

# 基于 LS - DYNA 的大容腔潜孔锤钻头结构研究

杨冬冬<sup>1</sup>, 殷琨<sup>1</sup>, 彭视明<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 李亮<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 江西省地质工程(集团)公司, 江西 南昌 330002)

**摘要:**提出通过大容腔结构改善潜孔锤钻头与冲锤质量比来提高液动潜孔锤钻进效率的方法,并应用 LS - DYNA 显示动力学分析手段,对常规潜孔锤钻头和新型大容腔结构潜孔锤钻头的碎岩效果及应力状态进行仿真分析,结果表明:采用大容腔结构减小潜孔锤钻头的质量,调整钻头与冲锤质量比,可明显提升碎岩效果;冲锤与钻头质量比由 0.79 变化到 0.91,岩石碰撞过程中吸收的最大冲击能变化率以及碰撞结束后的最终吸能变化率分别为 41.13% 和 67.17%;两种大容腔潜孔锤钻头的受力均满足长期作业的疲劳强度要求,数值模拟计算结果表明,该钻头结构在施工中具备可行性。

**关键词:**潜孔锤钻头;大容腔;最大冲击能;吸能变化率;LS - DYNA

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 7428(2016)09 - 0026 - 04

**Research on Large Cavity Structure of DTH Hammer Bit Based on LS - DYNA/YANG Dong-dong<sup>1</sup>, YIN Kun<sup>1</sup>, PENG Jian-ming<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LI Liang<sup>2</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Jiangxi Geo-engineering (Group) Corporation, Nanchang Jiangxi 330002, China)

**Abstract:** A method of improving the mass ratio of DTH hammer and impact hammer by large cavity structure is presented to increase the drilling efficiency of DTH hammer, and LS - DYNA dynamic analysis method is applied to conduct the simulation analysis on the large cavity structure of DTH hammer bit's rock fragmentation efficiency and stress state. The results show that the large cavity structure can reduce the mass of DTH hammer bit and adjust the mass ratio of DTH hammer bit and the impact hammer, which can obviously improve rock fragmentation efficiency. The mass ratio is changed from 0.79 to 0.91, the biggest absorptive impact energy change rate in the processes of rock collision and after the collision were 41.13% and 67.17% respectively. The forces of two kinds of large cavity DTH hammer bits meet the fatigue strength requirements for long-term operation. The numerical simulation calculation results show that this structure of DTH hammer bit is feasible in the construction.

**Key words:** DTH hammer bit; large cavity; biggest impact energy; energy absorption change rate; LS - DYNA

## 0 引言

与常规钻进工艺相比,液动冲击回转钻进技术在硬岩及复杂地层钻进具有钻头及钻具使用寿命长、钻进时不易卡堵、防偏斜效果好、高围压环境适应性好等优点,得到了较为广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。但与气动潜孔锤比较,存在冲击功较低的不足。因此,在液动射流式潜孔锤结构改进的过程中,需要对潜孔锤的性能参数进行改良。其中冲击功是潜孔锤的主要技术指标之一,是衡量其优劣的关键指标<sup>[3]</sup>。如何进一步提高液动潜孔锤钻进效率、降低生产作业成本仍是目前研究的重点。

由于泥浆的高动力粘度以及不可压缩性,液动潜孔锤冲锤末速度提升难度较大。为获得较好的碎岩效果,通过提高能量利用率以提升能量输出是解决液动潜孔锤钻效问题的重要途径之一。基于应力波的能量传递理论,目前已进行过大量研究, Fairhurst、Dutta 等揭示了碰撞应力波对于能量传递的影响<sup>[4-5]</sup>;杜小军等认为钻头与冲锤质量比对钻进效率有重要影响<sup>[6]</sup>;张保良基于简单的潜孔凿岩冲击器结构分析提出合理的钻头与冲锤质量比值区间<sup>[7]</sup>;王亚辉在相同冲击功情况下,对不同质量和速度的冲锤贯入效率进行实验研究,对比发现冲锤

