

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.005

硬石膏矿 RHT 动力学模型参数研究*

马凯^{1a}, 任高峰^{1a,1b}, 葛永翔^{1a,1b,1c}, 王扶成², 石义虎^{1a}, 张聪瑞^{1a,1b}, 张露伟^{1a}, 赵亮^{1a}, 于燕³

(1. 武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室; c. 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 安徽池州海螺水泥股份有限公司, 池州 247100; 3. 华新水泥股份有限公司, 武汉 430205)

摘要: 数值模拟计算是岩石动力学特性研究的重要手段, 模型及参数的合理确定是保证模拟试验结果准确的关键。在 RHT 模型的 34 个参数中, 19 个参数可以通过试验、理论计算等手段获得, 但还剩下 15 个参数较难获得。为研究适用于硬石膏的模型参数, 由试验分析、理论计算获得硬石膏的 19 个基本参数, 采用 LS-DYNA 对 15 个较难获得参数开展单一因素变化下的 SHPB 模拟试验, 对比应力-应变曲线对以上参数的敏感性程度并优化参数取值水平, 进而通过正交试验对敏感程度较高的参数进行确定, 最后将获得参数的模拟结果与室内试验结果对比分析。研究结果表明: RHT 参数 B 、 g_i^* 、 n 、 D_1 、 n_f 、 P_{comp} 和 N 对应力-应变曲线基本无影响, 而参数 A 、 f_s^* 、 f_t^* 、 Q_0 、 g_c^* 、 ξ 、 ε_p^m 和 A_f 对应力-应变曲线影响较大, 进一步利用正交试验对应力-应变曲线影响较大的参数进行确定, 获取了较为贴合硬石膏 SHPB 冲击试验曲线的 RHT 模型参数; 在不同加载应变率下, 硬石膏模拟试验的动态应力-应变曲线和破坏形态与室内试验表现出的规律一致, 验证了模型参数适用于硬石膏矿。

关键词: 硬石膏; RHT 模型; 敏感性; 正交试验; SHPB

中图分类号: TD87.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)04-0035-10

Study on Parameters of Anhydrite RHT Dynamic Model

MA Kai^{1a}, REN Gao-feng^{1a,1b}, GE Yong-xiang^{1a,1b,1c}, WANG Fu-cheng², SHI Yi-hu^{1a},
ZHANG Cong-ru^{1a,1b}, ZHANG Lu-wei^{1a}, ZHAO Liang^{1a}, YU Yan³

(1. a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Key Laboratory of Green Utilization of Key Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education; c. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Anhui Chizhou Conch Cement Co., Ltd., Chizhou 247100, China; 3. Huaxin Cement Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: Numerical simulation is a vital tool for studying the dynamic characteristics of rock, with the accurate determination of models and parameters being the key to ensuring the reliability of simulation results. Among the 34 parameters of the RHT model, 19 parameters can be obtained through experimental and theoretical calculations, but

收稿日期 (Date of reception): 2024-05-28

网络首发日期 (Published online): 2024-07-20

作者简介: 马凯 (1999-), 男, 陕西省汉中市, 在读研究生, 主要从事岩石动力学等方面的研究工作, (E-mail) mak@whut.edu.cn.

通讯作者: 葛永翔 (1995-), 男, 甘肃省张掖市, 博士、助理研究员, 主要从事矿山岩体力学与岩石动力学等方面的研究工作, (E-mail) gyxwhut@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (52174087) 硬石膏矿空区群灾变链断链控制及精细化开发时空原理研究

About the author: MA Kai (1999-), male, born in Hanzhong City, Shaanxi Province, master candidate, mainly engaged in the research of rock dynamics, (E-mail) mak@whut.edu.cn.

Corresponding author: GE Yong-xiang (1995-), male, born in Zhangye City, Gansu Province, Ph. D, research associate, mainly engaged in research on rock mechanics and rock dynamics of mining rock mass, (E-mail) gyxwhut@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52174087): Study on control mechanism of disasters chain-scission and fine development of underground goaf masses in hard gypsum mine

the remaining 15 are challenging to determine. Nineteen basic parameters of anhydrite were obtained through experimental analysis and theoretical calculation to identify the model parameters suitable for anhydrite. Furthermore, the LS-DYNA performed SHPB simulation tests on the 15 challenging parameters. The sensitivity of stress-strain curves to these parameters was compared, and the values were optimized. Parameters with high sensitivity were identified through orthogonal testing. Finally, simulation results were compared with laboratory test results. The findings indicate that RHT parameters $B, g_i^*, n, D_1, n_f, P_{comp}$ and N have minimal impact on the stress strain curve, while parameters $A, f_s^*, f_t^*, Q_0, g_c^*, \xi, \varepsilon_p^m$ and A_f significantly influence the curve. Furthermore, the parameters with a significant impact on the stress-strain curve were determined by orthogonal tests, and the RHT model parameters fitting the SHPB impact test curve were obtained. Under varying loading strain rates, the dynamic stress-strain curves and failure patterns of anhydrite simulation tests were consistent with laboratory tests, verifying the suitability of the model parameters for anhydrite.

