

# 不同本构模型下地应力对爆破效果的影响研究<sup>①</sup>

缪广红<sup>1</sup>, 张旭<sup>2</sup>, 孙伟波<sup>1</sup>, 孙文翔<sup>2</sup>

(1.安徽理工大学 力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001; 2.安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立不同地应力下的 HJC 本构模型和 RHT 本构模型, 对比分析不同本构模型中爆破对模型有效应力、岩石损伤的影响。结果表明: HJC 本构模型的有效应力变化更贴近实际情况, 而 RHT 本构模型的岩石损伤更贴近实际情况; 地应力对距离炮孔较近区域有效应力的影响较小, 而对距离炮孔较远区域有效应力的影响较大; 地应力对 HJC 本构模型的岩石损伤影响较小, 对 RHT 本构模型的损伤变量影响较大。

**关键词:** 本构模型; 地应力; 爆破效果; 数值模拟; 损伤变量; 有效应力; 岩石损伤

中图分类号: TD235

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.003

文章编号: 0253-6099(2025)02-0013-07

## Influence of In-situ Stress on Blasting Effects Under Different Constitutive Models

MIAO Guanghong<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>2</sup>, SUN Weibo<sup>1</sup>, SUN Wenxiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Optoelectronic Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** Constitutive models of HJC and RHT for different in-situ stress conditions were established by adopting ANSYS/LS-DYNA software, and the effects of blasting on effective stress and rock damage in different constitutive models were analyzed comparatively. The results show that the effective stress variation in the HJC model is more consistent with practical scenarios, while the rock damage in the RHT model can better reflect practical conditions. In-situ stress has a minor impact on effective stress in regions close to blast holes but a significant influence on effective stress in areas farther away. Additionally, in-situ stress has a smaller effect on rock damage in the HJC model, but substantially affects the damage variables in the RHT model.

**Key words:** constitutive model; in-situ stress; blasting effect; numerical simulation; damage variable; effective stress; rock damage

深部岩体爆破工程中, 岩体通常处于复杂地应力环境中, 地应力对爆破效果影响显著, 直接关系到爆破效率、围岩稳定性以及工程安全<sup>[1]</sup>。

现有岩石爆破效果研究主要集中在岩石爆破试验和数值模拟两个方面。在试验研究方面, 学者们通过缩比模型试验探讨了爆破荷载下岩石的破坏特征, 但由于试验成本高、危险性大, 且难以真实反映大规模工程的实际响应, 其应用受到限制<sup>[2-5]</sup>。在数值模拟方面, 有限元法、离散元法等数值模拟方法得到了广泛应用, 其中 LS-DYNA 软件因其高效性和准确性成为主流

工具<sup>[6-9]</sup>。然而, 不同本构模型(如 HJC、RHT 和 JH2 本构模型)在描述岩石爆破过程时存在显著差异。例如, HJC 本构模型仅采用一个弹性极限面来描述材料的屈服准则, 相较于 RHT 本构模型, 它较为片面; 但在破坏形态的描述方面, RHT 本构模型表现不理想<sup>[10-13]</sup>。

准确可靠的本构关系是开展相关岩石爆破效果研究的关键, 然而, 目前国内外学者对地应力作用下岩石爆破能量分布特征及爆破损伤机制的研究仍不深入, 尤其在不同的本构模型下地应力对爆破效果的影响方面, 尚未形成系统性的理论体系。因此, 本文基于

① 收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(11902003)

作者简介: 缪广红(1985—), 男, 安徽淮南人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事爆炸力学相关研究。E-mail: miaogh@mail.ustc.edu.cn

LS-DYNA 软件,分别采用 HJC 和 RHT 本构模型研究地应力对爆破效果的影响,旨在为岩体爆破工程提供参考。

## 1 损伤本构模型

### 1.1 HJC 本构模型

HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 本构模型用于描述岩石的本构及其参数<sup>[14]</sup>,将岩石等效强度表示为压力、应变率和损伤的函数,其中压力表示为体应变的函数,且考虑了永久粉碎影响;损伤累积是塑性体积应变、等效塑性应变及压力的函数。HJC 本构模型综合考虑了这三个方面对强度的影响,被广泛应用于数值计算。

