

文章编号:1673-5005(2009)05-0068-04

钢粒冲击岩石破岩效果数值分析

徐依吉, 赵红香, 孙伟良, 任建华, 钱红彬

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 为了分析钢粒冲击岩石的破岩效果, 应用动力瞬态非线性有限元方法, 建立球形钢粒冲击岩石的计算模型, 并对其破岩过程和破岩机制进行分析。钢粒冲击岩石的理论最优粒径为 0.1 ~ 0.3 cm、冲击速度为 100 ~ 250 m/s、入射角为 0° ~ 20°。室内钢粒冲击岩石试验结果表明: 加入钢粒后岩石的冲击破碎体积是不加钢粒的 4 倍多; 在常规钻井机械水力联合破岩的基础上, 加入钢粒会大幅度提高硬地层的钻井速度; 试验验证了数值模拟的正确性。

关键词: 有限元方法; 钢粒冲击岩石; 硬地层; 破岩

中图分类号: TE 21

文献标识码: A

Numerical analysis on rock breaking effect of steel particles impact rock

XU Yi-ji, ZHAO Hong-xiang, SUN Wei-liang, REN Jian-hua, QIAN Hong-bin

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: In order to analyze the rock breaking effect of steel particles on rock, a computational model of rock breaking by round steel shot was established with dynamic transient non-linear finite element method. The rock breaking process and mechanism were analyzed. The optimal parameters of particle diameter, penetrating velocity and input angle are 0.1 ~ 0.3 cm, 100 ~ 250 m/s, 0° ~ 20° respectively. Experimental results show that the rock breaking effect with steel particles is four times of that without steel particles. Based on mechanically combined with hydraulic power in conventional drilling, adding the action of steel particles impact rock, the drilling speed will be increased. The validity of simulation is verified by experiment.

Key words: finite element method; steel particles impact rock; hard formation; rock breaking

受射弹冲击破岩思想的启发, 美国的 PDTI 公司将其应用在钻井工程领域, 用高速球形钢粒模拟射弹来破碎坚硬的岩石, 并通过钻井液携带循环^[1], 提高破岩效率, 该公司经过室内与现场试验, 证实粒子冲击钻井大大提高了能量的利用率, 其钻井速度是常规钻井的 3 ~ 4 倍, 在硬夹层钻进一口井可节省 1/3 钻井时间和 100 万元钻井费用。笔者对钢粒冲击岩石过程进行非线性冲击有限元模拟, 分析其破岩机制, 优选破岩参数并通过室内试验验证破岩效果。

1 钢粒冲击岩石工艺流程

在钻井过程中为实现钢粒冲击岩石过程, 需在

钻井液泵出后通过注入系统将钢粒注入到高压钻井液中, 钢粒经过钻具到达专门设计的 PID 钻头, 从喷嘴喷出以较高的频率和速度冲击地层, 破碎岩石, 并通过钻井液携带返到地面, 进行钢粒捕获分离再利用。钻井过程所需钢粒的量相对较小, 仅为钻井液总量的 2% ~ 5%^[2]。

普通磨料射流破岩有如下特点: 磨料粒径较小, 形状不规则, 对管线磨损严重; 与钻井液混合进入钻具后, 由于磨料自身破碎, 增加了钻井液的固相含量, 使得钻井液密度难以控制。因此, 选择密度大、强度高、形状规则的球形钢粒作为磨料冲击岩石^[3], 可以减少磨料(钢粒)的破碎, 增加循环利用的次数。

收稿日期: 2009-06-25

作者简介: 徐依吉(1953-), 男(汉族), 山东临淄人, 教授, 博士, 主要从事油气井流体力学与高压水射流技术研究。

2 基本原理

2.1 钢粒冲击岩石材料属性

在 DYNA 建模过程中忽略钢粒的变形,将其看作具有刚性性质的球体。岩石采用 H-J-C 模型。综合考虑了大应变、高应变率、高压效应,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(包括永久压垮状态)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^[4]。H-J-C 模型的强度以规范化等效应力描述为

$$\sigma^* = [A(1-D) + Bp^*]^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$

式中, $\sigma^* = \sigma/f_c$, 为实际等效应力与单轴抗压强度

之比; $p^* = p/f_c$, 为无量纲压力; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, 为无量纲应变率; D 为损伤因子; A, B, C, N 为材料常数。

