DOI：10.11883/bzycj-2025-0280

基于动静态力学试验下的红砂岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构与数值模拟研究*

周永旺[1]，汪维[1,2]，刘洁宁[1]，欧阳鑫[1]，刘君[1]

（1.宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室，浙江 宁波 315211；
2.江汉大学精细爆破全国重点实验室，武汉，430056）

摘 要：岩石材料被广泛应用于防护工程和各种隧道等民用工程结构中，其动态力学性能研究具有重要意义。以山东济南某石矿的红砂岩为文章研究对象，利用三轴试验机和分离式霍普金森杆装置分别开展不同围压下和不同应变率下红砂岩的力学特性研究，并基于动静态力学试验对红砂岩的 Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构模型的参数进行确定。采用已经确定的红砂岩的 HJC 本构模型的参数，建立了大口径分离式霍普金森压杆(SHPB)动态压缩试验的有限元模型对参数进行验证。结果表明:红砂岩在围压环境下，内部裂纹的扩展方向和程度受到限制，使得裂纹难以快速贯通，从而峰值应力随着静水压力和的增加而增加；红砂岩在不同气压的加载下，存在明显率效应现象，动态抗压和劈拉强度与平均应变率呈现正相关，通过抗压强度因子（DIF_c）和抗拉强度因子（DIF_t）的研究分析，动态拉伸峰值应力的率效应现象更为明显；确定的 HJC 本构模型参数在 LS-DYAN 中可以较好地模拟红砂岩在动态冲击的损伤失效过程，在未达到最大峰值应力时，数值模拟结果与试验的结果应力-应变曲线基本一致。确定的致密、高强度的红砂岩参数可为红砂岩的动态力学性能的研究和工程应用提供参考。

关键词：红砂岩；Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构；LS-DYNA；霍普金森压杆

中图分类号：O383　　**国标学科代码**：13035　　**文献标识码**：A

Study on Holmquist-Johnson-Cook Constitutive Model and Numerical Simulation of Red Sandstone Based on Static and Dynamic Mechanical Tests

ZHOU Yongwang[1]，WANG Wei[1,2]，LIU Jiening[1]，OUYANG Xin[1]

(1. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo, 315211, Zhejiang, China;

2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan, 430056)

Abstract: Rock materials are widely used in protective engineering and various civil engineering structures such as tunnels, and the research on their dynamic mechanical properties is of great significance. The red sandstone from a stone mine in Jinan, Shandong Province, is taken as the research object. Triaxial testing machines and split Hopkinson pressure bar (SHPB) devices were used to study the mechanical properties of red sandstone under different confining pressures and strain rates, respectively. Based on the static and dynamic mechanical tests, the parameters of the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) constitutive model for red sandstone were calibrated. Using the calibrated parameters of the HJC constitutive model for red sandstone, a finite element model for the dynamic compression test of the large-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) was established, and verification was conducted by comparing the numerical simulation results with the test

*收稿日期：2025-08-26；　修回日期：2025-10-14；
基金项目：国家自然科学基金(11302261，11972201)；江汉大学精细爆破全国重点实验室(项目编号：PBSKL25A18）
第一作者：周永旺（2000－ ），男，硕士研究生. E-mail: 2311090049@nbu.edu.cn；
通信作者：汪维（1983－ ），男，博士，教授. E-mail: wangwei7@nbu.edu.cn

results in terms of the failure mode of red sandstone and the corresponding stress-strain curve. The results show that: Under the confining pressure environment, the propagation direction and extent of internal cracks in red sandstone are restricted, making it difficult for cracks to penetrate rapidly. Thus, the peak stress increases with the increase of hydrostatic pressure. Under loading with different air pressures, red sandstone exhibits an obvious rate effect. The dynamic compressive and splitting tensile strengths are positively correlated with the average strain rate. Through the research and analysis of the dynamic increase factor for compressive strength (DIF_c) and dynamic increase factor for tensile strength (DIF_t), the rate effect of the dynamic tensile peak stress is more significant. The calibrated HJC constitutive model parameters can well simulate the damage and failure process of red sandstone under dynamic impact in LS-DYNA. Before reaching the maximum peak stress, the stress-strain curves from the numerical simulation results are basically consistent with those from the test results. The calibrated parameters for dense and high-strength red sandstone can provide a reference for the research on the dynamic mechanical properties of red sandstone and its engineering applications.

Keywords: Red sandstone; Holmquist-Johnson-Cook (HJC) constitutive model; LS-DYNA; Split Hopkinson Pressure Bar

红砂岩作为一种广泛分布的沉积岩，在防护工程、采矿工程以及地质灾害防治等领域具有重要应用价值，会承受爆炸、冲击、地震、地应力等载荷的作用[1-3]。在精确制导武器技术快速迭代背景下，具有战略价值的地下指挥通信中心、能源与弹药储备库及防空设施等高价值目标正呈现显著的深埋-岩体化防护趋势。如今岩石防护结构的动态响应机制、破坏模式及毁伤评估仍存在一定的认知缺陷，

均亟需解决侵彻岩石时的破坏效应问题[4-6]。岩石爆破过程涉及炸药能量的高速释放、岩石内应力波的快速传播以及岩石损伤破坏等方面的内容，需解决岩石在进行爆破时破坏效应问题。由于实际的爆炸和侵彻试验的难度较大、限制因素较多，数值仿真计算方法成为了研究岩石侵彻效应和爆炸破坏性能的有效手段之一[7-9]。

岩石动态力学模型的建立及相关参数的是决定数值模拟的正确性与否的关键因素，其中 RHT 模型[10]、KCC 模型[11]、HJC 模型[12]在模拟岩石材料动态力学行为中得到了广泛的应用。RHT 本构能很好描述损伤裂纹，但其所含参数较多，标定过程复杂。KCC 本构在 LS-DYNA 软件中可根据抗压强度来自动生成部分参数，自动生成的参数但主要适用于混凝土材料[13]。相对于 RHT 模型和 KCC 模型，Holmquist 与 1993 年提出的 Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构模型的参数数量相对较少、物理意义明确能够很好地描述材料在强动载作用下的力学行为，在岩石的动态力学的研究中得到了十分广泛应用。目前研究人员确定岩石的 HJC 的参数的主要方法是进行岩石的相关力学试验进行标定，结合数值仿真计算进行验证。如方秦[14]等基于三轴实验、Hugoniot 实验和 Hopkinson 压杆实验数据，来确定 HJC 模型的参数。利用 LS-DYNA 对 Salem 石灰岩的弹体侵彻实验进行了数值模拟，表明了所确定的 HJC 本构模型参数和确定方法的合理性和有效性。石祥超等[15]对灰砂岩进行了三轴压缩实验得出了灰砂岩 HJC 本构参数，使用 autodyn 进行了模拟分析，并对各个参数的敏感度进行分析。闻磊等[16]对不同冻融次数下的花岗斑岩 SHPB 试验进行了模拟，得到不同冻融次数下的花岗斑岩 HJC 本构参数。由此可见，HJC 本构模型在高压、大应变、高应变率工况的数值模拟计算中，实现了简单性和准确性的良好折中。

目前针对脆性材料的动力学研究大量集中在混凝土，特种陶瓷等领域[17-20]，对致密高强度红砂岩的相关的动静态力学试验和相应 HJC 本构参数的研究较少。本文利用三轴试验机和分离式霍普金森杆装置分别开展不同围压下和不同应变率下红砂岩的力学特性研究，并基于实验对红砂岩的 Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构模型的参数进行确定。采用 LS-DYNA 有限元软件进行数值模拟，开展与动态压缩实验对比验证，所确定的为红砂岩的 HJC 参数可为红砂岩的侵彻、爆破等问题提供参考。

1 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型简介

HJC 本构模型是由 Holmquist[12]等（1993）提出的，主要包括三个部分：强度方程、状态方程、损伤方程。该模型考虑了高静水压力、高应变率和材料的损伤效应。在 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型中，强度方程中包含极限面参数 A、B、N、S_{max} 和率效应系数 C；状态方程含有压力参数 K_1、K_2、K_3、P_{crush}、P_{lock}、μ_{lock} 和 μ_{crush}；损伤参数包括 D_1、D_2、EF_{min}，相应的基本力学参数有抗压强度 f_c、剪切模量 G、抗拉强度 T 和密度 ρ，共计 19 个参数。