HJC 本构模型包括强度模型、损伤模型和状态方程<sup>[15]</sup>3 部分。强度模型曲线如图 1 所示,强度模型等效强度表达式见式(1)。

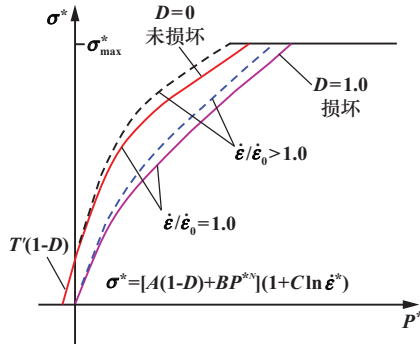


图 1 强度模型曲线

Fig. 1 Strength model curve

$$\begin{cases} \sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \\ \sigma^* = \frac{\sigma}{f_c} \\ P^* = \frac{P}{f_c} \\ \dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma^*$ 为无量纲等效应力, $\sigma^* \leq \sigma_{\max}^*$ , $\sigma_{\max}^*$ 为最大归一化无量纲强度极限; $A$ 为材料归一化内聚强度; $D$ 为损伤度, $0 \leq D \leq 1$ ; $B$ 为归一化压力硬化系数; $P^*$ 是根据 $f_c$ 归一化后的压力; $N$ 为压力硬化指数; $C$ 为应变率硬化系数; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率; $\sigma$ 为实际等效应力; $f_c$ 为静态单轴压缩强度; $P$ 为压力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 。

损伤模型曲线如图 2 所示。损伤度  $D$  是塑性体积应变、等效体积应变和压力的函数,其表达式见式(2)。

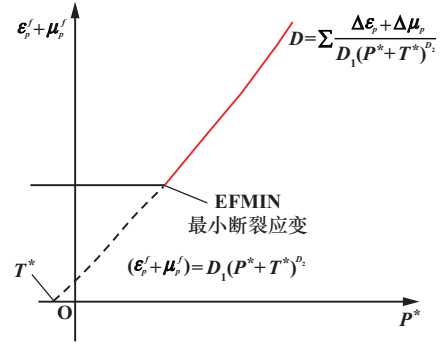


图 2 损伤模型曲线

Fig. 2 Damage model curve

$$\begin{cases} D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1(P^* + T^*)^{D_2}} \\ T^* = \frac{T}{f_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta \epsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为一个循环积分计算中的等效塑性应变增量和塑性体积应变增量; $D_1$ 和 $D_2$ 均为材料损伤常数; $T$ 为抗拉强度; $T^*$ 为归一化最大拉伸静水压力。

状态方程曲线如图 3 所示,分为线弹性阶段(OA)、塑性阶段(AB)、压密阶段(BC)3 部分。

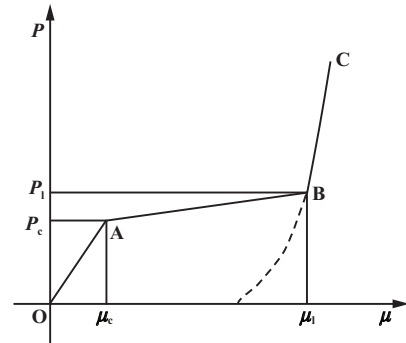


图 3 状态方程曲线

Fig. 3 Curve of equation of state

$P \leq P_c$  时,材料处于线弹性阶段,弹性体积模量为:

$$K = \frac{P_c}{\mu_c} \quad (3)$$

式中: $P_c$ 为单轴压缩试验中材料破碎临界压力; $\mu_c$ 为单轴压缩试验中材料临界应变。

$P_c < P < P_1$  时,材料处于塑性阶段,随着压力及塑性体积应变增加,岩石内部的气孔逐渐变小,变成密实介质。

$$\begin{cases} P = P_c + K_c(\mu - \mu_c) \\ K_c = \frac{P_1 - P_c}{\mu_1 - \mu_c} \\ \mu_1 = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mu$ 为体积应变; $P_1$ 为单轴压缩试验中材料压实时的临界压力; $\mu_1$ 为单轴压缩试验中材料压实时的体积应变; $\rho$ 为岩石瞬时密度; $\rho_0$ 为原始密度。

$P \geq P_1$ 时,材料处于压密阶段,此时岩石可以看成连续密实介质,岩石所受压力与体积的关系为:

$$P = \frac{K_1}{\bar{\mu}} + \frac{K_2}{\bar{\mu}^2} + \frac{K_3}{\bar{\mu}^3} \quad (5)$$

式中: $\bar{\mu}$ 为修正后的体积应变, $\bar{\mu} = (\mu - \mu_1) / (1 + \mu_1)$ ;  $K_1, K_2, K_3$ 均为常量。

