

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1529-05

# 顶板诱导崩落爆破效果的全景探测与评价

胡建华<sup>1,2</sup>, 周科平<sup>2</sup>, 罗先伟<sup>3</sup>, 邓红卫<sup>2</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南省深部金属矿产开发与灾害控制重点实验室, 长沙 420083; 3.柳州华锡集团铜坑矿, 广西 柳州 545000)

**摘 要:** 基于连续采矿的顶板诱导崩落技术, 采用预裂爆破控制裂隙发展区间, 强制崩顶爆破诱导顶板围岩裂隙发育、扩展, 从而诱导顶板致裂失稳的可控崩落。然而在地下采空区顶板诱导致裂失稳崩落处理采空区过程中, 预裂与崩顶爆破效果具有极大的隐蔽性, 难以进行直观可视的评价。采用钻孔摄像系统, 利用前视与全景可视技术, 对顶板诱导爆破前钻孔形态和爆破的效果进行了探测, 特别在爆破后的全景钻孔摄像, 数字化描述了钻孔的裂隙特征, 并通过钻孔摄像的图片分析评价了顶板诱导崩落爆破效果。全景探测的结果表明: (1) 预裂爆破在顶板岩体中形成了清晰可见宽为 20~40 mm 的预裂缝, 炮孔底部存在半个孔壁的预裂特征。(2) 顶板围岩中产生了大量的次生诱导微裂隙带, 裂隙交错呈“X”型, 并且原生裂隙得到了扩展。(3) 顶板诱导爆破实施后爆堆形状良好, 大量裂隙发育以及碎裂岩体结构的形成有利于顶板的诱导可控崩落。

**关 键 词:** 诱导爆破; 崩落; 钻孔摄像; 可视化

中图分类号: TD 235.39

文献标识码: A

## Panoramic inspection and evaluation of blasting effect of induction caving roof

HU Jian-hua<sup>1,2</sup>, ZHOU Ke-ping<sup>2</sup>, LUO Xian-wei<sup>3</sup>, DENG Hong-wei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Deep Mining & Disaster Control in Hunan Province, School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Tongken Mine, Liuzhou China Tin Group Company Ltd., Liuzhou Guangxi, 545000, China)

**Abstract:** Technology of blast-induced caving roof based on the successive mining, it is said that the caving zone of fracturing are controlled through the pre-splitting blasting and inducing fracture are developed by the forced blasting. With the development and expanding of the cracks, the rock mass would have been instability and caving in the roof. But, to the process of the induction caving roof by blasting in the underground mine, the effects were invisible to the pre-splitting blasting and the forced blasting. It is difficult to quantitatively evaluate the effect of blasting. Using the borehole camera system, the technique of front view and digital panorama were used to inspect the effect of blasting. The shape of the hole-wall was detected before blasting, and the effect of the inducing fracture was inspected after blasting in the hole-wall. Especially, the cracks character was described by the digital panoramic borehole camera. The photographs were analyzed by the view and digital method. The results of the digital panoramic borehole camera show: (1) The pre-splitting cracks had been formed after pre-splitting blasting. Its width is up to 20-40 mm; and the half wall of hole could be seen in the bottom. (2) Large of secondary cracks were formed in the rock mass of roof, the crack form is “X”. And the original cracks were expanded. (3) The mass shapes of blasting was right, the rock stacked by the natural angle of slope. It is advantage to induction caving roof to the large cracks and ruptured structural rock mass.

**Key words:** inducing blasting; induction caving; borehole camera; visualization

## 1 前 言

连续采矿顶板诱导崩落空区处理技术<sup>[1-4]</sup>是矿床的连续开采过程, 利用采场顶板中能量的积聚和应力集中现象, 通过人为干预、扰动和控制等活动

来诱导顶板产生一个不可逆的岩体致裂失稳发生、发展的力学过程, 从而达到处理采空区的目的, 确保地下矿山生产的安全性。目前诱导顶板致裂失稳采用对顶板部分强制爆破崩落, 预裂控制崩顶区域的爆破诱导崩落技术。然而, 对于地下矿山的顶板

收稿日期: 2009-05-07

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题 (No. Z110703); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50490274); 国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAB02B04-1-1)。

