

DOI: 10.11779/CJGE201905006

实时温度下花岗岩动态压缩破坏特性试验与数值研究

石 恒, 王志亮*, 石高扬, 郝士云

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 为了研究黑云母花岗岩热动力学性能, 对不同实时温度(20℃, 100℃, 200℃)下的花岗岩试样力学响应和破坏过程进行了室内试验和数值模拟分析。结果表明: 在所研究的温度范围内, 20℃时岩样的抗压强度和弹性模量值最大, 100℃时最小, 且 100℃下岩样的破碎程度比 20℃和 200℃的明显偏大; 随着加载速率的提高, 应力-应变曲线上的峰值应力和峰值应变增加, 岩样内部裂纹演化及破坏程度也随之增大; 低加载率时试样周边易萌生裂纹, 高加载率下试样内部裂纹在加载初期甚至也可被激活; 所提出的 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型参数确定方法是可行的, 数值模拟能较好地描述热处理岩样在冲击荷载作用下力学特性; HJC 模型与相关失效准则相结合, 能逼真地展现岩样动态压缩破坏过程及其形破坏态变化。

关键词: 花岗岩; 实时温度; 动态荷载; 破坏过程; 数值模拟

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)05-0836-10

作者简介: 石 恒(1993—), 男, 硕士, 从事岩石动力学研究。E-mail: xiangzhui@foxmail.com。

Experimental and numerical studies on dynamic compression failure characteristics of granite under real-time temperatures

SHI Heng, WANG Zhi-liang, SHI Gao-yang, HAO Shi-yun

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To investigate the thermodynamic properties of biotite granite, the mechanical response and failure process of the rock samples under different real-time temperatures (20℃, 100℃ and 200℃) are analyzed based on the laboratory tests and numerical simulations. The results show that the compression strength and elastic modulus of the granite sample are the largest at the temperature of 20℃ and the lowest at 100℃. The fracturing degree of the sample at 100℃ is more obvious than that at 20℃ and 200℃. As the loading rate rises, the peak strength and peak strain of the stress-strain curve increase along with the crack evolution and failure degree. At a low loading rate, the microcracks in the peripheral area of the sample are firstly initiated. The internal microcracks of the sample can be activated even at the initial stage of loading with the increase of loading rate. In addition, the proposed method for determining the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) model parameters is proved to be feasible and accurate. The numerical simulation can well reflect the mechanical characteristics of the rock sample under the coupling action of impact loading and real-time temperatures, and the failure mode and rupture process of the sample during dynamic compression can be also illustrated realistically using the coupled HJC model and related failure criterion.

Key words: granite; real-time temperature; dynamic loading; failure process; numerical simulation

0 引 言

核废料深埋处理、地热资源开发与利用、地下煤矿瓦斯爆炸防治、岩石地下工程灾后重建等都涉及到温度和动载的耦合作用^[1]。开展不同温度和冲击载荷作用下岩石力学特性研究具有十分重要的理论意义和工程实用价值^[2-3]。

迄今, 关于温度或动态载荷对岩石力学性能影响已取得不少成果: Peng等^[4]探究了三轴压缩下热损伤对粗粒大理石的力学性能的影响, 指出热处理使得试样的延性增强; 刘石等^[5]利用分离式霍普金森压杆

(SHPB) 对经不同温度处理的大理岩进行试验研究, 认为弹性模量整体上随着温度的升高呈现降低的趋势; Yin等^[6]对高温下和高温后花岗岩进行静态单轴压缩试验, 发现与高温后岩样相比, 高温下岩石的弹性模量偏小; 徐小丽等^[7]研究了实时温度和加载速率对花岗岩力学性质的影响, 指出加载速率会促进峰值强度和弹性模量的提高; 平琦等^[8]对煤矿砂岩试样实施

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579062, 51379147)

收稿日期: 2018-04-11

*通讯作者 (cviewzL@hfut.edu.cn)

了不同加载速率的冲击压缩试验,发现试样破碎耗能密度与入射能呈线性正相关;Hokka等^[9]研究了不同围压下应变率对花岗岩力学特性的影响,得出了低围压下的应变率效应比高围压下的应变率效应更显著的结论;尤业超等^[10]对盐岩进行不同围压下的冲击试验,发现入射能增加会加快盐岩的硬化速率,围压升高会增强盐岩的流塑性;朱晶晶等^[11]利用改进的分离式霍普金森压杆,对花岗岩试样进行单轴循环冲击试验,研究了变形模量、屈服应变和峰值应力随载荷循环作用次数的变化规律;Zhang等^[12]对大理岩进行动态冲击试验,并在加载过程中采用高速摄影与数字图像技术观察破坏过程和试样表面变形特性,利用扫描电镜成像技术观察裂纹的扩展情况。

另一方面,计算机及计算技术的迅猛发展使得数值模拟成为理论分析和实验测试之外的又一种研究手段,并普遍应用在各个学科领域,如用RPA软件研究岩石类材料在外载作用下的裂纹扩展与演化问题^[13],将UDEC与其它软件相结合探究节理对应力波传播的影响^[14],基于AUTODYNA程序分析弹体侵彻问题^[15]。为了计算混凝土高应变率和大变形问题,Holmquist等^[16]在1993年发展了Holmquist-Johnson-Cook (HJC)模型,后来大量研究表明HJC模型不仅可用来模拟混凝土力学性能^[17],而且还是描述岩石材料动力学行为的一种合理本构,如李成武等^[18]利用HJC模型对煤岩霍普金森压杆实验进行数值模拟,再现了煤岩在冲击实验中的损伤过程,对比发现模拟结果与实验实测现象具有较好的相似性;王政等^[19]利用HJC模型数值研究弹体侵彻岩石问题,分析了不同速度条件下弹体响应和靶体抗侵彻能力,模拟结果与实验数据基本一致;方秦等^[20]基于理论与试验研究,给出了凝灰岩、花岗岩的HJC本构参数,并通过弹体侵彻实验验证了参数确定的正确性;闻磊等^[21]将岩石物理、力学实验数据与数值模拟相结合,给出了花岗斑岩的HJC参数取值,随后将所得参数用于此岩石的SHPB实验模拟中,发现计算曲线与实测结果吻合良好,从而验证了参数取值的合理性;赵光明等^[22]利用HJC模型对砂岩的破坏模式和能量特性进行了分析,认为岩石试样主要呈现张应变破坏、轴向劈裂破坏以及压碎破坏等3种破坏模式。