## 1.2 RHT本构模型

RHT本构模型考虑了压力硬化、应变硬化、应变率硬化、压缩、偏应力张量的第三不变量、损伤效应、体积压缩、裂纹软化等效应<sup>[16]</sup>。基于HJC本构模型引入弹性极限面、失效面和残余强度面,分别描述材料初始屈服强度、失效强度及残余强度的变化规律,RHT本构模型曲线如图4所示。

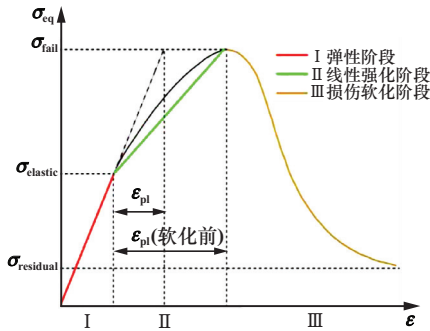


图4 RHT本构模型曲线

Fig.4 Curves in RHT constitutive model

失效面定义为压力 $P$ 、应力洛德角 $\theta$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的函数:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{fail}} = Y_{\text{TXC}}(P) \cdot R_3(\theta) \cdot F_{\text{rate}}(\dot{\varepsilon}) \\ Y_{\text{TXC}}(P) = f_c \left| A [P^* - P_{\text{spall}}^* F_{\text{rate}}(\dot{\varepsilon})]^{N_f} \right| \\ P_{\text{spall}}^* = P^* \frac{f_t}{f_c} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{\text{fail}}$ 为失效面应力; $Y_{\text{TXC}}(P)$ 为压缩子午线上等效应力; $R_3(\theta)$ 为角隅函数; $F_{\text{rate}}(\dot{\varepsilon})$ 为应变率强化因子; $A$ 为失效面常数; $P_{\text{spall}}^*$ 为归一化层裂强度; $N_f$ 为失效面指数; $f_t$ 为单轴拉伸强度。

由失效面确定弹性极限面,弹性极限面应力定义为:

$$\sigma_{\text{elastic}} = \sigma_{\text{fail}} \cdot F_{\text{elastic}} \cdot F_{\text{CAP}}(P) \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\text{elastic}}$ 为弹性极限面应力; $F_{\text{elastic}}$ 为弹性强度与失效面强度之比,可根据单轴拉伸强度 $f_t$ 和单轴压缩强度 $f_c$ 确定; $F_{\text{CAP}}(P)$ 为弹性极限面帽子函数,用于限制静水压力下弹性偏应力。

残余强度面应力定义为:

$$\sigma_{\text{residual}} = B \cdot P^{*M} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\text{residual}}$ 为残余强度面应力; $B$ 为残余强度面常数; $M$ 为残余强度面指数。

## 2 数值模型

### 2.1 建模

利用ANSYS/LS-DYNA软件建立2D数值模型,模型厚度为一个单元,在 $z$ 轴上施加约束,限制模型变形。单元类型选择3D SOLID164,模型尺寸为1000 mm × 1000 mm × 1 mm,单元长度设置为5 mm;网格划分时,对模型切割处理使得每个单元为六面体单元,炸药和炮孔周围单元网格细化处理,炮孔直径和炸药直径均为60 mm。后处理阶段岩石采用Lagrange算法,空气和炸药采用Euler算法,通过关键字\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID实现流固耦合;地应力采用dynain文件法<sup>[17]</sup>实现应力初始化。

### 2.2 材料参数设置

HJC本构模型由关键字\*MAT\_JOHNSON\_HOLMGUIST\_CONCRETE定义,RHT本构模型由关键字\*MAT\_RHT定义。炸药材料由关键字\*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN定义,炸药状态方程为JWL状态方程<sup>[18]</sup>:

$$P_{\text{CJ}} = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{CJ}}$ 为爆轰产物的压力; $E_0$ 为单位体积内能; $V$ 为相对体积; $A, B, R_1, R_2, \omega$ 均为常数,通常采用炸药圆筒试验<sup>[19]</sup>确定。

空气材料使用\*MAT\_NULL模型,密度为1.29 kg/m<sup>3</sup>,采用\*LINEAR\_POLYNOMIAL关键字定义空气状态方程:

$$P_a = C_0 + C_1 \gamma + C_2 \gamma^2 + C_3 \gamma^3 + (C_4 + C_5 \gamma + C_6 \gamma^2) E_0 \quad (10)$$

式中: $P_a$ 为气体压力; $\gamma$ 为相对体积; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 均为常数,理想气体 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ 。

模型参数详见表1~4,采用g-cm- $\mu\text{s}$ 单位制。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 无地应力作用下的爆破效果

