

# 空隙率对潜孔锤凿岩瞬态冲击过程的影响

卜长根, 龚汉松, 夏柏如

(中国地质大学工程技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 潜孔锤的钻进过程是一个高度非线性、大变形、破碎岩石的过程, 利用非线性有限元程序 ANSYS/LS - DYNA 研究了在凿岩过程中, 球齿凿入不同空隙率(塑性体积应变)岩石的冲击力特性。结果表明, 岩石空隙率对钻头球齿与岩石之间的凿入冲击力幅值有很大影响, 随着空隙率的增大, 球齿凿入的冲击力显著减小, 而对活塞与钻头间冲击力幅值影响甚微。通过 ANSYS/LS - DYNA 瞬态冲击数值模拟, 形象地再现了潜孔锤钻凿系统冲击岩石发生侵入破坏的物理过程, 为冲击碎岩瞬态研究提供了一个有效的分析方法。

**关键词:** 潜孔锤; 空隙率; 瞬态冲击力; ANSYS/LS - DYNA

**中图分类号:** P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2011)04 - 0006 - 04

**Simulation Study of Rock Voids Rate Affecting on Impact Force of DTH Hammer/BU Chang-gen, GONG Han-song, XIA Bo-ru** (School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The process of impact hammer drilling is very complex for high non-linearity, large deformation and damage behavior. The explicit finite element code ANSYS/LS - DYNA was employed to research the transient percussive characteristic of bit inserts impacting brittle rock with different rate of air voids. The impact forces curves of concrete and sandstone under hammer impact has been recorded. From the simulation results, the rock void rate affects variously on the transient impact force of bit inserts penetrating rock. The impact force between bit and rock decreases sharply as the rock void rate rises. However, the transient impact force between piston and bit has nothing with the rock void rate. The physical processes such as insert penetrating rocks subjected to percussive hammer drilling are displayed visually. It is believed that the numerical simulation will become a good research method for transient impact process.

**Key words:** DTH Hammer; rock voids; transient impact force; ANSYS/LS - DYNA

## 0 引言

潜孔锤钻进是一种以轴向冲击力为主破碎岩石的钻进方法, 广泛地应用于地质工程基岩钻进领域。使用该钻进技术时, 潜孔锤活塞冲击钻头, 产生的冲击力以应力波的形式作用于钻头, 能高效地体积破碎岩石。气动潜孔锤凿岩系统(活塞 - 钻头 - 岩石)的冲击过程是应力波的产生、传播与耗散的过程, 目前一般是采用一维弹性波理论来建立凿岩系统的冲击数学模型, 并通过特征线法或表算法来进行数值计算<sup>[1~4]</sup>。活塞与钻头冲击面局部接触的处理是在活塞与钻头之间虚设一个非线性弹簧, 其作用力与变形的关系符合 Hertz 接触定律<sup>[5]</sup>。钻头与岩石之间的边界是在钻头与岩石之间施加等效非线性弹簧, 弹簧刚度由岩石凿入系数及卸载系数来表征<sup>[6,7]</sup>。

利用一维弹性波理论建立凿岩系统的冲击模型时, 必须对活塞及钻头进行分段简化(简化为直杆

或锥形结构), 而活塞的气槽及钻头的花键等局部结构尺寸都比较大, 研究凿岩系统的冲击过程时, 这些局部结构不能忽略。另外, 活塞与钻头冲击面之间的 Hertz 接触模型属于静态范畴, 对于活塞与钻头的非一致性冲击面, 其物理意义不明确<sup>[8]</sup>。事实上, 活塞与钻头冲击面实际变形非常复杂, Liu<sup>[9]</sup>等指出纵然活塞与活塞冲击接触变形这一非线性力学过程能用接触撞击弹簧模拟近似, 但其刚度一般很难通过理论计算得到, 而必须借助于试验研究。实际情况是多齿钻头的岩石动态凿入系数及卸载系数目前很难测定。ANSYS/LS - DYNA 是著名的通用显式动力有限元分析程序, 用于求解高度非线性复杂问题, 能够有效处理多种冲击接触问题以及高效处理大变形问题, 如高速碰撞、爆炸及岩石、混凝土的侵彻、贯穿等。Bu<sup>[10]</sup>等利用 LS - DYNA 系统地研究了潜孔锤复杂结构活塞、钻头及岩石之间的接触冲击瞬态动力学问题。

