

# 9 孔桶形掏槽一次成井技术

赵国彦, 赵井清, 李启月

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 为解决一次成井中天井断面小、深度低的问题, 提出 9 孔桶形掏槽一次成井技术。通过对掏槽爆破机理研究, 选取了 4 空孔掏槽方式, 装药孔与空孔直径分别为 0.11、0.25m, 掏槽孔与空孔间距 0.46m 等爆破成井主要参数。采用非线性动力分析软件 LS-DYNA 对 9 孔桶形掏槽一次成井的关键—掏槽过程进行了数值模拟, 实现了 9 孔桶形掏槽槽腔形成过程的可视化。模拟结果表明, 成井参数选取合理, 主掏槽孔能与空孔有效贯通形成“莲花形”槽腔, 副掏槽孔能以“莲花形”槽腔为自由面进一步扩大槽腔。最后在理论分析和数值模拟基础上, 以某露天矿为工程实例, 对所取参数进行现场实验, 一次爆破形成了 23.4m 天井, 天井断面 4m×4m, 证明数值模拟结果准确, 该技术在深孔一次成井中可行。

**关键词** 桶形掏槽; 一次成井; 数值模拟; 工程实例

**中图分类号** TD235

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.16.005

## Nine-hole Parallel Cutting Technology of the Shaft Excavation in One-step

ZHAO Guoyan, ZHAO Jingqing, LI Qiyue

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** To solve the problem of the small section and the low altitude in the shaft excavation, the nine-hole parallel cutting technology of the shaft excavation in one-step is proposed in this paper. Firstly, according to the rock failure mechanism in cutting blasting, the main parameters of the shaft excavation are identified. The parallel cutting method works on modes of four empty holes and the diameters of the hole and the empty hole are 0.11m and 0.25m, respectively, and the distance between the cutting hole and the empty hole is 0.46m. Then, the numerical stimulation of the cutting blasting, as the key of the nine-hole parallel cutting mode technology of the shaft excavation, is carried out by the LS-DYNA 3D software and the cavity formation can be visualized. The results of the numerical stimulation show that the parameters are reasonable so that the lotus-shaped cutting cavity can be formed by the main cutting hole blasting and the auxiliary cutting hole can further expand the cavity size. Finally, based on the theoretical analysis and the numerical stimulation and with the engineering case of the shaft excavation by blasting in an open-pit mine in mind, the field experiment is carried out with the selected parameters and a 23.4m patio is formed with section of 4m×4m. The results of the experiment have verified the accuracy of the numerical stimulation and the feasibility of this technology of the shaft excavation in one-step.

**Keywords** parallel cutting; shaft excavation in one-step; numerical stimulation; engineering case

### 0 引言

一次成井是利用钻机一次性钻凿炮孔并由下至上一次全断面爆破的天井掘进方法。由于其安全、经济、高效的特点在工程中广泛应用并取得一定成功, 如龙潭地下厂房通过直眼掏槽一次成井技术形成了 8m 天井<sup>[1]</sup>; 山东新汶矿业通过全深度一次成井技术形成了 13.2m 天井<sup>[2]</sup>。但目前国内外一次爆破所成天井断面小、深度低, 20m 以上一次成井大多为失败案例, 如 Homestake 金矿通过直眼掏槽一次爆破形成 21m 天井<sup>[3]</sup>, 但因掏槽参数选取不当成井失败。因此, 对于大断面、高深度来说, 一次成井技术研究意义重大。

掏槽是一次成井的核心, 掏槽参数选取不当是导致成井失败的主因, 为此许多学者对掏槽进行了大量研究。Shapiro<sup>[4]</sup>对直眼掏槽、楔形掏槽和分阶掏槽 3 种掏槽方式的掏槽效率进行了比较, 认为在孔深小于 2.5m 的软岩中楔形掏槽效率最高; 张奇等<sup>[5]</sup>通过模拟实验分析了空孔直眼掏槽爆破机理, 提出装药孔和空孔间的最佳距离关系式; 戴俊<sup>[6]</sup>根据岩石压缩破坏和剪切破坏的力学准则, 推导了掏槽眼间距的理论计算公式; 李廷春等<sup>[7]</sup>结合直眼和斜眼掏槽的优点提出含抛渣眼的楔形掏槽方式, 并在实践中取得良好的爆破效果; 郑祥滨等<sup>[8]</sup>通过 LS-DYNA 软件研究了单螺旋掏槽成腔过程的压力