ANSYS/LS-DYNA模拟一般采用有效应力表征岩石应力特性,反映炸药起爆后岩体介质中爆炸应力场的动态变化过程。无地应力状态下2种本构模型在40、80、120  $\mu\text{s}$ 时的有效应力云图如图5~6所示。炸药

表1 HJC本构模型参数

Table 1 Parameters of HJC constitutive model

项目	数值	项目	数值	项目	数值
$\rho_{\text{岩石}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.66	A	0.79	C	0.007
G/GPa	17	B	0.61	$D_1$	0.04
$f_c/\text{MPa}$	150	N	1.6	$D_2$	1.0
T/MPa	4.0	SFMAX	5.0	EFMIN	0.01
$P_c/\text{MPa}$	16	$P_1/\text{MPa}$	800	$K_1/\text{GPa}$	85
$\mu_c$	0.001	$\mu_1$	0.1	$K_2/\text{GPa}$	-171
$K_3/\text{GPa}$	208				

表2 RHT本构模型参数

Table 2 Parameters of RHT constitutive model

项目	数值	项目	数值	项目	数值
$\rho_{\text{岩石}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.66	$\alpha$	1.1	$P_{al}/\text{GPa}$	0.000 4
$P_{\text{comp}}$	0.06	$N_p$	4.0	$A_1/\text{GPa}$	0.867 1
$A_2/\text{GPa}$	1.456 7	$A_3/\text{GPa}$	0.890 34	$T_1/\text{GPa}$	43.87
$T_2/\text{GPa}$	0	$f_c/\text{MPa}$	150	$F_T^*$	0.1
$F_s^*$	0.38	G/GPa	17	$D_1$	0.04
$D_2$	1.0	$\varepsilon_p^m$	0.012	$\xi$	0.5
A	1.6	N	0.6	$Q_0$	0.64
B	0.010 5	$\varepsilon_0^c/\text{ms}^{-1}$	$3.0\times 10^{-11}$	$\varepsilon_0^i/\text{ms}^{-1}$	$3.0\times 10^{-12}$
$\beta_c$	0.010 6	$\beta_f$	0.014 4	$\varepsilon_0^s/\text{ms}^{-1}$	$3.0\times 10^{19}$
$\varepsilon^i/\text{ms}^{-1}$	$3.0\times 10^{19}$	$G_c^*$	0.4	$G_T^*$	0.7
$A_f$	1.62	$N_f$	0.6		

表3 空气状态方程参数

Table 3 Parameters of equation of state for air

$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/\text{MPa}$	$V_0$
0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25	0

表4 炸药材料参数

Table 4 Parameters of explosive materials

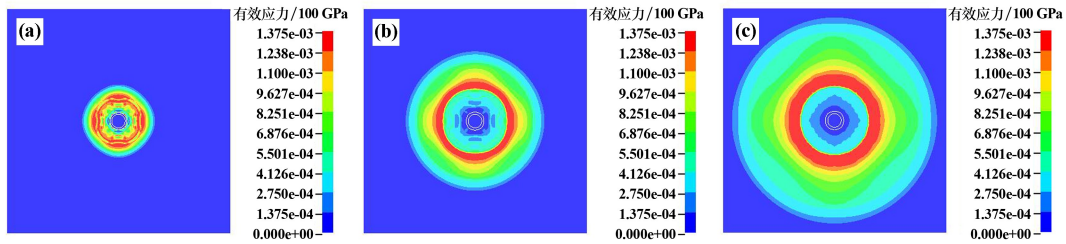
$\rho_{\text{炸药}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	D/ ( $\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ )	$P_{cl}/\text{GPa}$	A/ GPa	B/ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
1.5	0.512 2	9.53	276.2	8.44	5.2	2.1	0.5	3.87

爆炸后产生的冲击波在炮孔周围均匀分布,爆炸初期的冲击波在极短时间内达到峰值,迅速作用于岩体,形成粉碎区,而后继续对岩体做功,能量逐渐损耗,冲击波衰减为应力波。相较而言,RHT本构模型的应力传播速度和衰减速度更快,作用于粉碎区的有效应力范围更广。

2种本构模型在50、100、150  $\mu\text{s}$ 时的损伤云图如图7~8所示。作用时间越久,岩体损伤范围越大。HJC本构模型中的岩体损伤集中在炮孔周围,没有呈现裂纹扩展现象;而RHT本构模型中的岩体损伤范围较大,以裂纹形式向外扩散。与文献[20]的试验结果相比,本文模拟的HJC本构模型没有形成裂纹,结果相差较大,这可能与HJC本构模型的损伤累积与等效塑性应变及压力有关,无法捕捉模型的拉伸破坏行为;RHT本构模型的模拟结果与文献[20]的裂纹扩展基本一致。

