

爆破冲击作用下岩体损伤范围研究*

王小委^① 陈洪凯^① 廖云平^②

(^①重庆交通大学岩土工程研究所 重庆 400074)

(^②重庆地质矿产研究所 重庆 400042)

摘要 针对地下工程岩体压碎和塑性变化两种损伤形式,本文以莫尔-库伦准则为岩体在爆破荷载作用下的破坏条件,提出了冲击波作用下岩体压碎圈范围的计算式,运用 Von Mises 屈服条件,计算了应力波作用下岩体塑性区范围。以 KUBELA 420 炸药为例,估算了重庆主城区常见砂岩在爆破过程中形成的压碎圈范围不超过 1.7 倍装药半径,应力波作用下岩体塑性区范围不超过 25.06 倍装药半径,其与数值模拟预测的结果较接近。

关键词 爆炸力学 应力波 压碎圈 塑性区 数值模拟

中图分类号:TD235 文献标识码:A

DAMAGE ZONE OF SANDSTONE UNDER BLASTING IMPACT

WANG Xiaowei^① CHEN Hongkai^① LIAO Yunping^②

(^①Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

(^②Institute of Geology & Mineral Resources of Chongqing, Chongqing 400042)

Abstract This paper deals with the two damage forms; rock mass crushing and plastic changes in underground engineering. It is based on Mohr-Coulomb criterion. The radii of crushed circle under the action of shock wave is obtained. It applies Von Mises yielding criterion to calculate the rock plastic zone under stress wave. It uses the KUBELA 420 explosive as an example. For sandstone in Chongqing under blasting load, the radii of crushed circle is not more than 1.7 times of charging radius and plastic zone radius does not exceed 25.06 times of charging radius. The prediction is close to the numerical simulation results.

Key words Mechanics of explosion, Stress wave, Crushed circle, Plastic zone, Numerical simulation

1 引言

近年来,我国在地下空间的开挖方面取得了长足进步,地下工程施工方法主要有明挖法、盖挖法、新奥法和钻爆法等,其中,钻爆法仍然是非常重要且常采用的方法之一。爆破施工过程中对周围岩土体

的扰动、损伤是地质环境保护及地下工程施工安全关注的核心问题并开展了一系列的研究,如:朱和玲等在分析现有岩体爆破损伤研究方法的基础上,引入核磁共振检测技术,为研究爆破岩体损伤开辟了一种新的技术手段^[1];宗琦等根据水中爆破理论和爆炸应力波理论求解了炮孔周围岩石中粉碎圈和裂隙圈的范围,并从工程实践上验证了炮孔水介质不

* 收稿日期:2013-03-05;收到修改稿日期:2014-01-02.

基金项目:国家自然科学基金(11272185),重庆市国土科技项目(cqgt120301)资助.

第一作者简介:王小委,男,硕士,主要从事岩土力学和地下工程地质环境保护方面研究. Email: 15823916951@163.com

耦合装药爆破时岩石破坏作用范围理论分析的正确性^[2]；傅洪贤等以贵广铁路牛王盖双线隧道为例，进行围岩爆破松动影响范围的测试，发现围岩爆破松动圈内比松动圈外的围岩声波波速小 10%~20%，松动圈内岩体的破碎程度与围岩声波的波速降低有关^[3]；张平松等采用地震波 CT 测试技术有效评价了爆破弱化范围及特征^[4]；刘伟等采用弹性力学方法，结合 Hopkinson 动态破裂理论，给出了深部岩体巷道爆破卸荷破裂情况和瞬态卸荷破裂范围，表明动态卸载扰动更容易诱发岩爆灾害^[5]；肖明等根据数值计算提出了在地下洞室开挖爆破中，确定围岩松动圈的方法，并与实际工程量测数据作对比，验证了数值计算结果的可靠性^[6]；左双英等采用数值模拟技术预估了岩体开裂深度及爆破损伤影响范围，对实际工程设计起到指导作用^[7]。这些研究成果对深入分析地下工程爆破劣化岩体力学行为研究奠定了重要基础。

