

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.009

基于 HJC 本构模型的石灰岩冲击破坏形态 数值模拟方法研究*

娄乾星,陶铁军,田兴朝,谢财进

(贵州大学 土木工程学院,贵阳 550025)

摘要: 为探寻石灰岩冲击荷载作用下数值模型参数选取的合理性,基于 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 本构模型构建石灰岩冲击破坏数值分析方法,同时对桐梓隧道现场钻取的石灰岩开展静力学试验,获得了基本物理力学参数。首先通过三轴围压实验、Hopkinson 压杆等实验,获得了岩样极限面参数、压力参数和率效应参数;然后在 SHPB 冲击作用下进行了 LS-DYNA 数值模拟和室内试验,将两者计算结果进行了对比,最后以动态峰值应力为目标函数,对石灰岩 HJC 本构模型的 21 个参数进行了敏感性分析。结果表明:数值计算与 SHPB 室内试验取得的应力-应变曲线及破坏形态吻合度较好,表明了石灰岩 HJC 本构模型参数取值的合理性;石灰岩强度对参数 f_c 、 A 、 B 、 N 较为敏感,其强度增大或减小的最大变化率均超过 10%。

关键词: 石灰岩; HJC 本构模型; 数值模拟; SHPB 试验; 敏感性分析

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0071-09

Research on Numerical Simulation Method of Limestone Impact Failure based on HJC Constitutive Model

LOU Qian-xing, TAO Tie-jun, TIAN Xing-chao, XIE Cai-jin

(School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the rationality of the parameter selection for the numerical model of limestone under the action of impact load, a numerical analysis method for the impact failure of limestone was constructed based on the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) constitutive model. At the same time, static tests were carried out on the limestone drilled in Tongzi tunnel, and the basic physical and mechanical parameters were obtained. First, the rock sample limit surface parameters, pressure parameters and rate effect parameters were obtained through triaxial confining pressure experiments, Hopkinson pressure bar and other experiments. Then, LS-DYNA numerical simulation and SHPB tests were carried out, and the results were compared. Finally, the sensitivity analysis of 21 parameters of the limestone HJC constitutive model was carried out with the dynamic peak stress as the objective function. The results show that the numerical calculation is in good agreement with the stress-strain curve and the failure form obtained from the SHPB laboratory tests, indicating the rationality of the parameters of the limestone HJC constitutive model in this paper. The strength of the limestone is sensitive to the parameters f_c , A , B , and N , and either the maximum change rate of its intensity increase or decrease exceeds 10%.

Key words: limestone; HJC constitutive model; numerical simulation; SHPB test; sensitivity analysis

收稿日期:2022-06-19

作者简介:娄乾星(1997-),男,硕士,主要从事隧道工程、结构工程专业,(E-mail)1049179033@qq.com。

通讯作者:陶铁军(1984-),男,博士、教授、博士生导师,主要从事隧道工程、爆破工程科研,(E-mail)tjtao@gzu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(52064008)

HJC 模型是由 T J Holmquist 等为解决高应变率及高压荷载下混凝土的大变形问题提出的一种本构模型,目前在岩石材料的动态冲击破坏过程中应用广泛。由于岩石种类不同和地质条件的差异性,该类材料的物理力学性质较难统一。然而,其材料本构模型的参数直接影响数值模拟结果的可靠性,因此对石灰岩材料 HJC 模型参数的确定和验证是必要的。

目前,国内外学者针对 HJC 模型参数方面的研究较多,任亮等通过数值模拟和实验分析了 HJC 模型强度参数 A 与参考应变率之间的相关性^[1],并对参数进行了优化。米振国等通过 ANSYS-LS-DYNA 优先软件研究了适用于 130 mm 穿甲侵彻混凝土靶的 HJC 本构模型参数,并以加速度为变量进行了研究^[2]。张嘉凡等把 HJC 本构模型运用到煤岩中,通过数值模拟的方式确定液态 CO_2 爆破效果^[3]。刘锦等采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件中的 HJC 本构模型结合实验的方式重现了煤岩的动态压缩的破坏过程^[4]。孙玉祥等采用 58 mm 火炮加载技术和多普勒探针系统测速技术对不同抗压强度的混凝土进行了平板撞击实验的数值模拟^[5],确定了 HJC 本构模型状态方程参数。汪衡等研究了 LS-DYNA 软件中 HJC 本构模型的损伤参数 F ,并通过动能弹侵彻深度和弹体的剩余速度进行了校准^[6]。苏伟林等通过 HJC 本构模型研究了盾构刀具切削混凝土材料时的阻力大小及变化规律^[7]。张社荣等结合静动态力学实验确定了 HJC 本构模型参数^[8]。姚本余等通过静力学实验确定了 HJC 本构模型的基本参数^[9],采用 LS-DYNA 程序模拟了不同速度冲击煤岩的破碎程度。凌天龙等通过静力学实验与 SHPB 室内实验确定了砂岩的 HJC 本构模型的参数^[10],对室内实验与数值模拟的应力-应变曲线进行了对比。李成武等采用 LS-DYNA 有限元软件对煤岩 SHPB 实验进行了数值模拟,重现了室内实验过程中的应力波^[11]。闻磊等采用 HJC 本构模型研究了花岗斑岩 SHPB 动态冲击过程中的力学性能^[12]。方秦等通过理论研究确定 HJC 本构模型参数^[13],采用数值模拟研究了 Salem 石灰岩的弹体侵彻实验。

目前,HJC 本构模型的研究多集中在混凝土冲击破坏方面,也有部分学者将 HJC 本构模型引入岩石材料的动力学分析中,数值模拟效果较好。但对于我国西南地区常见岩石——石灰岩 HJC 本构模型参数的研究却鲜有报道,同时在 HJC 本构模型参数确定方法方面,基本通过传统的室内试验和经验公式确定,不具有适用性及推广性,无法还原石灰岩