综上所述,在岩石热动力学特性研究方面,现有工作多集中于温度后(加热后冷却至室温)岩样特性,而实时温度(加热后无冷却阶段)下的研究开展则相对较少。本文拟采用带有加热装置的SHPB,对不同实时温度(20℃, 100℃, 200℃)下的花岗岩试样进行冲击压缩试验,并用高速摄影仪记录常温下试样侧面裂纹的萌生与扩展的全过程。最后,基于有限元软

件ANSYS/LS-DYNA和耦合失效准则的HJC模型,数值模拟试样的冲击压缩破碎过程,分析实时温度和动态荷载对岩石破坏的影响机理,力求得出对实际工程有参考价值的结论。

1 实温下花岗岩力学特性试验研究

1.1 试样制备与仪器

试验所用岩石为黑云母花岗岩,粒径为0.7~4 mm,静态抗压强度平均值为138 MPa,主要矿物成分有微斜长石(41%)、斜长石(27%)、石英(22%)和黑云母(7%)等。为满足应力均匀性假设等要求,特将试样加工成直径50 mm、高25 mm的圆柱体(图1)。在加工过程中,对岩样两端进行了精细打磨,保证试样两端面不平行度小于0.03 mm。



图1 花岗岩试样

Fig. 1 Granite samples

本次试验在带有加温装置的SHPB上进行(图2),该试验装置主要由加热装置、动力系统、弹性杆件(入射杆、透射杆和能量吸收杆)与电阻应变仪等组成。其中,入射、透射与能量吸收杆长度分别为2.4, 1.2, 1.0 m,直径均为50 mm。压杆材质为高强度镍合金钢,极限强度800 MPa,密度 ρ 为7795 kg/m³,波速 C_0 为5198 m/s,弹性模量 E_0 为210 GPa,泊松比 ν 为0.3。试验中使用了纺锤形冲头,其目的是为了产生半正弦波,以实现恒应变率加载。入射、反射和透射波电压信号通过黏贴在压杆上的应变片采集,随后基于“三波法”处理所测的电压信号,从而可得到试样的应力 $\sigma(t)$,应变 $\epsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 等力学参数^[1]。

为减小试样与压杆间的摩擦,在试样两端面涂抹黄油,并使压杆与试样紧密接触,通过调节气压大小或子弹在发射腔的位置可以改变冲击载荷的幅值,冲头在入射杆内产生半正弦入射波,定义 σ_p 为入射波峰值应力。对20℃, 100℃, 200℃下的试样分别进行不同冲击载荷下的压缩试验(载荷与温度的组合情况见表1),并使用高速摄影仪对常温下试样侧面裂纹萌生与扩展过程进行拍摄。对于100℃和200℃下的冲击试验,加载前利用加热箱以10℃/min的升温速率对试样进行加热,达到试验预设温度后并保持恒温3 h,接着将试样快速转移至已加热至试验预设温度的管式高温

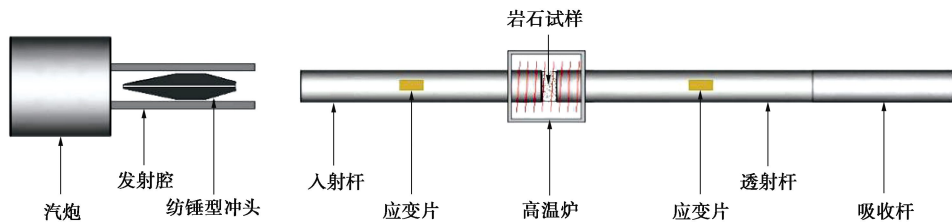


图2 改进的分离式霍普金森压杆

Fig. 2 Improved split Hopkinson pressure bar

炉中（见图2），为弥补转移过程的热量散失，试样在高温炉中再恒温保持10 min，随后快速移动入射杆和透射杆间并用力夹紧试样，随后对实时温度试样进行冲击压缩试验。

表1 试验分组情况

Table 1 Experimental groups

编号	温度 /℃	σ_p /MPa	编号	温度 /℃	σ_p /MPa	编号	温度 /℃	σ_p /MPa
T1-1	20	160	T2-1	100	160	T3-1	200	160
T1-2	20	180	T2-2	100	180	T3-2	200	180
T1-3	20	205	T2-3	100	205	T3-3	200	205
T1-4	20	250	T2-4	100	250	T3-4	200	250
T1-5	20	300	T2-5	100	300	T3-5	200	300

1.2 试验结果及分析

图3所示为温度200℃、入射应力峰值为250 MPa时试样两端的应力平衡检验，可见在透射波达到峰值之前，入射波与反射波叠加后和透射波非常接近，这表明此次试验中应力已基本达到平衡，即满足SHPB动态压缩中的均匀性假定。在透射波峰值之后入射波加反射波与透射波逐渐分离表明试件发生破坏。限于篇幅，其它试样动态应力平衡图不再一一列出。

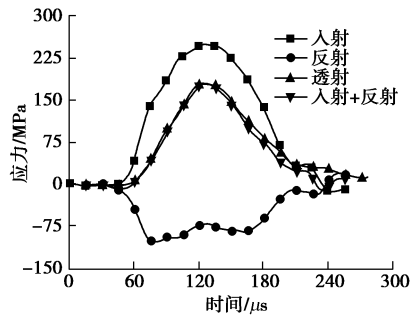


图3 试样应力平衡检验

Fig. 3 Stress equilibrium validation of sample

图4为不同温度（20℃，100℃，200℃）与不同冲击载荷耦合下的动态应力-应变曲线。可见在冲击荷载下，应力-应变曲线压密段很小，很快进入弹性段和微裂纹产生与扩展段，接着在较小的峰值应变下应力达到峰值，随后迅速进入破坏阶段，最终丧失承载力。3个温度下应力-应变曲线形态基本一致，冲击载

荷增大使试样峰值应变和峰值应力明显增大的现象在3个温度下均可以观察到，如温度为200℃时，当入射波峰值应力 σ_p 由180 MPa提升到250 MPa时，试样的应力-应变曲线峰值应力由141.1 MPa提升到184.2 MPa，峰值应变由0.0064增大到0.0095。

由图4还可知，相同冲击应力下，当温度由20℃升高至200℃时，试样峰值应力和弹性模量（应力-应变曲线上升段对应峰值应力为40%和60%的两点连线的斜率）均呈现出先降低后升高的趋势，如 σ_p 为250 MPa时，20℃，100℃，200℃下试样应力-应变曲线峰值应力分别为199.6，175.3，184.2 MPa，20℃，100℃，200℃下试样平均弹性模量分别为28.4，18.6，22.3 GPa。这是因为由20℃升温至100℃过程中，岩样内部吸附水和自由水分逸出，孔洞裂隙里面气体膨胀，导致裂纹增多，降低了岩石内部颗粒间黏聚力，故强度和弹性模量相比20℃时降低明显。在200℃附近时，由于岩样内部结合水丧失，矿物颗粒自身受热膨胀使得部分微缺陷闭合，故宏观上表现为承载和抗变形能力相比100℃时有明显的提高。

