

基于XFEM的切槽炮孔定向断裂爆破数值模拟

李清, 郭洋, 张垒志, 徐文龙, 张江雨, 常旭

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083

摘要 应用ABAQUS扩展有限元(XFEM)模拟了切槽炮孔定向断裂爆破时爆生裂纹沿切槽方向和非切槽方向的起裂、扩展和止裂。结果表明:切槽方向爆生裂纹的起裂时间比非切槽方向早 $10\ \mu\text{s}$;裂纹扩展速度较非切槽方向具有明显的阶段性,可分为加速扩展、失稳扩展和减速扩展3个阶段;裂纹的止裂时间比非切槽方向晚 $60\ \mu\text{s}$ 。在裂纹扩展阶段,切槽方向在失稳扩展阶段爆生裂纹的平均速度为 $1343\ \text{m/s}$,非切槽方向爆生裂纹的平均速度为 $600\ \text{m/s}$,仅为切槽方向爆生裂纹平均速度的44%,说明切槽有利于爆炸能量释放,增加爆生裂纹的扩展速度。切槽方向和非切槽方向爆生裂纹扩展的平均距离分别为 $124\ \text{mm}$ 和 $45\ \text{mm}$,说明切槽对爆生裂纹的扩展有明显的导向作用。XFEM能够正确模拟切槽爆破爆生裂纹的扩展,具有广阔的应用前景。

关键词 扩展有限元;定向断裂爆破;切槽炮孔;爆生裂纹

切槽爆破作为实现定向断裂爆破的一种常见方法,广泛用于地铁区间、公路隧道、矿山巷道等爆破施工中,在提高周边眼成型质量,减少周边眼数量和巷道围岩损伤方面有着显著效果。20世纪60年代,Langfors等^[1]提出了通过在炮孔壁上切槽来实现定向断裂爆破的方法。Costin^[2]采用油页岩进行了V形刻槽动态断裂实验,发现裂纹总是从裂纹尖端首先起裂。Fourney等^[3]利用有机玻璃进行切槽爆破实验,发现所有的模型主裂纹均沿切槽方向扩展。国内学者针对切槽爆破也进行了一些研究。杜云贵等^[4]采用模型实验验证了切槽炮孔可以形成定向断裂爆破。杨仁树等^[5,6]建立了爆炸动态焦散线系统,并应用该系统研究了切槽爆破时爆生主裂纹的扩展速度、主裂纹尖端的动态应力强度因子等断裂参数。李清等^[7]采用动焦散线法研究了切槽角度和深度对定向断裂爆破的影响。吴春平^[8]采用动光弹实验对切槽爆破的刻槽参数进行了研究。然而,由于岩石爆破致裂过程的复杂性和瞬时性,对切槽炮孔定向断裂控制爆破机理的研究还存在很多不足。

近年来,随着数值分析方法日趋成熟,一些学者借助数值分析方法对切槽爆破机理进行了研究^[9-11]。其中,常见的数值方法有数值流形法、边界元法、无限元法、有限元法和扩展有限元等。数值流形法的理论基础还不完善,尤其是在二维和三维裂纹的接触理论存在较大难点。边界元法不需要进行繁琐的网格划分,只需在模型边界和裂纹处布置单元节点就可以进行断裂模拟,但对于多裂纹等复杂应力问题求解存

在很大困难。无限元法虽不需要进行网格划分等前处理,但其数值计算量太大,因此,目前仍停留在理论研究之中。有限元法是一种连续介质力学方法,在处理接触断裂问题时需要布置内聚力单元、节理单元等接触单元来模拟断裂的不连续面。扩展有限元(the extended finite element method, XFEM)是有限元和无限元的结合,保留了常规有限元算法的所有优点,在模拟断裂分析时则采用罚函数的形式模拟断裂面,用于反映裂纹面的位移不连续性,可以很好地模拟裂纹的起裂和扩展阶段。

本研究针对切槽炮孔定向断裂控制爆破,应用有限元软件ABAQUS扩展有限元法进行爆生裂纹的扩展分析,通过模拟爆炸载荷作用下爆生裂纹的起裂和扩展,分析爆生裂纹的扩展规律及断裂特性。