本文拟采用冲击动力学和数值模拟方法探索爆破引起的破碎圈及塑性区范围问题，对于地下工程爆破施工具有积极指导作用。

2 冲击波作用下岩体压碎圈范围分析

炸药在岩体中点燃爆破的瞬间，往往会在孔壁上激发前沿很陡的脉冲波，称之为冲击波。冲击波作用范围内，岩体处于单向受压状态，取其中任一单元体进行分析（图 1）：

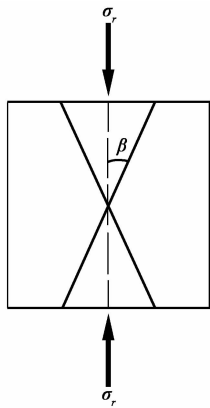


图 1 冲击波作用下岩体中任一单元体受力模式

Fig. 1 Unit stress model in rock mass under the action of shock wave

图中 β 为岩体两组共轭破坏面与 σ_r 的夹角。冲击波作用区域内有如下关系式^[8]：

$$\sigma_r = \sigma_0 \left(\frac{1}{\bar{r}} \right)^3 \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \frac{0.1 \rho_w D^2}{1+k} \quad (2)$$

式中， \bar{r} 为比例半径， $\bar{r} = \frac{r}{r_w}$ ， r 为与药包轴线的距离， r_w 为药包半径； σ_r 为与爆源相距 r 处的冲击波峰值应力 (kPa)； σ_0 为炸药爆轰波超压 (kPa)； ρ_w 为炸药密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)； D 为炸药的爆轰速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)； k 为等熵指数 (当 $\rho_w > 1.2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时， $k=3$ ；当 $\rho_w < 1.2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时， $k=2.1$)。

按莫尔-库伦破坏准则，岩体在压缩应力作用下表现为沿剪切面的剪切破坏，这与实际岩体表现出的破坏形式一致，因此采用莫尔-库伦破坏准则分析岩体破坏与否是合适的。

由一点的应力状态分析可得破坏面上的正应力和剪应力分别为：

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2} \sigma_r (1 - \cos 2\beta) \quad (3)$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{2} \sigma_r \sin 2\beta \quad (4)$$

式中， σ_r 可由式(1)确定。

由莫尔-库伦准则给出岩石破坏条件：

$$\tau_\beta \geq \sigma_\beta \tan \varphi + c \quad (5)$$

式中， φ 、 c 分别为岩石材料的内摩擦角和黏聚力。

将式(3)和式(4)代入式(5)并令 $f(\beta) = \tau_\beta - \sigma_\beta \tan \varphi - c$ ，得：

$$f(\beta) = \frac{1}{2} \sigma_r \sin 2\beta - \frac{1}{2} \sigma_r (1 - \cos 2\beta) \tan \varphi - c \quad (6)$$

岩石发生破坏时， $f(\beta)$ 必然取得最大值，则有下式成立：

$$\frac{df(\beta)}{d\beta} = 0 \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)得：

$$\beta = \pm \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (8)$$

将式(3)、式(4)和式(8)代入式(5)得压碎圈内岩石的破坏条件：

$$\sigma_r \geq \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

3 应力波作用下岩体塑性区范围分析

随着冲击波向前传播，冲击波逐渐衰减为应力

波。应力波破坏性虽不如冲击波强,但往往使岩体处于拉、压两向应力状态,而岩体的抗拉性是远不如抗压性的,结果应力波常常导致岩体在较大范围内出现径向和环向裂隙。任取一单元体分析(图2):

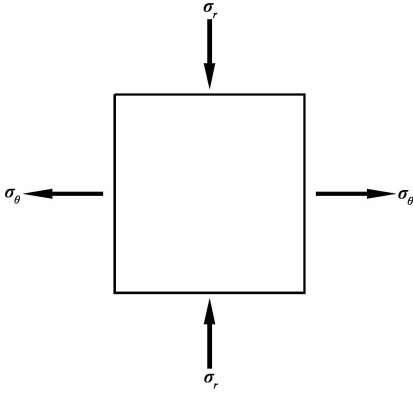


图2 应力波作用下岩体中任一单元体受力模式

Fig. 2 Unit stress model in rock mass under the action of stress wave

应力波作用区域内有如下关系式^[8]:

$$\sigma_r = \sigma_0 \left(\frac{1}{r} \right)^\alpha \quad (10)$$

$$\sigma_0 = \frac{0.1 \rho_w D^2}{2(1+k)} \quad (11)$$

式中, α 为与岩石及炸药种类有关的常数,对于多数岩石, $\alpha=1.5$ 。

对于多数岩石,环向应力与径向应力有如下关系式^[8]:

$$\sigma_\theta = -\frac{1}{2}\sigma_r \quad (12)$$

式中, σ_r 可由式(10)确定。

由 Von Mises 屈服条件给出屈服方程:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (13)$$

