

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.003

动载下磁铁矿石的动力学特性及破坏模式分析*

刘浩杉¹,张智宇^{1,2},李祥龙¹,黄永辉³,王建国¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院,昆明 650093;

2. 云南省中一德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室,昆明 650093;

3. 昆明理工大学 电力工程学院,昆明 650500)

摘要: 针对磁铁矿石在采选和破碎过程中耗能巨大的问题,借助分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置,对磁铁矿石进行不同应变率条件下的冲击压缩试验,分析磁铁矿石的动态力学特性及其破坏过程中的能量耗散特征,并借助 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟试样完整动态破坏过程。研究表明:磁铁矿石试样的动态抗压强度具有显著的应变率相关性,应变率从 $43.94 \sim 147.75 \text{ s}^{-1}$,其动态抗压强度从 126.77 MPa 提高到 220.62 MPa 。能量传递规律分析表明,随着入射能的增大,反射能增长趋势增大,最大占比约占总入射能的 22%;而透射能增长趋势减小,且透射能占比从低入射能下的 78% 降低至高入射能下的 38%,用于试件破碎的耗散能量逐步增多,与入射能呈线性关系。其破坏模式从中低应变率下的劈裂破坏转为高应变率下的压碎破坏,从破碎尺度来看,中低应变率下碎块多为大块状,而高应变率下碎块尺度较小且多呈细粒状及针状。数值仿真计算表明试件最开始发生破坏是由试件入射杆端面的“十字”反射拉伸波引起的。研究结果可为判断磁铁矿石动力破碎的难易程度以及提高冲击破岩效率提供参考。

关键词: 霍普金森压杆; 磁铁矿石; 动力学特性; 破坏模式; 数值模拟

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)01-0021-09

Dynamic Properties and Failure Modes Analysis of Magnetite Ore under Dynamic Loading

LIU Hao-shan¹, ZHANG Zhi-yu^{1,2}, LI Xiang-long¹, HUANG Yong-hui³, WANG Jian-guo¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, China; 3. Faculty school of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In view of the problem that mining and crushing of magnetite ore require huge energy consumption, the split Hopkinson pressure bar(SHPB) is used to test and analyze the dynamic mechanical properties and energy dissipation characteristics of magnetite ore during crushing process under different strain rates. Meanwhile, the complete dynamic failure process of the sample is simulated by ANSYS/LS-DYNA software. The results show that the dynamic compressive strength of the magnetite ore samples has a significant strain rate correlation, and increases from 126.77 MPa to 220.62 MPa when the strain rate ranges from 43.94 s^{-1} to 147.75 s^{-1} . Besides, The analysis of energy transfer law shows that the increase trend of reflected energy become more obvious with the increase of incident energy, and the maximum proportion accounts for about 22% of the total incident energy. However, The increase

收稿日期: 2022-10-14

作者简介: 刘浩杉(1998-),男,云南文山,在读硕士,从事工程爆破方面研究, (E-mail)1622716889@qq.com。

通讯作者: 张智宇(1973-),男,广东韶关,教授,主要从事工程爆破及岩石破碎方面的研究, (E-mail)924221851@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52064025)

trend of transmission energy become weaker, and the proportion of transmission energy decreases from 78% at low incident energy to 38% at high incident energy. At the same time, the dissipated energy used for specimen crushing increases gradually, which has a linear relationship with the incident energy. The failure mode changes from the splitting failure at low and medium strain rates to crushing failure at a high strain rate. In terms of the crushing scale, most of the fragments at low and medium strain rates are large, while the fragments at high strain rates are small and mostly fine-grained and needle shaped. Numerical simulation results indicate that the initial failure is caused by the "cross" shaped reflected tensile waves on the incident end of the specimen. The results of this study can provide a reference for judging the difficulty of dynamic crushing of magnetite ore and improving the efficiency of rock breaking by impact.

Key words: hopkinson pressure bar; magnetite ore; dynamic characteristics; failure modes; numerical simulation

磁铁矿石作为重要的工业原材料于国民经济发展起着重要作用。冲击破碎是矿岩破碎的基本方法,在消耗一定能量的情况下矿岩破碎成不同粒径,其在冲击过程中的能量耗散不可逆转,破碎耗能与岩块数量、破坏模式之间的关系是一个不可忽视的问题。

SHPB 装置现已成为为研究高应变率 ($10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) 下岩石的动态力学特性的基本手段^[1-4]。关于不同应变率下岩石这种非均质材料所表现出的动态力学特性,国内外学者进行了大量的研究:姜峰和 Wang 等对花岗岩进行了不同应变率下的动态压缩试验^[5,6],发现花岗岩在高应变率下动态强度突变的特性且岩样在高应变率下的失效和裂纹扩展会消耗更多能量,同时岩样更加破碎。平琦等对不同高温作用后的石灰岩进行动力特性试验^[7],发现其动态抗压强度与温度的关系呈二次函数形式。在岩石材料的破坏模式上,卢志堂等对中高应变率下的花岗岩的裂纹扩展进行了研究^[8],指出岩石在单轴冲击下呈劈裂破坏。王伟等利用 CT 扫描技术获得不同受力情况下砂岩的裂纹密度^[9],并指出在单轴,一维、三维动静组合下情况下砂岩的破坏形式。武仁杰研究了不同层理倾角岩石的能量耗散情况与破碎程度之间的关系^[10],指出岩石倾角在 $45^\circ \sim 67.5^\circ$ 时,能量利用率高并且岩石更加破碎。同时,试验快捷、低成本的数值模拟现已成为 SHPB 室内试验的良好补充。李明利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对长径比为 0.5,直径为 74 mm 的砂岩试样进行了 SHPB 数值模拟试验^[11],研究了砂岩在不同冲击速度下的力学性能和能耗规律。张明涛用 ANSYS/LS-DYNA 软件对不同冲击速度下有无轴压的两种情况的砂岩进行了数值模拟研究^[12],采用微裂纹密度法定量表征了砂岩的损伤程度并直观展示了其破坏过程。Wu 等人利用 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 本构模型对混凝土进行了数值模拟^[13],并将试验应力应变曲线与模拟得到的进行比较。