### 3.2 不同地应力作用下的爆破效果

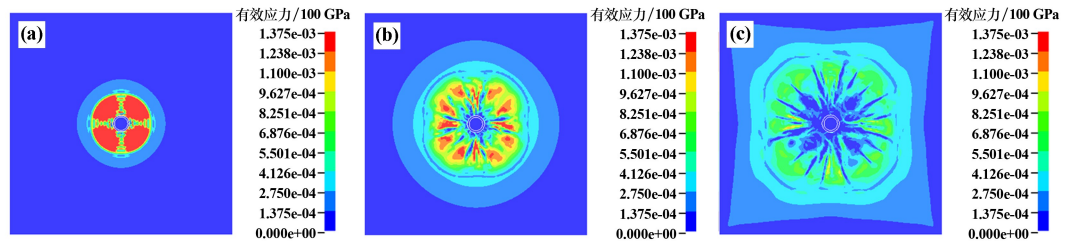
为了探究不同地应力作用下的爆破效果,选取A、B两点,如图9所示。A点位于爆心距10 cm处,处于爆炸冲击波作用范围;B点位于爆心距40 cm处,此处冲击波衰减为应力波。



(a)  $t = 40 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 80 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 120 \mu\text{s}$

图5 HJC本构模型有效应力图

Fig.5 Effective stress of HJC constitutive model



(a)  $t = 40 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 80 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 120 \mu\text{s}$

