

沈春明,汪东,张浪等.水射流切槽诱导高瓦斯煤体失稳喷出机制与应用[J].煤炭学报,2015,40(9):2097-2104. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1760

Shen Chunming, Wang Dong, Zhang Lang, et al. Mechanism and application of inducing high-gas coal outburst from borehole by waterjet slotting[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2097-2104. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1760

水射流切槽诱导高瓦斯煤体失稳喷出机制与应用

沈春明^{1,2,3}, 汪东^{1,2}, 张浪^{1,2}, 郭建行^{1,2}, 林柏泉³

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采和洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对钻孔内水射流切槽诱发煤体失稳喷出问题, 探讨了在水射流破煤与瓦斯压力作用下的煤体切槽诱导失稳喷出机制, 并推导了诱导失稳发生的判据公式。基于古汉山矿10631运输巷二₁煤层, 采用ANSYS软件数值模拟分析了切槽煤体应力分布及演化特征; 并基于裂纹扩展试验分析了水射流冲击煤岩断裂特性; 最后, 进行了现场试验与应用。数值模拟和实验室试验结果表明: 围压条件下, 切槽煤体周围会形成应力显著变化区, 且随切槽深度的增加而扩大和增强; 大直径水射流冲击破断煤岩分为初期响应、稳定破坏和断裂突变3个阶段, 煤岩破裂具有瞬时性。现场试验应用表明, 水射流切槽会诱发煤体失稳移动, 失稳喷出现象与理论分析较吻合, 切槽诱导失稳钻孔的累计和瞬时瓦斯排放量是常规钻孔的3~4倍, 有利于提高钻孔瓦斯抽采能力和防治矿井煤与瓦斯突出。

关键词: 水射流切槽; 诱导失稳; 喷孔; 高瓦斯; 瓦斯抽采

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2015)09-2097-08

Mechanism and application of inducing high-gas coal outburst from borehole by waterjet slotting

SHEN Chun-ming^{1,2,3}, WANG Dong^{1,2}, ZHANG Lang^{1,2}, GUO Jian-hang^{1,2}, LIN Bai-quan³

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute Beijing 100013, China; 2. National Key Lab of Coal Resource High Efficient Mining and Clean Utilization Beijing 100013, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology Xuzhou 221116, China)

Abstract: In terms of the waterjet slotting induced phenomenon of coal and gas outburst from the borehole, the mechanism of coal and gas outburst induced by waterjet slotting was discussed, and the criterion formula of inducing instability was deduced. Based on the 2-1 coal seam in No. 10631 transportation roadway at Guhanshan Mine, the ANSYS numerical simulation software was used to analyze the stress distribution and evolution of the slotted coal. In addition, based on the crack extension theory, the waterjet impacted coal and fracture characteristics were analyzed by testing. Also, the field test and application were conducted. Numerical simulation and testing results show that under the condition of confining pressure, a significant stress change area around the slot was formed, which was enhanced with the increase of slot depth. Three phases were divided when a large diameter waterjet impacted coal seam, including early response, stability disruption and abrupt failure. The coal fracture was instantaneous. Field test and application show that the waterjet slotting induced the coal to be unstable and moved, which could explain the outburst phenomenon. The accumulated and transient gas emissions in slotting borehole were three to four times higher than that in conventional

收稿日期: 2014-12-19 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201206); 国家油气重大专项资助项目(2011ZX05040-001, 2011ZX05063-009)

作者简介: 沈春明(1985—), 男, 江苏徐州人, 助理研究员, 博士。Tel: 010-84262942, E-mail: scmcmu@163.com

boreholes, which improved the ability of borehole gas extraction and the prevention of coal and gas outburst.

Key words: waterjet slotting; instability inducing; borehole; high gas; gas extraction

中国煤层赋存条件复杂^[1-2], 50% 以上具有高瓦斯低渗透的特性, 其渗透率比美国、澳大利亚低 3~4 个数量级^[3-4], 直接导致了原始赋存瓦斯抽采难, 而煤层增透是解决该难题的有效方法^[5]。煤层内水力化增透技术近年来在我国高瓦斯低透气性煤层中得到普遍应用, 如高压水射流切槽(割缝)技术^[6]、水力冲孔技术^[7]及水力压裂技术^[8]等。20 世纪七、八十年代, 煤炭科学研究总院抚顺研究所就已开展了水力切槽技术的研究^[9]; 而 21 世纪初, 随着脉冲、旋转、空化等射流和固、气、液等多相射流的研究取得进展^[10], 以及钻割一体化^[11]和自激振荡射流装备^[12]等割缝切槽装备、工艺的研发, 为煤层高压水射流切槽增透技术的推广和应用奠定了重要基础。

