

◀钻井与完井▶

高压射流冲击破碎岩石的有限元计算

张文华¹ 汪志明¹ 张永忠²

(1. 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,北京昌平 102249;2. 大港油田集团公司钻采工艺研究院,天津大港 300280)

摘要: 高压射流冲击破岩是一个复杂的非线性问题。通过 MSC. Marc 建立模型, 分别使用动态接触作为非线性冲击载荷模拟高压水射流冲击岩石。通过动力计算分析, 根据岩石内部应力的变化使用 Hoffman 失效准则研究了岩石的破碎过程。分析表明, 增加射流冲击速度可以提高射流破碎岩石的效率, 当射流速度达到某一临界值时, 射流水锤作用使得岩石发生大块破碎。

关键词: 射流; 岩石破碎; 有限元法; 数学模型; 实验室试验

中图分类号: TE248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0010-03

在国内外多年的钻井实践中, 喷射钻井技术表现出巨大优势, 但是由于技术、理论等各个方面的限制, 喷射钻井的井底压降最高约 20MPa, 因而喷射钻井主要起到了辅助机械破岩的作用^[1-4]。高压水射流破碎岩石的机理十分复杂, 原因在于岩石的动态本构关系、水射流冲击动载以及流体与岩石的耦合作用等诸多复杂关系迭加, 给有关试验研究和理论探讨带来较大困难, 同时也导致高压水射流破岩的理论研究滞后于实际应用研究。因此有必要对高压水射流的破岩理论进行深入的研究, 以进一步推动高压水射流钻井技术的现场应用。笔者通过 MSC. Marc 建立模型, 分别使用动态接触作为非线性冲击载荷模拟高压水射流冲击岩石, 并根据岩石内部应力的变化应用 Hoffman 准则研究了岩石的破碎过程。

1 有限元模型的建立

通过对射流、岩石结构属性的模拟, 采用动力接触分析岩石内部应力的变化, 把射流和岩石看作互相接触的两个物体, 给射流赋予一定的速度, 让射流冲击岩石, 因而不需对接触面上的受力状态进行假设, 使建立的模型更加接近射流冲击岩石的真实过程。为了更好地描述岩石在射流冲击下的动态响应, 不增加任何人为载荷, 所以射流的连续性无法长时间保证, 可以看作一束水。

为了使计算不过于复杂, 笔者假设岩石体积不随时间变化, 而以应力值来观察岩石的破碎。这在射流冲击很短的时间内, 影响不大。使用半无限大单元模拟岩石的边界, 将岩石假设为一个半无限大模型, 边界处各项参数都为零。不用专门施加其他边界条件。

1.1 几何模型

为了充分分析, 笔者建立了几个不同的几何模型, 如图 1 所示。

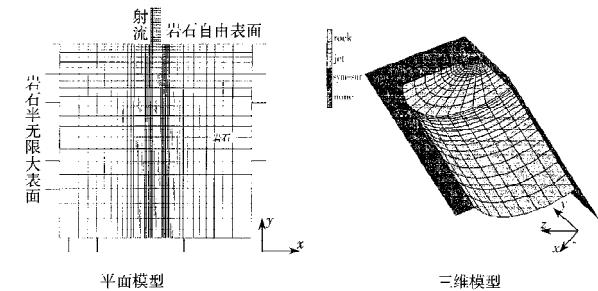


图 1 高压水射流冲击岩石模型

1.2 材料属性

将射流视为完全塑性, 屈服应力设置为 0。模拟被冲击岩石是砂岩, 其力学参数见表 1。

表 1 砂岩和射流相关的力学参数

名称	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/ kg · L ⁻¹	内摩擦角/ (°)	内聚力/ MPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
砂岩	3.308×10^4	0.188	0.231	45	26.0	73.5	9.2
钻井液	2.000×10^3	0.500	0.105				

注: 为了在计算中便于进行力学分析, 钻井液泊松比取 0.45。

1.3 岩石破碎准则

通常人们判断岩石是否被破坏, 或采用抗拉强度

收稿日期: 2005-07-15; 改回日期: 2005-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 50274053) 资助

作者简介: 张文华 (1969—), 男, 2001 年 7 月毕业于石油大学石油工程系, 在读博士, 高级工程师。

联系电话: (010) 89734958

理论, 或采用莫尔-库仑理论作为准则。事实上, 对于岩石被破坏这一事件本身而言, 不管拉应力作用产生破坏, 还是剪应力作用产生破坏, 其作用结果是等效的; 且在冲击破岩条件下, 拉应力、剪应力在破岩过程中都起到积极作用。因此笔者采用 Hoffman 准则^①。这是一种联合强度准则, 数值分析中引入无量纲破坏系数 (F_d) 来表示岩石破坏程度, 则 Hoffman 准则可写为:

$$F_d = C_1 (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2 (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3 (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4 \sigma_1 + C_5 \sigma_2 + C_6 \sigma_3 + C_7 \sigma_{23}^2 + C_8 \sigma_{13}^2 + C_9 \sigma_{12}^2 \quad (1)$$