1 XFEM原理

扩展有限元(XFEM)思想是Belytschko和Black为了求解材料断裂等位移不连续问题而首先提出的^[12]。该方法是在标准有限元框架内,通过加入形状函数来反映裂纹两侧不连续面的存在。因此,扩展有限元法不需要对结构内存在的几何或物理界面(如裂纹面)进行网格细划,即可准确地模拟裂纹的扩展问题。一般而言,形状函数包含表示裂纹尖端奇异性的应力渐近函数和表示裂纹处位移跳跃的间断函数两部分。ABAQUS中采用了具有整体划分特性的形状函数^[13],可表示为:

收稿日期:2015-06-09;修回日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51374212,51134025);国家大学生创新训练项目

作者简介:李清,教授,研究方向为爆破工程及土木工程,电子信箱:liq@cumb.edu.cn

引用格式:李清,郭洋,张垒志,等.基于XFEM的切槽炮孔定向断裂爆破数值模拟[J].科技导报,2016,34(13):83-87;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.13.013

$$\mu = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[\mu_i + H(x) a_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x) b_i^{\alpha} \right] \quad (1)$$

式中, $N_i(x)$ 为节点形状函数; μ_i 为模型连续部分采用有限元算法得到的节点位移向量; a_i 和 b_i^{α} 表示节点扩展自由度向量; $H(x)$ 为裂纹处的间断函数, 可表示为:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x - x^*), n \geq 0 \\ -1 & \text{Other} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x 为考察点; x^* 为裂纹面上距离点 x 最近的点; n 为 x^* 处裂纹的单位外法线矢量。

$F_{\alpha}(x)$ 为裂纹尖端的应力渐近函数, 可表示为式(3):

$$F_{\alpha}(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (3)$$

式中, (r, θ) 为以裂纹尖端为原点的极坐标系, 裂纹尖端的切线方向对应的 $\theta=0$ 。

2 切槽爆破数值模型

在切槽炮孔定向断裂控制爆破中, 炸药起爆后, 爆炸冲击波迅速向外传播, 由于炮孔壁上切槽的存在, 爆炸冲击波在切槽尖端形成很高的应力集中, 使切槽尖端的应力迅速上升, 微裂隙逐渐被激活, 切槽尖端的损伤不断增大。本研究采用最大主应力准则模拟裂纹的扩展, 即当裂纹尖端的应力平衡后, 裂纹尖端附近任一点的最大主应力超过了材料的抗拉强度, 裂纹就会沿该点起裂扩展。对于裂纹的扩展方向, 目前主要的理论有: 最大周向拉应力理论、最大能量释放率理论、最小应变能密度理论等, ABAQUS 提供了 XFEM 判断裂纹的扩展方向, 该方法默认裂纹的扩展方向垂直于主拉应力, 不需要预先定义裂纹的扩展路径, 只需设置材料损伤起始的判据、损伤演化规律及损伤稳定控制参数等相关参数即可实现裂纹的扩展。

2.1 计算模型

本研究针对切槽炮孔定向断裂控制爆破进行了模拟, 切槽爆破数值计算模型如图 1 所示。为了提高运算速度, 本研究将数值模型简化为平面应力问题进行处理。其中, 模型尺寸为 400 mm×400 mm, 炮孔位于模型试件的中心, 炮孔直径为 6 mm, 切槽深度为 1 mm, 切槽角度为 60°。模型材料选用大理石, 密度为 2370 kg/m³, 弹性模量为 70 GPa, 泊松比为 0.19, 抗拉强度为 12 MPa。XFEM 模型的初始损伤阈值为 10