的 SHPB 动态冲击破坏过程。

本文以石灰岩静力学试验、三轴围压实验、Hugoniot 实验^[14]、Hopkinson 压杆实验^[15]、石灰岩极限面参数 A 与帽盖模型参数的关系为基础,确定了石灰岩 HJC 本构模型参数,基于确定的石灰岩模型参数,采用 LS-DYNA 有限元分析软件再现了石灰岩 SHPB 冲击破坏的全过程,将该数值模拟岩石破坏过程中的应力-应变曲线与试验进行对比分析,验证该 HJC 本构模型取值的合理性及有效性,并以动态峰值应力为目标函数,对 21 个参数进行了敏感性分析,为石灰岩动力学分析提供一种简单可行的数值模拟方法^[16-18]。

1 HJC 本构模型

HJC 本构模型是由 T J Holmquist 等为解决高应变率及高压荷载下的大变形问题提出的一种率相关本构模型^[19],适用于拉格朗日与欧拉算法,模型主要包括屈服强度函数、状态方程及损伤演化方程三部分。

屈服强度模型由标准化等效应力表示

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (1)$$

$$\sigma^* = \sigma / f'_c \quad (2)$$

式中: σ 为实际等效应力; f'_c 为准静态单轴抗压强度; $P^* = P/f'_c$ 为标准化静水压力(P 为实际静水压力); $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲应变率(其中 $\dot{\varepsilon}$ 为真实应变率; $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率); D 为损伤度($0 \leq D \leq 1.0$); A 、 B 、 C 、 N 为材料的强度参数。屈服面方程图如图 1 所示。

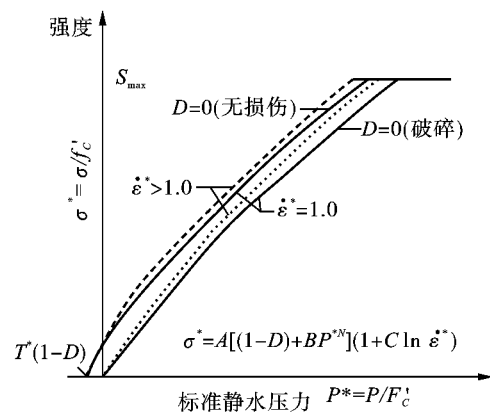


图 1 HJC 屈服面方程

Fig. 1 HJC yield surface equation

状态方程描述静水压力 P 与体积应变 μ 之间的关系, OA 弹性阶段 ($P \leq P_e$), AB 塑性阶段 ($P_e \leq P \leq P_l$), 该阶段材料内部空隙被压缩导致材料产生塑性体积应变, 结构出现损伤; BC 密实阶段 ($P \leq P_l$), 该阶段材料完全被压缩达到完全密实状态, 呈

现非线性变化,采用三次多项式表示: $P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3$, $\bar{\mu} = (\mu - \mu_1) / (\mu + \mu_1)$, $\bar{\mu}$ 为修正体积应变, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ 为材料即时密度, ρ_0 为材料初始密度, K_1, K_2, K_3 为常数。状态方程如图 2 所示。

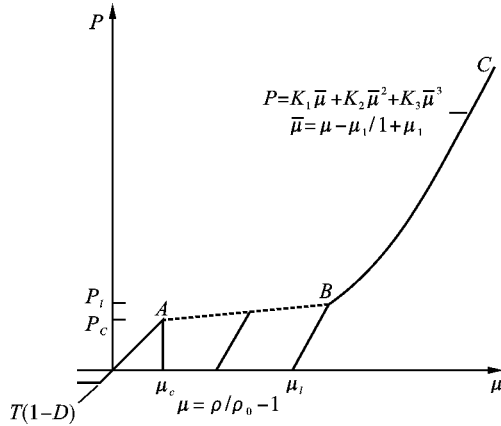


图 2 HJC 状态方程

Fig. 2 HJC state equation

损伤模型由等效塑性应变和塑性体积应变表征,演化方程为

$$D = \sum [(\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p) / (\epsilon_p^f + \mu_p^f)] \quad (3)$$

$$\epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + D^*) \quad (4)$$

式中: $\Delta \epsilon_p, \Delta \mu_p$ 分别表示一个积分循环内单元的等效塑性应变和塑性体积应变; ϵ_p^f, μ_p^f 分别表示常压破碎等效塑性应变和塑性体积应变($\epsilon_p^f + \mu_p^f \geq \epsilon_{fmin}$), ϵ_{fmin} 为材料破坏时最小塑性应变, $\epsilon_{fmin}, D_1, D_2$ 为损伤常数。损伤模型如图 3 所示。

2 石灰岩 HJC 本构模型参数确定

2.1 静力学参数确定

石灰岩试样取自桐梓隧道施工现场,为减小试样的离散型,避免岩石试样组成成分和结构差异对试样结果的影响,所有岩石试样均取自同一岩块。根据国际岩石力学学会(international society for rock mechanics, ISRM)对岩样在力学试样中尺寸的要求^[17],

将静力学岩石试样加工打磨制成直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱体岩样,试件两端面平整度误差不超过 0.02 mm,侧面应光滑笔直,满足垂直度要求,如图 4 所示。

