

网格对潜孔锤钻头球齿冲击过程数值模拟的影响

瞿叶高, 卜长根, 刘宝林

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 潜孔锤钻头冲击钻进的过程是一个高度非线性、大变形、破坏的过程。对这一复杂过程的研究, 目前主要是利用实验方法。应用非线性显式三维有限元求解程序 LS-DYNA3D, 采用与岩石性质较接近的混凝土模型, 对潜孔锤钻头硬质合金球齿冲击混凝土板的过程进行了仿真计算, 讨论了不同网格尺寸对冲击力、冲击速度及破碎坑深度的影响等。

关键词: 潜孔锤钻头; 硬质合金球齿; 冲击; 网格尺寸; LS-DYNA3D

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2007)06-0010-04

Effect on Numerical Simulation of DTH Hammer Bit Insert Impact Process by Mesh Size/QU Ye-gao, BU Chang-gen, LIU Bao-lin (School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The process of down-the-hole hammer (DTH) drilling is very complex because of its high non-linear, large deformation and damage behavior. For this complex problem, current studies are mainly based on experiments. The process, impacting concrete slab with tungsten carbide button of DTH hammer bit, was simulating calculated by non-linear finite element software LS-DYNA3D on concrete model, the effects of different target mesh sizes of concrete on impaction force, impact velocity and penetration depth was discussed.

Key words: DTH hammer bit; tungsten carbide insert; impact; mesh size; LS-DYNA3D

0 引言

钻头齿冲击岩石的过程是非常复杂而又难以处理的问题, 其严格的理论分析涉及钻头齿的几何形状及尺寸、岩石和钻头齿的弹塑性性质、冲击波的传播、流动、有限变形和应变、应变率、热性质、摩擦效应、以及断裂的发生和扩展等。目前关于钻头冲击破碎岩石机理的研究还不够完善, 主要是采用实验手段来研究^[1,2]。

随着计算机技术的发展, 有限元数值模拟方法在岩石、混凝土的冲击侵彻问题的分析中得到了广泛应用^[3,4]。然而在数值模拟中, 对于动态冲击由于很多材料属性都被加入了本构模型, 材料的应变率效应取决于数值网格, 动态强度的增加也依赖于网格^[5], 因此对网格的依赖性就显得非常重要。如果选择很少的网格将使得解完全无效, 然而太精确的网格划分在大量增加计算时间的同时也会引起误差的累积。

LS-DYNA3D 是著名的显式冲击动力有限元程序, 能够模拟真实世界的各种复杂问题, 特别适合

求解各种二维、三维非线性结构的冲击、侵彻、贯穿等非线性动力冲击问题。本文利用 LS-DYNA3D, 对冲击载荷下潜孔锤硬质合金球齿的冲击钻进过程进行了仿真。分析了网格划分对潜孔锤钻头硬质合金球齿冲击的影响, 并对计算结果进行分析。

1 潜孔锤钻头球齿冲击有限元模型

1.1 计算模型简化

某潜孔锤钻头的质量为 18 kg, 钻头接触井底齿数为 18 颗硬质合金球齿。由于主要目的是来研究岩石网格对冲击的影响, 因此为简化计算, 仿真中在球齿上附加了质量为 1 kg 的柱形金属块, 即将钻头总质量平均分配到每颗硬质合金球齿上。金属质量块与硬质合金球齿以 10 m/s 的速度冲击方形岩石板, 岩石板底面固定。球齿的直径为 16 mm, 方形岩石板的尺寸为 200 mm × 200 mm × 50 mm, 冲击模型如图 1 所示。

1.2 材料模型

硬质合金球齿材料为 YG8, 采用线性弹性体材

收稿日期: 2006-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 50475056)

作者简介: 瞿叶高(1983-), 男(汉族), 山东人, 中国地质大学(北京)硕士研究生在读, 机械工程专业, 研究方向为虚拟样机分析及机械结构 CAD/CAE 设计, 北京市海淀区学院路 29 号, 13520831476, quyegao@sina.com; 卜长根(1963-), 男(汉族), 安徽人, 中国地质大学(北京)副教授, 机械工程专业, 从事机电产品集成设计及机械动力学仿真方面的教学与科研工作, bucg@cugb.edu.cn; 刘宝林(1959-), 男(汉族), 吉林人, 中国地质大学(北京)教授、科学钻探国家专业实验室主任, 探矿工程专业, 从事微机自探钻进、优化钻进、钻机无级调速和湖泊钻探取心等方面的研究工作。

