

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.12.023

高压水射流螺旋式切槽辅助松动爆破模型

粟登峰¹, 康勇^{1,2}, 王晓川^{1,2}, 郑丹丹³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 武汉大学 水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 四川国泰民安科技有限公司, 四川 成都 610100)

摘要: 基于水射流独特的切割优势提出了高压水射流螺旋式切槽辅助松动爆破的新方法, 实验研究了高压水射流切割煤岩体所形成缝槽的断口形貌并建立了其几何模型. 在此基础上, 基于断裂力学理论同时结合 Westergaard 方法, 确定了复变函数, 进而推导出爆生气体准静态作用下射流螺旋切槽孔的应力场公式, 得到了射流螺旋切槽孔缝槽尖端应力强度因子计算公式, 并分析了高压水射流切槽辅助松动爆破松动效应. 最后, 采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件对该模型进行了验证, 结果符合较好.

关键词: 水射流; 螺旋切槽; 松动爆破; 应力场; ANSYS/LS-DYNA

中图分类号: U 455.6 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)12-1778-06

Model of Loosen Blasting Assisted by High-Pressure Water Jet Spiral-Notch

SU Deng-feng¹, KANG Yong^{1,2}, WANG Xiao-chuan^{1,2}, ZHENG Dan-dan³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Hubei Key Laboratory of Waterjet Theory & New Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Sichuan Guotaiminan Science and Technology Co., Ltd, Chengdu 610100, China. Corresponding author: KANG Yong, professor, E-mail: kangyong@whu.edu.cn)

Abstract: A new technology of loosen blasting assisted by high-pressure water jet spiral-notch was put forward based on its unique advantages of water jet cutting, and the geometric model for water jet notched boreholes was established based on experiments. Furthermore, by employing fracture mechanics and Westergaard stress function method, the functions of complex variables was confirmed, and the stress field acted upon the spirally water jet notching borehole by quasi-static explosion gas was derived. The stress intensity factor of spiral-notch boreholes with high-pressure water jet was determined, and the loosening effect of loosen blasting assisted by high-pressure water jet spiral-notch was also analyzed. Finally, ANSYS/LS-DYNA was applied to verify the theoretical model, and the results of the numerical simulation are almost comparable to the model.

Key words: water jet; spiral notch; loosen blasting; stress field; ANSYS/LS-DYNA

煤层瓦斯抽采不仅是防治煤矿瓦斯事故的有效措施, 而且是煤层瓦斯开发利用的关键技术. 因而, 如何有效提高煤层透气性、增大瓦斯抽采率是国内外相关学者研究的焦点^[1-2]. 松动爆破是一种能在一定范围内对岩石起到松动和破碎效果的爆破技术, 近年来许多研究者将其应用于煤层卸

压、瓦斯增透方面, 并取得了一定的效果, 但是由于爆破后密实圈的存在^[3-4], 阻碍了瓦斯的运移, 进而对瓦斯高效抽采产生一定的影响. 郭德勇等^[5]将聚能爆破应用于煤矿深孔松动爆破, 提高了爆破能量的利用率, 但无法解决爆破压缩煤质阻碍瓦斯运移的问题; 吴新华等^[6]将爆破孔和控

收稿日期: 2015-08-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB239203); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0424); 教育部留学回国基金资助项目(教外司留→[2012]940号); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室访问学者基金资助项目(2011DAI05287-FW201205).

作者简介: 粟登峰(1989-), 男, 四川内江人, 重庆大学博士研究生; 康勇(1978-), 男, 宁夏西吉人, 武汉大学教授, 博士生导师.

制孔相结合,通过控制孔的控制、空间补偿作用来增大煤体裂隙,提高瓦斯抽放效率,但是增加了生产成本;郑周练等^[7]研究了螺旋式松动爆破的机理,提高破碎岩石的效率,解决了密实圈的问题(缝槽提供补偿空间),但只研究了爆生气体准静态作用过程,与实际爆破情况有一定出入,并且没有提出切实可行的螺旋式切槽方法.因此,研究一种更加切实可行的煤层瓦斯增透方法对于矿井安全高效生产有重要经济效益与社会意义.

1 高压水射流螺旋式切槽辅助松动爆破

近年来,随着高压水射流技术的日趋成熟,其无损切割、高度聚能等优点为人们所认识.基于此,将高压水射流切割技术与深孔松动爆破技术相结合,提出了高压水射流螺旋式切槽辅助松动爆破的新思路.其实质是在施工完成的爆破炮孔内,采用高压水射流进行螺旋式切槽,从而在煤层中形成沿炮孔轴向与径向分布的螺旋式预裂缝,随后装药爆破,如图 1,图 2 所示.