Key words: anhydrite; RHT model; sensibility; orthogonal test; SHPB

我国硬石膏矿资源储量大、分布广,多采用空场法开采,遗留大量多中段重叠采空区。在爆破振动及开挖卸荷等动力扰动下易引发空区顶板和矿柱失稳灾害。而开采扰动多以中高应变率动力作用为主,在此应变率范围内可采用气动液压机、落锤冲击加载装置和 SHPB 加载装置来研究硬石膏在动载作用下的力学性质,其中 SHPB 试验装置应用最为广泛。然而,SHPB 室内试验存在重复性低、成本高等缺点,为高效开展岩石动力学性能研究工作,诸多学者利用 LS-DYNA 研究岩石动力学特性。对于数值模拟工作而言,本构模型参数的选取决定了模拟结果与实际的接近程度。而不同岩石类材料的本构模型参数具有差异性,研究适用于硬石膏的本构模型参数对开展动力学数值模拟试验具有重要意义。

岩石理论模型共经历了弹性、断裂和损伤理论模型三个发展历程。但这些模型未能够准确全面地描述岩石变形的弹性、线性强化和损伤软化阶段。因此,部分学者在此基础上建立和发展了 HJC、TCK 和 RHT 等脆性材料理论模型^[1-6],并取得了丰硕成果。对于研究岩石类脆性材料,RHT 模型是受学者们最为认可的模型,RHT 模型相较于 HJC 和 TCK 模型,充分考虑了岩石在爆炸冲击下的压缩、应变率和损伤累积效应,能够更好地反映岩石在不同受力状态下的动态力学行为等特征^[7]。

对于 RHT 模型而言,其参数多达 34 个,如何高效确定其参数取值,国内外诸多学者开展了大量研究。如刘殿柱等人基于 RHT 模型的理论分析^[8],对较难获得的参数开展正交试验,进而确定出了各参数的敏感程度。李洪超等人通过岩石力学室内实验^[9,10],利用 LS-DYNA 数值模拟对较难确定的 RHT 模型参数进行敏感性分析,并通过正交实验确定了大理岩的 RHT 模型参数。聂铮玥等人利用优化拉丁超立方设计算法设计了 RHT 模型参数计算矩阵

并开展了敏感性分析^[11],得到了参数敏感性排序。邱薛等人通过不同动态应变率下的正交试验与不真实性参数敏感性分析确定出煤岩 RHT 动态压缩本构模型最优参数^[12]。Tian H F 等人通过改进 RHT 模型^[13],并利用数值模拟手段验证了模型合理性。

综上所述,虽然众多学者基于敏感性分析及正交试验对材料 RHT 模型参数确定开展了大量研究,但对参数进行敏感性分析时只对单一参数的影响趋势进行分析,未对敏感性较低参数进行确定,导致正交试验工作量大。此外,已有研究主要集中于煤岩及砂岩等岩石材料,对于硬石膏的研究极少。因此,本文结合试验分析和理论计算方法获取硬石膏基础参数,通过 SHPB 模拟试验对较难确定参数开展敏感性分析,确定各参数影响趋势及敏感性较低参数的取值,优化敏感性较高的参数取值水平,利用正交试验对敏感性较高的参数进行确定,进而获得硬石膏动态 RHT 模型参数,基于获得的参数对比分析 SHPB 数值模拟试验与 SHPB 室内试验所得应力-应变曲线及破坏形态,进而验证模型参数的适用性。

1 RHT 损伤理论模型及参数定义

RHT 模型是 Riedel、Thoma 和 Hiermaier 在传统 HJC 模型基础上提出一种拉压损伤本构模型^[14],RHT 模型能较好描述岩石类材料在受到冲击和爆炸过程中的应变硬化和压缩损伤软化等特性。其理论包含两部分:状态方程和本构方程。

状态方程描述的是材料在动高压乃至超高压条件下岩石中的压力变化情况。岩石是由多种物质胶结在一起的复合材料,其内部存在不同尺度的裂隙和微裂纹等缺陷。对于多孔及疏松介质的力学特性可由 $p-\alpha$ 状态方程进行描述。

本构方程则描述的是材料在压力相对较低条件下的力学响应。如图 1 所示,RHT 模型的本构方程

分别经历三个阶段^[15-18]:弹性、线性强化、损伤软化。该模型引入了与压力相关的弹性极限面、失效面和残余强度,见图 2。

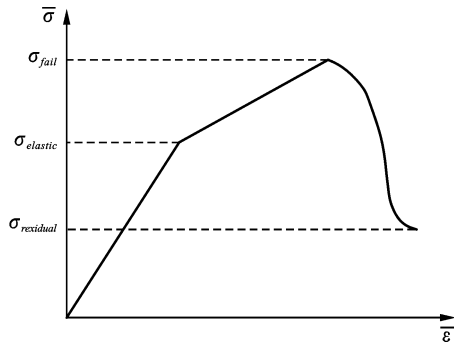


图 1 RHT 本构模型“三阶段”示意图
Fig. 1 Schematic diagram of “three stages” of RHT constitutive model

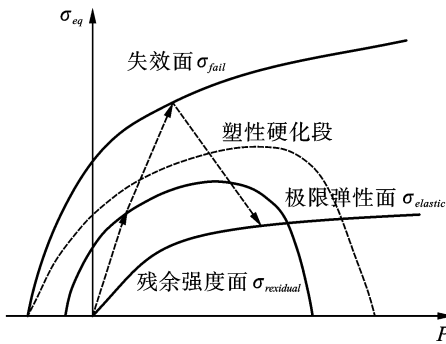


图 2 RHT 弹性极限面、失效面及残余强度面关系
Fig. 2 Relation of RHT elastic limit surface, failure surface and residual strength surface

通过以上 $p-\alpha$ 状态方程和 RHT 本构方程, RHT 模型共包含有 34 个参数,如表 1 所示为各参数的类型及含义。对于不同岩石材料的 RHT 模型参数取值具有差异性,合理的参数是进行岩石动力学模拟研究的关键。

2 硬石膏 RHT 模型基本参数确定

对于硬石膏 RHT 模型的 34 个参数,密度 ρ_0 、单轴抗压强度 f_c 、剪切模量 G 、和初始孔隙度 α_0 可由密度测试、单轴压缩试验和压汞法试验测量得到;参考压缩应变率 $\dot{\epsilon}_0^c = 3.0 \times 10^{-8}$ 、参考拉伸应变率 $\dot{\epsilon}_0^t = 3.0 \times 10^{-9}$ 、失效压缩应变率 $\dot{\epsilon}^c = 3.0 \times 10^{22}$ 、失效拉伸应变率 $\dot{\epsilon}^t = 3.0 \times 10^{22}$ 和损伤指数 $D_2 = 1$ 为给定值;Hugoniot 多项式系数 A_1, A_2, A_3 , 状态方程参数 B_0, B_1, T_1, T_2 , 孔隙开始压碎时的压力 p_{el} , 拉伸应变率指数 β_c , 压缩应变率指数 β_t 可通过状态方程及本构方程计算确定。对于 $B, g_i^*, A, n, f_s^*, f_t^*, Q_0, g_c^*$ 、

