

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.015

# 不耦合岩孔爆破数值模拟时等效荷载取值问题探讨

汪鹏程, 郭劲松, 夏文丽, 徐永恺

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为探讨不耦合装药爆破等效荷载合理取值问题,文章分别建立不同不耦合系数实体炸药模型和按岩石破裂 I 区范围相等为等效标准的施加荷载模型,经过多次试算确定各不耦合系数相应的等效荷载,得到等效荷载峰值与不耦合系数的对应关系,拟合得出不同不耦合系数下的孔壁压力调整系数。结合现有孔壁压力峰值计算公式得到不耦合系数相关的等效荷载经验公式。对 3 个不同不耦合系数岩石单孔爆破实例均采用炸药实体和施加等效荷载 2 种方法进行模拟,并重点从岩石损伤范围、质点峰值振动速度和峰值压力 3 个方面进行对比分析。结果表明,2 种模型数值模拟结果吻合度较高,验证了经验公式的准确性。该研究为不耦合装药爆破的等效荷载合理取值提供一定的参考。

**关键词:**爆破;等效荷载;数值模拟;不耦合系数;损伤范围

**中图分类号:**TD235.11

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2025)11-1533-09

## Discussion on equivalent load values in numerical simulation of uncoupled rock hole blasting

WANG Pengcheng, GUO Jinsong, XIA Wenli, XU Yongkai

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

**Abstract:**In order to discuss the reasonable value of equivalent load in uncoupled charge blasting, the solid explosive models with different uncoupling coefficients and the equivalent load models based on the equal range of rock fracture I zone are established in this paper. After multiple trial calculations, the corresponding equivalent load of each uncoupling coefficient is determined, and then the corresponding relationship between the peak value of equivalent load and the uncoupling coefficient is obtained. The adjustment coefficients of hole wall pressure under different uncoupling coefficients are obtained by fitting. Combined with the existing formula for calculating the peak pressure of hole wall, the empirical formula of equivalent load related to uncoupling coefficient is obtained. Three examples of rock single-hole blasting with different uncoupling coefficients are simulated by explosive solid method and equivalent load method, and the damage range, peak particle velocity and peak pressure of rock are investigated and compared. The results show that the numerical simulation results of the two models are in good agreement, which verifies the accuracy of the empirical formula. This study provides a reference for the reasonable value of the equivalent load of uncoupled charge blasting.

**Key words:**blasting; equivalent load; numerical simulation; uncoupling coefficient; damage range

目前,学者们研究爆破技术的主要方法是数值模拟和爆破试验,爆破试验能够较为真实地反映实际的爆破效果,但缺点在于需要耗费大量的

时间及资金,且试验过程存在一定的危险性,材料不易重复利用。随着爆破理论和计算机技术的飞速发展,数值模拟已成为研究爆炸与冲击的有效

**收稿日期:**2023-07-03;**修回日期:**2023-10-12

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(12272119);国家自然科学基金联合基金资助项目(U1965101)

**作者简介:**汪鹏程(1968—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:zjuwangpc@hfut.edu.cn.

方法。

爆破震动传播的数值模拟主要采用 3 种方式:① 使用 LS-DYNA 软件,运用软件中的高性能炸药材料及其状态方程关键字来定义炸药,进而模拟整个炸药爆轰过程;② 建立无炮孔模型,在炮孔连心线和炮孔轴线确立的平面上施加等效荷载时程曲线;③ 直接在炮孔壁上施加半经验半理论荷载曲线。

第 1 种方法是国内外学者常使用的传统数值模拟方法,大量的研究表明建立炸药模型能够较为真实地模拟炸药爆破过程,但缺点在于模型复杂,且计算时间较长。第 2 种方法基于圣维南原理,不设炮孔模型,可以大量减少建模工作量和计算时间,其缺点也很明显,只适用于单排多个起爆点的情况,与第 1 种方法相比,所得结果在爆破近区的差异较大,在中远区差别较小,故更适用于中远区的爆破震动研究。第 3 种方法适用于单孔和多孔爆破,该方法计算效率较高、操作方便,且能够根据炸药的种类、装药不耦合系数等灵活调整等效荷载峰值,但最明显的缺点是无法描述高温高压的爆炸气体作用于孔壁的过程和爆生气体促进裂纹扩展的准静态作用。

文献[1]采用 LS-DYNA 软件比较不同荷载施加方法的数值模拟结果,得出使用等效爆破荷载施加方法对中远区的爆破震动场进行数值模拟是可行的;文献[2]利用圣维南荷载等效原理,将爆破荷载等效施加在同排炮孔连心线上,数值模拟结果与现场试爆试验结果对比得出,爆破荷载等效施加方法在近区存在一定差异,但在中远区吻合得较好;文献[3]将爆炸荷载等效施加在岩体破碎区边界上,用 LS-DYNA 软件完成台阶爆破振动全历程模拟,结果与现场实测数据能较好吻合;文献[4]采用有限元软件对无炮孔和有炮孔 2 种模型进行数值模拟分析,发现二者的振速均随着爆心距离的增大而减小,衰减规律基本一致,且衰减速度和数值上的差别越来越小;文献[5]建立微差爆破荷载等效施加方式的关系式,对中远场岩体振动特性数值模拟有良好的效果;文献[6]将真实爆破荷载峰值沿炮眼连心线方向等效成阶梯型爆破荷载,按微差顺序施加在爆破轮廓面上,结果表明该方法对远场振动效应研究是可行的;文献[7]施加爆破荷载到多个爆破孔的等效弹性边界上,通过与现场监测数据的分析比较,得出这种等效模拟方法是有效的。

