分层不掏槽爆破在下山巷道掘进中的试验研究

杨　帆[1]，张少波[2]，胡坤伦[3]

（1.安徽江南爆破工程有限公司，安徽 宣城　242300；2.南京科工煤炭科学技术研究有限公司，江苏 南京　210000；
3.安徽理工大学 化学工程学院，安徽 淮南　232001）

摘　要：针对煤矿下山巷道钻爆法掘进中普遍存在的循环进尺小、炮孔利用率低、爆后矸石堆积工作面、留底严重等问题，提出一种分层不掏槽爆破技术。基于高速摄影和掏槽破岩理论，通过试验对比，分析了直眼掏槽、楔形掏槽、不掏槽 3 种形式的爆破破岩效果优劣；并使用 ANSYS/LS-DYNAY 有限元软件，对实际工程中不掏槽单孔爆破时的炮孔内岩石连续损伤演化累积过程进行数值模拟。在实际煤矿下山巷道掘进施工中，采用楔形加直眼掏槽和分层装药、同时起爆、不掏槽 2 种爆破方案，进行现场试验。通过对掘进进尺、炮孔利用率、光爆效果、抛渣距离、矸石块度等指标的对比分析，评价设计方案，优选出综合指标最佳的爆破方案。采用此方案，能将月进尺提高 13%以上，并能大大提高出矸效率。

关键词：下山巷道；分层不掏槽爆破；数值模拟；钻爆法

中图分类号：TD236　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002-6029(2019)06-0004-06

Test and Study on Slicing No-cut Blasting Applied to Heading of Mine Dip Roadway

YANG Fan[1], ZHANG Shaobo[2], HU Kunlun[3]

(1.*Anhui Jiangnan Blasting Engineering Company Limited*, *Xuancheng*　242300, *China*; 2.*Nanjing Coal Science and Technology Research Company Limited*, *Nanjing*　210000, *China*; 3.*School of Chemical Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*　232001, *China*)

Abstract: According to a small circulated footage and a low utilization of the blasting boreholes generally existed in the drilling and blasting heading of the tip roadway in the coal mine as well as the waste rock pile left in the heading face after the blasting, many rock waste left on the ground floor and other problems, a slicing no-cut blasting technology was provided. Based on the high speed photography and the cut blasting rock-breaking theory, with the comparison between the tests, the paper had an analysis on the advantages and disadvantages of the three type blasting rock breaking effects with the parallel cut, wedge cut and no cut. The ANSYS/LS-DYNAY finite element software was applied to the numerical simulation on the continued damage evolution accumulation process of the rock in the blasting borehole during the no-cut single borehole blasting of the actual engineering. In the heading of the tip roadway in the actual coal mine, a site test was conducted with two blasting planes of the wedge and parallel cut and layer charge, synchronous detonation and no-cut. With the comparison analysis on the heading footage, borehole utilization rate, smooth blasting effect, waste rock throwing distance, waste rock size and other indexes, the design plan was evaluated and the optimum plan with the comprehensive indexes was optimized. With the optimized plan, the month heading footage could be improved over 13% and the waste rock discharging efficiency could be highly improved.

Key words: mine dip roadway; slicing no-cut blasting; numerical simulation; drilling and blasting method

收稿日期：2019-02-25　　**DOI：**10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.2019.06.002

作者简介：杨　帆（1990—），男，安徽枞阳人，硕士研究生。Tel：15956658840，E-mail：15956658840@sina.cn

引用格式：杨　帆，张少波，胡坤伦．分层不掏槽爆破在下山巷道掘进中的试验研究[J]．建井技术，2019，40(6)：4-9.

0　引　　言

目前，我国矿山井巷掘进主要采用钻爆法施工，爆破效果受制于多种条件，如围岩性质、作业空间、瓦斯条件和爆破参数等。下山巷道是煤炭开采的必要通道之一，提高巷道掘进速度，对于确保采掘正常接续具有重要意义。下山巷道掘进，普遍采用浅孔爆破或分台阶爆破方法，掏槽爆破效果不理想，存在爆破进尺小、炮眼利用率低、留底严重、爆后矸石堆积工作面、爆破断面不规整等问题，严重影响掘进速度。在现有条件下，如何利用已有设备、器材，创新掏槽爆破方式和优化爆破参数，实现高效爆破，仍是下山巷道掘进中需要重点研究的内容。

国内外学者以岩石爆破破碎理论为基础[1-4]，对掏槽爆破理论和炮眼布置等技术[5-11]做了深入研究，取得了许多成果。在掏槽爆破理论方面，董方庭等研究了直眼掏槽和斜眼掏槽各自优缺点[2]；张奇等研究了直眼掏槽爆破效果影响因素[4]。在炮眼布置理论方面，宗琦等提出了合理确定岩巷掘进炮眼数目的方法，以及解决下山巷道留底严重的双排底眼的爆破设计方案[5-7]；单仁亮等提出了准直眼掏槽爆破新方法及其爆破参数[8-9]；李廷春等设计了含抛渣眼的新型楔形掏槽结构[10]。笔者将分层不掏槽爆破方法应用于煤矿下山巷道掘进中，通过构建巷道模型，设计合理孔网参数，对比分析中间空孔直眼掏槽、楔形掏槽和分层不掏槽 3 种掏槽爆破方法的爆破效果和爆炸在岩石内部产生的应变差异，研究强夹制作用下的掏槽方式对爆破破岩块度大小的影响，并用于指导生产实践[11-14]。