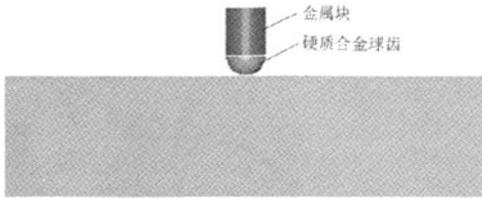


图1 冲击模型

料模型。球齿的密度为 $\rho = 14500 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 5.88 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。

由于暂无动载荷下岩石的详细性能参数, 采用与岩石性质较接近的混凝土来近似描述。采用 Johnson - Holmquist 混凝土模型^[6,7], 该模型可以应用于高应变率、大变形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:

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

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。

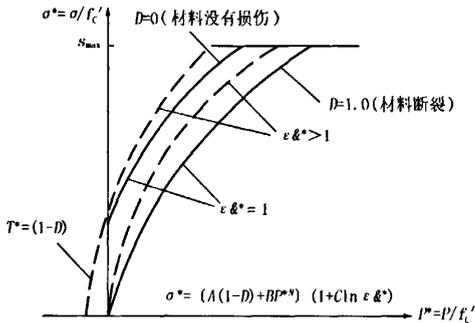


图2 Johnson - Holmquist 本构模型

σ ——实际等效应力; f_c' ——静态屈服强度; $P^* = P/f_c'$, 为无量纲压力; P ——实际压力; $\epsilon \dot{\epsilon}^* = \epsilon \dot{\epsilon} / \epsilon_0 \dot{\epsilon}_0$, 为无量纲应变率; D ——损伤因子

采用单轴压缩强度为 48 MPa 的混凝土材料, 材料模型参数选用 Holmquist 等^[7]提供的参数。

1.3 接触算法与网格划分

有效模拟混凝土单元表面发生失效贯穿, 球齿与混凝土之间的接触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。采用 8 节点三维实体单元 SOLID164 分别对球齿、混凝土进行网格划分, 模型均采用拉格朗日网格描述, 网格划分的模型如图 3 所示。

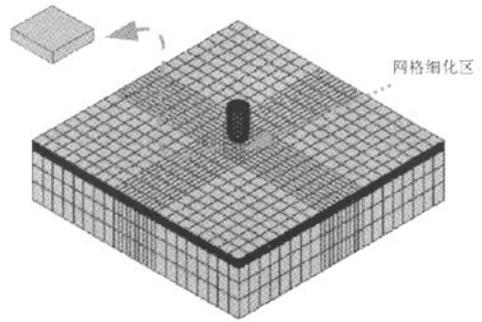


图3 网格模型

由于混凝土在钻头冲击作用下会产生裂纹并发生破碎, 因此必须对岩石可能产生破碎的部位划分较密的网格, 否则大量的失效单元会使计算结果产生很大的误差。

2 仿真模拟

研究数值计算对网格的依赖性, 通常的方法是将网格均分, 然后针对粗网格和较细网格分别进行计算, 如果两种情况计算结果的差值可忽略, 这个网格划分就是满意的。

为分析网格尺寸对混凝土冲击破碎的影响, 将细化区域按照不同网格尺寸进行建模仿真。首先研究细化区域单元在一定厚度下(0.8 mm), 不同单元边长对球齿冲击过程的影响。单元尺寸及单元数量见表 1。

表1 不同网格边长的划分方案

计算方案	细化区域单元尺寸(边长×边长×厚度)/mm	单元数量
1	2×2×0.8	7436
2	0.667×0.667×0.8	23276
3	0.5×0.5×0.8	34496
4	0.4×0.4×0.8	47916
5	0.333×0.333×0.8	63536

仿真发现, 冲击接触后接触力使球齿速度逐步降低, 最后使球齿发生反弹。混凝土板同时发生变形—损伤—破碎, 冲击造成的三维应变波由接触区同时沿厚度(Y方向)和面内(XZ方向)传播。图 4、5 为计算得到的不同网格边长对应的球齿侵入过程中冲击力、冲击速度随时间 t 的变化曲线。

从图 4、5 中可以看出, 混凝土板划分为 47916 及 63536 个单元时, 冲击力曲线及冲击速度曲线非常吻合。冲击力最大误差仅为 3.05%, 冲击速度最大误差仅为 0.62%。而当混凝土板网格划分的较少时(方案 1), 冲击力曲线及冲击速度曲线误差较

