

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-935-06

磨料水射流作用下岩石损伤场的数值模拟

司 鹄^{1,2}, 谢延明¹, 杨春和²

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 西南资源开发及灾害控制教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 磨料水射流 (AWJ) 破碎岩石的过程是多相流体与结构物体之间非线性碰撞动力耦合问题, 其内部的复杂机制涵盖了诸多方面。基于 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 流-固耦合罚函数算法, 从连续损伤力学和细观损伤力学角度出发, 建立了磨料水射流冲击破碎岩石模型。研究表明: 岩石的破坏主要以冲击破坏为主, 破坏具有明显的局部效应, 破碎过程以漏斗状交替推进; 岩石内部的损伤场以阶段性演化, 即分为线弹性阶段、非线性失稳破碎阶段, 岩石在射流冲击交替应力的作用下 50 μs 内完全破坏。计算结果与相关文献基本吻合, 研究结果对深入研究磨料水射流破岩理论及应用有着重要的学术和现实意义。

关 键 词: 磨料水射流; ALE 罚函数耦合; 损伤; 冲击载荷;

中图分类号: TD231.62

文献标识码 A

Numerical simulation of rock damage field under abrasive water jet

SI Hu^{1,2}, XIE Yan-ming¹, YANG Chun-he²

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Key Lab. for the Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The process of rock breaking under abrasive water jet (AWJ) is concerned with lots of factors; and it is a complicated and nonlinear dynamic coupling problem between multiphase flow and structure. Based on the arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) fluid-solid coupling penalty function method, a model of rock breaking under AWJ is established with continuum damage mechanics and micro damage mechanics. The results show that the body of rock damage and breakage is mainly attributed to impact; the local effect is the main feature; and the evolvement of rock damage shows a funnel trend. The results show that the internal process of breaking rock experienced three stages within 50 microseconds. On the whole, numerical results agree with relevant results; and the numerical simulation is the important aspect for developing and applying abrasive water jet breaking rock technology.

Key words: abrasive water jet; ALE penalty function coupling; damage; impact load

1 引 言

磨料射流技术是 20 世纪 80 年代中前期发展起来的新兴技术, 它被广泛运用在采矿、石油化工、建筑、隧道开挖、机械加工等行业中。磨料水射流切割破碎作业在常温下进行, 切割过程没有热反应区, 具有较纯水射流效率高、整个过程不发生化学反应等优点, 特别在矿井危险环境中对瓦斯治理显现出传统方法不可比拟的优势。磨料射流技术在瓦斯治理中应用的关键与核心问题是对煤体在射流作用下损伤破坏及微裂隙、微裂纹扩散情况的研究^[1-2]。

磨料射流切割破碎技术是将一定数量的磨料与高压水互相混合而形成的液固两相高速流体, 磨料粒子从高压水中获得能量, 从而把射流对岩石的持续作用变为磨料粒子流对岩石的高频冲击、磨削作用。岩石作为一种脆性损伤材料, 存在着大量的微裂隙、微裂纹等缺陷, 在冲击载荷作用下岩石的动态断裂是一个连续损伤演化累积过程, 其损伤断裂机制可归结为岩石内部微裂纹动态演化^[3-5]。文献[6-9]基于 FLUENT6 求解器建立的 CFD (computational fluid dynamics) 模型, 对两相流在喷嘴内、外的流场进行了数值模拟, 指出两相射流沿轴线方向速度在自由射流阶段速度梯度下降缓慢, 接近壁面时速度

收稿日期: 2010-01-12

基金项目: 国家自然科学基金创新团队资助 (No. 5062140); 国家 973 研究计划 (No. 2009CB724602)。

第一作者简介: 司鹄, 女, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事工程力学、流体力学的研究和教学工作。E-mail: sihu@cqu.edu.cn

梯度变化剧烈,该模型没有考虑靶体对流场的作用。Junkara 等^[10]、吴晶华等^[11]将磨料射流简化为单颗磨料粒子以不同的速度、角度射向物体进行了试验分析与数值模拟,通过试验现象结果与数值分析结果的比较,得出了合理的最优入射角和最优入射速度的结论,但这种模型没有充分考虑冲击过程是连续磨料粒子的作用,同时忽略了水楔的贡献。