收稿日期:2016 - 01 - 15; 修回日期:2016 - 05 - 25

基金项目:国土资源公益性行业科研专项项目“干热岩快速钻井用高压高能射流式液动锤研究”(编号:201311112)

作者简介:杨冬冬,男,汉族,1991年生,硕士研究生,地质工程专业,主要研究方向为多工艺冲击回转钻探技术,吉林省长春市西民主大街 938 号, yangdd14@mails.jlu.edu.cn。

通讯作者:彭视明,男,汉族,1975年生,教授,博士生导师,从事多工艺冲击回转钻探技术和天然气水合物勘探等研究,吉林省长春市西民主大街 938 号, pengjm@jlu.edu.cn。

质量对贯入度影响大于速度<sup>[8]</sup>。上述研究表明,合理的钻头、冲锤质量配比对于提高能量传递效率、改善碎岩效果具有重要意义,然而除小口径设计外,常规潜孔锤钻头与潜孔锤冲锤的质量比远大于 1,大幅降低了能量传递效率,减少了实际碎岩的有效冲击功。为此,提出大容腔钻头结构设计,即通过适当减小钻头中心质量实现与冲锤的质量匹配,达到提高能量利用率的目的。本文以  $\varnothing 216$  mm 潜孔锤钻头为例,运用 LS-DYNA 数值模拟对 3 种容腔结构钻头的能量传递效率进行分析,并进行了强度校核,探讨钻头结构设计的合理性,以期为提高液动潜孔锤能量利用率提供参考。

## 1 LS-DYNA 数值模拟

### 1.1 基本控制方程

对于“冲锤-钻头-岩石”碰撞系统,分析方式可采用 LS-DYNA 动态显示模块,控制方程主算法为 Lagrange 有限元列式,其单元网格变形依附于材料特性。初始时刻质点坐标定为  $X_i$ ,任意  $t$  时刻后坐标为  $x_i$ ,质点运动方程为:

$$x_i = x_i(X_i, t) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

动量方程为:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho a_i \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{ij,j}$ ——柯西应力;  $f_i$ ——单位质量体积力;  $a_i$ ——加速度。

质量守恒方程为:

$$\rho = J\rho_0 \quad (3)$$

式中:  $\rho$ ——当前质量密度;  $\rho_0$ ——初始质量密度;  $J$ ——雅克比行列式。

能量守恒方程:

$$E = VS_{ij}\varepsilon_{ij} - (P + Q)V \quad (4)$$

式中:  $V$ ——现时构形体积;  $S_{ij}$ ——偏应力;  $\varepsilon_{ij}$ ——应变率张量;  $P$ ——压力;  $Q$ ——体积粘性阻力。

应用虚功原理,代入偏应力和压力,式(2)可表示成如下矩阵形式:

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \begin{array}{l} \int_{v_m} \rho N^t N a dv + \int_{v_m} B^t \sigma dv \\ - \int_{v_m} \rho N^t b dv - \int_{\partial v_m} N^t t ds \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中:  $N$ ——插值矩阵;  $\sigma$ ——应力向量;  $B$ ——应变-位移矩阵;  $a$ ——节点加速度向量;  $b$ ——体力;  $t$ ——牵引力。

### 1.2 碰撞模型及边界条件

图 1 为通过 solidworks 软件建立的 3 种  $\varnothing 216$  mm 潜孔锤钻头简化模型,(a)为常规  $\varnothing 216$  mm 潜孔锤钻头,钻头质量为 40.17 kg;(b)为球顶大容腔潜孔锤钻头,即在普通潜孔锤基础上对中心通道进行适度变径和扩大,扩大后容腔前端为球形面,钻头质量为 35.04 kg;(c)为平底大容腔潜孔锤钻头,变径部分体积与(b)钻头相同,但考虑加工方便前端面设计为平面,钻头质量为 35.80 kg。冲锤质量均为 31.86 kg。