上述关于岩石动态力学特性以及破坏模式的研

究结论大多数都是基于工程地质岩体开展的,对于金属类型的矿山开采下的矿石研究较少。利用分离式霍普金森杆对攀枝花市白马铁矿磁铁矿石进行动态冲击实验,通过研究不同应变率下磁铁矿石的动态力学性能、冲击破坏过程中的能量转化利用以及试件破坏模式来反映该磁铁矿石破碎情况。

1 磁铁矿石冲击压缩试验

1.1 试验装置与基本原理

本次试验采用国际岩石力学学会推荐标准岩石动力学测试工具,分离式霍普金森压杆 (SHPB)。SHPB 试验装置采用纺锤形子弹,长 0.4 m,可产生近似恒应变率的半正弦波形,避免 Pochhammer-Chree 振荡问题^[14]。入、透射杆件材质为 40Cr 高强度合金钢。直径 50 mm,长度 2 m,密度 7784 kg/m^3 ,弹性模量 250 GPa,弹性杆纵波波速 5667 m/s。装置结构如图 1 所示。

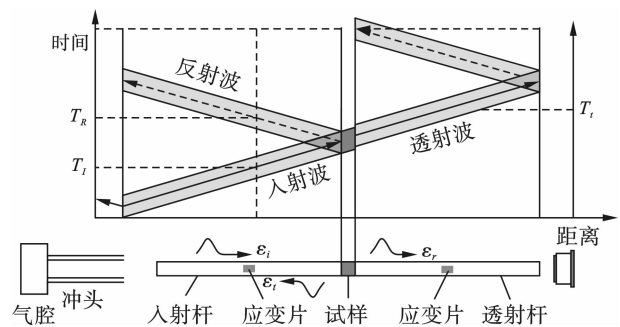


图 1 分离式霍普金森压杆试验装置

Fig. 1 Split Hopkinson pressure bar test device

由应变片上信号可求得应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 。

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{AE}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \varepsilon(t) = \frac{C}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 、 E 、 C 分别为压杆的横截面积、弹性模量、纵波波速; A_s 、 l_s 分别为试样的横截面积和长度, $\varepsilon_I(t)$ 、 $\varepsilon_R(t)$ 、 $\varepsilon_T(t)$ 为 t 时刻压杆的入射应变、反射应变、透射应变。

1.2 试件中耗能计算

入射能 W_I 、反射能 W_R 和透射能 W_T 在基于一维波理论及能量守恒的情况下可由式(2) 计算获得。

$$\begin{cases} W_I(t) = AEC \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt \\ W_R(t) = AEC \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \\ W_T(t) = AEC \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

试件吸收的耗散能等于入射能减去反射能和透射能,即

$$W_s = W_I - (W_R + W_T) \quad (3)$$

假设试件耗散能全部用于岩石破碎,忽略试样的体积影响,采用破碎耗能密度 η 进行试样的破碎耗能特性分析,计算公式如下

$$\eta = \frac{W_s}{V} \quad (4)$$

式中, V 为试样的体积。

1.3 岩石试样制备及试验方案

试验所用岩样为攀枝花白马铁矿的钒钛磁铁矿石,选择完整性较好的岩块加工成长径比接近于1 圆柱体,并对试样两端进行打磨,使其不平整度和不垂直度均小于 0.02 mm。试样为直径 50 mm,高 50 mm 的圆柱体,长径比约为 1.0。加工完成的岩石试样如图 2。

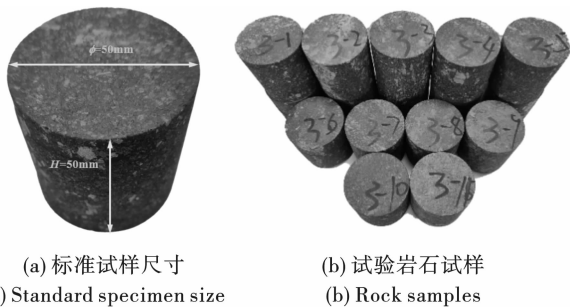


图 2 冲击试验岩样
Fig. 2 Rock samples of impact tests

为避免冲击气压过小试样未发生破坏或者气压过大试样发生粉碎性破坏,通过对磁铁矿石冲击后确定其冲击气压范围,试验共设计了 0.3 ~ 0.7 MPa 5 种不同的冲击气压,气压梯度为 0.1 MPa,每个冲

击气压下 3 个试样,共计 15 个试样。以研究不同冲击荷载下磁铁矿石的动力学性质及破坏模式。

2 试验结果及分析

试件基本力学参数如表 1 所示。

表 1 磁铁矿石静态力学参数
Table 1 Static mechanical parameters of magnetite ore

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
3.6	117.7	6.98	7.51	0.25

2.1 动态应力平衡验证

SHPB 试验合理性是基于一维传播理论而存在。如图 3 所示,入射波形与反射波形在经平移相加后,所得到的入射加反射波形与透射波几乎重合,说明磁铁矿石试样在破坏前两端应力大小接近。试样在破坏前两端的应力已达到平衡,试验结果有较高的可靠性。

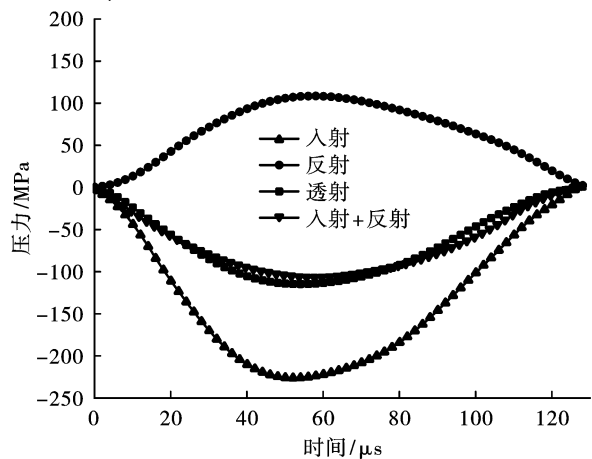


图 3 动态典型波形及应力均匀性验证
Fig. 3 Typical dynamic waveform and verification of stress uniformity

