文章编号：1000-5773(2012)01-0089-06

粒子冲击破岩的数值模拟分析*

任建华[1]，徐依吉[1]，赵　健[1]，赵绪龙[2]，张　萌[1]

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院，山东青岛　266555；
2.胜利石油管理局钻井工艺研究院，山东东营　257017)

摘要：应用ANSYS/LS-DYNA模拟粒子冲击破岩的三维非线性冲击动力学问题，得到了破岩过程中能量的转化关系以及粒子冲击破岩的演化过程，分析了粒子冲击破岩机理。模拟结果较好地反映了粒子冲击破岩的物理过程，模拟结果与实验结果基本一致，证明了模拟方法的可行性。研究结果为水力参数优选等提供一定的理论依据。

关键词：粒子；能量；破岩机理；数值模拟
中图分类号：O347.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

为了提高深井硬地层钻井速度，美国的Curlett等人受到射弹冲击破岩思想的启发，采用钻井泥浆的水力能量作为驱动力，用高速硬质球形钢粒子模拟射弹来破碎坚硬的岩石，提出了粒子冲击钻井(Particle Impact Drilling，PID)技术的新概念。随着计算机技术的进步及计算理论的完善，利用数值模拟技术，基于较少的假设，对复杂事物的运动变化规律进行研究已逐渐成为一种重要的研究手段。为了更好地分析粒子冲击钻井系统的破岩原理，真实地反映物理过程，本研究应用动力瞬态非线性有限元方法模拟粒子冲击破碎岩石问题，为理论研究提供依据。

2　数值模型

粒子冲击破岩的实质就是粒子与岩石相互作用以及由此引发的延时损伤破坏。因此，粒子冲击破岩的数值模型主要包括岩石的动态损伤模型等。岩石的动态损伤模型反映了岩石对压缩、拉伸载荷的响应。

2.1　岩石动态损伤模型

岩石的损伤破坏程度反映了应力波作用过程中不可逆能量耗散的大小，而连续介质力学过程可以等价于热力学过程，因此损伤过程实质上是能量耗散过程或不可逆的热力学过程。基于损伤力学原理，受损材料的损伤能量释放率Y为[1]

$$Y=-(\lambda\varepsilon_{ii}^{e}\varepsilon_{jj}^{e}+2\mu\varepsilon_{ij}^{e}\varepsilon_{ij}^{e})/2 \tag{1}$$

式中：λ、μ为拉梅常数，ε_{ij}^{e}为弹性应变张量分量。

基于波动理论的超声波检测是一种评价岩石属性和损伤程度的综合量测技术，是预测裂纹扩展和演化的有效方法。研究表明，耗散能Y与声波衰减系数α存在显著的相关性，可表述为

$$\alpha=\alpha_0+MY \tag{2}$$

* **收稿日期**：2010-07-23；**修回日期**：2011-04-23
基金项目：山东省自然科学基金(ZR2010EZ004)；中石油十一五科技攻关项目(2008A-2301)
作者简介：任建华(1986－)，男，博士研究生，主要从事油气井流体力学、油气井化学与工程研究.
E-mail：renjianhua126@126.com

式中：α_0、M 为岩石参数。对于砂岩[2]，$\alpha_0=4.860\,04$，$M=1.0\times10^5$。将(1)式代入(2)式，得到

$$\alpha=\alpha_0-\frac{1}{2}M(\lambda\varepsilon_{ii}^{e}\varepsilon_{jj}^{e}+2\mu\varepsilon_{ij}^{e}\varepsilon_{ij}^{e}) \tag{3}$$

假设原岩中存在随机分布的裂纹，冲击载荷作用使微裂纹被激活，产生了累积损伤，导致材料刚度劣化。引入等效体积模量 $\widetilde{K}/K$ 和裂纹密度 C_d，并定义损伤参量 D，即

$$\frac{\widetilde{K}}{K}=1-\frac{16}{9}\left(\frac{1-\tilde{\nu}^2}{1-2\nu}\right)C_d \tag{4}$$

$$D=\frac{16}{9}\left(\frac{1-\tilde{\nu}^2}{1-2\nu}\right)C_d \tag{5}$$

则

$$\widetilde{K}=K(1-D) \tag{6}$$

$$\widetilde{G}=\frac{3\widetilde{K}(1-2\tilde{\nu})}{2(1+\tilde{\nu})} \tag{7}$$