本文采用 ALE 流-固耦合罚函数算法,将模型考虑成水柱与岩石的碰撞,磨料粒子随机分布在水柱中,充分考虑磨料、水、岩石三者之间的物态特性,比模拟单颗粒子撞击物体更接近真实情形。数值模拟磨料水射流冲击作用下岩石内部应力、应变与损伤的关系,深入讨论了岩体材料内部的破坏过程。

2 计算模型

磨料射流破碎岩石的过程是多相流体与结构物体之间非线性碰撞动力耦合问题,其内部的复杂机制涵盖了多个领域。为了使建立的模型接近于真实物态工况,在模型建立前作如下假设:①磨料粒子随机地填充在液相介质中且磨粒与磨粒之间、磨粒与液体之间无相对运动。②暂不考虑磨粒形状的影响和射流的边界层效应。③岩石为各向同性初始无损伤的均质材料,射流以一定的速度垂直冲击岩石。

2.1 控制方程

将磨料射流设为完塑性材料,磨料射流作为一种混合流体忽略其液体和颗粒之间相互作用力,控制体的方程引自文献[12],其方程如式(1)~(4)所示。

(1) 连续性方程

$$\rho_{,t} + \rho_{,i}c_i + \rho v_{k,k} = 0 \quad (1)$$

式中: t 为时间; ρ 为密度; c_i 为对流速度张量, $i=1,2,3$; v_k 为速度张量, $k=1,2,3$ 。

(2) 动量方程

$$\rho(v_{i,t} + v_{i,j}c_j) = \sigma_{ji,j} + \rho b_i \quad (2)$$

式中: σ_{ji} 为 Cauchy 应力张量, $j=1, 2, 3$; b_i 为体力张量。

(3) 能量方程

$$\rho(E'_{,t} + E'_{,i}c_i) = \sigma_{ij}D_{ij} + b_i v_i + (k_{ij}\theta_{,j})_{,i} + \rho s \quad (3)$$

式中: E' 为内能; k_{ij} 为热传导张量; θ 为热动力温度; s 为单位体积热源。

(4) 变形率

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

2.2 几何模型及边界条件

几何模型如图 1 所示,由于撞击基本是轴对称的,为了简化计算,本文采用了 1/4 模型进行分析。

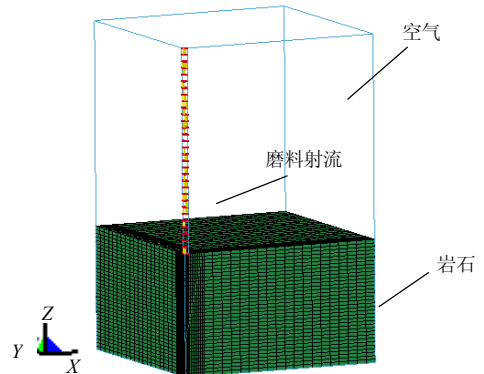


图 1 磨料水射流冲击煤岩的三维模型
Fig.1 The 3D model of abrasive water jet impacting coal rock

模型的岩石几何尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 射流尺寸为 $\phi 2 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 空气尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。射流和空气用完全塑性多物质实体单元,射流中的磨料粒子当作刚体来处理,并以单元的形式随机分布其中。岩石选用弹塑性常应力实体单元,根据圣维南原理在射流直径 10 倍以上的岩石冲击区域受影响很小,所以在射流冲击区域设置了较细密的网格。岩石底端采用位移约束固定,限制其 X 、 Y 、 Z 向的位移,在 XOZ 对称界面上 $Y=0$,在 YOZ 对称界面上 $X=0$,上下表面及侧面施加无反射边界条件。

2.3 磨料、水和空气的材料模型

水和空气均被认为是完全塑性材料,对于流体材料而言,除了上述的控制方程外,还需要状态方程才能形成封闭的方程组。水的状态方程如下:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{\alpha}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2}]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \quad (5)$$

