

基于 LS-DYNA 的冲旋钻头牙齿破岩 机理仿真研究^{*}

黄志强¹ 谭力¹ 金鑫² 李琴¹ 魏振强¹

(1.西南石油大学 2.北京安东奥尔工程技术有限责任公司)

黄志强等.基于 LS-DYNA 的冲旋钻头牙齿破岩机理仿真研究.天然气工业,2007,27(4):76-78.

摘 要 介绍了显式动力学有限元软件 LS-DYNA 的功能特点,阐述了冲旋钻井中钻头牙齿与岩石相互作用数值研究的模型建立、网格划分、材料定义、接触定义及边界条件等相关问题。利用 LS-DYNA 对 3 种不同齿形牙齿在冲击载荷下破碎岩石进行了计算机仿真,描述了牙齿破岩过程,并求出了相应的应力、位移时程关系曲线,得到了 3 种不同齿形牙齿的破岩机理。经过分析发现,在弹头齿和锥形齿冲击下裂纹首先出现在岩石内部,齿和岩石接触面下端最早出现裂隙,而在球形齿冲击下裂纹首先出现在齿和岩石接触面边缘;3 种牙齿齿尖应力波峰值由大到小依次为:弹头齿、锥形齿、球形齿;布齿时锥形齿宜分布在钻头头部端面中心、球形齿分布在边缘,弹头齿或者锥形齿可分布在中心与边缘之间,这样有利于提高钻井破岩效率。

主题词 钻井 钻头 LS-DYNA 计算机仿真 冲旋钻井 破岩机理

冲击旋转钻井的破岩过程是在钻头上施加静载荷(轴向压力)和扭矩的同时,利用冲击器产生的脉动冲击载荷对岩石实施破碎作用,从而提高破岩效率^[1]。冲旋钻井技术可以实现对硬地层的有效钻进,一直受到油气田钻井界的关注。由于缺乏较好的适用于冲旋钻井的钻具和钻井工艺,使得该技术一直难于推广应用,其主要原因之一在于冲旋钻井破岩机理的基础理论和试验研究滞后。计算机仿真可以随时连续动态的、重复的显示事物的发展。因此,在某种意义上计算机仿真比理论和试验研究对问题的认识更为深刻、更为全面。

一、LS-DYNA 的功能特点^[2]

LS-DYNA 最早由美国 J.O.Hallquist 博士于 1976 年主持开发,经过多年的发展,已成为全世界最著名的通用显式动力学分析软件,它对冲击碰撞、流固耦合等非线性问题的解能力尤为突出,在工程应用领域被认可为最佳分析软件包。LS-DYNA 拥有其他软件难以比拟的材料研究优势(150 多种)和单元资料库,而且 LS-DYNA 的多种碰撞接触模式能提供高度的准确性,可以模拟分析现实生活中的各

种复杂碰撞问题。LS-DYNA 的用户遍布世界发达国家的研究机构、大学和企业研发部门,广泛应用于航空航天、汽车、国防、制造、石油、电子等领域,有力地促进了各行业的技术发展。近年来,国内在爆破、冲击碰撞、侵彻贯穿、冲压成形等领域上推广应用 LS-DYNA,已取得不少研究成果。

二、冲旋钻井中牙齿与岩石 相互作用仿真研究

1.有限元模型

(1)三维实体模型的建立及材料定义

采用 FEMB 作为前处理软件建立几何模型,牙齿采用江汉钻头厂生产的型号为 Q0710(球齿)、D0710(弹头齿)、Z0710(锥齿)3 种牙齿的几何尺寸。单位为 g,cm,μs。

近年来,国内外学者相继提出了多个动载下岩石破坏的动力学模型,并在侵彻深度和体积上进行了深入研究。理论模型从以弹塑性和流体弹塑性理论为基础的弹性阶段过渡到了应用断裂力学和损伤力学的断裂、损伤阶段^[3]。LS-DYNA 引入了多种岩土的本构模型,能应用各种强度准则。由于材

^{*} 本文受到中国石油天然气集团公司科技攻关项目“物探气动冲击钻具失效分析与结构改进设计”(编号:部 415)资助。

作者简介:黄志强,1968 生,副教授,博士,从事石油天然气钻采装备和工艺的研究工作,主要研究方向为冲旋钻井装备及其工艺和设备工程等。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学设备处。电话:(028)83032148。E-mail:shandaiwei@tom.com