在冲击荷载下，试样破坏过程非常短暂，一般只有几百至几千微秒，故本试验中采用高速摄影仪对试样破坏过程进行拍照记录，室温下冲击载荷峰值为205 MPa时岩石动态破坏过程高速摄像如图5所示。在 $t = 130 \mu s$ 时第一条裂纹出现（图5（b））， $t = 150 \mu s$ 时裂纹轴向到达试样两端（图5（c）），耗时20 μs 左右；在 $t = 190 \mu s$ 时，原有裂纹的上部和下部分别出现了一条裂纹（图5（d））， $t = 270 \mu s$ 时这两条裂纹均到达试样两端（图5（e）），耗时约80 μs ；之后这3条裂纹进一步张开与加宽（图5（f）），从而形成宏观的主控裂缝，岩石承载能力快速下降，进入应变软化阶段，直到完全破坏。虽然裂纹产生有一定随机性，但是大多数裂纹是与冲击加载方向平行，这充分表明由冲击应力形成的裂纹与原生岩石裂纹存在明显的区别。

2 实温下花岗岩力学特性数值模拟

2.1 数值模型建立

建模中试样和压杆选用Solid164单元进行网格划

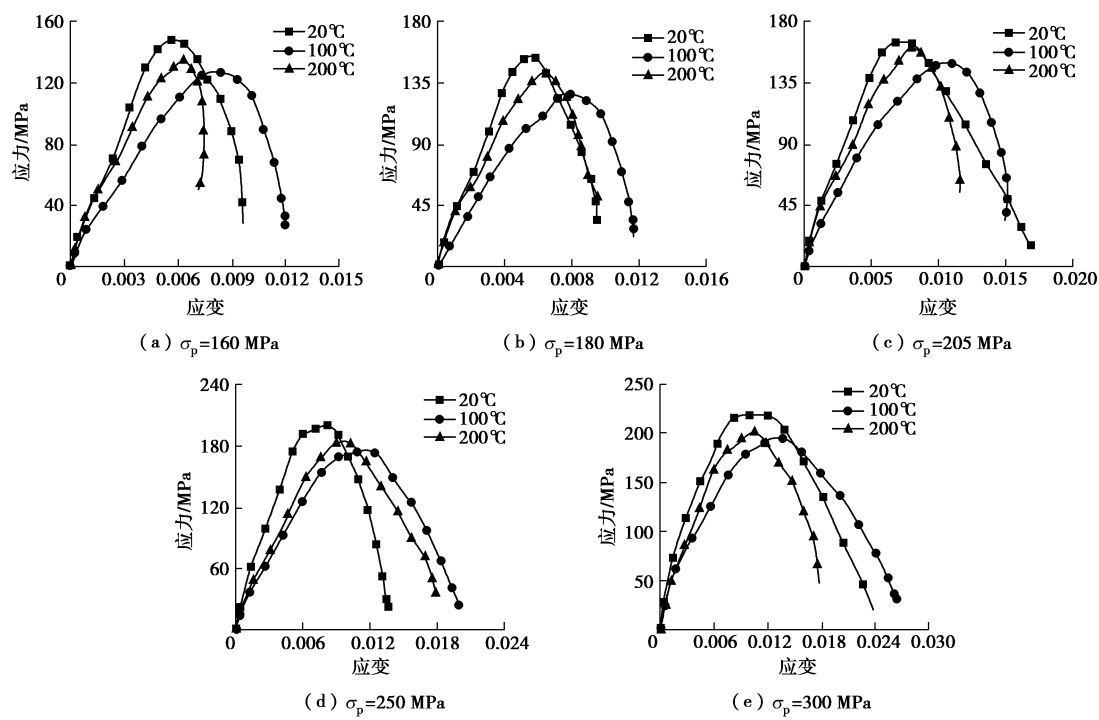


图 4 不同温度下花岗岩动态应力 - 应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of samples under different temperatures

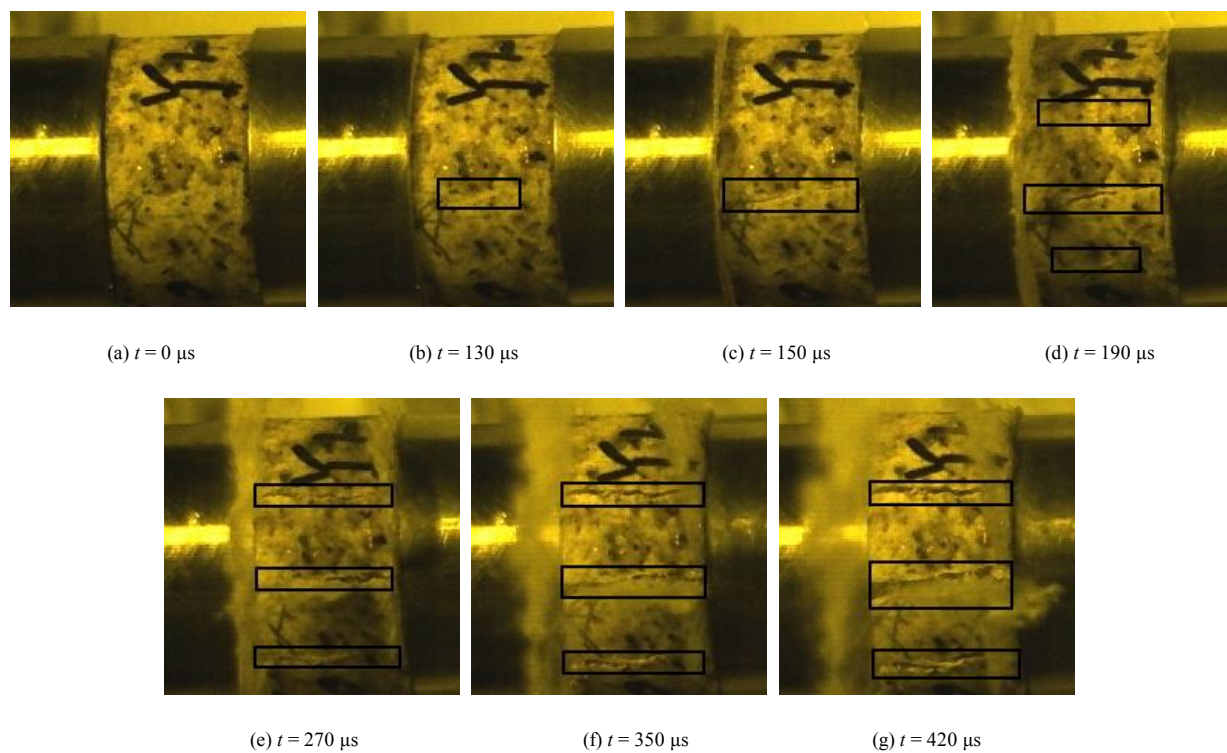


图 5 岩石动态破坏过程高速摄影图 (20°C, $\sigma_p = 205$ MPa)
Fig. 5 High-speed photos of sample during failure process (20°C, $\sigma_p = 205$ MPa)