式中: C 为冲击波速度 v_s 与质点速度 v_p 曲线的截距; S_1 、 S_2 、 S_3 为 v_s - v_p 曲线的斜率系数; γ_0 为 Gruneisen 常数; α 为 γ_0 和 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 的一阶体积修正量。空气采用 Linear Polynomial 状态方程,磨料材料选用石榴石。具体力学参数见表 1。

表1 空气、石榴石和水相关的材料参数

Table 1 Material parameters for air, water and garnet

名称	弹性模量 E /MPa	泊松比	密度 /(g/cm ³)
空气			1.293×10^{-3}
石榴石	2.48×10^4	0.27	4.00
水		0.50	1.05

2.4 岩石的损伤模型

针对大变形、高应变率、高压效应的岩石工况，通常采用 TCK 模型^[13-15]和 $H-J-C$ 模型^[16-18]来处理，本文采用 $H-J-C$ 模型，它综合考虑了以上各方面的因素，其等效屈服强度是压力、应变率及损伤的函数，而压力是体积应变的函数，损伤积累是塑性体积应变、等效塑性应变及压力的函数。强度以规范化等效应力描述如下：

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + F \ln \varepsilon^*) \quad (6)$$

式中： $\sigma^* = \sigma / f'_c$ ，为实际等效应力与静态屈服强度之比； $P^* = P / f'_c$ ，是无量纲压力； $\varepsilon^* = \varepsilon / \varepsilon_0$ ，为无量纲应变率； A 为规范化黏附强度； B 为规范化压缩系数； N 为压缩强化指数； F 为应变率系数。通过等效塑性应变和塑性体积应变累积得到的损伤因子表示如下：

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (7)$$

式中： $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变增量； $\Delta \mu_p$ 为等效体积应变增量； $f(P) = \varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2}$ ，为常压 P 下材料断裂塑性应变； P^* 与 T^* 为规范化压力与材料所能承受的规范化最大拉伸静水压力； D_1 和 D_2 均为损伤常数。岩石本构模型参数如表2所示。

表2 煤岩材料参数

Table 2 Material parameters for coal rock

ρ /(g/cm ³)	f'_c /GPa	A	B	F	S_{Fmax}	G /GPa	D_1	D_2	N	E_{Fmin}	T /GPa	P_{crush} /GPa	μ_{crush}	P_{lock} /GPa	μ_{lock}	K_1 /GPa	K_2 /GPa	K_3 /GPa	E /GPa
2.44	0.048	0.79	1.6	0.61	7.0	14.86	0.04	1.0	0.61	0.01	0.004	0.016	0.001	0.80	0.10	85	-171	208	35.7

注： ρ 为密度； S_{Fmax} 为规范化最大强度； G 为剪切模量； E_{Fmin} 为允许塑性应变； T 为最大静水拉伸强度； P_{crush} 、 μ_{crush} 分别为单轴试验中的压应力和体积应变； P_{lock} 为锁死压力； K_1 、 K_2 、 K_3 分别为材料常数； E 为弹性模量。

2.5 有限元算法

本模型涉及非线性冲击动力学问题，瞬态冲击作用会使网格严重变形并且产生高幅值的冲击波，为使其更接近真实物理状态，本算例采用 ALE 罚函数耦合算法。这种算法是通过罚函数耦合系数追踪拉格朗日节点和欧拉流体物质位置间的相对位移 d ，检查每一个从节点对主物质表面的贯穿，如果节点不出现贯穿，就不进行任何操作；如果发生从节点对主物质表面有贯穿，界面力 Q 就会分布到欧拉流体节点上；然后进行标准的 ALE 有限元离散，其中界面力的大小与发生贯穿量成正比：

$$Q = k_i d \quad (8)$$

式中： k_i 为基于主从节点质量模型特性的刚度系

数。

3 计算结果分析

根据上述方法对磨料水射流破岩过程进行模拟。图2显示了射流中磨料浓度为5%、速度为500 m/s 时岩体孔口的截面形状演化过程，破碎坑成明显的漏斗状，与文献[19]所得到的结果吻合。图3是纯水和磨料浓度 f 分别为5%、10%的射流以500 m/s 的速度冲向岩体时，破碎坑的深度随时间变化曲线，可以看出，破碎坑的深度随磨料浓度的提高而呈现出明显的增加趋势，与文献[20]中相关结果基本吻合。图4为煤岩中损伤变量 D 分布云图，图5为损伤场随时间的演变过程，损伤等值线灰度对应于0.1~1.0。