在用施加等效荷载代替炸药爆炸过程的研究

中,学者们多数采用了第 2 种方法,而在炮孔壁上直接施加半经验半理论荷载曲线的方法研究并不多,尤其等效荷载取值时人为性、任意性较大。本文拟采用直接在炮孔壁上施加半经验半理论荷载曲线的方法,基于有限元软件 LS-DYNA 建立有实体炸药模型和无实体炸药模型(等效荷载模型)建立等效评估标准,并结合相关理论公式,得到等效荷载峰值经验公式。最后从 2 种模型的岩石损伤范围、质点峰值振动速度和峰值压力等方面进行分析,验证了等效荷载峰值经验公式的合理性。

## 1 施加等效荷载方法

### 1.1 荷载施加方式

使用\* DEFINE\_CURVE 关键字定义荷载曲线,再通过边界条件关键字\* SET\_SEGMENT 和 LOAD\_SEGMENT\_SET 把荷载施加在炮孔壁上。

### 1.2 荷载曲线

本文采用指数型荷载曲线,该荷载形式需要确定两大要素:① 爆破荷载峰值;② 爆破荷载升压时间和荷载持续时间。

#### 1.2.1 爆破荷载峰值强度

爆轰气体作用在炮孔壁上的平均爆轰压力计算公式<sup>[8]</sup>为:

$$P_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (1)$$

其中: $P_0$  为炸药爆轰平均初始压力; $\rho_0$  为炸药密度; $D$  为炸药爆轰速度; $\gamma$  为炸药等熵指数,一般取  $\gamma=3$ 。

耦合装药情况下,炸药平均爆轰压力等于作用在炮孔壁上的荷载峰值压力,即

$$P_b = P_0 \quad (2)$$

其中, $P_b$  为孔壁峰值压力。

不耦合装药条件下,孔壁爆破峰值压力为:

$$P_b = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d}\right)^{2\gamma} \quad (3)$$

其中: $d_c$  为装药半径; $d$  为炮孔半径。

#### 1.2.2 爆破荷载升压时间和荷载作用时间

一般认为,炮孔内爆破压力持续时间约为数百微秒,爆破荷载升压时间在  $100 \mu\text{s}$  内<sup>[9-10]</sup>,结合实际炸药数值模拟结果,将炮孔内爆破荷载压力升压时间定为  $50 \mu\text{s}$ ,持续时间为  $600 \mu\text{s}$ 。

#### 1.2.3 爆破荷载曲线公式

根据文献[11]提出的指数型函数式为:

$$P = P_1 \frac{(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})}{(e^{-\alpha t_0} - e^{-\beta t_0})} \quad (4)$$

其中:  $P$  为时间  $t$  时的压力;  $P_1$  为等效荷载峰值压力;  $\alpha$  和  $\beta$  为调整曲线上升和下降的常数, 取  $\beta/\alpha = 2$ ;  $t_0$  为荷载升压的时间,  $t_0 = \ln(\beta/\alpha)/(\beta - \alpha) = 50 \mu\text{s}$ 。

## 2 等效荷载计算公式

### 2.1 数值计算模型的建立

采用实体炸药模型和无实体炸药模型(等效荷载模型)2种方法进行爆破计算分析, 岩石模型尺寸均为半径 400 cm、厚度 1 cm 的准二维单孔爆破模型。炮孔半径为 10 cm, 空气耦合域半径为 100 cm, 施加等效荷载模型则无需建立空气模型。模型如图 1 所示。

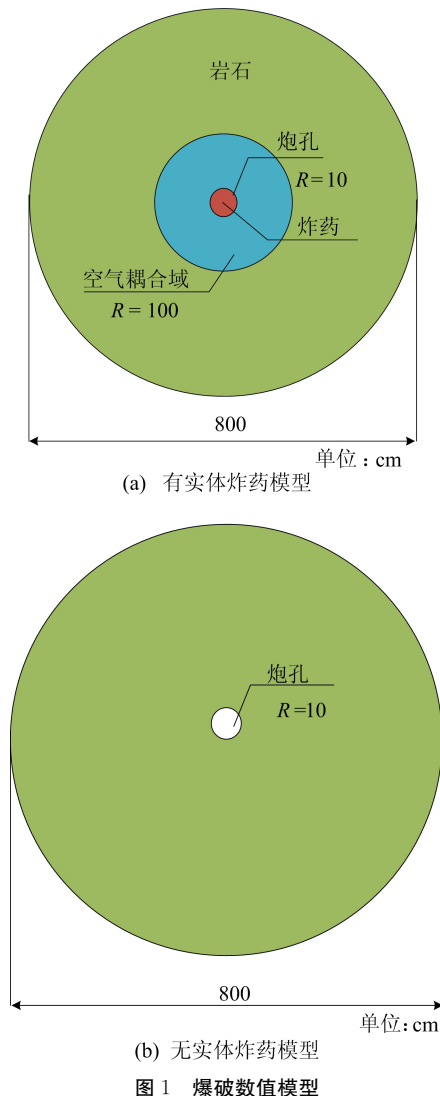


图 1 爆破数值模型

用炸药材料进行爆炸分析时, 采用多物质流固耦合算法, 即岩石采用 Lagrange 算法, 空气和炸药采用 ALE 算法。该算法的优点是炸药和流体材料在 Euler 单元中流动不存在单元畸变问