2.2 SHPB 试验结果

为了表征岩样在冲击荷载下的强度变化,引入动态强度因子 K 来定量描述不同冲击应变率下岩石动态抗压强度相对于静态抗压强度的增幅。

$$K = \sigma_D / \sigma_S \quad (5)$$

式中: K 为动态强度因子; σ_D 、 σ_S 为试样的动态、静态抗压强度。

通过式(1)及式(5) 计算得到应力、应变、应变率及动态强度因子 K 等参数。冲击试验结果如表 2 所示。

2.3 磁铁矿石动力学特性分析

试验可获得入射、反射、透射波三种信号,根据

三波法原理绘制试样在不同应变率下的应力-应变曲线,其大致可划分为压密、弹性变形、塑性变形以及破坏四个阶段。如图4所示。

表2 冲击荷载下岩样试验参数

Table 2 Test parameters of rock samples under impact loads

试样编号	冲击气压/ MPa	冲击速度/ (m · s ⁻¹)	平均应变率/ (s ⁻¹)	动态抗压 强度/MPa	动态强度因子 K	
					试验值	平均值
1 [#]	0.3	8.32	43.94	126.77	1.08	1.06
2 [#]		8.24	42.56	123.63	1.05	
3 [#]		8.29	42.88	125.49	1.07	
4 [#]	0.4	11.19	56.42	155.49	1.32	1.32
5 [#]		11.05	53.73	152.76	1.30	
6 [#]		11.28	57.94	156.35	1.33	
7 [#]	0.5	14.48	82.59	175.69	1.49	1.48
8 [#]		14.26	79.98	172.10	1.46	
9 [#]		14.32	81.86	174.31	1.48	
10 [#]	0.6	16.18	116.94	203.49	1.73	1.74
11 [#]		16.47	117.21	204.63	1.74	
12 [#]		16.80	120.23	206.42	1.75	
13 [#]	0.7	19.36	146.53	218.58	1.86	1.86
14 [#]		19.24	146.22	217.39	1.85	
15 [#]		19.53	147.75	220.62	1.87	

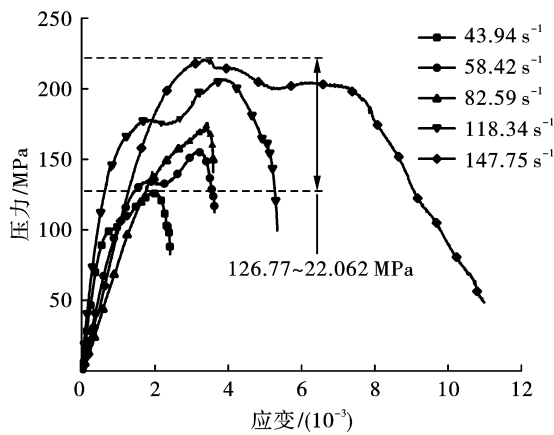


图4 不同冲击速度下磁铁矿石的应力应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of magnetite ore under different impact speeds

在入射杆的撞击下,试件的内部孔隙被挤压,在极短时间内孔隙闭合,之后动态应力应变曲线进入弹性变形阶段,此阶段动态应力应变曲线接近为一条直线。之后应力持续增加,在达到峰值应力的80%左右时,试件进入弹塑性阶段,应力应变曲线斜率降低,即在应力缓慢增加的同时,试样应变不断加大。中低应变率(43.94 s⁻¹、58.42 s⁻¹、82.59 s⁻¹)下的试样无明显塑性变形阶段,而高应变率(147.75 s⁻¹)下试样的曲线具有明显的塑性阶段,

即应力大致保持不变的情况下应变持续增长,并且在其曲线下降阶段趋势相对缓慢。

如图5所示,随着应变率不断增加,试件的动态强度因子K也随之变大,说明磁铁矿石是率敏感性材料,与其他岩石的动态力学特性基本一致^[15,16]。这是因为冲击时间很短,矿石没有足够的时间积累能量,只能暂时性提高自身强度来应对外界冲击能量。在应变率为147.75 s⁻¹的情况下,试件的动态抗压强度为220.62 MPa,对比其单轴抗压强度117.7 MPa,增大了约1.86倍。

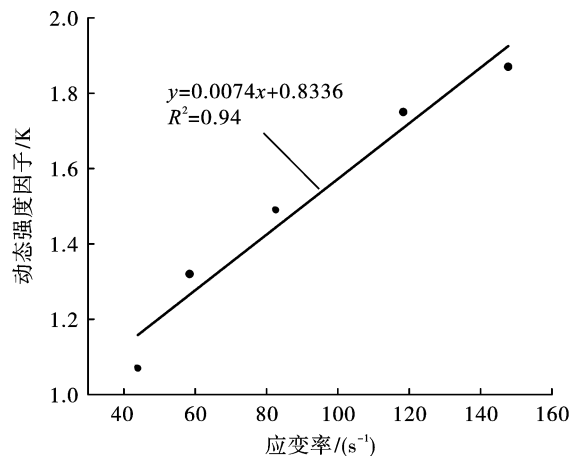


图5 动态强度因子K随应变率的变化
Fig. 5 Variation of dynamic intensity factor with strain rate

3 试件能量吸收及破坏形态分析

3.1 入射能与透、反射能量的关系

为更全面分析磁铁矿石冲击破坏特性,根据式

(2)、(3)、(4)对试件能量利用情况进行计算分析,得到了不同冲击气压下的试件入射能、反射能、透射能、耗散能。并将 3 种能量与入射能的比值称为能量反射率、能量透射率、能量耗散率。计算结果见表 3。