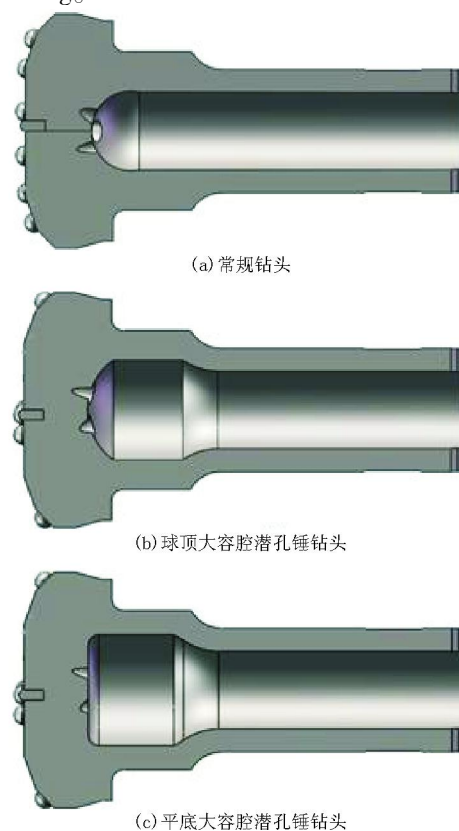


图 1  $\varnothing 216$  mm 潜孔锤钻头几何模型

采用 Hypermesh 进行自适应网格划分。图 2 为“冲锤-钻头-岩石”碰撞网格模型。由于钻头体结构复杂,在保证计算精度要求的前提下,对模型采用四面体单元进行划分,单元均采用 solid164 实体单元,网格总数均在 26 万左右,摩擦系数 0.1。冲锤和钻头的材料均为 35CrMo,弹性模量 206 GPa,密度  $7.85 \text{ kg/dm}^3$ ,泊松比 0.3。

岩石模型采用 HJC (“Holmsquist - Johnson Concrete”),该模型能够较好地反映岩石冲击压缩下的本构关系,可用于模拟高应变率下岩石的大变形破坏以及侵彻过程中的力学行为。岩石参数为:材料密

度  $\rho = 2580 \text{ kg/m}^3$ , 剪切模量  $G = 25.8 \text{ GPa}$ , 压溃点压力  $P_c = 17 \text{ GPa}$ ,  $P_c$  对应的体积应变  $U_c = 0.0013$ , 常量  $K_1 = 85 \text{ GPa}$ , 常量  $K_2 = -171 \text{ GPa}$ , 常量  $K_3 = 208 \text{ GPa}$ ,  $P_1$  对应的体积应变  $U_1 = 0.38$ , 准静态屈服强度  $F_c = 60 \text{ MPa}$ , 压力常量  $T = 3.3$ , 损伤系数  $D_1 = 0.04$ , 损伤系数  $D_2 = 1$ , 常量  $A = 0.79$ , 常量  $B = 1.6$ , 常量  $N = 0.6$ , 常量  $S = 7$ 。

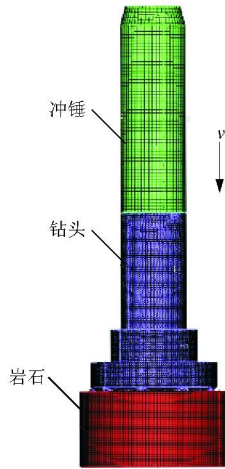


图2 “冲锤-钻头-岩石”碰撞网格模型

将岩石定义为无反射边界的半无限体, 由于重力加速度对高速运动的冲锤速度影响很小, 因而在模拟计算中忽略重力影响。冲锤初始速度为  $4 \text{ m/s}$ , 计算时间步长设置为  $0.001 \text{ s}$ , 计算总时间为  $0.1 \text{ s}$ 。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 能量传递影响

图3为碰撞后的冲锤、钻头和岩石能量变化曲线, A阶段运动的冲锤与钻头碰撞后, 接触面质点压缩形成应力波, 冲锤的能量便以应力波的形式传递给钻头, 转化为钻头的动能; 随后进入B阶段, 钻头与接触的岩石碰撞进行能量交换, 此时位于球齿边缘的岩石在压力作用下不断发生弹-塑性形变直至超过塑性极限发生断裂, 并将压力分布重新分配, 在不考虑轴压条件下, 钻头在钻进过程中达到最大凿入深度后会有所反弹, 反弹过程中会带走一部分能量, 因而岩石吸收能量在达到峰值后随即下降; C阶段反弹后的钻头与冲锤进行二次碰撞, 将能量分配给冲锤, 此时在下次冲击作用前三者进入稳定状态。

