

文章编号: 0253-9993(2008)09-0983-04

# 煤岩体水射流破碎机理

常宗旭<sup>1,2</sup>, 郜保平<sup>3</sup>, 赵阳升<sup>3</sup>, 赵隆茂<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学机械工程学院, 山西太原 030024; 2. 太原理工大学应用力学研究所, 山西太原 030024; 3. 太原理工大学采矿工艺研究所, 山西太原 030024)

**摘要:** 假设非均质岩体微元的弹性模量和抗压强度均服从 Weibull 分布, 用愈渗理论推导了非均质岩体的水射流破坏准则和水射流破碎非均质岩体的门槛压力; 数值模拟了水射流在非均质煤层中的连续钻孔过程; 并进行了水射流的破煤实验. 研究表明, 在水射流作用下, 煤岩体中强度较弱的一系列微元首先破坏, 形成裂隙. 进入裂隙空间的水射流对裂隙发生的水楔作用, 使裂隙尖端产生拉应力集中, 导致裂隙迅速发展和扩大, 裂隙与裂隙连通后使得大块的煤岩体脱落, 形成破碎坑. 当水射流压力为 60 MPa 时, 煤体破碎距离达到 0.5 m 以上.

**关键词:** 水射流破岩; 破坏准则; 裂隙发展; 门槛压力; 钻孔; 有限元模拟

**中图分类号:** TD231.62      **文献标识码:** A

## Mechanical of breaking coal by water jet

CHANG Zong-xu<sup>1,2</sup>, XI Bao-ping<sup>3</sup>, ZHAO Yang-sheng<sup>3</sup>, ZHAO Long-mao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Supposed that the elastic modulus and compressive strength of inhomogeneity rock mess cells conform to Weibull distribution. Deduced breaking rule of inhomogeneity rock mess by water jet and the threshold pressure of water jet with percolation theory, numerical simulated continuous drilling in the inhomogeneity coal by water jet with finite elements method and the experiment of breaking coal by water jet was carried out. The study indicates that under water jet, the low strength cells in inhomogeneity rock mess are first destroyed, a crack is created under water jet, the effect of the water wedge occurring by water jet which enters the crack space producing tensile stress concentration at the tip of a crack, so the cracks expand rapidly and converge gradually, eventually the rocks mess are fragmented, a cracked pit is formed. The cracked distance of coal by water jet at 60 MPa is more than 0.5 m.

**Key words:** breaking rock by water jet; breaking rule; crack propagation; threshold pressure; drilling hole; finite elements simulation

水射流作用下, 岩体破坏的本构关系或失效准则问题是力学界公认的几个迄今未能得到彻底解决的力学基本现象和基本规律之一. 目前的研究方法基本上是通过实验现象的观测和实验结果分析进行抽象简化而得出结论. 由于考虑问题的着重点不同, 因而对问题的简化和假设存在差异, 得出的结论也不相同.

笔者在水射流钻孔的试验中发现<sup>[1]</sup>, 非均质岩体的破坏形式主要是在拉应力作用下的脆性破坏, 具体表现为沿着低强度微元产生的径向裂纹、锥状裂纹和横向裂纹及其扩展. 岩体在射流的冲击下产生的拉

应力和剪应力分别超过了非均质岩体低强度单元的抗拉和抗剪的极限强度,使得岩体中强度低的单元首先破坏,在岩体中形成裂隙.裂隙形成和汇交后,水射流将进入裂隙空间,在水楔作用下,裂隙尖端产生拉应力集中,使裂隙迅速发展和扩大,致使岩体破碎.

## 1 水射流破岩理论与准则

目前关于水射流破岩的理论有:①把水射流的冲击作用简化为静压力使岩体的某一部位的拉应力或剪应力超过其极限而导致岩体破坏的静态弹性理论<sup>[2]</sup>;②在水射流冲击作用下产生的应力波是导致岩体破坏主要原因的应力波破碎理论<sup>[3]</sup>;③认为射流中空穴破裂产生的局部巨大压力导致岩体破坏的气蚀破碎理论<sup>[4-5]</sup>;④由于裂纹扩展联通导致岩体破坏的裂纹扩展破碎理论<sup>[6-7]</sup>.