表 3 不同应变率下典型试样能量计算结果

Table 3 Energy calculation results of typical samples under different strain rates

试件编号	冲击气压/MPa	子弹速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	入射能 W_I/J	反射能 W_R/J	透射能 W_T/J	吸收能 W_S/J	能耗密度/ $(J \cdot cm^{-3})$	破碎耗能占比 P
1#	0.3	8.32	48.31	4.68	37.93	5.68	0.057	0.117
2#	0.4	11.19	85.16	10.08	56.52	18.56	0.189	0.217
3#	0.5	14.48	154.46	21.77	79.77	52.92	0.539	0.344
4#	0.6	16.18	210.50	43.05	95.21	72.24	0.736	0.343
5#	0.7	19.36	273.24	60.67	104.58	107.99	1.100	0.395

磁铁矿石在冲击载荷作用下,吸收的能量用于其内部的裂隙的发育发展、贯通。冲击破碎过程中从入射杆传递的总入射能经岩样破碎后发生耗散,一部分转变为岩石破碎吸收能,一部分发生透射转变为透射能,其他部分主要以弹性波的形式反射回冲击机构转变为反射能。由图 6 可知在入射能从 48 J 增至 273 J 过程中,反射率从 10% 增至 22%,试件耗散率从 12% 大幅增加至 40%,而能量透射率从 78% 降低至 38%。

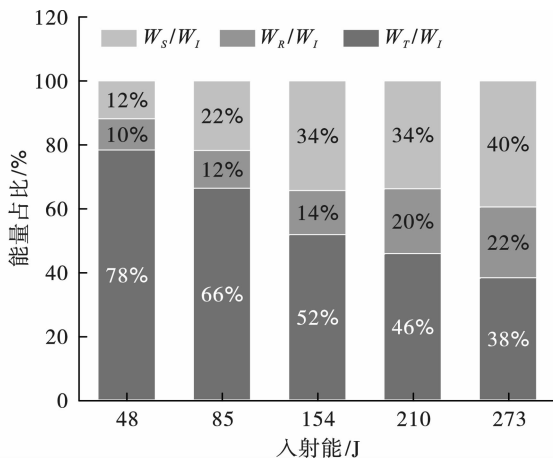


图 6 各能量占入射能的百分比

Fig. 6 Percentage of each type of energy in incident energy

各能量占入射能的百分比见图 6, 磁铁矿石入射能与透射能、反射能的关系见图 7。

从图 7 中可以看出,透射能随入射能的增大逐渐变大,其增幅逐渐变小,二者呈对数关系。这是因为入射能在较低情况下,试件处于弹性变形阶段,试件内部孔隙被压密,故透射能大幅增加。而随着入射能的增加,相应的试件吸收的能量也增多,这些吸收的能量用于试件内部的孔隙发育,其内部损伤增加,故减弱了透射波的传播,透射波增幅减小。

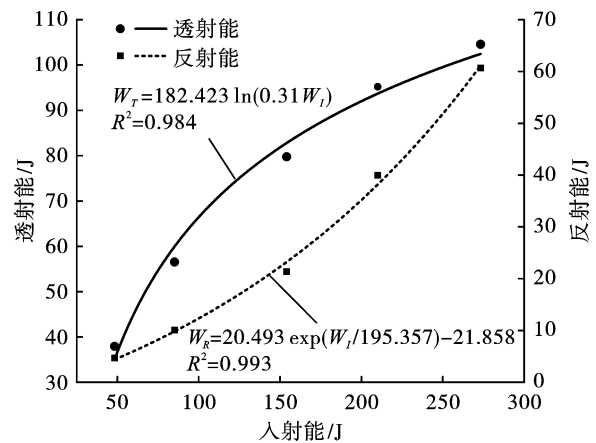


图 7 磁铁矿石入射能与透射能、反射能的关系

Fig. 7 Relationship between incident energy, transmission energy and reflection energy of magnetite ore

入射能较小时,反射能随着入射能的增加而增大,且反射能增大的幅度也在逐渐增加,二者呈指数关系,不同入射能作用下磁铁矿石所表现出的变形特性是不同,当入射应力波能量较小时,岩石呈脆性,吸能效果较差,能量主要以透射能形式耗散;当入射应力波能量较大时,岩石呈脆延性,岩石吸能效率随入射应力波能量的增大而增加。岩石吸能效率达到最高可达到约入射能量的 40%;说明一半以上的能量在杆件上以弹性波的形式耗散。

3.2 破碎耗能与入射能量

磁铁矿石破碎耗能密度与应变率的关系见图 8。

由图 8 可以看出,能耗密度与应变率之间呈线性关系。在磁铁矿石的冲击破碎行为中,破碎耗能密度越大,其吸收的能量也就越多,其内部的微裂纹数目也就越多,裂纹不断扩展贯通导致磁铁矿石的破碎程度也更加剧烈。

3.3 磁铁矿石破坏形态

从图 9 中破坏形态可以看出:宏观的破坏过程

一般为边缘破裂、产生裂纹或裂隙、裂纹裂隙扩展、试件破碎。

应变率为 $43.94 \sim 82.59 \text{ s}^{-1}$ 时,入射能较小,应力波通过岩石会导致岩石损伤,裂纹低速扩展,最终试块沿裂纹贯通分散为 $2 \sim 4$ 大块;应变率为 118.34 s^{-1} 时,入射能量逐渐增大,试块多破碎为大碎块,掺杂个别小块,碎块呈柱状和细粒状形态;在 147.75 s^{-1} 的应变率下可见矿石被破碎为碎屑粉末,冲击杆速度较高的时候试件的应变率也相对较高,入射应力波携带的能量也相应地增多,从而试件内部获得极高的能量,激发出试样内的更多裂隙,并在此基础上形成了新的裂纹,原有的裂纹与新产生的裂纹相互交叉贯通,导致试样破碎成小块或细小碎屑,并伴随着粉末的产生。



