

文章编号:1000-582X(2008)08-0942-04

# 高压水射流破岩应力波效应的数值模拟

司 鹤<sup>a,b</sup>, 王丹丹<sup>a</sup>, 李晓红<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 西南资源开发及灾害控制教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:** 高压水射流破岩是一个涉及诸多因素的复杂的非线性动力学问题, 利用非线性有限元法, 采用动态接触模拟高压水射流对岩石冲击作用。结果显示岩石内部最初受到冲击时的不稳定性由强变弱, 反映了岩石的动态响应特性; 模拟了在不同冲击速度下应力波在岩石中的传播和衰减过程, 结果表明应力波的传播速度与冲击速度成正比, 射流速度越大, 应力波衰减越快; 同时还模拟了以相同的速度分别冲击砂岩和煤时的应力波效应, 计算表明在相同的冲击速度下, 射流冲击煤的局部性效应比冲击砂岩时更为显著, 应力波在砂岩中的传播范围要广泛一些。

**关键词:** 高压水射流; 有限元法; 应力波; 冲击载荷

中图分类号: X931

文献标志码: A

## Stress wave effect in numerical simulation on rock breaking under high-pressure water jet

SI Hu<sup>a,b</sup>, WANG Dan-dan<sup>a</sup>, LI Xiao-hong<sup>b</sup>

(a. College of Resource and Environmental Sciences; b. Key Laboratory for the Exploration of Southwestern Resource & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The evolvement of rock damage struck by a high-pressure water jet is characterized by nonlinear properties, thus making it a complicated dynamic problem. Based on a nonlinear finite element and elastic-plasticity theory, a computational model was established. The dynamic load striking the rock by a high-pressure water jet was simulated by the dynamic contact method. Furthermore, the propagation of a stress wave in the same rock was simulated at different impact velocities. The results show that the propagation velocity of a stress wave is proportional to the impact velocity of the high-pressure water jet. The effects of a stress wave in sandstone and coal impacted by high-pressure water jets of the same velocity were simulated. The effect of a stress wave in coal was stronger than in sandstone, while the region of propagation of stress wave in coal was smaller.

**Key words:** high-pressure water jet; finite element method; stress wave; impact load

水射流研究始于 20 世纪, 在石油、矿业和建筑工程、医疗技术等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>, 显示出了巨大的发展潜力。高压水射流技术因其独有的技术

特性, 近年来在煤矿瓦斯治理中展现出良好的应用前景。分析岩石在高压水射流冲击下的动力学效应是研究水射流破岩机理的关键, 也是开发水射流技

收稿日期: 2008-04-19

基金项目: 国家自然科学基金创新团队资助项目(5062140)

作者简介: 司鹤(1964-), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事工程力学、流体力学研究,

(E-mail) sihu@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

术应用的核心,也为水射流技术应用于煤矿瓦斯治理的提供重要的学术依据。

射流冲击是动载,在岩石内部产生的应力波是水射流冲击岩石初期的主要影响因素,Huang 和 Hammit 探索了一维和二维液滴对刚性靶板冲击时,液滴的形态演化及其内部瞬态压力和速度分布<sup>[2]</sup>,但是没有考虑到固体的变形或只是作为弹性体考虑,忽略了岩石本构关系的复杂性以及一束水和一滴水的冲击效果的差异性;美国 Jia-Bo Hwang 和 Hammit 等运用弹性力学和应力波理论,将一滴水或一段水柱冲击固体的过程简化为一段刚体撞击一固体,确定了被撞击一方的应力和位移<sup>[3]</sup>。这种模型的缺陷在于没有考虑到水射流的特性,而简单的把它看作刚体以及把岩石看作弹性体。水射流破岩是冲击载荷和准静态压力共同作用的结果,其中又以冲击载荷为主,射流冲击岩石在岩石内产生的应力波作用形成岩石的损伤破坏主体<sup>[4-6]</sup>。