第一作者简介: 胡建华, 男, 1975 年生, 副教授, 博士后, 从事高效安全采矿技术与岩土工程稳定性研究。E-mail: hujh21@126.com

诱导崩落爆破工程而言，这种地下爆破效果难以可视和检测<sup>[5]</sup>，如顶板预裂爆破形成的预裂缝效果等。目前隐蔽工程（炮孔预检、深部爆破效果）最有效的可视化检测为钻孔摄像技术。

钻孔摄像技术经历了钻孔照相（BPC）、钻孔摄像（BVC）和数字光学成像（DBOT）3个发展阶段，是目前应用和发展较快的一种技术。国际上最具代表性的2种数字光学成像系统<sup>[6]</sup>是数字光学前景钻孔电视（OPTV及OBI-40）与数字式全景钻孔摄像系统（DPBCS），其中数字式全景钻孔摄像改变了传统侧壁观测方法，以全景、快速探测及造价低廉的特点弥补了其他钻孔摄像技术的不足<sup>[7]</sup>，观测方法更加直观，更符合人们的观察习惯。已广泛应用于岩土、采矿、土木、水利水电、地质、勘测设计、冰川研究等领域<sup>[8-11]</sup>。

通过对爆破前炮孔的钻孔摄像直观判定炮孔的质量和形态，以及爆破后的炮孔全景摄像，指导顶板诱导崩落的爆破及其效果评价。

## 2 工程概况

92号矿体目前是广西华锡集团铜坑矿开采的主矿体，属缓倾斜厚大矿体，其开采范围和规模巨大。由于其顶板上部存在细脉带矿体和91号矿体，与92号矿体三者空间结构上呈立体重叠开采模式。92号矿岩体的完整性受到91号矿体的开采活动影响损害严重。它的采场直接顶板就是开采91号矿体时的胶结或者非胶结的空区充填体，部分地段甚至是未充填的采空区，使92号缓倾斜厚大矿体的上部形成大范围的隐患区。针对这种隐患矿体的开采，提出了顶板诱导崩落连续采矿的综合技术试验研究。目前在92号矿体的T112—T115矿段开展爆破崩落部分顶板，扰动顶板围岩的稳定性，从而诱导顶板自然失稳的可控崩落工艺研究。为研究诱导爆破效果，开展了爆破后的炮孔钻孔摄像探测，探测工程位于试验采场的上方顶板的554m水平，工程场地环境与钻孔布置如图1所示。

## 3 诱导爆破参数

对铜坑矿92号矿体连续采矿顶板诱导崩落，既需考虑提高资源回收率，顶板诱导崩落滞后采矿矿段一定距离，又需诱导可控崩落安全性好，形成采空区内一定厚度的缓冲垫层，降低顶板大面积垮落出现的可能性，同时，必须体现诱导理念经济性。因此，诱导可控崩落爆破的关键在于预裂可控和强

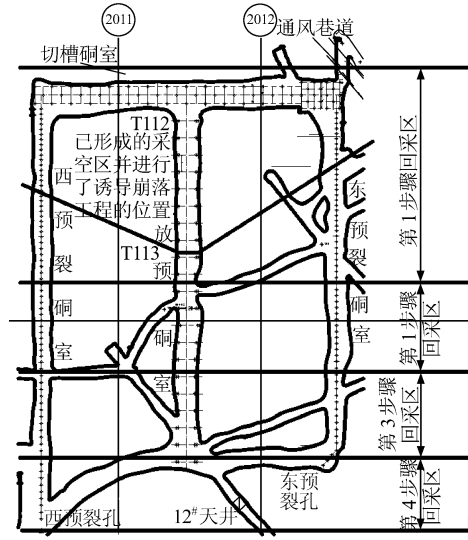


图1 工程场地和钻孔布置图

Fig.1 Engineering site and holes arrangement plan

制崩顶部分的爆破结构和起爆方式<sup>[12]</sup>。

### 3.1 炮孔直径

炮孔孔径 $D$ 的确定应综合考虑顶板内已有工程和作业安全等因素。根据诱导爆破作业水平至采空区的顶板厚度、矿内现有钻孔设备条件和尽量减少炮孔工程量的原则<sup>[13]</sup>，确定铜坑矿中等稳固以上岩层顶板诱导崩落炮孔直径 $D=165\text{ mm}$ 。

