

双粒子联合冲击破岩仿真研究

伍开松¹, 荣明¹, 李德龙², 况雨春¹, 罗进军¹

(1. 西南石油大学, 成都 610500; 2. 新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依, 834000)

摘要: 单粒子冲击破岩与粒子冲击钻井的真实工况有一定的差异, 因此, 需要研究多粒子联合冲击破岩的规律。在双粒子联合冲击破岩条件下, 利用LS-DYNA的参数化设计语言, 采用无量纲化分析方法, 选择粒子间距、直径、初速度和入射角度为设计变量, 建立了它们与岩石破碎体积和侵入深度之间的关系, 并绘制了它们之间的变化关系曲线图。进一步分析这些曲线图的变化规律后发现: 间距为0.25个左右的基准直径、粒子直径取0.8~1个基准直径、冲击初速度取每秒32 000~40 000个基准直径、入射角度为0°~40°, 粒子冲击破碎岩石效果达到最佳或接近最佳。这些结果可以作为深入研究多粒子联合冲击破岩的参考依据。

关键词: 双粒子; 无量纲; 冲击破岩; LS-DYNA; 钻井

中图分类号: O 347.3

文献标识码: A

Simulation study of impacting breaking rock by double particle

WU Kai-song¹, RONG Ming¹, LI De-long², KUANG Yu-chun¹, LUO Jin-jun¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Xinjiang Oilfield Sub-company, Karamay Xinjiang 834000, China)

Abstract: The rock breaking is different between single particle impacting and real particle impacting drilling. Therefore, it is urgent to study the laws of multi-particle impacting the breaking rock jointly. The space between double particle, the diameter, the initial velocity and the incident angle of particles are selected as design variables. The relationships between these variables and the volume of breaking rock and the invasion depth are established and drawn by means of parametric design language of LS-DYNA and dimensionless method under the condition of double particle impacting breaking rock. The analytical results show that the effect of particles impacting breaking rock will reach to or close to optimum when the space between the double particle is about 0.25 times of the datum diameter, the particle diameters are 0.8–1 times of datum diameter, the initial velocity is 32000–40000 times of datum diameter per second, and the incident angle is 0–40 degree. These results can be used as references for further researches of multi-particle impacting breaking rock.

Key words: double particle; dimensionless; impacting breaking rock; LS-DYNA; drilling

1 引言

高效钻越硬地层是一个世界性的难题。目前在破碎坚硬岩石方面, 射弹冲击破岩被认为是最经济最实惠的方法之一^[1], 但如果该方法直接用于油气钻井, 还存在着许多难以克服的技术难题。受射弹冲击破岩方式的启发, 产生了粒子冲击钻井技术^[2]。该技术代表着一种新的高效破碎硬地层方法, 并在室内和现场试验中已经取得成功, 证明其在高效钻进硬地层中具有巨大的潜力。然而, 粒子冲击破碎

硬地层的力学行为研究还不够深入。文献[3]对粒子冲击破岩现象进行了分析, 而且运用冲击动力学有限元分析软件LS-DYNA^[4]研究了单粒子冲击破岩的规律, 得出了适合粒子冲击钻井工艺的一系列参数。但由于文献[3]研究的仅仅是单个粒子冲击破碎岩石, 这与真实的粒子冲击钻井工况还有一定的差异。由粒子冲击钻井的工艺原理^[5]可以知道, 在实际的钻井工况中, 大量的钢粒子会同时从不同方向和角度喷射出来冲击破碎岩石。为了更符合实际工况, 必须研究多粒子的冲击破岩的规律。但由于关

于多粒子冲击破岩工艺的各项参数的资料几乎没有,所以必须首先研究双粒子联合冲击破岩。本文模拟了双粒子在各种参数(粒子直径、粒子间距、冲击初速度和入射角度)变化时的冲击破碎岩石效果,并应用参数化设计语言编制了相应的程序,且通过变化相关参数,得到了它们对破岩效果的影响规律为深入研究多粒子联合冲击破岩奠定了基础。