收稿日期: 2010 - 10 - 24; 修回日期: 2011 - 02 - 28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50475056)

作者简介: 卜长根(1963 - ), 男(汉族), 安徽人, 中国地质大学(北京)副教授、硕士生导师, 探矿工程专业, 博士, 从事科研、教学工作, 北京市海淀区学院路 29 号, bucg@cugb.edu.cn。

本文对潜孔锤凿入混凝土、砂岩的冲击瞬态过程进行数值模拟,研究了岩石空隙率差异,在凿入挤压过程中,空隙逐渐闭合而空气被排出岩石,进而产生不同的塑性体积应变  $\mu_{lock}$ ,模拟分析了球齿凿入不同空隙率(塑性体积应变)的岩性的冲击力特性。

### 1 潜孔锤冲击凿入系统有限元建模

#### 1.1 计算模型简化

潜孔锤凿岩数值模拟中只研究凿岩系统的轴向冲击过程,为计算方便,对活塞的气槽及钻头的花键槽圆角处进行了相应地简化,气动潜孔锤凿岩系统简化后的计算模型如图 1 所示。

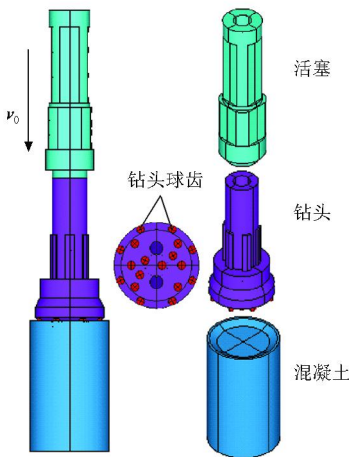


图 1 某气动潜孔锤凿岩系统简化模型

#### 1.2 冲击凿入系统有限元建模

##### 1.2.1 材料模型

潜孔锤活塞和钻头材料为高韧性合金钢,硬质合金球齿材料为 YG8,均采用线性弹性体材料模型。活塞、钻头及钻头球齿的材料参数如表 1 所示。

被钻凿的脆性材料,采用 Johnson - Holmquist

表 1 活塞、钻头及钻头球齿的材料参数

部件名称	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/Pa	泊松比
活塞	7850	2.06E11	0.3
钻头	7850	2.06E11	0.3
钻头球齿	14500	5.88E11	0.22

混凝土模型<sup>[6,7]</sup>,该模型可以应用于高应变率、大变形下的混凝土及岩石模拟,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。H - J - C 模型的材料屈服面定义为:

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

式中: A——无量纲粘性常数; B——无量纲的压力强化系数; C——应变率系数; D——损伤度; N——无量纲的压力硬化指数。

Johnson - Holmquist 本构模型如图 2 所示。

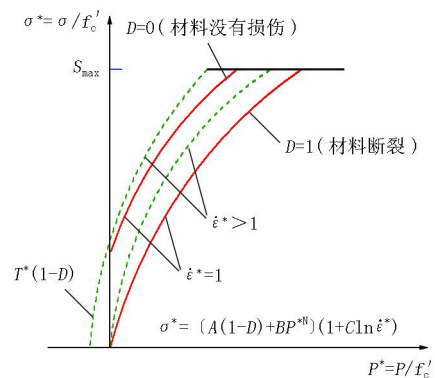


图 2 Johnson - Holmquist 本构模型

$\sigma$ ——实际等效应力;  $f_c'$ ——静态屈服强度;  $P^* = P/f_c'$ ——无量纲压力;  $P$ ——实际压力;  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ ——无量纲应变率;  $D$ ——损伤因子;  $S_{max}$ ——最大无量纲强度。