题。在前处理建模阶段, 岩石与空气、炸药采用分离式建模。

为方便研究不同不耦合系数与等效荷载压力的对应关系, 采用初始体积分法<sup>[12]</sup>定义装药不耦合系数。该方法可通过 \* INITIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY 关键字定义为多物质 ALE 中不同材料的初始体积分数, 即在建模阶段对于流体模型只需定义一种单元属性和材料属性, 完成建模后只需在 k 文件中修改初始体积分数关键字中相应参数, 即可调整炸药的位置、形状及尺寸。相比传统方法, 该方法减少了划分各个部分网格的过程, 节省建模时间, 且研究不耦合炸药爆破时无需重复建模。使用该方法需要提前在建模阶段将炮孔内流体单元网格进行细化处理, 以保证计算的精度。

岩石材料选用 RHT 模型, 该模型能较好地描述岩石压碎区的形成以及裂隙区径向与环向拉伸裂纹发展过程, 相关参数取自文献<sup>[13]</sup>, 见表 1 所列。

表 1 花岗岩 RHT 模型参数

参数	参数值	参数	参数值
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 700	$Q_0$	0.64
$G/\text{GPa}$	24.17	$B_a$	0.010 5
$f_c/\text{MPa}$	119	$A$	1.6
$N_1$	0.6	$N_p$	4
$\beta_c$	0.016	$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	6
$B_0$	1.68	$\beta_t$	0.014 4
$B_1$	1.68	$G_c^*$	2
$\alpha$	1.1	$G_1^*$	0.7
$T_1/\text{GPa}$	86.71	$\xi$	0.5
$T_2/\text{GPa}$	0	$D_1$	0.04
$F_1^*$	0.10	$D_2$	1.00
$F_S^*$	0.38	$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	40
$A_1/\text{GPa}$	86.71	$A_f$	1.62
$A_2/\text{GPa}$	145.67	$N_f$	0.60
$A_3/\text{GPa}$	89.03		

炸药选用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型, 并结合对应的 EOS\_JWL 状态方程模拟炸药爆炸冲击动力作用, JWL 状态方程式为:

$$P_{\text{ex}} = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (5)$$

其中:  $P_{\text{ex}}$  为爆轰产物的压力;  $V$  为相对体积;  $E_0$  为初始比内能;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为描述 JWL 方程的独立常数。炸药的具体参数取自文献<sup>[14]</sup>,

见表 2 所列。

表 2 炸药相关参数

参数	数值	参数	数值
$\rho_e / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 500	$R_2$	1.6
$C_d / (\text{m}/\text{s})$	7 450	$\omega$	0.28
$A_j / \text{GPa}$	625.0	$P_{Cj} / \text{GPa}$	22
$B_j / \text{GPa}$	23.3	$E_j / \text{GPa}$	8.56
$R_1$	5.25		

空气采用 MAT\_NULL 模型和多项式 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 进行描述,其表达式为:

$$P_a = C_0 + C_1 V_0 + C_2 V_0^2 + C_3 V_0^3 + (C_4 + C_5 V_0 + C_6 V_0^2) E_0 \quad (6)$$

其中: $P_a$  为气体压力; $V_0$  为气体体积; $E_0$  为气体内能;对于理想气体, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ , $C_4 = C_5 = 0.4$ 。

### 2.2 等效荷载的试算

为验证理论计算出的孔壁压力峰值是否能直接作为等效荷载峰值施加在炮孔壁上,需要建立不同不耦合系数的有实体炸药模型以及施加不同等效荷载的无实体炸药模型,对比二者岩石损伤和爆炸响应效果,以此建立不耦合系数与等效荷载峰值对应关系的衡量标准。

#### 2.2.1 等效评估标准

爆破破岩是高温、高压、高速的瞬态过程,其机理研究难度大,多数学者认为爆生气体和应力波综合作用是破岩的主要原因。根据岩石在冲击荷载和高强度应力波作用下的破坏特征,通常将单个炮孔周围岩石分为 3 个区域:破碎区(炸药产生冲击波导致岩石被压碎)、破裂区(岩石发生径向压缩产生裂隙)和弹性振动区(岩石受弹性振动而不破裂)。

根据文献[15]提出的改进的钻孔爆破破坏分区模型,可以把破裂区划分为 2 个部分:内侧靠近压碎区的部分为破裂 I 区,损伤类型为塑性破坏;外侧部分为破裂 II 区,损伤类型为径向裂缝破坏。破坏分区示意图如图 2 所示。

设定计算时间为 1 500  $\mu\text{s}$ ,此时损伤演化已基本稳定,时间步长取 10  $\mu\text{s}$ 。在爆破应力波作用下,岩石径向受压、切向受拉。由于岩石本身抗拉性弱,使其在拉应力的作用下产生径向裂隙。岩石中的径向裂隙是岩石爆破破坏的主要形式,因此破裂区的扩展范围对爆破效果评估有着重要意义,所以可用破裂 I 区的半径和破裂 I 区边缘

