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 54–78.

[11] LEE S H, LEE J, KIM Y, et al. Surface residual stress in H-section steel beams processed by quenching and self-tempering using instrumented indentation testing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 177–184.

[12] SANGUEDOLCE M, SAFFIOTI M R, ROTELLA G, et al. Numerical simulation of nanoindentation process on pre-stressed Ti6Al4V alloy for residual stresses evaluation [J]. Procedia CIRP, 2021, 102: 121–125.

[13] 许海涛, 邱吉, 肖革胜, 等. 动态预压缩对 CoCrFeNiMn 高熵合金微尺度压入硬度的影响 [J]. 高压物理学报, 2021, 35(6): 064101.
XU H T, QIU J, XIAO G S, et al. Effect of dynamic pre-compression on micro-scale indentation hardness of CoCrFeNiMn high-entropy alloy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(6): 064101.

[14] ANDRADE U, MEYERS M A, VECCHIO K S, et al. Dynamic recrystallization in high-strain, high-strain-rate plastic deformation of copper [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(9): 3183–3195.

[15] DAI L J, LIU Y, YANG S Z, et al. Strain dependence of adiabatic shearing behaviors of CoCrFeNi high-entropy alloy fabricated via laser powder bed fusion under impact loads [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 1151–1163.

[16] ZHU F, ZHANG Q, CHEN J H, et al. Effect of crystallographic orientation on the deformation and mechanical behavior of CoCrFeNi in Berkovich nanoindentation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 914: 147106.

[17] DING H X, ZHU T, WANG X R, et al. A yield function based on stress invariants and its extensions: modeling and validation [J]. Mechanics of Materials, 2025, 200: 105205.

[18] GAO X S, ZHANG T T, ZHOU J, et al. On stress-state dependent plasticity modeling: significance of the hydrostatic stress, the third invariant of stress deviator and the non-associated flow rule [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(2): 217–231.

[19] CAZACU O. A criterion for description of anisotropy and yield differential effects in pressure-insensitive metals [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(11): 2027–2045.

[20] WU X D, ZHANG Z, ZHANG W K. A study on anisotropic hardening of 7075 aluminum alloy based on non-associated flow rules [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 612–619.

[21] BARLAT F, HA J J, GRáCIO J J, et al. Extension of homogeneous anisotropic hardening model to cross-loading with latent effects [J]. International Journal of Plasticity, 2013, 46: 130–142.

[22] ZHOU A N, WU S S, LI J. A constitutive model for unsaturated soils using degree of capillary saturation and effective interparticle stress as constitutive variables [C]//Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Multi-physics Processes in Soil Mechanics and Advances in Geotechnical Testing. Singapore: Springer, 2018: 79–86.

[23] WANG H, LI L, LI J P, et al. A simple stress correction method for explicit integration algorithm of elastoplastic constitutive models and its application to advanced anisotropic S-CLAY1 model [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104817.

[24] TÓTH G, DE ZEEUW D L, GOMBOSI T I, et al. A parallel explicit/implicit time stepping scheme on block-adaptive grids [J].

Journal of Computational Physics, 2006, 217(2): 722–758.

[25] PÉREZ-DÍAZ S, BENEDICTO R M, DE SEVILLA M F. An effective algorithm for computing the asymptotes of an implicit curve [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2024, 437: 115468.

[26] ZHANG H W, ZHOU L. Implicit integration of a chemo-plastic constitutive model for partially saturated soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(14): 1715–1735.

[27] GENG D J, DAI N, GUO P J, et al. Implicit numerical integration of highly nonlinear plasticity models [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 132: 103961.

[28] KAMBLE A, TANDAIYA P. Modeling and simulation of dynamic compression of bulk metallic glasses at room and elevated temperatures using split Hopkinson pressure bar setup [J]. International Journal of Plasticity, 2024, 174: 103915.

[29] MA Y, ZHANG Y, YU H F, et al. Plastic characterization of metals by combining nanoindentation test and finite element simulation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(8): 2368–2373.

[30] WU M, GAO X R, LIN H. Simulation analysis of the deformation behavior of nanoindentation based on elasto-plastic constitutive model [J]. Polymer Bulletin, 2023, 80(5): 4879–4889.

Indentation Behavior of CoCrFeNiMn High-Entropy Alloys under Dynamic Loads

WU Kunkun[1], LIU Cong[1], SU Buyun[1], QIU Ji[1,2], SHU Xuefeng[1], KANG Zhengdong[1]

（1. *Institute of Applied Mechanics*, *School of Aeronautics and Astronautics*, *Taiyuan University of Technology*, *Taiyuan* 030024, *Shanxi*, *China*;

2. *Shanxi Construction Investment Group Co.*, *Ltd.*, *Taiyuan* 030032, *Shanxi*, *China*）

Abstract: To address the challenge of evaluating the internal stress of materials or structures in service environments, a method combining finite element analysis and micro-indentation testing is proposed. Taking the CoCrFeNiMn high-entropy alloy as the research object, compression, shear and micro-indentation tests were carried out at various loading speeds respectively. Based on an asymmetric initial yield function, Swift hardening and the associated flow rule, an elastoplastic constitutive model for this material was established. The constitutive model was programmed by using the stress integration algorithm and interfaced with the ABAQUS finite element software. Furthermore, by comparing the finite element simulation results with the experimental results from the split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests and the indentation model, the reliability of the model was verified. Using the SHPB model, the numerical simulation of the dynamic compression experiment was carried out, and the stress fields at different dynamic deformation moments were imported into the indentation model as the initial stress (internal stress) fields for indentation simulation analysis. The results indicated that the initial stress field in the loading stage significantly reduces the indentation load at the same indentation depth, and the reduction amplitude increases with the increase of stress. In addition, the existence of the initial stress field will further weaken the stress concentration during the indentation process. Through the quantitative analysis of the load-indentation displacement curves under different compression amounts, the indentation response laws of the materials under different initial stress conditions were revealed. The research results provide a reference for the evaluation of the internal stress of materials or structures under service conditions.

Keywords: split Hopkinson pressure bar; constitutive equation; high-entropy alloy; initial stress field; micro-indentation