图9 不同加载应变率下磁铁矿石破坏形态

Fig. 9 Failure morphology of magnetite ore under different loading strain rates

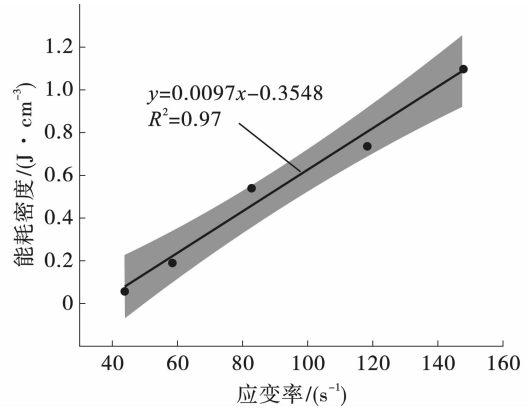


图8 磁铁矿石破碎耗能密度与应变率的关系

Fig. 8 Relationship between energy consumption density and strain rate in magnetite ore crushing

4 有限元模型建立

4.1 模拟方法及参数确定

建模在软件 ANSYS 中完成,使用 LS-PREPOST

软件进行后处理。其中试样采用适用于岩石材料高应变率、大变形问题的 HJC 本构。其中部分的参数确定可通过试验获得,其余参数参考相关成果^[17-19]。见表4。

表4 磁铁矿石 HJC 模型参数

Table 4 HJC model parameters for magnetite ore

参数	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G / GPa	F_c / MPa	A	B	C	N	S_{\max}	T / MPa	P_c / MPa	μ_c
数值	2586	6.53	118	0.9	1.1	0.007	0.61	7	4.0	20.2	0.0017
参数	P_1 / GPa	μ_1	K_1 / GPa	K_2 / GPa	K_3 / GPa	D_1	D_2	$EPSO$	FS	$\varepsilon_{f,\min}$	
数值	1.2	0.1	82	-171	208	0.04	1.0	1	2.0	0.004	

表中:强度参数: A 、 B 、 C 、 N 分别表示标准化内聚力强度、标准化压力硬化系数、应变率系数、压力硬化系数, S_{\max} 为材料所能达到的最大标准化强度;压力参数:单轴压缩岩样的压碎体积压力和压碎体积应变分别对应 P_c 、 μ_c , P_1 、 μ_1 分别为压实压力和压实体积应变, T 为岩样最大拉伸应力, K_1 、 K_2 、 K_3 为常数;损伤参数: D_1 、 D_2 为损伤常数, $EFMIN$ 为材料最小塑性应变。剩余两个参数为参考应变率 $EPSO$ 和失效类型 f_s 。

4.2 模型构建

依据实际装置尺寸建立有限元模型,采用映射

网格划分。入射杆和透射杆沿径向划分 20 份,轴向划分 200 份,试样沿径向划分 40 份,轴向划分 34 份。总单元数为 236266。有限元模型如图 10 所示。纺锤形子弹和入射杆采用 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 接触、试样与入射杆、透射杆之间采用 CONTACT_EROSION_SURFACE_TO_SURFACE 接触。为减少沙漏效应接触算法采用罚函数算法,罚函数因子 K 取 2.0。

4.3 模型及参数有效性验证

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件求解,将所得数值

模拟结果导入后处理软件 LS-PREPOST 中,选取入射杆、透射杆中间位置提取入射、反射、透射应力波

形。图 11 为典型的应力时程曲线。

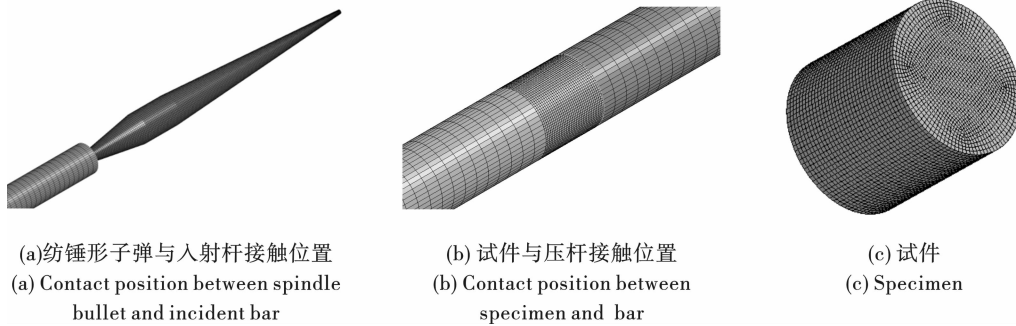


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element models

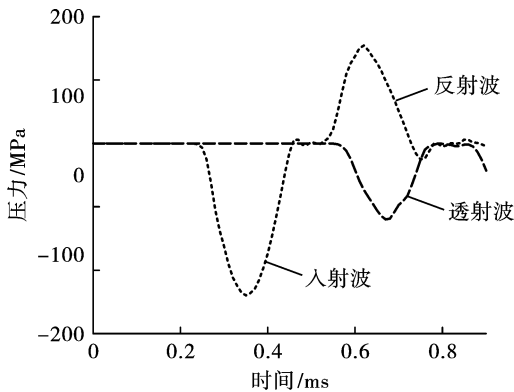


图 11 入射杆、透射杆上的应力波形

Fig. 11 Stress waveform of incident bar and transmitted bar

从图 11 中可以看出,模拟入射波形近似为半正弦波,与试验得到波形接近。说明对试样加载的荷载,模拟与试验误差极小。证明了本次数值模拟的可靠性。

由于 ANSYS 中不可以设置应变率的大小,故由试验数据中应变率所对应的冲击速度来模拟不同冲击速度下的破坏形态。冲击速度 8.32 m/s、16.18 m/s 对应的应变率为 43.94 s^{-1} 、 118.34 s^{-1} 。