冲锤冲击功均为  $35.5 \text{ J}$  的初始条件下, 对于普通潜孔锤钻头, 碰撞过程中岩石吸收的最大冲击功

为  $12.5 \text{ J}$ , 碰撞结束后为  $2.2 \text{ J}$ ; 球顶大容腔潜孔锤钻头岩石吸收的冲击功最大值为  $21.6 \text{ J}$ , 稳定后为  $6.7 \text{ J}$ ; 平顶大容腔潜孔锤钻头岩石吸收的冲击功峰值  $19.1 \text{ J}$ , 最终吸能为  $6.0 \text{ J}$ 。由此可知, 冲锤与钻头质量比对碰撞后的能量传递效率影响显著, 当冲锤与钻头的质量比由  $0.79$  变化到  $0.91$ , 岩石碰撞过程中吸收的最大冲击功变化可达  $41.13\%$ , 稳定后的吸能值相差最高可达  $67.17\%$ , 图4为3种钻头的冲锤、钻头质量比与岩石吸能值关系曲线。由此可知, 减小大直径钻头的质量、调节钻头与冲锤质量比是改善碎岩效果和提高了钻进效率的有效手段。

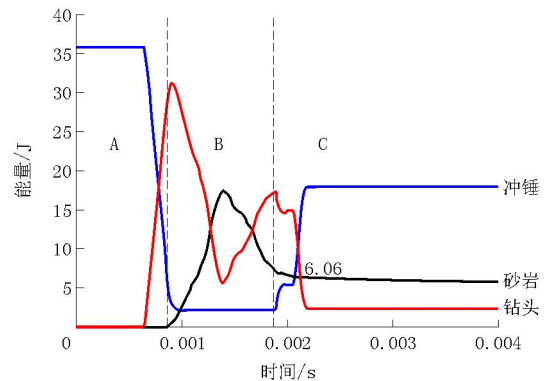


图3 冲锤、钻头及岩石能量随时间变化曲线

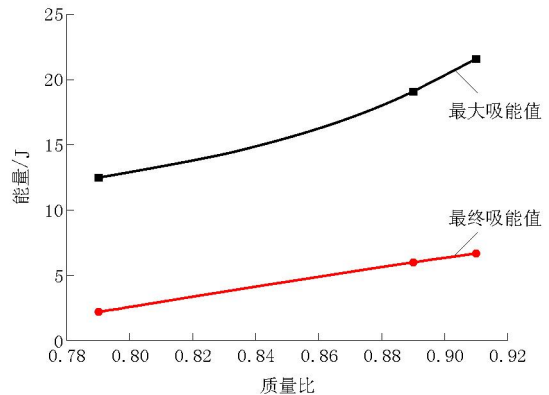


图4 质量比与岩石吸收冲击能关系曲线

### 2.2 应力强度分析

图5为碰撞后3种钻头的应力分布云图, 由图5可知, 对于常规潜孔锤钻头, 碰撞后应力主要集中在钻头尾部, 而对于大容腔结构钻头, 应力多分布于容腔变径位置。普通潜孔锤钻头的最大应力为  $139 \text{ MPa}$ , 球顶大容腔钻头的最大应力为  $231 \text{ MPa}$ , 而平顶大容腔钻头的最大应力为  $239 \text{ MPa}$ , 可见从施工安全考虑, 常规钻头的安全系数最高, 球顶大容腔潜

孔锤钻头次之,平顶大容腔潜孔锤钻头受力状态相对较差。虽然大容腔结构的最大应力均大于普通潜孔锤钻头,但远小于 35CrMo 疲劳极限 431 MPa,2 种钻头受力均可满足应力强度要求。此外,为了保