2 间距的影响

粒子间的间距大小对粒子冲击破岩效果有着很大的影响。为了研究间距变化对破岩效果的影响,本文模拟了在其它参数均不变的前提下,研究了只改变双粒子间距时的冲击破岩效果。

本文中,力学模型的建立基于以下的假设:粒子和岩石为均匀连续介质,整个侵入冲击过程为绝热过程,不计空气阻力,不考虑重力的作用,不考虑岩石的侧边效应,忽略岩石的整体运动,粒子和岩石的初始应力为0。设定周边固定的岩石尺寸为 $0.1 \times 0.1 \times 0.07 \text{ m}^3$ 。在材料模型上,将钢粒子定义为线弹性体,即**MAT_ELASTIC*;将岩石材料处理为**MAT_PLASTIC KINEMATIC*,即塑性应变失效模型。具体数据为:钢粒子的密度 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.3$;岩石的密度 $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 0.48 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.27$,屈服应力 $\sigma_s = 1.17 \times 10^8 \text{ Pa}$,失效应变 $\xi = 0.06$ 。在LS-DYNA建模中,因模型具有对称性,为节省计算时间,故有限元分析几何模型只需要取二分之一即可。为了简化计算工作量,利用文献[3]中的结论,可以假设双粒子冲击破岩的基本参数如下:两个粒子的直径为 0.005 m ,喷射的初速度为 160 m/s ,以垂直方式联合冲击破碎岩石。在此基础上,改变双粒子间的间距,以岩石破碎体积和粒子侵入岩石的垂直深度为评价标准,通过分析间距-岩石破碎体积曲线图和间距-垂直侵入深度曲线图来研究双粒子的间距对破岩效果的影响。

为了具有普遍性,将所有参数作无量纲化处理。以粒子直径 0.005 m 为基准值(称之为基准直径,对应的粒子体积称之为基准体积),将粒子间距 0.00075 m 、 0.001 m 、 0.00125 m 、 0.0015 m 、 0.00175 m 、 0.002 m 、 0.003 m 、 0.004 m 、 0.005 m 、 0.006 m 、 0.01 m 、 0.015 m 和 0.02 m ,分别除以基准直径后作为横坐标,将岩石破碎体积除以基准体积后作为纵坐标,绘制它们的关系曲线,如图1所示。

由图1可以看出:粒子间距为 $0.15 \sim 0.25$ 个基准直径时,随着间距的增加,岩石破碎体积急剧地

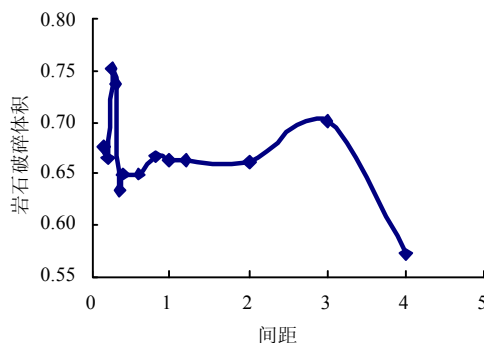


图1 间距-岩石破碎体积曲线图
Fig.1 Graph of space-volume of breaking rock

增大;在间距为 $0.25 \sim 0.35$ 个基准直径时,破碎体积随间距的增加表现为急剧地下降;在间距为 $0.35 \sim 2$ 个基准直径时,岩石破碎体积随间距的变化并不明显,虽然其值有些起伏,但总体变化的幅度都较小;当间距为 $2 \sim 4$ 个基准直径时,随着间距的增大,岩石破碎体积逐渐上升后又转为下降。因为双粒子在同时冲击岩石的过程中会产生两道冲击波,在粒子间距达到一定值时,两道波彼此干扰,产生耦合,此时会产生较强的破碎功,致使岩石破碎体积有一缓慢的上升趋势,但上升的峰值不会超过最大破碎体积。

