

深部岩体下的爆破裂纹扩展模拟

Simulation of crack propagation in deep rock

杨国祥

Guoxiang Yang

合肥工业大学 土木与水利工程学院 安徽 合肥 230009

College of civil engineering Hefei University of technology Hefei Anhui 230009

摘要:基于 LS-DYNA 软件中的隐式-显式耦合分析建立了地应力条件下岩石单孔爆破模型,研究了不同地应力大小和不等值双向地应力对爆破裂纹扩展的影响。研究发现:地应力的大小对爆破裂纹的扩展有很大的影响,随着地应力的增大,爆破裂纹的长度减小;不等值双向地应力条件下,爆破裂纹扩展的方向受最大的地应力方向影响;地应力对爆破孔近点处的峰值速度有抑制作用,而对爆破孔远点处的峰值速度有增强作用并且随着地应力的增大这种效果越显著;不等值地应力条件下,竖直方向和水平方向上的应力大小会有区别,但是其应力值均是随着地应力的增大而增大。

Abstract: Based on the implicit explicit coupling analysis of LS-DYNA software, a rock single hole blasting model under in-situ stress is established, and the effects of different in-situ stress and unequal two-way in-situ stress on blasting crack propagation are studied. It is found that the in-situ stress has a great influence on the propagation of blasting crack, and the length of blasting crack decreases with the increase of in-situ stress; Under the condition of unequal bi-directional situ stress, the direction of blasting crack propagation is affected by the direction of maximum situ stress; The in-situ stress can restrain the peak velocity near the blasting hole, but can enhance the peak velocity far away from the blasting hole, and the effect becomes more significant with the increase of in-situ stress; Under the condition of unequal in-situ stress, the vertical and horizontal stress will be different, but the stress value increases with the increase of in-situ stress.

关键词: 地应力; 隐式-显式算法; 爆破裂纹; 峰值速度

Keywords: ground stress; Implicit explicit algorithm; Blasting crack; Peak velocity

DOI: 10.12346/etr.v3i1.3095

当前,爆破开挖技术普遍应用在矿山和交通建设工程当中。随着当前开采技术的不断提升和能源的需求不断增大,大量的工程开始往深部岩体发展。实际上,深部岩石的破坏是由于地应力和爆炸引起的冲击载荷的共同作用所致。因此研究地应力对深部岩体爆破裂纹的影响有很大的实际工程意义。1996年,刘殿书^[1]进行了聚碳酸酯板的激光动光弹实验,通过实验表明了初始应力会对爆破动应力波的传播有影响。刘超等^[2]用 RFP2D 软件模拟了煤体在地应力条件下的爆破裂纹规律,模拟再现了煤体在地应力围压作用下的爆破裂纹的产生以及扩展的全过程,不同侧压系数下及围压下对爆破裂纹的影响。目前对于地应力对爆破影响研究。魏晨慧等^[3]研究了不同地应力条件下节理角度对岩石双孔爆破的影响,分析了节理角度和地应力对爆破作用效果的影响。李新平等^[4]对地下深部工程中掏槽爆破过程中的应力波进行研究分析。LU W B 等^[5]通过对含高地应力的岩石预裂爆破中的压应力传播以及裂纹的扩展过程进行分析,得出了当岩体处

于地应力大于 12MPa 状态时,首次开挖不应该采用预裂爆破。陈明^[6]通过对隧道开挖后的爆生裂隙区的研究发现,初始的地应力对爆生裂隙区的半径有显著影响。陈晓林^[7]通过具有初始应力场介质的爆破模型试验,研究了初始应力场对爆破应力波的传播规律的影响,并应用到实际工程中来证明其结果的正确性。

本文采用 LS-DYNA 中隐式-显式耦合数值模拟方法,研究不同地应力条件下的岩石爆破开裂过程,分析地应力对岩石爆破裂纹的影响和速度以及应力值的影响,为深部开挖设计提供参考。

1.有限元模型及材料本构

1.1 模型的建立

通过 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟,数值计算模型尺寸长和宽均设置为 300 cm,炮设置在模型中心,孔和炸药直径均为 10 cm,模型各边界取非反射边界,地应力 σ_x 和 σ_y 施加在水平和垂直边界上如图 1 所示。网格采用映射网