$\xi, D_1, \epsilon_p^m, A_f, n_f, P_{comp}$ 和 N 共 15 个待定参数需要结合敏感性分析,并利用正交试验确定。

表 1 RHT 参数概述

Table 1 Overview of RHT parameters		
类型	参数	物理意义
材料基本强度参数	ρ_0	材料密度
	α_0	初始孔隙度
	p_{el}	孔隙开始压碎时压力
	P_{comp}	孔隙完全压实时的压力
	N	孔隙度指数
	A_1, A_2, A_3	状态方程系数
	B_0, B_1	
	T_1, T_2	
	f_c	
	f_t^*	抗压强度比
f_s^*	剪压强度比	
G	剪切模量	
损伤软化参数	D_1, D_2	损伤参数
	ϵ_p^m	最小失效应变
线性强化参数	ξ	剪切模量缩减系数
	A	失效面参数
失效面参数	n	失效面指数
	Q_0	拉压子午比参数
	B	罗德角相关系数
	$\dot{\epsilon}_0^c$	参考压缩应变率
	$\dot{\epsilon}_0^t$	参考拉伸应变率
	β_c	拉伸应变率指数
	β_t	压缩应变率指数
	$\dot{\epsilon}^t$	失效拉伸应变率
	$\dot{\epsilon}^c$	失效压缩应变率
	弹性屈服面参数	g_c^*
g_t^*		拉伸屈服面参数
残余强度面参数	A_f	残余应力强度参数
	n_f	残余应力强度指数

2.1 硬石膏基本物理力学参数测定

2.1.1 硬石膏试样制备及物理特性测试

试验所用的硬石膏选自湖北龙源下新硬石膏矿。根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266—2013)的规定,将硬石膏制成尺寸为 50 mm × 100 mm 及 50 mm × 25 mm 的圆柱形试样,分别用于单轴压缩试验及 SHPB 冲击试验,如图 3 所示。

密度 ρ_0 、初始孔隙度 α_0 可采用密度测试和压汞法试验测定,并通过表面直透法测试得到硬石膏波速 c_0 。

2.1.2 硬石膏静荷载试验

利用 TAW-2000 试验系统对硬石膏试样进行单

轴压缩试验,获得如图 4 所示的典型硬石膏应力-应变曲线,进而得到硬石膏单轴抗压强度 f_c 、弹性模量

E 和泊松比 ν 。

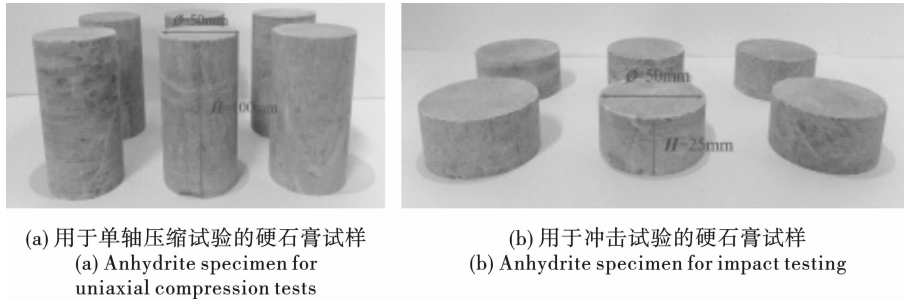


图 3 硬石膏试样

Fig. 3 Anhydrite sample

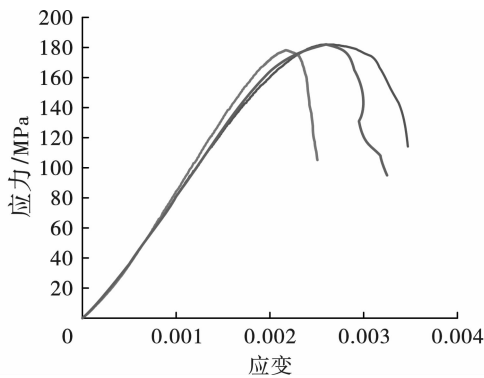


图 4 硬石膏单轴抗压应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial compressive stress-strain curve of anhydrite

根据弹性波理论确定出剪切模量 G ,如下式

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

2.1.3 SHPB 冲击试验

利用分离式霍普金森杆 (SHPB) 试验系统对试样开展应变率分别为 35 s^{-1} 、 54 s^{-1} 、 72 s^{-1} 和 89 s^{-1} 的冲击试验,得到如图 5 所示的硬石膏室内试验原始波形图,对其通过三波法处理得到如图 6 所示的不同应变率下硬石膏应力-应变曲线,选取图 6 中应变率为 54 s^{-1} 的应力-应变曲线作为敏感性分析及正交试验模拟曲线的对比标准曲线。