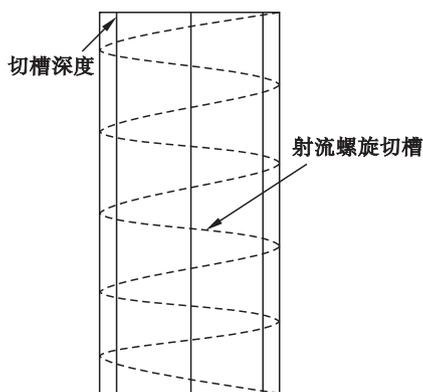


图 1 炮孔示意图
Fig. 1 Blasthole schematic diagram

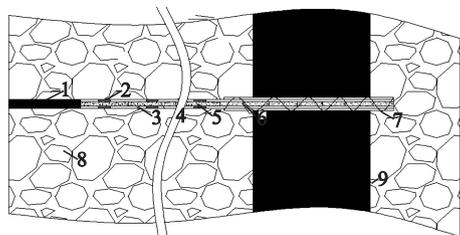


图 2 装药示意图
Fig. 2 Charge schematic diagram

2 螺旋式切槽辅助松动爆破模型

由于水射流切割破碎岩石机理与机械刻槽破碎岩石机理存在本质的区别,因而,其最终形成的

缝槽形貌也不尽相同.为此,利用高压水射流切割系统对其切割缝槽形貌进行分析研究,实验系统如图 3 所示.

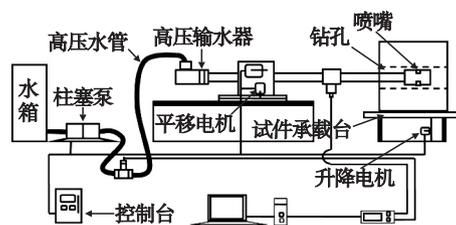


图 3 水射流切割实验系统
Fig. 3 Experiment system of water jet slotting

实验试件为煤炭颗粒、水泥和水混合制作而成的型煤,试件尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,各组分的比例为 $1:0.3:0.5$,混合均匀后,自然风干 28 d.通过测试,该煤岩体模型抗压强度为 8.24 MPa ,抗拉强度为 0.63 MPa ,抗剪强度为 1.87 MPa .其次,试件制作过程中,在其中心线上通过预留钻杆形成一钻孔形状,如图 4 所示.

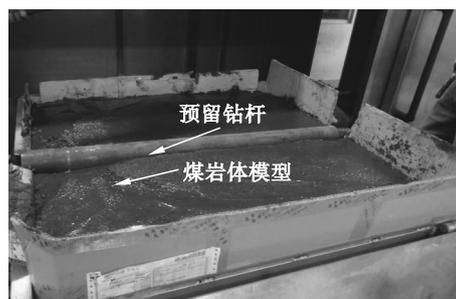


图 4 煤岩体模型
Fig. 4 Model of coal and rock mass

本次实验在常压下进行,采用标准的圆锥型收敛喷嘴,喷嘴直径为 2.5 mm ,收敛角为 14° .其次,实验中采用单个喷嘴的旋转运动加上轴向运动的方式来实现高压水射流对煤岩体的螺旋式切割,其中,喷嘴旋转速度为 120 r/min ,喷嘴轴向运动速度为 0.04 m/min ,实验时最大泵压为 10 MPa ,切割时间为 15 min ,切割后的缝槽形貌如图 5 所示.

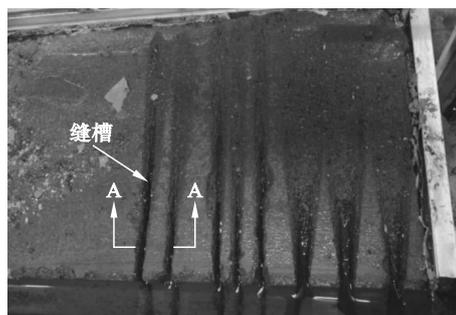


图 5 水射流切割缝槽平面图
Fig. 5 Plane graph of water jet slot

经测量,切割后缝槽最深处达 0.36 m,缝槽最宽处为 0.028 m.分析图 6 可以看出,高压水射流切割煤岩体所形成的缝槽平面由一个较规则的四边形与一个逐渐收敛成类似 V 型的端部组成,其总体截面呈“似子弹型”.因此,为方便分析计算,对该模型进行简化,其示意图如图 7 所示.