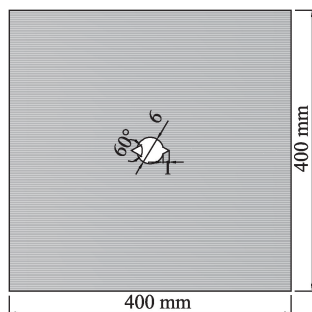


图1 切槽爆破数值计算模型

Fig. 1 Numerical model of grooving blasting

MPa, 裂纹扩展遵循线性能量损伤演化规律, 失效位移为 0.1 mm。

本研究选用二维可变形壳体单元模拟切槽爆破。为了模拟爆生裂纹沿切槽方向和非切槽方向起裂和扩展的过程, 在切槽处和非切槽处均设置了长度为 0.1 mm 的初始缝隙, 初始缝隙只有在材料达到预设的初始损伤值后才能起裂, 起裂后基于定义的能量损伤演化规律, 自动判断裂纹扩展的方向及其扩展长度。在进行有限元网格划分时, 单元类型选用四边形平面应力单元(CPS4R), 能够有效保证模型的求解精度, 并采用结构化方法划分网格。整个模型共划分 25200 个单元, 节点总数为 51076 个。模型网格划分见图 2。

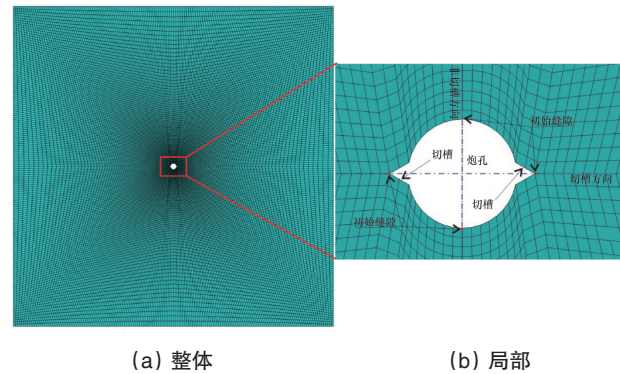


图2 模型网格划分

Fig. 2 Mesh model of grooving blast

2.2 爆炸载荷

目前, 在数值分析中, 爆炸载荷主要是采用JWL状态方程、施加压力曲线函数和优化压力曲线等方法施加在计算模型中的。其中, JWL状态方程虽然考虑了岩石与炸药的相互作用, 但其参数的选择忽略了岩石破碎过程中的强度弱化问题, 因而得出的模型内部的压力与实际有较大差别。压力曲线函数一般较为复杂, 且很难得到准确的参数。因此, 目前广泛采用矩形、三角形、梯形等曲线近似代替爆炸载荷作用于炮孔壁上。经过调试, 本文采用线性优化压力曲线模拟爆炸应力波在炮孔壁上的超压, 其值可由式(4)求得:

$$P(t) = kP_0 \quad (4)$$

式中, P_0 为炮孔壁上的最大超压值, 本文取为 2.95 GPa, k 为超压系数, 其值在 [0, 1] 之间, 本文采用双线性形式, 如图 3 所示。

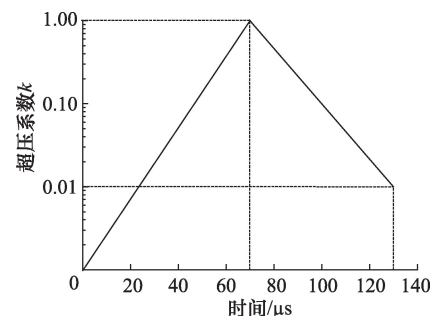


图3 加载幅值曲线

Fig. 3 Loading amplitudes

2.3 边界条件

在采用数值分析的方法求解应力波在介质中的传播问题时,往往需要考虑边界效应的影响。一般,对于隧道开挖、巷道施工等实际工程爆破作业而言,相对于开挖隧洞,爆破岩体是无限大的。因此,在进行数值分析时,应按无限域问题进行考虑,否则会使应力波在有限边界上产生反射而导致模拟失真。目前,采用有限元数值分析方法时,消除边界影响的方法主要有3种:1) 远置边界法;2) 采用无限元或边界元模拟边界;3) 设置黏性边界、黏弹性边界等人工边界。远置边界法求解精度高,但往往需要增加模型尺寸,降低了模型计算速度。无限边界是一种将有限元和无限元相结合求解问题的方法,这种方法采用有限元构造模型近场网格,采用无限元构造远场网格。其求解精度一般也较高,但需要编程语言,对编程人员有一定要求。设置动力人工边界也是一种常用的边界处理方法。这种方法一般是通过在边界上设置弹簧—阻尼器系统使应力波在到达边界时能够被边界吸收而无法产生反射波。且这种设置目前已在一些通用数值分析软件中有应用,不需要人为编程,操作简单。ABAQUS提供了用于模拟黏弹性动力人工边界的模型,该模型将在计算模型边界上连续分布若干并联弹簧—阻尼器系统,其中,