的单元压力、振动速度时程曲线作为评估爆破效果的标准。

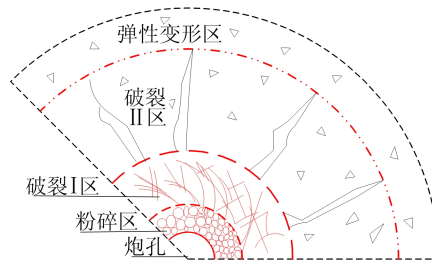
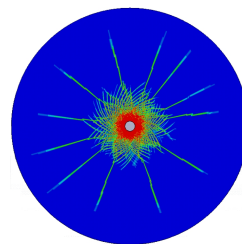


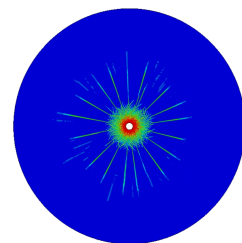
图 2 岩石爆破破坏分区示意图

#### 2.2.2 等效荷载模型的试算

若直接以不耦合系数对应的孔壁压力峰值作为等效荷载峰值,则对比等效荷载方法与传统不耦合装药方法的爆破效果效果较差。以不耦合系数  $K$  为 1.54 的有实体炸药模型和以相应理论计算得到的孔壁压力峰值  $P_b$  作为等效荷载峰值  $P_1$  施加的无实体炸药模型为例,所得岩石损失效果对比如图 3 所示。



(a)  $K=1.54$  的有实体炸药模型



(b)  $P_1=800 \text{ MPa}$  的无实体炸药模型

图 3 岩石损伤对比图

由于炮孔内炸药爆炸后对炮孔壁的作用非常复杂,无论从理论还是试验的角度,都难以准确获得爆破炮孔壁压力峰值。同时,现有的不耦合装药爆破孔壁压力峰值计算方法缺乏与等效爆破荷载峰值计算直接相关的理论分析和数值模拟计算,因此直接以不耦合系数对应的孔壁压力峰值作为等效荷载峰值。会使计算结果与实际情况存在较大差距。文献[16-17]提出应用这种常用的计算方法得到的孔壁压力峰值需要添加一个压力调整系数  $n$ ,  $n$  的取值直接影响理论值与数值模拟

值的契合程度。

为建立等效荷载峰值与不耦合系数的关系,提取不耦合装药模型的孔壁峰值压力作为等效荷载取值的参考,再经过大量不同的等效荷载模型的试算,以 50 MPa 为间隔,本文建立了以 300~

4 000 MPa 为等效荷载峰值的多个等效荷载模型,与不耦合装药模型逐一进行对比,当二者的爆破破裂 I 区半径相差在 10% 以内时,可以看成二者在爆破近区的爆破效果相当。由于篇幅所限,仅列出部分结果的对比,如图 4 所示。

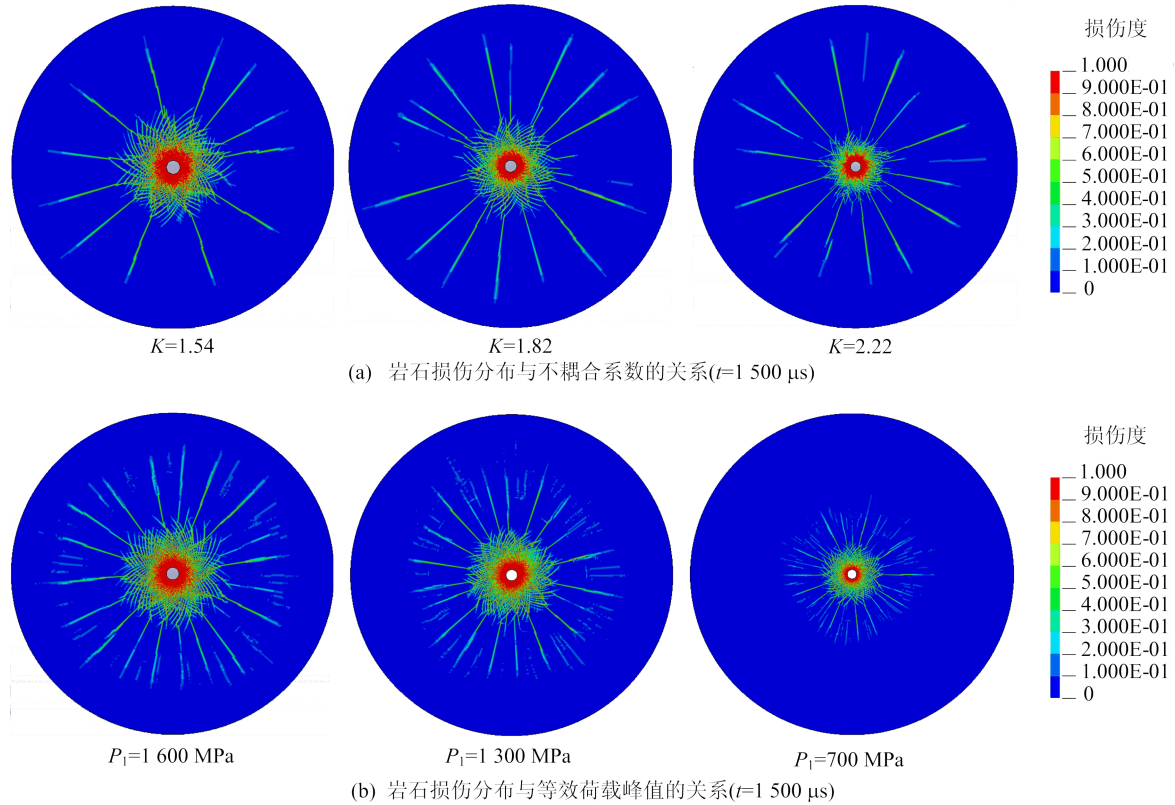


图 4 岩石损伤分布图

从图 4 可以看出,损伤度随炮心距增加大致呈由大到小的分布规律,炮孔附近岩石完全损伤,即损伤度为 1,在图中呈红色区域。损伤主要以放射状裂隙形式向外发展,随着不耦合系数的增加及等效荷载峰值的减小,压碎区和破裂区范围呈现逐渐减小的趋势。在 2 种模型中分别取 3 组对比岩石破坏分区范围,见表 3 所列。

