

文章编号: 1000-4750(2012)01-0055-09

# 围压下岩石的冲击力学行为及动态统计损伤本构模型研究

刘军忠<sup>1,2</sup>, 许金余<sup>1,2</sup>, 吕晓聪<sup>3</sup>, 王泽东<sup>1,4</sup>, 张磊<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学工程学院机场建筑工程系, 西安 710038; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072;

3. 北京军区空军后勤部机场营房处, 北京 100005; 4. 九三五—四部队, 天津 300202)

**摘 要:** 采用改进后具有主动围压加载装置的 $\phi 100\text{mm}$  分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)试验装置, 研究了斜长角闪岩在不同围压等级(0MPa~6MPa)和不同应变率( $50\text{s}^{-1}\sim 170\text{s}^{-1}$ )下的冲击压缩力学性能。试验结果表明: 在相同围压下, 斜长角闪岩的动态抗压强度随应变率的增加而近似线性增加, 动态增长因子与应变率的对数呈近似线性关系, 体现了显著的应变率相关性; 在同等级应变率范围内, 随着围压的增加, 岩石的增强效果逐渐增强, 显现出较强的围压效应。采用组合建模的方法, 将统计损伤模型和粘弹性模型相结合, 建立了基于 Weibull 分布的动态损伤本构模型。验证发现, 修正后的模型曲线和试验曲线吻合较好, 表明所构建本构模型是合理的, 可为进一步研究和工程应用提供一定的参考。

**关键词:** 岩石力学; 冲击力学性能;  $\phi 100\text{mm}$  SHPB 试验装置; 斜长角闪岩; 主动围压; 本构模型

**中图分类号:** O347; TU458 **文献标志码:** A

## STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR AND DAMAGE CONSTITUTIVE MODEL OF ROCK UNDER IMPACT LOADING WITH CONFINING PRESSURE

LIU Jun-zhong<sup>1</sup>, XU Jin-yu<sup>1,2</sup>, LÜ Xiao-cong<sup>3</sup>, WANG Ze-dong<sup>1,4</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Engineering College, Xi'an 710038, China;

2. School of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China;

3. Airport and Barracks office, Air Force Logistics Ministry of Beijing Military Region, Beijing 100005, China; 4. PLA Unit 93514, Tianjin 300202, China)

**Abstract:** In order to test the impact mechanical properties of rock, the amphibolites are subjected to impact loads with different confining pressures (0MPa-6MPa) and strain rates ( $50\text{s}^{-1}\sim 170\text{s}^{-1}$ ) by using the improved SHPB of 100mm diameter. The SHPB has confining pressure device. Experimental results show that under the same confining pressure, the dynamic compressive strength of amphibolites are strain-rate dependent, and the strain-rate effect can be expressed by linear approximations, so the relationship between the dynamic increase factor and the logarithm of strain-rate is approximately linear. The strengthening effect gets more prominent with the increase of confining pressure at the same range of strain rates. The damage constitutive model of rock under dynamical load based on weibull distribution is established through combining statistic damage model and visco-elastic model. It is found that the theoretical curves and experimental curves are in good agreement, indicating the constitutive model is reliable. It can offer reference for further research on rock mechanical

收稿日期: 2010-04-19; 修改日期: 2010-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078350); 陕西省自然科学基金项目(SJ08E210)

通讯作者: 刘军忠(1983—), 男, 广东梅州人, 博士生, 主要从事防护工程研究(E-mail: liujunzhong.ok@163.com).

作者简介: 许金余(1963—), 男, 吉林靖宇人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构工程、防护工程研究(E-mail: jyx369@yeah.net);

吕晓聪(1982—), 男, 山西交城人, 博士生, 主要从事结构工程、防护工程研究(E-mail: nuc6140@163.com);

王泽东(1986—), 男, 山西运城人, 硕士生, 主要从事防护工程研究(E-mail: liujz2100@126.com);

张磊(1982—), 男, 山西大同人, 硕士生, 主要从事防护工程研究(E-mail: liujz2100@126.com).

properties and engineering application in underground engineering.

**Key words:** rock mechanics; impact mechanical properties; 100-mm-diameter SHPB apparatus; amphibolites; confining pressure; constitutive model

在自然界及现实的岩体工程中,有相当一部分岩石在承受动荷载作用之前,往往已经处于一定的静应力或地应力状态之中。在地下岩体工程中,地应力是不可忽略的,大量的爆破工程实践以及理论研究也表明,初始地应力对地冲击传播、岩体破坏和爆破效果有重要的影响<sup>[1]</sup>。

岩石类材料冲击力学特性的研究是岩石力学较为基础的研究分支,当前对岩石动态特性研究,主要采取分离式 Hopkinson 杆和轻气炮装置,得到单轴条件下的岩石本构特征及破坏特性,但考虑围压条件下岩石类材料的动态力学特性的研究较少见诸报道。在三轴 SHPB 试验研究方面,Christensen 等<sup>[2]</sup>,Lindholm 等<sup>[3]</sup>先后设计了用于三轴 SHPB 的实验装置,但是并未得到大的发展。于亚伦<sup>[4]</sup>采用设计的三轴 SHPB 实验装置对岩石的动载特性、破坏机理及微观损伤机理进行了研究,并建立相应的本构关系,研究发现石英磁铁矿和混合花岗岩的破坏强度随着围压的增加呈线性增大的趋势,在一定围压下,随着应变率的增加,破坏强度呈平行上升趋势。李海波等<sup>[5]</sup>研究了含有裂纹的花岗岩在应变率范围为  $10^{-4}\text{s}^{-1}\sim 10^0\text{s}^{-1}$ ,围压为 20MPa~170MPa 的力学性能,结果表明花岗岩的抗压强度随围压的增加而增大,且在不同的应变率下具有相同的趋势。近年来,林大能等<sup>[6]</sup>对岩石侧向施加围压,轴向施加循环冲击荷载,采用超声波波速变化量描述试件的损伤度,试验结果表明围压的存在提高了岩石抗冲击破坏的能力。