笔者研究的是初期形成岩石损伤破坏主体的应力波效应,采用的模型考虑了水射流和岩石的特性,比其他模拟中把水射流冲击破岩简化为一段刚体冲击另一段刚体更接近真实情形,并采用动力接触模拟射流对岩石的冲击。数值模拟了某一时刻应力波沿某一路径的传播特性,同时也讨论了速度和岩体材料对应力波传播的影响,直观显示了岩石内部的应力波特性。计算的结果与实验结果一致,为水射流技术应用提供了理论依据。

## 1 建立模型

通过对射流、岩石结构属性的模拟<sup>[7]</sup>,采用动力接触分析岩石内部应力的变化。建立模型时,将射流和岩石看作相互接触的两个物体,使射流以一定的速度冲击岩石,因而不用对接触面上的受力状态进行假设处理,这样建立的模型更接近于真实物理状态。

### 1.1 几何模型设置

几何模型如图 1 所示,将三维力学模型近似为平面应变模型,岩石几何尺寸为 10 cm×8 cm,射流几何尺寸为 0.3 cm×2.5 cm。在  $x$  方向上,岩石的大小尺寸和水射流的尺寸比大于 30,水射流冲击岩石时,水射流对岩石的冲击作用范围远小于模型的大小,只对岩石底部采用铰支连接,其余为自由约束。

### 1.2 材料属性

将射流设为完全塑性,屈服应力设置为 0,模拟被冲击的岩石为砂岩,具体力学参数见表 1。

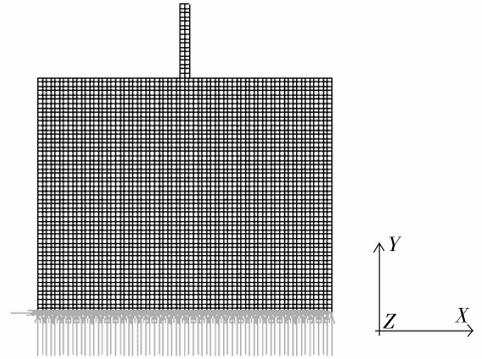


图 1 高压水射流冲击岩石的平面模型

表 1 砂岩、煤和水相关的力学参数

名称	砂岩	煤	水
杨氏模量 $E/\text{MPa}$	3.308e4	1 874.1	—
泊松比	0.188	0.3	0.5
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2.31e3	1.4e3	1.05e3
内摩擦角/ $(^\circ)$	45	33.7	—
抗压强度/ $\text{MPa}$	73.5	15	—
抗拉强度/ $\text{MPa}$	9.2	—	—

### 1.3 岩石控制方程

将岩石假设为弹塑性各项同性材料。在初始弹性范围内,应力和应变存在一一对应关系,即广义虎克定律。进入塑性状态之后,不再存在应力和应变的一一对应关系,建立的只能是应力增量和应变增量之间的关系,整体的方程如下所示。

$$\text{运动方程为 } \sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i, \quad (1)$$

$$\text{几何方程为 } \epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

$$\text{物理方程 } \left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \\ \sigma_{kk} &= (3\lambda + 2\mu) \epsilon_{kk} = 3K \epsilon_{kk} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

### 1.4 有限元离散及边界条件

计算模型为平面应变模型,离散单元采用四节点矩形单元,它的优势在于用较少的单元就可以得到较高的计算精度。

其形函数为

$$N_i = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{x}{\xi_i} \right) \left( 1 + \frac{y}{\zeta_i} \right), \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (4)$$

式中,  $(\xi_i, \zeta_i)$  为单元第  $(\xi_i, \zeta_i)$   $i$  节点的自然坐标。

单元内任意点的坐标用节点坐标插值表示为

$$\{x(\xi, \zeta)\} = [N] \{\delta\}^e, \quad (5)$$

式中,  $\{\delta\}^e$  为单元节点坐标矢量。

算例为冲击接触问题,不对接触面的受力状态进行假设,而在有限元计算中采用动接触,使其更为接近真实物理状态;岩石底端采用位移约束固定,限制其  $x$ 、 $y$  向的位移。

## 2 计算结果分析

高压水射流破岩的实质是水射流与岩石相互作用,并由此引起岩石损伤破坏的过程,岩石和水射流的物质特性以及射流的载荷特征决定了高压水射流破岩的机理和过程。

根据上述方法和设置的材料属性对高压水射流破岩过程进行了模拟,水射流速度分别为 350 m/s、400 m/s 和 500 m/s,图 2 显示了这 3 种速度冲击煤岩得到的计算结果。