【作者简介】杨国祥(1993~),男,安徽铜陵人,汉族,合肥工业大学,硕士研究生,研究方向:岩土工程与地下工程。

格随机划分的方式。将计算模型可以简化为平面应变模型，厚度方向上为单层网格。同时我们在边界处设置无反射边界条件来模拟半无限域岩体，在 z 轴方向上施加位移约束。炸药起爆方式设为整体同时起爆。计算时间步长取 5.0 μs。

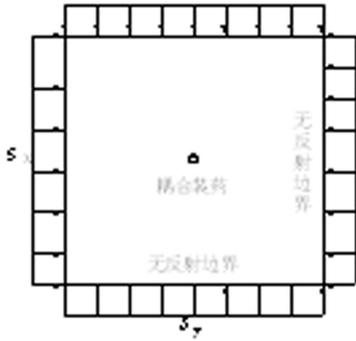


图 1 地应力作用下单孔爆破模型

1.2 材料参数的选取

(1) 岩石本构

岩石爆破过程中炸药瞬时爆炸产生巨大能量使得岩石处于应变很大的同时处在应变率和压力同时变大的状态下，而 HJC 本构模型能够对该过程进行较好地描述。本文模拟时采用石灰岩的材料参数参考文献^[8]。

表 1

ρ	G	σ_c	A	B	C	N	S_{max}	D_1	D_2
2300	10093	60	0.55	1.23	0.0097	0.89	20	0.04	1
T	p_c	μ_c	p_1	μ_1	K_1	K_2	K_3	ϵ_0	ϵ_{Lmin}
4	20	0.00125	2000	0.174	39	-223	550	1E-6	0.01

(2) 炸药材料

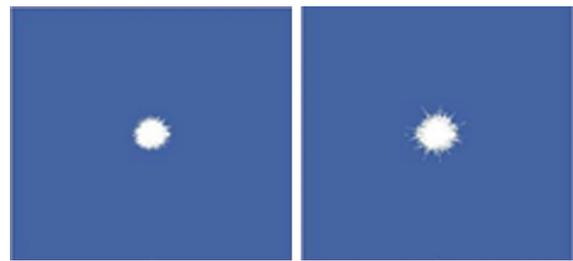
本章模拟选用的是 TNT 炸药，各参数取为^[10]：密度 $\rho=1150 \text{ kg/m}^3$ ，爆速 $C_e=3500 \text{ m/s}$ ， $A=741 \text{ GPa}$ ， $B=18 \text{ GPa}$ ， $R_1=5.56$ ， $R_2=1.65$ ， $\omega=0.35$ ，初始体积内能 $E_0=4190 \text{ MJ/m}^3$ ，相对体积 $V=1.0$ 。

2. 地应力对爆破裂纹的影响

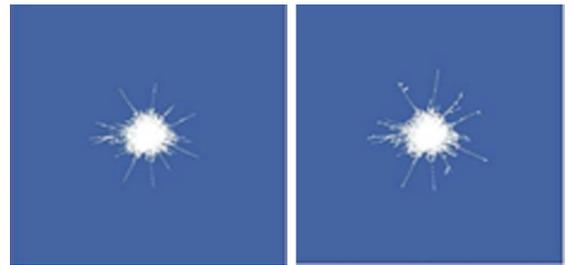
2.1 地应力下爆破裂纹扩展

深部高地应力岩体在爆炸荷载作用下的爆生裂纹扩展及岩体破裂过程如图 2 所示(水平方向和垂直方向地应力均为 20 MPa)。如图(a)所示当炸药开始起爆，炸药爆炸产生冲击波通过空气介质立即作用到炮孔壁上，由于此时爆炸产生的冲击波很大，炸药孔周围的岩石立刻被炸成碎片形成了一定范围的区域，即压碎区。随后如图(b)和(c)所示，由于岩石抗拉强度远小于其抗压强度，爆炸应力波在炮孔切向的拉伸应力

分量依然具有足够的强度从非线性破裂区边界产生径向拉伸裂纹，随着爆炸产生的气体对岩体的压缩使得裂隙进一步的延伸和扩展。最后在爆炸产生的应力波和气体的共同作用下，会形成一个压碎区之外的区域，即弹性破坏区。在弹性破坏区以外，此时爆炸应力波和爆轰气体共同作用下的强度已经低于岩石动态抗压强度，径向应力不会引起岩体压剪破坏生成裂纹。当压缩应力波通过压碎区时，岩石会受到强烈的压缩，存储了一部分的弹性变性能，当应力波通过后，岩石中的应力波释放，会产生与应力波方向相反的向心拉伸应力，这种向心拉伸应力会使岩石产生周向的裂隙，如图(d)中可以看到产生了一部分周向裂隙。



