DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0825-07

爆炸荷载作用下岩石动态裂纹扩展的数值模拟*

钟波波,李 宏,张永彬
(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:运用岩石破裂过程分析软件 RFPA-dynamic,就爆炸荷载的加载速率、炮孔到自由边界的距离以及两炮孔中间空孔的大小对动态裂纹扩展方式的影响进行了研究。结果表明:随着加载速率的减小,炮孔周围的破碎区逐渐减少;裂纹开始萌生的位置逐渐由破碎区外边缘向炮孔孔壁转移;萌生的分支小裂纹逐渐减少,主裂纹扩展长度逐渐增大。由于自由边界的影响,炮孔向下扩展的裂纹逐渐弯向水平方向,且炮孔到自由边界的距离越小,这种趋势越明显。由于空孔的导向作用,使靠近空孔的裂纹逐渐弯曲向空孔处扩展,同时在空孔孔壁两端产生一条向炮孔扩展的裂纹;空孔半径大小对裂纹的导向作用,并无明显的影响;材料的非均匀性,对裂纹的扩展方式有显著的影响。

关键词:固体力学;裂纹扩展;RFPA-dynamic;爆炸应力波;空孔
中图分类号:O346.1 **国标学科代码**:1301545 **文献标志码**:A

在采矿工程、石油开采工程及地震预测等领域中,常常关注裂纹、空孔、夹杂物等爆破结构或材料中的原始缺陷,对介质中应力波传播方式的影响。尤其在巷道或隧道的开挖中,常设置一些空孔,利用空孔的应力集中效应、自由面效应和卸压效应,以提高爆破效果。空孔在爆破过程的作用机理,有了大量的研究。S. H. Cho 等[1]通过数值模拟的方法,研究了不同波形和自由边界对动态裂纹扩展过程的影响,并讨论了岩石的非均匀性对断裂模式的影响;S. H. Cho 等[2]通过 DFPA 软件研究了两端带有刻痕的空孔对动态裂纹扩展过程的控制作用,并讨论了空孔位置、两炮孔起爆时间误差和材料非均匀性对裂纹扩展的影响;Z. Aliabadian 等[3]采用二维动态离散元方法研究了预裂爆破方法,主要考虑的参数是应力张量和压裂模式,结果表明爆炸荷载的大小和炮孔间距非常重要;李启月等[4]运用 LS-DYNA,模拟了槽孔与不同直径空孔的动态破碎贯通过程,分析了不同直径空孔引起的空孔效应及其对槽腔岩石破坏和槽腔成型的促进作用;岳中文等[5]采用新型数字激光动态焦散线实验系统,以 PMMA 为实验材料,对爆炸荷载作用下空孔周围的动应力场分布及空孔对爆生主裂纹扩展行为的影响进行了研究。

由于岩石是一种非均匀材料,其断裂过程依赖于应变率的大小,其空孔作用机理复杂、设置灵活,所以对空孔周围应力场变化过程和动态裂纹扩展方式进行研究有着重要的理论意义和工程价值。本文中,选用 RFPA-dynamic 分析系统,就爆炸荷载加载速率、炮孔到自由边界距离以及两炮孔中间空孔大小对动态裂纹扩展方式的影响进行研究。该程序可以以一个应力波或初始速度作为输入,按照时间步长进行逐步分析,在每个时间步内,考虑质量和加速度对于力学平衡的影响,用弹性动力有限元程序进行应力分析,用最大拉应力准则和摩尔库仑准则判断单元是否损伤,从而可以再现岩石这种非均匀材料在爆炸荷载作用下的动态裂纹扩展过程。

1 模 型

RFPA-dynamic 分析系统规定应力以压为正,拉为负,相关详情请参见文献[6-8]。

模型如图 1 所示,尺寸为 200 mm×100 mm,划分为 500×250=125 000 个单元,炮孔半径 r_0 均为 4 mm。图 1(a)中,炮孔到自由边界距离 l 分别为 35、30、25 mm;图 1(b)中,两个炮孔间距 s 为 50 mm,

* **收稿日期**:2015-04-15;**修回日期**:2015-06-29
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB047100,2011CB013503)
第一作者:钟波波(1990—),男,硕士研究生,ytgczbb@163.com。