分析得知,水射流的作用只能使岩体中强度较弱的单元受到的拉应力或剪应力超过其抗拉或抗剪强度极限而直接破坏;而高强度单元则是由于岩体裂隙的发展、连通,以剥离的方式脱离岩体而失效.

对于直接破坏的单元,破坏准则为最大拉应力: $|\sigma_3| \geq T_0$ ,最大剪应力: $\tau_n \geq c + \sigma_n \tan \varphi$ ,其中, $T_0$ 为单元的抗拉强度; $c$ 为内聚力; $\sigma_n$ 为受力面上的正应力; $\varphi$ 为内摩擦角.

不能直接破坏的高强度的失效准则,可由岩石的非均质性,通过愈渗理论得到.设非均质岩体的微元强度服从 Weibull 分布,则岩体单元抗压强度分布函数为

$$P(R_c) = mR_{c_0}^{-1} (R_c/R_{c_0})^{m-1} \exp[-(R_c/R_{c_0})^m],$$

式中, $m$ 为岩体的非均质参数; $R_c$ 为单元抗压强度; $R_{c_0}$ 为岩体单元的平均抗压强度.

设在某一级载荷作用下已破坏的微元体数目为  $N_f$ ,定义统计损伤变量为已破坏的微元体数目与总微元体数目  $N$  之比,即  $D = N_f/N$ ,这样在任意区间  $[R_c, R_c + dR_c]$  内已破坏的微元数目为  $NP(R_c) dR_c$ ,当加载到某一水平  $R_c$  时,已破坏的微元数目为

$$N_f(R_c) = \int_0^{R_c} NP(R_c) dR_c = N\{1 - \exp[-(R_c/R_{c_0})^m]\}.$$

得到用损伤变量  $D$  表示的非均质岩体损伤变量演化方程<sup>[8]</sup>为

$$D = N_f/N = 1 - \exp[-(R_c/R_{c_0})^m]. \quad (1)$$

根据愈渗理论,当该岩体中破坏单元比例超过一定的值后,则认为这部分单元是游离的,即被剥离岩体而失效.设  $M_f$  为愈渗理论值,则得出水射流作用下,岩体的破坏准则为  $D \geq M_f$ .将式(1)代入得

$$R_c \geq R_{c_0} [-\ln(1 - M_f)]^{1/m}.$$

当水射流冲击压力大于  $R_c$  时,岩体中将有比例超过  $M_f$  的单元被破坏,由愈渗理论知岩体将被破坏.否则,岩体不能被破坏.因此, $R_c$  为水射流冲击破碎非均质岩体的门槛压力  $p_m$ ,即  $p_m = R_{c_0} [-\ln(1 - M_f)]^{1/m}$ .

## 2 水射流在煤层中钻孔的数值模拟

笔者用 C 语言编制了水射流破岩的三维有限元计算模型,并选用空间 8 节点立方体单元作为有限元计算的基本单元.根据煤层受力的特点,计算中选用垂直对称模型.数值计算模型的大小为 200 mm × 80 mm × 40 mm,比实际钻孔范围小,可定性分析水射流的钻孔.图 1 为该模型的网格剖分,该模型共有 31 920 个单元和 35 322 个结点.图 2 为边界条件简化.

由于水射流喷嘴直径很小,其射流对岩体的作用区域很小,但射流压力的变化却很大,因此,在水射流作用区域内,有限元计算网格的划分应该很密.以尽可能反映水射流对岩体的作用机理.水射流冲击作用以外的区域,则选用较疏的剖分网格,以适应计算机的计算能力.