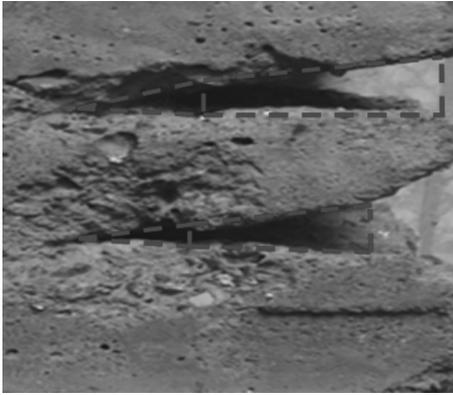


图 6 A-A 剖面放大图
Fig. 6 Local amplification of A-A profile

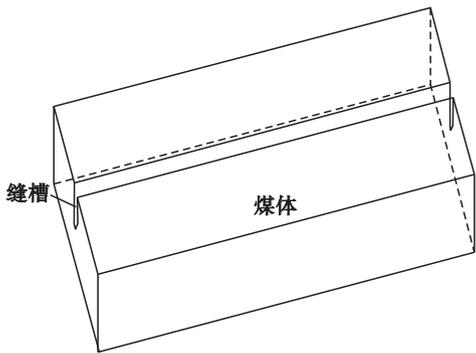


图 7 高压水射流切割缝槽形貌
Fig. 7 Morphology of slot by water jet slotting

2.1 裂纹扩展模型

根据爆破理论,当炸药爆炸时,由于爆炸冲击波的作用,在射流缝槽的端部会形成一个很强的动态应力-应变场,使得沿缝槽方向的裂隙在爆炸应力波作用阶段优先发展;随后,在爆生气体的准静态作用下,裂纹会持续扩展.炸药的潜能约 97% 存在于爆生气体中,因此爆生气体的准静态作用在整个爆破过程中起主导作用^[8].本文采用 Westergaard 方法对裂纹尖端的应力场进行分析.

根据水射流螺旋式切槽松动爆破方法的技术原理,在炮孔壁存在沿轴向环绕的螺旋式缝槽(图 1,图 2),同时,由于高压水射流切割出缝槽的深度(1~3 cm)远大于机械刻槽深度(3~4 mm),故本模型必须考虑爆生气体到达缝槽尖端过程中的衰减,并作出如下假设:①射流切槽深度处处相等;②炮孔周围岩石为均质连续的各向同性体,且爆生气体准静态压力均匀作用

于炮孔壁;③煤岩体原生裂隙远远小于缝槽,炮孔壁只存在唯一预制螺旋式缝槽;④缝槽由矩形段缝槽和 V 型段缝槽组合而成,且矩形段缝槽长度大于 V 型段缝槽长度.同时,为简化计算,根据平面应变理论,取炮孔的一个横截面,建立如图 8 所示的计算模型.

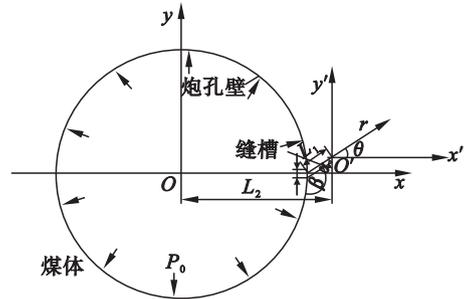


图 8 爆破二维模型示意图
Fig. 8 Two-dimensional model of blasting

根据图 8 所示的 xOy 坐标系,在爆生气体准静态作用下的缝槽裂纹边界条件可近似为

- ①当 $y = \pm \frac{d}{2}$, $x = L_2 - L_1 \cos\beta$ 时, $\sigma_y = P_0$, $\tau_{xy} = 0$, 认为裂纹在孔壁处附近的爆炸应力等于炮孔壁处的爆炸应力;
- ②当 $y = 0$, $x \rightarrow +\infty$ 时, $\sigma_y = \sigma_x = 0$, $\tau_{xy} = 0$, 即应力波在无限远处,煤岩体应力为 0;
- ③当 $y \rightarrow L_1 \sin\beta$, $x \rightarrow L_2$ 时, $\sigma_y \gg \sigma$, 裂纹尖端应力集中;

其次,由爆生气体的压力衰减公式^[7]:

$$P = P_0 e^{-\frac{2kx}{d}}, x \geq r. \quad (1)$$

式中: P_0 为炮孔壁处的准静态气体压力; k 为缝槽表面粗糙度系数; d 为缝槽宽度; r 为炮孔半径; P 为横坐标 x 处的爆生气体压力.