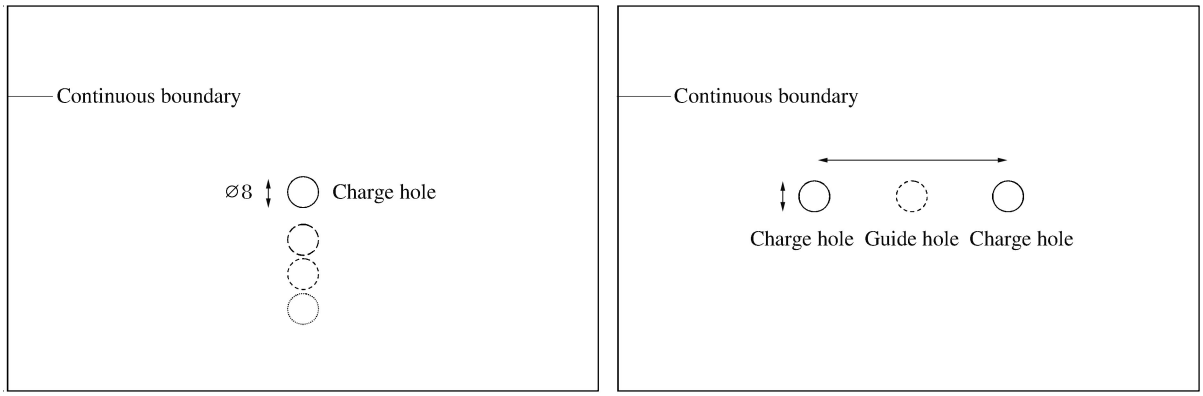

图 1 分析模型几何示意图

Fig. 1 Schematic geometry for analysis model

两炮孔中间空孔半径 r_2 分别为 2、4、6 mm。施加的爆炸荷载如图 2 所示，荷载峰值都为 10 MPa，荷载上升时间分别为 1、5、10、20 μs，荷载从峰值衰减到零的时间不变，均为 5 μs。为了计算的精确性，动态时间步长取为 0.2 μs。

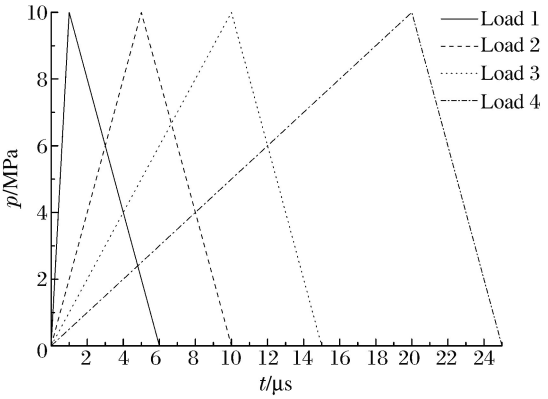

图 2 施加荷载的压力曲线

Fig. 2 Pressure curves for applied pressure waveforms

研究爆炸荷载加载速率和空孔大小对动态裂纹扩展方式的影响时，模型边界都为连续边界条件，应力波不发生反射；研究炮孔到自由边界距离对动态裂纹扩展方式的影响时，模型底边为自由边界，应力波可以发生反射，其余边界仍为连续边界。采用平面应变模型，进行分析。

计算参数分别为：P 波波速 $v_P=5.00$ km/s，S 波波速 $v_S=2.89$ km/s，密度 $\rho=2.7$ t/m^3，弹性模量 $E=56$ GPa，泊松比 $\nu=0.25$，抗压强度 $T=75$ MPa，压拉比 $\eta=15$，均质系数 $m=5$。为了考虑材料的非均匀性，假设基质单元的弹性模量及强度等力学参数服从 Weibull 分布函数，即：

$$\varphi(\alpha)=\frac{m}{\alpha_0}\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{m-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m} \tag{1}$$

式中：m 为均质系数，反映岩石材料力学性质的均质度，m 越小则岩石的性质越不均匀；α_0 为反映岩石材料平均性质的参数。有关上述分布函数和参数的定义及选取方法参见文献[9-10]。