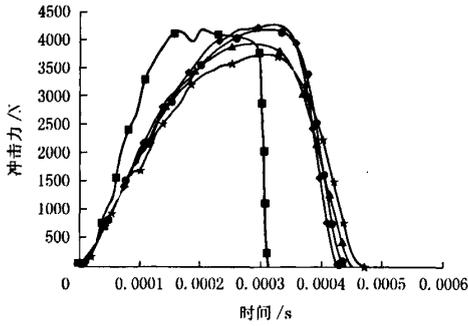


图4 冲击力曲线(不同网格边长)

■—方案1:划分 7436 个单元;★—方案2:划分 23276 个单元;▲—方案3:划分 34496 个单元;●—方案4:划分 47916 个单元;◆—方案5:划分 63536 个单元。

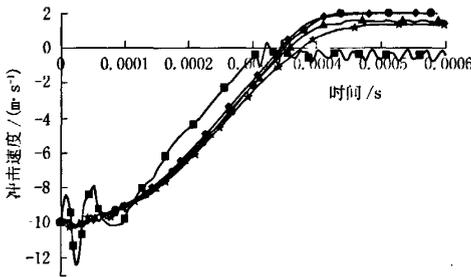


图5 球齿冲击速度曲线(不同网格边长)

■—方案1:划分 7436 个单元;★—方案2:划分 23276 个单元;▲—方案3:划分 34496 个单元;●—方案4:划分 47916 个单元;◆—方案5:划分 63536 个单元。

大,而且冲击力及冲击速度曲线均产生了较大跳跃波动,这主要是和网格的侵蚀有关,较大网格变形到一定程度时的突然侵蚀势必造成大的载荷及速度阶越,从而造成冲击力及冲击速度曲线的不平滑和峰值的不准确。

考虑到前面方案4的网格划分模型已得到了较好的收敛解,在方案4的网格边长基础上,分析不同网格厚度对冲击过程的影响。单元尺寸及单元数量见表2。

表2 不同网格厚度的划分方案

计算方案	细化区域单元尺寸(边长×边长×厚度)/mm	单元数量
A	0.4×0.4×1.2	34848
B	0.4×0.4×0.8	47916
C	0.4×0.4×0.667	64340
D	0.4×0.4×0.5	82764

图6、7为计算得到的不同网格厚度对应的球齿侵彻过程中冲击力、冲击速度随时间*t*的变化曲线。从图中可以看出,方案C与方案D得出的冲击力及冲击速度曲线基本一致。网格厚度较大时(方案A),冲击力曲线在峰值处存在一些波动,与方案D

相比,冲击力误差为3.06%。然而从图7可以看出,不同网格厚度计算得到的冲击速度曲线变化不明显。

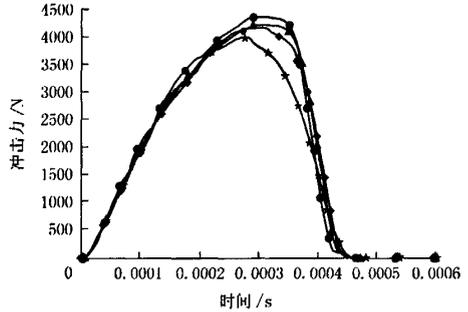


图6 冲击力曲线(不同网格厚度)

●—方案A:划分 34848 个单元;▲—方案B:划分 47916 个单元;◆—方案C:划分 64340 个单元;★—方案D:划分 82764 个单元。

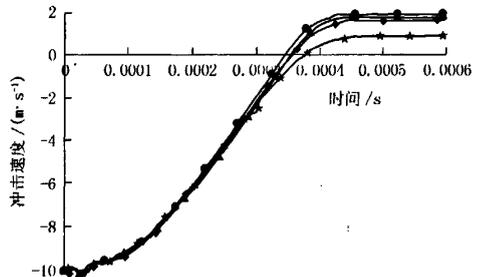


图7 冲击力曲线(不同网格厚度)