收稿日期: 2013-01-23; 修回日期: 2013-02-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209402); 国家重点实验室开放基金项目(SKLG200906)

作者简介: 赵国彦, 教授, 研究方向为采矿工程、矿山安全和岩石力学与工程, 电子信箱: 312929122@qq.com

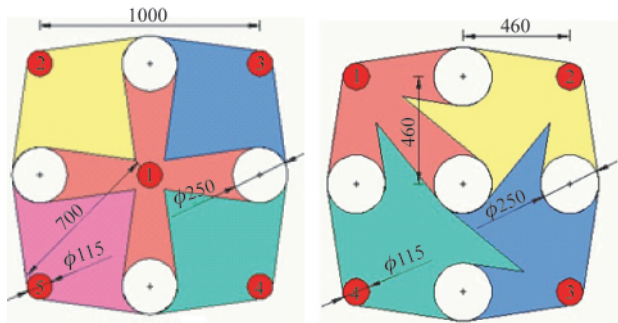
传播过程;周传波等<sup>[9]</sup>模拟了坚硬岩石条件下深孔一次成井的4种掏槽方式(9孔、双孔菱形、单螺旋、双螺旋),提出单螺旋掏槽方式的优化模型;李启月等<sup>[10]</sup>对直眼掏槽破岩过程进行了数值模拟,并对掏槽中空孔效应进行了分析。总结前人研究成果,大多是针对浅孔掏槽,对于大断面、高深度一次成井掏槽的研究尚少。

为此,本文以某露天矿23m一次成井项目为依托,提出9孔桶形掏槽一次成井技术。通过对9孔桶形掏槽成井理论分析,选取了成井参数;同时对9孔掏槽进行数值模拟,实现了槽腔成形过程可视化;最后进行现场实验,实验取得良好效果,且与数值模拟结果基本相符,为大断面、高深度一次成井技术的应用奠定了基础。

## 1 9孔桶形掏槽成井理论分析与参数确定

### 1.1 掏槽方式

合适的掏槽方式选取是掏槽成功的前提。目前,9孔桶形掏槽炮孔布置主要有4空孔和5空孔两种,典型的炮孔布置如图1所示。



(a) 4空孔掏槽 (a) Four empty holes cut  
(b) 5空孔掏槽 (b) Five empty holes cut

图1 典型的9孔掏槽炮孔布置(单位:mm)

Fig. 1 Typical layout of nine-hole cutting (unit: mm)

掏槽方式可根据炮孔补偿系数进行选择,补偿系数  $n$  为

$$n = S_{\text{空}} / S_{\text{实}} \quad (1)$$

式中,  $S_{\text{空}}$  为有效补偿空间横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $S_{\text{实}}$  为爆破岩石实体横截面积,  $\text{m}^2$ 。2种典型的9孔桶形掏槽方式炮孔补偿系数计算结果见表1。

表1 2种掏槽方式的炮孔补偿系数

Table 1 Compensation coefficient of two cutting modes

掏槽方式	炮孔补偿系数				
	1	2	3	4	5
4空孔掏槽	0.81	2.04	3.09	4.13	5.18
5空孔掏槽	0.80	1.24	2.28	3.39	

### 1.2 掏槽孔与空孔直径关系

在掏槽爆破中,空孔作为掏槽孔的自由面和补偿空间。由于空孔的存在,掏槽孔爆破属于单自由面下漏斗爆破,爆

破后形成的槽腔形状类似于爆破漏斗。掏槽孔与空孔直径关系如图2所示,可得

$$\frac{D}{d} = \frac{2E_1 + 2E_2 + D}{2E_1 + d} \quad (2)$$

式中,  $D$  为空孔直径,  $\text{m}$ ;  $d$  为掏槽孔直径,  $\text{m}$ ;  $E_1$  为爆破漏斗锥顶与掏槽孔孔边距,  $\text{m}$ ;  $E_2$  为掏槽孔与空孔孔边距,  $\text{m}$ 。

