

文章编号: 1001-1455(2005)04-0296-07

# 水饱和岩石中爆炸应力波传播的数值模拟\*

周 钟, 王肖钧, 赵 凯, 刘 飞

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 基于连续介质力学和不相融混合物理论, 假定组分间无相对运动, 采用 B-W-N-B 有效应力准则, 在屈服面中引入孔隙影响因子, 提出了一种多孔含水介质流固耦合的本构模型, 并给出了孔隙的演化方程, 对水饱和凝灰岩介质中的爆炸应力波传播作了数值模拟。数值计算给出的应力波形与实测结果有良好的 consistency。采用本文中所述流固耦合本构模型, 可很好地预测水饱和和岩石中爆炸波的演化规律。

**关键词:** 爆炸力学; 本构模型; B-W-N-B 有效应力准则; 水饱和岩石; 爆炸应力波

**中图分类号:** O382.2

**国标学科代码:** 130 · 3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

多孔介质在动力加载下呈现复杂的特征, 如孔隙压实或膨胀、不可逆孔洞塌陷以及塑性畸变等。多孔介质可看作广义复合材料, 不同组分、不同几何排列以及不同孔隙度等都会对混合物的应力状态产生影响。采用纯粹的细观力学方法建立介质的本构模型相当困难, 因此从宏观角度建立一个合理的本构模型更有意义及实用性。水饱和岩石作为一种特殊多孔流体饱和混合物, 大量存在于地层中。石油开采、地震预报等工作中必然要研究它在受力状态下的力学响应, 因此受到了广泛地关注。这些工作都是利用无孔隙的介质实体及孔隙流体的本构关系, 来获得两相材料混合物表观动力响应的组合本构模型。

早期 Terzaghi 利用混合物理论, 对水饱和岩石作了引导性研究。考虑了孔隙流体压力对岩石表观力学响应的影响, 认为有效应力是总体表观压力减去孔隙流体的压力, 即  $p_e = p - p_f$ 。结果相当于降低了介质承受的载荷而使材料强度增大。此后一些学者发展了 Terzaghi 提出的传统有效应力准则。M. A. Biot 等<sup>[1]</sup>、A. Nur 等<sup>[2]</sup>指出介质的几何运动包括基体的总体运动以及和孔隙体积变化相关的局部运动。如果岩石实体的压力和孔隙流体的压力增加幅度相等, 则岩石实体在介质中所占的体积比不变。这种新的混合物准则认为在有效应力的表达式中, 只需减去一部分孔隙压力, 即  $p_e = p - (1 - K/K_s)p_f$ , 这里  $K$ 、 $K_s$  分别是含孔隙材料和固体实体的体模量。20 世纪 70 年代, S. K. Garg 等<sup>[3~4]</sup>、L. W. Morland 等<sup>[5]</sup>基于现代交互作用连续介质理论 (TINC) 也提出了一种有效应力准则。TINC 理论假定介质中各组分本构关系彼此独立, 可用有效应力和有效变形进行描述, 组分之间允许有相对运动。他们证明了 Biot-Willis-Nur-Byerlee 有效应力准则是 TINC 的一种近似形式。

根据不相融混合物理论, D. S. Drumheller<sup>[6]</sup>提出了针对多孔含水材料动力响应的本构模型, 假定固、流体之间无相对运动, 从 Hamilton 原理和热力学第二定律出发, 明确地给出了混合物的质量、动量和能量平衡方程。在连续介质力学基础上, M. B. Rubin 等<sup>[7]</sup>给出了 Helmholtz 自由能的一种显式形式, 结合 Grüneisen 状态方程, 模拟了多孔脆性材料的动态响应, 给出了可以模拟可逆及不可逆孔隙变形的孔隙度演化方程, 并开展了多孔岩石介质爆炸响应的数值计算。

本文中在连续介质力学的框架内, 假定介质各向同性, 不考虑组分间的相对运动; 由岩石实体和孔隙水的状态方程导出含水岩石的表观状态方程; 进而考虑岩石实体微裂纹对材料的损伤效应, 以及孔隙