随着煤矿开采向深部延深, 煤层高瓦斯、高地应力和低渗透特征日趋严重^[13], 水射流切槽增透中诱发煤体失稳喷出的现象时有发生, 国内学者对诱发失稳的机理进行了探讨。欧建春等^[14]从煤体受到的振动作用角度, 对钻孔施工时钻杆对煤体的振动效应进行了分析, 提出了基于钻孔施工诱发的煤与瓦斯突出耦合跃迁失稳机理; 周红星等^[15]通过理论分析和数值模拟, 从煤体应力分布的角度研究了水力冲孔中钻孔煤与瓦斯喷出的力学作用和增透原理; 郑春山等^[16]在数值模拟钻孔应力和现场工程实践基础上, 分析了射流水压和旋转切割速度对喷出的影响。但由于孔内失稳喷出的机理复杂且受到现场观测条件的限制, 水射流切槽诱导煤体失稳喷出机制仍没有得到合理解释, 失稳发生的水射流破煤与瓦斯压力因素作用的分析还远不足。

笔者从煤体内部、外部应力作用的角度, 探讨了水射流切槽诱导煤体失稳喷出发生的判据条件, 通过数值模拟和实验室试验分析了切槽煤体应力分布特征及水射流破煤岩的瞬间断裂特性, 同时, 进行了现场验证与应用。研究结论对煤层水力化增透中即将普遍面临的孔内煤与瓦斯喷出问题的防治与应用, 具有重要的理论指导意义。

1 水射流切槽诱导煤体失稳喷出机制

1.1 水射流破岩裂纹扩展理论

目前, 水射流破煤机理仍处于假说理论阶段^[17]。水射流破岩裂纹扩展理论认为, 岩石中含有初始裂纹, 岩石的破坏是裂纹扩展的结果^[18]。如图 1 所示 (v 为水射流微元体在孔隙内的瞬时流速; P_w 为射流

截面上任一点的水压; P_0 为煤层原始瓦斯压力), 煤体内分布着原始裂隙和孔洞缺陷, 水射流冲击时会形成渗流应力和孔隙压力, 导致原始微裂纹扩展和新裂纹萌生。

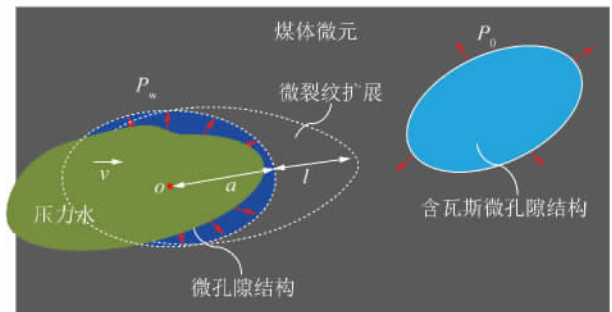


图 1 渗流水压扩展煤体微孔隙示意

Fig. 1 Schematic diagram of coal micro-pore expanded by the seepage pressure

根据准脆性材料的微裂纹扩展条件^[19]:

$$\sigma = \sigma_c = K_{lc} \sqrt{\frac{\pi}{4a}} \quad (1)$$

式中 σ_c 为微裂纹发生扩展的临界应力; a 为微裂纹的初始半径; K_{lc} 为断裂韧度。

当微裂纹满足扩展准则(1)时, 发生二次扩展, 并引起岩石内部损伤和变形局部化。微裂纹尖端的损伤局部化长度 l 为

$$\begin{cases} l = b \left[1 - \cos\left(\frac{\pi\sigma_v}{2\sigma_u}\right) \right] \\ b = l + a \end{cases} \quad (2)$$

式中 b 为孔隙扩展后的半径; σ_v 为体积应力; σ_u 为微裂纹尖端的损伤局部化带内岩石的抗拉强度。

而在非淹没射流条件下, 水射流的破岩作用主要为射流的基本段^[18], 基本段上射流动压可以表示为式(3)。因此, 水射流冲击破煤时侵入裂隙的射流压力可以用基本段上射流动压力表示。

$$P_w = \frac{x_c \rho v_0^2}{2x} \left[1 - \left(\frac{Y}{L} \right)^{1.5} \right]^4 \quad (3)$$

式中, v_0 为射流出口速度; x 为距喷嘴出口距离; x_c 为射流核心段长度; Y 为射流截面上任一点距轴心线距离; L 为射流截面的半径。

1.2 煤体失稳的内部力学作用

在满足 Mohr-Coulomb 准则和均围压条件下, 钻孔周围分布着破碎区和塑性区^[20], 会形成显著的应力集中作用, 破碎区半径 R_b 和塑性区半径 R_p 为

$$\begin{cases} R_b = r_1 \left[\frac{(\gamma H + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi (1 + \sin \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \\ R_p = r_1 \left[\frac{(\gamma H + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 γ 为地层岩体容重; H 为钻孔的埋深; C 为岩体的内聚力; φ 为岩体的内摩擦角; r_1 为钻孔半径。

周世宁院士提出的瓦斯流动理论认为, 钻孔周围瓦斯流动为一种径向稳定流动^[21]。因此, 钻孔周围煤体中的瓦斯压力分布为

$$\frac{P}{P_0} = \sqrt{\ln \frac{r}{r_1} / \ln \frac{r_0}{r_1}} \quad (5)$$

式中 r_0 为饱和瓦斯煤层的半径; r 为钻孔周围某位置。

钻孔周围煤体瓦斯压力(P)呈对数曲线分布, 对于应力集中区内瓦斯压力随 r 增大将迅速增大, 形成的瓦斯压力梯度力 F_g 为

$$F_g = \frac{dP}{dr} = P_0 / \left(2r \sqrt{\ln \frac{r_0}{r_1} \ln \frac{r}{r_1}} \right) \quad (6)$$