考虑本模型中螺旋角 β 及缝槽深度的影响,代入式(1)得到缝槽中爆生气体衰减公式:

$$P = P_0 e^{-\frac{2k(x-r)}{d \cos\beta}}, x \geq r. \quad (2)$$

根据炮孔模型的对称性,选取炮孔右半部分计算.为求得缝槽尖端的应力场,利用边界条件,选定复变函数^[10]:

$$Z_1(z) = \frac{P}{\left\{ 1 - \frac{\left[z - (L_2 - L_1 \cos\beta) \pm i \frac{d}{2} \right]^2}{\left[L_1 \cos\beta + i L_1 \sin\beta \pm i \frac{d}{2} \right]^2} \right\}^2}. \quad (3)$$

式中“ \pm ”,当 $\text{Im}z \geq 0$ 时,取“-”,反之,取“+”.

考虑爆生气体在缝槽中的衰减和缝槽螺旋角因素,运用 Westergaard 复变函数方法,得到了爆

生气体作用下炮孔内应力场公式：

$$\sigma_x = \frac{P_0 e^{\frac{-2k(x-r)}{d \cos \beta}} L_1^{\frac{1}{2}} \left[\sec^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin \beta \tan \frac{\alpha}{2} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\sin \left(\frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \right) \right]}{\sqrt{2r}}$$

$$\left[\cot \frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \pm \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right],$$

$$\sigma_y = \frac{P_0 e^{\frac{-2k(x-r)}{d \cos \beta}} L_1^{\frac{1}{2}} \left[\sec^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin \beta \tan \frac{\alpha}{2} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\sin \left(\frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \right) \right]}{\sqrt{2r}}$$

$$\left[\cot \frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \pm \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right],$$

$$\tau_{xy} = \frac{P_0 e^{\frac{-2k(x-r)}{d \cos \beta}} L_1^{\frac{1}{2}} \left[\sec^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin \beta \tan \frac{\alpha}{2} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\sin \left(\frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \right) \right]}{2 \sqrt{2r}} \sin \theta.$$

$$\left[\cot \frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \pm \cos \frac{3\theta}{2} \right]. \tag{4}$$

根据边界条件①，当 $y = \pm \frac{d}{2}, x = L_2 - L_1 \cos \beta$ 时，有 $z = L_2 - L_1 \cos \beta \pm i \frac{d}{2}$ ，利用式(3)并一次求导可得 $\sigma_y = P_0, \tau_{xy} = 0$ ；根据边界条件②，当 $y = 0, x \rightarrow +\infty$ 时，即 $z \rightarrow +\infty$ ，根据式(3)有 $Z_1 \rightarrow 0$ ，故有 $\sigma_y = \sigma_x = 0, \tau_{xy} = 0$ ，即煤岩体无限远处应力波为 0；根据边界条件③，当 $y \rightarrow L_1 \sin \beta, x \rightarrow L_2$ 时，即 r

$\rightarrow 0, Z_1 \rightarrow \infty, \sigma_y \rightarrow \infty$ ，产生应力集中现象。经验证，复变应力函数满足边界条件，由此可知推导出的应力公式(4)~(6)是正确的。

根据文献[9-10]，有

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y(r, 0). \tag{5}$$

代入式(4)可得

$$K_I = \sqrt{\pi} P_0 e^{\frac{-2k(x-r)}{d \cos \beta}} L_1^{\frac{1}{2}} \left[\sec^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin \beta \tan \frac{\alpha}{2} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\sin \left(\frac{\arctan \frac{\sin \beta + \tan \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{2} \right) \right]. \tag{6}$$

式(6)即为水射流螺旋式切槽爆破时缝槽尖端的应力强度因子表达式。

当螺旋角 $\beta = 0$ 且不考虑爆生气体的衰减效应时有

$$K_I = \frac{P \sqrt{\pi L_1} \sin \frac{\alpha}{4}}{\sqrt{\cos \frac{\alpha}{2}}}. \tag{7}$$