●—方案A:划分 34848 个单元;▲—方案B:划分 47916 个单元;◆—方案C:划分 64340 个单元;★—方案D:划分 82764 个单元。

图8是混凝土板在方案D网格划分条件下,混凝土板产生的破碎坑效果图。在仿真过程中发现,网格尺寸越小,破碎坑底面越为光滑。

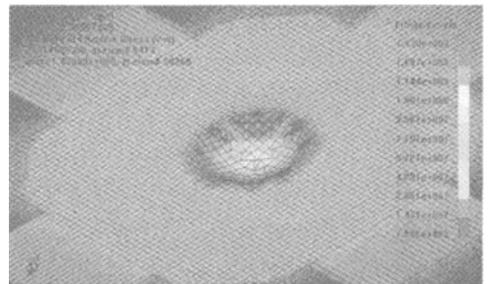


图8 混凝土板破碎坑效果图

图9是不同网格边长仿真得出的破碎坑深度。从图9中可以看出,破碎坑深度并不是随着网格边长越小而越小,当网格边长较大时,反而出现了更小的破碎深度。

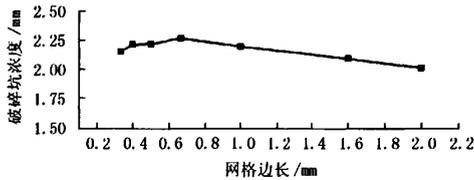


图9 混凝土板的破碎坑深度(不同网格边长)

从图10中可以看出,网格厚度对应的破碎坑深度趋势与网格边长的结果的一致。当网格厚度较小时,破碎深度的误差很小,如方案C与方案D计算的破碎坑深度分别为2.218 mm、2.216 mm,误差仅为0.09%。

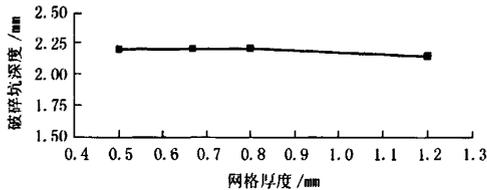


图10 混凝土板的破碎坑深度(不同网格厚度)

综上所述,要对整个潜孔锤钻头(球齿直径16 mm)的冲击过程进行仿真模拟,在建立数值模型时混凝土板(或岩石板)与球齿接触区域的网格尺寸选为0.4 mm×0.4 mm×0.667 mm即可满足计算精度要求。

3 结语

利用非线性显式三维有限元程序LS-DYNA3D对潜孔锤钻头球齿冲击混凝土板的过程进行

了数值模拟。通过对混凝土板划分不同单元尺寸网格进行仿真,发现不同尺寸的单元网格对球齿的冲击力、冲击侵入速度及混凝土的破碎坑深度均有影响。较粗的网格会导致较大的误差,然而过细的网格也并不能大幅度地提升计算精度。因此,利用有限元法研究钻头冲击破碎岩石、混凝土的问题时,需要充分考虑计算结果的精度与硬件配置的计算能力问题。

参考文献:

- [1] Akihiko Kumano. An Analytical and Experimental Investigation of the Effect of Impact on Coarse Granular Rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1982, (1).
- [2] F. E. Heuzou. An Overview of Projectile Penetration into Geological Materials with Emphasis on Rocks[J]. Internal Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1990, (1).
- [3] Behzad M H, Rohani R S. Analysis of Projectile Penetration into Concrete and Rock Targets[R]. AD/A, 016909, 1994.
- [4] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures [Z]. Defense Systems Division, Hopkins, Mimescta 55343, USA, 1985.
- [5] Johanson M. Structural Behavior in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelter. Non-linear Finite Element Analyses and Experiments [D]. Golehora, Sweden: Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, 2000.
- [6] 曹菊珍,李恩征,王政. 高速碰撞中有关混凝土与砂岩的破坏问题的数值研究[J]. 计算物理, 2002, 19(2): 137-140.
- [7] T. J Holmquist, et al. A Computational Constitutive Model for Subject to Large Strains, High Strain Rate, and High Pressures[C]. 14th International Symposium on Ballistics, 1993, 9: 591-600.

(上接第5页)

电而得到的经济效益是相当可观的(当时卢布同美元的比价是比较高的)。

9 结语

我国人口众多,资源有限,石油天然气缺口较大,但是煤炭资源比较丰富,煤炭地下气化是个新技术,很有实际意义。煤炭地下气化研究工作起步较晚,气化采煤生产工作至今没有开展起来,应该加强研究,努力探索,通过试验,早日推广才是。新奥集团公司正在计划开展这方面的工作。可以相信,他

们的气化采煤试验一定能够取得成功并在中国推广应用。钻探工程在煤炭地下气化方面是大有作为的。

参考文献:

- [1] Underground coal gasification in the Republic of Usbekistan[DB/OL]. WWW. EROSTIGAS. UZ.
- [2] Вакулев Г. Д. Подземная газификация углей в СССР и за рубежом[М]. Углетехиздат, 1957.
- [3] Скафа П. В. Подземная газификация углей [М]. Госгортехиздат, 1960.
- [4] Тучанинов И. А. Подземная газификация углей [М]. Госгортехиздат, 1961.