2 结 果

2.1 单孔

2.1.1 爆炸荷载加载速率对动态裂纹扩展方式的影响

4 种加载速率下最大主应力分布及裂纹扩展方式，如图 3 所示。从图 3 中可以看出，随着加载速率的减小，炮孔周围的破碎区逐渐减小，裂纹开始萌生的位置逐渐改变。第 1 种加载速率下，炮孔周围形成一圈破碎区，裂纹开始萌生的位置为破碎区的外边缘；第 4 种加载速率下，炮孔周围未能形成破碎区，裂纹开始萌生的位置为炮孔孔壁；第 2、3 种加载速率下，破碎区范围逐渐减少，裂纹开始萌生的位置逐渐由破碎区的外边缘向炮孔孔壁转移。这个现象主要是由于，随着加载速率的减小爆炸荷载引起的应力波作用逐渐减弱，当加载速率很小时，裂纹萌生就会类似于炮孔孔壁受法向均匀静荷载时的情况。从图 3 中还可以发现，随着加载速率的减小，萌生的分支小裂纹逐渐减少，而主裂纹扩展的长度逐渐增大。上述模拟结果与文献[1]所得到的结论基本一致。

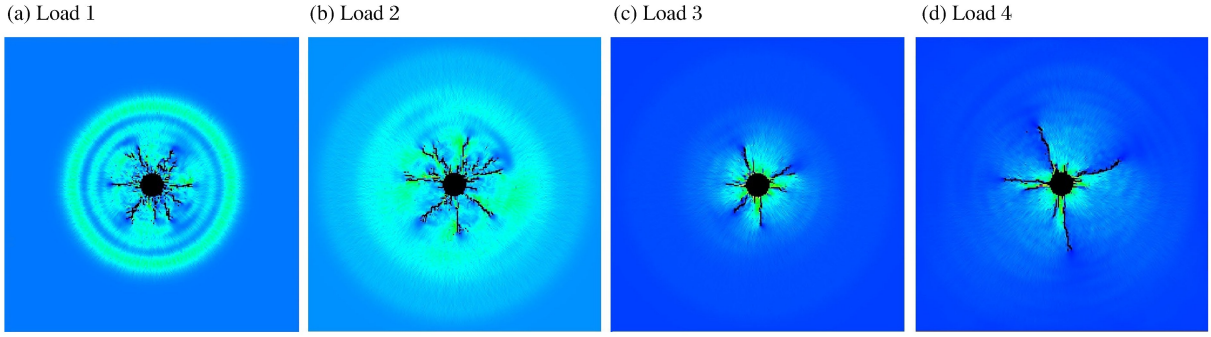

图 3　不同加载速率下最大主应力分布及裂纹扩展

Fig. 3　Maximum principal stress distribution and crack propagation at different loading rates

2.1.2　炮孔到自由边界距离对动态裂纹扩展方式的影响

只施加第 1 种荷载，将炮孔到自由边界的距离分别取为 35、30 和 25 mm，结果如图 4 所示。根据应力波传播理论，当应力波传播到自由面时，压缩应力波反射为拉伸应力波，产生拉应力。该拉应力与先前的压应力叠加，使靠近自由面单元的径向压应力减小。当反射回来的拉伸应力波幅值大于先前入射的压缩应力波幅值时，在靠近自由面的区域内就会出现只有拉应力的情况。根据最大拉应力瞬时断裂准则[11]，一旦拉应力达到或超过材料的抗拉临界值时，就会发生层裂。

从图 4 中可以发现，炮孔处向下扩展的裂纹逐渐弯向水平方向，且随着炮孔到自由边界距离的减小，这种趋势更加明显，说明自由表面的存在对裂纹扩展方向产生了明显的影响。炮孔到自由边界越近，应力波传播到自由面位置的幅值就越大，相应地反射产生的拉应力幅值也就越大，层裂现象越明显。当炮孔到自由边界的距离较小时，炮孔处扩展的裂纹与层裂产生的裂纹在自由面附近，更易于互相搭接和贯通。