1.3 煤体失稳的外部力学作用

煤体失稳的外部动力为水射流冲击力。根据水射流破岩裂纹扩展理论可知, 水射流冲击能够扩展煤体内部裂隙, 由于水射流冲击破岩解析关系十分复杂^[17], 将水射流破岩作用简化为渗流水压作用和孔隙气压作用。根据式(1)、(3), 简化煤体初始裂隙最小扩展压力, 有

$$\frac{x_c \rho v_0^2}{2(h + r_1)} \left[1 - \left(\frac{Y}{L} \right)^{1.5} \right]^4 + \frac{P_0 V_0}{V} \geq K_{lc} \sqrt{\frac{\pi}{4a}} \quad (7)$$

式中, h 为水射流切槽的极限深度; V 为水射流切割时孔隙体积; V_0 为单个孔隙体积。

因此, 水射流冲击破煤岩存在着的极限深度 h , 根据式(7)推导可得

$$h \leq \frac{x_c \rho v_0^2}{2 \left(K_{lc} \sqrt{\frac{\pi}{4a}} - \frac{P_0 V_0}{V} \right)} \left[1 - \left(\frac{Y}{L} \right)^{1.5} \right]^4 - r_1 \quad (8)$$

研究表明, 高应力下岩体的快速卸载可导致岩体的拉伸破坏^[22]。因此, 在水射流切槽极限深度内煤体被剥离时, 剥离处会形成地应力瞬态卸载荷载, 产生煤体拉伸破坏。

1.4 切槽诱导煤体失稳的发生判据

根据以上分析, 水射流切槽过程中的煤体应力及破坏示意图如图2所示(σ_e 为地应力瞬态卸载荷载; σ_0 为切槽煤体应力集中区峰值应力)。进入钻孔应力集中区后, 切槽端部高应力变化区形成, 煤体损伤和瓦斯压力增大, 煤体的断裂韧度降低, 新鲜煤体暴露并快速释放瓦斯, 在极短时间内形成了瓦斯压力梯度力。随着切槽深度的增加, 瓦斯峰值梯度力向煤体深部推进且快速增强, 当射流冲击形成的地应力瞬态卸载荷载与瓦斯梯度力达到煤体断裂强度时, 煤体失稳破坏, 进而发生微型煤与瓦斯喷出。

所以, 切槽诱导煤体失稳发生必需满足两个条件, 即切槽进入钻孔的应力集中区, 同时, 内、外部的作用力达到煤体的断裂强度。因此, 沿切槽面法向方向上, 钻孔内水射流切槽诱发煤体失稳发生的判据可表示为

$$\begin{aligned} & \frac{P_0}{2(r_1 + h) \sqrt{\ln \frac{r_0}{r_1} \ln \frac{r_1 + h}{r_1}}} + \sigma_e \geq K_{lc} \sqrt{\frac{\pi}{4a}} \\ & h \leq \frac{x_c \rho v_0^2}{2 \left(K_{lc} \sqrt{\frac{\pi}{4a}} - \frac{P_0 V_0}{V} \right)} \left[1 - \left(\frac{Y}{L} \right)^{1.5} \right]^4 - r_1 \\ & (R_b < h \leq R_p) \end{aligned} \quad (9)$$

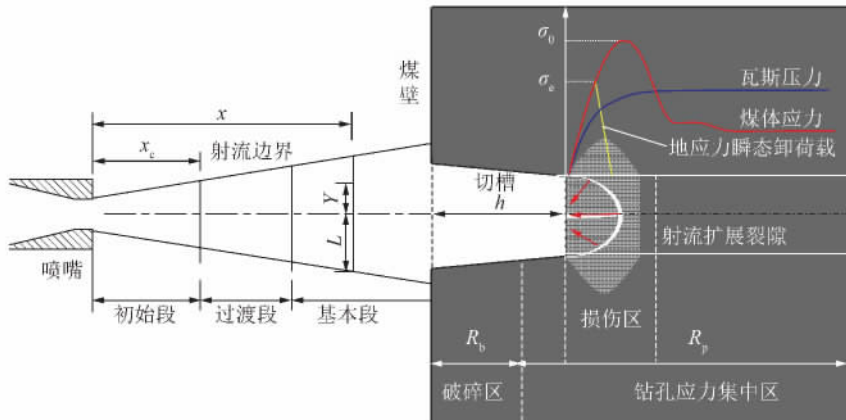


图2 水射流切槽诱发煤体失稳示意

Fig. 2 Coal instability diagram induced by waterjet

2 切槽煤体应力分布特征模拟

2.1 数值模型建立

根据河南煤化集团古汉山矿 16031 运输巷二₁煤层赋存条件及煤样参数,在 ANSYS 软件中建立煤层模型并进行网格划分。模型参数见表 1。模型上部施加 20 MPa 的均布压力,整体施加重力加速度 9.8 m/s^2 ,模型底部全部约束,左右 X 方向约束,并进行模型