数值模拟中,射流速度在射流截面服从高斯分布,其计算公式为

$$v = \sqrt{2}r_0r_c^{-1}v_0\exp(-r^2/r_c^2),$$

式中， $r_e$  为射流截面特征半径， $r_e = 0.114x$ ， $x$  为射流冲击距离； $r_0$  为喷嘴半径； $v_0$  为射流出口速度。

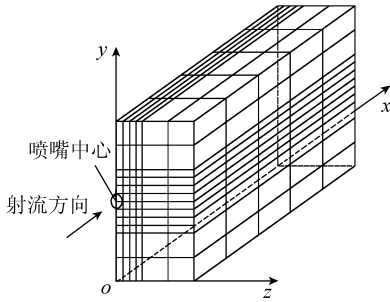


图1 水射流计算模型网格剖分

Fig. 1 Grid distribution of numerical model of water jet

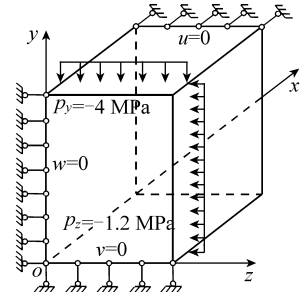


图2 计算模型边界条件简化

Fig. 2 Simplification for boundary conditions of numerical model

由此得出射流冲击煤体的作用力  $f = \rho q v (1 - \cos \beta)$ ，其中， $\rho$  为流体密度； $q$  为射流体积流量； $\beta$  为射流方向变化角。

计算中使用的水射流密度为  $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ，黏度为  $0.001\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，压力为  $70\ \text{MPa}$ ，喷嘴个数为 9 个，喷嘴直径为  $0.8\ \text{mm}$ 。煤岩体弹性模量为  $1\ 874.1\ \text{MPa}$ ，泊松比为  $0.3$ ，密度为  $1\ 400\ \text{kg/m}^3$ ，单轴抗压强度为  $15.0\ \text{MPa}$ ，内摩擦角  $33.7^\circ$ ，孔隙率  $4.00\%$ ，渗透系数  $14.445\ \text{m/s}$ ，非均质性系数  $7.0$ 。

图3为煤岩体在9喷嘴组合喷头水射流钻孔过程中，冲击方向（ $x$ 方向）对称面的位移等值线，中间部分为已经破碎的部分。由于煤岩体的非均质性和分布喷嘴中心冲击压力高的特点，可以看到形成的凹凸不平的冲击面。并使得煤体强度低的细胞元先破碎，产生一系列大小不等的裂隙。由于位移等值线的特性，煤体产生的微小裂隙被样条曲线平滑掉了。但仍可以看出水射流的冲击破碎和钻孔的形成，首先在冲击面的中心范围内形成裂隙，然后裂纹沿低强度细胞元发展、延伸，逐渐汇聚，发生大块煤岩体的剥落，形成破碎坑。随着射流冲击的继续，坑壁裂隙的发展和延伸，使得破碎坑直径逐渐变大，形成钻孔。由于冲击波在煤体中的传播随距离的增大，其衰减极为迅速，因此裂隙的产生和发展均在冲击区附近，距煤体表面很薄的区域内发生。只有在表面层的煤体破碎后，里层的煤体暴露出来或距表面很近时，才能被破碎。随着冲击距离的增加，当水射流冲击压力低于煤体的门槛压力后，破碎停止。这时向里推进钻头，保持水射流的冲击压力大于煤体的门槛压力，煤体才能继续破碎，形成更深的钻孔。

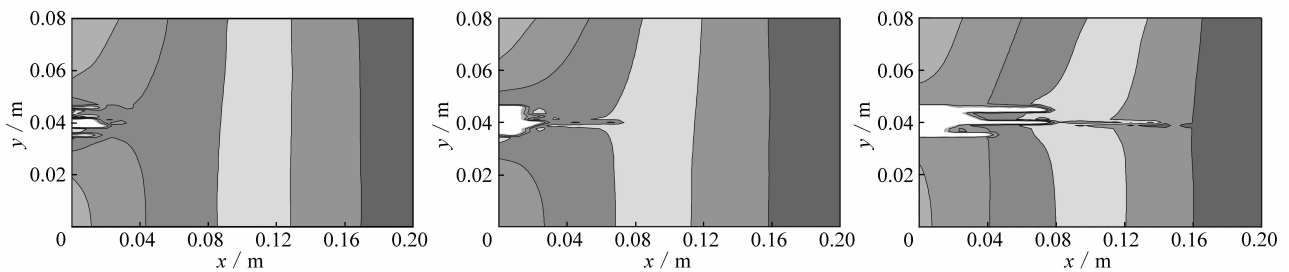


图3 水射流钻孔数值模拟的位移等值线

Fig. 3 Displacement isoline of drilling coal by water jet

### 3 水射流钻孔试验

水射流破碎试验采用9喷嘴组合射流喷头，喷嘴直径为  $0.8\ \text{mm}$ 。其特点：喷头横截面上喷嘴分布密度大，喷嘴间距小，因而射流密度大，多股射流的干扰区变小，缩短了多股射流的联合长度。