2 动静态力学试验

以山东济南某石矿开采的致密高强度的红砂岩为研究对象，利用三轴试验机和分离式霍普金森杆装置开展红砂岩的动静态力学特性研究，通过试验得到红砂岩的静力学参数以及在不同围压、不同应变率加载下的力学特性，为 HJC 本构参数的确定提供支撑。

2.1 试验试件制备

试验所用红砂岩采自山东济宁地区某一山脉，试样均委托专业的岩石加工机构山东中科岩土科技有限公司进行加工制造。所用试样均采用取芯机在较为完整岩块上进行取芯，后用抛光机对试件进行精磨，来保证同种岩石间的力学性能的一致。岩样加工严格按照 ISRM[21]岩石力学试验标准进行加工，控制端面平行度在±0.05mm 以内，表面平整度在±0.02mm 以内，最后制成尺寸 Φ50mm×H100mm、Φ50mm×H30mm 和 Φ50mm×H25mm 的圆柱试件，如图 1 所示。取一定量的红砂岩试样研磨成粉末，进行 XRD 衍射分析，如图 2 所示，得到红砂岩主要为高岭石、石英、方解石、赤铁矿等矿物组成。

图 1 红砂岩圆柱形试件

Fig.1 Cylindrical specimen of red sandstone

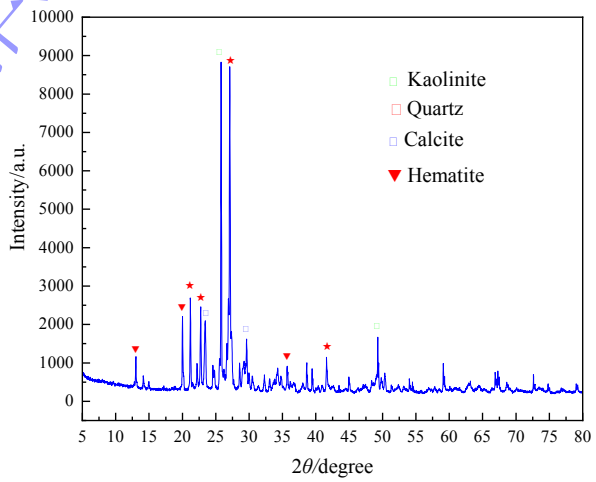


图 2 红砂岩试件 XRD 衍射分析

Fig.2 XRD diffraction analysis of red sandstone specimens

2.2 试验装置与原理

2.2.1 围压试验装置与原理

三轴围压试验使用 TAW-2000 微机控制岩石三轴试验机，如图 3 所示。该试验系统所配备的液压、围压均为独立的伺服控制系统，通过控制液压系统来实现试验机的上下移动，能够施加高达 2000kN 的轴向载荷，通过控制围压系统来压缩抗磨液压油，可均匀地在试样的整个表面上施加围压，最大围压可施加 120MPa。在红砂岩试件上安装环向和轴向引伸计，测得环向和轴向的应变，轴压和围压通过三轴试验机内置的力传感器获得。

图 3 TAW-2000 微机控制岩石三轴试验机

Fig.3 TAW-2000 microcomputer-controlled rock triaxial testing machine

三轴围压试验采用标准圆柱体试件，把试件放到上下压块的中间，使用合适大小热缩管包裹试件和上下压块，热风枪加热，使热缩管缩紧，在接缝处做好密封。连接径向和轴向传感器，封闭腔室进行围压和轴压的加载。试样三向应力加载路径如图 4 所示，先将目标围压（f_r=10MPa、20MPa、30MPa、40MPa）以 0.05MPa/s 的加载速率施加在红砂岩试样的表面（$OA:\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$），后对液压系统采用位移控制的方式，以 0.002mm/s 的加载速率对试件进行轴向加载直到试件破坏（$AB:\sigma_1-\Delta\sigma=\sigma_2=\sigma_3$）。

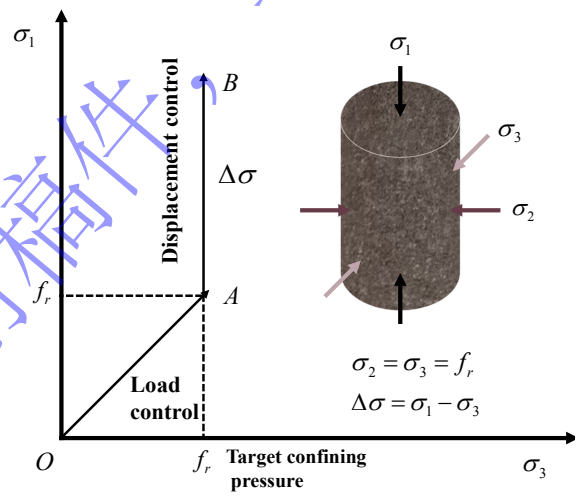


图 4 三向应力加载路径

Fig.4 Loading path in the triaxial compression tests

2.2.2 *动态压缩、劈裂试验装置与原理*

动态压缩和动态劈裂试验使用宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室的 Φ74mm 大口径分离式霍普金森压杆(SHPB)装置，SHPB 装置如图 5 所示。入射杆长 2800 毫米，透射杆长 1800 mm，子弹长度为 400 mm，由弹性模量为 210GPa、密度为 7850kg/m^3 的弹簧钢制成。所有杆的直径为 74 mm，并且采用圆环状橡胶作为整形器，试样与入射杆、透射杆的接触面涂抹凡士林，来减小撞击时应力波振荡。试验主要通过气压控制系统，来控制炮管内的气压，从而实现不同的应变率加载。

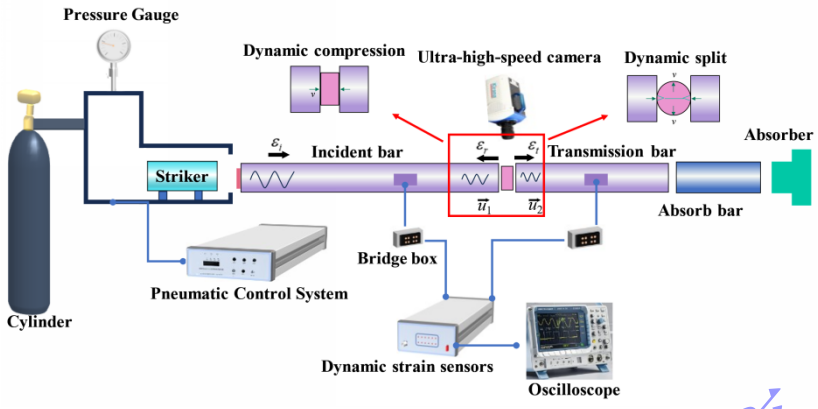


图 5 SHPB 装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of Split Hopkinson pressure bar