通过以上物理特性测试及静荷载试验即可确定出硬石膏基本物理力学参数,见表 2。

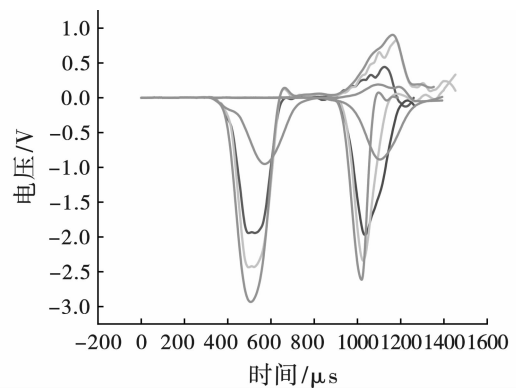


图 5 硬石膏 SHPB 单次冲击试验原始波形图

Fig. 5 Original waveform of anhydrite SHPB single impact test

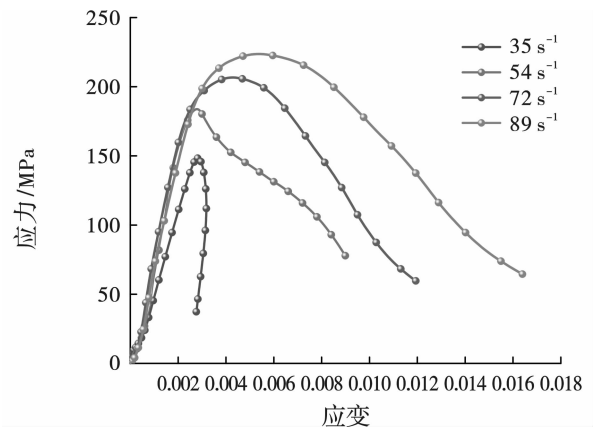


图 6 SHPB 冲击硬石膏应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of SHPB impact anhydrite

表 2 硬石膏基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of anhydrite

抗压强度 f_c/MPa	弹性模量 E/GPa	剪切模量 G/GPa	泊松比 ν	波速 $c_0/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	密度 $\rho_0/$ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙率 α_0
182.000	85.700	36.000	0.168	6651.000	2.940	1.020

2.2 $p-\alpha$ 状态方程参数确定

Hugoniot 多项式系数 A_1 、 A_2 、 A_3 可通过冲击绝

热方程确定,状态方程参数 B_0 、 B_1 、 T_1 、 T_2 孔隙开始压碎时的压力 p_d 可通过 Mie-Gruneisen 状态方程确定。

2.2.1 冲击绝热方程

根据冲击绝热方程可求得 A_1, A_2, A_3 , 如下式

$$A_1 = \rho_0 c_0^2 = K_m \quad (2)$$

$$A_2 = K_m (2s - 1) \quad (3)$$

$$A_3 = K_m (3s^2 - 4s + 1) \quad (4)$$

式中: s 为经验参数^[15-17], 取 1.34。

2.2.2 Mie-Gruneisen 状态方程

根据 Mie-Gruneisen 状态方程可求得 $B_0, B_1, T_1, T_2, p_{el}$, 如下式

$$B_1 = B_0 = \gamma_0 = 2s - 1 \quad (5)$$

$$T_1 = \rho_0 c_0^2 = A_1 \quad (6)$$

$$T_2 = 0 \quad (7)$$

$$p_{el} = f_c / 3 \quad (8)$$

2.3 RHT 本构方程参数确定

压缩和拉伸应变率指数 β_c, β_t 可由下式计算得到

$$\beta_c = \frac{4}{20 + 3f_c} \quad (9)$$

$$\beta_t = \frac{2}{20 + f_c} \quad (10)$$

至此, RHT 模型中的 $\rho_0, f_c, \alpha_0, \dot{\epsilon}_0^c, \dot{\epsilon}_0^t, \dot{\epsilon}^c, \dot{\epsilon}^t, D_2, A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2, p_{el}, g, \beta_c$ 和 β_t 共计 19 个参数已经确定。还剩 $B, g_t^*, A, n, f_s^*, f_t^*, Q_0, g_c^*, \xi, D_1, \epsilon_p^m, A_f, n_f, P_{comp}$ 和 N 共 15 个参数未确定。

3 硬石膏 RHT 模型待定参数确定

对于较难确定的参数, 结合已确定的 RHT 模型基本参数, 采用控制单一变量的方法, 通过数值模拟手段分析 15 个较难确定的参数对应力-应变曲线影响规律, 进而优化各参数取值水平, 最终通过正交试验确定各参数取值。

3.1 待定参数敏感性分析

3.1.1 SHPB 冲击模拟试验

根据室内 SHPB 试验系统的实际尺寸, 入射杆和透射杆为直径 5 cm, 长度 300 cm、250 cm 细长圆柱体, 硬石膏试样直径 5.0 cm, 高度 2.5 cm。在 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序中采用 cm-g- μ s 的基本单位制, 建立如图 7 所示的模型。

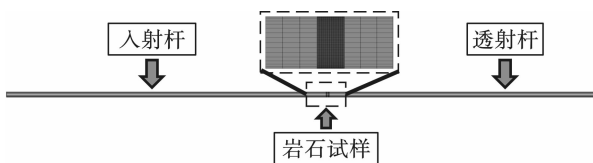


图 7 SHPB 数值模拟模型
Fig. 7 SHPB numerical simulation model

3.1.2 参数敏感性分析

为了研究 $B, g_t^*, A, n, f_s^*, f_t^*, Q_0, g_c^*, \xi, D_1, \epsilon_p^m, A_f, n_f, P_{comp}$ 和 N 对应力-应变曲线的影响, 以大理岩 RHT 模型参数为基准(水平 2), 结合已获取的 19 个参数, 通过控制变量法, 逐一改变 15 个较难确定的参数, 利用 LS-DYNA 开展应变率为 54 s^{-1} 的 SHPB 模拟试验, 研究应力-应变曲线的变化规律。硬石膏 RHT 模型变化参数见表 3。

表 3 RHT 模型参数不同水平取值
Table 3 Values of different levels of RHT model parameters

参数	水平 1	水平 2	水平 3
N	1.000	3.000	6.000
n_f	0.710	0.810	0.910
A_f	0.250	0.500	1.000
ϵ_p^m	0.010	0.015	0.020
D_1	0.038	0.048	0.058
ξ	0.200	0.500	0.800
g_c^*	0.230	0.530	0.730
Q_0	0.280	0.480	0.680
n	0.370	0.570	0.770
A	1.440	2.440	3.440
f_s^*	0.110	0.210	0.310
f_t^*	0.040	0.120	0.200
B	0.0005	0.1005	0.3005
g_t^*	0.500	0.700	0.900
P_{comp}	0.100	0.800	1.500