爆破漏斗的形成存在压缩破坏区、拉伸破坏区、剪切破坏区,故  $E_2 > 0$ , 则式(2)可变为

$$\frac{D}{d} \geq \frac{1 + \sin\alpha}{1 - \sin\alpha} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为爆破漏斗锥顶角的  $1/2$ , ( $^\circ$ )。

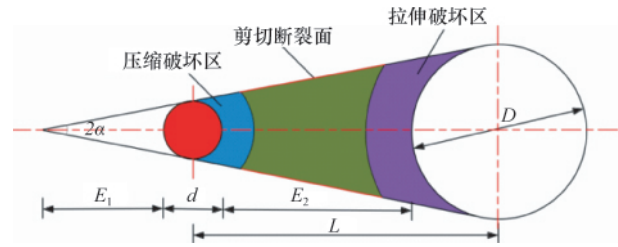


图2 掏槽孔与空孔直径的关系

Fig. 2 Relationship between the diameters cutting hole and empty hole

掏槽孔爆破不仅需要破碎岩体,还需将岩渣向空孔抛掷以形成槽腔,故掏槽孔爆破满足减弱抛掷爆破条件,即  $\tan 2\alpha \geq 0.75$ 。代入式(3),可得空孔与掏槽孔直径关系:

$$\frac{D}{d} \geq 1.92 \quad (4)$$

### 1.3 掏槽孔与空孔间距关系

当掏槽孔直径和空孔直径一定时,二者之间的孔心距  $L$  成为能否形成槽腔的关键因素。 $L$  越大,夹制性越强,可能出现补偿空间不够、爆破被“挤死”现象; $L$  越小,炮孔施工难度越大,形成的槽腔面积越小,不利于后续炮孔爆破。

#### 1.3.1 基于补偿空间理论计算 $L$

空孔需容纳掏槽孔爆破破碎的岩渣,按图2所示关系可得:

$$L = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(D^2 + d^2)(K + 1)}{(D + d)(K - 1)} \quad (5)$$

式中,  $L$  为掏槽孔与空孔孔心距,  $\text{m}$ ;  $K$  为岩石碎胀系数,取2.0。

#### 1.3.2 基于炮孔偏斜理论计算 $L$

炮孔底端最小抵抗线须在经验许可范围内,由经验公式有

$$L = \frac{2\mu H \eta}{1 - \mu} \quad (6)$$

式中,  $H$  为天井高度,  $\text{m}$ ;  $\mu$  为炮孔偏斜系数,按经验取0.5;  $\eta$  为炮孔偏斜率,取1%。

### 1.4 辅助孔位置

当天井直径大于2.0m时,需布置辅助孔,以破碎掏槽孔外围岩体<sup>[11]</sup>。为保证辅助孔能独立破碎和抛掷它所分担部分

的岩体,其需满足自由面系数  $f \geq 0.8$ 。 $f$ 由下式计算:

$$f = \frac{b}{W} \quad (7)$$

式中, $b$ 为爆破自由面距离,m; $W$ 为装药最小抵抗线,m。

### 1.5 炮孔布置

为能一次爆破形成高深度、大断面天井,炮孔补偿系数和槽腔面积应越大越好。根据表1对9孔桶形掏槽两种炮孔布置的比较,本文选择4空孔掏槽方式。由露天矿钻孔设备参数和式(4)中掏槽孔与空孔直径关系,掏槽孔和空孔直径分别取  $d=0.11\text{m}$ 、 $D=0.25\text{m}$ 。由式(5)和式(6)计算所得  $L$  分别为  $0.488\text{m}$  和  $0.46\text{m}$ ,综合考虑取  $L=0.46\text{m}$ 。根据式(7)中自由面系数关系式,辅助孔需满足关系  $W \leq 1.15\text{m}$ ,设计应考虑一定余量,故辅助孔与空孔间距离取  $1.0\text{m}$ 。由于所成天井规格为  $4\text{m} \times 4\text{m}$ ,故在天井4个顶角处布置4个周边孔。天井断面炮孔布置如图3所示。