在 LS-PREPOST 后处理软件中选取冲击后试样前中后各 3 个单元点,得出试件的应力应变信息并绘制应力应变曲线。由图 12 可知,数值模拟的应力应变曲线与试验的曲线基本吻合。无较大数量级差异,说明建模过程以及模型划分精度合格。同时也证明了 HJC 参数选择较合理。

4.4 模拟破坏形态分析

图 13 是模拟岩样在冲击速度 8.32 m/s (43.94 s^{-1})下的破坏过程。从图 13 中可见,应力波在 $419 \mu\text{s}$ 左右到达试样端面,之后在十几微秒的时间内应力波均匀作用于试样表面。在 $639 \mu\text{s}$ 时,压

应力到达试件边缘。在边缘处四个角应力明显大于入射端表面。之后随着应力波继续传播,在 $674 \mu\text{s}$ 压应力反射成为拉伸波,在试件入射端面出现一个类似“十字”的反射拉伸波。随着时间增加,在 $724 \mu\text{s}$ 反射拉伸波集中于试件入射杆端面一角,由于岩石类材料抗拉强度远小于抗压强度,试件边缘发生破坏。与试验在 8.32 m/s 冲击速度下的磁铁矿石破坏形态十分符合。

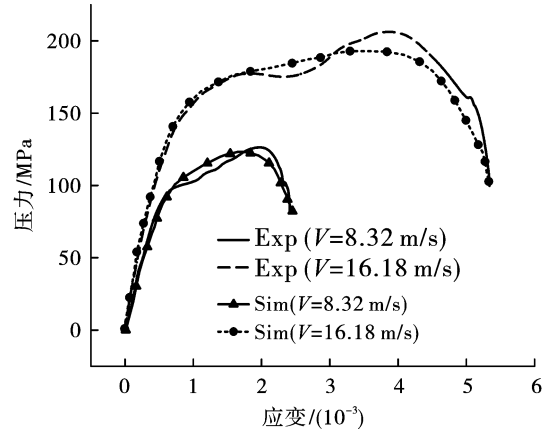


图 12 模拟所得与试验所得应力应变曲线对比

Fig. 12 Comparison of stress-strain curves of simulated and tested results

随着冲击速度的增大,入射应力在更短时间内到达了试件表面, $429 \mu\text{s}$ 时,入射应力均匀施加在试样入射杆端面。在 $529 \mu\text{s}$ 时试件沿着圆周剥去一圈后同样反射拉伸波集中于试件一角,而此处就是试样最开始发生破坏的地方。 $559 \mu\text{s}$ 时试件开始发生破坏。在 $749 \mu\text{s}$ 从试件中心位置产生了轴向劈裂,裂纹贯穿了试件上下表面,试件形成了沿轴向的较大块体,此时的磁铁矿石试样破坏模式为轴向劈裂拉伸破坏。之后在 $849 \mu\text{s}$ 时,试件内部应力