应力平衡,网格模型及边界施加如图 3 所示。为了分析煤体应力随水射流切槽深度的变化,数值计算中设计开挖两种尺寸的切槽,切槽深度分别为 1 000 mm 和 2 000 mm,切槽宽度均为 200 mm。记录沿 X 方向上距切槽不同距离处的微元应力值。模拟中采用弹塑性本构模型和 Drucker – Prager 屈服准则进行运算,水射流切槽采用 ANSYS 中指定 Death 和 Birth 方法实现。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

模型尺寸	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/($^\circ$)
15.0 m × 15.0 m	煤	1.2	0.2	1.45	9.0	0.8	26

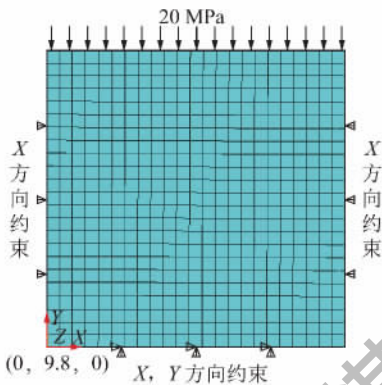


图 3 模型网格划分及边界施加

Fig. 3 Model mesh and boundary conditions

2.2 煤体应力随切槽深度演化

切槽模型应力分布云图如图 4 所示,切槽周围明显出现应力集中区和卸压区。模型的最大应力分布在切槽两端,最小应力出现在紧靠切槽面的上下位置。沿 X 方向上的缝槽中心线以及切槽上部距离 1.0, 3.0 m 不同位置处的总应力分布曲线如图 5 所示,各模型切槽面区域出现应力卸载与集中的显著变化区,随着切槽深度的增大,应力显著变化区范围增大,应力突变程度增强,应力集中波峰的波宽增大。

因此,水射流切槽周围煤体应力会发生剧烈改变。根据 Matchstick 几何模型和 Shi and Durucan 有效应力 – 渗透率方程^[23],切槽周围煤体的微元孔隙变化示意图如图 5(b) 所示,假设原始微孔隙体积为 b ,切槽面卸压区中的孔隙增大,瓦斯渗流性能提高,而切槽端应力集中区的孔隙闭合,煤体瓦斯渗流性能显著降低。

模拟结果可知,水射流切槽进入钻孔应力集中区后,切槽端煤体会受到叠加应力作用,根据煤岩应力和瓦斯压力分布特征^[21],瓦斯压力会明显增大,而切

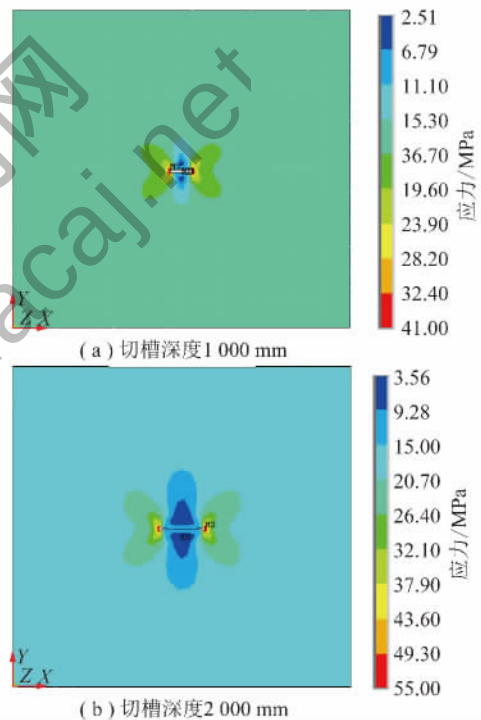


图 4 槽模型总应力分布云图

Fig. 4 Total stress nephogram of the slotting model

槽端周围的瓦斯梯度力将随着切槽深度的增加而快速增大。

3 水射流破断煤岩体特性试验

3.1 水射流冲击破岩试验系统与设计

水射流破岩试验系统主要包括水射流形成装置,水射流监控装置,以及试样变形破坏监测装置,如图 6(a) 所示。试验设计采用动静态应变仪监测冲击中的煤岩体试样表面应变,从而分析裂纹扩展行为,条状表面应变片分别布置于冲击面的对面,以及与冲击面相邻的侧面和上面,如图 6(b) 所示。试验中选