### 3.2 强制崩顶爆破参数

强制崩顶部分根据缓冲垫层初始厚度要求，确定炮孔装药长度为20m，排距取值范围为3.80~4.95m，取4.0m<sup>[13]</sup>。崩顶排炮中间两孔孔距取4.0m。因顶板诱导崩落对块度没有太大要求，排炮两边斜孔孔底距取12~18m，孔口距0.465m。倾斜角：顶板高侧为60°，顶板低侧为70°~72°。

爆破采用矿山现用乳化铵油炸药，单个药卷长度为0.6~0.8m，重12.5kg。为避免在顶板诱导处理过程中悬顶现象的发生，在诱导崩顶孔的最顶端采用加强药包，中间诱导崩顶炮孔为扇形排炮。

### 3.3 边界预裂爆破参数

当 $D > 60\text{ mm}$ 时，预裂孔孔距为1.32~1.98m，取1.4m。炸药用乳化铵油自制药卷，药卷直径为90mm，长度为0.8m，单个药卷重5.85kg。采用空气间隔装药结构，空气间隔为2.0m，预裂孔的装药深度控制在25m比较合适。为保证预裂孔间的贯通效果，在预裂孔最顶端的药包采用了加强药包或采取2~3m连续装药的方法。两侧预裂炮孔的爆破采用两侧同等范围内的预裂孔同时起爆的方式，一次爆完相应要求范围内的预裂孔。

### 3.4 起爆方式

对于顶板爆破诱导模式，研究表明，采用先预裂后强制崩顶爆破<sup>[14]</sup>，考虑作业安全，预裂与崩顶同次微差非电导爆管起爆方法<sup>[15]</sup>。

## 4 可视化探测

### 4.1 探测系统

钻孔摄像系统采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的数字式全景钻孔摄像系统，它是电子技术、视频技术、数字技术和计算机应用技术的综合集成应用，解决了钻孔内工程地质信息的采集可视化与数字分析问题。系统的总体结构由硬件和软件两部分组成，如图 2 所示。

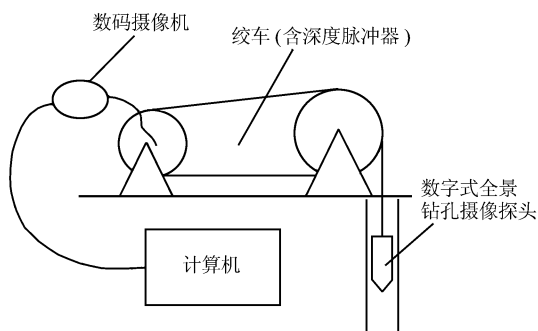


图 2 钻孔摄像系统框图

Fig.2 System chart of borehole camera

数字钻孔摄像测试过程是将探头沿钻孔壁拍摄记录后通过处理重新形成孔壁柱面的过程，利用探头内部的 CCD 摄像头，通过某种反射装置透过探头观测窗和孔壁环状间隙的空气或者井液（如清水或轻度的浑水）将探头侧方被光源照亮的一小段孔壁，连续拍摄并通过综合电缆传输到地面后叠加深度记录存储，该段孔壁图像经室内或现场数字化成图，形成完整的测井结果图像，并开展综合分析获得测井结果<sup>[16]</sup>。

### 4.2 炮孔形态检测

爆破前，为了了解炮孔的质量与形态，利用钻孔摄像系统的前视对炮孔进行可视化探测，检测钻孔的变形、孔底穿透顶板情况等，见图 3。检测结果表明，(1) 在西预裂硐室的 15 排预裂炮孔，炮孔由于受到地压作用，炮孔由圆形变为椭圆形，说明此处的地压显现比较明显，并且对预裂爆破将产生明显的方向性，见图 3(a)；(2) 炮孔内生的原生裂隙由于受到采空区的空间效应影响，得到了进一步的发育，这种裂隙存在将影响炮孔的爆破效果，需要避免炸药的直接放置此处或进行其他处理，见图