分别提取入射杆和透射杆上两个固定单元沿轴向的应变值, 计算得到如图 8 在单一参数不同水平下的应力-应变曲线。从图中得到单一参数的变化对应力-应变曲线形状的影响规律:

- (1) $B, g_t^*, n, D_1, n_f, P_{comp}$ 和 N 对应力-应变曲线形状基本没有影响;
- (2) $A, f_s^*, f_t^*, Q_0, g_c^*, \xi, \epsilon_p^m$ 和 A_f 对应力-应变曲线的弹性阶段基本没有影响;
- (3) 对应力-应变曲线线性强化阶段斜率影响较大的为 g_c^* , 随着 g_c^* 的增加, 线性强化阶段斜率不断增大, 加快了线性强化阶段;
- (4) 对应力-应变曲线损伤软化斜率影响较大的为 f_s^*, Q_0 和 ξ , 随着 f_s^*, Q_0 和 ξ 的增加, 增大了失效强度, 加快了损伤软化过程;
- (5) 对应力-应变曲线的峰值应力影响较大的为 f_s^*, Q_0, g_c^*, A 和 ξ , 随着 f_s^*, Q_0, g_c^*, A 和 ξ 的增加, 峰值应力不断增大;
- (6) 对应力-应变曲线的峰值应力影响较小的为 f_s^*, f_t^* 和 ϵ_p^m 。

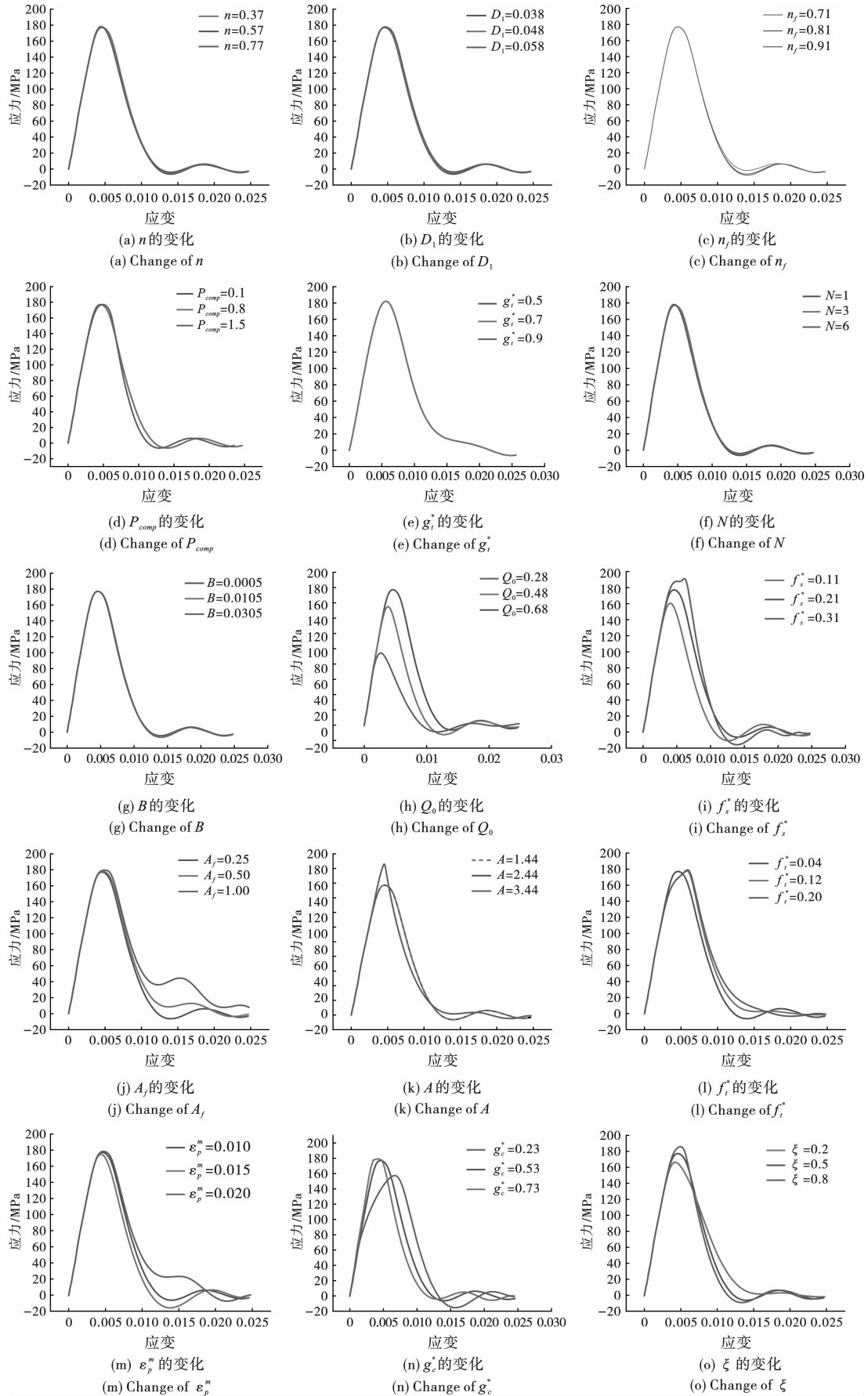


图8 硬石膏试样 RHT 模型单一参数变化对应力-应变曲线形状的影响

Fig. 8 Influence of single parameter change in RHT model of anhydrite sample on the shape of stress-strain curve

由于 $B, g_t^*, n, D_1, n_f, P_{comp}$ 和 N 应力-应变曲线形状基本没有影响,故选取各参数的中间水平作为参数取值,分别为 0.0105、0.7、0.57、0.048、0.81、0.8 和 3。