式中, $C_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Z_t Z_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} - \frac{1}{X_t X_c} \right)$; $C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} - \frac{1}{Y_t Y_c} \right)$; $C_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Y_t Y_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} - \frac{1}{X_t X_c} \right)$; $C_4 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}$; $C_5 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}$; $C_6 = \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c}$; $C_7 = \frac{1}{S_{23}^2}$; $C_8 = \frac{1}{S_{13}^2}$; $C_9 = \frac{1}{S_{12}^2}$; X_t, Y_t, Z_t 分别是岩石在 X, Y, Z 方向上的抗拉强度; X_c, Y_c, Z_c 分别是岩石在 X, Y, Z 方向上的抗压强度; $S_{12}^2, S_{23}^2, S_{13}^2$ 分别是在 12 面、23 面、13 面内的剪切强度。

对平面情况, Hoffman 准则可写为:

$$F_d = \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{13}^2}{S_{13}^2} + \frac{\sigma_{23}^2}{S_{23}^2} \quad (2)$$

与其他几种强度准则相比, Hoffman 准则主要优点有:

- 1) 既包含了岩石的正应力也包含了岩石的剪切应力, 还可以用于在同一方向抗拉强度和抗压强度不相等的情况。
- 2) 考虑了岩石三个方向上的抗拉、抗压以及剪切强度。对岩石的各个方向的强度都有所考虑。
- 3) 可以模拟岩石的各种破碎情况。

首先, 通过 Mark 程序求得模型中每个积分点的应力值; 根据上述方程求得该积分点的破坏系数值。然后, 设定 $F_d \geq 1$, 表征岩石发生破坏, 据此对指定范围内的破坏系数进行外插处理, 形成岩石破坏区域的等值线, 由此圈定岩石破坏区域。

2 计算结果及分析

2.1 35 MPa 压力下射流破碎岩石

根据流体力学方程可以估算出 35 MPa 压力下射流速度约 200 m/s, 笔者根据上述方法对高压水射流破岩过程进行了模拟。

图 2 为射流冲击岩石时, 岩石所受载荷随增量步的变化曲线。由于岩石边界单元使用的是半无限大单元, 其左右和下边界相当于在无限远处, 上边界是自由平面, 所以边界处的力学参数都为 0。岩石只受射流冲击的作用, 岩石所受载荷也就是射流的冲击动载。由图 2 可以看出, 在 1 到 9 步射流并没有冲击到岩石, 所以岩石的受力为 0。在第 10 步射流冲击到岩石, 岩石受力急剧上升, 达到最大值, 随后岩石所受载荷迅速下降, 然后回升, 经过几个轻微的波动之后趋于平稳。

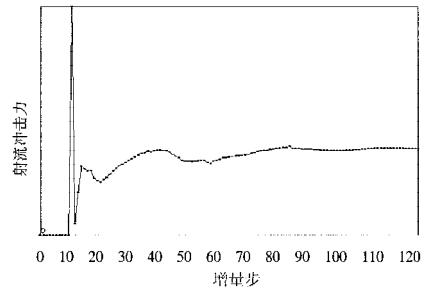


图 2 受射流冲击时岩石所受载荷的变化

射流对岩石的初始冲击没有返回流的影响, 而且岩石完全处于静止状态, 所以射流冲击力最大。后续射流由于返回流和岩石碎屑形成了一个载荷的缓冲区域, 射流冲击力下降。又由于开始时岩石变形梯度最大, 所以随后射流冲击力降到了一个极点。射流冲击力的波动在一定程度上受到岩石动态响应的影响。

图 3 为岩石在不同增量步时的破碎情况。由图 3 可以看出, 在第 10 步时, 在射流正下方, 岩石开始形成了一些裂隙源, 并逐渐扩展形成破碎。从中反映出水射流破碎岩石具有明显的局部效应, 这是因为应力波在岩石中传播产生的瞬态应力场虽可分解为径向压应力和环向拉应力, 且岩石的抗拉强度较抗压强度小得多, 但由于应力波在岩石中的传播随距离的增加衰减极为迅速, 在距离射流冲击点较远处, 岩石中的能量密度已经达不到导致岩石破坏的临界值。

2.2 100 MPa 压力下射流破碎岩石

根据流体力学方程可以估算出 100 MPa 压力下射流速度约 400 m/s, 根据上述方法对高压水射流破岩过程进行了模拟。

由于此时流体能量很大, 形成了水锤效应, 水锤作用使岩石大块破碎形成漏斗坑^[5], 中国石油大学(北京) 高压水射流实验室通过试验也验证了这一理

① 陈火红. 非线性有限元分析培训教程. MSC. Software 中国公司, 2001.