3(b)；(3) 90 % 的炮孔已经穿透了顶板，而部分未穿透顶板的炮孔，炮孔孔底岩层薄，对于炸药而言，难以承受其重量，见图 3(c)、(d)。

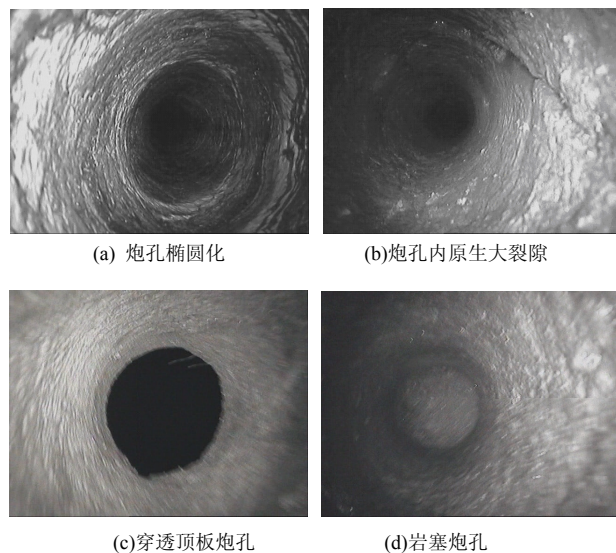


图 3 炮孔质量检测图

Fig.3 Inspecting shape picture of holes

炮孔的处理措施：对于炮孔受压变形，建议采用补孔，避免产生方向不一致的预裂缝，同时通过炮孔裂缝的定位，在装炸药时可以进行错位装药，强化爆破效果，同时将药卷间隔绑在铁丝或粗绳索上的办法下放炸药，铁丝或粗绳索每隔一定距离打结以防止药卷滑落。

### 4.3 爆破后钻孔探测

爆破后，在顶板下方的采空区，诱导崩落的爆堆形状良好，爆堆边缘部分以岩石自然安息角的形式堆放，整个爆堆在空区宽度方向呈现中间略高、两端稍低的形状，爆堆的平均厚度经崩落岩石量的估算为 16 m 左右，整个生产过程中没有发生大面积顶板突然垮落的地压灾害现象，生产安全得到有效保障。

在华锡集团铜坑矿顶板诱导崩落连续采矿试验中，为了研究顶板诱导崩落的爆破效果，对已经进行爆破后的西预裂硐室的 X37 和 X23 预裂爆破孔、崩顶硐室的 B12、B16 崩顶垂直孔以及东预裂硐室的 D23、D35 预裂爆破钻孔开展了钻孔摄像监测，具体监测位置布置见表 1。

通过全景钻孔摄像系统探测发现，在顶板诱导崩落爆破后，总体上在采空区顶板上方的探测钻孔内，通过顶板钻孔探测裂隙的形态参数，裂隙主要表现为两种不同的形式，即主裂隙和次生裂隙。从结构上发现，裂隙倾角主要以陡倾角为主，并在主

裂隙周边形成次生裂隙群。在主裂隙中主要以隙宽为 5 mm 及其以上陡倾角状的裂隙，而次生裂隙主要受到诱导形成，构成陡倾角的微裂隙带。

表 1 钻孔裂隙探测原始深度与诱导工程后实测深度  
Table 1 Depths of the original and blasted borehole

测点	钻孔原始深度	测试深度	备注
	/m	/m	
X23	53.5	11	
X37	43.6	21	已实施爆破，测点 X 代表
B12	29.6	11	表西预裂炮孔；D 代表
B16	37.0	20	东预裂炮孔；B 代表强制
D23	25.0	12	崩顶炮孔
D25	25.0	15	

在预裂孔之间形成了清晰可见的贯通预裂缝，预裂缝的宽度为 20~40 mm，基本表现为垂直连续状，并且受到崩落的影响，随炮孔深度的增加，预裂缝宽度更宽。在预裂炮孔的底部，呈现出较完整的半个孔壁，认为达到了预裂爆破控制崩落范围的设计要求（图 4）。