\* 收稿日期: 2004-08-31; 修回日期: 2004-11-08

基金项目: 国家人防办十五科研项目; 计算物理重点实验室基金项目 (51479010303ZK0102)

作者简介: 周 钟 (1977—), 男, 博士研究生。

度对材料屈服强度的影响;采用修正的有效应力准则,建立水饱和和多孔固体的含损伤弹塑性本构模型,开展了含水凝灰岩中爆炸应力波传播的数值模拟。计算结果与实测波形吻合,为水饱和岩石中的爆炸波计算提供了依据。

## 2 水饱和岩石的本构模型

假定水饱和岩石可以看作是不考虑孔隙的岩石实体和充满饱和水的孔隙组成的混合物,水和岩石实体间不存在相对运动,岩石实体为各向同性体。

### 2.1 应力应变关系

设现时构形中材料微元总体积为  $dv$ , 实体体积为  $dv_s$ , 孔隙体积为  $dv_p$ , 孔隙度为  $\phi$ , 则

$$dv = dv_s + dv_p, \quad \phi = \frac{dv_p}{dv} \quad (1)$$

相应地对于参考构形

$$dV = dV_s + dV_p, \quad \Phi = \frac{dV_p}{dV} \quad (2)$$

记  $\rho_{s0}$ 、 $\rho_{f0}$  分别为岩石实体和孔隙流体在参考构形中的密度,  $\rho_s$ 、 $\rho_f$  为岩石实体和孔隙流体在现时构形中的密度,  $\rho_0$ 、 $\rho$  分别为含水介质在参考构形和现时构形中的表观密度, 则可以得到如下关系

$$\rho_0 = (1 - \Phi)\rho_{s0} + \Phi\rho_{f0}, \quad \rho = (1 - \phi)\rho_s + \phi\rho_f \quad (3)$$

记  $J$ 、 $J_s$ 、 $J_f$  分别为含水介质、岩石实体、孔隙流体的相对体积, 则

$$J = \frac{dv}{dV} = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad J_s = \frac{dv_s}{dV_s} = \frac{\rho_{s0}}{\rho_s}, \quad J_f = \frac{dv_p}{dV_p} = \frac{\rho_{f0}}{\rho_f} \quad (4)$$

结合式(1)、式(2), 可得到

$$J_s = \frac{J(1 - \phi)}{(1 - \Phi)}, \quad J_f = \frac{\phi J}{\Phi} \quad (5)$$

根据文献[4~5]中的 TINC 理论, 水饱和岩石介质的现时表观应力  $\sigma$  可以写成

$$\sigma = (1 - \phi)\sigma_s + \phi\sigma_f \quad (6)$$

式中:  $\sigma_s$ 、 $\sigma_f$  分别表示岩石实体和孔隙水的应力张量。如果采用流体弹塑性模型, 则式(6)也可表示为

$$p = (1 - \phi)p_s + \phi p_f, \quad \mathbf{S} = (1 - \phi)\mathbf{S}_s \quad (7)$$

式中:  $p_s$ 、 $p_f$  分别为岩石实体和孔隙水的压力,  $\mathbf{S}_s$  为岩石实体的偏应力张量,  $p$ 、 $\mathbf{S}$  分别为岩石的表观压力和偏应力。可见, 若已知岩石实体和孔隙水的应力应变关系, 可得到水饱和岩石的表观应力应变关系。

参考文献[8], 对岩石实体采用 Grüneisen 型的状态方程  $p_s = p_{sH} + \rho_s \gamma_s (E_s - E_{sH})$ , 其中  $p_{sH}$ 、 $E_{sH}$  是 Hugoniot 冲击绝热线上的压力和内能,  $\gamma_s$  为 Grüneisen 系数,  $E_s$  为内能。当压力不是特别高时, 忽略其中的热效应, 静水压力  $p_s$  可以取成如下的多项式关系

$$p_s = \begin{cases} \beta_{s1}\mu_s + \beta_{s2}\mu_s^2 + \beta_{s3}\mu_s^3 & \mu_s \geq 0 \\ C_k \beta_{s1} \mu_s & \mu_s < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\beta_{s1}$ 、 $\beta_{s2}$ 、 $\beta_{s3}$  是材料参数;  $\beta_{s1}$  表示实体的体模量  $K_s$ ;  $C_k$  是考虑体积膨胀时微裂纹张开对岩石实体体模量的弱化系数;  $\mu_s = \rho_s/\rho_{s0} - 1 = 1/J_s - 1$  为实体的体积压缩比。