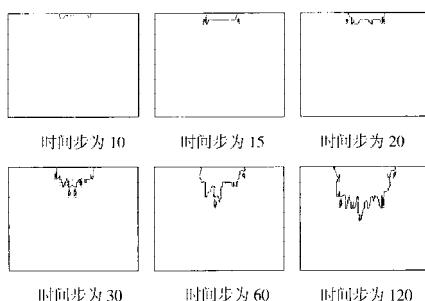


图 3 35 MPa 压力下射流冲击岩石破碎区形成过程

论^[6]。数值模拟的结果和这一理论吻合的也比较好(如图 4 所示)。图 4 为不同模型中射流初始冲击时,在岩石上形成的破碎坑。继续对一点进行冲击可以观察到岩石的破碎过程变成了一个连续过程,也就是说高压射流的水锤效应只出现在冲击的开始瞬间,这主要是因为液体的返回流分担了射流的很大一部分能量。数值模拟的结果也正确地显示了这一个过程。

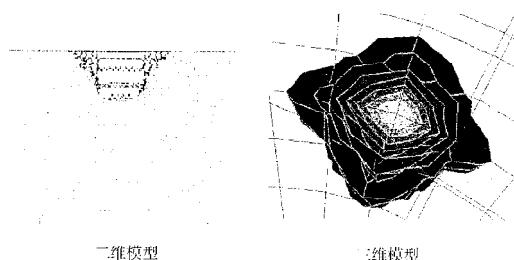


图 4 数值模拟 100 MPa 压力下射流冲击岩石初始破碎区域

图 5 为二维模型中开始冲击之后 5 步、10 步和 20 步时的岩石破碎情况,与图 3 对比后可发现 100 MPa 压力下岩石破碎区域明显增大。

3 结 论

1) 利用动态接触、结构分析可以较好地模拟出岩石在射流冲击下的破碎过程,研究结果直观、明了,这

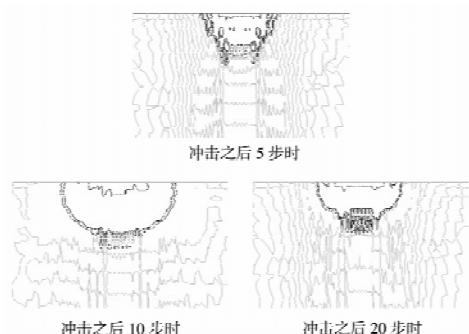


图 5 100 MPa 压力下射流冲击岩石破碎区形成过程
对于深入探讨射流冲击破岩机理具有理论意义。

2) 高压水射流冲击破岩时,尤其在开始阶段,冲击载荷波动较大,射流破岩表现出明显的局部效应。

3) 使用 Hoffman 准则研究岩石破碎,对岩石各个方向的强度都有所考虑,可以模拟岩石的各种破碎情况。分析表明增加射流冲击速度可以提高射流破碎岩石的效率。

参 考 文 献

- [1] 王瑞和, 倪红坚, 周卫东. 破岩钻井方法及高压水射流破岩机理研究 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (5): 7-10.
- [2] 李根生, 沈忠厚. 充分利用水力能量 提高深井钻井速度 [J]. 石油钻探技术, 2002, 30 (6): 1-3.
- [3] 李根生, 沈忠厚, 徐依吉, 等. 超高压射流辅助钻井技术研究进展 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33 (5): 20-23.
- [4] 王太平, 程广存. 国内外超高压喷射钻井技术研究探讨 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (2): 6-8.
- [5] 徐小荷, 于静. 岩石破碎学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 张文华, 汪志明. 高压水射流破岩的动态数值模拟 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (增刊 2): 91-94.

[审稿 李根生]

FEM Calculation on Rock Breaking Process by High Pressure Jet Impact

Zhang Wenhua¹ Wang Zhiming¹ Zhang Yongzhong²

(1. College of Petroleum and Gas Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China;
2. Drilling & Production Research Institute, Dagang Oilfield, Dagang, Tianjin, 300280, China)

Abstract: High pressure water jet rock breaking process is a complex non-linear one. A model is developed by using dynamic contact qua non-linear impacting load to simulate high pressure water jet to impact rock in MSC. Marc. Based on the change of the stress in inner rock and dynamic transient analyses, the rock breaking process is studied by means of Hoffman failure criteria, and the comparisons between the partial results of simulation and the results of experimentation are made. Analytical results show that increasing jet impacting velocity can enhance the rock breaking efficiency of water shoot, that is, when jet velocity reaches the critical value, water hammer actions make rocks be cracked in chunks.

Key words: fluidics; rock breaking; finite element method; mathematical model; lab test