弹簧系数 K_b 及阻尼系数 C_b 可由公式(4)计算得到:

$$\begin{cases} K_b = \alpha \frac{G}{R} \\ C_b = \rho c \end{cases} \quad (4)$$

式中, G, ρ 分别为人工边界处介质的剪切模量、密度; R 为散射波源(爆炸点)到人工边界的距离; c 为人工边界处介质的波速,法向阻尼系数取纵波波速 C_p ,切向阻尼系数取为剪切波波速 C_s ; α 的取值取决于黏弹性动力人工边界的类型及设置的方向,本研究中 $\alpha=1.5$ 。

3 结果与分析

图4为数值模拟的STATUSXFEM结果图。STATUSXFEM表征了扩展有限元(XFEM)单元失效裂纹扩展的状态,其值在[0,1]之间。当STATUSXFEM=0时,表示单元没有损伤,模型保持完好;当 $0 < \text{STATUSXFEM} < 1$ 时,表示单元产生了损伤,但并没有产生裂纹;当STATUSXFEM=1时,表示单元完全失效,裂纹开始扩展。从图4中可以看出,在 $t=20 \mu\text{s}$ 时,爆生裂纹沿切槽方向首先起裂扩展,而在非切槽方向仅存在一定的损伤,但并未产生宏观裂纹。在 $t=40 \mu\text{s}$ 时,非切槽方向开始产生爆生裂纹,其扩展方向基本垂直于切槽方向。但由于切