(a) 压碎区的裂纹扩展 (b) 径向裂纹发展



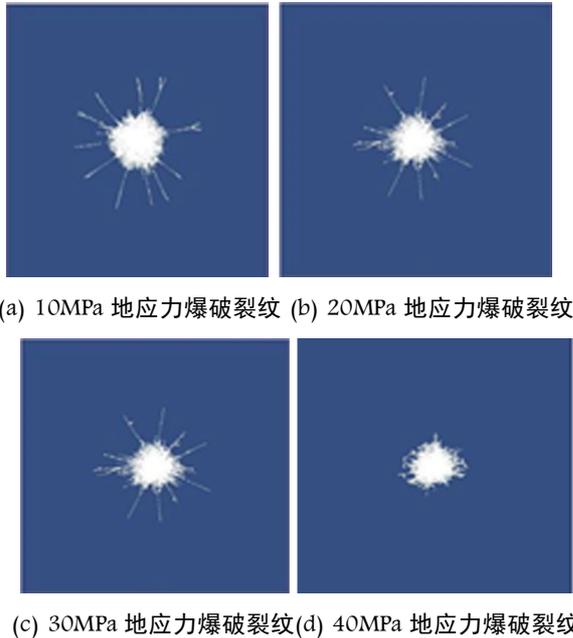
(c) 破碎区的裂纹发展 (d) 最终的爆破裂纹扩展

图 2 地应力下爆破裂纹扩展过程

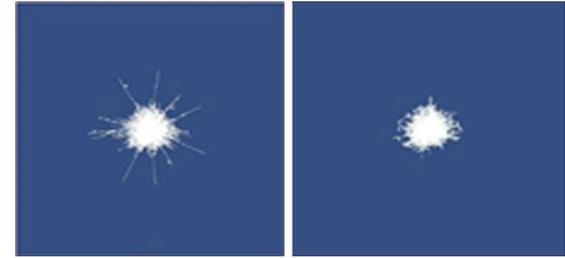
2.2 双向等值地应力下爆破裂纹扩展

考虑等值双向地应力对爆破裂纹的影响时，对水平方向和垂直方向施加相同大小的地应力，其值分别为 10、20、30、40MPa。

图 3 (a)~(d) 为不同地应力下 200 μs 时裂纹扩展图，在 200 μs 时，应力波均已到达了该模型的边界，也说明地应力的大小并不影响应力波的传播速度。如图 3 的 4 幅图中所示，不同等值双向地应力作用下的单孔爆破裂纹的结果有明显的不同，在无地应力的时候，爆破产生的裂纹长度比有地应力时的爆破裂纹长度长，而且是当地应力越大的时候，爆破产生的裂纹长度会越短。因此可以得出地应力的大小对爆破压碎区的影响不大，对弹性破坏区的裂纹长度则会有显著的影响，且是随着地应力值的增大而逐渐减小。



(a) 10MPa 地应力爆破裂纹 (b) 20MPa 地应力爆破裂纹



(c) 30MPa 地应力爆破裂纹 (d) 40MPa 地应力爆破裂纹

图3 不同等值双向地应力下爆破裂纹扩展过程

由表2可知,不同等值双向地应力作用下,爆破压碎区半径约为圆孔半径6倍左右,压碎区半径的值几乎不变,说明地应力值的大小对爆破压碎区的影响较小。然而对于弹性破坏半径而言,地应力的大小对裂纹长度的影响较大如图4,这是因为是由于径向裂纹扩展主要由切向拉伸应力分量控制,地应力的存在削弱了炮孔切线方向上的拉应力分量,从而抑制了爆破裂纹的扩展。

表2 双向等值地应力加载

水平地应力 (MPa)	竖直地应力 (MPa)	压碎区半径 R1(cm)	压碎区半径与炮孔半径之比	弹性破坏区半径(cm)
0	0	30	6	80
10	10	28.75	5.75	70
20	20	27.5	5.5	64
30	30	27.5	5.5	56
40	40	27.5	5.5	33