以 54 s^{-1} 应变率下室内试验的应力-应变曲线为参考,对应力-应变曲线的峰值应力影响较大的 f_s^*, Q_0, g_c^*, A 和 ξ ,将 Q_0, f_s^*, g_c^*, A 和 ξ 的合理取值水平提高并优化为 $[0.6, 0.7], [0.25, 0.45], [0.75, 1.15], [2.22, 2.66]$ 和 $[0.44, 0.6]$;对应力-应变曲线的峰值应力影响较小的 A_f, f_i^* 和 ε_p^m ,减小取值水平梯度,进而优化取值水平。

至此,还剩 $A, f_s^*, f_i^*, Q_0, g_c^*, \xi, \varepsilon_p^m$ 和 A_f 待确定。

3.2 待定参数确定

3.2.1 试验指标确定

在数值模拟冲击硬石膏的正交试验中,通过所选点位的数据差值对比分析室内试验与模拟的应力-应变曲线的差异。具体标准点位如图 9 所示,以图 6 中应变率为 54 s^{-1} 的应力-应变曲线作为正交试验模拟曲线的对比标准曲线,分别选取模拟 SHPB 与真实 SHPB 应力上升段 120 MPa 处的点、应力为

150 MPa 的两处点和应力最大点作为标准对比点。

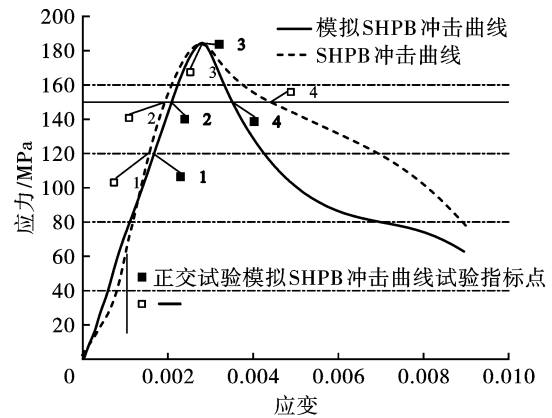


图 9 模拟曲线与 SHPB 冲击岩石试验曲线对比取点示意图

Fig. 9 Schematic diagram of comparison between simulation curve and SHPB impact rock test curve

3.2.2 正交试验水平确定

试验设置为 3 水平,结合 RHT 模型参数敏感性分析结果,对 $A, f_s^*, f_i^*, Q_0, g_c^*, \xi, \varepsilon_p^m$ 和 A_f 选择如表 4 所示的试验水平跨度。

表 4 硬石膏 RHT 模型参数水平

Table 4 Parameter levels of anhydrite RHT model

试验水平	A	f_s^*	f_i^*	Q_0	g_c^*	ξ	ε_p^m	A_f
1	2.44	0.95	0.35	0.1	0.6805	0.50	0.015	0.25
2	2.22	0.75	0.45	0.08	0.6000	0.44	0.007	0.20
3	2.66	1.15	0.25	0.13	0.7000	0.60	0.010	0.30

3.2.3 正交表的确定

根据上述 8 因素 3 水平,选择正交表 $L_{27}(3^8)$ 进行模拟正交试验。

3.2.4 试验结果分析

采用极差分析法对试验结果进行分析。利用式 (11) 对正交试验模拟曲线上的试验指标点和 SHPB 冲击试验曲线上的相关对比标准点进行处理分析。 $d(x_i, x_j)$ 值越小说明模拟曲线与 SHPB 冲击试验曲线越接近,结果越优。

$$d(x_i, x_j) = |x_{ik} - x_{jk}| = |\sigma_{i7sim} - \sigma_{j15test}| + |\varepsilon_{i2sim} - \varepsilon_{j10test}| + |\varepsilon_{i4sim} - \varepsilon_{j12test}| + |\varepsilon_{i6sim} - \varepsilon_{j14test}| + |\varepsilon_{i8sim} - \varepsilon_{j16test}| \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, 27) \quad (11)$$

式中: $d(x_i, x_j)$ 为各点位坐标差异的 Hamming 距离和, $(\sigma_{i1sim}, \varepsilon_{i2sim}), (\sigma_{i3sim}, \varepsilon_{i4sim}), (\sigma_{i5sim}, \varepsilon_{i6sim}), (\sigma_{i7sim}, \varepsilon_{i8sim})$ 为数值模拟曲线上的试验指标点; $(\sigma_{i1test}, \varepsilon_{i2test}), (\sigma_{i3test}, \varepsilon_{i4test}), (\sigma_{i5test}, \varepsilon_{i6test}), (\sigma_{i7test}, \varepsilon_{i8test})$ 为室内试验曲线上的相关对比标准点。

(1) 计算 K_{jm}, \bar{K}_{jm}

K_{jm} 为第 j 列因素第 m 水平所对应的试验指标和, \bar{K}_{jm} 为 K_{jm} 的平均值。由 \bar{K}_{jm} 大小可以判断第 j 列因素优水平。 \bar{K}_{jm} 越小,则因素水平最优。各因素 \bar{K}_{jm} 计算结果见表 5。

表 5 各因素 \bar{K}_{jm} 值

Table 5 Values of \bar{K}_{jm} for each factor

试验水平	A	f_s^*	f_i^*	Q_0	g_c^*	ξ	ε_p^m	A_f
1	1.90	2.06	2.01	2.29	2.00	2.46	2.22	2.38
2	2.60	2.60	1.68	2.90	2.97	2.46	2.49	2.49
3	2.61	2.44	3.41	1.91	2.13	2.19	2.40	2.24

由表 5 可知 A_1 、 f_s^* 、 f_t^* 、 Q_0 、 g_c^* 、 ε_3 、 ε_p^m 、 A_f 是 34 个参数全部确定,见表 6。
所有参数的优水平。至此,硬石膏 RHT 模型的 34