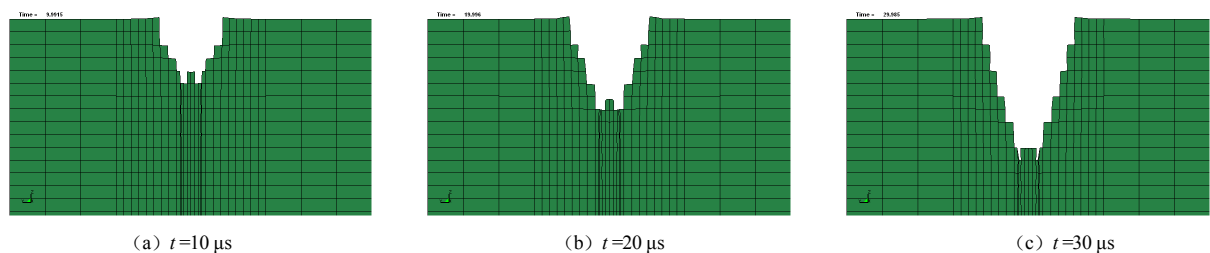


图2 破碎坑截面形状图
Fig.2 Section of crushing hole

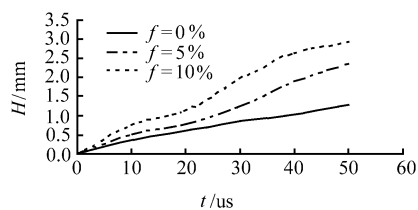


图3 在不同磨料浓度下深度时间变化图

Fig.3 Depth of penetration against time for a variety of abrasive flow rate

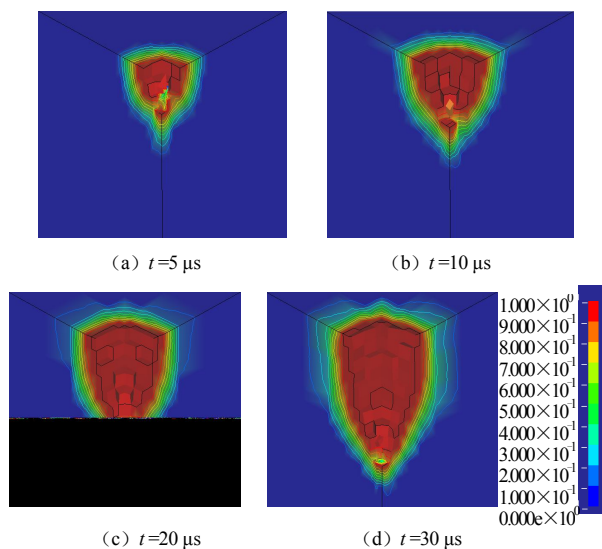
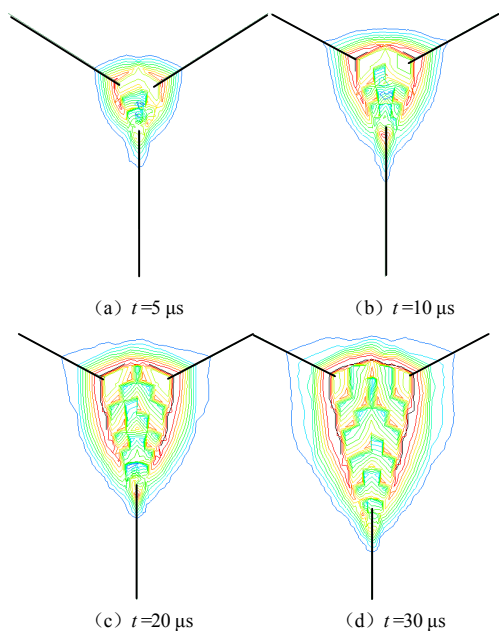
图4 煤岩中损伤变量 D 分布图Fig.4 Distribution of damage variable D in coal rock