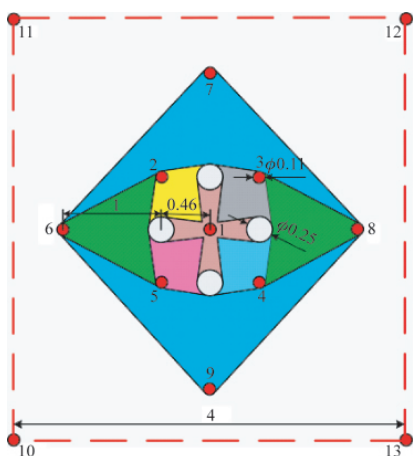


图3 炮孔布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of holes (unit: m)

## 2 掏槽过程数值模拟

为验证参数设计的合理性,采用LS-DYNA 3维非线性动力分析有限元程序对深孔桶形掏槽一次成井的核心—掏槽过程进行数值模拟。本文采用流固耦合算法,模型中炸药和空气采用 Euler 网格,岩石和炮泥采用 Lagrange 网格,岩石材料与炸药和土壤材料间进行耦合分析。

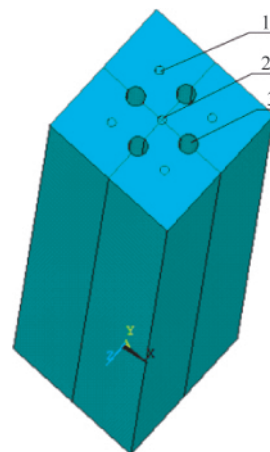
### 2.1 材料模型

爆破近区岩石发生塑性破坏,故岩石选择塑性随动模型<sup>[24]</sup> \*MAT\_PLASTIC\_KINE\_MATIC。某露天矿岩石为砂卡岩,其物理力学参数为:密度  $3.471 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,弹性模量  $78.3\text{GPa}$ ,泊松比  $0.22$ ,抗压强度  $173.1\text{MPa}$ ,抗拉强度  $8.72\text{MPa}$ 。炸药选用 2# 岩石乳化炸药,其材料模型选为 \*MAT\_HIGH\_EXPLOSI VE\_BURN, 状态方程为 JWL 方程,炸药具体参数为:密度  $1.24 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,爆速  $5.5 \times 10^3 \text{m/s}$ ,CJ 压力  $9.7\text{GPa}$ , $A$  和  $B$  分别为  $214.4\text{GPa}$  和  $0.182\text{GPa}$ , $R_1$  和  $R_2$  分别为  $4.2$  和  $0.9$ ,初始内

能为  $4.192\text{GPa}$ 。空气材料模型采用 \*MAT\_NULL 状态方程,运用此状态方程可对空气膨胀和压缩时单元是否失效进行判断;炮泥状态方程选用 \*MAT\_SOIL\_AND\_FORM。空气密度取  $1.2\text{kg/m}^3$ ,炮泥密度取  $1.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,炮泥弹性模量取  $1.6 \times 10^4 \text{GPa}$ ,泊松比为  $0.2^{[8]}$ 。

### 2.2 有限元计算模型

9孔桶形掏槽具有对称性,选取模型的1/4进行网格划分,并根据相似原理<sup>[5]</sup>,按1:10的比例取计算模型,完整的几何模型如图4所示。利用8节点的六面体 SOLID164 单元分别对岩石、炸药、空气、炮泥进行网格划分,总共15400个单元。为避免边界处波的反射对求解域的影响,对模型的侧面施加无反射边界条件,上下底面作为自由面不添加任何边界条件。孔间采用微差间隔起爆,主掏槽孔超前4个副掏槽孔2ms起爆。添加失效准则 \*MAT\_ADD\_EROSION,程序将自动删除失效单元,以清晰显示槽腔动态形成过程。