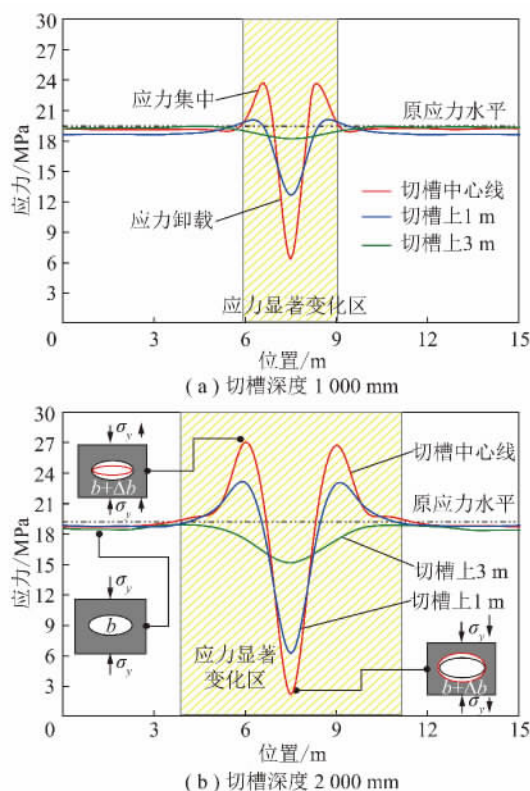
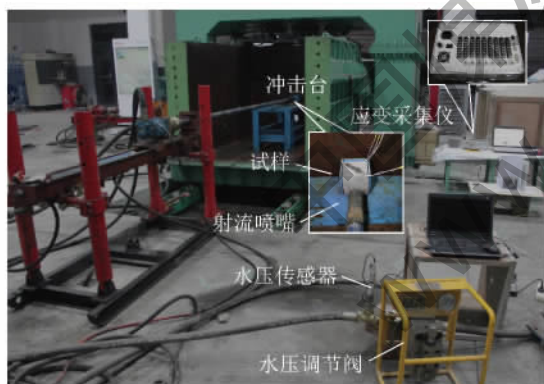
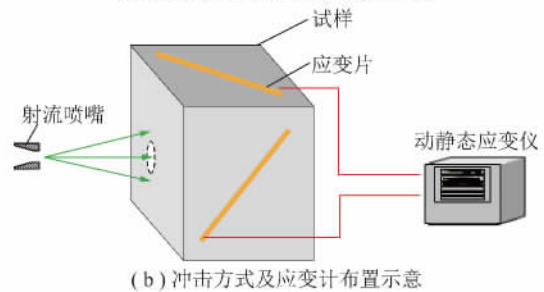


图5 模型不同位置处总应力分布曲线

Fig. 5 Total stress curves of the different location in the waterjet slotted model



(a) 水射流冲击破岩试验系统实物



(b) 冲击方式及应变计布置示意

图6 水射流冲击破岩试验系统与设计

Fig. 6 System and design of waterjet impact experiment

用直径为 2.5 mm 的大直径锥直型喷嘴, 初始冲击靶距为 35 mm, 试样为边长 100 mm 的立方体, 采用煤、石膏和水泥的相似材料制作, 其力学参数为抗压强度

σ_c 为 5.60 MPa, 弹性模量 E 为 0.79 GPa, 抗拉强度 σ_t 为 0.72 MPa, 抗剪强度为 3.03 MPa。试验时调节射流冲击压力, 同时开启应变监测仪, 当试样破裂时停止信号采集。

3.2 试样表面应变及断裂特征

如图 7 所示, 试样破裂时, 表面应变出现瞬时增大, 冲击孔周围较破碎, 试样以竖直和水平向裂纹为主。水射流出口水压 P 为 5 ~ 15 MPa 时, 如图 7 (a) (b) 所示, 试样受冲击至发生断裂的时间较长, 约 120 s, 应变曲线出现明显的稳定增长段, 突变前微应变量较高, 达 400。水射流出口压力 P 为 15 ~ 25 MPa 时, 如图 7 (c) (d) 所示, 试样冲击断裂时间明显减小, 约 25 s, 在破坏突变前应变曲线相对平缓, 突变前的微应变量较小 (约 100)。当射流水压远大于岩体破坏的阈值时^[19], 裂纹扩展得迅速。

试样冲击破坏过程基本可分为初期响应阶段、稳定破坏阶段和断裂突变阶段。在初期响应阶段, 随着冲击水压的快速升高, 试样的应变会发生较明显的响应, 初期响应阶段很短。在稳定破坏阶段, 由于射流冲量连续而稳定, 试样的应变进入稳定变化阶段, 试样各面应变通常都会增大。在断裂突变阶段, 各面的应变变化剧烈, 出现明显的增大或减小, 在冲击破坏瞬间, 破裂面的应变突变达到极限值, 试样体破裂时表面应变计表现出两面张拉变形、一面为压缩变形的特征。

试验现象和分析可知, 在大直径水射流冲击切槽时, 煤体内部裂隙扩展, 当切槽水压和时间达到足够大时, 切槽端煤体会发生断裂破坏, 而煤岩体破断基本为瞬间完成。

4 水射流切槽诱喷现场应用

4.1 应用现场及方案

古汉山矿位于焦作市东北部, 矿井核定能力为 1.4 Mt/a, 矿井主采煤层为山西组二₁煤, 厚度分布稳定为无烟煤。试验应用区域位于矿井 1603 工作面的 1603 (2 号) 底抽巷, 煤层参数为: 倾角 15°; 煤厚 1.88 ~ 7.57 m; 瓦斯含量 22.43 ~ 25.32 m³; 瓦斯压力 1.94 MPa; 坚固性系数 0.1 ~ 1.2; 煤层渗透率 $5 \times 10^{-18} \sim 1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。试验方案包括水射流切槽钻孔和煤体位移测试孔, 相邻钻孔的顶板间距约 5.2 m, 底板间距约 3.0 m。钻孔设计为叉花式布置, 控制巷道两帮各 30 m, 每组钻孔分为两列共 13 个。选择底抽巷正上方区域的短钻孔作为考察钻孔, 考察孔设计及传感器位置如图 8 所示, 考察孔参数见表 2。