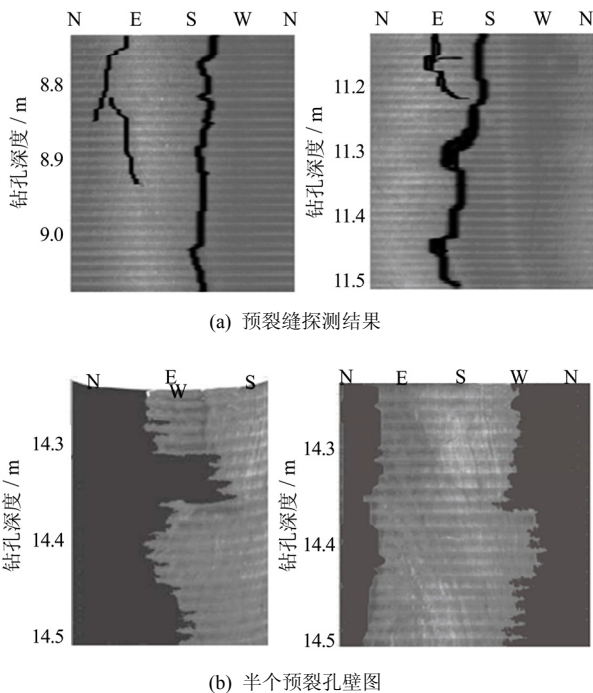


图 4 顶板诱导爆破后预裂炮孔钻孔全景图  
Fig.4 Panoramic borehole camera picture after induce blasting

诱导爆破后顶板围岩体裂隙得到了极大发育，呈现陡倾角和“X”交错的大量次生裂隙发育，原生裂隙进一步扩展，统计发现，裂隙可测迹长呈正态分布，均值在 50~60 mm 间；在诱导工程附近，裂隙频度达到 15~20 条/米，部分顶板围岩出现了

碎裂岩体结构的特征，为顶板的诱导崩落创造了裂隙发育的环境，形成可控的顶板诱导崩落（图 5）。

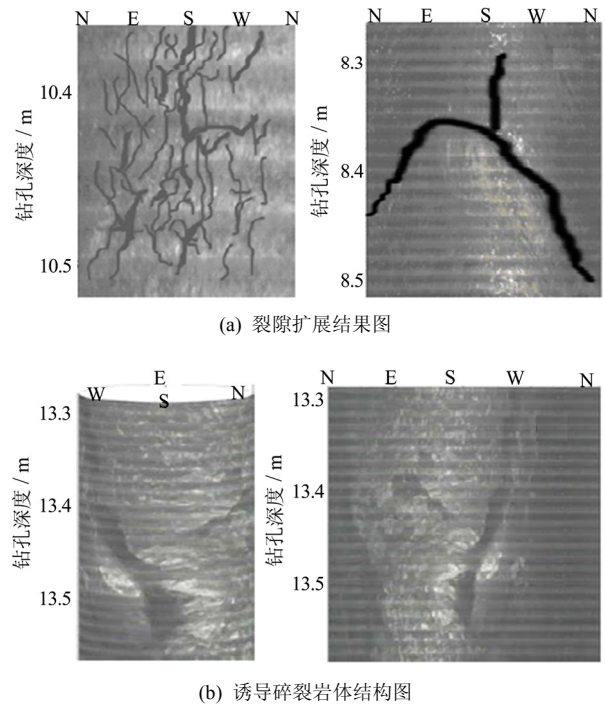


图 5 诱导爆破后顶板岩体裂隙扩展图  
Fig.5 Cracks extend picture after inducing blast

### 5 结 论

(1) 数字全景钻孔摄像系统可用于顶板爆破诱导崩落效果的可视化探测与分析，通过前视钻孔摄像可对炮孔的质量和形态进行直观可视的形态探测与评价，为提高爆破效果提供了基础数据。

(2) 诱导爆破后，在预裂区形成了清晰可见的宽为 20~40 mm 的预裂缝，在底部存在半个孔壁，说明预裂爆破达到了预定的控制顶板崩落范围。诱导爆破在顶板围岩中形成了大量的次生裂隙，其形态为交错的“X”型，对于原生裂隙，诱导崩落爆破后裂隙进一步发育，并产生碎裂岩体结构，结果表明了顶板诱导崩落爆破后形成了可控崩落。

### 参 考 文 献

[1] HU Jian-hua, ZHOU Ke-ping, LI Xi-bing, et al. Numerical analysis of application for induction caving roof[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(Supp.1): 146-149.