由上面的分析可得,当粒子间距为 0.25 个基准直径时,岩石的破碎体积最大,即破岩效果最好。这说明在一定的初始条件下必然存在着一个最佳的粒子间距值,双粒子在此间距下同时冲击岩石时,破碎效果最佳。

将粒子间距除以基准直径后所得的无量纲作为横坐标,对应的粒子侵入岩石的垂直深度除以基准直径后所得的无量纲作为纵坐标,绘制它们的关系曲线,如图2所示。

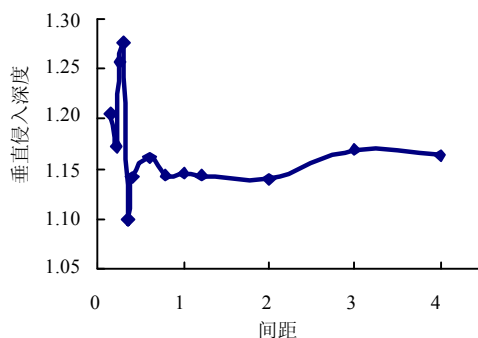


图2 间距-垂直侵入深度曲线图
Fig.2 Graph of space-vertical invasion depth

从图2可以看出:粒子间距为 $0.15 \sim 0.3$ 个基准直径时,垂直侵入深度随间距的增加逐渐增大;在间

距为0.3~0.35个基准直径时,垂直侵入深度随间距的增加表现为一个陡降的变化;在间距为0.35~2个基准直径时,垂直侵入深度随间距的变化并不明显,其起伏幅度都较小;当间距为2~4个基准直径时,垂直侵入深度随间距的增大表现为逐渐变大后又逐渐减小。从图2中可以看出,粒子侵入岩石的垂直深度均在1~1.5个粒子直径内,这种状态对后来粒子的进一步侵彻破岩和粒子的回收是很有利的。根据上述分析,可以得到:双粒子间距为0.3个基准直径时,粒子侵入深度达到最大值。

综合上面的分析结果,可以得出以下基本结论:当双粒子间的间距为0.25个左右的基准粒子直径时,其破岩的效果是最好的。

3 粒子直径的影响

粒子直径的选择与粒子冲击钻井的工艺和破岩效果都有着很密切的关系,所以有必要研究粒子直径对破岩效果的影响。根据文献[3]中的结论,本文选择双粒子的直径分别为0.3 cm、0.4 cm、0.5 cm、0.6 cm和0.7 cm,并将其设为变量,确定冲击初速度为160 m/s,入射方向为垂直,双粒子间的间距为0.3 cm。

将所有参数无量纲化后,绘制它们的关系曲线,如图3所示。

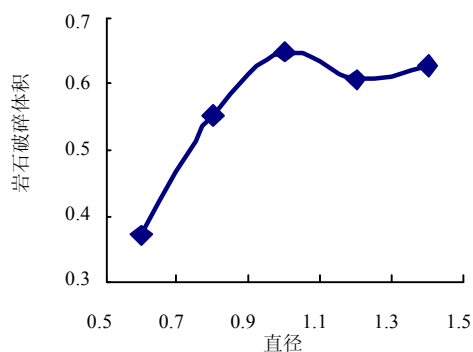


图3 直径-岩石破碎体积曲线图

Fig.3 Graph of diameter-volume of breaking rock

从图3中可以看出:当粒子直径为0.6~1个基准直径时,随着粒子直径的增大,岩石破碎体积基本上是呈线性增长的,且增长幅度较大;当粒子直径为1~1.4个基准直径时,随着粒子直径的改变,岩石破碎体积的变化非常微小,即在此阶段,破岩效果差异并不大。由此建议粒子直径可在0.6~1个基准直径范围内选取。