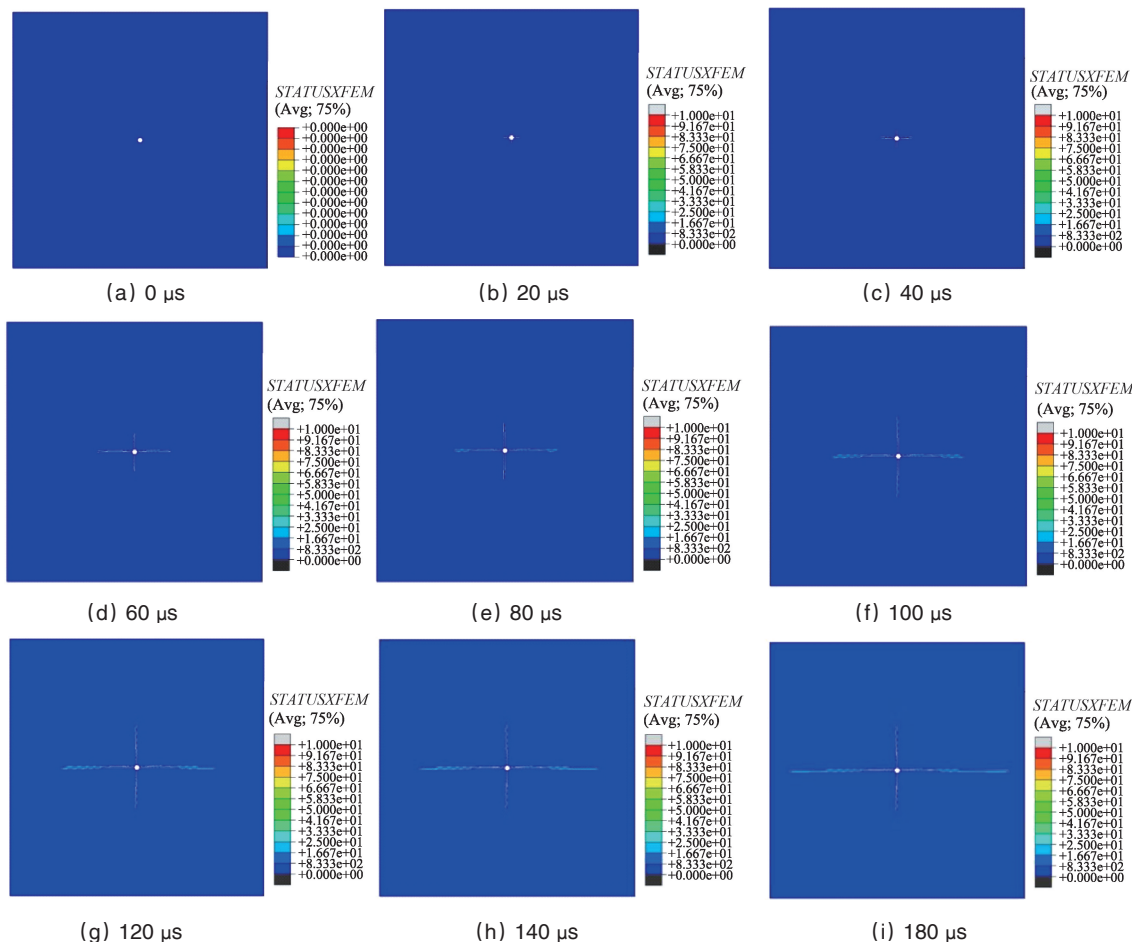


图4 爆生裂纹扩展的STATUSXFEM图

Fig. 4 STATUSXFEM of blast-induced crack propagation

槽方向优势裂纹的影响,促使爆炸能量沿切槽方向继续释放,使爆生裂纹沿切槽方向快速扩展,直到 $t=180\ \mu\text{s}$ 时停止扩展。而在非切槽方向,爆生裂纹由于没有得到更多爆炸能量的补充,其裂纹的扩展速度较切槽方向慢很多,在 $t=120\ \mu\text{s}$ 时就基本停止扩展。最终,切槽方向爆生裂纹的扩展长度分别为121 mm(炮孔左侧爆生裂纹)和127 mm(炮孔右侧爆生裂纹),平均为124 mm,非切槽方向爆生裂纹的扩展长度分别为48 mm(炮孔上方爆生裂纹)和42 mm(炮孔下方爆生裂纹),平均为45 mm,是切槽方向爆生裂纹扩展平均长度的36%。

从模拟的结果可以看出,造成切槽方向和非切槽方向裂纹长度差异的原因主要有2个。一方面,爆炸能量在切槽处首先形成应力集中,当切槽处的应力达到材料的抗拉强度时,裂纹就起裂并沿切槽方向扩展;另一方面,由于切槽方向裂纹起裂早于非切槽方向,能量沿切槽方向优先释放,导致切槽方向裂纹的张开角度更大,这又进一步促使能量沿张开度较大的裂缝方向释放,最终使切槽方向的裂纹快速持续扩展,而非切槽方向的裂纹则扩展慢且扩展距离短。

为了定量分析切槽方向和非切槽方向爆生裂纹的扩展规律,将炮孔切槽方向左右两侧的爆生裂纹分别表示为 H_1 和 H_2 ,非切槽方向上下两侧的爆生裂纹分别表示为 V_1 和 V_2 。图5和图6分别为切槽方向和非切槽方向爆生裂纹的扩展速度和扩展距离随时间的变化曲线。