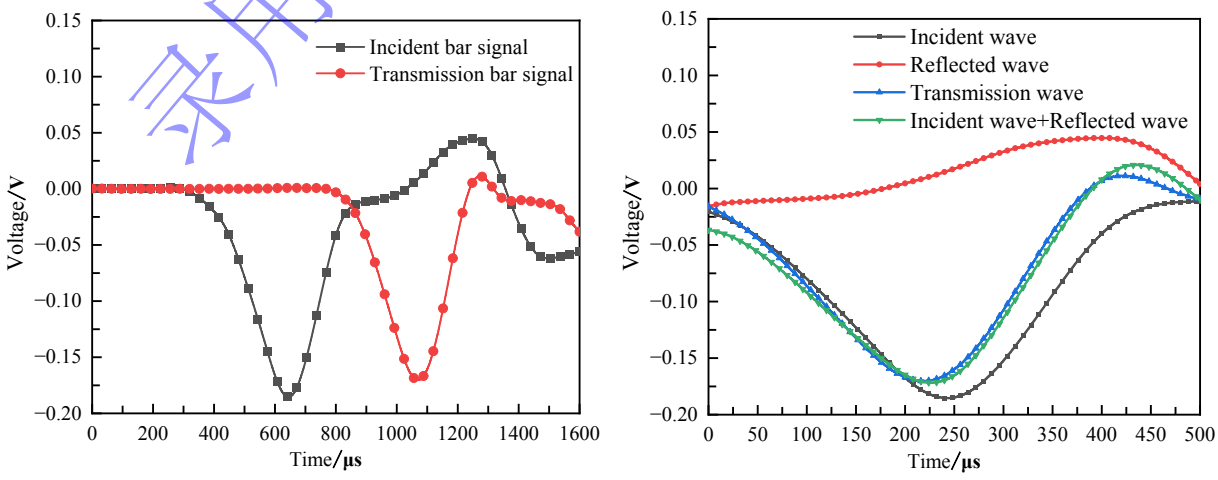
实验过程满足变形均匀性假定，即 $\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)=\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)$，根据应力波基本理论，在动态压缩试验中通过入射波 ε_i、反射波 ε_r 和透射波 ε_t 来得到在不同应变率下的应力和应变关系[22]，即公式（1）。参考混凝土的动态劈裂试验数据处理方法[23]，使用公式（2）可以得到在不同冲击加载下的红砂岩的拉应力。

$$\begin{cases}\sigma_s(t)=\dfrac{EA_0}{A_s}[\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)] \\ \varepsilon_s(t)=-\dfrac{2C_0}{l_s}\displaystyle\int_0^t\varepsilon_r(t)dt \\ \dot{\varepsilon}_s(t)=-\dfrac{2C_0}{l_s}\varepsilon_r(t)\end{cases} \tag{1}$$

$$\sigma_{dt}(t)=\frac{2P(t)}{\pi DH}=\frac{2EA_0\varepsilon_t(t)}{\pi DH} \tag{2}$$

其中，l_s 和 A_s 分别表示试样的长度和横截面积；D 和 H 分别为试件圆截面直径和高度；而 A_0、C_0 和 E 分别表示杆的横截面积、弹性波速度和弹性模量。

为满足变形均匀性假定，进行 SHPB 试验的应力平衡验证，如图 6 所示。通过叠加入射波和反射波来计算对比波，并将其与透射波进行比较。透射波和对比波之间良好的波形对准证实了实验数据的有效性和可靠性。



(a) Incident signal and transmitted signal

(b) Dynamic stress equilibrium curve

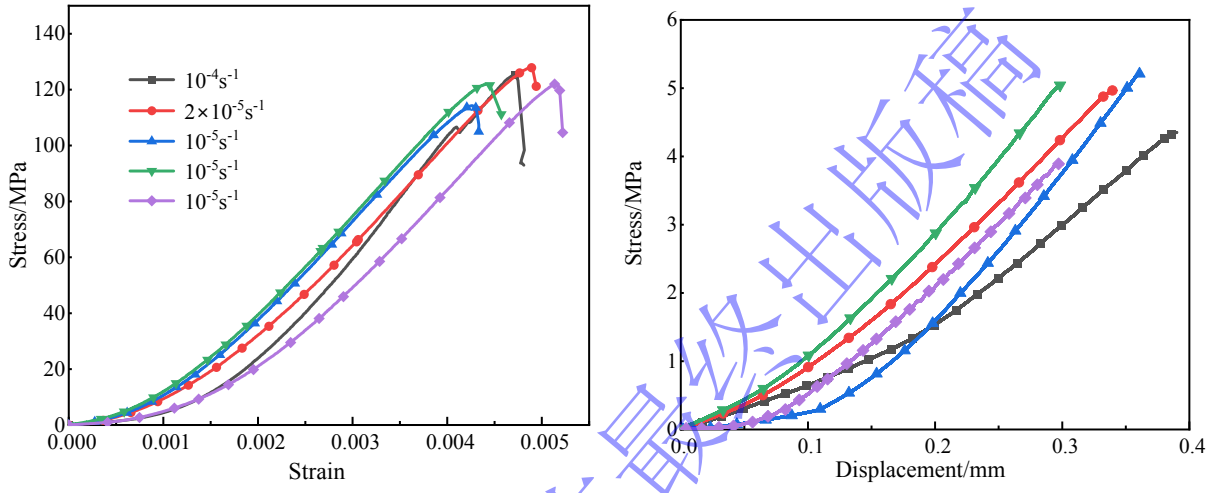
图 6 应力平衡条件验证

Fig.6 Validation of stress equilibrium state

2.3 试验结果与分析

2.3.1 静力学试验结果与分析

分别开展静态单轴压缩和静态巴西劈裂的静力学试验，静态单轴压缩试验采用尺寸 Φ50mm×H100mm 试件，静态巴西劈裂试验采用尺寸 Φ50mm×H30mm 试件，静力学试验结果曲线如图 7 所示。为了实现准静态稳定加载的状态，试验过程采用位移变形的控制方式，静态单轴压缩的应变率设置为 10^{-4}/s、2×10^{-5}/s 和 10^{-5}/s，静态巴西劈裂试验应变率设置为 10^{-5}/s。通过计算应变率 10^{-5}/s 的重复试验的平均值，得到红砂岩基本力学参数如表 1 所示。



(a) Stress-strain Curve in uniaxial compression text (b) Stress-displacemen curve in brazilian splitting text

图 7 静力学试验

Fig.7 Static mechanical testing

表 1 红砂岩静力学参数

Table 1 Static mechanical parameters of red sandstone

岩石种类	密度 ρ/(g/cm^3)	单轴抗压强度 f_c/MPa	抗拉强度 T/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 v
红砂岩	2.40	119.5	4.74	33.7	0.25

2.3.2 三轴围压试验结果与分析

三轴围压试验使用 Φ50mm×H100mm 的圆柱试件，选定 10MPa、20MPa、30MPa、以及 40MPa 四个不同的围压值进行压缩试验。为了消除在不同围压之下静水压力不同的影响，绘制了不同围压下偏应力与轴向和环向应变的关系曲线，其中轴向应变为正值，径向应变以负值的形式显示。如图 8 所示，在不同的围压下，红砂岩的偏应力-应变响应存在一定的差异，初始时具有相似的初始曲率，但随着围压的增加，曲线的线性段和峰值点的范围逐渐增大。如图 9 所示，从偏应力-应变关系曲线可以观察到，同其他岩石材料相似，红砂岩在压缩过程中经历四个典型阶段：压实（Ⅰ）、弹性变形（Ⅱ）、屈服（Ⅲ）和失效（Ⅳ）。压实阶段发生在受压缩初始时，试件在压缩应力下内部孔隙急剧闭合，应力-应变曲线呈现上凹状态，出现非线性的变形。弹性变形阶段时，试件内部孔隙在围压和轴压的双重作用下达到上限值，应力-应变曲线呈现线性状态，此阶段为岩石进行能量吸收主要阶段，并储存大量弹性能。屈服阶段时，应力-应变曲线呈现上凸状态，试件产生不可逆塑性变形和微裂纹的扩张，并伴随软化效应。随着塑性变形的增大，弹性能进行释放，微裂纹的扩张成主裂纹，红砂