分, 为了节省计算时间, 在入射杆端直接施加半正弦波, 不再对子弹进行建模。压杆径向划分为36份, 入射杆和透射杆轴向分别划分240份和150份。试样采用精细网格, 径向划分为50份, 轴向划分为24份(图6), 压杆与试样间采用侵蚀面接触, 忽略试样和压杆间的摩擦力。压杆采用线弹性模型, 花岗岩试样采用HJC模型。由于有限元本身是基于连续介质力学的, 而在连续介质力学中, 所研究的物体是连续介质, 即物质

域在空间中连续。在这样的理论假设框架下,单元本身不会消失。然而,在实际情况下,由于损伤断裂的存在,势必会使得一些单元消失或者完全失效,所以为了能够模拟这种情况,研究人员将HJC模型与其它失效准则结合^[19, 23-24],以模拟岩石类材料在外荷载下的力学行为与破坏过程,岩样单元中一部分单元失效,另一部分未失效,这些未失效的部分被孤立就形成了宏观破碎。

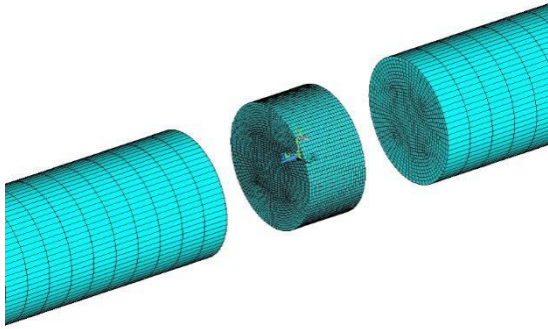


图6 网格划分局部图

Fig. 6 Partial view of meshing

温度对于花岗岩力学特性有不可逆的改变,模拟100℃和200℃下花岗岩SHPB试验时必须考虑温度的影响,本文借助“隐式-显式顺序求解”模拟实时温度下花岗岩的冲击破坏过程。众所周知,ANSYS隐式方法能高效的求解静载问题,而求解瞬态问题则需要借助显式方法,“隐式-显式顺序求解”实质上就是隐式求解的结果被写入ASCII的drelax文件中,接着ANSYS/LS-DYNA读入这些变形,并且对描述的几何模型进行初始化,之后再进行瞬态求解。具体计算过程概括如下:①取常温下花岗岩的线热膨胀系数为 $8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[25],首先对试样施加温度荷载(图7),求解分析隐式部分(热荷载);②改变当前文件名,防止显式求解的结果覆盖隐式求解结果;③将隐式单元改为相应的显式单元;④更新单元关键选项,如材料属性等;⑤去除施加在隐式分析上的多余约束;⑥将隐式求解中得到的节点位移写入drelax文件;⑦通过drelax文件,为显式求解进行几何模型的初始化;⑧为

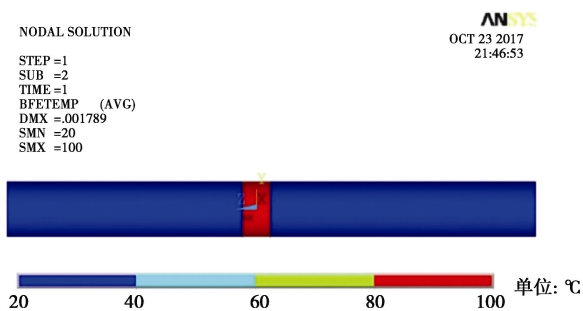


图7 试样附近温度场

Fig. 7 Temperature fields near sample

显式求解施加冲击荷载和接触条件;⑨求解该分析的显示部分(冲击荷载)。

2.2 花岗岩 HJC 模型参数确定

HJC 模型包括强度模型、损伤模型和状态方程三部分^[16],在模拟岩石类材料冲击分析中得到广泛应用,但涉及参数较多(共21个),目前常用的确定方法有:①对岩石进行物理试验、拉压试验测定相关参数;②参考HJC原始参数,并结合工程经验确定;③对敏感度较大的参数进行不断试算,使问题计算结果与实测结果吻合,在试算中确定参数^[21, 26]。上述第一种方法实现起来比较繁琐需要大量实验,下文将方法一和方法三结合起来使用。

(1) 基本力学参数

花岗岩的单轴抗压强度 f_c 、剪切模量 G 、体积模量 K 和抗拉强度 T 可根据应变率为 10^{-4} s^{-1} 时的单轴压缩试验和巴西劈裂试验得到,分别为138 MPa, 12.5 GPa, 19.9 GPa和3.1 MPa。称重计算得其密度 $\rho_0 = 2.62 \text{ g/cm}^3$ 。

(2) 极限面参数与率效应参数

根据弹塑性理论可知,在不考虑损伤和率效应时,HJC模型与莫尔-库仑模型在压缩子午面上都通过纯剪切和单轴压缩等特征点,据此得到参数 A 、黏聚力 c 以及单轴抗压强度三者之间的关系式^[23]:

$$A = c / f_c \quad (1)$$

应变率 10^{-4} s^{-1} 时第一主应力和围压的关系如图8(a)所示,采用莫尔-库仑准则拟合试验结果得到第一主应力和围压间关系:

$$\sigma_1 = 3.8\sigma_3 + 191.4 \quad (2)$$

已知莫尔-库仑准则:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} + \frac{2c \cos \theta}{1 - \sin \theta} \quad (3)$$