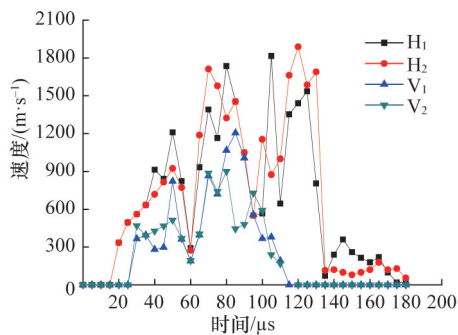


图5 爆生裂纹扩展速度随时间的变化

Fig. 5 Velocity of the blast-induced crack propagation vs. time

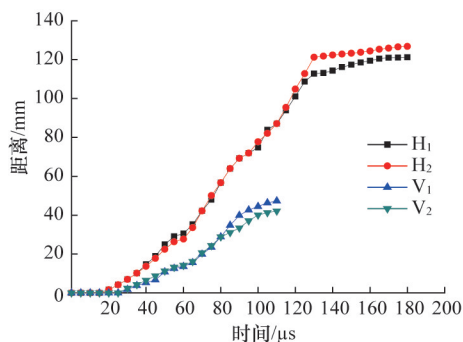


图6 爆生裂纹扩展距离随时间的变化

Fig. 6 Displacement of the blast-induced crack propagation vs. time

从图5中可以看出,在切槽方向,爆生裂纹的扩展可分为3个阶段:第一阶段:加速扩展阶段。在 $t=20\sim 60\ \mu\text{s}$,爆生裂纹 H_1 和 H_2 起裂并沿切槽方向扩展,其扩展速度在起裂后先快速增大,在 $t=50\ \mu\text{s}$ 时, H_1 和 H_2 的扩展速度分别达到这一阶段的最大值1206 m/s和924 m/s,随后迅速下降,在 $t=60\ \mu\text{s}$ 时分别下降到307 m/s和277 m/s,这是由爆炸冲击波的应力幅值下降造成的。在第一阶段,爆生裂纹 H_1 和 H_2 扩展距离分别为30 mm和27 mm,约为炮孔直径的5倍,裂纹扩展的平均速度分别为750 m/s和675 m/s。第二阶段:失稳扩展阶段。爆生裂纹 H_1 和 H_2 在起裂并向前扩展一段距离之后,逐渐失稳,并沿切槽方向快速扩展。其扩展速度呈先增大后减小又再次增大的特点,其扩展速度的最大值分别为1888 m/s和1816 m/s。在这一阶段, H_1 和 H_2 扩展的平均速度分别达到了1171 m/s和1343 m/s,其扩展距离分别达到了82 mm和94 mm,约为炮孔直径的15倍。第三阶段:减速扩展阶段。随着爆炸冲击波应力幅值的衰减,爆生裂纹 H_1 和 H_2 的扩展速度在 $t=130\ \mu\text{s}$ 之后迅速下降,并在 $180\ \mu\text{s}$ 之后停止扩展。在该阶段,裂纹的扩展速度在300 m/s以下,处于裂纹扩展的末期。

在非切槽方向,由于爆生裂纹 V_1 和 V_2 获得的爆炸能量小,其扩展速度和扩展距离均低于 H_1 和 H_2 。在 V_1 和 V_2 的扩展过程中,其扩展速度最大值分别为1205 m/s和900 m/s,其平均速度分别为525 m/s和600 m/s,低于爆生裂纹 H_1 和 H_2 的平均速度。这是因为爆炸能量沿切槽方向的主裂纹面优先释放。由于切槽的存在, H_1 和 H_2 在 $t=20\ \mu\text{s}$ 时首先沿切槽方向扩展,形成新的断裂面,为爆炸能量提供了释放空间,使 H_1 和 H_2 沿切槽方向快速扩展;非切槽方向的爆生裂纹 V_1 和 V_2 则由于得到的能量较少而扩展较慢。

4 结论

基于ABAQUS平台,应用扩展有限元(XFEM)方法成功模拟了切槽爆破爆生裂纹沿切槽方向和非切槽方向的裂纹扩展。数值模拟结果表明:

1) 切槽方向和非切槽方向爆生裂纹扩展的平均距离分别为124 mm和45 mm,说明采用切槽炮孔定向断裂爆破可以在切槽方向加大孔距,减少钻孔数量,同时减弱了非切槽方向对围岩的损伤;

2) 切槽方向爆生裂纹的扩展较非切槽方向具有明显的阶段性,可分为加速扩展阶段、失稳扩展阶段和减速扩展阶段;而非切槽方向爆生裂纹扩展速度的波动相对较小;

3) 切槽方向在失稳扩展阶段的平均速度为1343 m/s,非切槽方向爆生裂纹的平均速度为600 m/s,仅为切槽方向爆生裂纹平均速度的44%,说明切槽有利于爆炸能量释放,增加爆生裂纹的扩展速度;