型的破裂 I 区半径相差 2.9% 和 0.9%,二者破裂 II 区的半径相差 11.6% 和 33.9%;当不耦合系数较大(不耦合系数为 2.22)时,2 种模型的破裂 I 区半径相差 5.6%,而二者破裂 II 区的半径相差 51.3%,不耦合装药模型明显比等效荷载模型的破裂 II 区范围大。

文献[18]认为在岩石爆破中,当采用不耦合装药时,应力波的峰值将随不耦合系数的增大而降低,同时爆生气体准静态压力的作用将得到加强。不耦合系数较大时,应力波对破裂 II 区范围的影响是有限的,更多是依靠爆生气体以准静态压力的形式作用于应力波形成的裂隙区,并以膨胀、挤压、气楔等综合作用使径向裂隙产生二次扩展。而由于等效荷载模型无法描述高温高压的爆炸气体作用于孔壁的过程和爆生气体促进裂纹扩展的准静态作用,产生的破裂 II 区范围较小。

由表 3 可知:当不耦合系数较小(不耦合系数为 1.54、1.82)时,等效荷载模型与不耦合装药模

在 2 种模型的破裂 I 区边缘提取单元的压力-时程和振动速度-时程曲线进行对比,结果如

表 3 岩石破坏分区半径范围 单位:cm

组别	模型类型	破裂 I 区	破裂 II 区
I 组	K=1.54 有炸药	144	353
	P <sub>1</sub> =1 600 MPa 无炸药	140	312
II 组	K=1.82 有炸药	112	342
	P <sub>1</sub> =1 300 MPa 无炸药	113	226
III 组	K=2.22 有炸药	90	310
	P <sub>1</sub> =700 MPa 无炸药	85	151

图 5、图 6 所示。

由图 5、图 6 可知:二者在破裂 I 区边缘单元的压力曲线和振动速度曲线在升压阶段和降压阶段的前段能够较好地吻合,说明二者在破裂 I 区

内的破岩过程是一致的;而二者在降压阶段的不一致反映出应力波作用在迅速地消失,含炸药模型在爆生气体作用下仍能维持一定的压力状态,从而使得二者在破裂 II 区的差异显著。

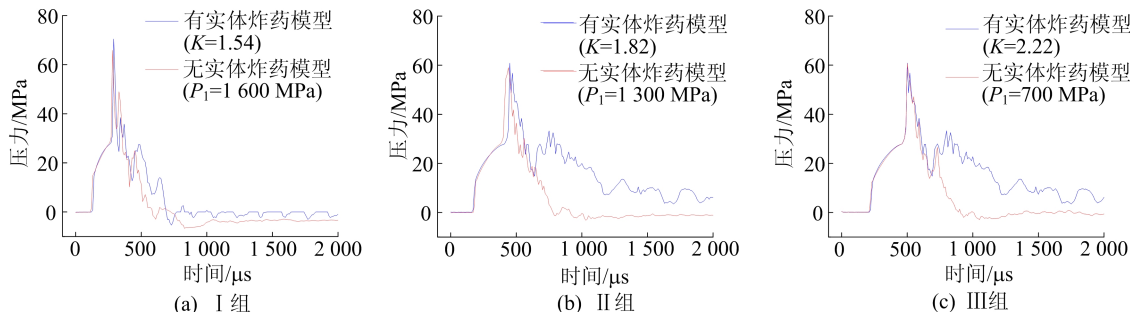


图 5 2 种模型单元压力-时程曲线对比

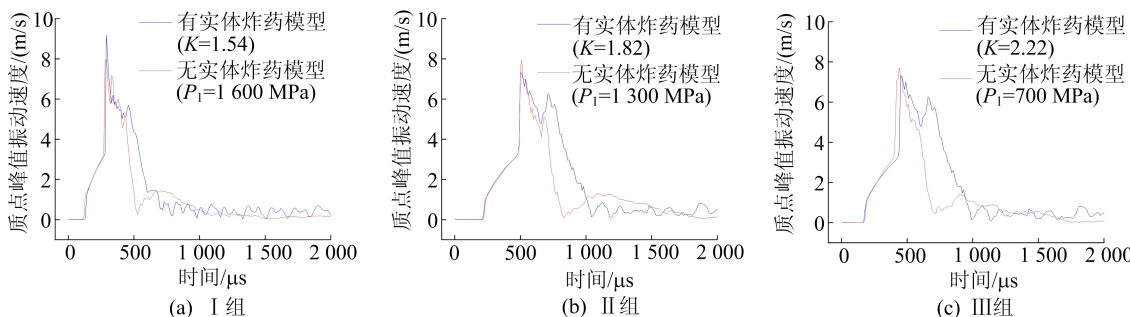


图 6 2 种模型单元峰值振速-时程对比

2.2.3 等效荷载公式的确定

为得到等效荷载峰值计算公式,以 50 MPa 为间隔,建立以 300~4 000 MPa 为等效荷载峰值的等效荷载模型,在经过大量等效荷载模型的试算,按照前文所定的评估标准,得到等效荷载峰值与理论孔壁压力峰值的对应关系,相关结果见表 4 所列。