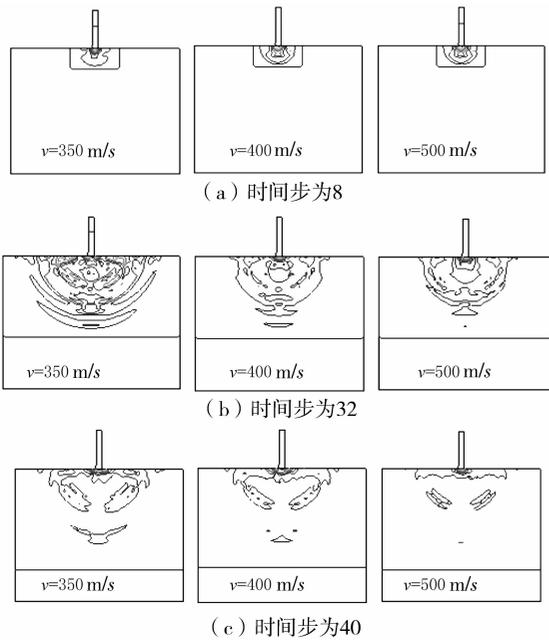


图 2 不同的射流速度冲击煤岩时应力波的传播

图 3 显示了水射流以 400 m/s 的速度冲击煤岩时,射流冲击煤岩中心区某一节点的应力随时间的演变过程。这一模拟结果与文献[8-15]的试验结果一致,表明计算结果可靠,计算方法是可行的。

沿煤岩计算模型中,以水射流中心线接触到煤岩表面位置为顶点,沿煤岩内部选取一径向路径,计算应力波的衰减。图 4 显示了冲击速度分别为 350 m/s 和 400 m/s 时煤岩内部沿径向路径应力波的衰减。

由计算结果中应力波随时间的传播过程,可以看出应力波在岩石传播中随距离的增加急剧衰减,在距离冲击区较远的地方,应力波的能量已经达不

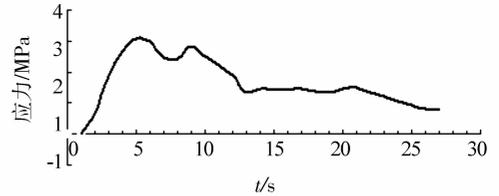


图 3 节点的应力随时间的变化过程

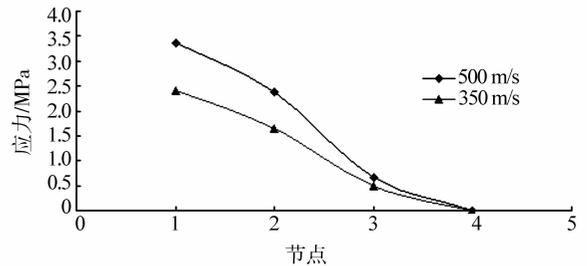


图 4 不同的射流速度冲击煤岩时应力波的衰减过程

到岩石破坏所需的要求,在更远处的物质并未受到力的作用,证明应力波有明显的局部效应,这为高压水射流冲击岩石试验初期的破碎坑的形成提供了理论依据,这和数值模拟下,破碎坑的形成结果一致。且每个时间步的应力波最大值、最小值以及其分布状况都不相同,体现了冲击初期受力的不稳定性,这主要是受冲击载荷的特性和岩石的动态响应的影

响。而且,射流以不同的速度冲击岩石时,应力波的传播情况是有区别的,计算结果显示,同一点不仅应力值的大小不同,并且衰减的速度也不相同,冲击速度越大,衰减越快,对岩石的冲击作用就越明显,效率就越高。原因在于衰减快可以使得中心受压区域的能力得以沿径向及时充分释放,从而岩石破坏从射流边缘向内、外发展。故衰减频率高的情况下,压缩能量释放的频率就高,有利于破碎坑的形成和扩展。这也验证了冲击速度越大,破碎坑的形成就越明显的现象。