4) 切槽方向爆生裂纹的起裂比非切槽方向早 $10\ \mu\text{s}$,导致爆炸能量沿切槽方向优先释放,使切槽方向的裂纹张开角度更大,促使爆炸能量沿这一方向继续释放,这是导致切槽

方向爆生裂纹扩展时间长、速度快、扩展距离远的主要原因。

参考文献 (References)

- [1] Langefors U, Kihlstrom B. The modern technique of rock blasting[M]. Neo York: John Wiley and Son, 1963: 300-301.
- [2] Costin L S. Static and dynamic fracture behavior of oil shale[J]. ASTM Special Technical Publication, 1981, 745: 169-184.
- [3] Fourney W L, Barker D B, Holloway D C. Model studies of well stimulation using propellant charges[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(2): 91-101.
- [4] 杜云贵, 张志呈. 圆形炮孔切槽后对岩石破坏方向控制作用的力学分析[C]//全国第四届岩石破碎学术讨论论文集. 成都: 中国金属学会, 1989: 87-93.
- Du Yungui, Zhang Zhicheng. Mechanics analysis of control effect to rock fracture direction in grooving circle borehole[C]//The Fourth National Academic Discussion on Rock Fragmentation. Chengdu: The Chinese Society For Metals, 1989: 87-93.
- [5] 杨仁树, 王雁冰, 杨立云, 等. 双孔切槽爆破裂纹扩展的动焦散实验[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 868-872.
- Yang Renshu, Wang Yanbing, Yang Liyun et al. Dynamic caustics experimental study on crack propagation in two borehole cut blasting[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(6): 868-872.
- [6] 杨仁树, 王雁冰, 岳中文, 等. 定向断裂双孔爆破裂纹扩展的动态行为[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 631-637.
- Yang Renshu, Wang Yanbing, Yue Zhongwen, et al. Dynamic behaviors of crack propagation in directional fracture blasting with two holes[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 631-637.
- [7] 李清, 王平虎, 杨仁树, 等. 切槽孔爆破动力学特征的动焦散线实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 413-418.
- Li Qing, Wang Pinghu, Yang Renshu, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical behaviors of cracks induced by V-notch borehole blasting with dynamic caustics[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4): 413-418.
- [8] 吴春平. 切槽定向断裂控制爆破机理的动光弹研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2006.
- Wu Chunping. Study on the mechanism of notched directional splitting controlled blasting by dynamic photoelastic method[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2006.
- [9] 张玥. V形刻槽爆破动态数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- Zhang Yue. Dynamic numerical simulation of V-shaped notch blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [10] 徐海清. 刻槽控制爆破有限元数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- Xu Haiqing. The finite element numerical simulation of groove fracture controlled blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [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] Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601-620.
- [13] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS/standard user's Manual[M]. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2001.

Numerical simulation of directional fracture blast in grooving borehole based on XFEM method

LI Qing, GUO Yang, ZHANG Leizhi, XU Wenlong, ZHANG Jiangyu, CHANG Xu

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract The blast-induced crack initiation, propagation and arrest along both grooving and non-grooving directions in grooving directional fracture blasting are simulated by using the extended finite element method (XFEM) in the ABAQUS software. The results show that, it is 10 μs earlier in the grooving direction for the charge explosion to initiate cracks than in the non-grooving direction; while the crack propagation in the non-grooving direction does not see clear stages, the crack propagation in the grooving direction is clearly in three stages: the accelerating crack propagation, the unstable crack propagation and the decelerating crack propagation; the crack arrest time along the grooving direction is 60 μs more as compared with that in the non-grooving direction. During the crack propagation stage, the average speed of the unstable propagation in the grooving direction is 1343 m/s, while, it is 44% less in the non-grooving direction with the average speed of 600 m/s. This indicates that the groove is beneficial for releasing the blast energy, and increasing the crack speed to a higher level. The groove has obviously the guidance effect in the extension direction of cracks, for the average crack length in the grooving and non-grooving directions is 124 mm and 45 mm, respectively. The XFEM method shows a promising prospect in simulating the crack propagation in the grooving directional blast.

Keywords extend finite element method (XFEM); directional fracture blast; grooving borehole; blast induced cracks

(编辑 傅雪)