损伤因子 $D(0 \leq D \leq 1)$ 由等效塑性应变和塑性体积应变累加得到,即

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p + \mu_p} \quad (2)$$

式中, $\Delta \epsilon_p$ 为等效塑性应变增量; $\Delta \mu_p$ 为等效体积应变增量; $f(p) = \epsilon_p + \mu_p = D_1(p + p_T)^{D_2}$, 为常压下材料断裂时的塑性应变; p_T 为材料所能承受的最大拉伸静水压力; D_1 与 D_2 为损伤常数。

钢粒物性参数:弹性模量为 203 GPa, 密度为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 泊松比为 0.3。岩石的参数见表 1。

表 1 岩石 H-J-C 模型参数

Table1 H-J-C model parameters of rock

密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量 G/GPa	材料常数							单轴抗压强 度 f_c/GPa	损伤常数 D_1, D_2	最大抗拉静水 压力 p_T/GPa
2600	14.86	0.79	1.6	0.61	0.007	85	-171	208	0.166	0.05, 1.0	4.0
压垮静水压力 p_c/GPa		压垮体应变 U_c/GPa		极限静水压力 p_l/GPa		极限体应变 U_l/GPa		损伤系数 $E_{\min}$		无量纲强度 S_F	
0.016		0.001		0.01		0.10		0.01		7.0	

2.2 基本假设和物理模型

鉴于钢粒冲击岩石理论和数值模拟的可行性,假设:模拟过程中忽略钻井液流体的静载荷和动载荷对岩石的损伤破坏;岩石为连续介质体,忽略孔隙介质的影响;钢粒为刚性小球。考虑数值计算所建立的岩石模型无法模拟无限大的情况,因此要谨慎选择岩石的尺寸^[5]。

采用八节点六面体单元对岩石进行划分,粒子采用定单元体积划分,粒子的单元总数约 4 030,岩石靶物的单元总数约 33 132,粒子冲击岩石的有限元模型如图 1 所示。

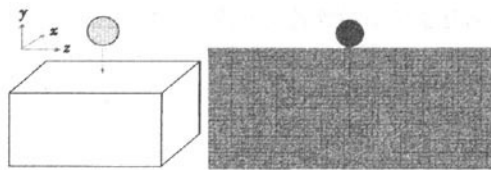


图 1 钢粒冲击岩石有限元模型

Fig.1 Finite element model for steel particles impact rock

2.3 钢粒冲击破岩效果分析

选择钢粒直径为 0.1 cm, 初速度为 150 m/s, 垂直入射冲击岩石, 模拟结果如图 2 所示。

由图 2 可见, 在硬质钢粒接触岩石后极短的时间内, 撞击点附近的岩石就受到极大的冲击波压力, 应力波以撞击点为中心向外传播, 撞击点附近的岩

石在强大的压力作用下呈现塑性流动的特点, 在钢粒的挤压下, 岩石塑性拟流体沿径向流动, 随应力波的传播, 应力波波振面处的岩石受到拉伸应力的作用而产生裂纹^[6]。

在钢粒冲击岩石时, 钢粒作用于岩石非常小的接触面, 产生很大的冲击瞬时接触应力。钢粒在接触岩石 4 μs 时, 岩石受到的拉力为 59.3 MPa, 压力为 457.9 MPa, 最大剪应力为 298 MPa。瞬时接触应力超过了硬岩石的极限抗压、抗拉、抗剪强度。同时在冲击接触区边界周围产生环向拉应力和剪应力, 在岩石中形成裂隙、压缩“锥”、微裂纹, 同时产生破碎的岩屑^[7]。

3 钢粒冲击岩石破岩规律

3.1 钢粒初速度对破岩的影响

图 3 为钢粒直径 0.1 cm、初速度 150 m/s、垂直冲击岩石的位移曲线。钢粒在达到最大冲击深度以后, 其位移有一定程度的减小, 表明钢粒存在一定的反弹现象。因为岩石无法大量吸收钢粒冲击过程中所耗散的能量, 从而导致钢粒回弹离开岩石表面向反方向运动。在钻井过程中, 钢粒的反弹有利于钻井液携带钢粒离开井底上返, 实现钢粒的回收利用。