孔隙水的状态方程可由冲击 Hugoniot 试验<sup>[6]</sup>获得

$$p_f = \frac{\rho_{f0} c_{f0}^2 \eta_f}{(1 - s_f \eta_f)^2} \quad (9)$$

式中:  $\eta_f = 1 - \rho_{f0}/\rho_f = 1 - J_f$ 。  $c_{f0}$ 、 $s_f$  是实测冲击波速度与质点速度间线性关系  $D = c_{f0} + s_f u$  中的系数。式(9)也可写成

$$p_f = \beta_{f1}\mu_f + \beta_{f2}\mu_f^2 + \beta_{f3}\mu_f^3 \quad (10)$$

式中:  $\mu_f = \rho_f/\rho_{f0} - 1 = 1/J_f - 1$  为水的体积压缩比;  $\beta_{f1}$ 、 $\beta_{f2}$ 、 $\beta_{f3}$  是与  $c_{f0}$ 、 $s_f$  相关的常数,  $\beta_{f1}$  相当于水的体

积压缩模量  $K_f$ 。

如果考虑到孔隙水无法承受剪应力,不能产生畸变,则可以认为实体的偏应变和介质表观偏应变相等,即  $e = e_s$ ,那么实体的增量型偏应力应变关系如下

$$dS_s = 2C_g G_s de_s^e = 2C_g G_s de^e \tag{11}$$

式中:  $e_s^e$  为偏应力张量中的弹性分量,  $G_s$  为岩石实体的无损伤剪切模量,  $C_g$  是考虑微损伤对实体弹性剪切模量的弱化系数。

可以看出,结合式(7)、(8)、(10)、(11)和孔隙度演化方程,可建立水饱和岩石的表观应力应变关系。

### 2.2 孔隙度 $\phi$ 的演化

考察材料表观压力表达式(7),如果已知  $p(J)$ 、 $p_s(J_s)$  和  $p_f(J_f)$ ,则借助式(5)便可隐式地求得孔隙度  $\phi(J)$  的演化方程。孔隙演化在低压时表现明显,因此不能采用高压冲击 Hugoniot 曲线式(8)、式(9)建立  $\phi(J)$ ,而需通过低压试验确定。由于混合物的表观响应  $p(J)$  很难通过试验测定,因此依然不能由式(12)求出孔隙演化方程。S. K. Garg<sup>[3]</sup>指出,多孔水饱和岩石材料的屈服强度较低(约几百 MPa),在建立水饱和岩石孔隙演化方程时,作为一级近似,可认为不同组分的有效压力基本相等,即

$$p_s \left( \frac{1 - \phi J}{1 - \Phi} \right) \approx p_f \left( \frac{\phi J}{\Phi} \right) \tag{12}$$

若常规低压实验测得的岩石实体和水的  $p$ - $v$  关系为

$$p_s = A_s \mu_s + B_s \mu_s^2 + C_s \mu_s^3 \tag{13a}$$

$$p_f = A_f \mu_f + B_f \mu_f^2 + C_f \mu_f^3 \tag{13b}$$

则根据式(12)便可通过迭代法隐式地求得  $(J, \phi)$  的对应关系,进而拟合得到孔隙度  $\phi$  和表观体积比  $\mu$  的演化关系。图 1 便是利用上述方法获得的凝灰岩  $\phi(\mu)$  曲线,其中式(13)中的系数取自文献[3]。由图 1 可见,加载初期水更易压缩,孔隙度下降;到一定阶段,水的抗压能力增强,孔隙度略有回升;当压力较高(20 GPa 以上)时,水和实体的可压缩性基本达到同步,因此孔隙度将维持不变。据此把孔隙度的演化方程取为

$$\phi = \begin{cases} \Phi \left( 1 + \sum_{i=1}^4 a_{fi} \mu^i \right) & p \leq p_c \\ \phi_c & p > p_c \end{cases} \tag{14}$$