从应力波的衰减图中可以看出,应力波在同一物质中传播时,冲击速度越大,应力峰值就越大同时衰减的速度也相对较快;从图 3 中可以得出,应力在波动几次后就趋于稳定,但是整体是呈下降趋势。说明了在冲击初期,岩石内部最初受到冲击时的不稳定性由强变弱,反映了岩石的动态响应特性。

图 5 显示了水射流以相同速度 400 m/s 分别冲击砂岩和煤岩时,应力波的传特性。

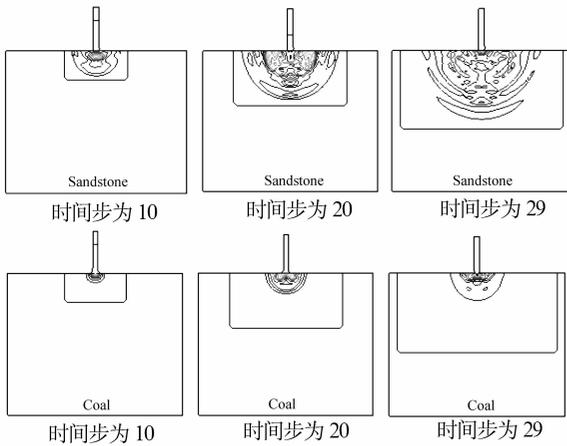


图 5 在相同冲击速度下砂岩和煤的内部应力波的传播

从图 5 中,可以看到应力波在砂岩中传播的距离相对煤来说,范围更广一些,就应力波的波及区域,砂岩比煤更广一些。射流冲击煤的局部性效应比冲击砂岩更为显著。砂岩相对于煤比较密实,变形在相临介质质点之间传播得容易些,所以在相同时间步的情况下,应力波在砂岩中要比在煤中传播得远一些。从应力波的衰减图中可以看出,在不同的物质中传播时,因为冲击速度相同,所以应力波的峰值差别不大,但是应力波在较为坚硬密实的物质中衰减路径要远一些,这在应力波传播过程图和应力波衰减图中都可以得到印证。

### 3 结 论

从材料物性出发,利用动态接触,建立了射流冲击岩石的计算模型,通过和试验结果对比,证明了计算的可靠性。模拟结果直观、明了,这对于深入研究水射流破岩机理具有深刻的理论意义,并为下一步的研究奠定了基础;同时对射流冲击时,岩石内部的受力状况进行了详细的研究,表明了高压水射流冲击岩石初期,由冲击产生的应力波效应,表明了射流冲击岩石初期,冲击载荷波动比较大,且随距离的增加衰减的极为迅速,体现了冲击载荷和岩石动态响应的影响效果。详细分析了射流以不同的速度冲击岩石时,不仅相同时刻同一点的应力值大小不同,而且衰减的速度也不相同,冲击速度越大,应力峰值就越大同时衰减得越厉害,对岩石的冲击作用就越明显,越有利于破碎坑的形成。这些都为射流冲击岩石前期的冲击效应提供了理论依据和实验指导。在冲击初期,应力在波动几次后就趋于稳定,但是整体呈下降趋势。说明了岩石内部最初受到冲击时的不稳定性由强变弱,反映了岩石的动态响应特性;另外

还研究了不同介质(砂岩和煤)在相同的射流冲击速度下的冲击效果,从应力波的衰减图中可以看出,在不同的物质中传播时,因为冲击速度相同,所以应力波的峰值差别不大,但是应力波在较为坚硬密实的物质中衰减路径要远一些,得出了射流冲击煤比冲击砂岩的局部性更为显著。