式中, σ_1 取 σ_θ ; σ_2 取0; σ_3 取 σ_r ; σ_s 为材料拉伸屈服极限。

将式(12)代入式(13)中得应力波作用范围内岩石屈服的条件为:

$$\sigma_r \geq \frac{2}{\sqrt{7}}\sigma_s \quad (14)$$

4 算例分析

为了验证上述分析的可靠性,以常规炸药 KUBELA 420 炸药在岩体中爆炸破碎岩石为例,分

别计算了冲击波作用下的岩体压碎空腔范围和应力波作用下产生的塑性区范围。

炸药的热力学参数近似取为:

$$D = 3500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \rho_w = 1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}, k = 2.1$$

岩石以重庆主城区常见的砂岩为例,其动态力学参数分别取为: $c=20\text{MPa}$, $\varphi=45^\circ$, $\sigma_s=2.5\text{MPa}$ 。

(1) 冲击波作用下压碎圈范围计算

$$\sigma_0 = \frac{0.1 \rho_w D^2}{1+k} = \frac{0.1 \times 1.2 \times 3500^2}{1+2.1} = 474190 \text{ (kPa)}$$

$$\frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{2 \times 30 \times 10^3 \times \cos 45^\circ}{1 - \sin 45^\circ} = 96569 \text{ (kPa)}$$

$$\bar{r} \leq \sqrt[1/3]{\frac{\sigma_0}{2c \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)}} = \sqrt[1/3]{\frac{474190}{96569}} = 1.70$$

结果表明,岩体在冲击波作用下产生的压碎空腔半径不超过装药半径的1.7倍。

(2) 应力波作用下产生的塑性区范围计算

$$\sigma_0 = \frac{0.1 \rho_w D^2}{2(1+k)} = \frac{0.1 \times 1.2 \times 3500^2}{2 \times (1+2.1)} = 237095 \text{ (kPa)}$$

$$\bar{r} \leq \sqrt[1/1.5]{\frac{\sigma_0}{2/\sqrt{7}\sigma_s}} = \sqrt[1/1.5]{\frac{237095}{2/\sqrt{7} \times 2.5 \times 1000}} = 25.06$$

结果表明,岩体在应力波作用下产生的塑性区半径不超过装药半径的25.06倍。

5 数值模拟验证

采用 ANSYS 显示动力分析模块 LS-DYNA 模拟岩体爆破过程,得到爆破过程中形成的压碎圈和塑性区范围。

实体模型选取 $150\text{cm} \times 150\text{cm} \times 150\text{cm}$ 的方形体,柱形装药半径 10cm 。考虑到问题的对称性,为了节省计算时间只建立 $1/4$ 个模型,计算区域为 $75\text{cm} \times 75\text{cm} \times 150\text{cm}$ 的矩形体,在 ANSYS 中范围是: X 方向 $0 \sim 0.75\text{m}$; Y 方向 $0 \sim 1.5\text{m}$; Z 方向 $0 \sim 0.75\text{m}$,炸药设置在 Z 方向 $0 \sim 0.05\text{m}$ (图3):

在 ANSYS 中建立上述实体模型,并给各部分赋相应参数。描述炸药爆轰产物压力-体积关系的 JWL 状态方程如式(15):

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{w E_0}{V} \quad (15)$$

式中, V 为相对体积; E_0 为初始内能密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 w 为试验确定的常数,可参照相关文献(表1)。