式中:  $a_{fi}$  是与初始孔隙度有关的拟合参数,  $p_c$  为孔隙度保持不变的应力阈值。

### 2.3 屈服面、有效应力准则

水饱和岩石由于孔隙中充满了水,孔隙水压降低了材料所承受的有效压力,相比于一般的干岩,这种介质的抗压强度更高。考虑到材料在加载过程中同样会经历弹性、塑性硬化,损伤软化和完全破坏等几个阶段,因此本文中采用了修正的 Biot-Willis-Nur-Byerlee 有效应力准则,并且在屈服面中引入孔隙度的影响,给出了水饱和岩石材料的强度准则。忽略时率相关效应,水饱和岩石的屈服面一般可以取为

$$Y = F_1(p_e, \epsilon_p, D) F_2(\phi) \tag{15}$$

式中:  $F_1$  为不考虑孔隙影响的干岩屈服函数,与有效应力  $p_e$ 、等效塑性应变  $\epsilon_p$  和损伤  $D$  有关。  $F_2$  为孔隙演化对屈服面的影响,且  $F_2(\phi) = (1 - \phi)/(1 - \Phi)$ 。

大量试验表明,一般干岩作为应变软化脆性材料,加载过程中的变形特征呈现如下几个明显阶段:(1)弹性和塑性硬化阶段。材料经历了从弹性到初始屈服,随塑性变形的发展,应力应变曲线偏离线性但继续上升,岩石的承载能力继续提高,模量降低但强度硬化。(2)损伤软化阶段。当加载到一定程度,

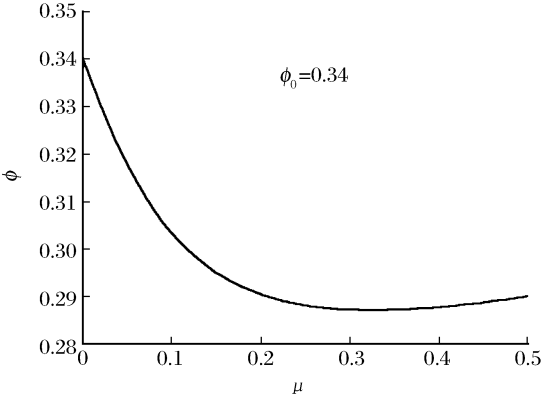


图 1 空隙度与表观体积压缩比的关系  
Fig. 1 Evolution of porosity

由于大量损伤的积累导致强度下降,但岩石仍有承载能力,并未完全破坏。(3)完全破坏阶段。强度失效,有围压时可依靠摩擦提供部分强度。针对上述的变形特征,根据以前的工作<sup>[8]</sup>,把屈服面  $F_1$  的形式分段取为:

(1)弹性及塑性硬化段

$$F_1 = Y_p - (Y_p - Y_q) \exp(-k\epsilon_p) \tag{16}$$

(2)损伤软化段

$$F_1 = Y_p \left( 1 - \frac{D - D_c}{1 - D_c} \right) + Y_r \frac{D - D_c}{1 - D_c} \tag{17}$$

(3)完全破坏段

$$F_1 = Y_r = \begin{cases} 2fp_e & Y_r < Y_{rc} \\ Y_{rc} & Y_r \geq Y_{rc} \end{cases} \tag{18}$$