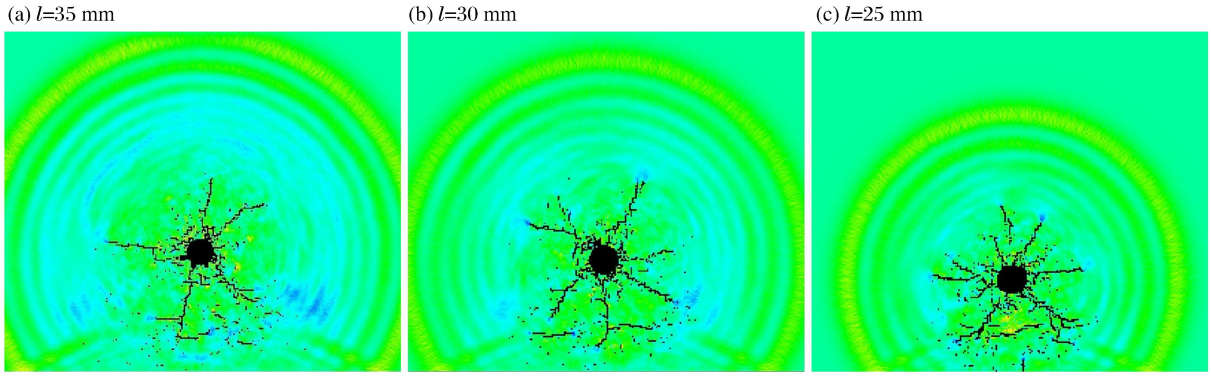

图 4　炮孔到自由边界不同距离下最大主应力分布及裂纹扩展

Fig. 4　Maximum principal stress distribution and crack propagation of different distance from charge hole to free boundary

2.2　双孔

2.2.1　爆炸应力波与空孔相互作用的理论依据

炮孔爆炸后，向周围岩石施加冲击荷载，冲击波向外传播而不断衰减，最后变成应力波。当应力波传播到空孔孔壁表面时，在空气与介质的分界面处，将产生透射与反射。下面分析应力波垂直传播到空孔孔壁时，即正入射时，模型中反射波的情况。

如图 5 所示，炮孔起爆后，在其周围介质中激起爆炸应力波，并向外传播，随着传播距离的增加，应力峰值衰减规律为[12]：

$$\sigma_r = p_0\left(\frac{r_0}{r}\right)^{\alpha},\sigma_\theta = \lambda_d\sigma_r \quad (2)$$

式中:σ_r 为介质中某点的爆炸附加径向应力;σ_θ 为介质中某点的爆炸附加环向应力;p_0 为炸药爆炸后作用于孔壁的初始压力;r_0 为炮孔半径;r 为介质中某点到炮孔中心的距离;α 为应力波衰减系数[12],$\alpha=2\pm(\nu/1-\nu_d)$;ν_d 为介质的动态泊松比,工程爆破加载速率范围内的动态泊松比与静态泊松比 ν 的关系为 $\nu_d=0.8\nu$;λ_d 为动态侧应力系数,$\lambda_d=\nu/(1-\nu_d)$。

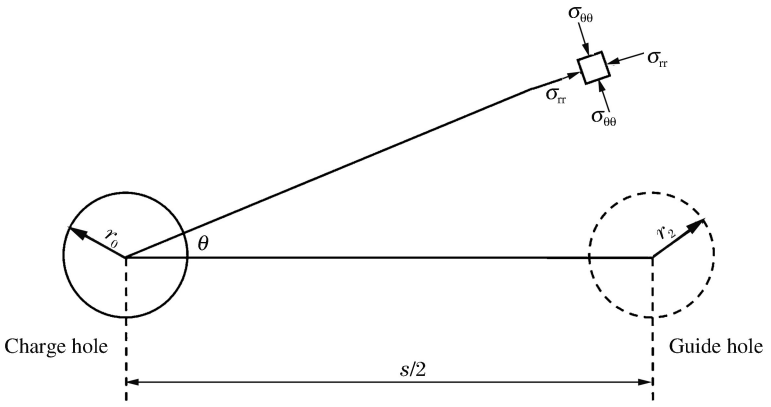

图 5 空孔应力集中作用分析图

Fig. 5 Concentrated effect of stress around guide hole

当应力波传到空孔孔壁时,由于应力波的反射,空孔孔壁附近的应力将比无空孔时大,表现为空孔的应力集中效应。根据弹性力学理论,空孔附近的峰值应力状态表示为:

$$\begin{cases}\sigma_{rr} = \dfrac{1}{2}\left[(1-\kappa^2)(\sigma_\theta-\sigma_r)+(1-4\kappa^2+3\kappa^4)(\sigma_\theta\cos2\theta+\sigma_r\cos2\theta)\right]\\ \sigma_{\theta\theta} = \dfrac{1}{2}\left[(1+\kappa^2)(\sigma_\theta-\sigma_r)+(1+3\kappa^2)(\sigma_\theta\cos2\theta+\sigma_r\cos2\theta)\right]\\ \tau_{r\theta} = \dfrac{1}{2}(1+2\kappa^2-3\kappa^4)(\sigma_\theta\cos2\theta+\sigma_r\cos2\theta)\end{cases} \quad (3)$$