将所有参数无量纲化后,绘制它们的关系曲线,如图4所示。

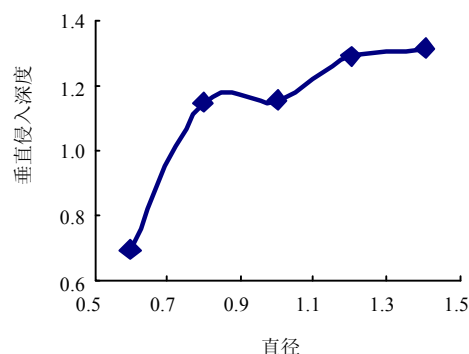


图4 直径-垂直侵入深度曲线图

Fig.4 Graph of diameter-vertical invasion depth

从图4可以看出:垂直侵入深度随粒子直径的增大而增大。具体表现为:当粒子直径为0.6~0.8个基准直径时,随着粒子直径的增大,粒子侵入岩石的垂直深度的变化相对较大;当粒子直径为0.8~1.4个基准直径时,随着粒子直径的增大,垂直侵入深度的变化相对较小。由于粒子侵入岩石的垂直深度须在1~1.5个粒子直径之间,故粒子直径较合适的取值范围为0.8~1.4个基准直径。

综合分析后,可以得到:双粒子联合冲击破岩较合适的粒子直径取值范围为0.8~1个基准直径。

4 冲击初速度的影响

当粒子以一定的初速度冲击岩石时,其速度的大小对岩石的破碎效果有着很大的影响。根据文献[3],可选择双粒子的冲击初速度为120 m/s、140 m/s、160 m/s、180 m/s和200 m/s。假设在双粒子直径为0.5 cm,间距为0.2 cm,垂直入射岩石的初始条件下,以冲击初速度为变量,通过分析冲击初速度-岩石破碎体积曲线图和冲击初速度-垂直侵入深度曲线图来研究其变化对破岩效果的影响规律。

将所有参数无量纲化后,绘制它们的关系曲线,如图5所示。

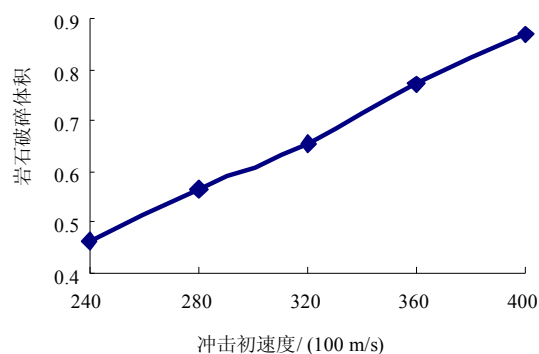


图5 冲击初速度-岩石破碎体积曲线图

Fig.5 Graph of initial velocity-volume of breaking rock

由图5可以看出:粒子的冲击初速度越大,岩石破碎体积越大;且变化的规律几乎是为线性的。由于在粒子冲击破碎岩石的过程中,粒子的动能主要是用来破碎岩石,故粒子的冲击速度越大,其动能越大,破碎的岩石体积也会越大。

将所有参数无量纲化后绘制关系曲线,如图6所示。

从图6中可以看出:粒子的冲击初速度越大,侵入岩石的垂直深度越大。但由于室内试验已经证实粒子侵入深度在1~1.5个粒子直径范围内有利于粒子冲击破岩,所以可以得出:较理想的冲击初速度为每秒32 000~40 000个粒子直径。

综合分析后得到:双粒子直径均为0.5 cm,间距为0.2 cm,以垂直方式冲击破碎岩石,当破岩效果达到最佳时,粒子的冲击初速度应当在每秒32 000~40 000个粒子直径范围内取值。