图5 磨料射流冲击作用下煤岩损伤场等值线演变图

Fig.5 Damage isoline map evolution of coal rock under abrasive jet impact

由图中可见, 在磨料射流冲击岩石后极短的一

段时间内, 在射流作用岩石表面处物质会受到相当大的压应力而下陷, 与此同时, 周围没有受到冲击作用的岩体会抵抗这种变形, 在其界面某处将产生极大的剪切应力而破坏, 形成初始的破碎坑。而距离射流冲击中轴线一定距离处, 出现拉伸应力极值, 使岩体产生裂纹, 裂纹逐渐汇聚, 岩石的损伤场在轴向和径向迅速扩展, 岩石孔洞的深度和直径方向都有扩大。冲击效应对岩体的作用随距离的增大, 衰减极为迅速, 在距离射流冲击点较远处, 岩石中的能量密度已经达不到岩石破坏的临界值, 从而孔洞直径很快趋于稳定, 但在孔眼附近区域有不同程度的损伤。这时岩石的破坏主要集中在孔底附近, 随着岩石孔洞的加深, 射流的外沿损耗逐渐增大、流速降低, 孔深、孔径的增长速率迅速减小, 这便是形成锥形断面的主要原因。

图6为在岩体的 XOZ 断面上取 Z 坐标为 2.5 cm; X 坐标分别为 0.15、0.30、0.45、0.73 cm 的单元 E37776、E38165、E38168、E44640, 进行损伤场的演化过程分析。由计算结果可以清楚地看出, 射流直接作用的岩石单元 E37776、E38165 损伤值瞬间达到 1, 并一直保持, 而距离增加 3 mm 的单元 E38168 损伤值达到 0.6 并趋于稳定, 更远处的物质单元损伤量几乎不受波动应力的影响。可见冲击作用随距离的增加急剧衰减, 在距离冲击区较远的地方, 能量已经不足以损伤岩石的构形, 这里从损伤场的角度证实了冲击是具有明显的局部效应的。图7~10显示了单元 E38165 内部 X 、 Y 、 Z 方向的正应力、等效塑性应变与损伤的关系。由图可以看出, 单元的破坏过程可以分成 3 个阶段: 在冲击应力作用初期 ($5 \mu s$ 左右) 岩石处于线弹性阶段, 此时各方向的应力成线性增加, 损伤值变化很小, 塑性应变为 0; 第 2 个阶段在 $5 \sim 25 \mu s$ 之间, 单元上的应力加卸载过程呈现出强烈的交替振荡状态, 此时由于岩石中的气孔不断地被破碎, 逐渐地汇聚成裂隙, 整个结构单元处于崩塌状态, 致使等效塑性应变成量级的增长, 损伤值迅速地达到 1; 第 3 个阶段在 $25 \mu s$ 之后, 当损伤值达到 1 之后该单元已经完全破碎, 应力呈现出较大斜率的变化趋势。在该阶段单元不能承受拉应力, 但还能在一定程度上承受压应力, 这也是岩石类材料独有特性。 $50 \mu s$ 后 3 个方向的应力和等效塑性应变没有任何变化, 表明射流的撞击作用不会再影响到该单元, 孔的直径也趋于稳定。