岩石等脆性材料本构模型的研究一直是岩石力学研究的重点之一,其本构模型的发展与力学性能实验的发展紧密相联。目前对于大多数岩石力学问题,通常采用静态本构模型,静态单轴应力状态脆性材料本构模型的研究已经成熟,且可以较为准确地通过实验验证<sup>[7]</sup>。然而,岩石等脆性材料在动态荷载作用下本构模型的研究则要复杂得多。岩石动态本构模型是研究岩石中爆炸和破坏机理、应力波传播和衰减规律、地下结构的破坏效应分析等必不可少的资料<sup>[1]</sup>。在实际工程中,由工程爆破、武器攻击以及地震等形成的动荷载与静态荷载更存在本质差别,此时若仍采用静态本构模型来研究岩石的动态特性,显然是不合适的。近年来,出现的多种岩石类材料动态本构模型,大多基于近似理论

的推导,参数众多、公式复杂,且往往与实验结果吻合不好,难以应用于实际工程中。

鉴于此,本文在已有研究成果的基础上,通过改进与创新,利用改进后的 SHPB 试验装置对岩石试件进行主动围压条件下的冲击加载试验。通过在围压和冲击动荷载的共同作用下的组合加载试验,对岩石试件在不同围压下受动力扰动作用时的力学响应规律及本构关系进行了研究。

## 1 岩石三轴 SHPB 试验

### 1.1 试件的制作

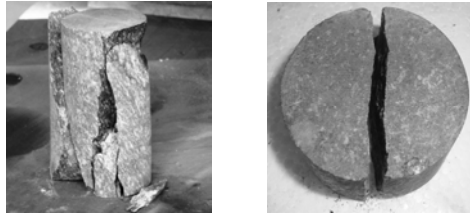
本文试验所用的斜长角闪岩颜色灰绿,为基性变质岩,主要由角闪岩和斜长石两大矿物组成,经国土资源部西安矿产资源监督检测中心鉴定,斜长角闪岩的矿物成分组成为:角闪石 45%~65%,斜长石 18%~28%,绿泥石 5%~18%,石英 6%~12%,绢云母 2%~7%,其他矿物成分 1%~3%。

在 SHPB 试验中,弹性波在细长杆中传播时,由于横向惯性效应,波会产生弥散。研究发现,在 SHPB 试验中,选取合适的试件尺寸比能够有效地减小惯性效应对试验结果的影响<sup>[8]</sup>。本文对岩石三轴 SHPB 试验所采用试样的尺寸比进行设计,制作成直径为 97.5mm,厚度为 43.0mm 的圆柱体(如图 1)。试样经 ZS-100 型立式取芯机进行钻芯取样,DQ-1 型岩石切割机切割,SHM-200 型双端面磨石机端面打磨等专门的岩石加工工序精加工。在进行岩石三轴 SHPB 试验前,首先进行室内静力试验(如图 2)。试验表明,该岩石试样单轴抗压强度为 140.2MPa,劈裂抗拉强度为 13.6MPa,弹性模量为 22.9GPa,软化系数为 0.92。



图 1 斜长角闪岩试样

Fig.1 Specimens of amphibolite



(a) 单轴抗压破坏形态 (b) 劈裂抗拉破坏形态

图 2 岩石试样的破坏形态

Fig.2 Failure patterns of specimens

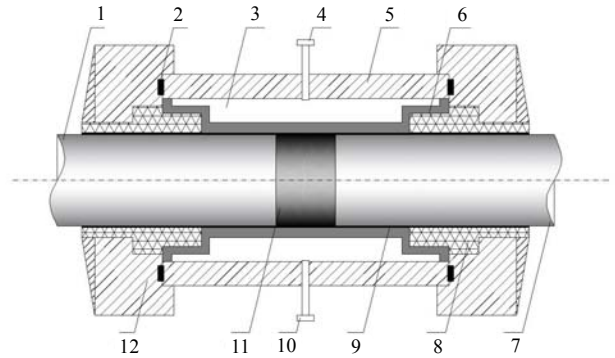
1.2 试验装置与试验方法

本文所采用的具主动围压的 $\phi 100\text{mm}$  SHPB 试验装置,如图 3 所示,主要由主体设备、能源系统、测试系统 3 大部分组成。其中,主体设备包括:发射装置、射弹、吸能装置、主动围压加载装置(见图 4)、杆件及其调整支架、操纵台等;能源系统包括:空气压缩机、液压系统、高压容器及管道;测试系统包括:弹速测试系统及动态应变测试系统。SHPB 杆直径为  $100\text{mm}$ ,入射杆长  $4.5\text{m}$ ,透射杆长  $2.5\text{m}$ ,其弹性模量  $210\text{GPa}$ ,泊松比  $0.25\sim 0.30$ ,密度  $7850\text{kg/m}^3$ 。



图 3  $\phi 100\text{mm}$  SHPB 试验装置

Fig.3 Apparatus of  $\phi 100\text{mm}$  diameter SHPB



(1-入射杆; 2-密封圈; 3-液压油室; 4-排气孔; 5-油缸; 6-隔油橡胶套; 7-透射杆; 8-钢圈; 9-聚酯膜; 10-进油口/压力表接口; 11-岩石试件; 12-钢壳体)