岩断裂失效，断裂失效过程十分短暂[24, 25]。

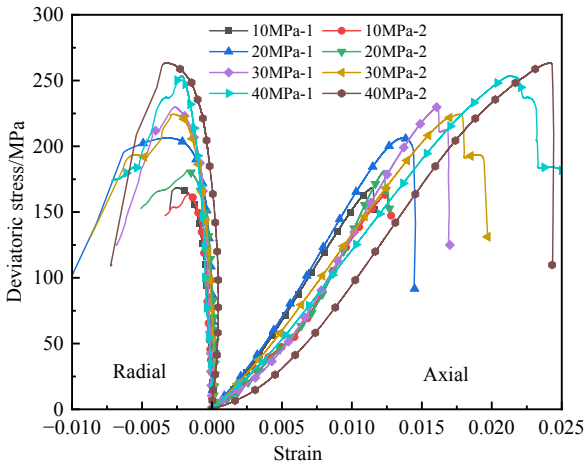


图 8 红砂岩偏应力-应变曲线

Fig.8 Deviatoric stress -strain curve of red sandstone

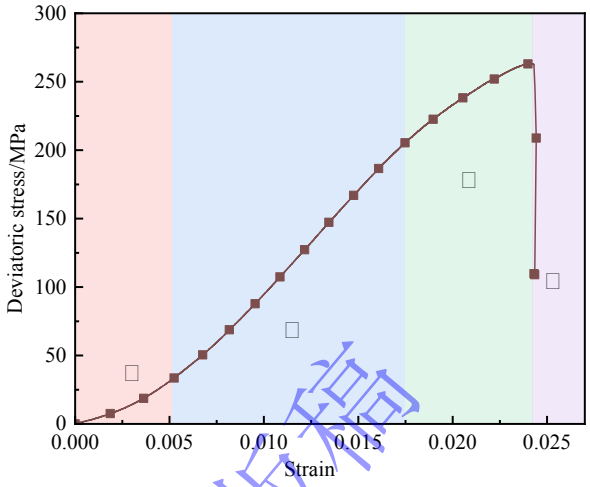


图 9 红砂岩受压缩中经历的四个典型阶段

Fig.9 The four typical stages of red sandstone under compression

表 2 为三轴围压试验结果，围压的大小对红砂岩试件的强度有较大的影响。围压的增加会导致红砂岩压缩强度的增大。将围压从 0MPa（单轴压缩实验：σ_2=σ_3=0MPa）增加到 40MPa，红砂岩压缩强度从 119.5MPa 增大至 298.4MPa，在围压 10MPa、20MPa、30MPa、以及 40MPa 下的增幅分别为 47.3%、79.1%、115.2%、159.7%。同混凝土相似，红砂岩内部同样存在许多孔隙，受到外界压力时，内部会产生微裂纹，从而导致破裂，而在围压环境下，这些裂纹的扩展方向和程度受到限制，使得裂纹难以快速贯通，从而延缓了砂岩的破坏过程，提高了红砂岩的整体强度。

表 2 三轴围压试验结果

Table 2 The triaxial compression tests Results

编号	围压 σ_3 /MPa	偏应力 σ_1 -σ_3 /MPa	平均偏应力/MPa	平均主应力 /MPa
A10-1	10	168.4	166.0	176.0
A10-2	10	163.6		
A20-1	20	206.4	194.0	214.0
A20-2	20	181.5		
A30-1	30	230.0	227.2	257.2
A30-2	30	224.3		
A40-1	40	253.6	258.4	298.4
A40-2	40	263.2		

莫尔-库仑 Mohr-Coulomb 破坏准则广泛用于评估岩石等脆性材料剪切破坏性能，Mohr-Coulomb 可表示为：

$$\sigma_1 = \alpha\sigma_3 + b \tag{3}$$

$$\sin\varphi = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \tag{4}$$

$$c = \frac{b(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} \tag{5}$$

其中，φ 和 c 分别为内摩擦角、黏聚力，α 为剪切破坏面与最大主应力之间的夹角，b 为莫尔圆

半径[26]。如图 10 所示，使用 Mohr-Coulomb 准则能很好地来描述红砂岩在不同围压下的强度关系，拟合式（3）后的公式为:

$$\sigma_1 = 4.579\sigma_3 + 119.5 \tag{6}$$

将拟合直线斜率 α=4.579 和截距 b=119.5 分别代入公式（4）、（5）可以求得黏聚力 c=27.91MPa，内摩擦角 φ=39.90°。

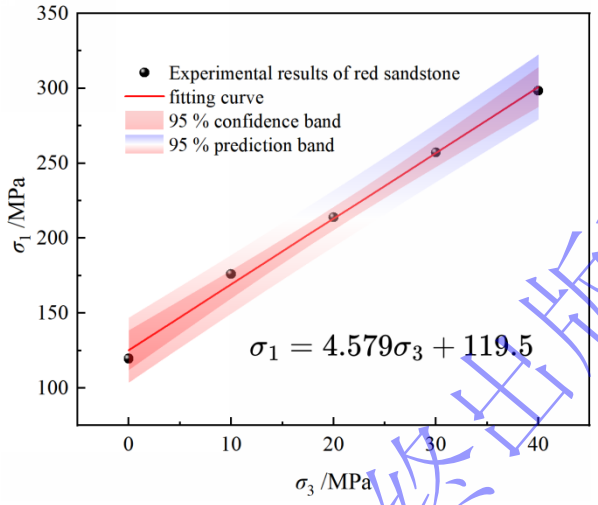


图 10 红砂岩莫尔-库仑准则

Fig.10 Mohr-Coulomb criterion of red sandstone

2.3.3 动态压缩、劈裂试验结果与分析

动态压缩实验和动态劈裂试验分别使用尺寸 Φ50mm×H25mm、Φ50mm×H30mm 的圆柱试件，选定大小为 0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa、、0.5MPa、0.6MPa 以及 0.65MPa 的冲击气压值，对每个气压值进行单轴冲击试验。图 11 显示了不同应变率加载下的红砂岩试件的动态压缩应力-应变曲线，随着应变率的提高，红砂岩压缩峰值应力从 119.5MPa 增大至 226.91MPa，在应变率 75s^{-1}、108s^{-1}、127s^{-1}、167s^{-1}、190s^{-1} 以及 258s^{-1} 下的增幅分别为 10.36%、23.35%、22.45%、50.54%、69.62%、89.88%。图 12 显示了不同应变率加载下的红砂岩试件的动态劈拉时的拉应力-时间曲线，随着应变率的提高，红砂岩拉伸峰值应力从 4.74MPa 增大至 33.17MPa，在应变率 47s^{-1}、56s^{-1}、75s^{-1}、86s^{-1}、101s^{-1} 以及 136s^{-1} 下的增幅分别为 140.13%、222.91%、431.15%、442.98%、488.17%、600.53%。应变率的提高，砂岩试样的动态抗压和抗拉的峰值应力都相应地增强，显示出显著的应变率现象，其中动态劈拉的率效应现象更为明显。同混凝土等脆性材料相似，由于在高速冲击载荷作用于红砂岩的瞬间，裂纹扩展速度明显低于应力波的传播速度，红砂岩内部的孔隙转变成裂缝过程受限，内部裂纹扩展不完全，内部能量不能迅速耗散，展现出较强的粘滞特性。因此，随着应变速率的增加，试样的累积冲击能量累积，导致应力相应增加[27]。

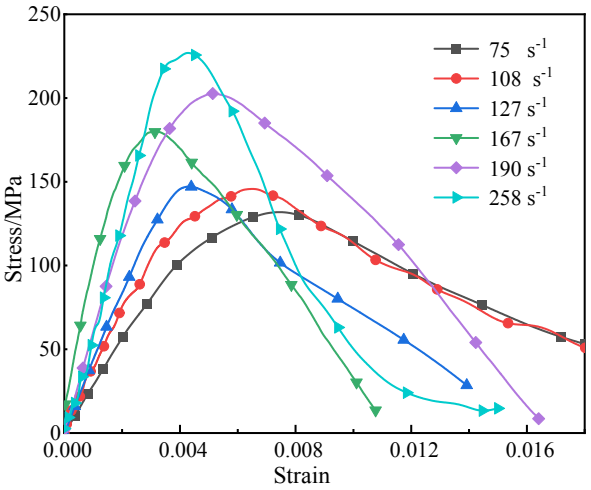


图 11 红砂岩动态压缩应力-应变曲线

Fig.11 Dynamic compressive stress-strain curve of red sandstone

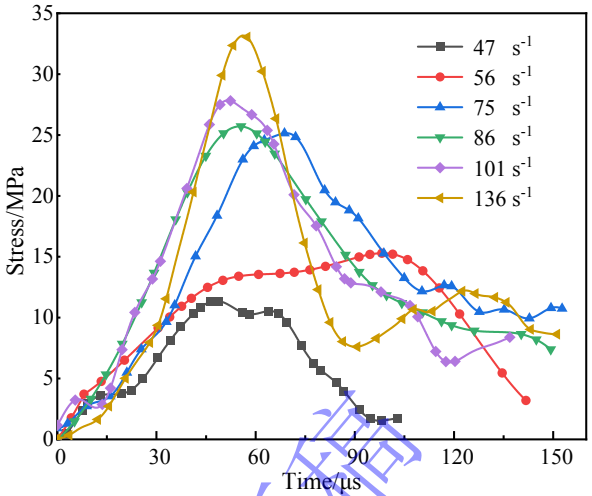


图 12 红砂岩动态劈裂应力-时间曲线

Fig.12 Mohr-Coulomb criterion relationship curve of red sandstone

为了定量地衡定红砂岩的率效应特征，定义了抗压强度因子（DIF_c）为岩石的动态压缩峰值应力与其静态压缩强度之比，抗拉强度因子（DIF_t）为岩石的动态拉伸峰值应力与其静态拉伸强度之比，来反应红砂岩对应变率变化的敏感性，其计算公式为：