首先对煤体进行水射流冲击破碎试验，图4为煤体破碎效果。试验中水射流喷嘴与煤块冲击面的距离为  $100\ \text{mm}$ 。

试验中发现，当射流压力低于  $15\ \text{MPa}$  时，对煤体经过长时间冲击后，煤体表面没有破碎的痕迹，该

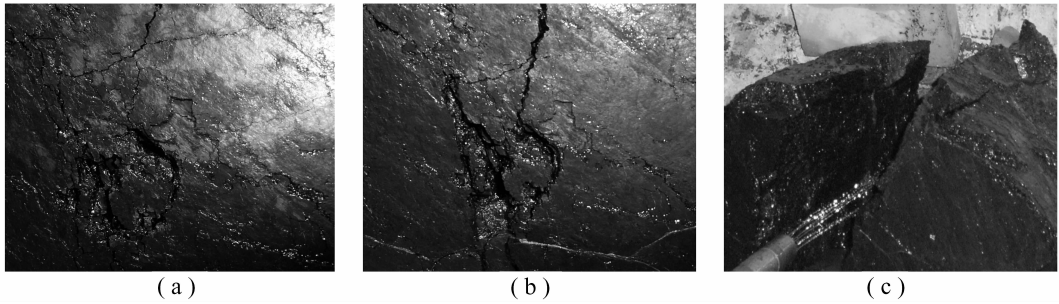


图 4 水射流破煤效果

Fig. 4 Fragmentized effect of coal by water jets

煤体的射流压力门槛值为 15 MPa。当水射流压力达到 15 MPa 时, 煤体表面冲击区附近的裂隙开始变大, 并形成一系列大小、深浅各不相同的破碎坑 (图 4 (a))。射流中心处的破碎坑最深, 约有 2 cm。破碎坑上面产生纵横交错的 2 条明显的裂隙, 右面有较浅的破碎坑。

当水射流压力上升到 20 ~ 25 MPa 时 (图 4 (b)), 刚才形成的破碎坑变大、变深, 并与上面形成的纵向裂隙连通。其左下方也形成一个稍小的破碎坑, 并有纵向裂隙贯通, 形成大表面破碎的趋势。

当射流压力上升到 30 MPa 时 (图 4 (c)), 由于煤体是自由状态, 在射流作用下, 受有冲击压力的正面力和水楔作用的侧面力, 煤体沿贯通的裂隙完全裂开。

课题组进行了水射流在煤层中钻孔的室内试验。将水泥、沙子和黏土与大炭块以适当的配比浇结在一起, 建成高压水射流钻孔试验用模拟煤壁。该煤壁高 1.4 m, 宽 1.6 m, 长 22 m。试验煤块的弹性模量为 1 750 MPa, 泊松比 0.3, 密度 1 570 kg/m<sup>3</sup>, 单轴抗压强度 13.0 MPa。图 5 为水射流钻孔试验现场。

试验中发现, 连续钢管的推进速度与射流压力存在非线性的变化规律, 射流压力越大, 推进速度越快。当泵压在 30 MPa 时, 排量为 30 L/min, 破岩作用很弱, 钻头的推进速度只有 0.1 m/min, 形成的钻孔直径为 50 mm; 当泵压 40 MPa 时, 排量为 40 L/min, 破岩作用增强; 当泵压提高到 60 MPa 时, 排量达到 70 L/min, 射流速度达到 370 m/s, 破岩效率大幅度提高, 水射流破岩距离达到 0.5 m 以上 (图 6)。