证钻进效率,潜孔锤钻头一般在球齿发生一定磨损而钻头体未发生强度破坏的情况下进行更换,使用寿命通常为 75.45 ~ 124 m,远未达到  $10^7$  次疲劳碰撞周期,因而认为可满足长期施工作业要求。

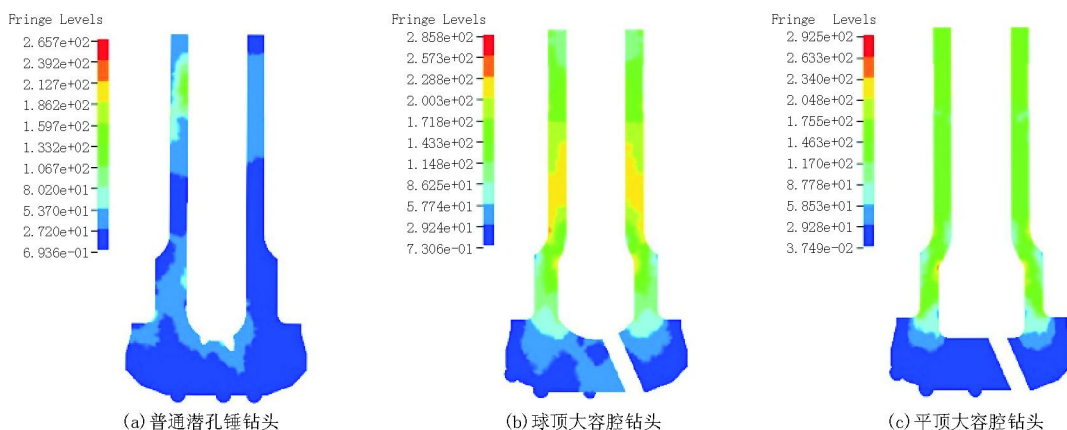


图 5 三种潜孔锤钻头应力分布云图

### 3 结论

本文就常规潜孔锤钻头与潜孔锤冲锤的质量比较大的问题,提出对钻头结构进行优化,并利用非线性动力学分析软件 LS-DYNA 对改良的  $\varnothing 216$  mm 潜孔锤钻头模型进行动力学仿真分析,得出以下结论:

(1) 冲锤与钻头质量比对于碎岩效果具有重要影响,钻头与冲锤的质量比由 0.79 变化到 0.91 时,质量变化仅为 12.5%,但岩石吸收的最大冲击功以及碰撞结束后的最终吸能值变化分别可达 41.13% 和 67.17%,碎岩效果显著提高;

(2) 2 种大容腔结构钻头的受力均满足应力强度要求。

由此证明通过设计大容腔结构减小钻头质量,改善钻头与冲锤质量比以提高碎岩钻进效率的方法具备充分可行性。

### 参考文献:

- [1] 贾涛,徐丙贵,李梅,等. 钻井用液动冲击器技术研究进展及应用对比[J]. 石油矿场机械,2012,41(12):83-87.
- [2] 彭视明,殷其雷,赵志强,等. 低速射流元件控制的高能液动锤研究[J]. 石油机械,2010,38(3):1-4.
- [3] 吴忠杰,林君,彭视明,等. 液动射流式冲击器冲击功测量方法及仪器研制[J]. 仪器仪表学报,2006,27(9):1037-1039.
- [4] Fairhurst C. Wave Mechanics of Percussive Drilling[J]. Mine Quarry Engng,1961,27(170):126-127.
- [5] Dutta P K. The Determination of Stress Waveforms Produced by Percussive Drill Pistons of Various Geometrical Designs[C]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1968,5(6):501-51.
- [6] 杜小军,蒋荣庆. 大直径潜孔锤冲击能量传递模拟试验研究[J]. 探矿工程,1996,(6):4-7.
- [7] B. LUNDBERG,张保良,陈仁福. 冲击钻进中应力波能量对岩石传递过程的微计算机[J]. 凿岩机械与风动工具,1984,(1):45-55.
- [8] 王亚辉,杨继红. 基于 ANSYS 干式钻头的优化设计及试验分析[J]. 煤矿机械,2013,34(8):18-20.