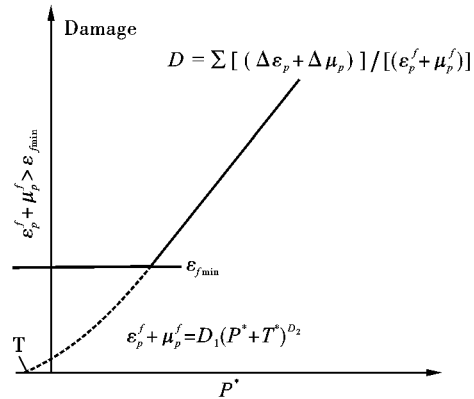


图 3 HJC 损伤模型

Fig. 3 HJC damage model

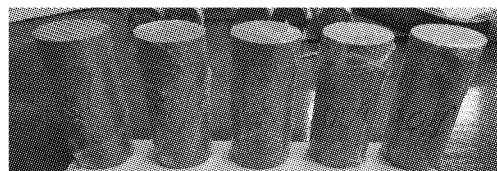


图 4 标准圆柱体岩样

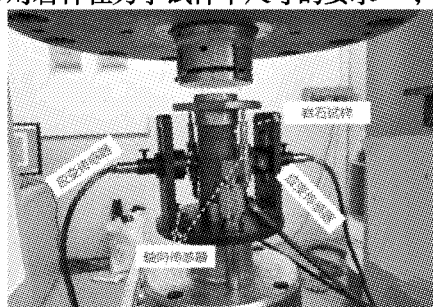
Fig. 4 Standard cylindrical rock samples

静力学试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-301 岩石与混凝土力学试验系统开展,如图 5 所示,由静力学试验得到石灰岩试样的静力学参数如表 1 所示。

表 1 石灰岩静力学参数

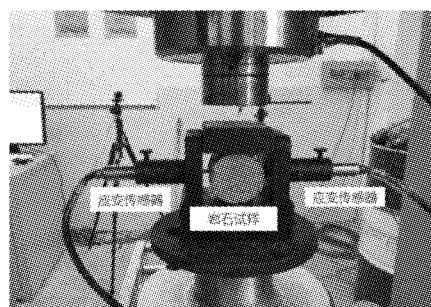
Table 1 Static mechanical parameters of limestone

密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压 强度 F_c / MPa	抗拉强度 T / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν
2645	105.82	8.03	19.13	0.25



(a) 单轴压缩试验

(a) Uniaxial compression test



(b) 巴西劈裂试验

(b) Brazilian splitting test

图 5 静力学实验

Fig. 5 Static experiment

2.2 HJC 本构模型参数确定

根据 Holmquist 等提出的理论^[19],石灰岩的强度大于 48 MPa,在不考虑应变率和损伤效应的基础上。

$$\sigma^* = A + BP^{*N} \quad (5)$$

根据帽盖模型与 HJC 模型的关系式,由方秦等建立的特征化黏性强度参数与帽盖模型参数之间的关系^[13]。见图 6。

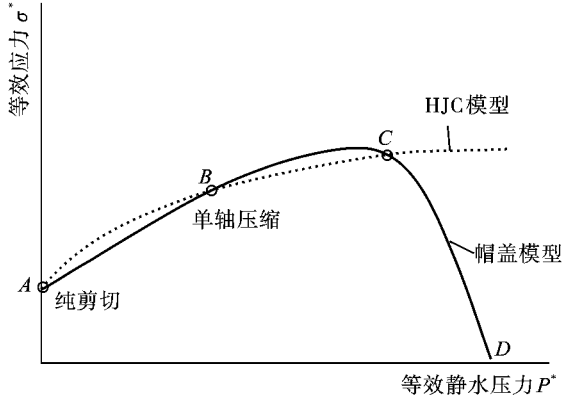


图 6 帽盖模型与 HJC 模型的关系

Fig. 6 The relationship between the cap model and HJC model

AC 面剪切破坏面函数为

$$F_f = \sqrt{J_2} = \alpha - \gamma e^{-\beta J_1} + \theta J_1 \quad (6)$$

CD 面帽盖面函数为

$$F_c = \sqrt{J_2} = F_c(J_1 K) \equiv \frac{1}{R} \sqrt{[X(k)] - L(k)^2 - [j_1 - L(k)]^2} \quad (7)$$

$$L(K) \equiv \begin{cases} K, & K > 0 \\ 0, & K \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: J_1 为第一应力不变量; J_2 为第二应力偏量不变量; $\alpha, \beta, \gamma, \theta, R$ 为材料参数;帽盖面与第一应力不变量 J_1 的交点表达式为

$$X(k) = k + RF_f[L(k)] \quad (9)$$

当第一应力不变量 $J_1 = 0$ 时,由于材料处于纯剪切状态, $\sqrt{J_2} = \alpha - \gamma, \sigma^* = A$,可以得到 σ^* 与 J_2 的关系表达式为

$$\sigma^* = \sigma/f_c = \sqrt{3J_2}/f_c \quad (10)$$

$$A = \sqrt{3}(\alpha - \gamma)/f_c \quad (11)$$

根据 Fossum 等研究的试验数据可得^[16]: $\alpha = 270$ MPa, $\gamma = 251$ MPa,由静力学实验得 $f_c = 105.82$ MPa,求得 $A = 0.31$ 。