式中:σ_{rr} 为空孔应力集中后介质中的径向应力;$\sigma_{\theta\theta}$ 为空孔应力集中后介质中的环向应力;r_2 为空孔半径;R 为介质中某点到空孔中心的距离;θ 为计算点到炮孔中心连线与炮孔和空孔连线的夹角;$\kappa=r_2/R$。

对上式求 $\mathrm{d}\sigma_{\theta\theta}/\mathrm{d}\theta$,令 $\mathrm{d}\sigma_{\theta\theta}/\mathrm{d}\theta=0$,得 $\theta=0,\pm\pi$,可知径向应力、环向应力及剪切应力的最大值均出现在炮孔与空孔连线方向上。此时:

$$\begin{cases}\sigma_{rr} = \dfrac{1}{2}\left[(1-\kappa^2)(\sigma_\theta-\sigma_r)+(1-4\kappa^2+3\kappa^4)(\sigma_\theta+\sigma_r)\right]\\ \sigma_{\theta\theta} = \dfrac{1}{2}\left[(1+\kappa^2)(\sigma_\theta-\sigma_r)+(1+3\kappa^2)(\sigma_\theta+\sigma_r)\right]\\ \tau_{r\theta} = \dfrac{1}{2}(1+2\kappa^2-3\kappa^4)(\sigma_\theta+\sigma_r)\end{cases} \quad (4)$$

在空孔孔壁上时,$r_2=R$,即 $\kappa=1$,得:

$$\begin{cases}\sigma_{rr}=0\\ \sigma_{\theta\theta,\max}=3\sigma_\theta+\sigma_r=(3\lambda_d+1)\,p_0\left(\dfrac{r_0}{S/2-r_2}\right)^{\alpha}\\ \tau_{r\theta}=0\end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 空孔大小对动态裂纹扩展方式的影响

空孔在爆破中有着重要地位,特别是在控制定向爆破中对应力波具有导向作用,这点已得到了证明[4-5]。

图 6(a)~(c)分别为半径 2、4 和 6 mm 空孔在第 1 种荷载作用下的最大主应力分布及其裂纹扩展方式。从图中可以看到,炮孔起爆后,伴随着应力波由炮孔逐渐向外传播,在炮孔周围逐渐形成破碎区,裂纹在破碎区边缘开始萌生、扩展;当应力波传播到空孔孔壁时,小部分应力波发生反射,反射波与之后的入射波叠加,相当于在空孔孔壁处产生了卸荷作用,大部分应力波继续向外传播,与另外炮孔产生的应力波叠加,叠加部位压应力幅值增加;炮孔周围萌生的裂纹呈放射状向外扩展,但由于空孔的导向作

用，使靠近空孔的裂纹逐渐弯曲向空孔处扩展，同时在空孔孔壁两端产生一条向炮孔扩展的裂纹。可见，空孔半径对裂纹的导向作用并无明显的影响，这与文献[13]的研究结果基本一致。半径 4、6 mm 空孔孔壁裂纹的萌生位置大约在与炮孔中心连线处，这与上述理论分析一致。而半径 2 mm 空孔的却不在中心连线处，这是由于当空孔半径较小时，非均匀性对它的影响比大孔径空孔的大。

图 6(d)为均质系数 25、半径 2 mm 空孔模型的最大主应力分布及裂纹扩展方式。通过与图 6(a)作对比，发现：当均质系数增大时，分支小裂纹减少，以扩展长度基本相同的主裂纹为主，且裂纹较平直光滑；两炮孔裂纹萌生位置和扩展方式基本一样。由于炮孔各方向受力相同，当材料较均匀时，裂纹萌生、扩展具有对称性。图 6(d)中大约在空孔与炮孔中心连线上萌生了两条裂纹，且很平直地向炮孔方向扩展。这个现象与上述的弹性理论较吻合，同时说明了考虑材料非均匀性的重要意义。