基于逾渗理论[2]

$$\tilde{\nu}=\nu\exp(-16\beta C_d/9) \tag{8}$$

式中：K、ν 分别为未损伤材料的体积模量和泊松比；$\widetilde{K}$、$\widetilde{G}$ 和 $\tilde{\nu}$ 分别为损伤材料的体积模量、剪切模量和泊松比；β 为控制材料卸载和重加载行为的常数，$0\leqslant\beta\leqslant1$。

对于脆性岩石的动态破碎，基于能量平衡原理

$$R=\frac{1}{2}\left(\frac{20^{1/2}K_{ic}}{\rho c\dot{\varepsilon}}\right)^{2/3} \tag{9}$$

式中：R 为裂纹平均长度的一半，K_{ic} 和 c 分别为材料的断裂韧性和纵波波速，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率。细观分析表明[3]，超声波衰减系数 α 与材料中的裂纹密度存在如下关系

$$R=hC_d/\alpha \tag{10}$$

式中：h 为常数。对于砂岩，$h=6.01$。

通过定义损伤参量 D 与裂纹密度 C_d 的关系，将 D 表示成声波衰减系数 α 与 $\dot{\varepsilon}$ 的函数，通过 α 和 $\dot{\varepsilon}$ 来揭示损伤的发展规律。岩石冲击损伤耗散能 Y 与衰减系数 α 的关系揭示了损伤演化的基本规律，而损伤参量 D 可通过(4)式～(9)式与 α 联系起来，将它们写成率形式，便构成了体积拉伸下的损伤演化方程。在体积压缩状态下，材料的屈服强度服从与应变率相关的 Mohr-Coulomb 准则

$$\sigma_s=[\sigma_0(1+C_1\ln\dot{\varepsilon}_p)+C_2p](1-D) \tag{11}$$

式中，σ_0 为静压屈服强度，C_1 为应变率影响参数，C_2 为围压常数，$\dot{\varepsilon}_p$ 为塑性应变率，D 为拉伸损伤参量，p 为压力。体积压缩状态下，损伤演化方程为

$$\dot{D}_c=\lambda'\dot{W}/(1-D) \tag{12}$$

式中：λ' 为损伤敏感系数；$\dot{W}$ 为塑性压缩功率；$\dot{D}_c$ 为压缩损伤标量，表示压缩时各向异性损伤状态。$\dot{D}_c$ 将作为拉伸损伤的初始值，反之亦然。从(12)式可以看出，拉伸时的损伤演化将影响材料压缩时的屈服强度，而压缩时的损伤将影响材料拉伸时的刚度。

冲击损伤引起的材料刚度劣化表现为

$$\sigma_{ij}=3K(1-D)\varepsilon\delta_{ij}+2G(1-D)e_{ij} \tag{13}$$

式中：e_{ij} 为应变偏量张量分量，δ_{ij} 为单位张量分量。

岩石的动态损伤采用体积应力准则和最大主应力准则来联合判断。如果材料单元处于体积拉伸状态，则材料单元产生损伤累积，当所受载荷满足最大主应力准则时，材料就发生脆性断裂；而材料单元处于体积压缩状态时，如果满足最大主应力准则，则令压缩强度 $\sigma_s=0$，否则服从与应变率有关的 Mohr-Coulomb 准则；压缩时的损伤 D_c 为拉伸损伤 D_t 的初始值，反之亦然；在拉伸和压缩两种状态下，只要损伤 D 达到 1，单元即丧失承载能力。

以上便构成了脆性岩石动态损伤模型,描述了岩石对压缩、拉伸载荷的响应。

2.2 计算参数

根据 2.1 节分析,采用非线性动力有限元对粒子冲击破岩过程进行模拟。钢粒的弹性模量为 203 GPa,密度为 7 800 kg/m^3,泊松比为 0.3。岩石采用 HJC 模型,参数见表 1,其中 ρ 为密度,G 为剪切模量,A、B、C、N、K_1、K_2、K_3 为材料常数,S_{un} 为单轴抗压强度,T 为最大抗拉静水压力,p_{crush} 为压垮静水压力,μ_{crush} 为压垮体积应变,p_{lock} 为极限静水压力,μ_{lock} 为极限体积应变,D_1、D_2 为损伤常数,S_F 为无量纲强度。