在矿山岩石爆破工程方面,质点振动速度是评价岩石损伤破坏程度的重要指标之一^[9-10]。但由于爆破质点破坏本身影响因素的复杂性及不确定性,通常将质点峰值速度作为质点是否破坏的评价标准之一。为研究爆破荷载与高地应力综合作用下爆破边缘质点峰值速度的变化特性,提取数值计算模型中质点速度进行对比分析研究;推导不同地应力工况下炮孔周围岩石爆破荷载与地应力共同作用下质点峰值速度

变化特性。

取坐标为(30,0)和(100,0)两点为A,B。因为A点的位置在炸药孔径的5~15倍范围内,可以看成A点处是受到了爆炸冲击波的作用,而B点处已经为炸药孔的20倍半径处,可以看成此处受到爆炸应力波的作用。

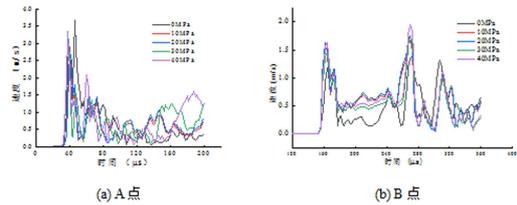
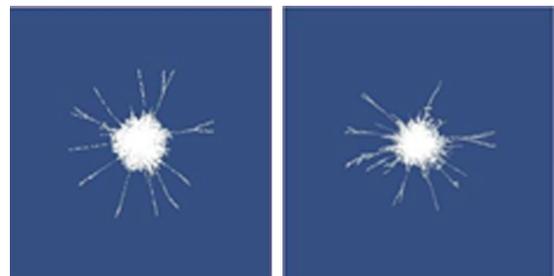


图5 A、B号测点爆破单元速度-时间图像

由图5所见:在岩体爆破压碎区内,岩体首先受到炸药爆炸产生的冲击波作用发生压剪损伤,随着地应力的增大,冲击波作用下的岩体损伤破坏单元速度峰值逐步减小。冲击波向外进一步传播逐渐衰减为应力波,此时应力波所产生的对岩体的压剪作用逐步减小,直至不能造成对岩体的完全破碎,后面岩体切向方向上产生的拉应力成为岩体破碎的主要因素,随着地应力的加大,应力波在岩体切向上产生的拉应力显现逐渐增大的趋势,表明随着地应力的加大,地应力均对爆炸冲击波的具有抑制作用和对爆炸应力波的促进作用。

2.3 双向不等值地应力下的爆破裂纹扩展

图6(a)~(d)在 $\sigma_y=10\text{MPa}$ 的情况下, σ_x 取10、20、30、40MPa时的裂纹扩展图。一方面当水平地应力逐渐增大时,地应力爆破效果也会逐渐变差,破坏区面积逐渐减小;另一方面当水平地应力逐渐增大时,竖直方向的裂纹长度逐渐变小,这是由于当水平方向地应力比竖直方向地应力大时,会导致水平方向上的抑制作用很强,而爆炸应力波的主压应力方向垂直于岩石最大拉应力方向,导致更容易出现拉裂破坏。因此在双向不等值地应力的作用下,爆破产生的裂纹更容易向着地应力较大的方向开展。



(a)无地应力

(b)10MPa

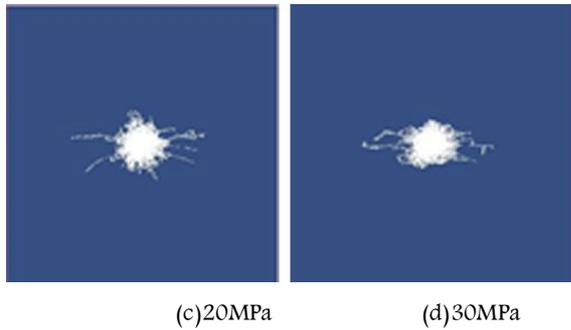


图 6 竖直地应力(10MPa)不同水平地应力的爆破裂纹

从表 3 中可以看出下图为双向不等值地应力爆破在不同地应力下水平方向和竖直方向的裂纹长度。从图中可以看出,竖直方向地应力为 10 MPa 不变时,而水平方向的地应力从 10 MPa 变化为 30 MPa; 水平方向裂纹长度变化从 78 cm 到 71 cm,而竖直方向裂纹长度则从 80 cm 到 31 cm。结果表明,水平方向应力主要控制着竖直方向裂纹的发展,且对竖直方向裂纹起抑制作用。同时从图中可以看出弹性破坏区近似于“椭圆形”。