式中, θ 为内摩擦角。联立式(1)~(3)可得参数 $A = 0.36$ 。

不考虑损伤和率效应时,HJC模型强度表达式为

$$\sigma^* = 0.36 + BP^{*N} \quad (4)$$

式中 σ^* 是无量纲化强度,为等效应力与单轴抗压强度的比值; P^* 是无量纲化静水压力,为静水压力与单轴抗压强度的比值。

图8(b)为 σ 与 P 的关系,可知 $B=1.84$ 和 $N=0.79$ 。参照文献[20], S_{\max} 可取为15。HJC模型认为强度 σ^* 的变化是由应变率与静水压力共同造成的,为了得到 σ^* 与应变率的关系,首先要排除静水压力的影响,之后再对数据拟合方可得到率效应系数 C ^[16]。表2为不同应变率下的无量纲等效强度,计算后得到 $C=0.0014$ 。

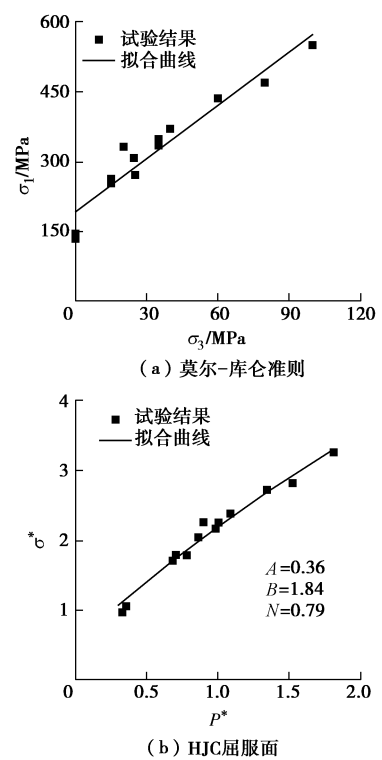


图 8 HJC 模型强度参数拟合

Fig. 8 Fitting of HJC model strength parameters

表 2 不同应变率下的无量纲等效强度

Table 2 Equivalent strengths at different strain rates		
应变率/s ⁻¹	10 ⁻⁴	100.9
等效强度	1.0	1.44

(3) 压力参数

压溃点的体应变 μ_{crush} 可由 $\mu_{crush}=P_{crush}/K$ 计算得到, P_{crush} 为与 μ_{crush} 对应的单元内静水压力, $P_{crush}=f_c/3$; μ_{lock} 为压实点的体应变, 可通过 $\mu_{lock}=\rho_g/\rho_0-1$ 求出, 其中 ρ_g 为压实密度, 按照文献[20]中花岗岩压实密度取值, 即 2.7 g/cm^3 , 则 $\mu_{lock}=0.031$ 。 K_1 , K_2 和 K_3 可以通过拟合压缩实验或经验 Hugoniot 曲线获得[20], 经验型的 Hugoniot 曲线表达式为

$$P=\frac{C_1^2\rho_0\mu(\mu+1)}{[(1-S)\mu+1]^2},\tag{5}$$

式中, C_1 , S 为经验常数, 对于花岗岩, $C_1=2100\text{ m/s}$, $S=1.63$ [27]。 利用MATLAB拟合可得, $P_{lock}=1.49\text{ GPa}$ 、 $K_1=20.2\text{ GPa}$ 、 $K_2=2.62\text{ GPa}$ 和 $K_3=85.44\text{ GPa}$ 。

(4) 损伤参数

EFMIN和参数 D_2 对数值模拟结果影响很小, 按照文献[20]分别暂取为0.01和1。 当满足等效断裂应变时, $P^*=1/6$, 由于压力较低, 故令 $\mu_p^f=0$, 由参数 $D_1=EFMIN/(P^*+T^*)^{D_2}$ 可求得其值为0.053。

因缺乏 100 和 200℃ 下试样的三轴压缩试验数据, 相应参数 A , B 和 N 无法直接求得。 因此, 在常温基础上考虑参数 A , B 和 N 对应力-应变曲线的具体影

响, 运用非线性有限元分析软件对 SHPB 试验进行反复模拟试算, 使计算结果与实测数据达到高度的吻合[21], 即“试算-逼近”法。 其余参数获取方法和常温下相应参数取值方法类似, 最后可得到不同温度下花岗岩 HJC 参数。

文献[21, 26, 28]研究表明 HJC 模型各参数对计算结果影响存在较大差异。 由于花岗岩的密度和压实点的体应变在所讨论的 300℃ 以内变化很小, 可忽略不计, 且限于篇幅, 表 3 仅列出 8 个敏感度较大的参数。

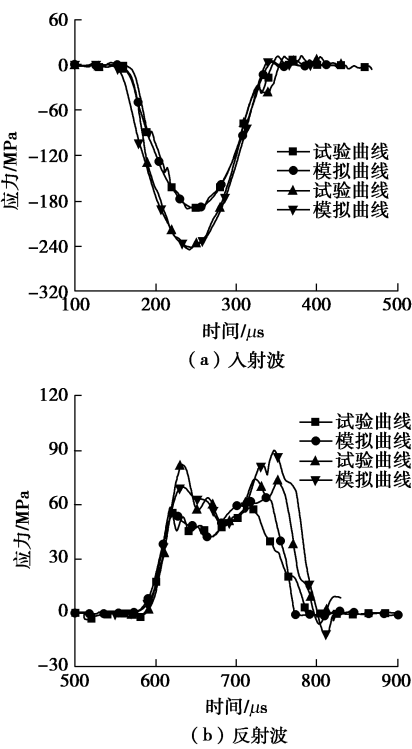
表 3 花岗岩 HJC 模型主要参数

Table 3 Main parameters of granite HJC model

$T_{emp}/^{\circ}\text{C}$	f_c/MPa	A	B	G/GPa	P_{crush}	μ_{crush}	P_{lock}	N
20	138.0	0.36	1.84	12.5	46.0	0.0023	1.49	0.79
100	95.3	0.45	1.87	7.7	31.8	0.0026	1.53	0.80
200	107.8	0.57	1.97	8.6	35.9	0.0026	1.74	0.70

2.3 数值模拟结果及分析

图9为常温时不同冲击载荷下试验与数值模拟所得入射波、反射波和透射波时程曲线对比图。 图10为入射应力峰值为180 MPa不同温度下试验应力-应变曲线与模拟所得曲线对比图。 由图9 (a) 可知, 试验所得入射波与模拟所得入射波基本一致。 对于反射波和透射波的前半段, 数值模拟结果与试验结果吻合度很好, 而对它们的后半段, 数值模拟所得波形曲线与试验所得稍有出入, 见图9 (b) 和图9 (c) 所示。