表 1 岩石 HJC 模型参数

Table 1 HJC model parameters of rock

ρ/(kg/m^3)	G/(GPa)	K_1/(GPa)	K_2/(GPa)	K_3/(GPa)	A	B	C	N
2 600	14.86	85	−171	208	0.79	1.6	0.61	0.007
S_{un}/(GPa)	T/(GPa)	p_{crush}/(GPa)	μ_{crush}/(GPa)	p_{lock}/(GPa)	μ_{lock}/(GPa)	D_1	D_2	S_F
0.166	4.0	0.016	0.001	0.01	0.166	0.05	1.0	4.0

2.3 模拟结果与实验结果的比较

通过室内实验来验证数值模拟的正确性。实验原理为:通过高压泵产生水射流,经高压管线输送给喷嘴,将一定尺寸的钢粒注入到高压水中,水与钢粒混合,在淹没条件下水流经喷嘴对岩石进行冲蚀。钢粒的直径为 0.1 cm,加量为 2%,喷距为 12 mm,入射角为 10°。对实验数据进行处理,得到不同压力下钢粒的平均破碎岩石体积数据,如图 1 所示。可见,模拟数据与实验结果相符,误差不超过 10%,证明了数值模拟的可靠性。

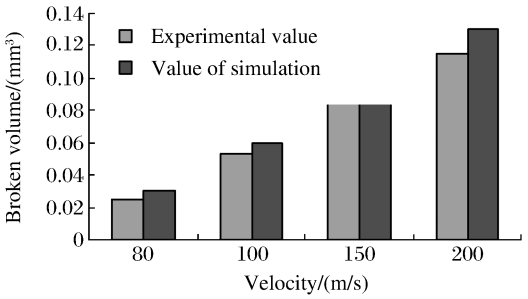


图 1 不同速度下单个钢粒的破碎体积

Fig. 1 Fractured volume of a single steel particle under different velocities

3 数值模拟结果分析

模型中岩石采用 8 节点六面体单元进行划分,粒子采用定单元体积划分,粒子的单元总数约为 4 155,岩石靶物的单元总数约为 345 000,粒子以初速度 150 m/s 冲击岩石。为了便于分析,假设岩石为连续介质,忽略孔隙介质的影响,将硬质粒子看作刚性等径小球。

3.1 能量转化分析

粒子冲击破岩是一个能量不断转化、总能量守恒的瞬态过程。图 2 给出了各种能量的变化曲线,其中 E_{total} 为系统总能量,E_k 为动能,E_i 为内能,E_{damp} 为阻尼能,E_{other} 为其它能量。从图 2 中可以看出:粒子总能量为 0.36 J;内能和动能占主要部分,而阻尼能等其它能量所占比例较小。粒子开始与岩石接触时,岩石发生一定的变形,内能迅速增加,动能减小,4 μs 时动能降到最小值,之后由于粒子发生一定的回弹,少许应变能又转化为动能,内能降低。在整个过程中,粒子的部分动能将转化为岩石的弹塑应变能、碎屑动能以及少量的阻尼能等其它能量。阻尼能等其它能量总和的最大值为 0.028 J,约为总