图 4 主动围压加载装置

Fig.4 Apparatus of confining pressure

采用主动围压和轴向冲击荷载组合加载方式的目的,在于探讨处于围压条件下岩石试件随着围压和轴向冲击荷载的变化表现出的动力响应规律。本文中,斜长角闪岩在主动围压下的 SHPB 试验,共进行了 4 个围压等级系列( $0\text{MPa}$ 、 $2\text{MPa}$ 、 $4\text{MPa}$ 和  $6\text{MPa}$ )和 5 种应变率等级水平的轴向冲击荷载组合下,共 20 组试验,每组试验重复 3 次~5 次。试验过程中,先加载围压,再进行轴向动荷载冲击,并必须保证所施加压力值的精确。采用  $\phi 100\text{mm}$  SHPB 试验装置时,选用长度为  $0.5\text{m}$  的射弹,其加载行程设置为  $1\text{m}$ 。为减小界面摩擦效应,特在试件和压杆的端面均匀地涂抹上一层石墨和润滑剂的混合物。

1.3 结果与分析

斜长角闪岩 SHPB 试验结果如表 1 所示。

表 1 斜长角闪岩三轴 SHPB 试验结果

Table 1 Summary of triaxial SHPB tests on amphibolites

围压值/MPa	试样编号	发射压力/MPa	打击杆速度/(m/s)	应变率 $\dot{\epsilon}/(\text{s}^{-1})$	峰值应力 $\sigma_p/\text{MPa}$	峰值应变 $\epsilon_p/(\times 10^{-3})$	动态增长因子 DIF	比能量吸收 SEA/(J/cm <sup>3</sup> )
$\sigma_3 = 0$	A0-1	0.30	9.03	75.0	169.5	7.99	1.209	1.089
	A0-2	0.45	11.63	83.3	182.1	7.58	1.299	2.198
	A0-3	0.49	12.99	102.5	199.5	8.42	1.423	2.458
	A0-4	0.60	15.70	136.3	221.8	10.97	1.582	2.148
	A0-5	0.65	16.26	146.7	234.9	11.91	1.676	3.123
$\sigma_3 = 2$	A2-1	0.50	12.79	108.6	188.5	11.07	1.345	1.285
	A2-2	0.52	13.72	123.4	208.0	12.68	1.484	2.503
	A2-3	0.55	14.70	137.2	227.5	13.10	1.623	3.088
	A2-4	0.61	15.02	145.0	248.9	12.87	1.776	3.873
	A2-5	0.64	16.29	151.0	259.7	13.56	1.853	4.503
$\sigma_3 = 4$	A4-1	0.50	12.32	103.1	196.3	11.02	1.400	1.574
	A4-2	0.53	13.58	112.0	209.0	11.83	1.491	2.256
	A4-3	0.60	15.33	135.1	242.3	12.93	1.728	3.281
	A4-4	0.60	15.44	143.6	253.7	13.54	1.810	4.333
	A4-5	0.68	16.70	161.0	282.0	14.20	2.012	5.529

(续表)

围压值/MPa	试样编号	发射压力/MPa	打击杆速度/(m/s)	应变率 $\dot{\epsilon}$ /(s <sup>-1</sup> )	峰值应力 $\sigma_p$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_p$ /( $\times 10^{-3}$ )	动态增长因子 DIF	比能量吸收 SEA/(J/cm <sup>3</sup> )
$\sigma_3=6$	A6-1	0.53	12.99	118.6	221.1	12.7	1.577	1.603
	A6-2	0.55	14.17	123.0	237.85	13.53	1.697	2.024
	A6-3	0.60	15.18	133.4	246.2	13.84	1.756	3.973
	A6-4	0.65	16.23	142.8	261.2	14.31	1.863	4.607
	A6-5	0.70	17.09	165.5	304.6	15.16	2.173	5.911

### 1.3.1 斜长角闪岩动载特性应变率效应分析

斜长角闪岩峰值应力随应变率  $\dot{\epsilon}$  的变化情况, 如图 5 所示。在 SHPB 试验中, 斜长角闪岩动态抗压强度具有显著的应变率相关性, 调高试验的应变率和围压值, 岩石的动态抗压强度也迅速提高, 比其单独承受静载和动载时都高, 最高可比其纯静载强度提高 120%。李夕兵等<sup>[9]</sup>对不同种类的岩石在高应变率下的压缩强度与应变率之间的关系进行了研究, 认为动态压缩强度与应变率的关系为:  $\sigma \propto \dot{\epsilon}^{1/3}$ , 并且强度主要取决于岩石的种类和应变率。

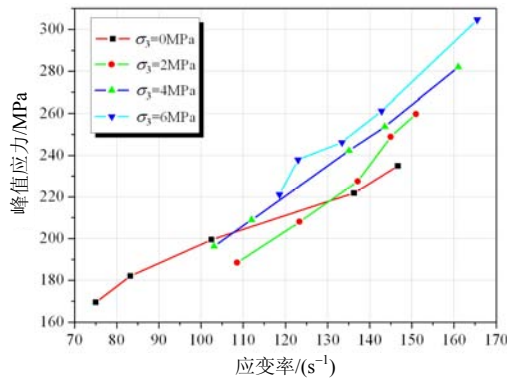


图 5 峰值应力随应变率的变化情况

Fig.5 Peak stress versus strain rate of amphibolites

动态增长因子(Dynamic Increase Factor, DIF)为试件动态抗压强度和静态抗压强度的比值, 是反映冲击荷载下材料抗压强度增幅的指标, 用公式表示为:

$$DIF = \frac{f_{c,d}}{f_{c,s}} \quad (1)$$

式中:  $f_{c,d}$ 、 $f_{c,s}$  分别为斜长角闪岩的动态、静态抗压强度。斜长角闪岩动态增长因子随应变率的变化情况如图 6 所示。

由图 6 可见, DIF 随应变率  $\dot{\epsilon}$  的对数的增大而增大, 应变率越大, 则动态抗压强度的增幅越大, 岩石的应变率敏感性随应变率的增大而增强; 由图 6 中横坐标为对数坐标可知, 动态增长因子 DIF 与应变率  $\dot{\epsilon}$  的对数近似呈线性关系:

$$DIF_{\sigma_3=0} = -1.6013 + 1.5034 \lg \dot{\epsilon}$$

$$DIF_{\sigma_3=2} = -5.8763 + 3.5326 \lg \dot{\epsilon}$$

$$DIF_{\sigma_3=4} = -4.8633 + 3.1029 \lg \dot{\epsilon}$$

$$DIF_{\sigma_3=6} = -6.4647 + 3.8817 \lg \dot{\epsilon} \quad (2)$$

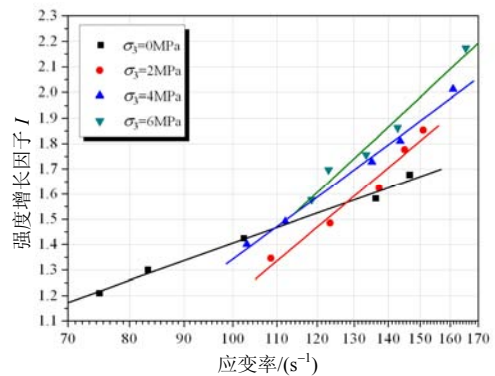


图 6 动态增长因子随应变率的变化情况

Fig.6 Dynamic increase factor versus strain rate of amphibolites

### 1.3.2 斜长角闪岩动载特性围压效应分析

本文的试验研究发现, 在动载作用下, 岩石的强度还与其受力状态有关, 表现出较强的围压效应。冲击动载不变时, 将围压值由 0MPa 提高到 6MPa 时, 岩石试件强度比其同等应变率范围的纯动载强度可提高 11%。图 7 和图 8 分别为斜长角闪岩在同等级的应变率范围内动态抗压强度和峰值应变随围压值的变化情况。

由图 7 和图 8 可见, 在应变率  $\dot{\epsilon}$  等级为  $130s^{-1} \sim 140s^{-1}$  和  $140s^{-1} \sim 150s^{-1}$  内, 斜长角闪岩的动态抗压强度与峰值应变均与试件上施加的围压值近似呈线性关系, 即随着围压值的增加, 相应的岩石动态抗压强度和峰值应变也增大, 这表明岩石动态抗压强度具有显著的静水压依赖性。

综上所述, 岩石材料承受围压作用时, 一方面提高了材料的破坏强度, 增加了其承载能力; 另一方面也增大了岩石的破坏应变, 从而增加材料的韧性。在相同应变率等级内, 斜长角闪岩的动态抗压强度和峰值应变与所施加的围压值大小之间的关系可用式(3)~式(6)表示。

① 应变率  $\dot{\epsilon}$  等级为  $130s^{-1} \sim 140s^{-1}$  时:

$$f_{c,d} = 221.25 + 4.400\sigma_3$$

$$R = 0.9742 \quad (3)$$

$$\varepsilon_p = 1.12 \times 10^{-2} + 4.52 \times 10^{-4} \sigma_3,$$

$$R = 0.9740 \quad (4)$$

② 应变率  $\dot{\varepsilon}$  等级为  $140s^{-1} \sim 150s^{-1}$  时:

$$f_{c,d} = 237.12 + 4.185 \sigma_3,$$

$$R = 0.9757 \quad (5)$$

$$\varepsilon_p = 1.198 \times 10^{-2} + 3.935 \times 10^{-4} \sigma_3,$$

$$R = 0.9973 \quad (6)$$

式(3)~式(6)中,  $R$  为相关系数,  $f_{c,d}$ 、 $\sigma_3$  的单位均为 MPa。

影响材料抗压强度的因素很多, 例如微裂纹面摩擦系数、断裂韧度、初始裂纹长度等, 很多学者在这方面做了研究<sup>[10]</sup>, 通过对比发现围压对提高材料抗压强度的贡献与断裂韧度相近, 这就从理论上说明围压的存在提高了材料的抗压强度。

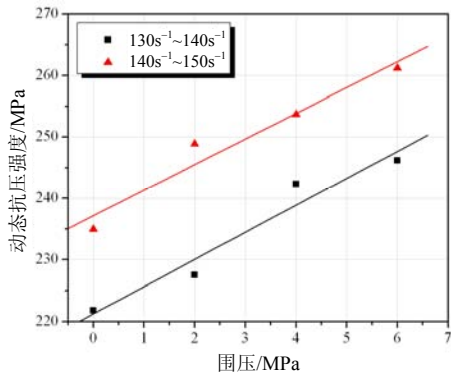


图 7 动态抗压强度随围压的变化情况

Fig.7 Impact compressive strength versus confining pressure of amphibolites

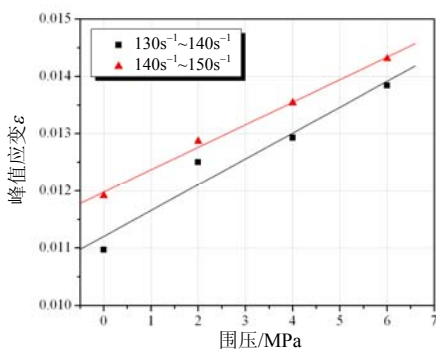


图 8 峰值应变随围压的变化情况

Fig.8 Peak strain versus confining pressure of amphibolites

## 2 基于 Weibull 分布的动态统计损伤本构模型

### 2.1 岩石损伤本构关系

根据 Lemaitre<sup>[11]</sup>应变等效原理, 即损伤材料在

有效应力作用下产生的应变与同种材料在无损伤时产生的应变等价, 可以建立起岩石损伤本构模型的基本关系式为:

$$\{\sigma^*\} = \{\sigma\}(1-D) = [C]\{\varepsilon\} / (1-D) \quad (7)$$

式中:  $\{\sigma\}$  为名义应力矢量;  $\{\sigma^*\}$  为有效应力矢量;  $[C]$  为材料弹性矩阵;  $\{\varepsilon\}$  为应变矢量;  $D$  为损伤变量。

损伤力学最初定义有效应力, 是为了分析受拉金属的损伤现象, 它假定力不能通过损伤传播。然而在岩石受压过程中, 岩石微元破坏后仍然可以传递部分压应力和剪应力。由于岩石类材料存在初始孔隙, 在破裂后往往还存在剩余强度, 即当  $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$  时,  $\sigma_{st} \neq 0$  ( $\sigma_{st}$  表示残余强度)。因此, 本文引入损伤修正系数  $q$  ( $q$  为从 0~1 变化的系数),  $q$  从一定意义上表征了岩石材料的各向异性、不均匀性和初始孔隙的存在。采用损伤变量  $D$  和初始损伤系数  $q$ , 将式(7)修正为:

$$\{\sigma^*\} = \{\sigma\} / (1-qD) = [C]\{\varepsilon\} / (1-qD) \quad (8)$$

由于岩石材料的内部构造极不均匀, 且含有许多缺陷, 各微元所具有的强度也不尽相同, 为便于研究分析, 并考虑到岩石材料在加载过程中的损伤是一个连续的过程, 故作如下假设:

1) 假定把岩石分成若干个含有不同缺陷的微元体, 微元体被划分得比较小且需要满足尺寸的二重性: 一方面, 在细观角度上, 其尺寸足够大, 能够包含足够多的微节理、微裂纹等细观信息; 另一方面, 在宏观角度上, 其尺寸足够小, 可以看作是连续损伤力学的一个质点来考虑。这就能保证在细观上仍能以弹性力学的基本定律——虎克定律为基础, 同时保证推导过程的严密性。由于岩石单元同时具有粘性液体的特性和统计损伤特性, 因而可设岩石试件是由粘性体  $\eta_b$  和损伤体  $D_a$  组合而成的并联体<sup>[12]</sup>, 如图 9 所示。

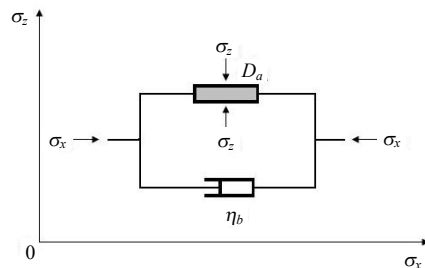


图 9 粘弹性损伤模型

Fig.9 Visco-elastic damage model

2) 在静载作用下, 粘性体不发挥作用, 当加载

速率达到一定值时,粘性体才发挥作用。

3) 各微元弹性体的强度  $F$  服从概率统计规律, 由于 Weibull 概率分布具有容易积分、均值大于 0 和取值范围大于 0 等特点, 满足岩石受压的破坏统计特征, 故设其概率密度函数为两参数的 Weibull 分布, 即:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} (F / F_0)^{m-1} \exp[-(F / F_0)^m] \quad (9)$$

式中:  $F_0$ 、 $m$  为 Weibull 分布参数, 它们反映岩石材料的力学性质; 其中,  $F_0$  代表了岩石的宏观平均强度,  $m$  则反映岩石脆性的参数,  $F$  为微元强度随机分布的分布变量,  $P(F)$  是岩石强度为  $F$  时微元体的破坏概率密度函数。

由于微元破坏的随机性, 以岩石微元破坏概率作为其损伤变量  $D$ , 则可表示为:

$$D = \int_0^F P(x) dx = 1 - \exp[-(F / F_0)^m] \quad (10)$$

## 2.2 岩石的微元强度

鉴于 Drucker-Prager 破坏准则既考虑了中间主应力的影响, 又计入了静水压力的作用, 且其具有参数形式简单、适用于岩体介质以及得到广泛应用等特点<sup>[13]</sup>, 选用它代入公式(10)中的  $F$  得:

$$F = f(\sigma) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  和  $k$  是与岩体粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  有关的参数, 其中  $\alpha = \sin \varphi / \sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}$ ;  $I_1$  为应力张量的第一不变量,  $J_2$  为应力偏量的第二不变量, 分别表示为:

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \\ J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2] \end{cases} \quad (12)$$

由岩石三轴试验的条件, 设定轴向有效应力为  $\sigma_1^*$ , 围压有效应力为  $\sigma_3^*$  ( $\sigma_2^* = \sigma_3^*$ ), 相应的应变为  $\varepsilon_1^*$  和  $\varepsilon_3^*$  ( $\varepsilon_2^* = \varepsilon_3^*$ ), 则有:

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1^* + 2\sigma_3^* \\ J_2 = \frac{1}{3} (\sigma_1^* - \sigma_3^*)^2 \end{cases} \quad (13)$$