由三轴围压实验数据拟合

$$\sqrt{J_2} = \sigma_1 - \sigma_3/\sqrt{3} \quad (12)$$

$$\sigma^* = \sqrt{3J_2}/f_c = \sigma_1 - \sigma_3/f_c \quad (13)$$

$$P^* = P/f_c = 2\sigma_1 + \sigma_3/3f_c \quad (14)$$

根据在不同围压条件下的三轴压缩结果,得到对应的第一主应力 σ_1 ,第三主应力 σ_3 ,将式(13)、(14)进行归一化,得到每一个相对应的 (σ^*, P^*) ,通过公式 $\sigma^* = 0.31 + BP^{*N}$ 拟合曲线得到 B 和 N 的值, $B = 1.74, N = 0.76, S_m$ 取对应于 σ^* 不再增大时的值, $S_{max} = 15$ GPa,可以得到 HJC 模型强度,见图 7,表达式为

$$\sigma^* = 0.31 + 1.74P^{*0.76} \quad (15)$$

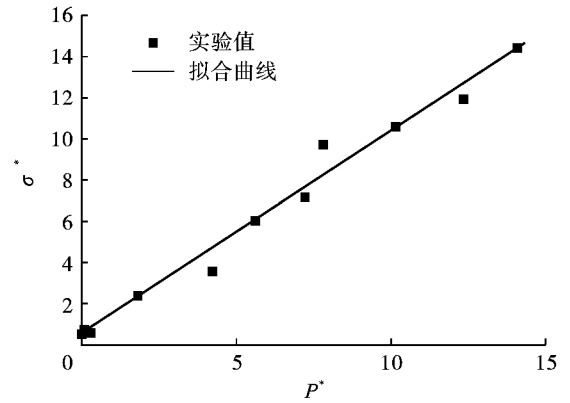


图 7 参数 B 和 N 的取值方法

Fig. 7 The determination method for the parameter of B and N

体积模量 $K = P_c/\mu_c$,岩石的剪切模量 G 和体积模量 K 可由下式确定

$$G = E/[2(1 + \nu)] \quad (16)$$

$$K = E/[3(1 - 2\nu)] \quad (17)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比,见表 1。由公式(16)、(17)求得 $G = 7.65$ GPa, $K = 12.75$ GPa。 P_c/μ_c 为单轴压缩实验测得的静水压力和体积应变, $P_c = F_c/3 = 0.035$ GPa^[11], $\mu_c = P_c/K = 2.7 \times 10^{-4}$ 。 $\mu_1 = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为材料的即时密度, ρ_0 为材料的初始密度,由实验数据得 $\mu_1 = 0.163$ 。

K_1, K_2, K_3 通过材料的 Hugoniot 实验数据并通过 $P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3, \bar{\mu} = (\mu - \mu_1)/(\mu + \mu_1)$ 进行拟合^[14],得到 $K_1 = 12$ GPa, $K_2 = -197$ GPa, $K_3 = 573$ GPa。 P_l 的值由拟合单轴压缩实验和三轴压缩实验确定, $P_l = 1.035$ GPa。见图 8。

通过 SHPB 压杆实验,得到了不同应变率下石灰岩单轴动态强度,结合准静态单轴压缩强度,得到不同应变率下的特征化强度 σ^* ,通过拟合应变率与无量纲特征化强度的关系,拟合斜率 $C = 0.017$ 。见图 9。

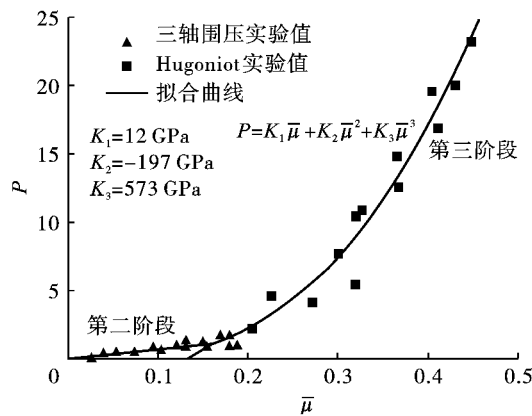


图 8 参数 K_1 、 K_2 、 K_3 取值方法

Fig. 8 The determination method for the Parameter of K_1 , K_2 , K_3

伤参数 D_1 根据文献[19]公式 $D_1 = 0.01 / (1/6 + T^*)$ 确定,其中 $T^* = T/F_c$,求得 $D_1 = 0.045$, $D_2 = 1 - \epsilon_{f_{min}} = 0.01$ 。HJC 模型参数如表 2 所示。

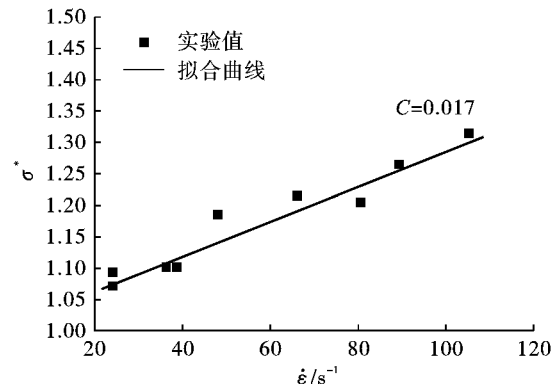


图 9 参数 C 取值方法

Fig. 9 Parameter C value method

Holmquist 指出损伤参数与材料强度无关^[1], 损

表 2 石灰岩 HJC 模型参数取值

Table 2 The parameter values of HJC model for limestone

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G / GPa	A	B	C	N	F_c / MPa	T / MPa	$EPSO$	$\epsilon_{f_{min}}$	S_{max}
2645	7.65	0.31	1.74	0.017	0.76	105.82	8.03	1	0.01	15
P_c / GPa	μ_c	P_1 / GPa	μ_1	D_1	D_2	K_1 / GPa	K_2 / GPa	K_3 / GPa	F_s	
0.035	2.7×10^{-4}	1.035	0.163	0.045	1	12	-197	573	-0.04	

3 参数验证

3.1 模型建立

SHPB 动态冲击数值模型的建立采用 Hypermesh 建立,子弹长度 400 mm,入射杆和透射杆长度为 2000 mm,子弹、入射杆及透射杆材料模型采用 LS-DYNA 软件中 001 号 MAT_ELASTIC 本构模型,直径均为 50 mm,材料模型选择 LS-DYNA 软件中 111 号 MAT - JOHNSON - HOLMQUIST - CONCRETE 本构模型。数值计算模型如图 10 所示。