料数据来源有限,本文中牙齿材料采用 YG8 硬质合金,处理为线弹性/理想弹塑性材料,石灰岩处理为塑性应变失效模型。

(2)定义单元的属性及网格划分

牙齿和岩石均采用 8 节点 3DSOLID164 单元,用缺省的常应力单元公式。尽管应用单点(缩减)高斯积分的单元可以较好地用于大变形、材料失效和接触等高度非线性问题,但由于存在单点积分所引起的砂漏问题(零能模式)。因此,这里通过总体附加刚度来控制,使总体砂漏不超过模型总内能的 10%^[4]。采用映射网络划分,四面体单元。

(3)定义接触及边界条件

在牙齿和岩石间定义接触模型为点对面的侵蚀接触,以仿真牙齿侵入岩石过程,同时定义了牙齿与岩石之间的静态和动态摩擦系数。设定岩石为半无限无反射边界,以模拟无限域^[5]。钻头获得的动能为 450 J,质量为 9 kg,假设钻头随机接触井底牙齿数为 9 颗,动能和质量取不均匀系数分配到每颗牙齿上。钻头牙齿获得的初始速度约为 10 m/s。采用了 CONSTRAINED_TIED_NODES_FAILURE 关键字,其可以在两个重合的节点间定义约束和失效塑性应变。在两物体碰撞过程中,当达到定义的塑性应变时,节点连接的单元就相互脱离,从而模拟破碎现象。求解时间控制为 200 μs ,即 0.2 ms。仅输出用于 LS-DYNA 求解的关键字 K 文件。

2.仿真计算结果及分析

结合分析目的,从结果中整理出了如下一些关系曲线。破岩过程中,3 种齿形牙齿在坐标系内的位移—时间曲线对比如下(图 1、2、3),A、B、C、D 分别代表牙齿在 X、Y、Z 方向位移和整体位移,所取单元为牙齿齿冠的最高点。其中 Y 方向为垂直方向。

(1)吃深对比分析

由分析可知,图 1 曲线 D 和曲线 B 实际应是几乎重合的,该图分离两条曲线是为了更好观察两条曲线的差异。后面锥形齿和弹头齿均无此设定。

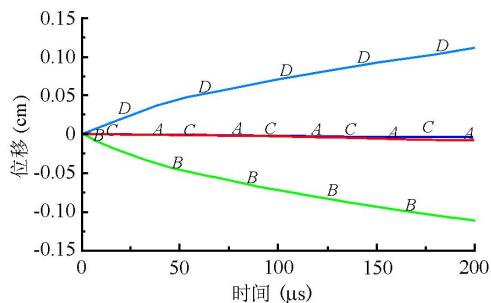


图 1 Q0710 位移时间曲线图

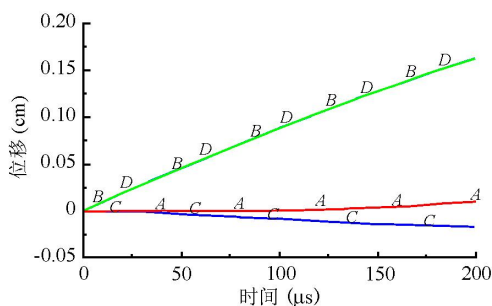


图 2 Z0710 位移时间曲线图

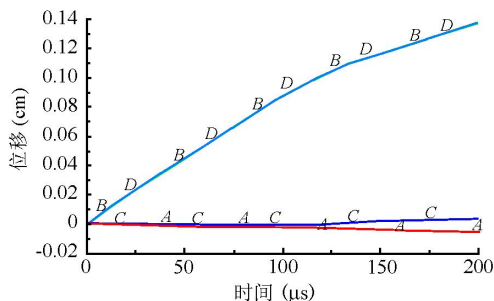


图 3 D0710 位移时间曲线图

①根据牙齿空间位移情况分析,牙齿吃深和破碎体积大小关系为:球齿<弹头齿<锥齿。②牙齿在 X 和 Z 方向的位移大小关系为:球齿<弹头齿<锥齿,在出现时间上以锥齿最早。钻头牙齿的横向位移会使牙齿运动出现偏斜,牙齿易松动,使断齿和掉齿的可能性增加,在整体上造成钻头碰撞井壁、钻柱振动、井眼轨迹难于控制(偏斜)等问题^[6]。③3 种齿形牙齿破岩效率大小为:球齿<弹头齿<锥齿。