式中:  $Y_p(p_e) = a_p - c_p \exp(-b_p p_e)$ ,  $Y_q(p_e) = a_q - c_q \exp(-b_q p_e)$ ;  $Y_p, Y_q$  是根据试验拟合的破坏面和初始屈服面,是有效应力  $p_e$  的函数;  $a_p, b_p, c_p$  和  $a_q, b_q, c_q$  是拟合的材料参数;有效应力  $p_e = p - (1 - K/K_s)p_f$ ,  $\epsilon_p$  是等效塑性应变,反映了材料的应变硬化现象,  $k$  为应变硬化系数,  $D$  是当前损伤,  $D_c$  是强度软化起始时刻的损伤临界值,  $f$  为摩擦因数,  $Y_{rc}$  为摩擦所能提供的强度最大值。

### 2.4 塑性流动和损伤演化

在弹塑性流动阶段,发生塑性变形时应力始终在屈服面上,因此由屈服面、一致性条件、塑性流动法则,可求得塑性流动因子  $d\lambda$ ,进而给出塑性变形的演化和应力状态。由式(15)得,弹塑性变形阶段的屈服函数

$$F = \sigma_e - [Y_p - (Y_p - Y_q) \exp(-k\epsilon_p)] \frac{1 - \phi}{1 - \Phi} = 0 \tag{19}$$

式中:  $\sigma_e = \sqrt{3S_{ij}S_{ji}/2}$  为等效应力。

通过一致性条件和相关流动法则以及等效塑性应变的定义,可得

$$de_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial S_{ij}} = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial S_{ij}} = \frac{3S_{ij}}{2\sigma_e} d\lambda, \quad d\epsilon_p = \sqrt{2de_{ij}^p de_{ji}^p / 3} = d\lambda \tag{20}$$

最后不难求得塑性流动因子

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial F}{\partial p_e} dp_e + \frac{3(1 - \phi)C_g G_s}{\sigma_e} S_{ij} de_{ij} + \frac{\partial F}{\partial \phi} d\phi}{3(1 - \phi)C_g G_s - \frac{\partial F}{\partial \epsilon_p}} \tag{21}$$

和大多数的脆性材料一样,岩石在变形中会经历塑性硬化和损伤软化的过程。在第一阶段,随着塑性变形的积累,损伤也在发展,但是材料强度是提高了,损伤演化与塑性变形相关;当损伤超过某一临界值  $D_c$ ,材料变形进入损伤软化阶段,损伤继续发展,材料强度软化,损伤演化与损伤屈服面  $Y_q(1 - D)/(1 - D_c)$  相关。因此损伤的演化方程可为

$$\dot{D} = \begin{cases} \frac{\dot{\epsilon}_p D_c}{\epsilon_{pc}} & D < D_c \\ 3n_1 D \left\{ 1 - \left[ Y_q \frac{1 - D}{1 - D_c} \frac{1}{\sigma_e} \right]^{n_2} \right\} & D \geq D_c \end{cases} \tag{22}$$

式中:  $\epsilon_{pc}$  是破坏面上等效塑性应变的取值,  $n_1, n_2$  为材料参数。

### 3 地下爆炸数值计算结果分析

为研究含水岩石介质中爆炸应力波的传播规律,在多孔凝灰岩中进行过地下化爆试验<sup>[6]</sup>。半径为 0.51 m 的球形 TNT 药包埋在凝灰岩中,试验测得了不同爆心距的应力和质点速度数据,表 1 给出了试验中探测器埋置的位置以及所测量的物理量。图 2、图 3 是现场试验测得的压力波形。

表 1 现场探测器的分布

Table 1 Field test gages

探测器名称	记录的物理量	爆心距/m	探测器名称	记录的物理量	爆心距/m
1YFC	径向应力	1.70	9TS1	径向应力	5.16
2YFC	径向应力	2.03	9PC1	环向应力	5.32
4YFC	径向应力	2.51	9TS2	径向应力	7.45
5YFC	径向应力	3.72	9PC2	环向应力	7.60
5AC	质点速度	3.72	12YFC	径向应力	7.63
8YFC	径向应力	5.27	12AC	质点速度	7.63
8AC	质点速度	5.27			