得到的关于压力调整系数  $n$  的拟合曲线为:

$$n = 0.4105e^{1.42739K} - 1.43719 \quad (7)$$

其中: $n$  为压力调整系数; $K$  为径向不耦合系数。结果表明,压力调整系数随不耦合系数的增大呈指数型增长,拟合结果的相关系数高达 0.99,证明该曲线具有良好的拟合度。

结合式(3)和式(7),得出等效荷载峰值计算公式为:

$$P_1 = n \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d}\right)^{2\gamma} \quad (8)$$

表 4 等效荷载峰值与理论孔壁压力峰值对比

装药条件 ( $d_c/d$ )	$K$	峰值/MPa		压力调整系数
		$P_b$	$P_1$	
10.0/10	1.00	3 500	1 406.00	0.34
9.0/10	1.11	3 000	5 530.18	0.54
8.5/10	1.18	2 700	3 924.62	0.69
8.0/10	1.25	2 400	2 727.87	0.88
7.5/10	1.33	2 100	1 852.04	1.13
7.0/10	1.43	1 900	1 224.26	1.55
6.5/10	1.54	1 600	784.81	2.04
6.0/10	1.67	1 450	485.50	2.99
5.5/10	1.82	1 300	288.04	4.51
5.0/10	2.00	1 150	162.59	7.07
4.5/10	2.22	700	86.41	8.10
4.0/10	2.50	500	42.62	11.73
3.5/10	2.86	450	19.13	23.52
3.0/10	3.33	350	7.59	46.11

3 效果的验证

3.1 岩石损伤范围对比

根据文献[19]的研究,可取损伤量临界值为 0.19,损伤量 0.19 以下的岩体可视为完整岩体。用前文中 I、II 组,即不耦合系数为 1.54、1.82 的模型及其相应的等效荷载模型比较二者完整岩体,可以更加清楚地体现 2 种方法的破岩效果,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,2 种模型的岩体损伤程度都随距爆源距离增加而衰减,但有实体炸药材料模型

的径向裂缝扩展范围更大,对岩体的损伤也更大,主要由于在岩体损伤开始阶段,应力波对破岩的作用较显著,对爆破损伤的贡献较大,随着应力波的衰减,气体准静态作用逐渐凸显,表现形式是径向裂缝少且较长。

等效荷载模型只能表现应力波作用,主要使岩石产生较多的径向裂隙,而由于缺少气体准静态作用,则表现出径向裂缝多且较短。

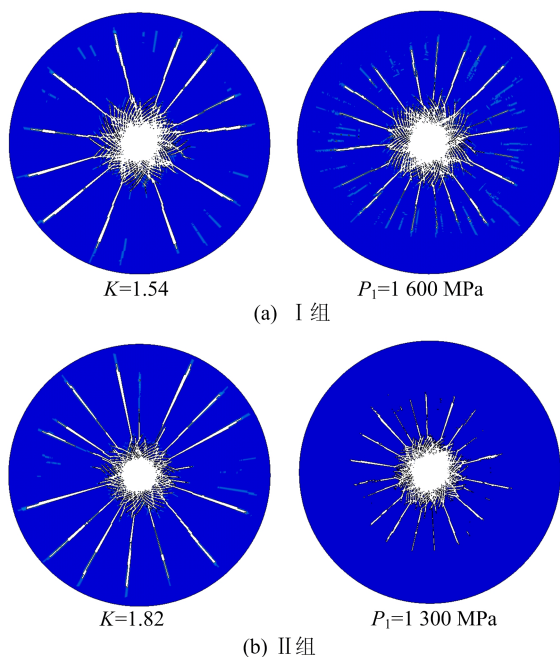


图 7 2 种模型完整岩体对比

### 3.2 测点峰值压力对比

在建立模型时,2 种模型的岩石部分网格划分是一致的,方便设置监测点。在岩石模型的  $x$  方向,每隔 10 cm 距离布置 1 个监测点,共布置 20 个监测点,如图 8 所示,并提取测点的峰值压力和质点峰值振动速度。

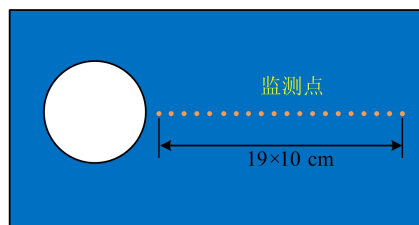


图 8 监测点布置示意图

2 种模型峰值压力对比如图 9 所示。

从图 9 可以看出:在爆破近区,距孔壁 0~20 cm 范围内,有实体炸药模型的单元峰值压力明显比无实体炸药模型(等效荷载模型)大,但这对于破碎岩石毫无益处,主要是由于峰值压力远远高于岩石的动态抗压强度,并且不会影响二者在粉碎区范围的差距;在距孔壁 20~80 cm 范围内,有实体炸药模型的单元峰值压力衰减较快,逐渐比无实体炸药模型(等效荷载模型)小;而在爆破中远区,即在距离孔壁 80 cm 范围以外,二者的峰值压力值逐渐趋于相同。