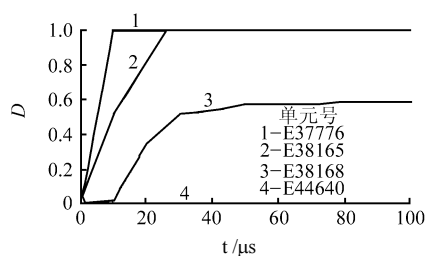
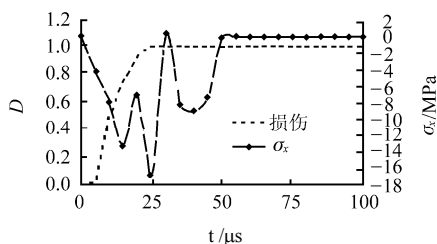
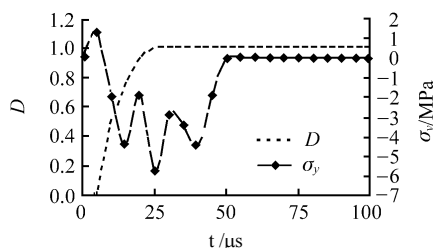
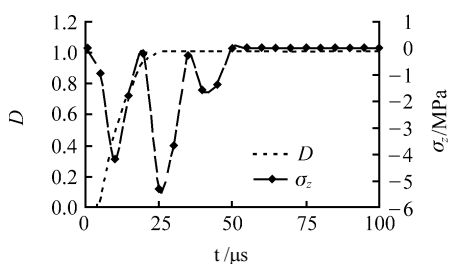
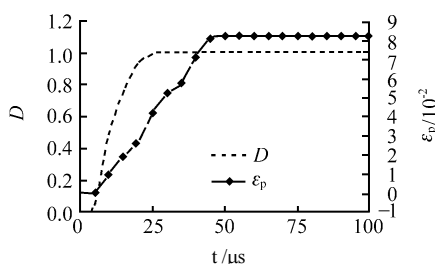


图6 单元损伤场随时间的变化过程

Fig.6 Damage evolution with time

图7 σ_x - D - t 时间的变化过程Fig.7 σ_x - D - t evolution with time图8 σ_y - D 随时间的变化过程Fig.8 σ_y - D evolution with time图9 σ_z - D 随时间的变化过程Fig.9 σ_z - D evolution with time图10 ε_p - D 随时间的变化过程Fig.10 ε_p - D evolution with time

4 结 语

本文从岩体材料损伤场的角度出发,考虑了磨料、水、岩石三者之间的物态特性,运用 ALE 流固耦合罚函数算法,深入研究了磨料水射流冲击破岩过程中破碎坑的形成及演化过程,同时也反映出损伤场随应力、应变的演化过程。在一定速度冲击下的岩体孔洞截面形状表明破碎过程以漏斗状阶跃推进,岩石的破坏主要以冲击破坏为主,冲击损伤场随径向距离的增加急剧衰减,破坏具有明显的局部效应,这与相关文献试验结果十分吻合。从断面直径方向上的单元内部应力、应变与损伤的关系出发,进一步深入研究了射流冲击作用下的岩石内部破坏过程,结果表明岩石内部的破碎过程中损伤场的演化分 3 个阶段,即线弹性阶段、非线性失稳破碎阶段、密实阶段,岩石在速度为 500 m/s 的射流复杂应力的作用下 50 μ s 内处于完全破坏状态。本文通过数值方法直接观察、捕捉到了磨料射流作用下岩体内部的应力、应变随损伤场的耦合变化关系,有效克服了实际工程研究中岩石材料透明性差、内部力学性能不易被观测等缺点,对深入研究磨料水射流破岩理论及应用有一定的学术意义和现实意义。

参 考 文 献

- [1] 孟筠青, 聂百胜. 磨料水射流切割技术在矿山安全中的应用研究[J]. 中国煤炭, 2008, 15(6): 45—50.
MENG Yun-qing, NIE Bai-sheng. A study on the application of abrasive water jet cutting technology in coal mine work safety[J]. *China Coal*, 2008, 15(6): 45—50.
- [2] 司鹤, 王丹丹, 李晓红. 高压水射流破岩应力波效应的数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(8): 942—950.
SHI Hu, WANG Dan-dan, LI Xiao-hong. Stress wave effect in numerical simulation on rock breaking under high pressure water jet[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(8): 942—950.
- [3] 黄筑平, 杨黎明, 潘客麟. 材料的动态损伤和失效[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 433—467.
HUANG Zhu-ping, YANG Li-ming, PAN Ke-lin. The material damage and dynamic failure[J]. *Advances in Mechanics*, 1993, 23(4): 433—467.
- [4] 姜小春, 谢和平, 周宏伟. 压缩载荷下准脆性材料宏观损伤变量研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 205—300.
JIANG Xiao-chun, XIE He-ping, ZHOU Hong-wei. Analysis of relationship between macroscopic damage variable and mesoscopic damage variable of quasi-brittle materials