脆性材料建模采用 Johnson - Holmquist 模型,混凝土、砂岩材料参数和 J - H 模型参数见表 2。

表 2 混凝土砂岩材料参数与 J - H 模型材料参数

岩石材料	密度 $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量 $E$ /GPa	剪切模量 $G$ /GPa	泊松比 $\nu$	抗压强度 $f_c$ /MPa	孔隙率 $n$ /%	损伤参数			状态方程参数			
							$D_1$	$D_2$	$(\epsilon_p^f + \mu_p^f)_{min}$	$P_{crush}$ /GPa	$\mu_{crush}$	$P_{lock}$ /GPa	$T$ /GPa
混凝土	2440	35.7	14.86	0.20	48	8 ~ 10	0.04	1.00	0.01	0.016	0.001	0.80	0.004
砂岩	2620	71	31.14	0.14	102	2 ~ 28	0.044	1.00	0.01	0.034	0.0013	0.80	0.00626

注:  $P_{crush}$ ——压溃点的压力;  $\mu_{crush}$ ——压溃点的体积应变;  $P_{lock}$ ——材料密实压力;  $\mu_{lock}$ ——在  $P_{lock}$  处的体积应变,岩石受压密实时应变可以由岩石的空隙率  $n$  来计算( $\mu_{lock} = \frac{n}{1-n}$ )。

##### 1.2.2 网格划分及接触算法

采用 8 节点三维实体单元 SOLID164 分别对活塞、钻头及岩石进行网格划分,为更好地反映材料几何大变形和失效等非线性问题,计算中采用单点积分和沙漏控制。由于沙漏模态与实际变形的其他基

矢量是正交的,沙漏模态在运算中不断得到控制,沙漏粘性阻尼力做功在总能量中可以忽略,沙漏粘性阻尼力的计算比较简单,耗费机时较少。活塞划分为 21414 个单元,钻头划分为 192522 个单元。活塞与钻头网格划分的模型分别如图 3、4 所示。

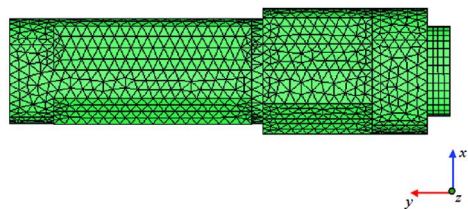


图3 活塞网格划分模型

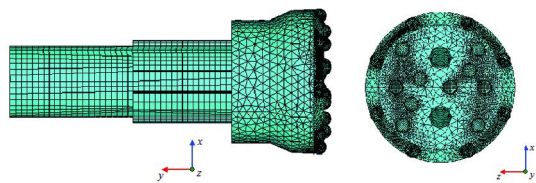


图4 钻头网格划分模型

当冲击破碎材料考虑为混凝土砂岩时,混凝土砂岩在潜孔锤钻头的冲击作用下会产生破碎。因此,冲击脆性材料可能产生破碎的区域需要划分较密的网格,否则大量的失效单元会对计算结果产生很大的误差,冲击体共划分为312000个单元。冲击体实体模型及网格划分的模型如图5所示。

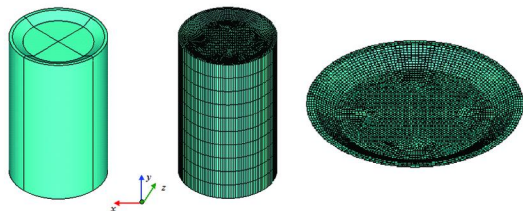


图5 岩石实体模型及网格划分模型

活塞与钻头冲击界面采用面-面自动接触算法。为有效模拟混凝土单元表面发生失效贯穿,钻头与混凝土接触中采用面面接触中的侵蚀算法,当接触时若发生材料失效,接触可依旧在剩余的单元中进行。

## 2 有限元数值模拟结果

### 2.1 钻头的冲击应力及侵入混凝土的过程

活塞冲击速度为7.2 m/s时,仿真得出某时刻钻头球齿冲击应力及混凝土的 Von\_Mises 应力云图,如图6、7所示。

从仿真的结果来看,冲击开始后由于钻头冲击力较小,混凝土与钻头球齿接触的区域仅发生弹塑性变形,产生了较小的压实坑(共有18个压实坑,底面球齿对应10个、边齿对应8个)。随着钻头冲击力的增大,混凝土压实坑体积逐渐变大,当冲击力增大到一定程度时,混凝土出现突然破裂,失效的单元从模型中被删除并形成齿坑,见图8。随着球齿