表 3 不等值双向地应力加载裂纹长度

水平地应力 (MP)	竖直地应力 (MPa)	X 方向裂纹长度 Lx(cm)	Y 方向裂纹长度 Ly(cm)	L _y /r
0	0	80	80	16
10	10	78	70	14
20	10	73	45	9
30	10	73	31	6.2

从爆孔右边等间隔取 4 个质点为研究对象。当双向等值地应力作用下,该炸药孔右边四个单元的峰值应力作比较,可以得到如图 7 这样的结果。无地应力时该单元为峰值应力为 100 MPa,而当地应力为 10MPa~40MPa 的时候,该处单元的峰值应力分别为 110 MPa、121 MPa、129 MPa、140 MPa。因此可以看出当地应力较大时,该处单元的峰值应力也会随着变大。

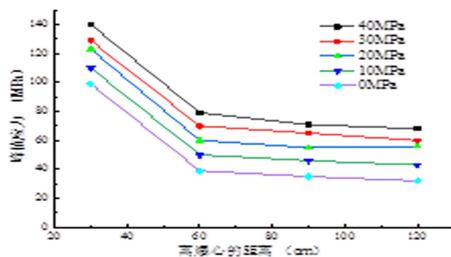


图 7 峰值应力随爆心距的变

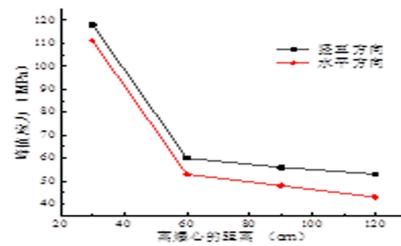


图 8 两个方向上峰值应力随爆心距的变化

双向不等值地应力作用下,由于水平方向和竖直方向所受到的地应力不同,因此取爆心的竖直和水平方向上各取四个单元为研究对象。图 8 为水平地应力为 20 MPa,竖直地应力为 10 MPa 的条件下的这八个单元的峰值应力与爆心距的关系。从图 3.12 可以看出当岩石受到双向不等值地应力作用时,离爆心相同距离的水平和竖直方向上的峰值应力不相同,地应力大的方向峰值应力大。

3.结论

通过深部岩体下的爆破裂纹模拟分析,得出以下结论:

- (1) 地应力的大小对弹性破坏区径向裂纹扩展区的扩展有很大的影响,但高地应力对压碎区和非线性破裂区裂纹扩展的影响不大。
- (2) 地应力对爆破孔近点处的峰值速度有抑制作用,而对爆破孔远点处的峰值速度有增强作用并且随着地应力的增大这种效果越显著。
- (3) 通过双向等值地应力作用下的单孔爆破裂纹数值模拟,当地应力的值从 10 MPa 到 40 MPa,爆破产生的裂纹长度从 80 cm 到 33 cm,说明了地应力会抑制爆破裂纹的扩展。同时可以看出地应力下弹性破坏区的裂纹区域类似一个圆形,且随着地应力的增大,圆的半径减小。
- (4) 双向不等值地应力下的爆破裂纹区大致为椭圆形,椭圆形的长轴为地应力较大的方向,而短轴则为较小的方向。地应力小的方向上的峰值应力比地应力大的方向上的峰值应力小。

参考文献

- [1] 刘殿书,王万富,杨吕俊,谢夫海.初始应力条件下爆破机理的动光弹实验研究[J].煤炭学报,1999,(06):612-614
- [2] 刘超,崔娜.不同地应力下煤体爆破裂纹扩展规律研究[J].煤炭技术,2018,37(06):3-5.
- [3] 魏晨慧,朱万成,白羽,李帅.不同节理角度和地应力条件下岩石双孔爆破的数值模拟[J].力学学报,2016,48(04):926-935.
- [4] 李新平,宋凯文,罗忆,黄俊红,周吉学,顿文昊.高地应力对掏槽爆破及爆破应力波影响规律的研究[J].爆破,2019,36(02):13-18+53.
- [5] Wenbo Lu,Ming Chen,Xiang Geng,Daqiang Shu, Chuangbing Zhou. A study of excava

(下转第 53 页)