由虎克定律可得:

$$\varepsilon_1^* = (\sigma_1^* - 2\mu\sigma_3^*) / E \quad (14)$$

由式(8)得:

$$\sigma_2^* = \sigma_3^* = \sigma_3 / (1 - qD) \quad (15)$$

$$\sigma_1^* = \sigma_1 / (1 - qD) \quad (16)$$

联立式(14)、式(15)和式(16)可得:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \\ \sqrt{J_2} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)E\varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \end{cases} \quad (17)$$

## 2.3 动态损伤统计本构关系的建立

假定岩石在  $x$  方向承受轴向动荷载, 由组合体的并联关系可知, 损伤体的应变  $\varepsilon_1$  应等于粘性体应变  $\varepsilon_2$ , 因而组合体的应变等于两分体的应变, 而应力等于两者应力之和, 即:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_x \\ \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x \end{cases} \quad (18)$$

三轴条件下弹性体的本构模型为:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E\varepsilon_x(1 - qD) + \mu(\sigma_y + \sigma_z) = \\ &E\varepsilon_x - E\varepsilon_x \cdot q[1 - \exp(-(F / F_0)^m)] + \mu(\sigma_y + \sigma_z) \end{aligned} \quad (19)$$

粘性体没有损伤特性, 遵循的本构关系为:

$$\sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_x}{dt} \quad (20)$$

将式(19)和式(20)代入式(18), 可得本构关系:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E\varepsilon_x - E\varepsilon_x \cdot q[1 - \exp(-(F / F_0)^m)] + \\ &\mu(\sigma_y + \sigma_z) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon_x}{dt} \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)即为基于 Weibull 分布的岩石动态损伤本构模型。

## 2.4 动态本构模型参数的确定

在本构方程求解过程中, 需要确定 7 个参数:  $E$ 、 $\alpha$ 、 $\mu$ 、 $\eta$ 、 $F_0$ 、 $m$  及  $q$ 。这 7 个参数的确定往往需要分析实测的曲线, 并且不可避免地需要一定的试算。通常  $E$  与岩石的应力-应变曲线的初始上升斜率相近, 这说明  $E$  能够表示未损岩石的初始弹性模量;  $\alpha$  的取值范围为  $0 \sim \sqrt{3}$ ;  $\eta$  的变化范围一般为  $0.1 \sim 0.5$ ; Weibull 分布参数  $F_0$  和  $m$  以及损伤修正系数  $q$  可根据试验实测应力-应变曲线, 采用曲线拟合的方法进行确定; 而应变  $\varepsilon$  和应变率  $d\varepsilon/dt$  应当用实测数据。基于斜长角闪岩各围压等级下的应力-应变试验曲线, 可通过线性拟合法得到不同围压等级和不同应变率范围下岩石的动态损伤统计本构模型参数  $F_0$ 、 $m$  和  $q$ , 见表 2。

## 2.5 参数对本构模型的影响

### 2.5.1 Weibull 分布参数 $F_0$ 与 $m$ 对模型的影响

从式(21)可以明显看出, 参数  $E$  代表无损材料的初始弹性模量, 它反映岩石材料的弹性性质。当固定  $E$  和  $m$  不变而改变  $F_0$  时, 应力-应变曲线的变

化情况见图 10。由图 10 可知，随着  $F_0$  的增大岩石的峰值强度也跟着增大，即参数  $F_0$  反映了岩石宏观平均强度的大小；当固定  $E$  和  $F_0$  不变而改变  $m$  时，应力-应变曲线的变化情况见图 11。由图 11 可知，参数  $m$  反映了岩石微元强度分布集中程度，即  $m$  越大，微元强度分布越集中，材料的脆性度越高；随着  $m$  的增大，峰后曲线越来越陡，材料的脆性增加，反之，若  $m$  值减小，则材料的延性增大。

由图 10 和图 11 可以得到如下的规律：

① 岩石的应力-应变曲线的峰值随着参数  $F_0$  与  $m$  的增大而增大，但是， $F_0$  与  $m$  的变化对初始段应力-应变曲线的影响不显著。

② Weibull 分布参数  $F_0$  与  $m$  对岩石应力-应变曲线的非线性变形部分，尤其是峰值后曲线的影响比较明显，可以改变应力-应变曲线的形态。

表 2 斜长角闪岩本构模型拟合参数值

Table 2 Parameters of constitutive model for amphibolites

围压/MPa	应变率 $\dot{\epsilon}/(s^{-1})$	$F_0/MPa$	$m$	$q$	相关系数
$\sigma_3=0$	75.0	156.97	2.99	1.00	0.982
	83.3	192.23	2.68	1.00	0.972
	102.5	244.60	2.51	0.99	0.965
	136.3	325.39	2.33	0.98	0.956
	146.7	351.65	2.43	0.97	0.976
$\sigma_3=2$	108.6	250.39	2.85	1.00	0.973
	123.4	291.25	2.65	0.99	0.963
	137.2	324.26	2.48	0.98	0.964
	145.0	348.35	2.41	0.97	0.992
	151.0	358.42	2.45	0.96	0.967
$\sigma_3=4$	103.1	251.35	2.84	1.00	0.975
	112.0	278.39	2.60	0.99	0.951
	135.1	327.26	2.45	0.98	0.954
	143.6	362.14	2.35	0.96	0.986
	161.0	410.69	2.43	0.94	0.962
$\sigma_3=6$	118.6	299.77	2.79	1.00	0.988
	123.0	322.80	2.56	1.00	0.979
	133.4	358.93	2.45	0.96	0.965
	142.8	382.47	2.28	0.95	0.969
	165.2	434.91	2.34	0.92	0.954