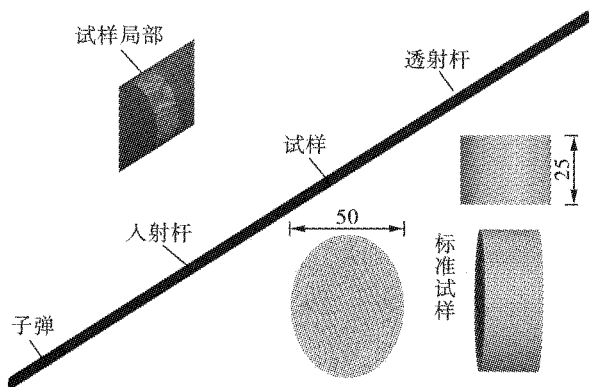


图 10 SHPB 数值模拟模型图

Fig. 10 SHPB numerical simulation model

采用表 2 的 HJC 本构模型参数进行数值模拟计算,为确保岩石计算的精确,对岩石的横向、环线网格均进行了精细化划分,通过在 k 文件中定义材料、子弹、入射杆、透射杆属性,材料、子弹、入射杆、透射杆均采用面面接触 (CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE),在 k 文件 INITIAL_VELOCITY_GENERATION 对子弹水平方向添加了和试验对应 10 m/s 和 12 m/s 的冲击速度两次冲击入射杆,并在 k 文件中添加关键字 MAT_ADD_EROSION 表征岩石的拉伸失效准则。

3.2 SHPB 试验

本实验采用阿基米德工业科技有限公司研制的分离式 Hopkinson 压杆测试系统 ALT100 进行冲击动力学实验,如图 11 所示。压杆密度为 7.81 g/cm^3 ,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.28,纵波波速为 5410 m/s,数据采集系统由黏贴在压杆上的应变片、惠斯通桥路(应变片接线桥盒)、超动态应变仪以及高速采集系统组成。

3.3 结果分析

3.3.1 应力-应变曲线

基于一维应力波和动态平衡假定,通过压杆上测得的人射应变信号 $\epsilon_i(t)$,反射应变信号 $\epsilon_R(t)$ 以

及透射应变信号 $\varepsilon_T(t)$, 对脆性岩石利用“三波法”能够准确计算出动态应力 $\sigma(t)$ 、动态应变 $\varepsilon(t)$ 以及应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$, 计算方法如下

$$\sigma(t) = \frac{A_0 E}{2A} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (18)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{C}{L} \int_0^t [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (19)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{C}{L} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (20)$$

式中: A 、 L 分别为试样的横截面积和长度; E 、 A_0 分别为压杆的弹性模量和横截面积; C 为压杆的纵波波速。

根据图 12 可以看出, 岩石动态破坏的峰值应力随冲击速度的增大而增大, 基于上述确定的参数, 10 m/s 和 12 m/s 的不同速度冲击时, 数值模拟得到的应力-应变曲线与室内试验应力-应变曲线都基

本吻合, 但由于数值模拟默认岩石为各向同性材料, 数值模拟得到的曲线为一条光滑的曲线, 而实际试验的岩石为各向异性, 岩石内部结构的不规整性, 岩石破坏过程表现不均匀, 导致试验得到的曲线出现凹凸现象。

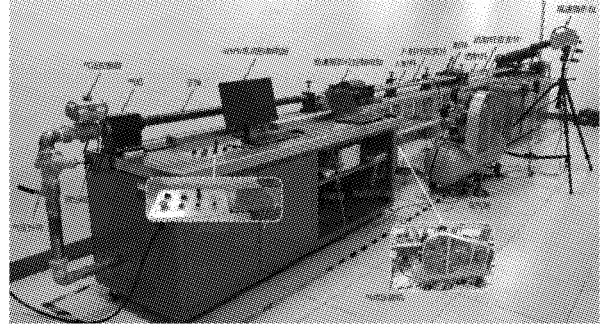
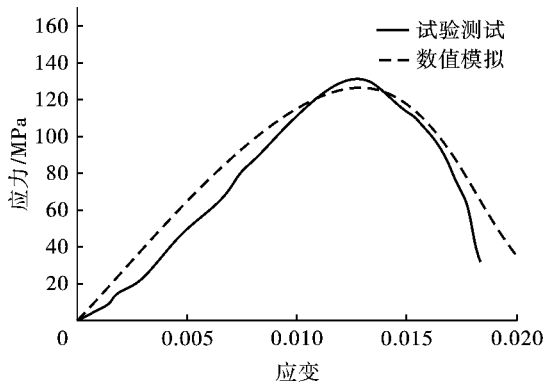
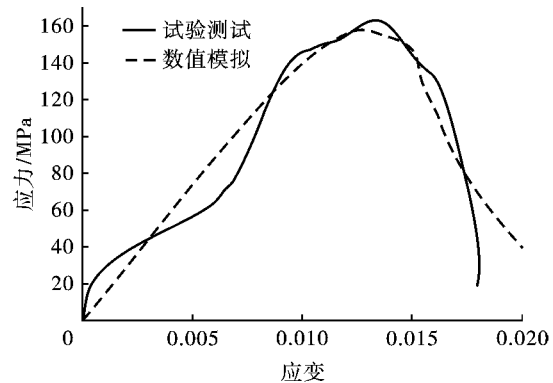