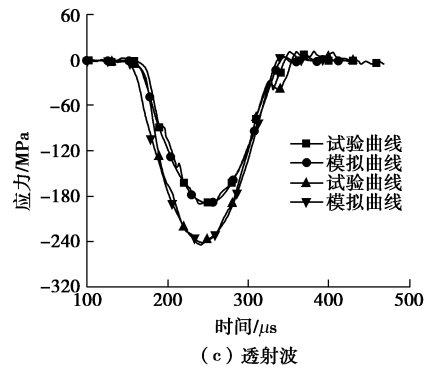


图9 试验与模拟波形曲线对比

Fig. 9 Comparison between test and simulation curves

从图10中应力-应变曲线的阶段特征来看, 峰值强度之前, 各应力-应变曲线与试验得到的曲线吻合很好, 说明HJC模型能较好地反映花岗岩破坏前的应力-应变行为; 峰值强度之后, 模拟得到的应力-应变曲线和试验结果相比有一定差距。事实上, 花岗岩是由性质各异的矿物颗粒(石英、长石和云母等)组成, 加上天然微缺陷(孔洞、裂纹)的存在, 使得测试岩样本具有较强各向异性与非均质性, 而在数值模拟时岩石被假设为均质各向同性材料, 因此数值模拟得到的应力-应变曲线形态与试验很难做到完全符

合。整体而言, 本部分采用HJC模型及基于“试算-逼近”法确定的系列参数, 对花岗岩动态应力-应变行为的表征效果较好。

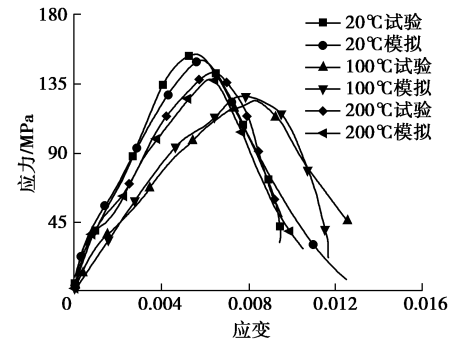
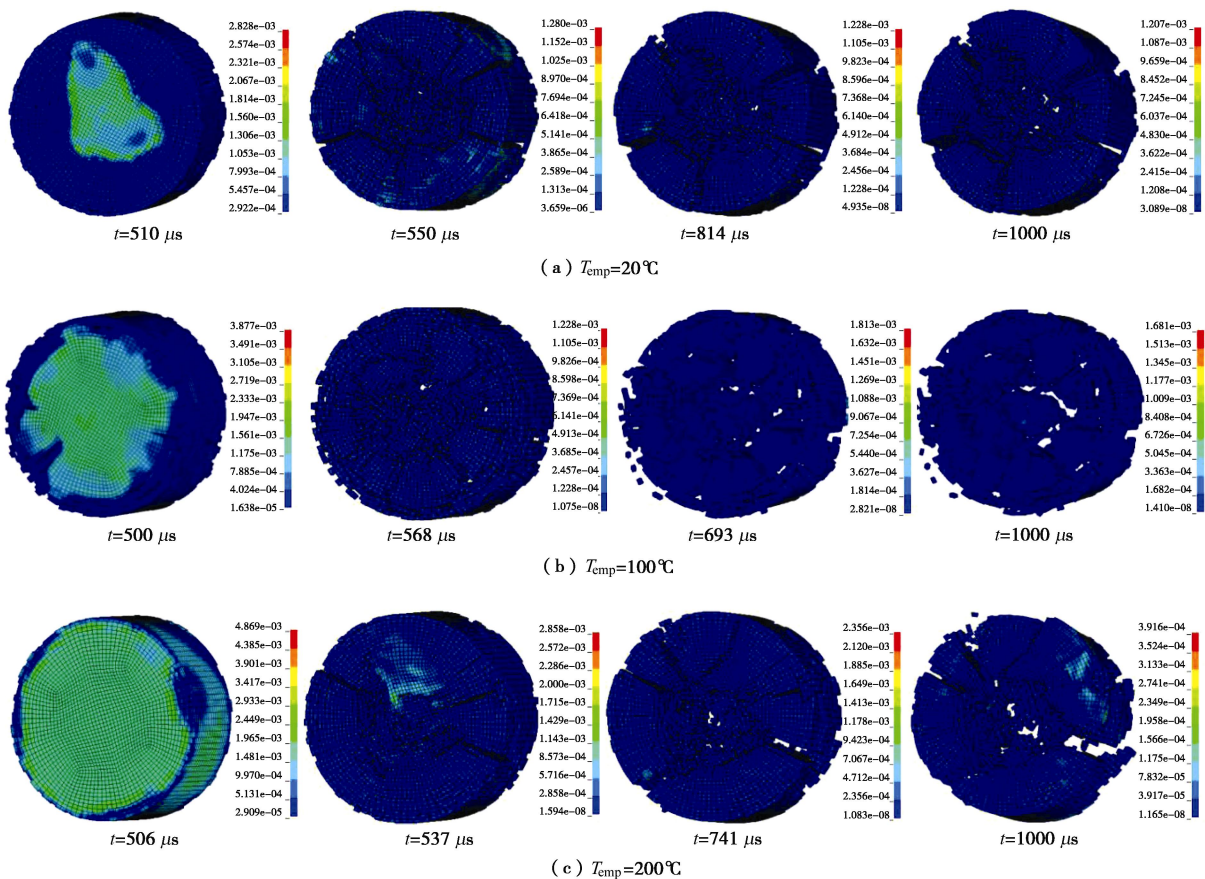
图10 试验与模拟应力-应变曲线对比 ($\sigma_p = 180$ MPa)Fig. 10 Comparison between test and simulated stress-strain curves ($\sigma_p = 180$ MPa)

图11为冲击载荷峰值应力 $\sigma_p = 180$ MPa时试样在不同温度作用下的破坏过程, 同时也是应力波在试件内部传播时的压力云图, 蓝色代表压力水平低, 红色代表压力水平高。岩石单元一旦满足失效准则就会被删除, 加载过程中有些岩石单元会失效, 有些未失效, 这些未失效的部分就会被孤立进而形成裂缝和碎块。应力波在400 μs左右到达试样前端, $t = 510$ μs

图11 不同温度作用下岩石动态破坏过程 ($\sigma_p = 180$ MPa)Fig. 11 Dynamic failure process of samples under different temperatures ($\sigma_p = 180$ MPa)

左右试样侧面开始出现裂纹, 之后裂纹开始向试样中间和两端扩展延伸, 最后贯通使试样破坏成几块, 试样的破坏形式为沿轴向的劈裂破坏 (即大多数裂纹是与冲击加载方向平行的)。另外, 100℃下岩石试样的破碎程度明显要大于 20℃和 200℃下的破碎程度, 原因同前所述。