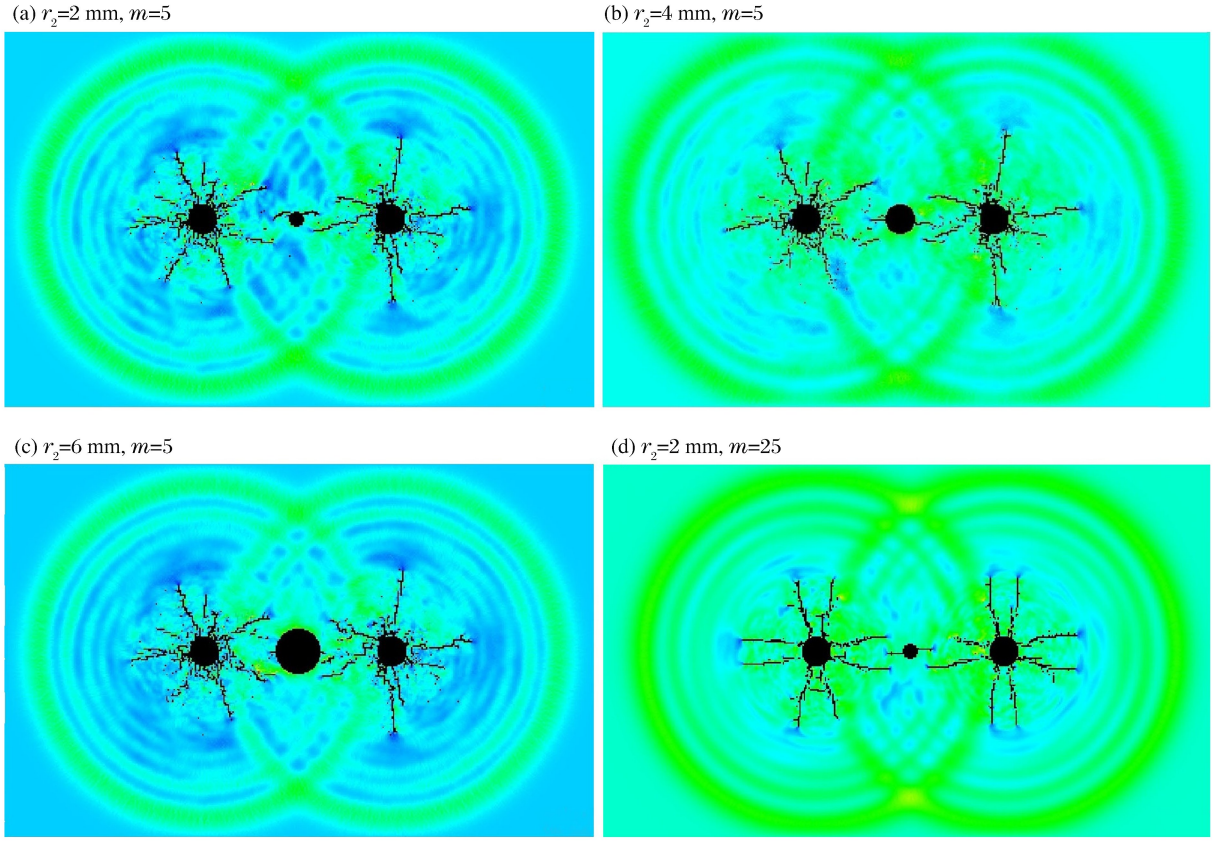

图 6　不同半径空孔的最大主应力分布及裂纹扩展

Fig. 6　Maximum principal stress distribution and crack propagation of different guide holes