[2] 胡建华, 周科平, 李夕兵, 等. 顶板诱导崩落及应用的数值分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(3): 68-70.

HU Jian-hua, ZHOU Ke-ping, LI Xi-bing, et al. Numerical analysis and applying to induction caving

- roof[J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 2005, 22(3): 68—70.
- [3] 周科平, 苏家红, 古德生, 等. 复杂充填体下矿体开采安全顶板厚度非线性预测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 1094—1099.  
ZHOU Ke-ping, SU Jia-hong, GU De-sheng, et al. The nonlinear forecasting method of the least security coping thickness when mining under complex filling body[J]. **Journal of Central South University of Technology (Science and Technology)**, 2005, 36(6): 1094—1099.
- [4] 胡建华, 周科平, 古德生, 等. 基于连续采矿的顶板诱导崩落时变力学特性分析[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 157—160.  
HU Jian-hua, ZHOU Ke-ping, GU De-sheng, et al. Analysis the time-varying character of induction caving roof based continuous mining[J]. **Mining Technology**, 2006, 6(3): 157—160.
- [5] 牟宗龙, 龚林名, 张广文, 等. 坚硬顶板型冲级矿压灾害防治研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 737—741.  
MU Zong-long, DOU Lin-ming, ZHANG Guang-wen, et al. Study of prevention methods of rock burst disaster caused by hard rock roof[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(6): 737—741.
- [6] 王川婴, LAW K T. 钻孔摄像技术的发展与现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3440—3448.  
WANG Chuan-ying, LAW K T. Review of borehole camera technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 3440—3448.
- [7] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 398—403.  
WANG Chuan-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. Study of the digital panoramic borehole camera system[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 398—403.
- [8] BENNECKE W. The identification of basalt flow features from borehole television logs[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(5): 371—383.
- [9] CHEN Y Q, TAKASHI N, MICHINAO T, et al. A fluorescent approach to the identification of grout injected into fissures and pore spaces[J]. **Engineering Geology**, 2000, 56(3/4): 395—401.
- [10] 张刚艳, 张华兴, 岳国柱. 煤层开采裂缝的观测与分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 414—417.  
ZHANG Gang-yan, ZHANG Hua-xing, YUE Guo-zhu. Observation and analysis of fissures in overburden strata induced by coal mining[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 414—417.
- [11] 何迈, 甘国权, 唐文坚. 水下摄像(水下电视、钻孔电视)在工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1842—1844.  
HE Mai, GAN Guo-quan, TANG Wen-jian. Application of water television system to water conservancy engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.): 1842—1844.
- [12] 胡建华, 苏家红, 周科平, 等. 顶板诱导崩落模式选择时变数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 887—891.  
HU Jian-hua, SU Jia-hong, ZHOU Ke-ping, et al. Time-varying numerical analysis of the mode in induction caving roof[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 887—891.
- [13] 张成良, 李新平, 米健, 等. 损伤光面层爆破参数确定及数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(7): 86—89.  
ZHANG Cheng-liang, LI Xin-ping, MI Jian, et al. Numerical analysis and parameters option based on damage in smooth blasting[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2006, 28(7): 86—89.
- [14] HU Jian-hua, SU Jia-hong, ZHOU Ke-ping, et al. Evaluation and time-varying mechanical numerical analysis to induction caving roof[C]//Proceedings in Mining Science and Safety Technology. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2007, (A): 48—54.
- [15] 龚杰. 宽孔距小抵抗线多排孔微差爆破技术[J]. 爆破, 2001, 18(2): 37—38.  
GONG Jie. An example of wide-space millisecond multiple-row holes blasting[J]. **Blasting**, 2001, 18(2): 37—38.
- [16] 魏立巍, 秦英译, 唐新建, 等. 数字钻孔摄像在小浪底帷幕灌浆检测孔中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 843—848.  
WEI Li-wei, QIN Ying-yi, TANG Xin-jian, et al. Application of digital borehole camera to quality test boreholes for grout curtain in Xiaolangdi Water Control Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 843—848.