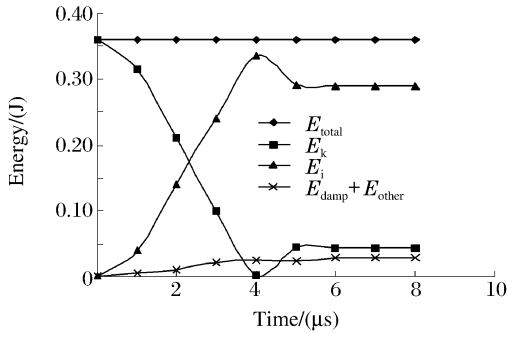


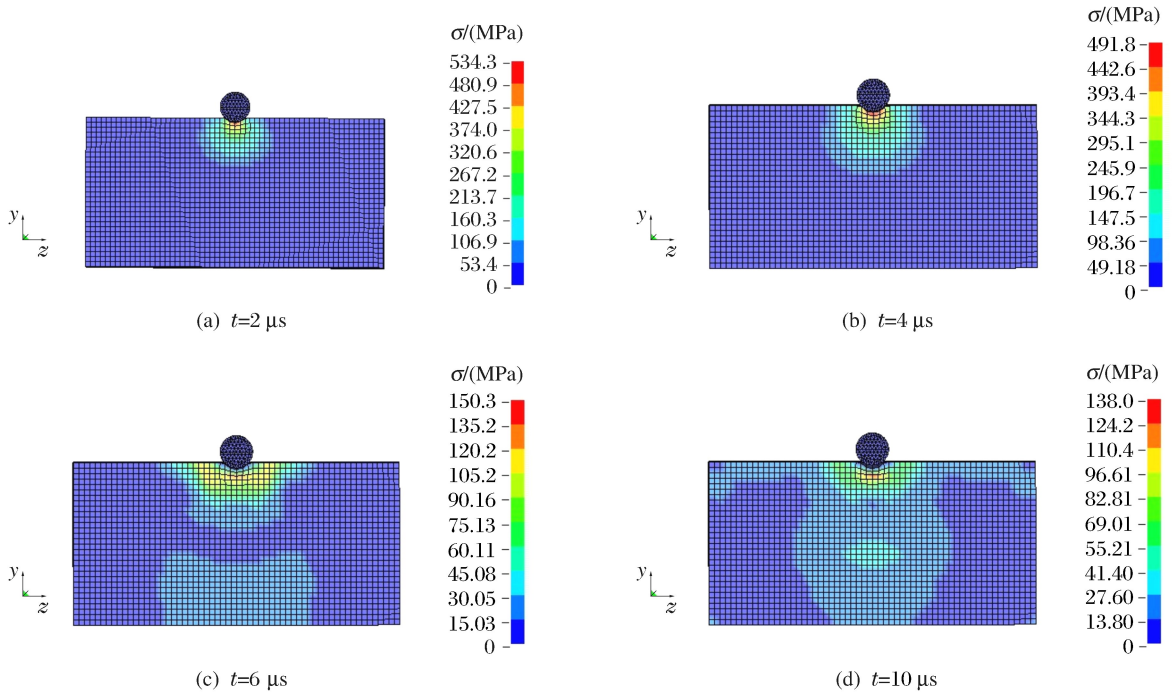
图 2 能量转化关系曲线

Fig. 2 Energy Conversion Relationship

能量的 7.7%，在 10%以内，说明模拟结果是可靠的。

3.2 粒子冲击破岩演化分析

图 3 为粒子冲击作用下岩石的损伤破坏演化结果和伴随这一过程的等效应力(von Mises 应力，σ)变化。从图 3 中可以看出：发生接触冲击时，岩体应力迅速升高，岩体发生变形，纵向上表现为压缩，切向上表现为拉伸；在粒子的进一步冲击作用下，岩石处于压缩和拉伸的受力状态，弹性变形达到一定程度后岩石开始破碎，新的岩面暴露出来以利于粒子进一步破岩；随着粒子冲击作用的延续，岩石应力场逐渐向外传播，在距离粒子与岩石的接触点较远处，应力值达不到岩石屈服破坏的临界值，因而岩石的损伤破坏主要集中在冲击点附近区域。



(a) t=2 μs (b) t=4 μs

(c) t=6 μs (d) t=10 μs

图 3 不同时刻粒子冲击破岩变形及等效应力场分布

Fig. 3 Particle impacting breaking rock deformation and equivalent stress distribution at different time

图 4 为钢粒冲击岩石 7 μs 时岩石的损伤分布，其中岩石损伤值在 0～1 范围内变化，代表岩石受到冲击作用后的不同损伤程度，损伤为 1 代表岩石完全破坏。可以看出，在硬质钢粒接触岩石后的极短时间内，撞击点附近的岩石受到极大的冲击波压力[4]。模拟过程中，粒子与岩石接触区域受到的最大拉应力为 57.19 MPa，最大压应力为 310.7 MPa，最大剪应力为 124.6 MPa。应力值远远大于岩石的极限抗拉强度(12 MPa)、抗压强度(166 MPa)和抗剪强度(19.8 MPa)，即岩石所受的应力远远超过了岩石抵抗破坏的能力(抗剪或抗拉强度)，因而岩石发生破坏[5]。