利用多孔含水岩石本构模型,采用自编的有限差分程序,对上述试验引起的爆炸波演化规律进行了数值模拟。第一步先计算炸药的起爆过程,采用 C-J 爆轰条件,爆炸产物采用 BKW 方程;第二步将起爆过程结束时的爆炸产物的压力、速度分布作为初始条件,对爆炸应力波的传播进行计算。计算中用到的参数列于表 2 中,其中水饱和凝灰岩的材料参数取自文献[6]。

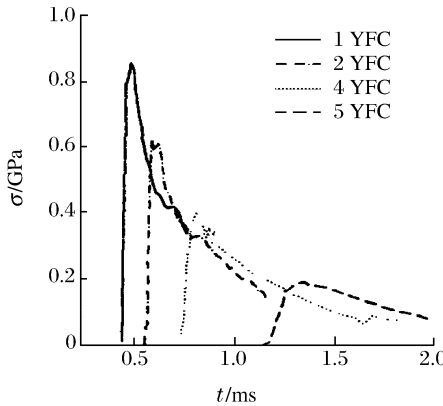


图 2 测试的近场质点应力波形  
Fig. 2 Radial stress waves recorded in near field

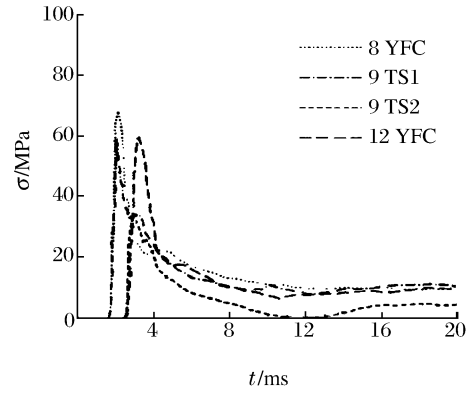


图 3 测试的远场质点应力波形  
Fig. 3 Radial stress waves recorded in far field

表 2 计算采用的材料参数

Table 2 Parameters used in the computation

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\rho_0 / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2 009	$\beta_{s1} / \text{GPa}$	25.91	$a_{f1}$	-1.566	$\phi_0$	0.34
$\rho_{s0} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2 530	$\beta_{s2} / \text{GPa}$	6.74	$a_{f2}$	5.948	$n_1 / \text{s}^{-1}$	78.4
$\rho_{f0} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 000	$\beta_{s3} / \text{GPa}$	8.05	$a_{f3}$	-10.112	$n_2$	0.07
$G_s / \text{GPa}$	10.3	$\beta_{f1} / \text{GPa}$	2.56	$a_{f4}$	6.618	$G / \text{GPa}$	6.8
$c_{f0} / (\text{km}/\text{s})$	1.6	$\beta_{f2} / \text{GPa}$	5.53	$D_c$	0.56	$p_c / \text{GPa}$	20
$s_f$	1.58	$\beta_{f3} / \text{GPa}$	5.55	$\epsilon_{pc}$	0.005	$K / \text{GPa}$	10

图 4、图 5 是与图 2、图 3 相对应的计算结果。比较两者可看出,无论从脉冲的宽度、应力峰值的大小还是衰减趋势来说,计算和实测都比较接近。只是 7.63 m (12YFC) 处的应力峰值差别稍大,但可看出该测试点的试验结果(见图 3)明显不合理,甚至超过了 5.27 m (8YFC) 处的应力峰值。图 6 是本文中计算的 3.72 m 处质点径向应力波形,图 7 是实测结果以及计算结果[6]。同样可见,波形的主要特征是吻合的,且图 6 中冲击波波前有一弱前驱波,和计算结果[6]相同。文献[6]中还指出,如果不考虑介质硬化效应,计算的爆炸产物空腔尺寸是实测的两倍,本文模型中考虑了硬化,因此计算得到的空腔半径和文献[6]中的计算结果类似。此外本文中還计算了不同初始孔隙度(即含水量)对应力波传播特性的影响,图 8、图 9 给出了 3.72 m 处质点的应力波形和速度曲线。可看出,随孔隙度的增加,峰值应力降低,但同时由于含水量的增大导致介质可压缩性的大幅度增加,因此质点峰值速度上升,速度历史曲线的脉宽也变大,卸载趋缓,最终导致质点残留位移增加。