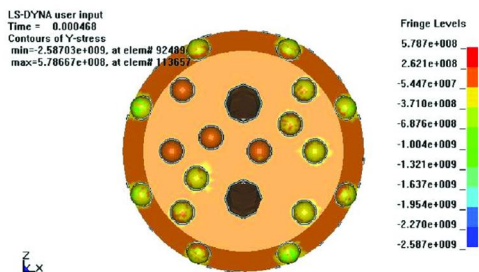


图6 钻头冲击应力云图(Y方向)

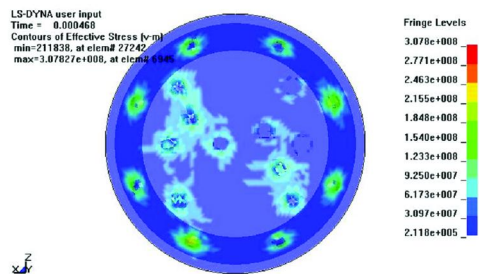


图7 混凝土的 Von\_Mises 应力云图

继续凿入,球齿侧面同时对混凝土挤凿破碎,破碎坑增大,然而由于随着钻头冲击能量的衰减,球齿的凿入速度减小。

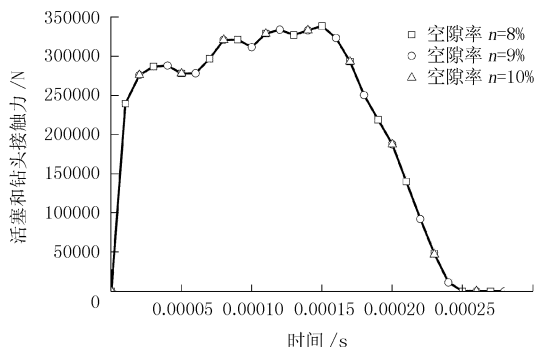


图8 不同混凝土空隙率时活塞对钻头冲击力曲线

### 2.2 活塞、钻头及其岩石冲击过程的模拟

活塞以7.2 m/s速度冲击钻头破碎不同空隙率(8%~10%)混凝土时,仿真得出的活塞冲击力及钻头球齿冲击力随时间变化曲线,如图8、图9所示。

从图8、图9中可以看出,以相同速度冲击不同空隙率的混凝土时,混凝土空隙率对活塞与钻头之间冲击力几乎没有影响,但对钻头球齿与岩石之间凿入的冲击力幅值影响较大,随着空隙率的增大,球齿凿入混凝土的冲击力相应地减小且冲击力曲线呈相似形状,冲击力的持续时间相同。