$$DIF_c = \frac{f_{cd}}{f_c'} \tag{7}$$

$$DIF_t = \frac{f_{td}}{f_t'} \tag{8}$$

f_{cd} 为动态压缩冲击下的峰值应力，f_c' 为准静态单轴拉伸强度；f_{td} 为动态巴西劈裂的峰值应力，f_t' 为准静态巴西劈裂拉伸强度。

表 3 红砂岩在不同应变率下抗压强度和强度因子计算数据表

Table 3 Data table of compressive strength and strength factor of red sandstone under different strain rates

加载状态	气压/MPa	平均应变率/s^{-1}	压缩峰值应力/MPa	抗压强度因子 DIF_c
静态压缩	/	10^{-5}	119.50	1.000
	/	2×10^{-5}	125.20	1.047
	/	10^{-4}	127.90	1.070
动态压缩	0.2	75	131.88	1.104
	0.3	108	146.33	1.225
	0.4	127	147.40	1.233
	0.5	167	179.90	1.505
	0.6	190	202.69	1.696
	0.65	258	226.91	1.899

表 4 红砂岩在不同应变率下抗拉强度和强度因子计算数据表

Table 4 Data table of tensile strength and strength factor of red sandstone under different strain rates

加载状态	气压/MPa	平均应变率/s^{-1}	拉伸峰值应力/MPa	抗拉强度因子 DIF_t
静态劈裂	/	10^{-5}	4.74	1.000
动态劈裂	0.2	47	11.37	2.399

0.3	56	15.29	3.226
0.4	75	25.15	5.306
0.5	86	25.71	5.424
0.6	101	27.85	5.876
0.65	136	33.17	6.998

参考 J. W. Tedesco[28]和宫凤强[29]提出的 DIF 公式，如图 13、图 14 所示，拟合得到的红砂岩的 DIF_c 和 DIF_l 值与动态应变率可建立如下关系式。

$$DIF_c=\begin{cases}0.01045\ \lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)+1.0318 & (\dot{\varepsilon}<75s^{-1})\\ 1.3153\ \lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)-7.9394 & (\dot{\varepsilon}\geq 75s^{-1})\end{cases} \tag{9}$$

$$DIF_l=\left[\frac{7.271}{7.271-\lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)}\right]^{1-0.509\frac{\lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)}{7.271}} \tag{10}$$

$\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别是动态应变率和参考的静态应变率，其中 $\dot{\varepsilon}_0=10^{-5}s^{-1}$。

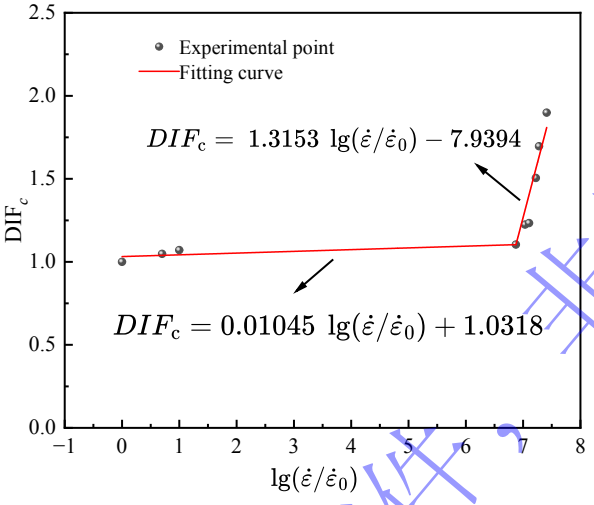


图 13 不同应变率下抗压强度因子（DIF_c）拟合曲线

Fig.13 Fitting curves of compressive strength factor (DIF_c) under different strain rates

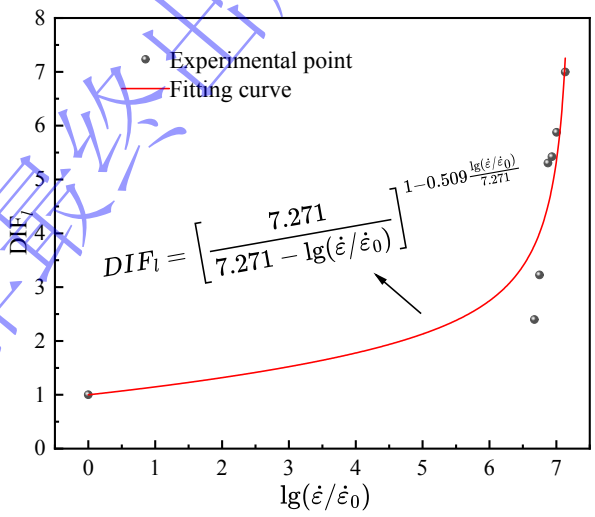


图 14 不同应变率下抗拉强度因子（DIF_l）拟合曲线

Fig.14 Fitting curves of tensile strength factor (DIF_l) under different strain rates

3 红砂岩 HJC 模型参数确定

3.1 极限面参数

HJC 本构模型在无损伤($D=0$)且不考虑应变率效应时为：

$$\sigma^*=A+BP^{*N} \tag{11}$$

岩石在进行围压试验时为准静态加载，初始状态完好，可用公式（11）表示其强度。熊益波[30]指出不考虑损伤和率效应的 HJC 模型和 Mohr-Coulomb 本构模型极限面上的纯剪切特征点相同，得出了无量纲的粘性强度系数 A 的计算公式 $A=c/f_c$，计算可得得 $A=0.234$。通过式 $\sigma^*=\sqrt{3J_2}/f_c=(\sigma_1-\sigma_3)/f_c$ 和 $P^*=(I_1/3)/f_c=(\sigma_1+2\sigma_3)/f_c$ 来对不同围压条件下的三轴压缩试验进行无量纲化，对式（11）进行拟合，如图 15 所示，拟合的强度方程为 $\sigma^*=0.244+1.832P^{*0.80}$，由此可得 $B=1.832$、$N=0.80$。

3.2 压力参数

本次研究的红砂岩不溶于水，采用排水法测得的孔隙度 q 为 4.43%，通过式 $\rho_g=\rho/(1-q)$ 可得红砂岩达到压实极限后的密度为 2.5078 g/cm^3。通过原始文献的公式 $P_{crush}=f_c/3$、$\mu_{crush}=P_{crush}/K$ 和 $\mu_{lock}=\rho_g/\rho_0-1$，可得到弹性极限时的静水压力 P_{crush} 值为 39.83 MPa，弹性极限时的体积应变 μ_{crush} 为 0.00177，压实极限时的体积应变 μ_{lock} 为 0.0449。压力常数 K_1、K_2 和 K_3 可以由红砂岩的 Hugoniot 实验数据确定。采用仇志龙[31]和聂铮玥[32]针对红砂岩进行 Hugoniot 实验的数据进行拟合，如图 16 所示，可得红砂岩在密实段的状态方程为 $P=23.78\bar{\mu}+64.36\bar{\mu}^2+150.24\bar{\mu}^3$，可见压力常数 K_1、K_2 和 K_3 分别为 23.78GPa、64.36GPa、150.24GPa，将 μ_{lock} 代入密实段的状态方程得到 P_{lock} 为 1.211GPa。