持续升高,试件内部吸收能量增多,更多的裂隙发育扩展。部分大块岩石碎块被压碎成更小的碎块。故

试样在冲击荷载下成为少量大块以及若干柱状小块。见图14。

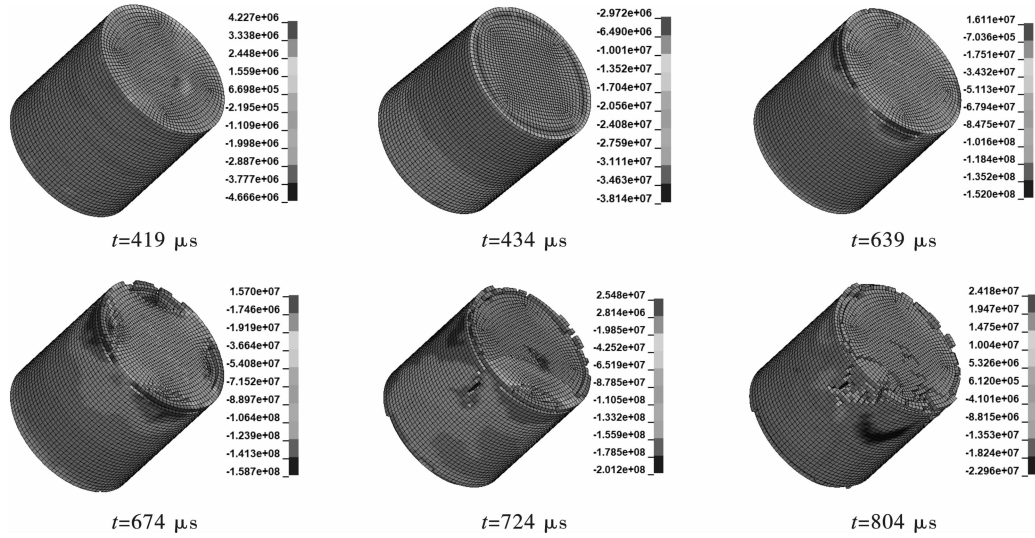


图 13 8.32 m/s 冲击速度下磁铁矿石破坏云图

Fig. 13 Damage cloud diagram of magnetite ore under velocity of 8.32 m/s

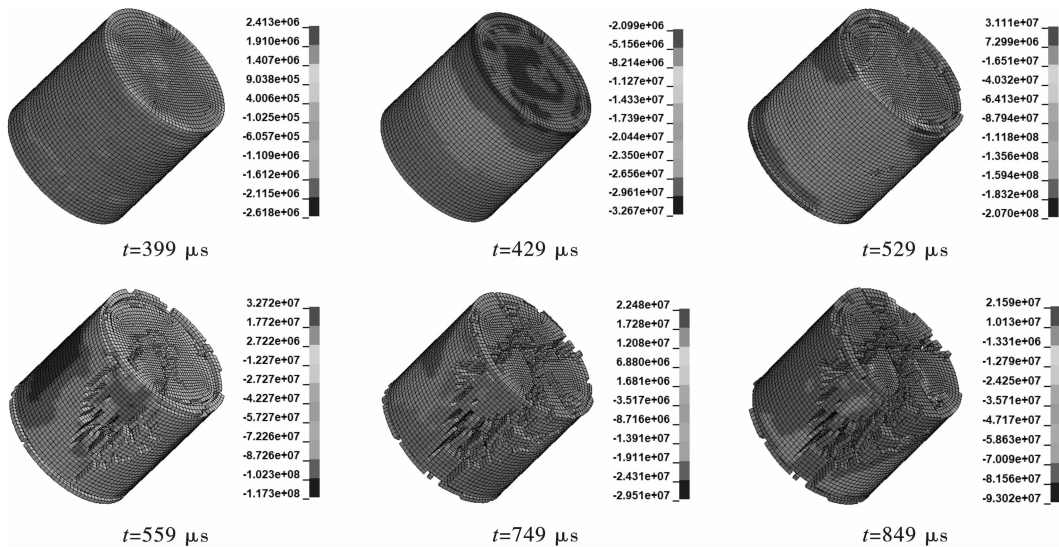


图 14 16.18 m/s 冲击速度下磁铁矿石破坏云图

Fig. 14 Damage cloud diagram of magnetite ore under velocity of 16.18 m/s

5 结论

基于分离式霍普金森压杆开展了不同冲击气压下对磁铁矿石的动态力学试验及破坏模式分析,试验结果如下:

(1) 磁铁矿石在高应变率(147.75 s^{-1})下具有明显塑性变形,而在中低应变率下(43.94 s^{-1} 、 58.42 s^{-1} 、 82.59 s^{-1})下无明显塑性变形。其动态强度因子K与应变率呈良好线性拟合关系,K值增长范围在1.06至1.86之间,说明磁铁矿石是率敏感性材料。

(2) 随着入射能从小到大地增加,反射能占比从10%增加至22%;透射能占比从78%降至38%,中低应变率下磁铁矿石无用功多以透射波形式耗散。而试件耗能呈线性上升趋势,在冲击气压0.7 MPa,入射能为273 J时,试件耗能占比达最大为40%。

(3) 随冲击气压升高,磁铁矿石试样的破坏以劈裂破坏为主转化为以压碎破坏为主。磁铁矿石吸收能量增多,破坏程度也更加剧烈,破坏后粒度不断减小,由大块状变为针状和细粒状。

(4) 利用ANSYS/LS-DYNA软件模拟了磁铁矿石在8.32 m/s(43.94 s^{-1})和16.18 m/s(147.75 s^{-1})

速度下的破坏形态,很好地展现了磁铁矿石在不同冲击速度下的破坏过程。两种应变率下的试样都在入射杆端面形成一个“十字”拉伸波,且从边角处最开始发生破坏。结果和分析可以相关数值模拟试验提供选择参考。

参考文献(References)

- [1] 刘磊,李睿,秦浩,等. 高温后深部砂卡岩动力学特性及微观破坏机制研究[J/OL]. 岩土工程学报:1-11. [2022-03-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=YTGC202206022&DbName=DKFXTEMP>.
- [1] LIU Lei, LI Rui, QIN Hao, et al. Study on dynamic mechanical properties and microscopic damage characteristics of deep skarn after high temperature treatment. [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering:1-11. [2022-03-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=YTGC202206022&DbName=DKFXTEMP>. (in Chinese)
- [2] 夏开文,王帅,徐颖,等. 深部岩石动力学实验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(3):448-475.
- [2] XIA Kai-wen, WANG Shuai, XU Ying, et al. Advances in experimental studies for deep rock dynamics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 448-475. (in Chinese)
- [3] YANG Y, ZHANG N, WANG J. Fracture morphology analysis of frozen red sandstone under impact [J]. Shock and Vibration, vol. 2021, Article ID 4388132, 12 pages, 2021.
- [4] ZHANG Z, QIAN Q, WANG H, et al. Study on the dynamic mechanical properties of metamorphic limestone under impact loading [J]. Lithosphere, 2021, 2021 (Special 4): 8403502.
- [5] 姜峰,李子沐,王宁昌,等. 高应变率条件下山西黑花岗岩的动态力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8):177-182.
- [5] JIANG Feng, LI Zi-mu, WANG Ning-chang, et al. Research on dynamic characteristics of Shanxi black granite under high strain rates [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8):177-182. (in Chinese)
- [6] WANG Y, TONON F. Dynamic validation of a discrete element code in modeling rock fragmentation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4):535-545.
- [7] 平琦,苏海鹏,马冬冬,等. 不同高温作用后石灰岩物理与动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 932-942, 953.
- [7] PING Qi, SU Hai-peng, MA Dong-dong, et al. Experimental study on physical and dynamic mechanical properties of limestone after different high temperature treatments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4):932-942, 953. (in Chinese)
- [8] 卢志堂,王志亮. 中高应变率下花岗岩动力特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6):1087-1094.
- [8] LU Zhi-tang, WANG Zhi-liang. Triaxial tests on dynamic properties of granite under intermediate and high strain rates [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6):1087-1094. (in Chinese)
- [9] 王伟,梁渲钰,张明涛,等. 动静组合加载下砂岩破坏机制及裂纹密度试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2647-2658.
- [9] WANG Wei, LIANG Xuan-yu, ZHANG Ming-tao, et al. Experimental study on failure mechanism and crack density of sandstone under combined dynamic and static loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2647-2658. (in Chinese)
- [10] 武仁杰,李海波,李晓锋,等. 冲击载荷作用下层状岩石破碎能耗及块度特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1053-1060.
- [10] WU Ren-jie, LI Hai-bo, LI Xiao-feng, et al. Broken energy dissipation and fragmentation characteristics of layered rock under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3):1053-1060. (in Chinese)
- [11] 李明,茅献彪. 冲击载荷作用下砂岩破坏及能量耗变率效应的数值模拟研究[J]. 爆破, 2014, 31(2):78-83.
- [11] LI Ming, MAO Xian-biao. Numerical simulation studies on strain rate effect of sandstone's energy dissipation and destruction under impulse loading [J]. Blasting, 2014, 31(2):78-83. (in Chinese)
- [12] 张明涛,王伟,张思怡,等. 冲击荷载作用下灰砂岩破坏过程及损伤数值模拟研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 46-54.
- [12] ZHANG Ming-tao, WANG Wei, ZHANG Si-yi, et al. Numerical simulation of failure process and damage of gray sandstone under impact loading [J]. Blasting, 2014, 31(2):78-83. (in Chinese)
- [13] WU Xu-tao, SUN Shan-fei, LI He-ping. Numerical simulation of SHPB tests for concrete by using HJC model [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2):137-142.
- [14] 宋春芳,徐龙龙,刘彦琦. 含水平非线性弹簧的准零刚度隔振系统的力传递率研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(2):356-363, 506-507.
- [14] SONG Chun-fang, XU Long-long, LIU Yan-qi. The force transmissibility of a quasi-zero stiffness isolation system with horizontal nonlinear springs [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(2):356-363, 506-507. (in Chinese)