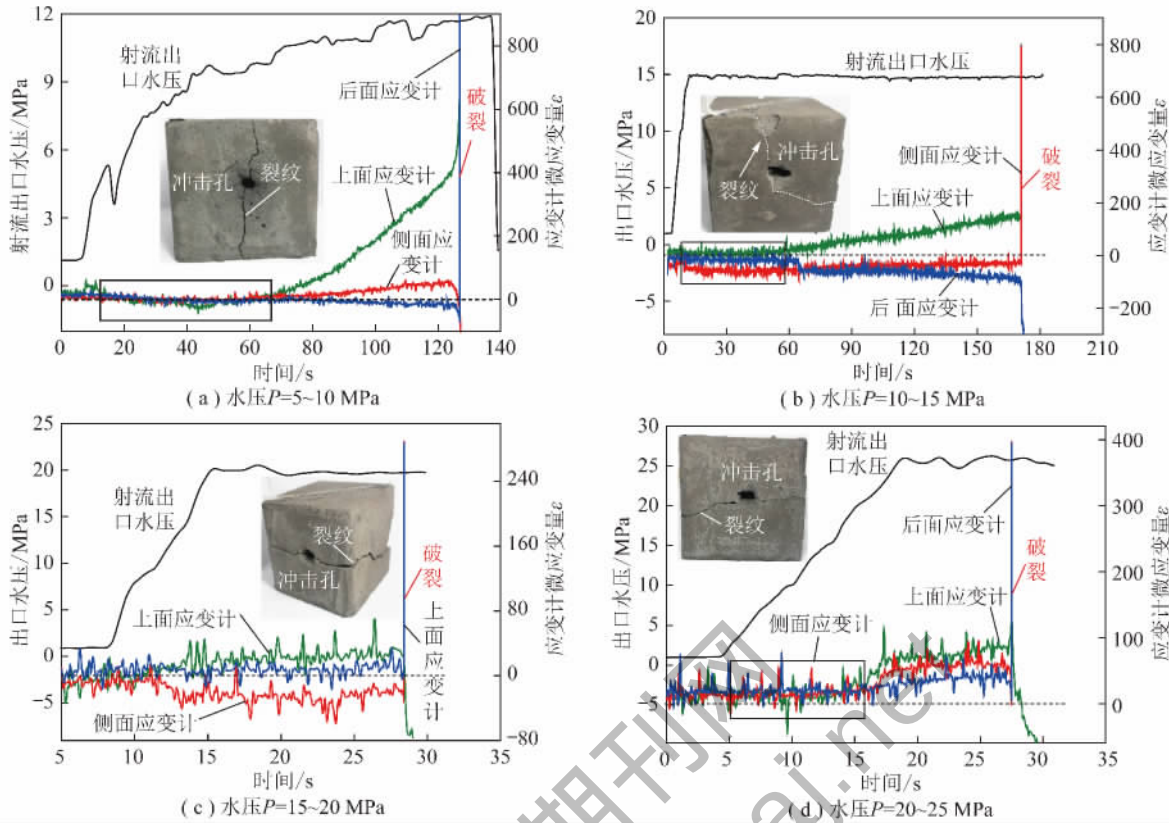


图 7 冲击试样表面应变及试样断裂形态

Fig. 7 Surface strain changes and fracture morphology of the impact samples

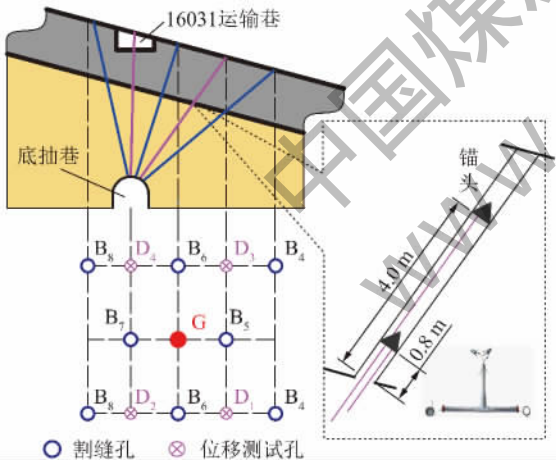


图 8 现场考察钻孔设计及传感器安装位置

Fig. 8 Field test drilling design and sensor installation position graph

试验应用中,首先施工并安装位移测试计,工作稳定后施工切槽钻孔,然后进行钻孔内水射流切槽。切槽工艺为定点旋转径向切割,切槽位置为煤层底板区域的含高瓦斯镜质组发育的软煤带,射流水压为 10~20 MPa,切割时间均为 20~60 min。