图 4 为钢粒初速度与破碎体积的关系曲线。可以看出, 钢粒初速度越大, 破碎岩石的体积也越大,

但是考虑钢粒的循环利用,冲击速度不宜太大,否则将会由于冲击太深导致钢粒嵌入岩石中无法离开井底,并磨损钻头。因此,当钢粒直径为0.1 cm时,考

虑到粒子的实际运动情况,初速度选在100~250 m/s 综合效果较好。

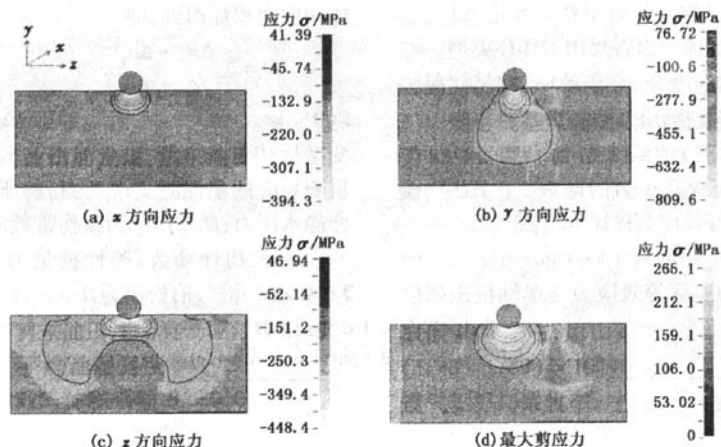


图2 钢粒与岩石接触4 μs 时刻的应力场

Fig. 2 Stress field of steel particles penetrating into rock at 4 μs

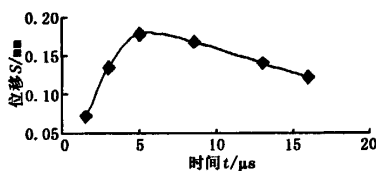


图3 钢粒冲击岩石位移曲线

Fig. 3 Displacement curve of steel particles penetrating into rock

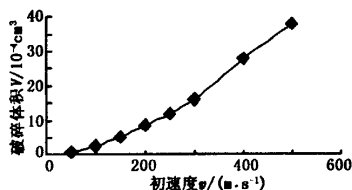


图4 钢粒初速度与破碎体积的关系曲线

Fig. 4 Relation curve of initial velocity of steel particles and breakage volume

3.2 钢粒直径对破岩的影响

钢粒初速度 $v = 150 \text{ m/s}$, 垂直入射冲击岩石, 模拟钢粒直径变化对破岩效果的影响(图5)。由图5可以看出, 随着钢粒直径的增大, 冲击岩石时的破碎体积呈非线性增长趋势。粒径越大, 岩石冲蚀体积越大。但是, 考虑到钻井过程中管线以及阀门的限制, 钢粒直径不宜过大, 否则会造成堵塞憋泵, 同时, 将加剧钻井液携带钢粒的难度。因此, 粒径在0.1~0.3 cm 选择较优。

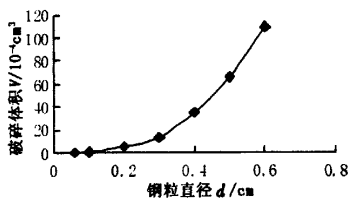


图5 钢粒直径与冲蚀体积关系曲线

Fig. 5 Relation curve of diameter of steel particles and breakage volume

3.3 钢粒入射角度对破岩的影响

钢粒初速度 $v = 150 \text{ m/s}$, 钢粒直径0.1 cm, 模拟钢粒入射角度变化对破岩效果的影响(图6)。从图6可以看出, 当钢粒倾斜入射岩石时, 钢粒会出现切向分速度, 在这个速度下, 钢粒会沿着岩石做切向运动, 即产生了切向位移。随着入射角度的增加, 切向速度增大, 切向位移逐渐增大, 法向侵入岩石的深度逐渐减小。

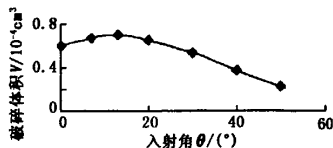


图6 钢粒入射角度与冲蚀体积关系曲线

Fig. 6 Relation curve between input angle of steel particles and breakage volume

入射角度为0°~20°, 破碎体积随着冲击角度的增大变化不是很明显。入射角大于20°时, 随着

角度的增加破碎体积减小。为了减小钢粒上返时对钻头的磨损,并实现较大的破碎体积,钢粒较佳的入射角度为 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