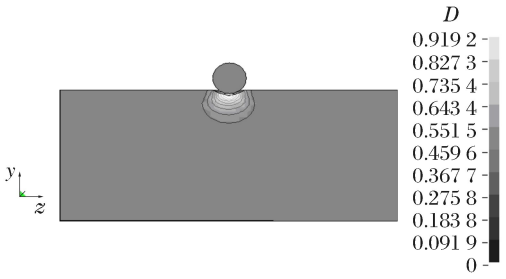


图 4 7 μs 时岩石的损伤分布

Fig. 4 Rock damage distribution at 7 μs

经过后处理软件 Isprepostd 程序，得到了粒子以 150 m/s 的速度冲击岩石时岩石接触面单元所受的等效应力，如图 5 所示。可见，钢粒完成了对岩石的冲击，岩石表面出现了明显的冲击凹坑，等效应力场以粒子接触点为中心呈半球形分布于凹坑周围，岩石发生损伤破坏。

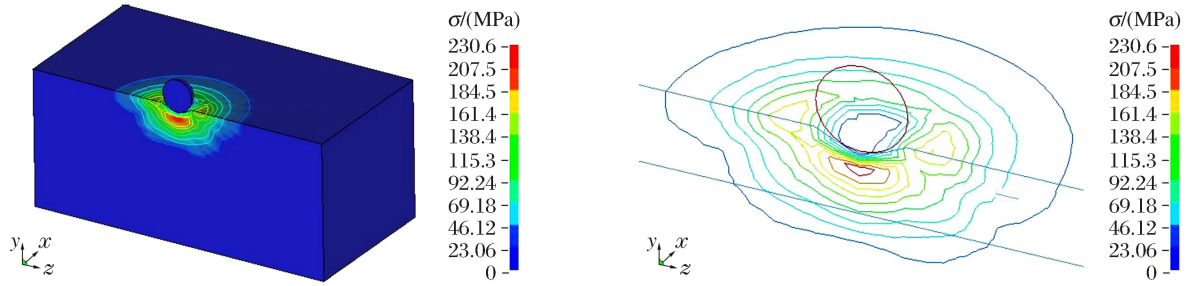


图 5　岩石中等效应力分布

Fig. 5　Equivalent stress distribution in rock

4　破岩机理

4.1　冲击作用对岩石的破坏

已有研究结果认为,岩石材料的破坏形式主要是拉应力作用下的脆性破坏,具体表现为径向裂纹、锥状裂纹和横向裂纹的扩展。从理论上讲,粒子冲击破岩过程如下:首先,球状钢粒子冲击井底,产生力的接触区域非常小,瞬时冲击接触应力非常大;在粒子的尺度和冲击速度合适的情况下,该瞬时应力将超过岩石的抗压强度,更为重要的是在冲击接触区正下方某一深处将产生最大剪应力,冲击接触区边界周围产生拉应力[6-7];由于岩石的抗拉强度仅为抗压强度的 1/80～1/16,抗剪强度仅为抗压强度的 1/15～1/8,因此冲击产生的压应力虽然达不到岩石的抗压强度,但拉应力和剪应力却均超过了岩石的抗拉和抗剪极限强度,在岩石中形成裂隙[8]、压缩"锥"、显性裂纹和隐性微裂纹,同时产生破碎的岩屑,如图 6 所示;裂隙形成和汇交后,裂隙、压缩"锥"和裂纹尖端区域附近将形成明显的应力集中,使裂隙迅速发展和扩大,岩石进一步破碎。