活塞以7.2 m/s速度冲击钻头破碎不同空隙率(2%~28%)砂岩时,仿真得出的活塞冲击力及钻头球齿冲击力随时间变化曲线,如图10、图11所示。

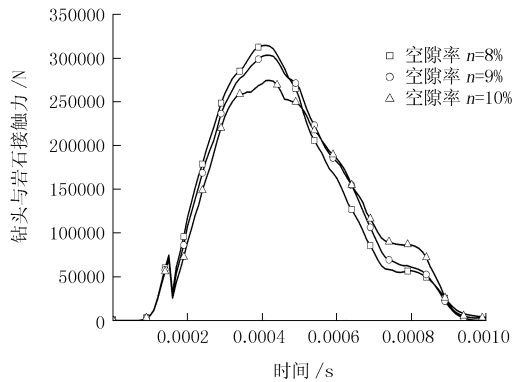


图9 不同空隙率时球齿凿入混凝土冲击力曲线

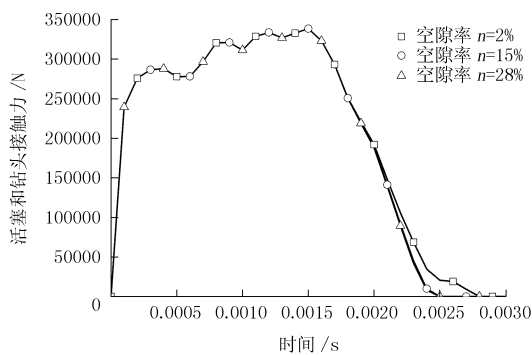


图10 不同砂岩空隙率时活塞对钻头冲击力曲线

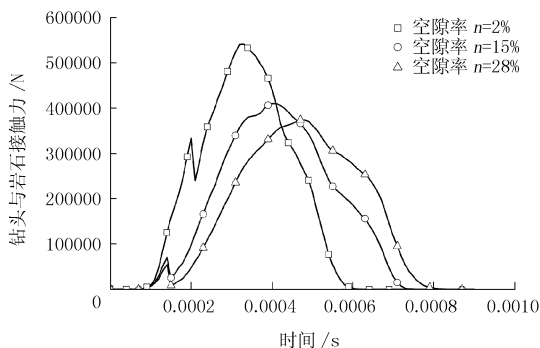


图11 不同空隙率时球齿凿入砂岩冲击力曲线

从图10、图11中可以看出,以相同速度冲击不同空隙率的砂岩时,砂岩空隙率对活塞与钻头之间冲击力的影响不明显,但对钻头球齿与岩石之间的凿入冲击力幅值影响很大,随着空隙率的进一步增大,球齿凿入砂岩的冲击力显著减小且凿入冲击力持续时间相应延长。

### 3 结论

潜孔锤多齿钻头的动态凿入岩石的动力学过程目前很难测定。本文利用冲击动力有限元软件LS-DYNA首次系统分析了潜孔锤凿岩系统(活塞-钻头-混凝土)的瞬态冲击具有不同空隙率不同岩石的动力学过程。得出以下结论:

(1)潜孔锤凿岩瞬态过程模拟再现了球齿凿入时,岩石裂纹的发展与应力状态;

(2)以相同活塞速度冲击钻头破碎岩石,不同岩石及不同空隙率对活塞和钻头的冲击力及其持续时间影响不明显;

(3)空隙率对钻头球齿与岩石之间的凿入冲击力幅值有很大影响,随着空隙率的增大,球齿凿入的冲击力显著减小;尤其像砂岩,空隙率的进一步增大,凿入冲击力持续时间也相应延长。

### 参考文献:

- [1] Fischer H C. On longitudinal impact. Appl[J]. Sci. Res. 1960, (A8):105-117.
- [2] Lundberg B. Microcomputer simulation of percussive drilling[J]. J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1985, 22(4):237-249.
- [3] 徐小荷. 冲击凿岩的理论基础及电算方法[M]. 辽宁沈阳:东北工学院出版社, 1986.
- [4] L. E. Chiang, D. A. Elias, Modeling impact in down-the-hole rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2000, 37:599-613.
- [5] 邹定祥. 杆件纵向撞击面局部变形的非线性模型[J]. 东北工业学院学报, 1980, (1).
- [6] Hustrulid W, Fairhurst C. Theoretical and Experimental Study of Percussive Drilling of Rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geom, 1971, (8):311-333.
- [7] Lundberg B. Microcomputer Simulation of Stress Wave Energy to Rock in Percussive Drilling[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geom, 1982, (19):229-39.
- [8] K. Y. Ahn, B. J. Ryu. A Modeling of Impact Dynamics and Its Application to Impact Force Prediction[C]. Proceedings of ACMD 2004, 2004.
- [9] Liu D S, Chen A H, Li X B et al. Impact Dynamic Inverse Design for the Split Hopkinson Press Bar[A]. Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures [C], Singapore (keynote paper), 2001:47-61.
- [10] Bu C. G., Qu Y. G., Cheng Z. Q., Liu B. L., Numerical Simulation of Impact on Pneumatic DTH Hammer Percussive Drilling[J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(5):868-878.
- [11] Online at <http://www.springerlink.com>.