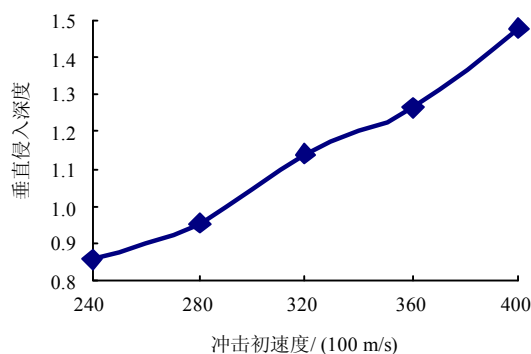


图6 冲击初速度-垂直侵入深度曲线图

Fig.6 Graph of initial velocity-vertical invasion depth

5 入射角度的影响

大量试验和研究中已经证实,弹体的入射角度对侵入深度影响非常明显^[6-7]。由于粒子侵入岩石的过程和弹体侵入有相似性,因此,可以认为粒子的入射角度对岩石的破碎效果也有着很大影响。为了研究其影响的规律,取粒子的入射角度为变量。假设初始条件为:双粒子直径为0.5 cm,初速度为160 m/s,间距为0.5 cm。在此基础上,通过分析入射角度—岩石破碎体积曲线图和入射角度—垂直侵入深度曲线图来研究入射角度对破岩效果的影响规律。

将所有参数无量纲化后,绘制它们的关系曲线图,如图7所示。

从图7可以看出:当入射角度为0°~30°时,随着入射角度的增大,岩石的破碎体积逐渐增大,且增长趋势较缓慢;当入射角度为30°~60°时,随着

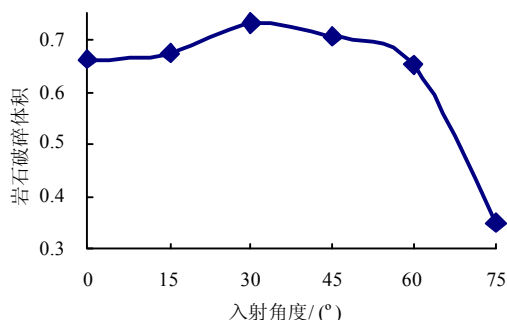


图7 入射角度-岩石破碎体积曲线图

Fig.7 Graph of incident angle-volume of breaking rock

入射角度的增大,岩石破碎体积缓慢地减小。入射角度在0°~60°之间时,岩石破碎体积的差异并不大。当入射角度为60°~75°时,破碎体积随入射角度的增加急剧地下降,说明入射角度在此阶段内时,岩石破碎效果并不理想。由此可以得到:较佳的入射角度为0°~60°。

将所有参数无量纲化后,绘制它们的关系曲线图,如图8所示。

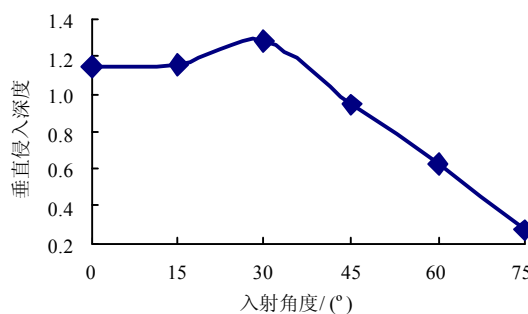


图8 入射角度-垂直侵入深度曲线图

Fig.8 Graph of incident angle-vertical invasion depth

从图8可以看出:当入射角度为0°~30°时,粒子侵入岩石的垂直深度随入射角度的增大缓慢地增大;当入射角度为30°~75°时,垂直侵入深度随入射角度的增大逐渐下降,且下降的趋势基本上呈线性规律的。由图8中可以看出,当入射角度大于40°后,粒子侵入岩石的深度已经小于1个粒子直径,这对破岩效果非常影响。故可以得到:较合适的入射角度为0°~40°。

综合分析后,可以认为:当双粒子以0°~40°的入射角度冲击破碎岩石时,此时的破岩效果是比较好的。

当粒子以一定的入射角度冲击岩石时,粒子会出现水平分速度。在此速度下,粒子将沿水平方向冲击破碎岩石。且入射角度越大,水平分速度越大,垂直分速度将减小,相应地,垂直侵入深度减小。