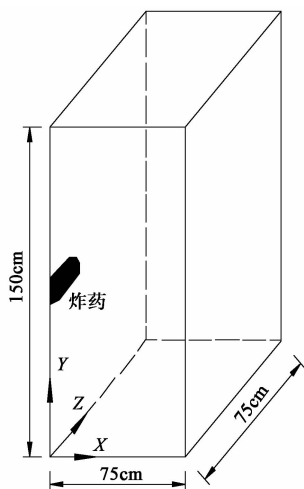


图3 数值计算模型简图

Fig. 3 Numerical simulation model

表1 JWLL 状态方程参数表

Table 1 Parameters of JWLL state equation

| A/GPa | B/GPa | R_1 | R_2 | w | $E_0/J \cdot m^{-3}$ |
|-------|-------|-------|-------|------|----------------------|
| 741 | 18 | 5.56 | 1.65 | 0.35 | 3.6×10^9 |

炸药密度 $\rho_w = 1.2g \cdot m^{-3}$, 爆速 $D = 3500m \cdot s^{-1}$, 爆

压 $P_{CJ} = 1.0 \times 10^{10} Pa$ 。

岩石材料参数按表2取:

表2 岩石材料基本力学特性

Table 2 Properties of intact rock material

| 密度 / $kg \cdot m^{-3}$ | 弹性模量 /GPa | 泊松比 | 内聚力 /MPa | 内摩擦角 /($^\circ$) | 抗拉强度 /MPa |
|---------------------------|--------------|------|-------------|-----------------------|--------------|
| 2500 | 27 | 0.23 | 20 | 45 | 2.5 |

划分网格单元(图4):

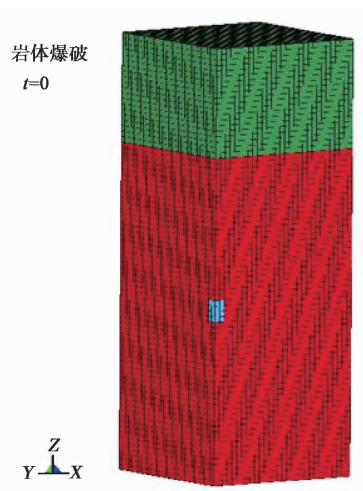


图4 有限元计算的网格模型

Fig. 4 Grid model of finite element calculation

模型边界条件设置:坐标设置边界条件,约束 $X: -0.1 \sim 0.1cm$ 节点的 UX 自由度;约束 $Y: -0.1 \sim 0.1cm$ 节点的 UY 自由度; $X: 74.9 \sim 75.1cm$ 、 $Y: 74.9 \sim 75.1cm$ 和 $Z: -0.1 \sim 0.1cm$ 节点设置无反射边界条件(图4)。

打开 ANSYS 中 LS-DYNA 求解器,获得计算结果(图5,图6):

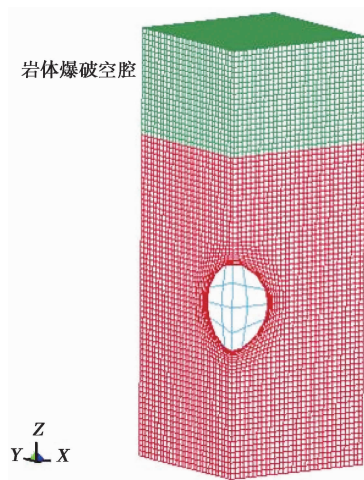


图5 压碎圈范围

Fig. 5 Range of crushed circle

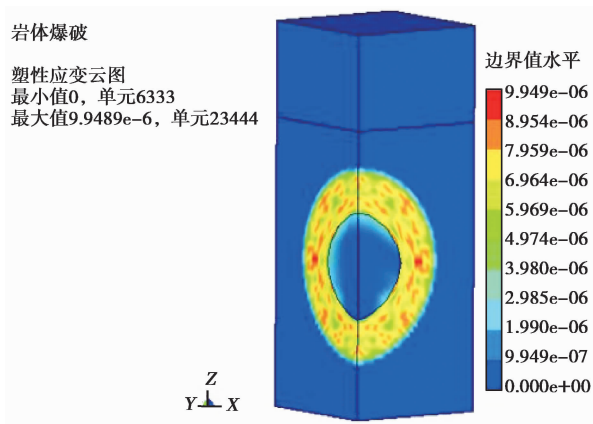


图6 塑性区范围

Fig. 6 Range of plastic zone

分析图5压碎圈范围,确定图中空腔边界上任意一点,查找该点所在空间确切坐标,并与计算前药包中心点空间坐标对比,以此确定冲击波作用下压缩圈范围。结果发现在爆破过程中,冲击波作用下压碎圈半径大约在2.1~2.5倍装药半径内。