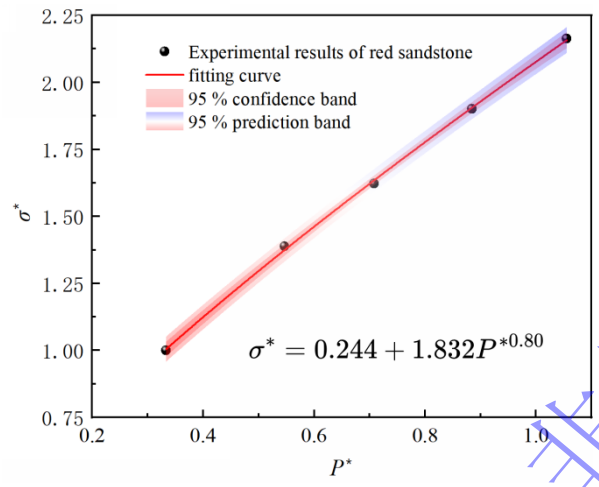


图 15 极限面参数拟合曲线

Fig.15 Fitting curves of limit surface parameters

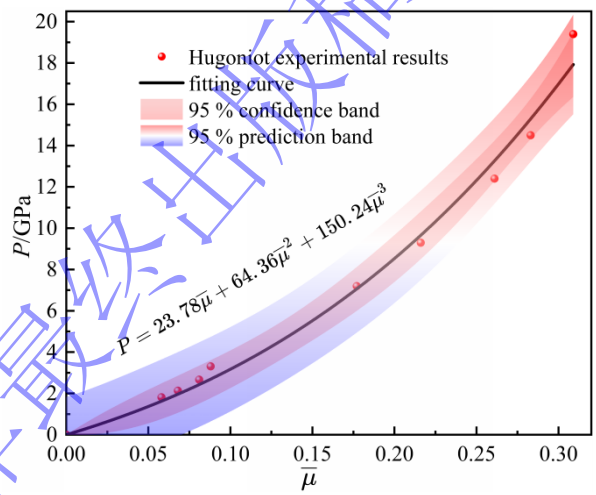


图 16 压力参数拟合曲线

Fig.16 Fitting curves of pressure parameters

3.3 应变率参数

通过表 3 中的试验数据，得到无量纲的等效应力 σ^* 和静水压力 P^*，连接点（$-T^*$，0）和点（P^*, σ^*），取无量纲的静水压力 $P^*=1/3$ 时的作为红砂岩不同应变率下的归一化强度，如图 17 所示。将不同应变率下的归一化强度和静力学试验的无量纲等效应力进行拟合成直线，该直线的斜率即为所要确定的应变率系数 C，如图 18 所示，得到红砂岩的应变率系数 C 为 0.00182。

表 5 红砂岩在不同应变率下归一化强度计算数据表

Table 5 Calculation Data Table of Normalized Strength of Red Sandstone under Different Strain Rates

加载状态	平均应变率 /s^{-1}	无量纲静水压力 P^*	无量纲等效应力 σ^*	归一化强度
静态压缩	10^{-5}	0.333	1.000	1.0000
	2×10^{-5}	0.349	1.048	1.0048
	10^{-4}	0.357	1.070	1.0069
动态压缩	75	0.368	1.104	1.0099
	108	0.408	1.225	1.0195
	127	0.411	1.233	1.0201

167	0.502	1.505	1.0362
190	0.565	1.696	1.0446
258	0.633	1.899	1.0518

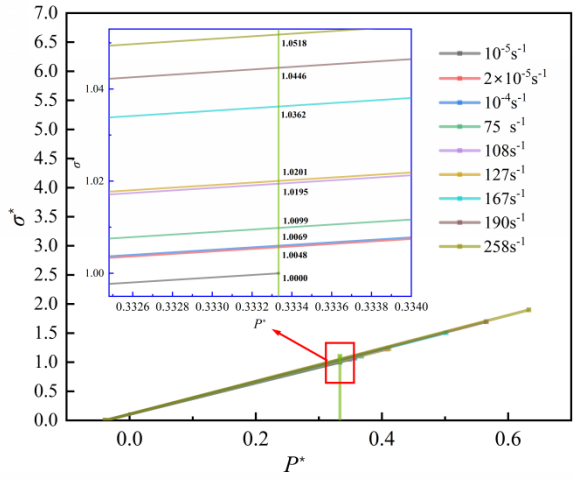


图 17 红砂岩在不同应变率下的归一化强度

Fig.17 Normalized strength of red sandstone under different strain rates

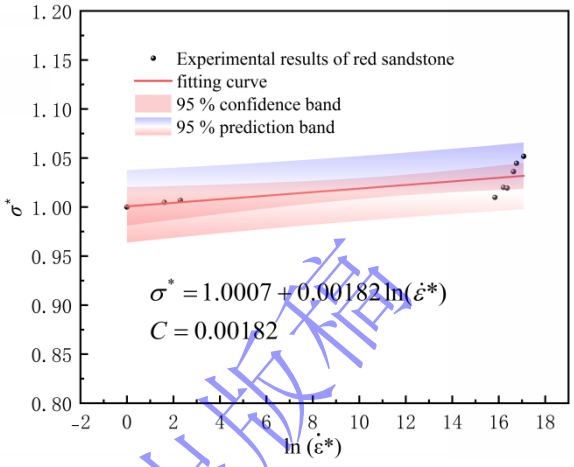


图 18 应变率系数拟合曲线

Fig.18 Fitting curves of strain rate coefficient

其余参数采用原始文献的方法进行确定，其中 EF_{min} 和 D_2 采用原始文献的参考取值，综合所得红砂岩 HJC 本构参数如表 6 所示。

表 6 红砂岩 HJC 本构参数

Table 6 The HJC constitutive parameter of Red Sandstone

ρ /(g/cm^3)	f_c/MPa	G/GPa	T/MPa	A	B	N	C	S_{max}	EF_{min}
2.40	119.5	13.484	4.74	0.234	1.832	0.80	0.00182	7.0	0.01
P_{crush} /GPa	μ_{crush}	P_{lock} /GPa	μ_{lock}	K_1 /GPa	K_2 /GPa	K_3 /GPa	D_1	D_2	
39.83	0.00177	1.211	0.0449	23.78	64.36	150.24	0.03872	1.0	

4 红砂岩冲击破坏的数值模拟

4.1 SHPB 动态压缩模型建立

如图 19 所示，利用 LSDYNA 数值模拟软件建立了 SHPB 动态压缩试验的有限元模型。有限元模型由子弹、整形器、入射杆、透射杆和红砂岩试件组成，具体尺寸大小根据 2.2.2 节的实际情况确定，其中子弹、入射杆、透射杆采用*MAT_ELASTIC 本构模型，整形器采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 本构模型、红砂岩试件采用*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 本构模型。子弹与入射杆定义面面接触*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE，红砂岩试件同入射杆和透射杆定义侵蚀接触*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE。

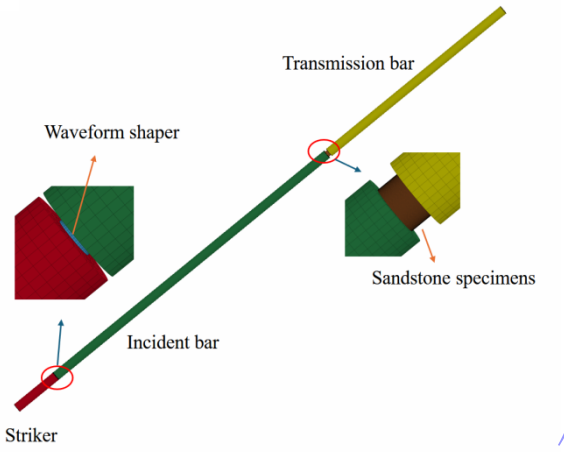


图 19 SHPB 动态压缩试验的有限元模型图

Fig.19 Finite Element Model Diagram of SHPB Dynamic Compression Test

4.2 SHPB 动态压缩试验与数值模拟的对比验证

图 20 显示了红砂岩试件在平均应变率为 127 s^{-1} 时的动态断裂破坏过程，数值仿真的计算与超高速的记录过程高度一致。在冲击加载下，T=100μs 时，红砂岩试件受到应力作用，在试件的边缘和内表面形成不连续拉伸裂纹网络，随着能量的不断积累，在 T=150μs 时，不连续拉伸裂纹网络扩张形成连续贯通的主裂纹，并在裂纹尖端伴随大量次生裂纹分叉。T=400μs 后，试件沿着主裂纹进行分离，产生大量细粒喷溅碎屑向四周扩散。