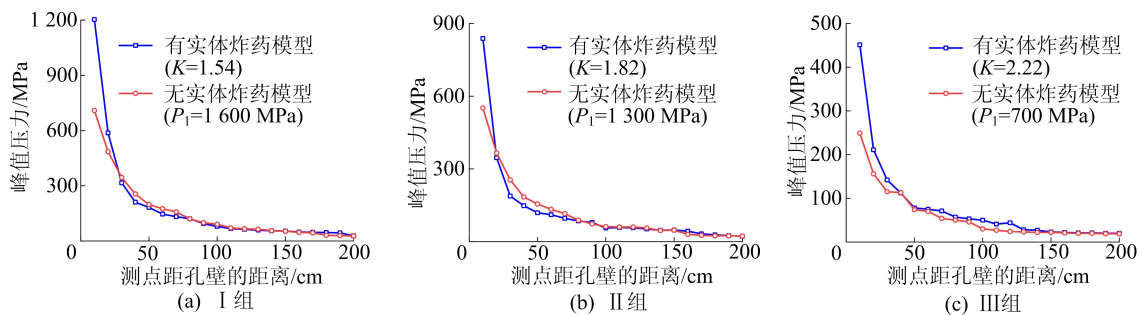


图 9 2 种模型峰值压力对比

### 3.3 质点峰值振动速度对比

爆破振动强度主要由爆破荷载、爆破振动加速度、爆破振动位移和爆破振动质点峰值振动速度等进行表征。其中,爆破振动质点峰值振动速度与振动破坏程度有较好的相关性,大多数国家和地区都以该参数作为振动破坏控制指标。文献[20]通过对爆炸前后岩体中新增裂隙的调查对比,给出了振动速度与岩石损伤的关系,具体划分

见表 5 所列。

表 5 振动速度与岩石损伤的关系

最大振动速度/(cm/s)	岩石损伤程度
<28.0	完整岩石不会损伤
[28.0,63.5)	岩石产生拉伸裂隙
[63.5,254.0)	岩石产生严重裂缝
≥254.0	岩石完全破碎

在爆破近区,炸药爆炸产生的波阵面上的压力很大,且能量衰减很快。随着传播距离的增加,能量衰减速度减慢。2种模型质点峰值振动速度对比如图 10 所示。

从图 10 可以看出,随着测点距炮孔壁距离的增加,有实体炸药模型的质点峰值振动速度随距

孔壁距离的增加而迅速衰减,距孔壁的距离越小,衰减幅度越大,衰减趋势与上述峰值压力曲线相似。2种模型得出的测点峰值压力和质点峰值振动速度曲线整体上衰减趋势一致,且在中远区吻合度较好,可见施加等效荷载模型可替代有实体炸药模型。

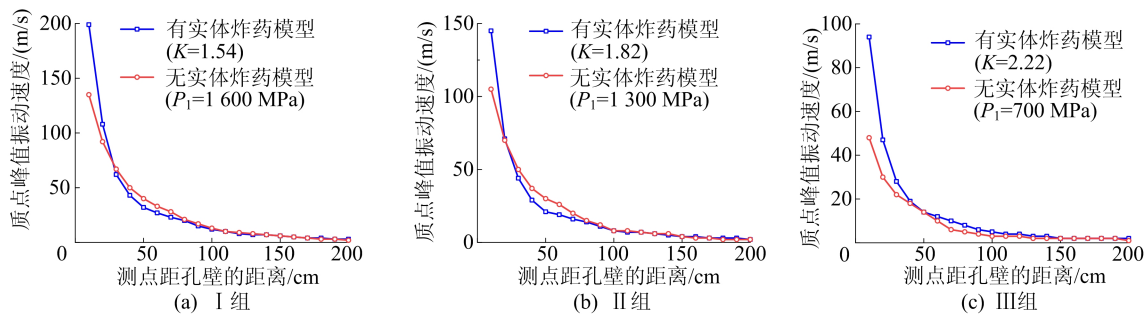


图 10 2种模型质点峰值振动速度对比

## 4 结 论

本文通过理论计算和数值模拟,建立不同不耦合系数实体炸药模型和施加等效荷载模型,结合现有孔壁压力峰值计算公式得到不耦合系数相关的等效荷载经验公式,并通过不同耦合系数岩石单孔爆破实例,对比 2 种模型的岩石损伤范围、距孔壁不同距离的峰值压力曲线和质点峰值振动速度曲线,得出如下结论:

1) 现有的不耦合装药爆破孔壁压力峰值计算方法无法直接计算出相应等效荷载峰值,需要添加一个压力调整系数  $n$ ,  $n$  随不耦合系数增大而增大。建立的  $n$  和不耦合系数的拟合曲线相关性较好,孔壁峰值压力理论值乘上  $n$  后的值可作为等效荷载的峰值。

2) 通过对二者的破裂区的划定和对比,可以看到当不耦合系数为 1.54、1.82 时,2 种模型的破裂 I 区半径相差 2.9% 和 0.9%,二者破裂 II 区的半径相差 11.6% 和 33.9%;当不耦合系数为 2.22 时,2 种模型的破裂 I 区半径相差 5.6%,而二者破裂 II 区的半径相差 51.3%,不耦合装药模型明显比等效荷载模型的破裂 II 区范围大。