图6 RHT本构模型有效应力图

Fig.6 Effective stress of RHT constitutive model

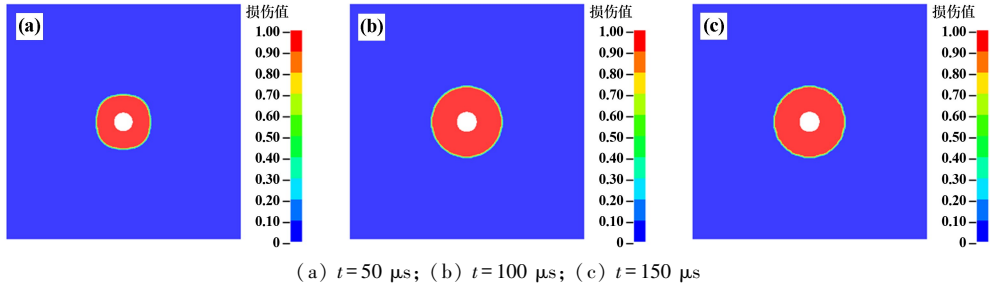


图 7 HJC 本构模型损伤云图

Fig.7 Damage nephogram of HJC constitutive model

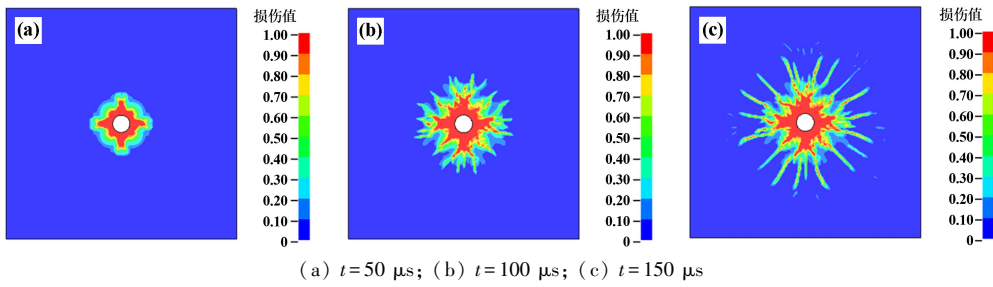


图 8 RHT 本构模型损伤云图

Fig.8 Damage nephogram of RHT constitutive model

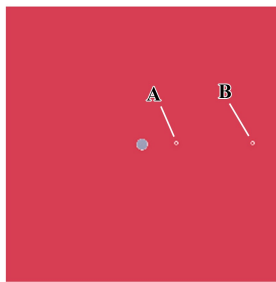


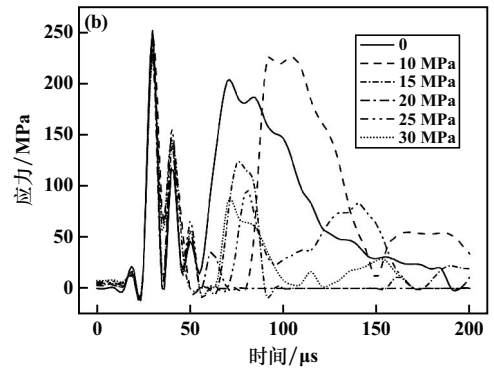
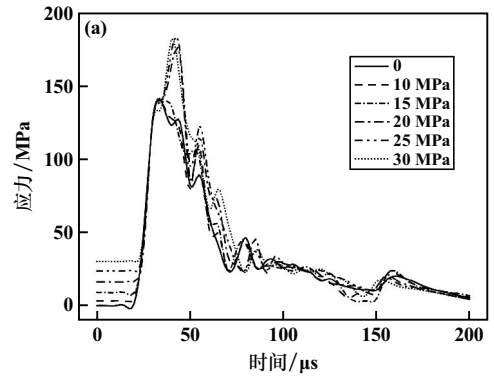
图 9 取点示意图

Fig.9 Schematic diagram of selected points

在地应力分别为 0、10、15、20、25、30 MPa 条件下,分析 2 种本构模型在 A 点的有效应力时程曲线,如图 10 所示。RHT 本构模型的应力传播速度和衰减速度比 HJC 本构模型快,冲击波从产生到衰减仅 40  $\mu s$  左右,而 HJC 本构模型的应力时程曲线更为平滑,衰减时间更长,为 100  $\mu s$  左右。与文献[21]研究结果对比发现,HJC 本构模型的有效应力时程曲线更符合实际情况。与文献[22]研究结果相互验证发现,不同工况下,2 种本构模型应力达到峰值的时间基本一致,HJC 本构模型应力曲线波形基本相同,即地应力对爆炸冲击波和应力波的传播影响较小。

2 种本构模型在 B 点的有效应力时程曲线如图 11 所示。结合 A 点的有效应力时程曲线可知,距离炮孔较近的区域,由于爆破冲击波远大于初始地应

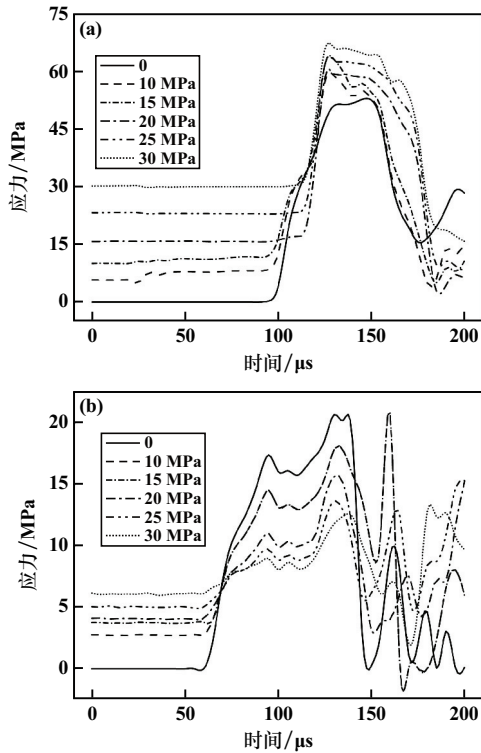
力,地应力对有效应力峰值没有太大影响。距离炮孔较远时,冲击波衰减成为应力波,与地应力处于相同数量级时,地应力对有效应力峰值影响较大。



(a) HJC 本构模型; (b) RHT 本构模型

图 10 2 种本构模型在 A 点的有效应力时程曲线

Fig.10 Time history curves of effective stress of two constitutive models at A point



(a) HJC 本构模型; (b) RHT 本构模型

图 11 2 种本构模型在 B 点的有效应力时程曲线

Fig. 11 Time history curves of effective stress of two constitutive models at B point

### 3.3 不同地应力下岩石损伤结果分析

文献[23]指出,若某损伤区域损伤变量  $D > 0.8$ ,则为粉碎区;损伤变量分布在  $0.2 \sim 0.8$  之间,则为裂隙区。基于本文模拟结果,通过后处理软件 LS/PREPOST 计算各单元的损伤变量,分析不同地应力对岩石粉碎区和裂隙区的影响。统计损伤变量稳定时刻  $260 \mu\text{s}$  时 2 种模型岩石粉碎区与裂隙区在整体岩石中的占比,结果如表 5~6 所示。

表 5  $260 \mu\text{s}$  时 HJC 本构模型岩石粉碎区与裂隙区占比Table 5 Proportion of damage zones and fracture zones at  $260 \mu\text{s}$  in HJC constitutive model %