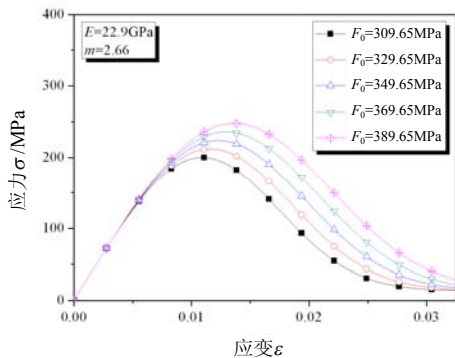


图 10 参数  $F_0$  对本构模型曲线的影响

Fig.10 Effect of parameter  $F_0$  on constitutive model curves

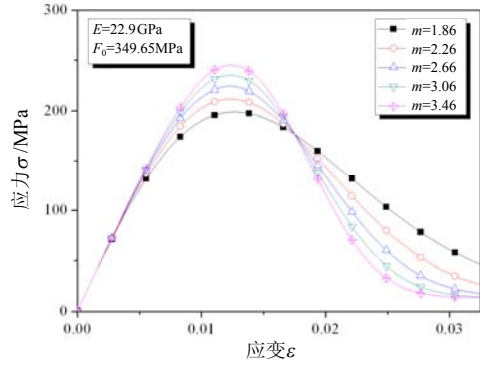


图 11 参数  $m$  对本构模型曲线的影响

Fig.11 Effect of parameter  $m$  on constitutive model curves

### 2.5.2 损伤系数 $q$ 对模型的影响

图 12 所示为  $F_0=349.65$  和  $m=2.66$  时，损伤修正参数  $q$  的变化对应力-应变曲线的影响。

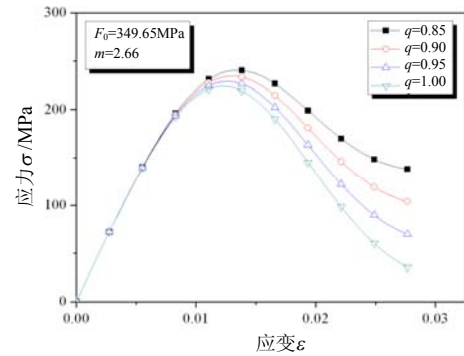


图 12 参数  $q$  的变化对本构模型曲线的影响

Fig.12 Effect of parameter  $q$  on constitutive model curves

从图 12 可以看出，随着  $q$  的减小，岩石峰值强度反而有所增大，而且峰后延性增加，残余强度提高。这说明损伤修正系数  $q$  在某种程度上反映了岩石的残余强度；因此，选择更好地反映试验曲线残余强度特征的  $q$  值，可以模拟出包括残余强度和软化特征在内的应力-应变全过程曲线<sup>[14]</sup>。

### 2.6 岩石损伤本构模型的验证

为了验证所构建的岩石动态损伤统计本构模型的正确性和合理性，将求得的损伤统计参数代入式(21)中，可以得到岩石的动态损伤统计本构模型，理论模型与试验结果的对比分析如图 13 所示。

由图 13 可以看出，理论计算曲线与实测曲线趋势基本一致，特别是峰值后的软化阶段吻合较好，说明模型能够充分反映岩石的软化特性。引入损伤修正参数后建立的本构模型，能够较好地反映不同围压条件下斜长角闪岩的全应力-应变曲线。综上，本文所构建模型具有参数少、求解方便的特点，能够较好地反映宏观破坏现象，可为岩石类脆性材料动态本构关系的进一步研究和工程应用提供参