4.2 切槽诱喷煤体位移分析

试验中,钻孔 B6 在切槽 15 min 后,孔内瓦斯涌量增大,且钻孔排渣量,随着切割时间增长,孔内煤

表 2 钻孔参数

Table 2 Parameters of monitor boreholes

孔号	倾角/ (°)	方向	钻孔长度/m	
			岩段	煤段
B5 ,D1 ,D3	59	与巷道中线垂直	10.0	6
B7 ,D2 ,D4	88	与巷道中线垂直	10.0	6
B6 ,G	75	与巷道中线垂直	9.5	6
B4	44	与巷道中线垂直	11.5	7
B8	104	与巷道中线垂直	11.5	7

与瓦斯喷出剧烈,钻孔下方煤体的位移测试计随之突然被拉动,位移量达 60 mm,如图 9 所示。该现象说明煤体原始状态发生改变。切槽 15 min 后孔内发生明显失稳喷出也表明,切槽诱发煤体失稳需要准备条件,这与本文对诱发煤体失稳喷出机制的解释相一致。

4.3 钻孔瓦斯排放特征分析

在井下常压条件下,考察切槽钻孔瓦斯排放特征。切槽钻孔和常规钻孔在施工完成初期,瞬时瓦斯排放量均很高,最大值分别可达 680 L/min 和 150 L/min,且在施工完成后的 48 h 内瞬时瓦斯排放量均会显著减低。

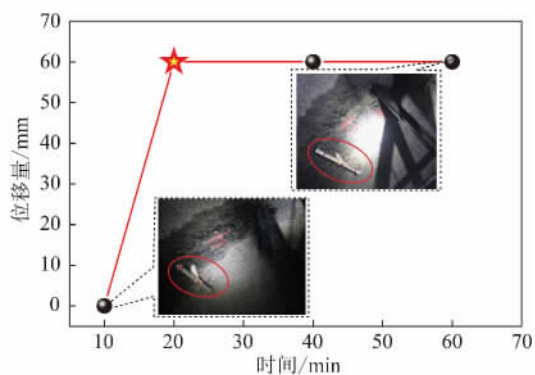


图9 切槽诱喷钻孔周围煤体运移量

Fig. 9 Coal migration volumes around outburst borehole induced by waterjet slotting

如图10所示,常规孔和切槽孔的累计与瞬时瓦斯排放呈量分别呈指数和对数曲线变化。在前20 d考察期内,切槽诱喷钻孔累计瓦斯排放量是常规孔的3~4倍(图10(a))。常规钻孔2 d内瓦斯排放速度下降到10 L/min以下,且在10 d后瞬时瓦斯排放量衰减到0,瓦斯排放呈间断式涌出(图10(b));钻孔切槽诱喷后,瓦斯排放20 d左右,瞬时瓦斯排放量首次下降到10 L/min以下,排放衰减速度显著降低。

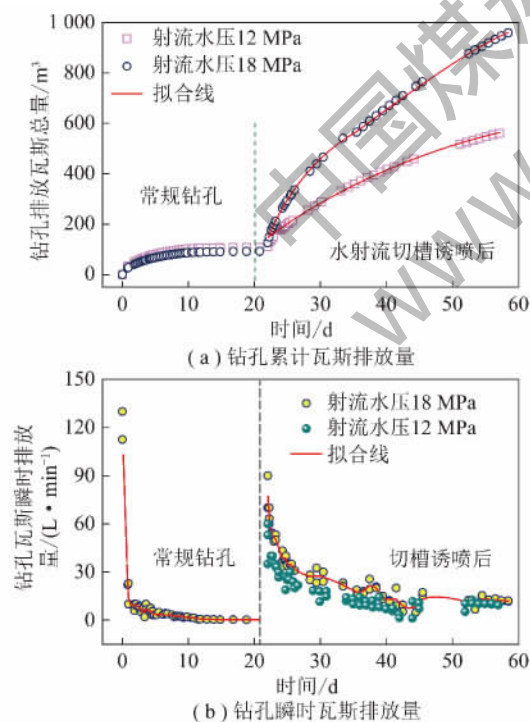


图10 切槽诱喷钻孔瓦斯排放特征

Fig. 10 Gas emission characteristics of the outburst borehole induced by waterjet slotting

以上结果说明,水射流切槽诱导煤体失稳喷出后,煤层瓦斯排放能力增强。

5 结 论

(1) 围压条件下,切槽面区域应力卸载,切槽端出现显著的应力集中,随着切槽深度的增加,应力集中和卸载的峰值增大,应力显著变化区范围和煤体不稳定性增大。

(2) 水射流冲击下的煤岩体断裂过程分为初期响应、稳定破坏和断裂突变3个阶段,初期响应和稳定破坏阶段,渗流压力扩展并贯通煤岩体微孔隙,煤岩体破断瞬时完成。

(3) 孔内切槽诱发煤体失稳是在水射流冲击力、地应力和瓦斯压力共同作用下发生。当切槽进入钻孔应力集中区时,随着切槽深度增加,切槽端应力集中度、煤体损伤破坏和瓦斯压力梯度力不断增强;同时,水射流剥离煤体产生地应力瞬态卸载荷载并作用于煤体,诱导煤体失稳发生。