因为双粒子侵入岩石时产生的冲击波会在双粒子间距达到一定值时产生耦合，使得破碎功增强，所以岩石破碎体积和垂直侵入深度在入射角为 30° 时达到最佳耦合效果。之后，粒子的水平分速度逐渐增大，使得粒子的垂直侵入深度迅速减小，但由于水平方向的冲击也能破碎岩石，故岩石破碎体积变化相对缓和。

6 结 论

采用无量纲分析方法和LS-DYNA软件，研究粒子间距的变化、直径的变化、冲击初速度的变化和入射角度的变化与岩石的破碎体积和垂直侵入深度之间的关系，研究结果表明：

(1) 当双粒子的间距取0.25个左右的基准粒子直径时，其破岩效果最好；

(2) 当双粒子联合破岩时，粒子直径应在0.8~1个基准直径范围内选取；

(3) 双粒子的冲击初速度越大，岩石破碎体积和垂直侵入深度越大。但由于室内试验已经证实粒子侵入深度在1~1.5个粒子直径范围内，有利于粒子冲击破岩，所以粒子的冲击初速度较理想的取值范围应为每秒32 000~40 000个粒子基准直径；

(4) 入射角度在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 之间时，岩石破碎体积的差异并不大，且破岩效果较好。但当入射角度大于 40° 后，粒子侵入岩石的深度已经小于1个粒子

直径，所以破岩效果会降低，故建议设计粒子冲击钻井钻头时，应当保证双（或多）粒子的入射角度在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 之间选取。

参 考 文 献

- [1] ZHANG M H. Resistance of high strength concrete to projectile impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31 (7) : 825—841.
- [2] CURLETT H B, DAVID P S, MARVIN A G. Formation cutting method and system: United States, 6581700[P]. 2002—10—06.
- [3] 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—11，16.
- [4] 尚晓江，苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.
- [5] 伍开松，古剑飞，况雨春，等. 粒子冲击钻井技术述评[J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2008，4，30（2）：142—146.
- [6] BROWN S J. Energy release protection for pressurized systems, Part II: Review of studies into impact/terminal ballistics[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1986, 39 (2): 125—131.
- [7] 尹放林，王明阳，钱七虎，等. 弹丸斜入射对侵彻深度的影响[J]. 爆炸与冲击，1998，1，18（1）：69—76.
- [2] 刘恭忍，王克成，刘云贺. 高边坡开挖爆破动力稳定分析方法研究[J]. 西安理工大学学报，1997，13(4): 308—313.
- [3] 胡益华，李宁，韩信，等. 岩石边坡爆破动力荷载计算方法初探[J]. 水利与建筑工程学报，2003，3(1): 49—52.
- [4] 李夕兵. 爆炸应力波遇夹层后的能量传递效果[J]. 有色金属，1993，45(4): 1—6.
- [5] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响[J]. 爆炸与冲击，1993，13(4): 334—342.
- [6] 刘一伟，张继春，郭学彬，等. 软弱夹层强度参数的室内模拟[J]. 西南科技大学学报，2007，22(1): 30—34.
- [7] ORIARD L L. Influence of blasting on slope stability[C]// 3rd International Conference on Stability in Surface Mining. Vancouver: [s. n.], 1981.
- [8] 吴青山，张继春，曹孝君，等. 顺层路堑边坡岩体爆破的层裂效应实验研究[J]. 中国铁道科学，2004，25(3): 50—54.
- [9] 张西前. 节理岩体边坡爆破动力稳定性分析研究[D]. 重庆：西安理工大学，2006.
- [10] HALLQUIST J O. LSDYNA key user's manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [11] 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.
- [12] 钟冬望. 预裂爆破数值模拟及其应用研究[J]. 爆破，2001，18(3): 8—11.

上接第 18 页