考。岩石动态荷载作用下的破坏过程十分复杂，本文所建立的本构模型虽具有一定优点，但不能从本质上解释岩石的破坏机制，因此，相关理论尚需进一步深入探讨。

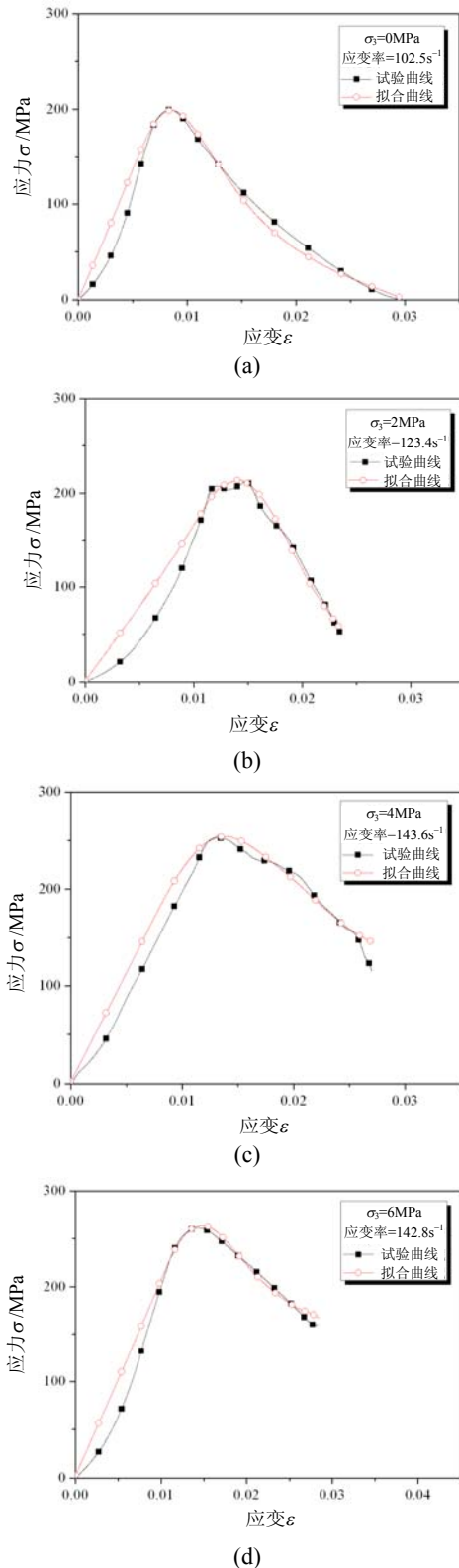


图 13 理论曲线和试验曲线对比

Fig.13 Comparison between theoretical and test curves

### 3 结论

(1) 三轴 SHPB 试验中，斜长角闪岩的峰值应力和峰值应变随着围压等级和应变率的变化表现出显著的应变率相关性和较强的围压效应；斜长角闪岩的动态增长因子与应变率的对数呈近似线性关系，动态抗压强度随应变率的增加而近似线性增长。

(2) 通过组合建模的方法，将统计损伤模型和粘弹性模型相结合，采用基于 Drucker-Prager 破坏准则来表征岩石微元的强度，并引入初始损伤系数  $q$  来反映岩石剩余强度规律，建立的基于 Weibull 分布的动态损伤本构模型。

(3) 所建立的本构模型对实测岩石应力-应变曲线拟合精度较高，所构建模型参数少、求解方便，能够较好地描述岩石动态力学行为，反映了岩石破裂过程的损伤不仅随岩石微元强度而变化，而且受岩石的应力状态影响。

#### 参考文献:

- [1] 左宇军, 李夕兵, 唐春安, 等. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1809—1820.  
Zuo Yujun, Li Xibing, Tang Chun'an, et al. Experimental investigation on failure of rock subjected to 2D dynamic-static coupling loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1809—1820. (in Chinese)
- [2] Christensen R J, Swanson S R, Brown W S. Split-hopkinson-bar tests on rocks under confining pressure [J]. Experimental Mechanics, 1973, 12(11): 508—513.
- [3] Lindholm U S, Yeakley L M, Nagy A. The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt [J]. Int J Rock Mech Sci and Geomech Abstr., 1974, 11(5): 181—191.
- [4] 于亚伦. 用三轴 SHPB 装置研究岩石的动载特性[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 76—79.  
Yu Yalun. Research on the dynamic behavior of rocks used triaxial SHPB [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 76—79. (in Chinese)
- [5] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 花岗岩动态压缩力学特性的实验以及理论研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 474—477.  
Li Haibo, Zhao Jian, Li Junru, et al. Experimental and theoretical study on dynamic compressive mechanical properties of a granite [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2001, 20(4): 474—477. (in Chinese)



- [6] 林大能, 陈寿如. 循环冲击荷载作用下岩石损伤规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4094—4098.  
Lin Daneng, Chen Shouru. Experimental study on damage evolution of rock under cyclical impact loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4094—4098. (in Chinese)
- [7] 王政, 倪玉山, 曹菊珍, 等. 冲击荷载下混凝土动态力学性能研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 519—527.  
Wang Zheng, Ni Yushan, Cao Juzhen, et al. Recent advances of dynamic mechanical behavior of concrete under impact loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 519—527. (in Chinese)
- [8] 陶俊林, 陈裕泽, 田常津, 等. SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应分析[J]. 固体力学学报, 2005, 26(1): 107—110.  
Tao Junlin, Chen Yuze, Tian Changjin, et al. Analysis of the inertial effect of the cylindrical specimen in SHPB system [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(1): 107—110. (in Chinese)
- [9] 李夕兵, 陈寿如, 古德生. 岩石在不同加载波下的动态强度[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(3): 301—304.  
Li Xibing, Chen Shouru, Gu Desheng. Dynamic strength of rock under impulse loads with different stress waveforms and durations [J]. Journal Central South Institute of Mining Metallurgy, 1994, 25(3): 301—304. (in Chinese)
- [10] 高富强, 杨军, 甯尤军. 围压对脆性材料力学性能影响的研究现状[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(2): 46—49.  
Gao Fuqiang, Yang Jun, Ning Youjun. Research status in the effect of confining pressure on brittle material mechanics [J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2009, 61(2): 46—49. (in Chinese)
- [11] Lemaitre J, Sermage J P, Desmorat R. A two scale damage concept applied to fatigue [J]. International Journal of Fracture, 1999, 97(1/2/3/4): 67—81.
- [12] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 基于统计理论的岩石动态损伤本构模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(4): 95—98.  
Yang Minghui, Zhao Minghua, Cao Wengui. Research on damage constitutive model of rock under dynamical load based on statistical theory [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(4): 95—98. (in Chinese)
- [13] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787—791.  
Xu Weiya, Wei Lide. Study on statistical damage constitutive model of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 787—791. (in Chinese)
- [14] 薛云亮, 李庶林, 徐宏斌, 等. 考虑残余强度的岩石损伤统计本构模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(增): 1—6, 18.  
Xue Yunliang, Li Shulin, Xu Hongbin, et al. Damage statistical constitutive model of rocks considering residual strength [J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2008, 41(Sup): 1—6, 18. (in Chinese)

(上接第 45 页)

- [12] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
Jiang Jianjing, Lu Xinzheng, Ye Lieping. The finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [13] Birtel V, Mark P. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure [J]. ABAQUS Users' Conference, 2006: 95—108.
- [14] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
GB50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)
- [15] Parviz Soroushian, Ki-Bong Choi. Steel mechanical properties at different strain rates [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113: 663—672.