- [2] YE Hai-wang, ZHOU Jian-min, YU Hong-bing, et al. Influence of rock structure planes on propagation of blasting seismic wave[J]. *Blasting*, 2016, 33(1):12-18. (in Chinese)
- [3] 马小满, 陈明, 严鹏, 等. 爆破作用下节理岩体应变能变化规律及影响研究[J]. *爆破*, 2018, 35(3):1-6, 67.
- [3] MA Xiao-man, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on strain energy processes and influence on jointed rock mass under blasting excavation[J]. *Blasting*, 2018, 35(3):1-6, 67. (in Chinese)
- [4] 向晓锐, 吴亮, 陈洋. 动态卸荷诱发节理岩体松动的数值模拟[J]. *爆破*, 2020, 37(1):55-60.
- [4] XIANG Xiao-rui, WU Liang, CHEN Yang. Numerical simulation of jointed rock mass loosening induced by dynamic unloading[J]. *Blasting*, 2020, 37(1):55-60. (in Chinese)
- [5] 董平, 刘婷婷, 李新平, 等. 冲击荷载作用下非贯通节理岩体细观破坏模式研究[J]. *爆破*, 2021, 38(4):17-25.
- [5] DONG Ping, LIU Ting-ting, LI Xin-ping, et al. Study on wave propagation and meso-failure of rock with non-persistent joints[J]. *Blasting*, 2021, 38(4):17-25. (in Chinese)
- [6] 闵忠鹏, 赵小稚, 程文文, 等. 结构面岩体爆破破坏机理探究[J]. *黄金*, 2017, 38(9):48-51.
- [6] MIN Zhong-peng, ZHAO Xiao-ya, CHENG Wen-wen, et al. Discussion on the blasting damage mechanism of structural surface rock mass[J]. *Gold*, 2017, 38(9):48-51. (in Chinese)
- [7] 胡建华, 高宏伟, 薛小蒙, 等. 岩体结构面对爆炸冲击工程响应的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(6):1560-1567.
- [7] HU Jian-hua, GAO Hong-wei, XUE Xiao-meng, et al. Influence of structural planes on response of explosion shock engineering[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(6):1560-1567. (in Chinese)
- [8] 张斌, 吴超俊, 张学富, 等. 不同倾角层理岩体爆破应力波传播规律[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(23):205-211.
- [8] ZHANG Bin, WU Chao-jun, ZHANG Xue-fu, et al. Propagation law of blasting stress waves in stratified rock mass with different inclinations[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(23):205-211. (in Chinese)
- [9] 路世伟, 周传波, 刘洪宇, 等. 含单条顺层结构面岩体中爆破振动的规律[J]. *工程爆破*, 2021, 27(2):29-34.
- [9] LU Shi-wei, ZHOU Chuan-bo, LIU Hong-yu, et al. Law of blasting vibration in rock mass with an out-dipped structural plane[J]. *Engineering blasting*, 2021, 27(2):29-34. (in Chinese)
- [10] 张飞, 张东宾, 王宇伟. 不同几何特征结构面岩体冲击动态响应的数值模拟研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(7):211-215, 220.
- [10] ZHANG Fei, ZHANG Dong-bin, WANG Yu-wei. Numerical simulation of dynamic impact response of rock-mass with different geometric features of structural plane[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(7):211-215, 220. (in Chinese)

英文编辑:李立峰

(上接第 29 页)

- [15] 陈猛, 王浩, 齐迈, 等. 岩石-钢纤维混凝土复合层动态压缩性能试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6):1222-1230.
- [15] CHEN Meng, WANG Hao, QI Mai, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of composite layers of rock and steel fiber reinforced concrete[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6):1222-1230. (in Chinese)
- [16] 纪杰杰, 李洪涛, 吴发名, 等. 冲击荷载作用下岩石破碎分形特征[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13):176-183, 214.
- [16] JI Jie-jie, LI Hong-tao, WU Fa-ming, et al. Fractal characteristics of rock fragmentation under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13):176-183, 214. (in Chinese)
- [17] KONG X, FANG Q, WU H, et al. Numerical predictions of cratering and scabbing in concrete slabs subjected to projectile impact using a modified version of HJC material model[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95:61-71.
- [18] 贾彬, 李正良, 陶俊林, 等. 混凝土 SHPB 试验数值模拟研究[J]. *固体力学学报*, 2010, 31(S1):216-222.
- [18] LI Zheng-liang, TAO Jun-lin, YAO Hua-chuan, et al. Research on numerical simulation of shpb concrete tests[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 31(S1):216-222. (in Chinese)
- [19] 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.
- [19] ZHANG She-rong, SONG Ran, WANG Chao, et al. Modification of adynamic constitutive model-HJC model for roller-compacted concrete and numerical verification[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12):25-31. (in Chinese)

英文编辑:陈东方