(2)破岩过程分析

图 4~图 6 是 3 种齿形的破岩过程截图。



图 4 弹头齿破岩过程图



图 5 锥形齿破岩过程图



图 6 球形齿破岩过程图

对上面的破岩过程分析,可以得到以下几点。

①弹头齿和锥形齿的破岩过程为:作用力急速增加,岩石表面小区域应力高度集中→作用力进一步增强,在岩石内部,齿与岩石接触面下端出现裂隙,同时表面出现放射性裂纹→裂隙发展与表面裂纹贯通,延伸到自由面,岩石出现突然破裂,并形成坑,作用力增加变慢→依靠牙齿侧面挤凿破碎侧壁岩石,出现更大破碎坑,齿尖继续凿入,速度减小,逐渐停止。②球形齿的破岩特征为:接触面被压入,弹性变形→随着作用力增大,拉伸接触面边缘出现裂纹,同时接触面下端岩石内部出现微小裂隙→裂纹向岩石内部发展并与已形成的岩石内部裂隙贯通,岩石出现突然破裂,并形成坑→齿面继续凿入,依靠牙齿侧面挤凿破碎,但速度减小。③从岩石裂隙出现的部位来看:弹头齿和锥形齿在岩石内部,齿与岩石接触面下端最早出现明显裂隙,同时表面出现放射性裂纹;球形齿最早在拉伸接触面边缘出现明显裂纹,同时接触面下端岩石内部出现微小裂隙。

(3) 牙齿受力分析

图7、8、9分别为Q0710、Z0710、D0710齿尖单元的有效应力时程图,反映了3种齿形牙齿齿尖的受力情况。考察齿尖应力状态的意义在于确定端面中心布置何种齿形最适宜,而边齿布置更多的需要

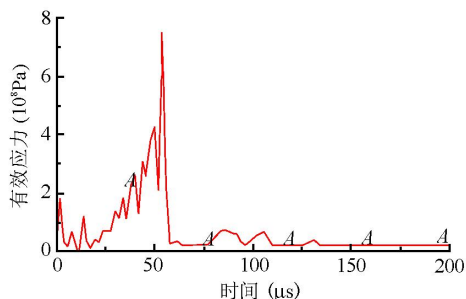


图7 Q0710 齿尖单元有效应力时程图

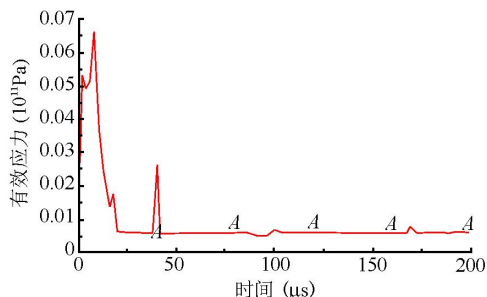


图8 Z0710 齿尖单元有效应力时程图

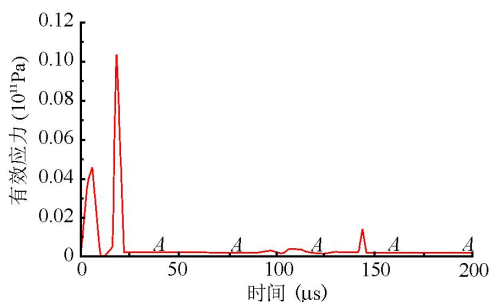


图9 D0710 齿尖单元有效应力时程图

考虑牙齿的强度和耐磨性。①由上面3个图可以看到,3种齿形牙齿齿尖单元的应力波波峰的幅值和出现时间均不相同,但波形基本相同。按幅值大小排列依次为:弹头齿>锥形齿>球形齿,且弹头齿的幅值要大的多。②布齿方案则以球形齿、锥形齿结合较适宜,利用球形齿冲击时岩石中应力分布广的特点和锥形齿较强的破碎能力,可以得到综合破碎效率高的布齿方案。锥形齿宜布置在钻头头部端面中心,球形齿可布置在边缘,弹头齿或锥形齿可布置在中心与边缘之间。

三、结束语

利用LS-DYNA仿真的方法对冲旋钻头破岩机理研究可以解决试验和理论难于回答的问题,有助于研究人员对问题实质的认识,从而为研发高效的钻具(冲击器和冲击钻头)和设计合理的钻井工艺提供依据。

参考文献

- [1] 刘希圣. 钻井工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1988.
- [2] 赵海欧. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社, 2003.
- [3] 刘德顺,等. 冲击机械系统的波动力学研究[J]. 机械工程学, 1997, 33(4).
- [4] 王亚军,等. 有限元分析系统在结构计算中的比较及展望[J]. 基建优化, 2003(4).
- [5] 薛廷河,等. 撞击速度的变化对陨石撞击形变场的影响及其规律探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(3).
- [6] 滕兆峰,等. 长庆区块 $\varnothing 222.2$ mm PDC 钻头的布齿设计和现场应用[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 59-61.

(收稿日期 2006-10-13 编辑 钟水清)