- under compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 22(9): 2531—2536.
- [5] 朱泽奇, 盛谦, 张占荣. 脆性岩石侧向变形特征及损伤机理研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2137—2144.
- ZHU Ze-qi, SHENG Qian, ZHANG Zhan-rong. Study on lateral deformational characteristics and damage mechanism of brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2137—2144.
- [6] LIU H, WANG J, KELSON N, et al. A study of abrasive water jet characteristics by CFD simulation[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2004, 153—154: 488—493.
- [7] NGUYEN T, SHANMUGAM D K, WANG J.. Effect of liquid properties on the stability of an abrasive water jet[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2008, 48: 1138—1147.
- [8] 杨新乐, 张永利, 陈伟雄. 固液两相射流喷嘴外冲击流场的数值模拟[J]. 煤矿机械, 2008, 29(8): 52—53.
- YANG Xin-le, ZHANG Yong-li, CHEN Wei-xiong. Numerical simulation of outside impact flow-field of Solid-liquid two phase jet nozzle[J]. **Coal Mine Machinery**, 2008, 29(8): 52—53.
- [9] 熊佳, 雷玉勇, 杨志峰, 等. 基于 FLUENT 的磨料水射流喷嘴内流场的可视化研究[J]. 润滑与密封, 2008, 23(6): 52—55.
- XIONG Jia, LEI Yu-yong, YANG Zhi-feng, et al. Visual research of flow field in the nozzle of abrasive water jet based on Fluent[J]. **Lubrication Engineering**, 2008, 23(6): 52—55.
- [10] JUNKARA M, JURISEVICA B, FAJDIGAB M, GRAH M. Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2006, 32(2): 1095—1112.
- [11] 吴晶华, 汤文成, 朱立义. 磨料冲击行为的数值分析方法[J]. 机床与液压, 2008, 36(9): 74—77.
- WU Jing-hua, TANG Wen-cheng, ZHU Li-yi. Numerical analysis of impacting behavior of abrasive particle[J]. **Machine Tool & Hydraulics**, 2008, 36(9): 74—77.
- [12] 庄茁. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [13] WEI X Y, ZHAO Z Y, GU J. Numerical simulations of rock mass damage induced by underground explosion[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 21(5): 1206—1213.
- [14] WANG T J, KISHIMOTO K. Higher order fields for damaged nonlinear antiplane shear notch, crack and inclusion problems[J]. **European Journal of Mechanics A/solids**, 1999, 18(6): 963—986.
- [15] 王志亮, 郑明新. 基于 TCK 损伤本构的岩石爆破效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 230—235.
- WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin. Numerical simulation of effect of rock blasting based on TCK damage constitutive model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 230—235.
- [16] HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W, BISHNOI K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain high-strain rate and high-pressure applications[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2006, 195: 110—132.
- [17] WANG T J. Further investigation of a new continuum damage mechanics criterion for ductile fracture: experimental verification and applications[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1994, 48(2): 217—230.
- [18] 鞠杨, 环小丰, 宋振铎, 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—142.
- JU Yang, HUAN Xiao-feng, SONG Zhen-duo, et al. Numerical analyses of blast wave stress propagation and damage evolution in rock masses[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2007, 27(2): 136—142.
- [19] 卢新郁, 黄传真, 冯衍霞, 等. 磨料水射流在大理石切割中的应用[J]. 山东大学学报, 2007, 37(4): 21—24.
- LU Xin-yu, HUANG Chuan-zhen, FENG Yan-xia, et al. The application of an abrasive water jet in cutting marble[J]. **Journal of Shandong University**, 2007, 37(4): 21—24.
- [20] 向文英, 李晓红, 卢义玉, 等. 磨料射流破碎岩石的性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 170—175.
- XIANG Wen-ying, LI Xiao-hong, LU Yi-yu, et al. The research of the characteristic of rock broken by abrasive water jet[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(2): 170—175.