图 11 分离式 Hopkinson 压杆测试系统 ALT100

Fig. 11 Split Hopkinson pressure bar test system ALT100



(a) 冲击速度 10 m/s
(a) Impact speed 10 m/s



(b) 冲击速度 12 m/s
(b) Impact speed 12 m/s

图 12 数值模拟曲线与试验应力应变图

Fig. 12 Numerical simulation curves and experimental stress-strain curve

3.3.2 破坏过程

试验过程利用 FASTCAM SA1.1 型高速摄影仪记录石灰岩在 10 m/s 速度动态冲击作用下裂纹的扩展过程及最终破坏过程, 如图 13 所示。图 14 根据相对应 10 m/s 冲击速度数值模拟得到的裂纹扩展情况及其破坏过程, 裂纹的扩展方向大部分沿轴线 60° 方向, 由于应力波在岩石内部多次透射反射, 岩石侧面出现拉伸破坏裂纹, 并在动态压缩作用下压缩破坏, 在拉伸和压缩裂纹共同作用下产生破坏。

根据试验与数值模拟分析可得, 数值模拟与 SHPB 动态冲击试验的应力-应变曲线、破坏模式基本吻合。

4 石灰岩 HJC 参数敏感性分析

对于 SHPB 动态冲击数值模型, 以冲击石灰岩

为研究对象, 并以岩石冲击后的峰值应力 σ_{\max} 为敏感性评价指标。设敏感性评价指标峰值应力 σ_{\max} 主要由 n 个参数 $F_i = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_n\}$ 影响, 即 $\sigma_{\max} = f(F_1, F_2, F_3, \dots, F_n)$ 。设基准参数 $F_i^* = \{F_i^*, F_i^*, F_i^*, \dots, F_i^*\}$, 评价指标为 σ_{\max}^* 对于 HJC 模型中的 21 参数, 在基准参数上的变化范围选 $\pm 20\%$ 与 $\pm 40\%$ 四个点进行数值模拟计算分析。

影响冲击后岩石的峰值应力 σ_{\max} 参数变化率 δF_{ij} 表达式为

$$\delta F_{ij} = \frac{F_{ij} - F_i^*}{F_i^*} \times 100\%$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (21)$$

式中: $\sigma_{\max ij}$ 表示第 i 个 HJC 模型本构参数相对于基准参数 F_i^* 调整后的第 j 个参数。

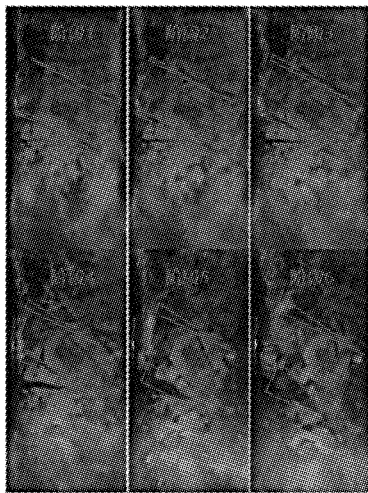


图 13 岩石试验破坏过程

Fig. 13 Failure process of rock test

δF_{ij} ($j=1,2,3,4$) 对应 -40% 、 -20% 、 20% 、 40% 。

峰值应力变化 $\delta \sigma_{\max ij}$ 表达式为

$$\delta \sigma_{\max ij} = \frac{\sigma_{\max ij} - \sigma_{\max}^*}{\sigma_{\max}^*} \times 100\%$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, 4) \quad (22)$$

式中: $\sigma_{\max ij}$ 表示 HJC 本构模型第 i 个参数在第 j 个参数变化率状态下模拟所得的峰值应力。

根据在 LS/DYNA 软件中 SHPB 数值模拟采用 HJC 本构模型对 21 个参数调整所计算的峰值应力变化率结果如图 15 所示。

由图可得,根据文献[18],采用剩余峰值应力变化率绝对值 $|\delta \sigma_{\max ij}| = 10\%$ 为参数敏感性分析标准,即岩石峰值应力变化率 $|\delta \sigma_{\max ij}| \geq 10\%$ 即认为该参数对峰值应力影响较大,参数 A 、 B 、 N 、 F_c 对峰值应力变化率影响较大, B 值的变化使峰值应力变化率接近 60%,其他参数对峰值应力变化率在 10% 之间,说明参数 A 、 B 、 N 、 F_c 对石灰岩破坏时的峰值应力是敏感的。