4 试验对比

通过室内破岩试验来验证数值模拟的正确性。试验原理:通过高压泵产生水射流,经高压管线输送给喷嘴,将一定直径的钢粒注入到高压水中,水与钢粒混合,在淹没条件下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° ,试验中改变速度,冲蚀大理石,对比不加钢

粒与加钢粒的破岩效果,试验流程如图 7 所示。冲蚀后岩石表面破岩效果对比见图 8。

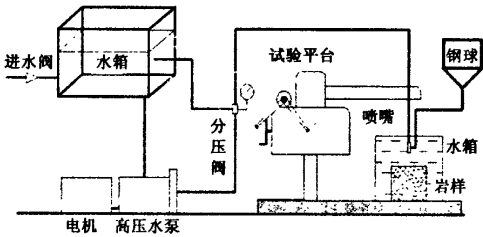


图 7 试验流程

Fig. 7 Experimental flow chart

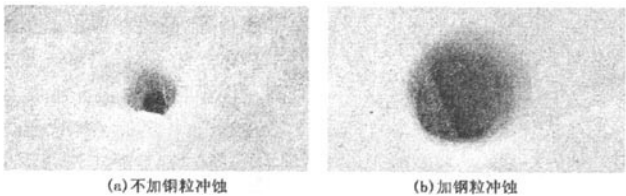


图 8 冲蚀后的岩石对比 (压力 $p = 25\text{ MPa}$)

Fig. 8 Petrographic comparison after impacted ($p = 25\text{ MPa}$)

图 9 为破碎体积随冲蚀速度的变化曲线。可以看出,随压力的增加(即冲蚀速度增加),破岩体积大幅度增加,加钢粒的破岩体积是不加钢粒的 4 倍多。图 10 为单个钢粒破碎体积试验值与模拟值的对比。二者数值相符,误差不超过 11.5% ,证明了数值模拟的正确性。

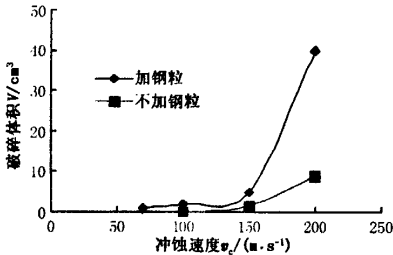


图 9 破碎体积随冲蚀速度的变化曲线

Fig. 9 Variation of fractured volume with jet velocity

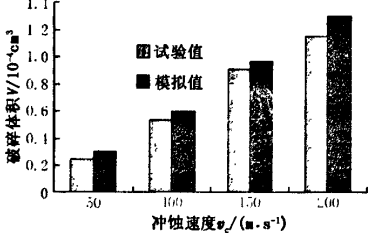


图 10 试验值与模拟值单个钢粒破碎体积对比

Fig. 10 Fractured volume of experimental value and simulation value

5 结 论

- (1) 加入钢粒后,冲击破碎岩石效果显著。
- (2) 钢粒冲击岩石表面时,钢粒会破碎和爆破出小的破碎坑,如果钢粒冲击频率足够高,单独的小破碎坑逐渐积累会形成大的岩石破碎体积。与常规钻井相比,加入钢粒可以显著提高机械钻速,缩短钻井时间,降低成本。

参考文献:

[1] CURLETT Harry B, SHARP David Paul, GREGORY Marvin Allen. Formation cutting method and system; US, 6386300B1 [P]. 2002-05-14.

[2] CURLETT Harry B, SHARP David Paul, GREGORY Marvin Allen. Formation cutting method and system; US, 6581700B2 [P]. 2003-06-24.

[3] TIBBITT Gordon A. Impact excavation system and method with suspension flow control; US, 2008/0017417A1 [P]. 2008-01-24.

[4] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 4-24; 204-230.

[5] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 55-110.

[6] 王明波. 磨料水射流结构特性与破岩机理研究 [D]. 东营: 中国石油大学石油工程学院, 2006: 136-140.

[7] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 165-167.

(编辑 李志芬)