2.2.3　空孔孔壁单元的主应力曲线

图 7 为与左炮孔中心连线处、距空孔孔壁 1.2 mm 处一个单元的主应力曲线，该空孔半径为 4 mm。可以清楚看到应力波的传播、反射和叠加：随着应力波从炮孔向空孔的传播，单元最大主应力从零开始逐渐增大到 1 MPa，到达 A 点后，由于爆炸荷载开始衰减和反射的拉应力与入射的压应力叠加的双重作用，主应力开始下降；B 点为临界点，由于拉应力随着反射波的增多而增大，主应力开始反向增大，C 点为最大主应力反向的最大值，约为 1 MPa；C 点到 D 点之间，由于右炮孔产生的应力波传播到了空孔左孔壁附近，导致主应力曲线出现小幅度的波动；从 D 点所对应时间的最小主应力云图可以发现，由于左右炮孔向外传播的应力波和空孔孔壁反射的应力波相互叠加、炮孔辐射状裂纹尖端的应力集中及破坏单元周围的应力释放，空孔孔壁周围形成了一个拉应力集中区，当拉应力达到试样的抗拉强度(5 MPa)时，裂纹开始萌生(E 点)；裂纹一旦萌生，单元应力迅速降到零。

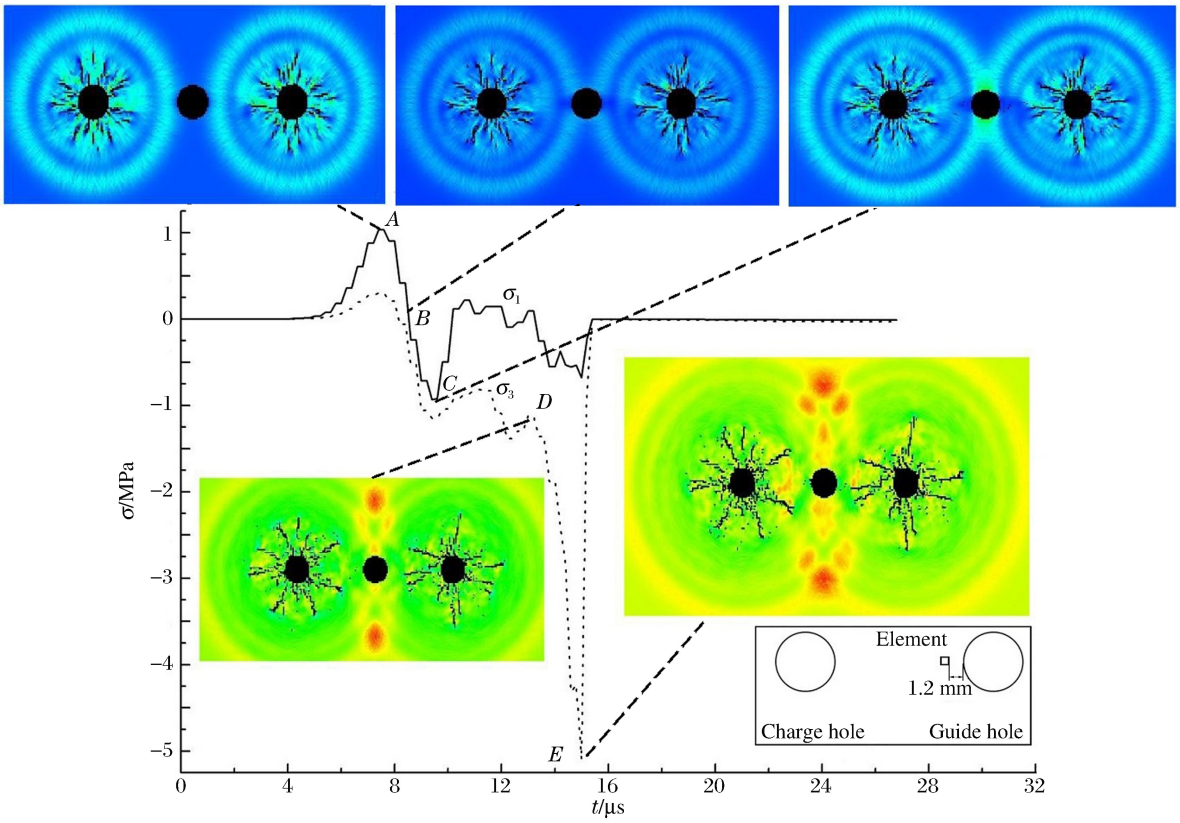

图 7 单元的主应力曲线

Fig. 7 The principal stress curves of the element

3 结 论

炮孔周围为连续边界条件时，在爆炸荷载作用下，随着加载速率的减小，炮孔周围的破碎区逐渐减少，裂纹开始萌生的位置逐渐由破碎区外边缘向炮孔孔壁转移，孔壁周围萌生的分支小裂纹逐渐减少，主裂纹扩展长度逐渐增大。炮孔周围存在自由边界时，由于自由面的影响，炮孔向下扩展的裂纹逐渐弯向水平方向，且炮孔到自由边界的距离越小，这种趋势越明显，加上层裂的作用，自由面附近的裂纹更易于互相搭接、扩展和贯通。当两炮孔中间有一个空孔时，由于空孔的导向作用，使炮孔向空孔方向扩展的裂纹，逐渐弯曲向空孔处扩展，但空孔半径大小对裂纹的导向作用，并无明显的影响，同时大约在空孔与炮孔中心连线上，空孔孔壁两端萌生了向炮孔处扩展的裂纹，由于材料的非均匀性，裂纹的萌生位置和扩展方式与弹性理论解有着些许的不同。由空孔孔壁处单元的主应力时程曲线可以发现，孔壁裂纹是由于空孔周围的拉应力集中而萌生的。

参考文献：

[1] Cho S H, Kaneko K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(5):771-784.

[2] Cho S H, Nakamura Y, Mohanty B, et al. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008,75(13):3966-3984.

[3] Aliabadian Z, Sharafisafa M. Numerical modeling of presplitting controlled method in continuum rock masses[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013,7(12):5005-5020.

[4] 李启月，徐敏，范作鹏，等. 直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. 爆破，2011,28(4):23-26.
Li Qiyue, Xu Min, Fan Zuopeng, et al. Simulation of rock failure process in cutting by parallel hole and analysis on

empty hole effect[J]. Blasting, 2011,28(4):23-26.

[5] 岳中文,郭洋,许鹏,等.定向断裂控制爆破的空孔效应实验分析[J].爆炸与冲击,2015,35(3):304-311.
Yue Zhongwen, Guo Yang, Xu Peng, et al. Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(3):304-311.

[6] Chau K T, Zhu W C, Tang C , et al. Numerical simulations of failure of brittle solids under dynamic impact using a new computer program: DIFAR[J]. Key Engineering Materials, 2004,261/263(1):239-244.

[7] Zhu W C, Tang C A, Huang Z P, e t al. A numerical study of the effect of loading conditions on the dynamic failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(3):424-424.

[8] Zhu W C, Tang C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006,43(2):236-252.