表 6 硬石膏 RHT 各参数取值表
Table 6 Parameter values after optimization

参数	取值	参数	取值	参数	取值
ρ_0	2.917 g/cm ³	f_c	182 MPa	α_0	1.02
P_{ei}	60.7 MPa	β_t	0.0099	β_c	0.0071
A_1	134 GPa	A_2	226 GPa	A_3	138 GPa
B_0	1.68	B_1	1.68	T_1	1.34
T_2	0	G	36 GPa	N	3
$\dot{\varepsilon}_0^c$	3.0×10^{-8} ms ⁻¹	$\dot{\varepsilon}_0^t$	3.0×10^{-9} ms ⁻¹	$\dot{\varepsilon}^c$	3.0×10^{22} ms ⁻¹
$\dot{\varepsilon}^t$	3.0×10^{22} ms ⁻¹	D_2	1	P_{comp}	0.8
B	0.0105	g_t^*	0.7	A	2.44
n	0.57	f_s^*	0.45	f_t^*	0.13
Q_0	0.6805	g_c^*	0.95	ξ	0.60
D_1	0.048	ε_p^m	0.015	A_f	0.30
n_f	0.81				

4 RHT 参数模拟验证

为验证 RHT 模型参数的合理性,基于表 6 中已确定的硬石膏 RHT 模型参数进行 SHPB 数值模拟试验,对比分析 SHPB 数值模拟试验与 SHPB 室内试验所得应力-应变曲线及破坏形态。

4.1 应力-应变曲线对比分析

利用表 6 中已确定的硬石膏 RHT 模型参数,开展不同冲击速度下石膏矿试样的冲击动力学试验模拟。结合前期如图 6 所示的不同应变率下 SHPB 试验结果,得到如图 10 所示的数值模拟和室内试验应力-应变曲线对比。

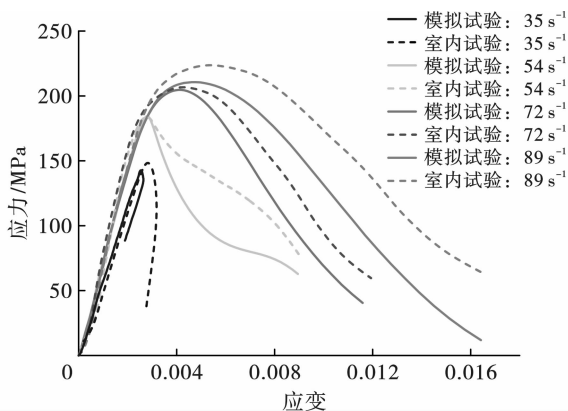


图 10 实验室试验与数值计算的应力-应变曲线比较图

Fig. 10 Comparison of stress-strain curves between laboratory tests and numerical calculations

两种试验情况下的应力-应变曲线基本一致,随

着加载应变率增大,应力-应变曲线由闭口型向开口型转变,试样的峰值强度逐渐增加,表现出了明显的率相关性。不同应变率的弹性范围基本一致,室内试验与数值模拟的应力-应变曲线峰值强度基本一致。RHT 模型能够较好地表征硬石膏的弹性、线性强化和损伤软化阶段。

在相同应变率下,以动态峰值强度和峰值应变为特征值进行误差分析,峰值强度及峰值应变与实验结果的误差均未超过 10%,说明确定的硬石膏 RHT 模型参数较为合理。

4.2 试样破坏形态对比分析

从图 11 可以看出,不同应变率下数值模拟和室内试验得到的硬石膏破坏形态规律基本一致。随着应变率增加,试样均由轴向劈裂破坏向压碎破坏过渡,试样裂纹不断增加,破碎程度越严重。

5 结论

(1) 通过 SHPB 模拟试验对 B 、 g_t^* 、 A 、 n 、 f_s^* 、 f_t^* 、 Q_0 、 g_c^* 、 ξ 、 D_1 、 ε_p^m 、 A_f 、 n_f 、 P_{comp} 和 N 共 15 个较难确定的待定参数进行敏感性分析,明确各因素对应力-应变曲线的影响趋势及影响程度,得到 B 、 g_t^* 、 n 、 D_1 、 n_f 、 P_{comp} 和 N 对应力-应变曲线形状基本没有影响;随着 g_c^* 的增加,线性强化阶段斜率不断增大,加快了线性强化阶段;随着 f_s^* 、 Q_0 、 g_c^* 和 ξ 的增加,峰值应力不断增大;随着 f_s^* 、 Q_0 和 ξ 的增加,增大了失效强度,加快了损伤软化过程; A_f 和 ε_p^m 主要影响损伤软化阶段的后半段。

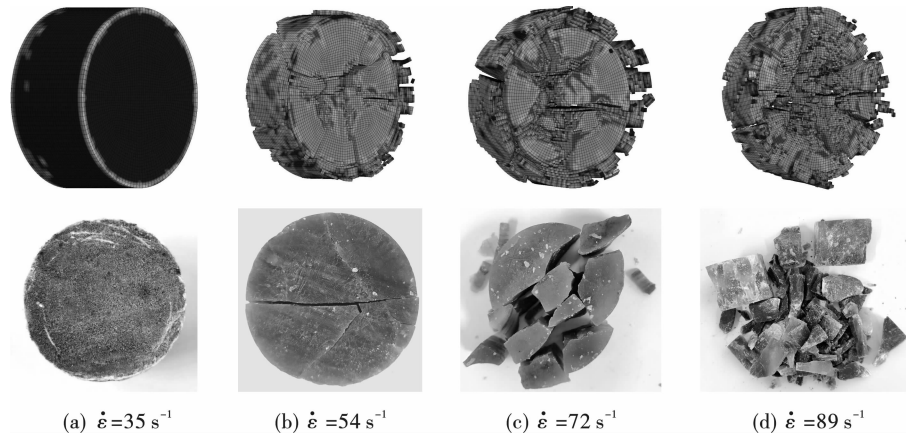


图 11 不同应变率下硬石膏破碎形态对比图

Fig. 11 Comparison of broken morphology of anhydrite at different strain rates

(2) 基于已确定的基本参数及待定参数敏感性分析结果,对 A 、 f_s^* 、 f_i^* 、 Q_0 、 g_c^* 、 ξ 、 ε_p^m 和 A_f 共 8 个待定参数进行正交模拟 SHPB 冲击试验,最终获取了适用于硬石膏的 RHT 参数。