1—副掏槽孔;2—主掏槽孔;3—空孔

图4 9孔桶形掏槽几何模型

Fig. 4 Geometric model of nine-hole parallel cutting

### 2.3 模拟结果及分析

数值模拟结果如图5所示,图(a)~(d)表示主掏槽孔爆破过程,图(e)~(h)表示4个副掏槽孔爆破过程。可以看出,主掏槽孔能与空孔贯通形成“莲花形”槽腔,副掏槽孔能进一步扩大槽腔,9孔桶形掏槽能在23m一次成井中取得良好的掏槽效果。槽腔具体形成过程如下:在  $t=9\mu\text{s}$  时,应力波以柱面波形式向周围呈辐射状传递,此时空孔未受到较大扰动; $t=23\mu\text{s}$  时,应力波传至空孔周围,主掏槽孔附近岩体受冲击波作用发生压缩破坏; $t=68\mu\text{s}$  时,空孔附近应力波发生反射导致岩体拉伸破坏,且此时主掏槽孔附近岩体不断破坏,爆腔逐渐扩大,并向空孔方向扩展,此时爆腔与4个空孔近似呈“莲花形”,与图3所示的槽腔形状基本一致; $t=152\mu\text{s}$  时,主掏槽孔与空孔贯通,应力不断释放,爆生气体与岩渣混合形成的两相流撞击空孔壁,并沿炮孔轴向抛渣,形成槽腔。图(e)~(h)4个过程与(a)~(d)基本类似。