损伤区域	地应力/MPa					
	0	10	15	20	25	30
粉碎区 ( $D > 0.8$ )	3.85	3.92	3.99	4.00	4.11	4.16
裂隙区 ( $0.2 \leq D \leq 0.8$ )	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11

表 6  $260 \mu\text{s}$  时 RHT 本构模型岩石粉碎区与裂隙区占比Table 6 Proportions of damage zones and fracture zones at  $260 \mu\text{s}$  in RHT constitutive model %

损伤区域	地应力/MPa					
	0	10	15	20	25	30
粉碎区 ( $D > 0.8$ )	5.09	3.60	3.46	3.09	2.79	2.76
裂隙区 ( $0.2 \leq D \leq 0.8$ )	8.36	6.50	5.00	3.91	3.44	2.39

由表 5~6 可知,随着地应力增大,RHT 本构模型中岩石粉碎区和裂隙区占比均逐渐减小,说明地应力可有效抑制爆破对岩石的损伤,且随着地应力增大,这种抑制效果逐渐增强;而 HJC 本构模型中岩石粉碎区和裂隙区占比均增大,说明 HJC 本构模型对裂隙区的模拟不理想,RHT 本构模型能较好模拟裂纹扩展的效果。

文献[24]研究发现,钻孔爆破中,炮孔周围受地应力作用影响,会产生应力集中。对于 HJC 本构模型,岩石损伤集中在炮孔周围,爆炸产生的冲击波与因地应力产生的应力集中共同作用,形成粉碎区,随着初始地应力增加,应力集中更加严重,使得粉碎区变大。对于 RHT 本构模型,岩石损伤不仅集中在炮孔周围,还会以裂纹形式向外扩展,文献[23]指出,地应力主要对后期爆生气体静作用阶段的裂纹扩展起抑制作用,故地应力从  $10 \text{ MPa}$  增大到  $30 \text{ MPa}$  时,RHT 本构模型中岩石粉碎区占比仅降低了  $0.84$  百分点,裂隙区占比降低了  $4.11$  百分点,说明地应力对 RHT 本构模型中岩石粉碎区影响不大,对裂隙区影响较大。

## 4 结论

1) 在爆破模拟过程中,HJC 本构模型对于爆炸产生的冲击波和应力波传播的模拟结果更贴近工程实际,而 RHT 本构模型对爆炸产生的损伤结果模拟得更好。

2) 分别在爆炸冲击波作用范围和应力波作用范围内取 A、B 两点,发现在冲击波作用范围内,地应力对峰值应力没有太大影响;在应力波作用范围内,地应力对峰值应力有较大影响。

3) 对比不同地应力下岩石损伤结果发现,在 RHT 本构模型中地应力对损伤变量有明显抑制作用,随着地应力增大,对岩石损伤变量的抑制效果会逐渐减弱。

4) 不同初始地应力在不同本构模型中对岩石损伤变量影响不同,初始地应力对 HJC 本构模型整体影响较小,对 RHT 本构模型的粉碎区影响较小,对裂隙区影响较大。

## 参考文献 (References):

- [1] 方成成,张义平,池恩安,等. 基于组合赋权-TOPSIS 的爆破方案优选[J]. 公路工程, 2021,46(2):65-70.  
FANG Chengcheng, ZHANG Yiping, CHI En'an, et al. Blasting scheme optimization based on combination weighting-TOPSIS [J]. Highway Engineering, 2021,46(2):65-70.
- [2] 魏可心,徐振洋,王雪松,等. 填塞长度对岩体爆破损伤效果的影响研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):16-21.  
WEI Kexin, XU Zhenyang, WANG Xuesong, et al. Influence of