经验证，当螺旋角 $\beta = 0$ 且不考虑爆生气体的衰减效应时裂纹尖端应力强度因子与文献[11]所推导的预制 V 型裂纹尖端应力强度因子完全

一致。

2.2 高压水射流切槽辅助松动爆破松动效应

根据炸药爆炸理论，炸药爆炸时，首先由炸药产生的冲击波对岩石进行作用，产生裂隙，随后爆生气体挤入岩石中，对岩石做功，使裂隙进一步扩展^[12]。而采用高压水流切槽之后，缝槽的存在为爆破提供了补偿空间，其次，假定爆炸冲击波对岩石作用时产生的初始裂隙长度小于高压水射流切槽深度时，根据以上推导出的理论模型可以看出，爆生气体作用在缝槽尖端产生的应力强度因子始终大于爆生气体作用于炮孔中其他裂隙时产生的

应力强度因子,因而,在爆生气体作用下,爆生裂纹会沿射流缝槽优先扩展,直至其应力强度因子小于煤岩体断裂韧性.由于高压水射流螺旋式切割缝槽时会沿钻孔均匀切割,因而缝槽会均匀分布于钻孔四周,这样使得炸药能量能均匀作用在钻孔四周的缝槽内,有效地避免了局部区域密实区的存在,提高了炸药爆炸能量利用率,使切槽炮孔周围形成的轴向和径向裂隙远大于普通爆破孔,并促使相邻炮孔裂隙网能够顺利贯通,从而达到提高煤层透气性、增强瓦斯抽放效果的目的.

3 数值模拟研究

3.1 模型及材料参数

采用 ANSYS/LS - DYNA 及流固耦合算法进行数值计算.根据炮孔的对称性,为方便计算,建立如图 8 所示的二分之一炮孔模型($\beta = 90^\circ$).其中,煤岩体外径为 500 mm,炮孔直径为 10 mm,缝槽深度为 2 mm,宽度为 1 mm,其直线段长 1.5 mm,模型厚度 5 mm.在模型的 yOz 面上均施加对称约束, $z = 0$ 和 $z = 0.05$ cm 的面上施加 z 方向的位移约束,侧面处的节点施加无反射边界约束条件,计算时间为 400 μs ,采用 $\text{g} - \text{cm} - \mu\text{s}$ 单位制^[13].模型及部分区域网格划分情况如图 9 所示.

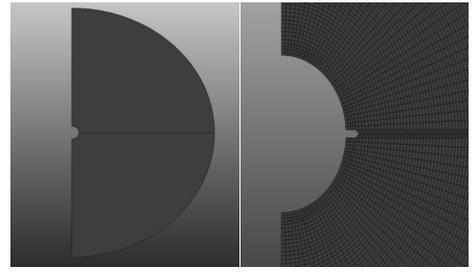


图 9 数值计算模型

Fig. 9 Numerical simulation model

煤体、炸药、空气的材料模型及其状态方程如表 1 所示^[14].其中,炸药密度取为 1.53 g/cm^3 ,爆速取为 $0.65 \text{ cm}/\mu\text{s}$,爆压取为 33.7 GPa .炸药的 JWL 状态方程中 A 取为 371 GPa , B 取为 7.43 GPa , R_1 取为 4.15 , R_2 取为 0.95 , w 取为 0.3 .空气密度取为 0.00125 g/cm^3 ,空气的 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程中 C_4 和 C_5 均取为 0.4 , E_0 取为 2.5×10^{-6} , V_0 取为 1 , C_0 , C_1 , C_2 及 C_3 均取为 0 .煤体密度为 2.44 g/cm^3 , F_c 取为 4.8 GPa , $S_{F_{\max}}$ 取为 7.0 , G 取为 1486 GPa , $E_{F_{\max}}$ 取为 0.01 , T 取为 0.4 GPa , P_{crush} 取为 1.6 GPa , μ_{crush} 取为 0.001 , P_{kick} 取为 80 GPa , μ_{kick} 取为 0.1 , A 取为 0.79 , B 取为 1.6 , C 取为 0.61 , D_1 取为 0.3 , D_2 取为 50 , N 取为 0.1 , K_1 取为 8500 GPa , K_2 取为 $-1.71 \times 10^4 \text{ GPa}$, K_3 取为 $2.80 \times 10^4 \text{ GPa}$, E 取为 35.7 .