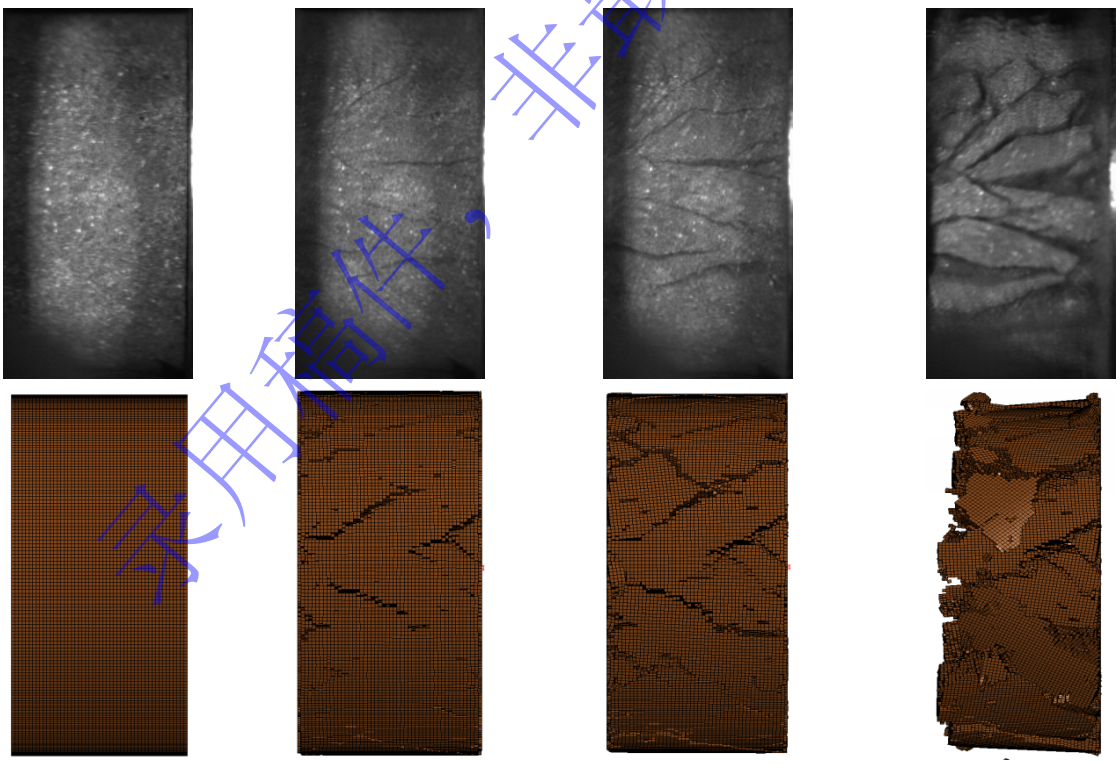
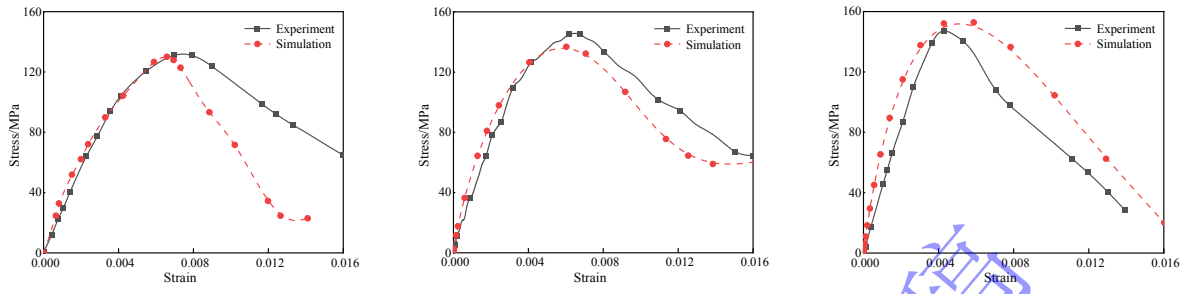


图 20 动态压缩实验与模拟的红砂岩动态断裂图对比

Fig.20 Comparison of dynamic fracture patterns between experimental and simulated dynamic compression tests

图 21 为不同应变率下红砂岩的数值模拟和动态压缩试验应力-应变曲线的比较，数值模拟中应变率 75s^{-1}、108s^{-1}、127s^{-1} 对应的峰值应力分别为 130.13MPa、136.83MPa、152.81MPa，与真实的动态

压缩实验相比其相对误差分别为 1.3%、6.5%、3.7%。可以看出，在未达到最大峰值应力时，数值模拟结果与试验的结果应力-应变曲线基本一致，反映了确定的红砂岩的 HJC 本构模型参数在一定程度上能够再现红砂岩的动态力学性能。在数值模拟中，试件的部分网格会自动删除，会干扰动态压缩失效段应力波的传递过程，造成数值模拟结果与试验失效段应力-应变曲线一致性较差。



（a）75s^{-1}　　（b）108s^{-1}　　（c）127s^{-1}

图 21 不同应变率下动态压缩实验与模拟的应力-应变曲线对比曲线图

Fig.21 Comparative stress–strain curves of dynamic compression experiments and simulations under various strain rates.

5 结论

本文针对红砂岩分别开展不同围压下和不同应变率下红砂岩的力学特性研究，并基于动静态力学试验对红砂岩的 Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构模型的参数进行确定。采用已经确定的红砂岩的 HJC 本构模型的参数，建立了 SHPB 动态压缩试验的有限元模型对参数进行验证，得到的主要结论如下。

（1）通过红砂岩的动静态力学试验的数据，结合 Holmquist-Johnson-Cook 的强度方程、状态方程、损伤方程的分析，对红砂岩的 Holmquist-Johnson-Cook（HJC）本构模型的 19 个参数进行了确定。确定的 HJC 本构模型参数在 LS-DYAN 中可以较好地模拟红砂岩在动态冲击的损伤失效过程，在未达到最大峰值应力时，数值模拟结果与试验的结果应力-应变曲线基本一致。本文确定的致密高强度的红砂岩 HJC 本构模型参数可为红砂岩的动态力学性能的研究和工程应用提供参考。

（2）红砂岩随着静水压力的增加，其偏应力-应变曲线的线性段和峰值点的范围逐渐增大。在围压环境下，内部裂纹的扩展方向和程度受到限制，使得裂纹难以快速贯通，从而峰值应力随着静水压力的增加而增加。

（3）红砂岩在不同气压的加载下，存在明显率效应现象，动态抗压和劈拉强度与平均应变率呈现正相关，通过抗压强度因子（DIF_c）和抗拉强度因子（DIF_t）的研究分析，动态拉伸峰值应力的率效应现象更为明显。

参考文献

[1] LI Y, FENG Z, ZHU Y, et al. Engineering characteristics and application analysis of red sandstone in the lanzhou metro[J]. Geofluids, 2023, 2023(1): 8927005.**DOI**: https://doi.org/10.1155/2023/8927005.

[2] 罗恒, 邹金锋, 李亮,等. 红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 2701-2706.

LUO H, ZOU J F, LI L, et al. Test study on soil dynamic stress diffusion and deformation during dynamic compaction in roadbed primed with large granule red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 2701-2706.

[3] 张栋, 吕新彪, 葛良胜,等. 军事地质环境的研究内涵与关键技术[J]. 地质论评, 2019, 65: 181-198.**DOI**:

10.16509/j.georeview.2019.01.012.
ZHANG D, LÜ X, GE L, et al. Research connotation and key technology of the military geological environment in the land battlefield[J]. Geological Review, 2019, 65: 181-198.**DOI**: 10.16509/j.georeview.2019.01.012.