- stemming length on damage effect of rock blasting[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(3):16-21.
- [3] 张袁娟,王凤凰,王幸荣. 预裂缝宽度对爆破效果影响研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(2):31-33.  
ZHANG Yuanjuan, WANG Fenghuang, WANG Xingrong. Influence of pre-split fracture width on blasting effect[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(2):31-33.
- [4] 付俊,周罕,徐继刘,等. 露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):32-34.  
FU Jun, ZHOU Han, XU Jiliu, et al. Study on characteristics and law of blasting vibration for open-pit slopes in limestone mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023,43(1):32-34.
- [5] 李晓静,韩雪瑞,张向阳,等. 爆炸冲击波下地应力对岩石裂纹扩展的影响[J]. *山东建筑大学学报*, 2024,39(1):1-8.  
LI Xiaojing, HAN Xuerui, ZHANG Xiangyang, et al. Effect of in-situ stress on crack propagation in rock under blast wave[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2024,39(1):1-8.
- [6] 庞宁波,杨永康. 地应力下岩石多孔爆破损伤演化数值模拟[J]. *矿业研究与开发*, 2023,43(10):119-125.  
PANG Ningbo, YANG Yongkang. Numerical simulation on damage evolution of rock porous blasting under in-situ stress[J]. *Mining Research and Development*, 2023,43(10):119-125.
- [7] 刘一帆,王梅,王晨龙,等. 地应力下节理岩体爆破损伤演化数值研究[J]. *工程爆破*, 2023,29(4):61-68.  
LIU Yifan, WANG Mei, WANG Chenlong, et al. Numerical study on blasting damage evolution of jointed rock mass under in-situ stress[J]. *Engineering Blasting*, 2023,29(4):61-68.
- [8] TANG Q, ZHOU Y, ZANG C, et al. Effect of confining pressure on the damage characteristics and mechanism of granite under ultra-high-frequency impact[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 238:212842.
- [9] NI Y, WANG Z, LI S, et al. Numerical study on the dynamic fragmentation of rock under cyclic blasting and different in-situ stresses[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024,172:106404.
- [10] RONG H, LI N, CAO C, et al. Numerical simulation of rock blasting under different in-situ stresses and joint conditions[J]. *PloS One*, 2024,19(4):e0299258.
- [11] 彭涛,王蒙. 模拟爆炸冲击加载下岩石破裂行为的改进JH2模型[J]. *力学季刊*, 2024,45(1):167-176.  
PENG Tao, WANG Meng. An improved JH2 model for modelling rock fracture under blasting and impact loads[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2024,45(1):167-176.
- [12] LIU J, ZHANG J. A modified HJC model for geological materials subjected to blasting loadings[J]. *Structures*, 2023,58:105483.
- [13] LI S, LING T, LIU D, et al. Determination of rock mass parameters for the RHT model based on the Hoek-Brown criterion[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023,56(4):2861-2877.
- [14] 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.  
ZHANG Sherong, 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.
- [15] 辛春亮,薛再清,涂建,等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2020.  
XIN Chunliang, XUE Zaiqing, TU Jian, et al. Handbook of material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2020.
- [16] 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]. *煤炭学报*, 2024,49(增刊1):261-273.  
QIU Xue, LIU Xiaohui, HU Ankui, et al. Research on numerical simulation of coal dynamic RHT constitutive model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024,49(S1):261-273.
- [17] YANG Jiakai, LIU Kewei, LI Xudong, et al. Stress initialization methods for dynamic numerical simulation of rock mass with high in-situ stress[J]. *Journal of Central South University*, 2020,27(10):3149-3162.
- [18] WANG Z, WANG H, WANG J, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021,135:104172.
- [19] 崔浩,郭锐,顾晓辉,等. BP 神经网络和圆筒能量模型标定炸药药的 JWL 参数[J]. *火炸药学报*, 2021,44(5):665-673.  
CUI Hao, GUO Rui, GU Xiaohui, et al. Calibration of JWL parameters of explosive by BP neural network and cylinder energy model[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021,44(5):665-673.
- [20] BANADAKI D M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011,40:16-25.
- [21] 高鑫,孔祥振,方秦,等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022,42(12):68-80.  
GAO Chu, KONG Xiangzhen, FANG Qin, et al. Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022,42(12):68-80.
- [22] 马昊阳. 高地应力下岩石爆破应力波传播及裂纹扩展规律研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.  
MA Haoyang. Study on stress wave propagation and crack extension law of rock blasting under high in-situ stress[D]. Shenyang: Shenyang Industrial University, 2023.
- [23] 胡英国,卢文波,陈明,等. 岩体爆破近区临界损伤质点峰值震动速度的确定[J]. *爆炸与冲击*, 2015,35(4):547-554.  
HU Yingguo, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Determination of critical damage PPV near the blast hole of rock-mass[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015,35(4):547-554.
- [24] 王凯飞,张昌锁,郝兵元,等. 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(增刊1):50-64.  
WANG Kaifei, ZHANG Changsuo, HAO Bingyuan, et al. Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress[J]. *Coal Science and Technology*, 2023,51(S1):50-64.
- 引用本文:缪广红,张旭,孙伟波,等. 不同本构模型下地应力对爆破效果的影响研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(2):13-19.  
MIAO Guanghong, ZHANG Xu, SUN Weibo, et al. Influence of in-situ stress on blasting effects under different constitutive models[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(2):13-19.