[9] 唐春安.岩石声发射规律数值模拟初探[J].岩石力学与工程学报,1997,16(4):368-374.
Tang Chun'an. Numerical simulation of AE in rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997,16(4):368-374.

[10] Tang C. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997,34(2):249-261.

[11] 王礼立,朱兆祥.应力波基础[M].2 版.北京:国防工业出版社,2005.

[12] 戴俊.柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(2):144-147.
Dai Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001,20(2):144-147.

[13] 文梼,谭海.岩石爆破中的空孔效应数值计算分析[J].爆破,2011,28(3):58-61.
Wen Tao, Tan Hai. The empty hole effect numerical computation analysis during rock blasting[J]. Blasting, 2011,28(3):58-61.

Numerical simulation of dynamic cracks propagation of rock under blasting loading

Zhong Bobo, Li Hong, Zhang Yongbin

(*State Key Laboratory Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*)

Abstract: The influences of the blast loading rate, the distance from the guide hole to the free boundary and the radius of the guide hole between the two charge holes, on the dynamic propagation of cracks in rock were studied using realistic failure process analysis (RFPA-dynamic). The results show that, as the loading rate decreases, the crushed zone around the charge hole is gradually reduced; the position of the crack initiation moves gradually from the crushed zone to the charge hole; and the number of small branch cracks gradually decreases while the length of the main crack increases. Due to the influence of the free boundary, the cracks that were previously downward now gradually bend in the horizontal direction, and this tendency becomes more observable as the distance from the charge hole to the free boundary gets shorter. As a result of the guidance of the guide hole, the cracks close to the guide hole gradually curve to the guide hole and, at the same time, a crack is formed at both ends of the guide hole wall that propagates to the charge hole. The radius of the guide hole has no obvious effect on the guiding role, but the nonuniformity of the material does have a significant effect on the way the cracks propagate.

Key words: solid mechanics; crack propagation; RFPA-dynamic; explosive stress wave; guide hole

(责任编辑　丁　峰)