(4) 现场试验应用表明:孔内水射流切槽会诱导煤体失稳喷出,切槽诱喷钻孔瓦斯累计和瞬时排放量显著增大,是常规钻孔的3~4倍,随时间分别呈指数和对数函数变化。

参考文献:

- [1] 袁亮. 煤与瓦斯共采理论与关键技术[A]. 中国煤炭学会2013高层学术论坛[C]. 北京: 2013.
- [2] 袁亮,秦勇,程远平,等. 我国煤层气矿井中—长期抽采规模情景预测[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 529–534.
Yuan Liang, Qin Yong, Cheng Yuanping, et al. Scenario prediction for medium-long term scale of coal mine methane drainage in China [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 529–534.
- [3] Chen Dong, Pan Zhejun, Liu Jishan, et al. Characteristic of anisotropic coal permeability and its impact on optimal design of multi-lateral well for coalbed methane production [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 88–89: 13–28.
- [4] Tao Shu, Wang Yanbin, Tang Dazhen, et al. Dynamic variation effects of coal permeability during the coalbed methane development process in the Qinshui Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 93: 16–22.
- [5] 王耀锋,何学秋,王恩元,等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1945–1955.
Wang Yaofeng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945–1955.
- [6] 吴海进. 高瓦斯低透气性煤层卸压增透理论与技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
Wu Haijin. Theory and technology study on pressure relief and permeability enhancements of coal seam with high concentration of gas and low permeability [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.

- [7] 刘明举, 赵文武, 刘彦伟, 等. 水力冲孔快速消突技术的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 58-61.
Liu Mingju, Zhao Wenwu, Liu Yanwei, et al. Research and application of hydraulic flushing borehole to quickly eliminate outburst[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 58-61.
- [8] 黄炳香. 煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1765-1766.
Huang Bingxiang. Research on theory and application of hydraulic fracture weakening for coal-rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1765-1766.
- [9] 煤炭科学研究总院, 鹤壁矿务局. 水力割缝新工艺的研究[J]. 煤矿安全, 1982(9): 1-15.
- [10] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 北京: 石油大学出版社, 1998: 5-18.
- [11] 林柏泉, 孟凡伟, 张海宾. 基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 75-79.
Lin Baiquan, Meng Fanwei, Zhang Haibin. Regional gas control based on drilling-slotting-extracting integration technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 75-79.
- [12] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜, 等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1386-1390.
Li Xiaohong, Lu Yiyu, Zhao Yu, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [13] 沈春明, 林柏泉, 吴海进. 高压水射流割缝及其对煤体透气性的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 2058-2063.
Shen Chunming, Lin Baiquan, Wu Haijin. High-pressure water jet slotting and influence on permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 2058-2063.
- [14] 欧建春, 王恩元, 徐文全, 等. 钻孔施工诱发煤与瓦斯突出的机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(5): 739-745.
Ou Jianchun, Wang Enyuan, Xu Wenquan, et al. Study of the mechanism of coal and gas outburst induced by drilling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(5): 739-745.
- [15] 周红星. 突出煤层穿层钻孔诱导喷孔孔群增透机理及其在瓦斯抽采中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
Zhou Hongxing. Permeability-increasing theory of array crossing boreholes using blowout-inducing and its application on gas drainage outburst coal seams[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [16] 郑春山, 林柏泉, 杨威, 等. 水力割缝钻孔喷孔机制及割缝方式的影响[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 5-8.
Zheng Chunshan, Lin Baiquan, Yang Wei, et al. Hole-spraying mechanism of hydraulic slotting drilling and the influence of slotting mode[J]. Journal of Coal Mine Safety, 2014, 45(1): 5-8.
- [17] 常宗旭, 邵保平, 赵阳升, 等. 煤岩体水射流破碎机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 983-987.
Chang Zongxu, Xi Baoping, Zhao Yangsheng, et al. Mechanical of breaking coal by water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(9): 983-987.
- [18] 李晓红, 卢义玉, 向文英. 水射流理论及在矿业工程中的应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007: 25-30.
- [19] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩钻孔过程的理论研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 44-47.
Wang Ruihe, Ni Hongjian. Theory study of high-pressure water jet drilling process[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Natural Science), 2003, 27(4): 44-47.
- [20] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21-32.
Dong Fangting, Song Hongwei, Guo Zhihong, et al. Theory of roadway surrounding rock loose circle support[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21-32.
- [21] 周世宁, 孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1965(1): 24-37.
Zhou Shining, Sun Jizheng. Coal-bed methane flow theory and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1965(1): 24-37.
- [22] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 37(2): 234-241.
Wang Mingyang, Fan Pengxian, Li Wenpei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 37(2): 234-241.
- [23] Shi Jiquan, Pan Zhejun, Durucan Sevkett. Analytical models for coal permeability changes during coalbed methane recovery: Model comparison and performance evaluation[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 136: 17-24.