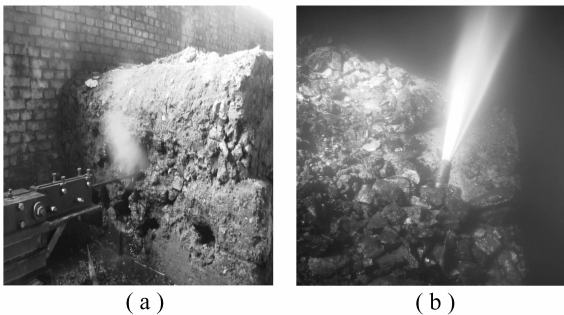


图 5 水射流钻孔现场

Fig. 5 Drilling scene of water jets

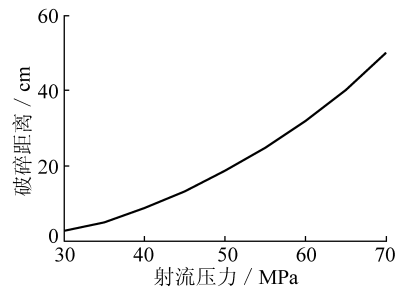


图 6 破碎距离与射流压力的关系

Fig. 6 Relation of cracked distance and jet pressure

## 4 结 论

(1) 水射流破岩存在一个门槛压力, 其大小与岩体的抗压强度和非均质系数有关, 当水射流的冲击压力小于该门槛压力时, 岩体不能被破碎。

(2) 由愈渗理论得出水射流作用下, 非均质岩体高强度单元的失效准则。

(3) 通过研究发现, 非均质岩体内较低强度的一系列微单元的破坏形成了裂隙, 裂隙的发展、交汇引起煤体颗粒的剥蚀, 形成破碎坑, 最后导致岩体破碎和失效。

## 参考文献:

- [1] 常宗旭, 赵阳升, 冯增朝, 等. 水射流在煤层中水平钻孔的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (S1): 4 740 - 4 744.  
Chang Zongxu, Zhao Yangsheng, Feng Zengchao, et al. Experimental studies on drilling horizontal hole by water jet in coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S1): 4 740 - 4 744.
- [2] Kondo M, FUjii K, Syoji H, On the destruction of mortar specimens by submerged water Jets [A]. Second International Symposium on Jet Cutting Technology [C]. Cambridge, U. K, 1974: 69 - 88.
- [3] Kang S W, Reitter T, Carlson G, Target responses to the impact of high-velocity, non-abrasive water jets [A]. 7th American Water Jet Conference [C]. Seattle, Washington, U. S. A, 1993: 5.
- [4] Crow S C, Lade P V, Hurlburt G H, The Mechanics of hydraulic rock cutting [A]. Second International Symposium on Jet Cutting Technology [C]. Cambridge, England, 1974: 1 - 14.
- [5] Crow S C. A theory of hydraulic rock cutting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1973 (10): 567 - 584.
- [6] 张永利, 张彦路, 李成全. 水射流切割理论研究进展 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1999, 18 (5): 503 - 506.  
Zhang Yongli, Zhang Yanlu, Li Chengquan. The progress of the research of water jet cutting theory [J]. Liaoning Engineering Technology University (Natural Science Edition), 1999, 18 (5): 503 - 506.
- [7] Reh binder G. Some aspects on the mechanics of erosion of rock with a high speed water jet [A]. Third International Symposium on Jet Cutting Technology [C]. Chicago, U. S. A, 1976: 1 - 20.
- [8] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (6): 628 - 633.  
Cao Wengui, Fang Zulie, Tang Xuejun. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17 (6): 628 - 633.

---

## 中煤集团高效刮板输送机成套设备通过鉴定

日前, 中煤集团自主研发的“高效矿井 SGZ1000/3 × 700 型综采工作面刮板输送机成套设备”通过由中国煤炭工业协会组织的新产品鉴定。

该成套设备是由中煤集团所属装备公司自主研发的具有自主知识产权的矿用大功率、长运距、大运量、高可靠性的重型装备, 采用了具有自主知识产权的铸焊式高可靠性中部槽、双向对称模锻刮板和综合监控系统等多项新技术。在井下工业性试验中, 该套设备取得最高日产 4.23 万 t、月产 80.4 万 t 的好成绩。

摘自“中国煤炭工业网”