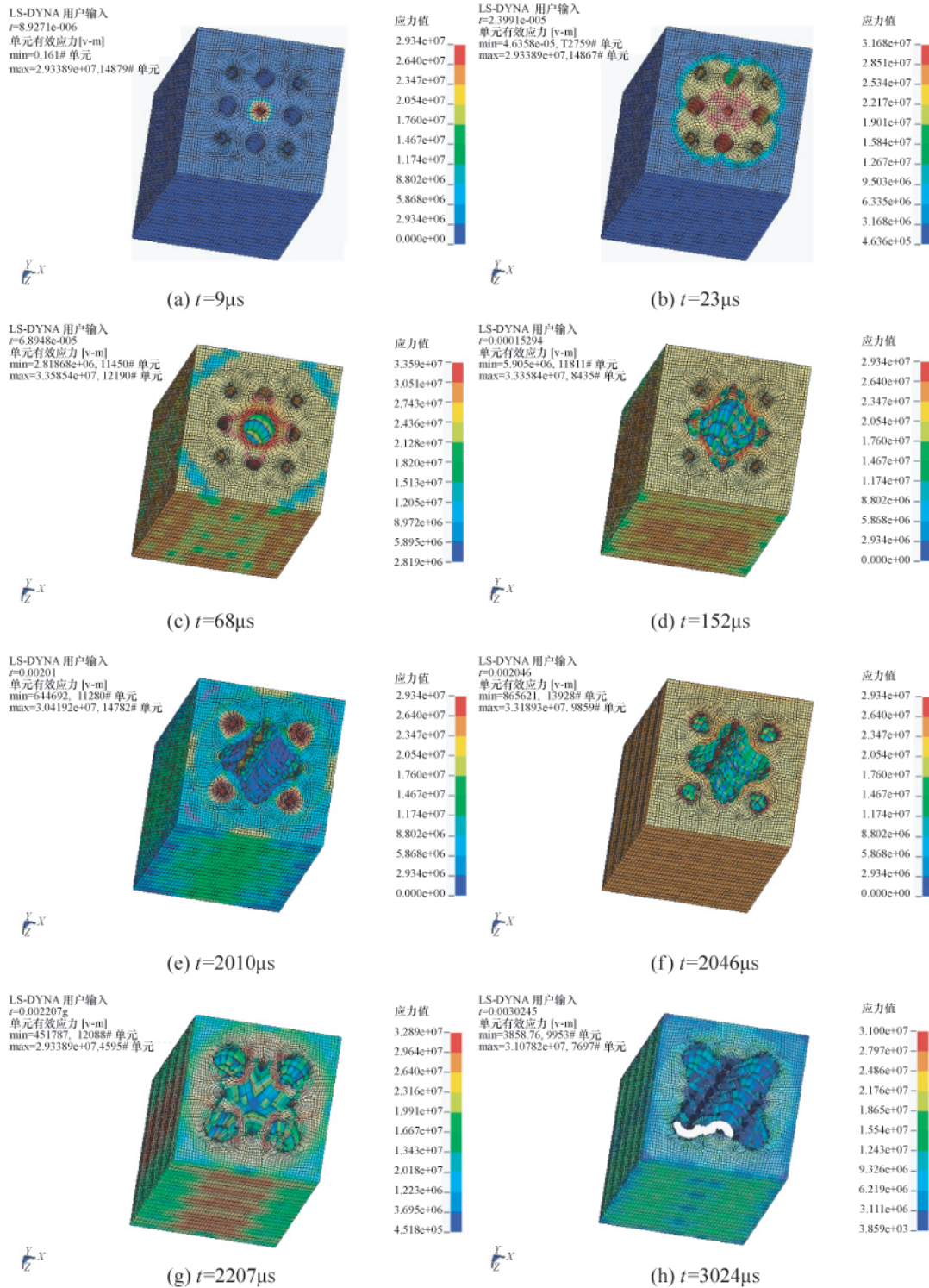


图 5 9 孔桶形掏槽腔形成过程

Fig. 5 Cavity formation process of 9-hole parallel cutting

### 3 工程实例分析

#### 3.1 实验地点

在理论分析和数值模拟研究基础上,在某露天矿进行了 9 孔桶形掏槽成井实验。实验前采用空区激光自动扫描设备 (CALS) 扫描 3 道庄露天矿成井地段空区,并通过比较各空区

扫描结果,最终选择在 1354 水平 N1# 空区的中心进行实验,空区形状如图 6 所示。空区尺寸  $33.37\text{m}\times 16.1\text{m}\times 7.8\text{m}$ ,按岩渣堆积角  $40^\circ$  计算,空区可容纳岩石体积  $1334\text{m}^3$ 。估算爆破后的岩渣松散体积为  $588\text{m}^3$ ,远小于空区可容纳体积,满足成井要求。

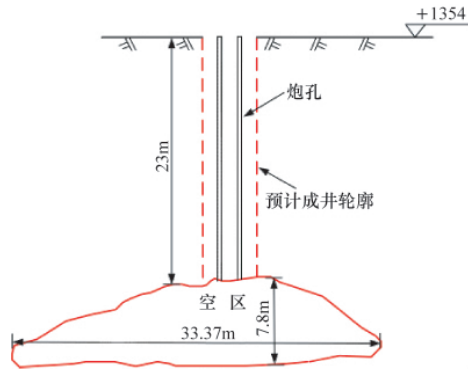


图 6 N1# 空区形状

Fig. 6 Shape of N1# cavity

### 3.2 实验施工

严格按照设计进行施工, 直径 250mm 空孔和直径 110mm 装药孔分别采用牙轮钻、潜孔钻钻凿, 空孔和装药孔偏斜率分别为 0.45% 和 0.9%, 均满足实验要求。实验共钻凿空孔和装药孔长度分别为 95 和 196m。掏槽孔采用间隔装药, 辅助孔和周边孔连续装药, 共装药 1573kg, 整体单耗为 4.59kg/m<sup>3</sup>。

### 3.3 实验效果

爆破后, 所成天井如图 7(a) 所示。待天井周围岩体稳定后, 对所成天井进行扫描, 扫描结果如图 7(b) 所示。可以看出, 成井效果良好, 爆堆块度均匀, 天井一次贯透下伏采空区; 天井断面宽 4.7~5.9m, 天井高 23.4m, 与设计相符; 受岩体节理裂隙薄弱面影响, 天井轮廓不够规整, 但基本满足充填井的要求。

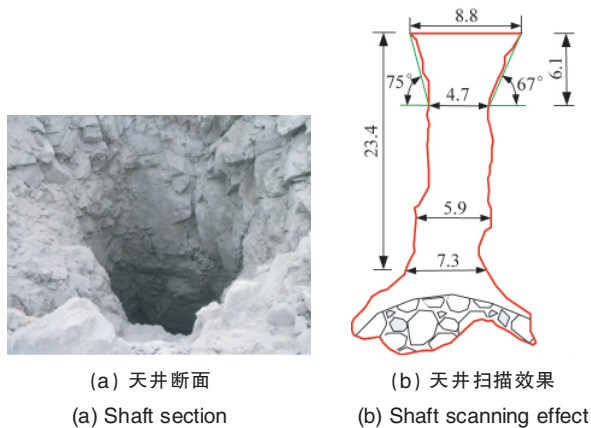
(a) 天井断面  
(a) Shaft section(b) 天井扫描效果  
(b) Shaft scanning effect