按分析图5的思路,分析图6塑性区范围,确定塑性区边界上任意一点,查找该点空间确切坐标,并与计算前药包中心点空间坐标对比,以此确定应力波作用下塑性区范围。结果发现在爆破过程中,应

力波作用下塑性区半径大约在 25~30 倍装药半径内,可见数值模拟结果与理论计算结果相接近。

值得一提的是,我们在设置岩体参数时,考虑的是均质岩体,未考虑岩体各部分之间的差异,因而数值模拟得到的压碎圈和塑性区都呈球形,这也就是为什么以空腔(塑性区)边界上任意一点来确定压缩圈(塑性区)范围的原因,虽然此做法有违实际,但对于分析问题是可取的。

6 结 论

(1)冲击波在岩体中作用形成的压碎圈范围不超过装药半径的 1.7 倍,数值模拟的结果为 2.1~2.5 倍装药半径,两者结果比较接近,实际爆破发现,压碎圈范围也在 2 倍装药半径左右,因此,关于冲击波在岩体中形成的压碎圈范围理论计算公式比较适用。

(2)应力波作用下岩体塑性区范围不超过装药半径的 25.06 倍,在数值模拟预测的范围之内,而实际爆破发现,塑性区范围在 100 倍装药半径内,理论计算结果较实际偏小,主要原因是未考虑爆炸过程中形成的爆生气体对岩体的破坏作用。

(3)在分析爆破破岩机理时,未来还需对爆生气体的作用做深入研究,结合应力波单独作用下的研究成果,预见会得到与实际更为接近的结论。

参 考 文 献

- [1] 朱和玲,周科平,张亚民,等. 基于核磁共振技术的岩体爆破损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(7): 1410~1416.
Zhu Heling, Zhou Keping, Zhang Yamin, et al. Experimental study of rock damage by blasting based on nuclear magnetic resonance technique. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(7): 1410~1416.
- [2] 宗琦,田立,汪海波. 水介质不耦合装药爆破岩石破坏范围的研究和应用[J]. 爆破, 2012, **29**(2): 42~46.
Zong Qi, Tian Li, Wang Haibo. Study and application on rock damage range by blasting with water-decoupled charge. Blasting, 2012, **29**(2): 42~46.
- [3] 傅洪贤,赵勇,谢晋水. 铁路双线隧道围岩爆破松动范围测试分析[J]. 中国铁道科学, 2010, **31**(5): 54~58.
Fu Hongxian, Zhao Yong, Xie Jinshui. Test analysis on the broken rock zone of the surrounding rock blasting for railway double-line tunnel. China Railway Science, 2010, **31**(5): 54~58.
- [4] 张平松,张永盛,杨华忠. 硬岩深孔爆破破坏范围地震波 CT 测试[J]. 工程勘察, 2012, **30**(5): 30~33.
Zhang Pingsong, Zhang Yongsheng, Yang Huazhong. Testing on destroying range of deep hole blasting in hard rock by seismic wave CT technology. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012, **30**(5): 30~33.
- [5] 刘伟,张伟,陈士海. 深部岩石巷道爆破卸荷的破裂范围研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, **32**(2): 66~70.
Liu Wei, Zhang Wei, Chen Shihai. Study on cracking area of deep rock tunnel under blasting unloading. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2013, **32**(2): 66~70.
- [6] 肖明,张雨霆,陈俊涛,等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2613~2618.
Xiao Ming, Zhang Yuting, Chen Juntao, et al. Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2613~2618.
- [7] 左双英,肖明,续建科,等. 隧道爆破开挖围岩动力损伤效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(10): 3171~3176,3184.
Zuo Shuangying, Xiao Ming, Xu Jianke, et al. Numerical simulation of dynamic damage effect of surrounding rocks for tunnels by blasting excavation. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(10): 3171~3176,3184.
- [8] 高金石,张继春. 爆破破岩机理动力分析[J]. 金属矿山, 1989, (9): 7~12.
Gao Jinshi, Zhang Jichun. Dynamic analysis of blasting rock breaking mechanism. Metal Mine, 1989, (9): 7~12.