为了验证数值模拟结果, 图 12, 13 给出了 σ_p 分别为 180 MPa 和 250 MPa 时的试验和模拟结果对比图。由于两种冲击载荷均较大, 均高于岩样常温下的单轴抗压强度平均值 (138 MPa), 故花岗岩试样发生了较大程度甚至严重的破坏。如 $\sigma_p = 180$ MPa 时, 3 个温度下的试样均破裂成数块; 当 σ_p 增加到 250 MPa 时, 试样破碎块数显著增加, 数值模拟结果中有大量单元因为满足失效条件被删除掉, 整体上数值模拟结果与实际观测结果较相似。

对比图 12, 13 还可看出, 100℃时岩样的破碎程度最大, 200℃下岩样次之, 其原因见前面针对图 4 现象所作的解释, 即不同温度下岩样内部不同状态的水分逸出及岩石矿物颗粒受热膨胀所致。

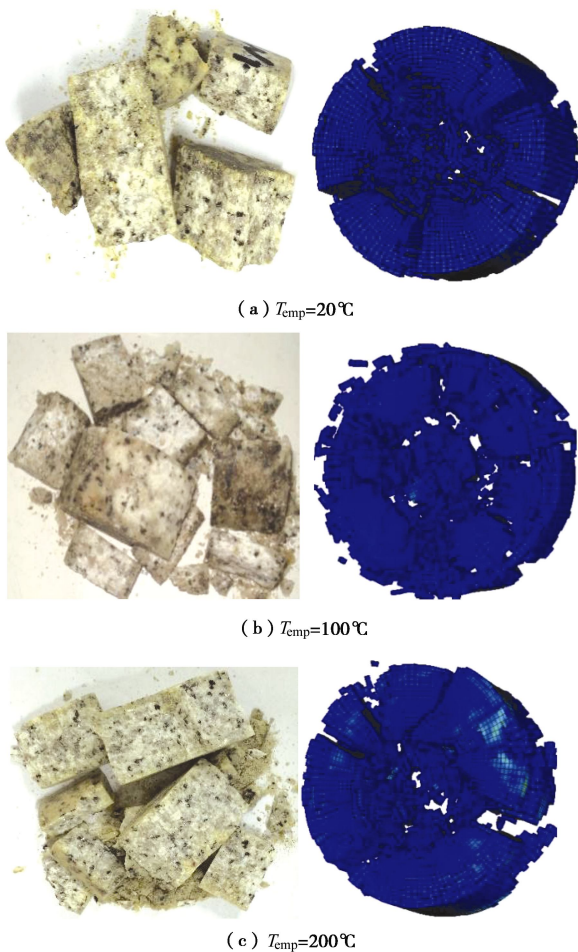


图 12 数值模拟与试验破坏模式对比图 ($\sigma_p = 180$ MPa)

Fig. 12 Comparison between simulation and experimental failure modes ($\sigma_p = 180$ MPa)

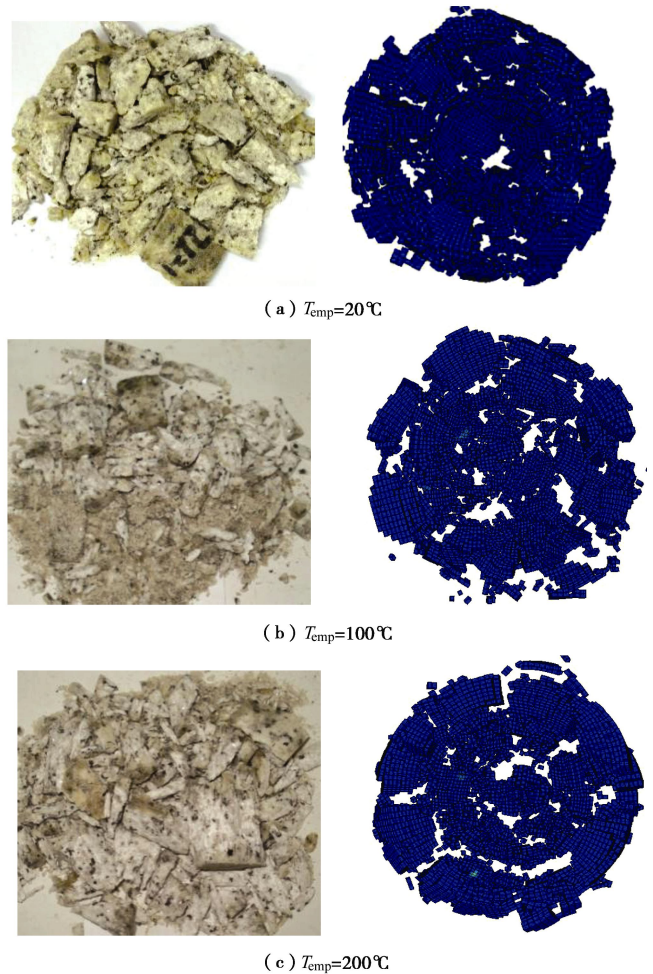


图 13 数值模拟与试验破坏模式对比图 ($\sigma_p = 250$ MPa)

Fig. 13 Comparison between simulated and experimental failure modes ($\sigma_p = 250$ MPa)

3 结 论

本文采用SHPB对热处理花岗岩进行了冲击压缩试验, 并利用ANSYS/LS-DYNA软件和耦合失效准则的HJC本构, 数值探析了实时温度与动态荷载耦合作用下岩石力学特性与破坏过程, 得到主要结论如下:

(1) 相同温度下, 加载速率增加使岩石峰值强度和峰值应变增加; 相同冲击载荷下, 20℃下岩石峰值强度和弹性模量最大, 100℃下岩石峰值强度和弹性模量最小, 且100℃处理的岩样, 经受同样荷载后, 其破碎程度明显大于20℃和200℃。

(2) 实时温度下花岗岩试样中的裂纹数目及其破坏程度均随加载速率的增加而不断增大。在低加载率下, 岩样侧面裂纹首先萌生, 之后裂纹向两端和内部扩展; 随着加载率的提高, 试样内部裂纹在加载初期也可以被激活和快速发展。

(3) 数值结果显示所提出的“试算-逼近”法确定不同温度下岩石HJC模型参数是可行的, 岩石材料

在冲击荷载下的动力响应能准确地被表征。此外, HJC模型与添加的失效准则相结合, 可很好地模拟岩石的损伤过程及破坏形态。

参考文献:

- [1] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (LI Xi-bing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [2] TIAN H, KEMPKA T, YU S, et al. Mechanical properties of sandstones exposed to high temperature[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2016, **49**(1): 321 - 327.
- [3] ZHOU S W, XIA C C, HU Y S, et al. Damage modeling of basaltic rock subjected to cyclic temperature and uniaxial stress[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, **77**: 163 - 173.
- [4] PENG J, RONG G, CAI M, et al. Comparison of mechanical properties of undamaged and thermal-damaged coarse marbles under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, **83**(4): 135 - 139.
- [5] 刘 石, 许金余, 支乐鹏, 等. 高温后大理岩的冲击力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 273 - 280. (LIU Shi, XU Jin-yu, ZHI Le-peng, et al. Experimental research on mechanical behavior of material after high temperatures subjected to impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2013, **32**(2): 273 - 280. (in Chinese))
- [6] YIN T B, SHU R H, LI X B, et al. Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, **26**(7): 1926 - 1937.
- [7] 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等. 实时高温下加载速率对花岗岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(8): 2184 - 2192. (XU Xiao-li, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen, et al. Experimental study of the effect of loading rates on mechanical properties of granite at real-time high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(8): 2184 - 2192. (in Chinese))
- [8] 平 琦, 骆轩, 马芹永, 等. 冲击载荷作用下砂岩试件破碎能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(增刊 2): 4197 - 4203. (PING Qi, LUO Xuan, MA Qin-Yong, et al. Broken energy dissipation characteristics of sandstone specimen under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S2): 4197 - 4203. (in Chinese))
- [9] HOKKA M, BLACK J, TKALICH D, et al. Effects of strain rate and confining pressure on the compressive behavior of Kuru granite[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, **91**: 183 - 193.
- [10] 尤业超, 李二兵, 谭跃虎, 等. 基于能量耗散原理的盐岩动力特性及破坏特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(4): 843 - 851. (YOU Ye-chao, LI Er-bing, TAN Yue-hu, et al. Analysis on dynamic properties and failure characteristics of salt rock based on energy dissipation principle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2017, **36**(4): 843 - 851. (in Chinese))
- [11] 朱晶晶, 李夕兵, 宫凤强, 等. 单轴循环冲击下岩石的动力学特性及其损伤模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 531 - 539. (ZHU Jing-jing, LI Xi-bing, Gong Feng-qiang, et al. Dynamic characteristics and damage model for rock under uniaxial cyclic impact compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 531 - 539. (in Chinese))
- [12] ZHANG Q B, ZHAO J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, **60**(8): 423 - 439.
- [13] 黄明利, 唐春安. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(4): 468 - 468. (HUANG Ming-li, TANG Chun-an. Numerical simulation on failure process of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(4): 468 - 468. (in Chinese))
- [14] 赵 坚, 陈寿根, 蔡军刚, 等. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报, 2002, **31**(2): 111 - 115. (ZHAO Jian, CHEN Shou-gen, CAI Jun-gang, et al. Simulation of blast wave propagation in jointed rock mass using UDEC[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, **31**(2): 111 - 115. (in Chinese))
- [15] 肖 明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(4): 421 - 425. (XIAO Ming. Three-dimensional numerical model of construction process for underground opening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(4): 421 - 425. (in Chinese))
- [16] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rates, and high pressure[C]// 14th International Symposium on Ballistic. Quebec City, 1993: 591 - 600.
- [17] 巫绪涛, 孙善飞, 李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土

- SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, **29**(2): 137 - 142. (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. (in Chinese))
- [18] 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. (LI Cheng-wu, WANG Jin-gui, XIE Bei-jing, et al. Numerical simulation of SHPB tests for coal by using HJC model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, **33**(1): 158 - 164. (in Chinese))
- [19] 王 政, 楼建锋, 勇 珩, 等. 岩石、混凝土和土抗侵彻能力数值计算与分析[J]. 高压物理学报, 2010, **24**(3): 175 - 180. (WANG Zheng, LOU Jian-feng, YONG Heng, et al. Numerical computation and analysis on anti-penetration capability of rock, concrete and soil[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, **24**(3): 175 - 180. (in Chinese))
- [20] 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. (FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014, **31**(3): 197 - 204. (in Chinese))
- [21] 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. (WEN Lei, LI Xi-bing, WU Qiu-hong, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook model for granite porphyry[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, **33**(5): 725 - 731. (in Chinese))
- [22] 赵光明, 马文伟, 孟祥瑞. 动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性[J]. 岩土力学, 2015, **36**(12): 3598 - 3605. (ZHAO Guang-ming, MA Wen-wei, MENG Xiang-rui. Damage modes and energy characteristics of rock-like materials under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(12): 3598 - 3605. (in Chinese))
- [23] 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**(6): 746 - 751. (XIONG Yi-Bo, HU Yong-le, XU Jin, et al. Determining failure surface parameters of the Johnson-Holmquist concrete constitutive model[J]. Acta Armamentarii, 2010, **31**(6): 746 - 751. (in Chinese))
- [24] 余道兴, 宗周红, 李明鸿, 等. 基于不同材料模型的混凝土 SHPB 试验数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, **47**(1): 124 - 129. (YU Dao-xing, ZONG Zhou-hong, LI Ming-hong, et al. Numerical simulation of concrete SHPB test based on different material models[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition) 2017, **47**(1): 124 - 129. (in Chinese))
- [25] 刘学伟, 刘泉声, 卢超波, 等. 温度-应力耦合作用下岩体裂隙扩展的数值流形方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1432 - 1441. (LIU Xue-wei, LIU Quan-sheng, LU Chao-bo, et al. A numerical manifold method for propagation of rock mass considering thermal-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014, **33**(7): 1432 - 1441. (in Chinese))
- [26] 吴 赛, 赵均海, 王 娟, 等. 基于砼 SHPB 试验数值分析的 HJC 模型参数研究[J]. 计算力学学报, 2015, **32**(6): 789 - 795. (WU Sai, ZHAO Jun-hai, WANG Juan, et al. Study on parameters of HJC constitutive model based on numerical simulation of concrete SHPB test[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, **32**(6): 789 - 795. (in Chinese))
- [27] 叶序双. 爆炸力学基础[M]. 南京: 工程兵工程学院, 2004. (YE Xu-shuang. Basis of dynamic explosion[M]. Nanjing: Engineering Institute of Engineering Corps, 2004. (in Chinese))
- [28] 王志亮, 毕程程, 李鸿儒. 混凝土爆破损伤的 SPH-FEM 耦合模拟[J]. 爆炸与冲击, 2018, **38**(6): 1419 - 1428. (WANG Zhi-liang, BI Cheng-cheng, LI Hong-ru. Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, **38**(6): 1419 - 1428. (in Chinese))