### 参考文献:

- [1] 李根生,沈忠厚. 高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2005(6):96-99.  
LI GEN-SHENG, SHEN ZHONG-HOU. Advances in researches and applications of water jet theory in petroleum engineering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005(6):96-99.
- [2] MOMBER A W. Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high-speed waterjet: an impact-force study [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25: 31-41.
- [3] DANIEL J L, KRAUTHAMMER T. Assessment of numerical simulation capabilities for medium-structure interaction systems under explosive loads [J]. Computers and Structures, 1997, 63(5):875-887.
- [4] 倪红坚,王瑞和,张延庆. 高压水射流作用下岩石的损伤模型[J]. 工程力学, 2003, 20(5):59-62.  
NI HONG-JIAN, WANG RUI-HE, ZHANG YAN-QING. A damage model for rock under high pressure water jet[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5):59-62.
- [5] FURLONG J R, DAVIS J F, ALME M L. Model the dynamic load/unload behavior of ceramic under impact loading [R]. RDA-TR-00. 0-0001, Arlington, VA: R&D Associates, Arlington, 1990.
- [6] 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, 2003, 27(4), 44-47.  
WANG RUI-HE, NI HONG-JIAN. Theoretical study on rock break-off process during high-pressure water jet drilling[J]. Journal of the University of Petroleum, 2003, 27(4), 44-47.
- [7] 岳龙旺,田取珍. 煤体冲击破碎中应力波传递规律的研究[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(3), 236-239.  
YUE LONG-WANG, TIAN QU-ZHEN. Stress wave propagation law of coal impact cutting[J]. Journal of taiyuan university of technology, 1999, 30(3):236-239.
- [8] YANG R, BRWDEN W F, KATSABANIS P D. A new constitutive model for blast damage[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1996, 33:245-254.
- [9] LEMAITRE J. Damage mechanics course[M]. Beijing: Beijing Scientific Press, 1996.

(下转第 950 页)

- 1954-1958.
- [10] 付志亮,高延法,宁伟,等. 含油泥岩各向异性蠕变研究[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(3):353-356.  
FU ZHI-LIANG, GAO YAN-FA, NING WEI, et al. Creep of anisotropic oil shale [J]. Journal of mining & safety engineering, 2008,25(3):353-356.
- [11] 李成波,ADNAN AYDIN,施行觉,等. 岩石蠕变模型的比较和修正[J]. 实验力学,2008,23(1):9-16.  
LI CHENG-BO, ADNAN AYDIN, SHI XING-JUE, et al. Comparison and modification of rock creep models [J]. Journal of experimental mechanics, 2008,23(1):9-16.
- [12] 王旭东,付小敏. 蚀变岩的蠕变特性研究[J]. 工程地质学报,2008,16(1):27-31.  
WANG XU-DONG, FU XIAO-MIN. Uniaxial compressive rheology testing for rheological properties rotten rock [J]. Journal of engineering geology, 2008,16(1):27-31.
- [13] 殷德顺,任君娟,和成亮,等. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1899-1903.  
YIN DE-SHUN, REN JUN-JUAN, HE CHENG-LIANG, et al. A new rheological model element for geomaterials [J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2007,26(9):1899-1903.
- [14] 王小平. 对改进西原模型的再认识[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):651-654.  
WANG XIAO-PING. Reevaluation of modified xiyuan model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007,35(6):651-654.
- [15] 范庆忠,李术才,高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1381-1385.  
FAN QING-ZHONG, LI SHU-CAI, GAO YAN-FA. Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression [J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2007,26(7):1381-1385.

(编辑 陈移峰)

(上接第 945 页)

- [10] AQUELENT N, SOULI M, OLOVSSON L. Euler-lagrange coupling with damping effect: application to slamming problems [J]. J Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995(6):110-132.
- [11] 施红辉. 高速液体撞击下固体材料内的应力波传播 [J]. 中国科学 G 辑,2004,34(5):577-590.  
SHI HONG-HUI. The propagation of stress wave in solid under high velocity liquid [J]. China Science G, 2004,34(5):577-590.
- [12] HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W, BISHNOI K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure application [J]. Int J Impact Engineering, 2001,25:211-231.
- [13] 冯西桥,余寿文. 准脆性材料细观损伤力学 [M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [14] LIU L Q, KATSABANIS P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997,34:217-231.
- [15] 鞠杨,环小丰,宋振泽,等. 损伤围岩中爆炸应力波动的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(2):136-141.  
JUN YANG, HUAN XIAO-FENG, SONG ZHEN-ZHE, et al. Theoretical models and numerical simulation of rock blasting [J]. Explosion and Shock Wave, 2007,27(2):136-141.

(编辑 陈移峰)