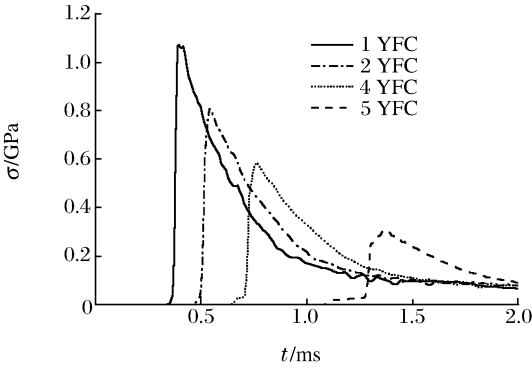


图 4 本文计算近场波形

Fig. 4 Computational results in near field

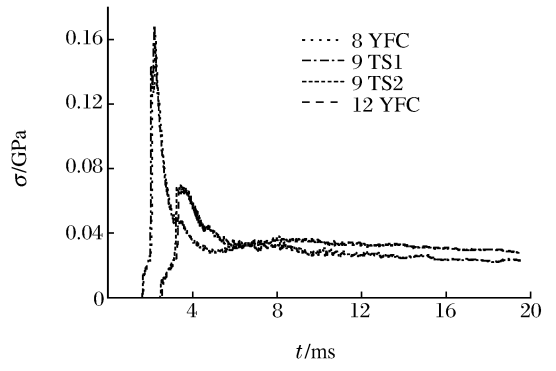


图 5 本文计算的远场波形

Fig. 5 Computational results in far field

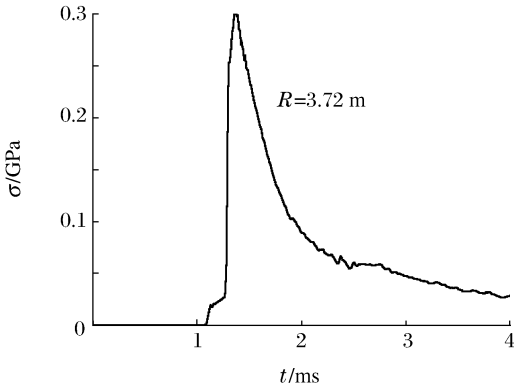


图 6 本文中质点应力波形的计算结果

Fig. 6 Radial stress waves calculated in this paper

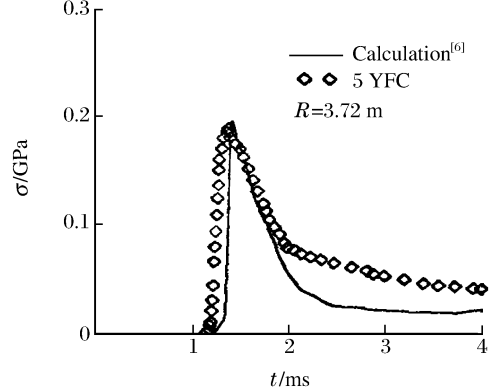


图 7 质点应力波形的计算结果<sup>[6]</sup>及实测数据

Fig. 7 Radial stress waves from calculation<sup>[6]</sup> and experiment

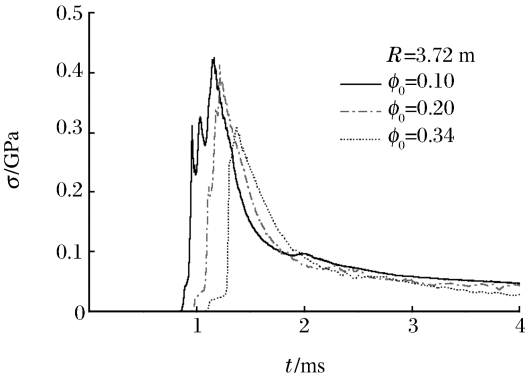


图 8 不同初始孔隙度的质点应力波形对比

Fig. 8 Radial stress waves for the different initial porosity

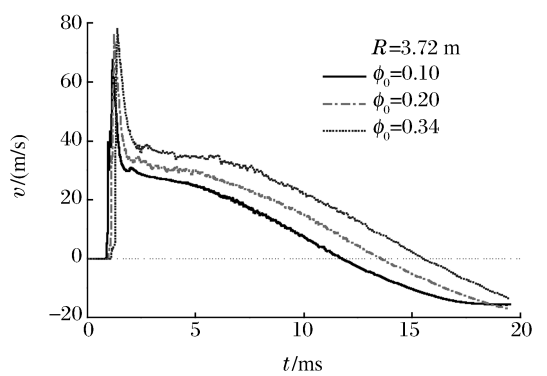


图 9 不同初始孔隙度的质点速度波形对比

Fig. 9 Velocity waves for the different initial porosity

上述数值模拟结果表明,本文中所建的本构模型可用于研究水饱和和岩石爆炸应力波的传播规律,分析孔隙度、含水量等介质特性对爆炸波传播的影响,从而为地下爆炸效应和震源函数研究提供依据。

### 4 结束语

针对多孔水饱和岩石介质的特点,在连续介质力学和混合物理论基础上,建立了一个流固耦合、考虑孔隙演化、应变硬化和损伤软化的连续本构模型。提出了一个确定孔隙演化的方法,采用了修正的有效应力准则,成功地把建立的本构模型应用于爆炸波传播规律的研究,取得了与现场试验和国外学者数值计算相吻合的结果。从而验证了模型的合理性和有效性,为进一步的研究打下了基础。

## 参考文献:

- [1] Biot M A, Willis D G. The elastic coefficients of the theory of consolidation[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1957,24:594—601.
- [2] Nur A, Byerlee J D. An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids[J]. Journal of Geophysical Research, 1971,76(26):6414—6419.
- [3] Garg S K. Wave propagation effects in a fluid-saturated porous solid[J]. Journal of Geophysical Research, 1971,76(32):7947—7962.
- [4] Garg S K, Nur A. Effective stress laws for fluid-saturated porous rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1973,78(26):5911—5921.
- [5] Morland L W. A simple constitutive theory for a fluid-saturated porous solid[J]. Journal of Geophysical Research, 1972,77(5):890—900.
- [6] Drumheller D S. A theory for dynamic compaction of wet porous solids[J]. International Journal of Solids Structures, 1987,23(2):211—237.