图 7 成井效果 (单位: m)

Fig. 7 Effects of shaft blasting (unit: m)

## 4 结论

(1) 根据爆破漏斗理论, 得出掏槽孔与空孔直径应满足  $D/d \geq 1.92$ ; 辅助孔位置可根据炮孔自由面系数  $f \geq 0.8$  确定。

(2) 数值模拟实现了槽腔成形过程的可视化。数值模拟结果证明 9 孔桶形掏槽参数选取合理, 主掏槽孔能与空孔有效贯透, 主掏槽孔爆破后槽腔呈“莲花形”。

(3) 通过现场工业实验一次爆破形成了 23.4m 天井且爆渣块度均匀, 说明数值模拟结果准确, 9 孔桶形掏槽技术在深孔一次成井中可行。

### 参考文献 (References)

- [1] 李伟泉. 一次爆破成井在龙滩地下厂房开挖中的应用[J]. 爆破, 2008, 25(1): 29-31.  
Li Weiquan. Blasting, 2008, 25(1): 29-31.
- [2] 高文乐, 黄博, 毕卫国, 等. 井下矸石仓全深度一次爆破成井技术[J]. 爆破, 2011, 28(1): 40-44.  
Gao Wenle, Huang Bo, Bi Weiguo, et al. Blasting, 2011, 28(1): 40-44.
- [3] Sterk P V. Development of drop raise blasting at Homestake mine[C]// International Society of Explosives Engineers. Proceedings of the 17th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Las Vegas, NE: Society of Explosive Engineers, 1991: 239-250.
- [4] Shaprio V Y. Efficiency of cut configuration in driving tunnels with a set of deep blast holes[J]. Journal of Mining Science, 1989, 25(4): 379-386.
- [5] 张奇, 杨永琦, 金乾坤, 等. 直眼掏槽爆破机理若干问题研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(3): 284-287.  
Zhang Qi, Yang Yongqi, Jin Qiankun, et al. Journal of China Coal Society, 1997, 22(3): 284-287.
- [6] 戴俊, 杨永奇. 三角柱直眼掏槽爆破参数研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 364-368.  
Dai Jun, Yang Yongqi. Explosive and Shock Waves, 2000, 20 (4): 364-368.
- [7] 李廷春, 刘洪强. 煤矿下山巷道爆破掘进技术试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 35-40.  
Li Tingchun, Liu Hongqiang. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 35-40.
- [8] 郑滨滨, 璩世杰, 范利华, 等. 单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2589-2594.  
Zheng Xiangbin, Qu Shijie, Fan Lihua, et al. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2589-2594.
- [9] 周传波, 谷任国, 罗学东. 坚硬岩石一次爆破成井掏槽方式的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2298-2303.  
Zhou Chuanbo, Gu Renguo, Luo Xuedong. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2298-2303.
- [10] 李启月, 徐敏, 范作鹏, 等. 直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. 爆破, 2011, 28(4): 23-26.  
Li Qiyue, Xu Min, Fan Zuopeng, et al. Blasting, 2011, 28(4): 23-26.
- [11] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011: 184-246.  
Li Xibing. Drilling and blasting engineering [M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 184-246.
- [12] John H O. LS-DYNA theoretical manual-version 970 [R]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2005.
- [13] Hallquist J O. Theoretical manual for dyna 3D university of California [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1982.
- [14] 石少卿, 康建功, 汪敏, 等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 20-31.  
Shi Shaoqing, Kang Jianguo, Wang Min, et al. Engineering application of ANSYS/LS-DYNA in explosion and shock fields[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 20-31.
- [15] Lee L E, Homing C, Kury J W. Lawrence livermore laboratory report UCRL-50442 [R]. Berkeley, CA: University of California Radiation Laboratory, 1986.

(责任编辑 王媛媛)