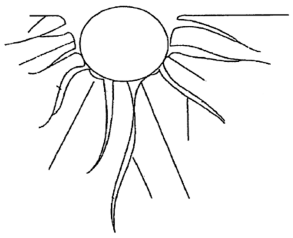


图 6　粒子冲击产生裂纹的示意图

Fig. 6　Schematic of crack formation induced by particle Impact

4.2　压缩波对岩石的破坏

粒子突然撞击岩石时,会在岩石的某个地方产生扰动,使该处的应力突然升高,与周围岩石之间产生压力差;这种压力差将导致周围岩石质点投入运动,处于运动的质点微团前进,又进一步把动量传递给后继的质点微团并使之变形,这种扰动传播现象就是应力波[9]。此后,应力波会以一定速度向撞击方向传播,同时向撞击点四周扩散,使周围岩石受到不同程度的冲击。粒子对岩石的撞击作用包含应力波效应。在粒子与岩石碰撞的过程中,两者均会发生变形(粒子变形较小,可忽略不计),部分动能转变为应变能。岩石的变形,在法向上表现为压缩,切向上表现为膨胀(伸长)。由于粒子在初次撞击后不会立即停止运动,因而在粒子与岩石之间产生压缩波。波在传播至接触界面时,部分透射,而另一部分则发生反射[10],对岩石材料形成拉伸作用。这样岩石就处于拉伸和压缩的共同作用。由于岩石是抗拉强度很低的材料,故先达到拉伸极限产生破坏,即当岩石的切向伸长应变超过极限拉应变时,岩石内就会出现裂纹,并产生脱落形成入口坑,形成了新的接触界面。冲击压缩波在新的接触界面上还会产生新的透射和反射,同样,也会在再次达到岩石的拉伸极限时,产生二次脱落,依此类推,对岩石产生破坏作用。

5　结　论

采用 LS-DYNA 进行粒子冲击破岩模拟是可行的,模拟结果较好地反映了粒子冲击破岩的真实物理过程。模拟结果表明:粒子在高速冲击岩石时具有很强的破岩能力,破岩过程中能量不断发生转化,

整个冲击破岩过程在粒子与岩石接触的较短时间内完成。研究结果可为工程设计人员进行粒子冲击钻井水力参数优选等提供参考依据。由于数值模拟的限制,不能很好地模拟粒子群冲击破碎岩石现象,因而还需进一步的研究和完善。

References:

[1] Xie H P. Damage mechanics of rock and concrete [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990: 29-57. (in Chinese)
谢和平. 岩石混凝土损伤力学 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1990:29-57.

[2] Gao W X, Liu Y T. Numerical simulations on dynamic damage in brittle rocks [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2002, 26(2): 5-10. (in Chinese)
高文学,刘运通. 岩石动态损伤的数值模拟 [J]. 北京工业大学学报,2002,26(2):5-10.

[3] Gao W X, Liu Y T, Yang J. A study of shock damage model of brittle rock [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 153-156. (in Chinese)
高文学,刘运通,杨 军. 脆性岩石冲击损伤模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):153-156.

[4] Bai J Z. LS-DYNA3D theoretical basis and case analysis [M]. Beijing: Science Press, 2005: 4-230. (in Chinese)
白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京:科学出版社,2005:4-230.

[5] Wu K S, Rong M, Kuang Y C, et al. Simulation study of rock breaking for particle impact drilling [J]. Petroleum Machinery, 2008, 36(2): 9-11. (in Chinese)
伍开松,荣 明,况雨春,等. 粒子冲击钻井破岩仿真模拟研究 [J]. 石油机械,2008,36(2):9-11.

[6] Zeng J, Kim T J. A study of brittle erosion mechanism applied to abrasive water jet processes [A]//Proceedings of 10th International Conference on Jet Cutting Technology [C]. Amsterdam, Netherlands, 1990.

[7] Fairhurst R M. Abrasive water jet cutting [D]. Durham, UK: Cranfield Institute of Technology, 1986.

[8] Zhang Y L. Destruction mechanism of rock on abrasive jet action [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2006, 25(6): 836-838. (in Chinese)
张永利. 岩石在磨料射流作用下破坏机理 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2006,25(6):836-838.

[9] Ma X Q. Impact dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. (in Chinese)
马晓青. 冲击动力学 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.

[10] Xu X H, Yu J. Rock breaking theory [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 165-167. (in Chinese)
徐小荷,余 静. 岩石破碎学 [M]. 北京:煤炭工业出版社,1984:165-167.

Numerical Simulation Analysis of Particle Impacting Breaking Rock

REN Jian-Hua[1], XU Yi-Ji[1], ZHAO Jian[1], ZHAO Xu-Long[2], ZHANG Meng[1]

(1. *School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao* 266555, *China*;
2. *Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying* 257017, *China*)

Abstract: The three-dimensional nonlinear dynamics of particle impacting breaking rock is simulated with LS-DYNA3D. The energy conversion curves and the process of rock breaking under steel particle are obtained, and the mechanism of rock breaking is also analyzed. The simulation results agree with the experimental observations basically. Therefore, this simulation is feasible and can be used as a good reference for optimizing hydraulic parameter for oil well drilling.

Key words: particle; energy; mechanism of rock breaking; numerical simulation