- [7] Rubin M B, Elata D, Attia A V. Modeling added compressibility of porosity and the thermomechanical response of wet porous rock with application to Mt. Helen tuff[J]. International Journal of Solids Structures, 1996,33(6):761—793.
- [8] 刘文韬,王肖钧,周钟,等. 岩石的连续损伤本构模型及在地下爆炸波数值计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(13):2149—2156.
- LIU Wen-tao, WANG Xiao-jun, ZHOU Zhong, et al. Continuously damaged constitutive model of rock and its application to numerical simulation for underground strong explosion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(13):2149—2156.

## Numerical simulation for blast wave in water-saturated rock

ZHOU Zhong<sup>\*</sup>, WANG Xiao-jun, ZHAO Kai, LIU Fei

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

**Abstract:** Within the framework of continuum mechanics and immiscible mixture theory, and by assuming that there is no relative motion between the components, an elastic-plastic constitutive model involving damage evolution for fluid-saturated porous solid is proposed. The porosity evolution is established on the conventional equipressure experiments and the effect of porosity on the yield function is considered in the new constitutive relations. By using the B-W-N-B effective stress rule, the blast waves in the fully water-saturated porous tuff are numerically simulated and the results are in good agreement with experiments, demonstrating that the model proposed in this paper is capable of predicting blast waves in water-saturated porous rocks.

**Key words:** mechanics of explosion; constitutive model; B-W-N-B effective stress rule; water-saturated rock; blast stress wave

\* Corresponding author: ZHOU Zhong  
E-mail address: zhouz@mail.ustc.edu.cn  
Telephone: 0551-3606734