3) 通过对比二者的峰值压力曲线和峰值振动速度曲线,可以看出二者在爆破近区的质点峰值振动速度和测点峰值压力曲线相差较大;二者在爆破中远区的质点峰值振动速度和测点峰值压力曲线衰减趋势逐渐趋于一致,可以看出施加等效荷载模型在中远区域可较好替代传统爆破

方法。

4) 本文采用的等效荷载方法对爆破近区的岩石损伤效果和中远区振动场有较好的模拟效果,但是无法做到对破裂 II 区裂纹的扩展和爆破近区振动的等效模拟,且所得结果缺乏实验验证,这些问题尚待进一步研究。

## [参 考 文 献]

- [1] 许红涛,卢文波,周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(1): 67-71, 103.
- [2] 张玉成,杨光华,刘鹏,等. 爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 56-64.
- [3] 杨建华,卢文波,陈明,等. 基于爆炸荷载等效施加方法的爆破振动全程数值模拟研究[C]//中国爆破新技术会议论文集. 北京:冶金工业出版社, 2012: 87-92.
- [4] 张钧堂,黄诗渊,王俊杰,等. 爆破动力荷载输入方式的比较[J]. 中国科技论文, 2016, 11(7): 813-817.
- [5] 李启月,李易,韦佳瑞,等. 中远场振动有限元分析中微差爆破荷载的等效施加方法研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(2): 1-5.
- [6] 关振长,周宇轩,吕春波,等. 空气间隔装药周边眼爆破精细化数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(4): 11-19.
- [7] LU W, YANG J, CHEN M, et al. An equivalent method for blasting vibration simulation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(9): 2050-2062.
- [8] 杨建华,卢文波,陈明. 炮孔爆炸荷载变化历程的确定[C]//中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会. 第 2 届全国工程安全与防护学术会议论文集(下册). 北京:中国岩石力学与工程学会, 2010: 773-777.

- [9] 卢文波,陶振宇. 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 140-147.
- [10] 张建华,李世禄,王玉杰,等. 爆炸扩腔数值模拟及分析[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 174-177.
- [11] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(6): 966-975.
- [12] 毕程程,王志亮,石高扬,等. 初始体积分数法在爆炸模拟中的应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 26-33, 38.
- [13] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2016.
- [14] WANG H, WANG Z, WANG J, et al. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103961.
- [15] 冷振东,卢文波,陈明,等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 101-107.
- [16] 叶志伟,陈明,李桐,等. 小不耦合系数装药爆破孔壁压力峰值计算方法[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 119-129.
- [17] CHEN M, YE Z, LU W, et al. An improved method for calculating the peak explosion pressure on the borehole wall in decoupling charge blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103695.
- [18] 徐颖,孟益平,程玉生. 装药不耦合系数对爆破裂纹控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1843-1847.
- [19] 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.
- [20] BAUER A, CALDER P N. Open pit and blast seminar: 63221[R]. Ontario: Queens University, 1978.

(责任编辑 吴亮)

## (上接第 1532 页)

- [11] 李彩金. 基于构效关系的猴头菌大分子量多糖的改性研究[D]. 上海:上海师范大学, 2017.
- [12] 康雨芳. 胶红酵母胞外多糖结构、活性及降解产物的研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2018.
- [13] XIE J H, WANG Z J, SHEN M Y, et al. Sulfated modification, characterization and antioxidant activities of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 7-15.
- [14] JIANG Y, SHANG Z, LV X, et al. Structure elucidation and antitumor activity of a water soluble polysaccharide from *Hemicentrotus pulcherrimus* [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 292: 119718.
- [15] 尹艳,宋冠华,李周玉,等. 水溶性大豆多糖溶解性的研究[J]. 惠州学院学报(自然科学版), 2009, 29(3): 13-16.
- [16] XIE S Z, YANG G, JIANG X M, et al. *Polygonatum cyrtoneuma* Hua polysaccharide promotes GLP-1 secretion from enteroendocrine L-Cells through sweet taste receptor-mediated cAMP signaling[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(25): 6864-6872.
- [17] CHEN X, ZHANG R, LI Y, et al. Degradation of polysaccharides from *Sargassum fusi forme* using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and its effects on structural characteristics[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 230: 115647.
- [18] LV Y, LIU Z, DUAN X, et al. Immunoenhancement and antioxidative damage effects of *Polygonum cillinerve* polysaccharide on RAW264. 7 cells[J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2022, 74(3): 435-445.
- [19] LI X Y, KUANG D D, GUO A J, et al. Inhibition of Ca<sup>2+</sup>-calpain signaling is a new mechanism using *Laminaria japonica* polysaccharide to prevent macrophage foam cell formation and atherosclerosis[J]. Food & Function, 2023, 14(9): 4036-4048.
- [20] LI X Y, WANG Y J, CHEN S, et al. *Laminaria japonica* polysaccharide suppresses atherosclerosis via regulating autophagy-mediated macrophage polarization[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(12): 3633-3643.
- [21] MENG Y, LYU F, XU X, et al. Recent advances in chain conformation and bioactivities of triple-helix polysaccharides[J]. Biomacromolecules, 2020, 21(5): 1653-1677.
- [22] WANG Z, CHEN X, LIU J, et al. Inclisiran inhibits oxidized low-density lipoprotein-induced foam cell formation in Raw264. 7 macrophages via activating the PPAR $\gamma$  pathway[J]. Autoimmunity, 2022, 55(4): 223-232.

(责任编辑 闫杏丽)