[4] YI C, JOHANSSON D, GREBERG J. Effects of in-situ stresses on the fracturing of rock by blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 321-330.**DOI**: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.12.004.

[5] 吴越. 钻地弹对典型地堡侵爆复合毁伤效能影响要素研究[D], 南京: 南京理工大学, 2014:1-8.

[6] 李国辉, 刘基程, 耿汉生,等. 岩石高速-超高速侵彻效应研究进展[J]. 防护工程, 2023, 45: 67-78.
LI G H, LIU J C, GENG H S, et al. Progress of research on high and ultra-high speed rock penetration effects[J]. Protective Engineering, 2023, 45: 67-78.

[7] YANG Y, KONG X, FANG Q, et al. Experimental and numerical investigation on projectile penetration resistance of a composite material made of granite rubble and UHPC[J]. International Journal of Impact Engineering, 2025, 204: 105390.**DOI**: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105390.

[8] BARANOWSKI P, KUCEWICZ M, GIELETA R, et al. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: Parameter determination, experiments and simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140: 103543.**DOI**: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103543.

[9] 韩鸿宇, 姚文进, 张笑瀛,等. 弹体侵彻岩石-混凝土复合靶数值分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44: 73-78.**DOI**: 10.19323/j.issn.1673-6524.2023.06.011.
HAN H Y, YAO W J, ZHANG X Y, et al. Numerical analysis-of projectiles-penetrating: rock-concrete composite-targets[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2023, 44: 73-78.**DOI:** 10.19323/j.issn.1673-6524.2023.06.011.

[10] 黄永辉, 孙博, 张智宇,等. 岩石 RHT 本构的爆破碎裂判定方法优化及验证 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43: 565-574.**DOI:** 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.157.
HUANG Y H, SUN B, ZHANG Z Y, et al. Optimization and Verification of Blasting Fragmentation Judgment Method for RHT Constitutive Model of Rock[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43: 565-574.**DOI:** 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.157.

[11] REN L, YU X, ZHENG M, et al. Evaluation of typical dynamic damage models used for UHPC ba sed on SHPB technology[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 269: 108562.**DOI:** https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108562.

[12] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A Computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[C]// In: Proceedings of The 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993: 591–600.

[13] 杜闯, 宋帅, 张江鹏. 爆炸冲击作用下三种混凝土本构模型对比研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43: 49-56.**DOI:** 10. 11809/bqzbgcxb2022. 11. 007.
DU C, SONG S, ZHANG J P. Comparative study on three concrete constitutive models under blast loading[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43: 49-56.**DOI**: 10. 11809/bqzbgcxb2022. 11. 007.

[14] 方秦, 孔祥振, 吴昊,等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31: 197-204.
FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of holmquist-johnson-cook consitiutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31: 197-204.

[15] 石祥超, 陶祖文, 孟英峰,等. 致密砂岩 Johnson-Holmquist 损伤本构模型参数求取及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34: 3750-3758.**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0515.
SHI C X, TAO Z W, MENG Y F, et al. Calculation and verification for johnson-holmquist constitutive model parameters of tight sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34: 3750-

3758.**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0515.

[16] 闻磊, 李夕兵, 吴秋红,等. 冻融循环作用下花岗斑岩动载强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34: 1297-1306.**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1250.
WEN L, LI X B, WU Q H, et al. Dynamic strength of granite porphyry under freezing-thawing cyc les[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34: 1297-1306.**DOI:** 10.13722/j.cn ki.jrme.2014.1250.

[17] 张仲昊, 汪维, 张国凯,等. 不同高温作用后混凝土劣化损伤性能[J]. 兵工学报, 2023, 44: 152-159.**DOI:** 10.12382/bgxb.2023.0731.
ZHANG Z H, WANG W, ZHANG G K, et al. Study on deterioration and damage performnance of concrete at different high temperatures[J]. Acta Armamentarii 2023, 44: 152-159.**DOI:** 10.12382/bgxb.2023.0731.

[18] 宋春明, 张中威, 林渊,等. ZTA 陶瓷动态力学性能及其纤维增强复合结构的抗侵彻行为研究[J]. 防护工程, 2024, 46: 1-8.
SONG C M, ZHANG Z G, LIN Y, et al. Study on dynamic mechanical properties of ZTA ceramics and penetration resistance behavior of fiber-reinforced composite structures[J]. Protective Engineering, 2024, 46: 1-8.

[19] WANG W, ZHANG Z, HUO Q, et al. Dynamic compressive mechanical properties of ur50 ultra-early-strength cement-based concrete material under high strain rate on shpb test[J]. Materials, 2022, 15(17): 6154.**DOI:** https://doi.org/10.3390/ma15176154.

[20] WANG W, XU Z, LI Y, et al. Experimental and numerical investigation of polyurea reinforced conc rete thick slab under contact explosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 171: 109349.**DOI:** http s://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109349.

[21] BIENIAWSKI Z T, BERNEDE M J. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 138-140.**DOI:** https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91451-7.

[22] 单仁亮, 戴其航, 梁俊奇,等. 基于砂岩 SHPB 试验的 HJC 模型参数研究[J]. 防护工程, 2025, 47: 1-7.
SHAN R L, DAI Q, LIANC J, et al. A study on the HJC model parameters based on SFPB test of sandstone[J]. Protective Engineering, 2025, 47: 1-7.

[23] 崔大顺, 王利民, 薛辉庭,等. 冲击荷载作用下纤维混凝土动态劈裂试验与分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43: 219-226.**DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2024.16.027.
CUI D S, WANG L M, XUE H T, et al. A dynamic splitting test and analysis of fiber reinforced concrete under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43: 219-226.**DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2024.16.027.

[24] 秦涛, 段燕伟, 孙洪茹,等. 砂岩三轴加载过程中力学特征与能量耗散特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45: 255-262.**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1393.
QIN T, DUAN Y W, SUN H R, et al. Mechanical characteristics and energy dissipation characteristics of sandstone under triaxial stress conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45: 255-262.**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1393.

[25] 储超群, 包兴佳, 毛明发,等. 深地灰岩三轴压缩声发射特征及破坏形式试验研究[J]. 岩土力学, 2025, 46: 2049-2061+2105.**DOI:** 10.16285/j.rsm.2024.1229.
CHU C Q, BAO X J, MAO M F, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics and failure forms of deep-buried limestone under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46: 2049-2061+2105.**DOI:** 10.16285/j.rsm.2024.1229.

[26] LIU H, LIU J, ZHANG S, et al. Experimental study on compression characteristics of fractured soft rock and

its Mohr-Coulomb criterion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 125: 103820.**DOI**: https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103820.

[27] LI Z, LI M, YANG H, et al. Experimental study and numerical simulation of the dynamic mechanical properties of ceramsite concrete containing different types of coarse aggregates[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22: e04431.**DOI:** https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04431.

[28] TEDESCO J W, ROSS C A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 1998, 120(4): 398-405.**DOI**: 10.1115/1.2842350.

[29] 宫凤强, 王进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37: 1586-1595.**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1239.

GONG F Q, WANG J, LI X B. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37: 1586-1595.**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1239.

[30] 熊益波, 胡永乐, 徐进,等. 混凝土 Johnson-Holmquist 模型极限面参数确定[J]. 兵工学报, 2010, 31: 746-751.

XIONG Y B, HU Y L, XU J, et al. Determining Failure Surface Parameters of the Johnson-Holmquist Concrete Constitutive Model[J]. Acta Armamentarii 2010, 31: 746-751.

[31] 仇志龙, 赵奎, 曹业锐,等. 红砂岩平板撞击实验与高压状态方程研究[J]. 爆破, 2024, 41: 69-74+84.**DOI:** 10.3963/j. issn.1001-487X.2024.03.009.

QIU Z L, ZHAO K, CAO Y R, et al. Study on planar impact experiment and state equation under high pressure of red sandstone[J]. Blasting, 2024, 41: 69-74+84.**DOI:** 10.3963/j. issn.1001-487X.2024.03.009.

[32] 聂铮玥. 三种典型岩石材料的 RHT 模型参数研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021:73-80.