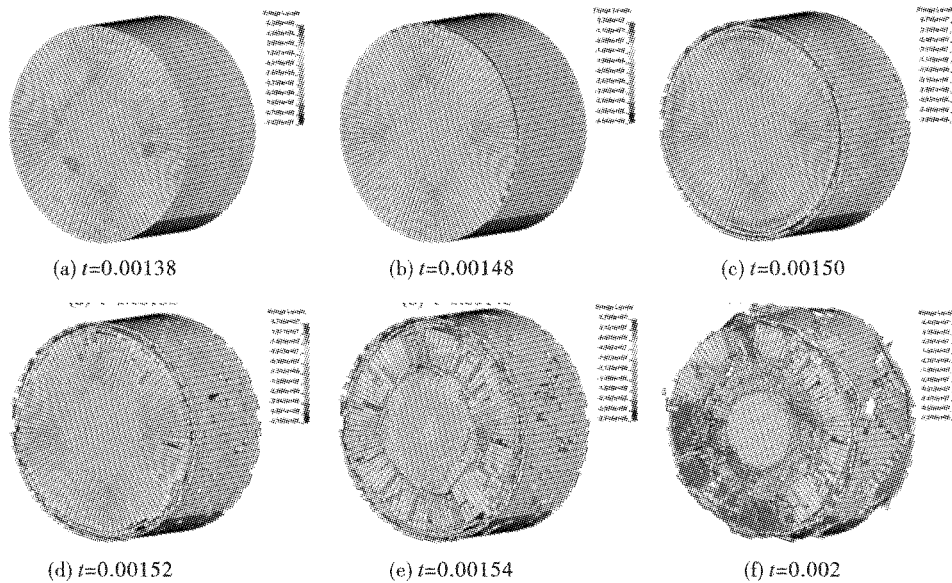


图 14 岩石数值模拟破坏过程

Fig. 14 Numerical simulation failure process of rock

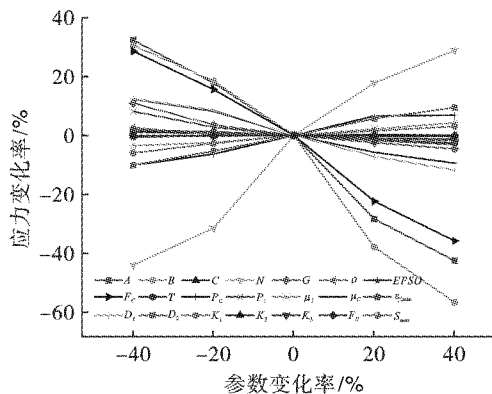


图 15 峰值应力对 HJC 参数敏感性分析

Fig. 15 Sensitivity analysis of peak stress to HJC parameters

5 结论

(1) 基于确定的极限面参数 A 与帽盖模型参数 α 与 γ 之间的关系,求得 $A = 0.31$; 结合三轴围压实验与公式 $\sigma^* = A + BP^*N$ 拟合曲线得到 $B = 1.74$ 、 $N = 0.76$ 。

(2) 基于确定的石灰岩 HJC 模型参数,分析了石灰岩 SHPB 动态冲击数值模拟结果与 SHPB 动态冲击试验应力应变曲线及破坏形态相似,岩石破坏时的峰值应力相差均小于 10%,验证了参数确定方法的准确性。

(3)以石灰岩动态峰值应力为目标函数,对HJC模型21个参数进行了敏感性分析,HJC本构模型参数 f_c 、 A 、 B 、 N 对石灰岩动态峰值应力的影响大于10%, B 值的变化使峰值应力变化率达到60%,因此石灰岩动态峰值应力对 B 值的变化最为敏感。

参考文献(References)

- [1] 任亮,喻贤明,王凯,等.基于HJC模型的UHPC冲击压缩性能数值研究[J].应用力学学报,2021,38(5):1910-1918.
- [1] REN Liang, YU Xian-ming, WANG Kai, et al. Numerical study on shock compression performance of UHPC based on HJC model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(5):1910-1918. (in Chinese)
- [2] 米振国,石云波,张婕,等.侵彻效应混凝土靶HJC本构模型研究[J].中国测试,2021,47(7):31-35.
- [2] MI Zhen-guo, SHI Yun-bo, ZHANG Jie, et al. Research on HJC constitutive model of concrete target with penetration effect[J]. China Test, 2021, 47(7):31-35. (in Chinese)
- [3] 张嘉凡,高壮,程树范,等.煤岩HJC模型参数确定及液态CO₂爆破特性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S1):2633-2642.
- [3] ZHANG Jia-fan, GAO Zhuang, CHENG Shu-fan, et al. Determination of parameters of HJC model of coal and rock and study on blasting characteristics of liquid CO₂[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1):2633-2642. (in Chinese)
- [4] 刘锦,李峰辉,刘秀秀.基于HJC模型的煤岩冲击损伤特性研究[J].工程爆破,2021,27(2):35-42,65.
- [4] LIU Jin, LI Feng-hui, LIU Xiu-xiu. Research on impact damage characteristics of coal and rock based on HJC model[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):35-42, 65. (in Chinese)
- [5] 孙玉祥,王杰,武海军,等.混凝土高压状态方程实验与数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2020,40(12):4-13.
- [5] SUN Yu-xiang, WANG Jie, WU Hai-jun, et al. Experimental and numerical simulation of concrete high pressure state equation[J]. Explosion and Shock, 2020, 40(12):4-13. (in Chinese)
- [6] 汪衡,汪于程,蔡金良,等.HJC模型失效参数对侵彻能力影响的数值研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(10):150-155.
- [6] WANG Heng, WANG Yu-cheng, CAI Jin-liang, et al. Numerical study on the effect of HJC model failure parameters on penetration ability[J]. Chinese Journal of Weaponry and Equipment Engineering, 2020, 41(10):150-155. (in Chinese)
- [7] 苏伟林,李兴高,许宇,等.基于HJC模型的盾构刀具切削混凝土数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(6):1106-1114.
- [7] SU Wei-lin, LI Xing-gao, XU Yu, et al. Numerical simulation of shield cutting tool cutting concrete based on HJC model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(6):1106-1114. (in Chinese)
- [8] 张社荣,宋冉,王超,等.碾压混凝土HJC动态本构模型修正及数值验证[J].振动与冲击,2019,38(12):25-31.
- [8] ZHANG She-rong, SONG Ran, WANG Chao, et al. Modification and numerical verification of HJC dynamic constitutive model of roller compacted concrete[J]. Vibration and Shock, 2019, 38(12):25-31. (in Chinese)
- [9] 姚本余,章翔艳,谢晋勇,等.小纪汗煤的HJC模型参数确定及数值模拟[J].煤炭技术,2018,37(9):145-147.
- [9] YAO Ben-yu, ZHANG Xiang-yan, XIE Jin-yong, et al. HJC model parameter determination and numerical simulation of Xiaojihan coal[J]. Coal Technology, 2018, 37(9):145-147. (in Chinese)
- [9] 凌天龙,吴帅峰,刘殿书,等.砂岩Holmquist-Johnson-Cook模型参数确定[J].煤炭学报,2018,43(8):2211-2216.
- [10] LING Tian-long, WU Shuai-feng, LIU Dian-shu, et al. Parameter determination of Holmquist-Johnson-Cook model of sandstone[J]. Acta China Coal Society, 2018, 43(8):2211-2216. (in Chinese)
- [11] 李成武,王金贵,解北京,等.基于HJC本构模型的煤岩SHPB实验数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):158-164.
- [11] LI Cheng-wu, WANG Jin-gui, XIE Bei-jing et al. Numerical simulation of coal and rock SHPB experiment based on HJC constitutive model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1):158-164. (in Chinese)
- [12] 闻磊,李夕兵,吴秋红,等.花岗斑岩Holmquist-Johnson-Cook本构模型参数研究[J].计算力学学报,2016,33(5):725-731.
- [12] WEN Lei, LI Xi-bing, WU Qiu-hong et al. Study on the parameters of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model of granite porphyry[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(5):725-731. (in Chinese)
- [13] 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(3):197-204.
- [13] FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Method for determining the parameters of rock Holmquist-Johnson-Cook model[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3):197-204. (in Chinese)
- [14] LARSON D B, ANDERSON G D. Plane shock wave studies of porous geological media[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B9):4592-4600.
- [15] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. A split Hop-

- kinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2001, 41(1):40-46.
- [16] FOSSUM A F, SENSENY P E, PFEIFLE T W, et al. Experimental determination of probability distributions for parameters of a Salem limestone cap plasticity model [J]. *Mechanics of Materials*, 1995, 21(2):119-137.
- [17] 殷志强. 高应力储能岩体动力扰动破裂特征研究 [D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [17] YIN Zhi-qiang. Research on dynamic disturbance and fracture characteristics of high-stress energy storage rock mass [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [18] 王志亮, 毕程程, 李鸿儒. 混凝土爆破损伤的 SPH-FEM 耦合法数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6):1419-1428.
- [18] WANG Zhi-liang, BI Cheng-cheng, LI Hong-ru. Numerical simulation of concrete blasting damage by sph-fem coupling method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6):1419-1428. (in Chinese)
- [19] 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] // 11th International Symposium on Ballistic, Quebec City, Canada, 1993:591-600.
- 英文编辑:黄刚
-
- (上接第24页)
- [7] ZHANG H, WANG B, XIE A, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152:154-167.
- [8] 赖建中, 过旭佳, 朱耀勇. 超高性能混凝土抗侵略及抗爆炸性能研究 [J]. *河北工业大学学报*, 2014, 43(6):50-53.
- [8] LAI Jian-zhong, GUO Xu-jia, ZHU Yao-yong. Properties of ultra-high performance concrete subjected to penetration and explosion [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2014, 43(6):50-53. (in Chinese)
- [9] YANG L, XIE H, FANG S, et al. Experimental study on mechanical properties and damage mechanism of basalt fiber reinforced concrete under uniaxial compression [J]. *Structures*, 2021, 31:330-340.
- [10] 李威, 李秀地, 芦天翔, 等. 玄武岩纤维材料抗爆抗冲击性能研究进展 [J]. *塑料工业*, 2019, 47(10):11-14.
- [10] LI Wei, LI Xiu-di, LU Tian-xiang, et al. Research progress on anti-explosion and anti-shock properties of basalt fiber materials [J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47(10):11-14. (in Chinese)
- [11] YU X, ZHOU B, HU F, et al. Experimental investigation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bar reinforced concrete slabs under contact explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144:103632.
- [12] NEGI P, CHHABRA R, KAUR N, et al. Health monitoring of reinforced concrete structures under impact using multiple piezo-based configurations [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222:371-389.
- [13] 熊伟, 钟冬望, 严爱国, 等. 采用压电波法的水下消能爆破损伤特征试验研究 [J]. *爆破*, 2021, 38(4):32-38.
- [13] XIONG Wei, ZHONG Dong-wang, YAN Ai-guo, et al. Experiment of underwater energy-relief blast-induced damage characteristics based on piezoelectric wave method [J]. *Blasting*, 2021, 38(4):32-38. (in Chinese)
- [14] 常琦, 杨维希, 赵恒, 等. 基于多传感器的裂纹扩展监测研究 [J]. *航空学报*, 2020, 41(2):231-242.
- [14] CHANG Qi, YANG Wei-xi, ZHAO Heng, et al. A multi sensor based crack propagation monitoring research [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2):231-242. (in Chinese)
- [15] AI D, LUO H, WANG C, et al. Monitoring of the load-induced RC beam structural tension/compression stress and damage using piezoelectric transducers [J]. *Engineering Structures*, 2018, 154:38-51.
- [16] 蔡路军, 陈少杰, 吴立过, 等. 基于压电损伤监测的 CFRP 加固混凝土板抗爆性能实验研究 [J]. *爆破*, 2021, 38(3):19-25, 57.
- [16] CAI Lu-jun, CHEN Shao-jie, WU Li-guo, et al. Experimental study on anti explosion performance of CFRP strengthened concrete slabs based on piezoelectric damage monitoring [J]. *Blasting*, 2021, 38(3):19-25, 57. (in Chinese)
- [17] XU K, DENG Q, CAI L, et al. Damage detection of a concrete column subject to blast loads using embedded piezoceramic transducers [J]. *Sensors (Switzerland)*, 2018, 8(5):1377.
- [18] 王海龙, 柏皓博, 赵岩, 等. 基于傅里叶分解—小波包分析的爆破信号去噪方法 [J]. *爆破*, 2021, 38(2):37-44.
- [18] WANG Hai-long, BAI Hao-bo, ZHAO Yan, et al. Denoising algorithm of blasting signal based on fourier decomposition method-wavelet packet analysis [J]. *Blasting*, 2021, 38(2):37-44. (in Chinese)
- [19] ZHOU K, LEI D, HE J, et al. Single micro-damage identification and evaluation in concrete using digital image correlation technology and wavelet analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267:120951.
- 英文编辑:黄刚