表 1 材料模型及其状态方程

Table 1 Material model and state equation

材料	材料模型	状态方程
炸药	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	EOS_JWL
空气	MAT_NULL	EOS_LINEAR_POLYNOMIA
煤体	MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE	

3.2 模拟结果分析

计算完成后,采用后处理软件 LS - Prepost 对数值模拟计算结果进行处理,分别得到炸药爆

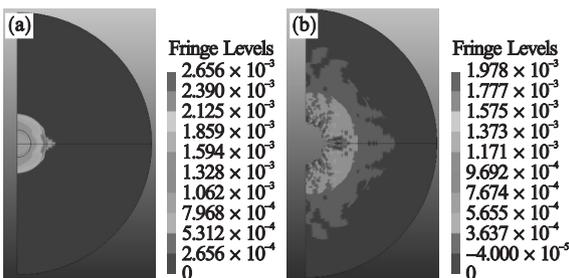


图 10 数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results

(a)—压力云图;(b)—损伤云图.

炸时炮孔周围压力云图与损伤云图(图 10).分析可以看出,炸药爆炸之后,会在缝槽方向产生明显的应力集中现象,且相对于炮孔其他位置,缝槽方向上的压力提高了约 30.6%,从而使得爆生裂纹沿缝槽方向扩展.非缝槽方向裂纹明显小于缝槽,炸药能量利用率明显提高,且切槽炮孔裂隙远大于普通炮孔裂隙,与上文理论相吻合.

4 结 论

1) 实验研究了高压水射流切割煤岩体缝槽形貌,其平面形貌为由一段较规则的四边形和一个 V 型段组成的“似子弹型”,根据断裂力学理

论,并考虑爆生气体衰减效应,建立了爆生气体准静态应力作用下切槽炮孔平面应力场,并推导出裂隙尖端应力强度因子公式。

2) 采用数值模拟方法对高压水射流螺旋式切槽松动爆破进行了数值计算,发现在缝槽尖端出现应力集中现象,且缝槽方向裂纹发育优于无缝槽方向,结果与理论模型结果相符。

参考文献:

- [1] Zhu W C, Wei C H, Li S, et al. Numerical modeling on destress blasting in coal seam for enhancing gas drainage [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 59: 179 - 190
- [2] Lu Y Y, Liu Y, Li X H, et al. A new method of drilling long boreholes in low permeability coal by improving its permeability [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 84(2): 94 - 102.
- [3] Sanchidrián J A, López L M, Segarra P. The influence of some blasting techniques on the probability of ignition of firedamp by permissible explosives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 155(3): 580 - 589.
- [4] Liu J C, Wang H T, Yuan Z G, et al. Experimental study of presplitting blasting enhancing pre-drainage rate of low permeability heading face [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 818 - 823.
- [5] 郭德勇, 宋文建, 李中州, 等. 煤层深孔聚能爆破致裂增透工艺研究 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34(8): 1086 - 1089.
(Guo De-yong, Song Wen-jian, Li Zhong-zhou, et al. Research on splitting technical of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(8): 1086 - 1089.)
- [6] 吴新华. 深孔松动爆破技术在防治瓦斯煤层突出中的应用 [J]. *煤炭技术*, 2007, 12(2): 76 - 77.
(Wu Xin-hua. Application of deep loosening blasting technology in preventing coal and gas out bursting [J]. *Coal Mining Technology*, 2007, 12(2): 76 - 77.)
- [7] 郑周练. 螺旋切槽孔松动爆破力学机理及试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003: 1 - 117.
(Zheng Zhou-lian. Study on the failed mechanism and experiment of spiral notch-holes blasting [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003: 1 - 117.)
- [8] Nateghi R, Kiany M, Gholipouri O. Control negative effects of blasting waves on concrete of the structures by analyzing of parameters of ground vibration [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(6): 608 - 616.
- [9] Donzé F V, Bouchez J, Magnier S A. Modeling fractures in rock blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1116 - 1153.
- [10] Atkinson B K. Fracture mechanics of rock [M]. London: Academic Press, 1987.
- [11] 王成端. 预制 V 型裂纹尖端应力强度因子的研究 [J]. *应用数学和力学*, 1992, 13(5): 461 - 477.
(Wang Cheng-duan. Prefabricated type V crack tip stress intensity factor research [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1992, 13(5): 461 - 477.)
- [12] Ozgur Y, Tugrul U. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 266 - 278.
- [13] Fan S C, Jiao Y Y, Zhao J. On modeling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31: 57 - 66.
- [14] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Version 970. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003.