(3) 模拟结果的峰值强度及峰值应变与室内试验结果的误差均未超过 10%,动态变形破坏过程基本一致,能够较好地模拟硬石膏力学特性及动态变形破坏过程,具有较强的适用性。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [1] ZHANG She-rong, SONG Ran, WANG Chao, et al. Modification of a dynamic constitutive model-HJC model for roller-compacted concrete and numerical verification [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12):25-31. (in Chinese)
- [2] 任根茂,吴昊,方秦,等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18):9-16.
- [2] REN Gen-mao, WU Hao, FANG Qin et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(18):9-16. (in Chinese)
- [3] 刘红岩,杨艳,李俊峰,等. 基于 TCK 模型的非贯通节理岩体动态损伤本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3):319-325.
- [3] LIU Hong-yan, YANG Yan, LI Jun-feng, et al. Dynamic damage constitutive model for rock mass with non-persistent joints based on TCK model[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3):319-325. (in Chinese)
- [4] 刘红岩,王新生,张力民,等. 非贯通节理岩体单轴压缩动态损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3):426-436.
- [4] LIU Hong-yan, WANG Xin-sheng, ZHANG Li-min et al. A dynamic damage constitutive model for rock mass with non-persistent joints under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3):426-436. (in Chinese)
- [5] TU Zheng-guo, LU Yong. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(10):1072-1082.
- [6] RIEDEL W, WICKLEIN M, THOMA K. Shock properties of conventional and high strength concrete: Experimental and mesomechanical analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(3):155-171.
- [7] 王政,倪玉山,曹菊珍,等. 冲击荷载下混凝土动力学性能研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2005(6):519-527.
- [7] WANF Zheng, NI Yu-shan, CAO Ju-zhen, et al. Recent advances of dynamic mechanical behavior of concrete under impact loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2005(6):519-527. (in Chinese)
- [8] 刘殿柱,刘娜,高天赐,等. 应用正交试验法的 RHT 模型参数敏感性研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(6):558-564.
- [8] LIU Dian-zhu, LIU Na, Gao Tian-ci et al. Study on the parameter sensitivity of RHT concrete model by orthogonal test technique [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(6):558-564. (in Chinese)
- [9] 李洪超,刘殿书,赵磊,等. 大理岩 RHT 模型参数确定研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(8):801-806.
- [9] LI Hong-chao, LIU Dianshu, ZHAO Lei et al. Study on parameters determination of Marble RHT Model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(8):801-806. (in Chinese)
- [10] 李洪超,陈勇,刘殿书,等. 岩石 RHT 模型主要参数

- 敏感性及其确定方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 779-785.
- [10] LI Hong-chao, CHEN Yong, LIU Dian-shu et al. Sensitivity analysis determination and optimization of rock RHT Parameters[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(8): 779-785. (in Chinese)
- [11] 聂铮玥, 彭永, 陈荣, 等. 侵彻条件下岩石类材料 RHT 模型参数敏感性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 108-116.
- [11] NIE Zheng-yue, PENG Yong, CHEN Rong, et al. Sensitivity analysis of RHT model parameters for rock materials under penetrating condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14): 108-116. (in Chinese)
- [12] 邱薛, 刘晓辉, 胡安奎, 等. 煤岩动态 RHT 本构模型数值模拟研究[J/OL]. 煤炭学报, 2023: 1-13. [2024-07-04]. <https://doi.org/10.13225/j.cnkijccs.2023.0540>.
- [12] QIU Xue, LIU Xiao-hui, HU An-kui et al. Research on numerical simulation of coal dynamic RHT constitutive model[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2023: 1-13. [2024-07-04]. <https://doi.org/10.13225/j.cnkijccs.2023.0540>. (in Chinese)
- [13] FAN Tian-hao, TAI Bao, ZHUO Li, et al. Determination of constitutive parameters of crystalline limestone based on improved RHT Model[J/OL]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022: 1-11. <https://doi.org/10.1155/2022/3794898>.
- [14] RIEDEL W, KAWAI N, KONDO K. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 283-293.
- [15] 王占江, 张德志, 张向荣, 等. 蓝田花岗岩冲击压缩特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(5): 797-802.
- [15] WANG Zhan-jiang, ZHANG De-zhi, ZHANG Xiang-rong, et al. Testing study on shock compression for lantian granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(5): 797-802. (in Chinese)
- [16] 信礼田, 颜潮兴. 砂岩冲击压缩和卸载力学特性[J]. 岩土工程学报, 1987(5): 57-66.
- [16] XIN Li-tian, YAN Chao-xing. Mechanical properties of sandstone under impact compression and unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987(5): 57-66. (in Chinese)
- [17] 赵坚, 赵宇辉, 尚嘉兰, 等. Bukit Timah 花岗闪长岩的 Hugoniot 状态方程[J]. 岩土工程学报, 1999(3): 59-62.
- [17] ZHAO Jian, ZHAO Yu-hui, SHANG Jia-lan, et al. The Hugoniot equation of state for Bukit Timah granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999(3): 59-62. (in Chinese)
- [18] TU Zheng-guo, LU Yong. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 36(1): 132-146.

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》是中文核心期刊要目总览、中国科学引文数据库(CSCD)、科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告、高质量科技期刊分级目录总汇、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)、中国应用型期刊评价研究报告(CACJ)等评价体系收录期刊。《爆破》还是Scopus科研检索分析和学科规划管理数据库、SciFinder CAS美国化学文摘数据库、Ulrich's 乌利希国际期刊指南、JST日本科学技术振兴机构数据库、中国知网知识发现网络平台、万方数据知识服务平台、超星期刊域出版平台、维普资讯中文期刊服务平台、SciEngine发布平台、Researching 中国光学期刊网、楚天卓越行动计划科技期刊论文在线开放平台等数据库和平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。