1　试验部分

在无缝钢管内浇筑水泥砂浆，形成巷道模型，内径 40 cm，高 50 cm，壁厚 8 mm，如图 1 所示。模拟砂岩材料，根据相似理论，配比为 1∶2∶0.6（水泥∶砂石∶水）。材料经充分搅拌后，注入模具中，振动成型，预留炮孔深度 200 mm，直径 8 mm。模型试件按标准条件养护 28 d，实测其物理力学性质，见表 1。

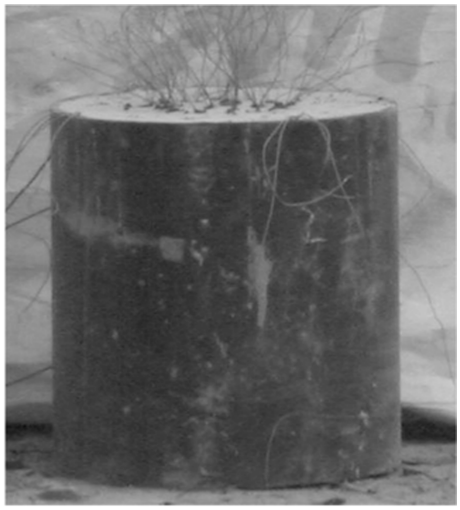


图 1　模拟巷道模型

表 1　巷道模型物理力学参数

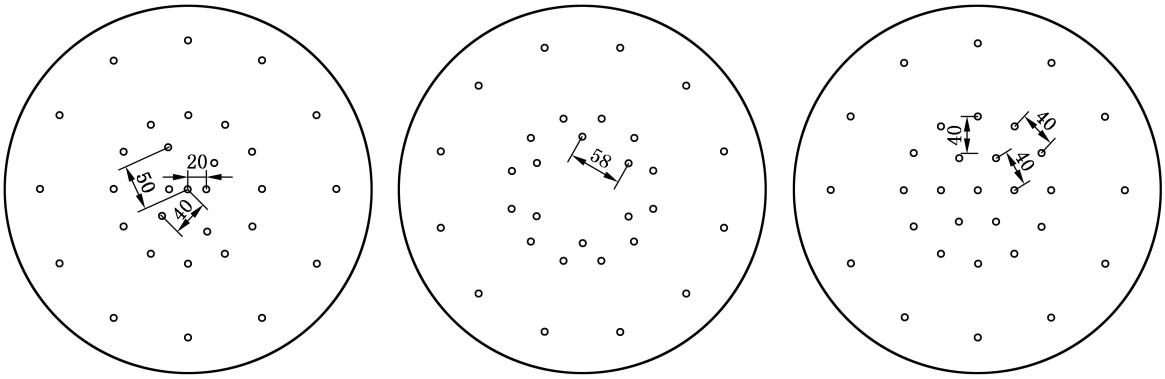
密度/（g·cm^{-3}）	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	纵波速度/（m·s^{-1}）
2.33	3.245	0.26	42.43	1.84	3 844.3

爆破材料采用淮南舜泰化工厂生产的同批次 MS1-5 段 8 号工业电雷管 100 发、未钝化的黑索金 500 g。根据相似比例，预留炮孔直径应为4.2 mm。但由于受到雷管直径限制，试验炮孔直径采用 8 mm。由于周边孔靠近钢管内壁，为避免边界效应影响，周边孔未装药。

（1）直眼掏槽参数设计。掏槽孔 7 个，直径 12 mm，桶形布置方式，采用不耦合集中装药结构，使用 2 发 1 段 8 号工业电雷管加 2 g 黑索金；辅助孔 12 个，与中心掏槽孔间距为 80 mm，孔间距为 42 mm，采用不耦合集中装药结构，使用 2 发 3 段 8 号工业电雷管，药量共 48 g（含雷管药量，按 1 g 计算），如图 2(a)所示。

（2）楔形掏槽参数设计。掏槽孔 6 个，倾角 75°，孔口相距 58 mm，孔底相距 22 mm，采用不耦合集中装药结构，使用 2 发 1 段 8 号工业电雷管加 2 g 黑索金；辅助孔 12 个，与中心点间距为 80 mm，孔间距为 42 mm，采用不耦合集中装药结构，使用 2 发 3 段 8 号工业电雷管，药量共 48 g（含雷管药量，按 1 g 计算），如图 2(b)所示。

（3）不掏槽爆破参数设计。除周边孔外，炮孔采用全断面均匀布置方式，间、排距均为 40 mm。炮孔内分上、下 2 段装药、堵塞、起爆，下段装药使用 3 段 8 号工业电雷管加 0.5 g 黑索金，上段装药使用 1 段 8 号工业电雷管，药量共 47.5 g（含雷管药量，按 1 g 计算），如图 2(c)所示。



(a)直眼掏槽爆破 (b)楔形掏槽爆破 (c)不掏槽爆破

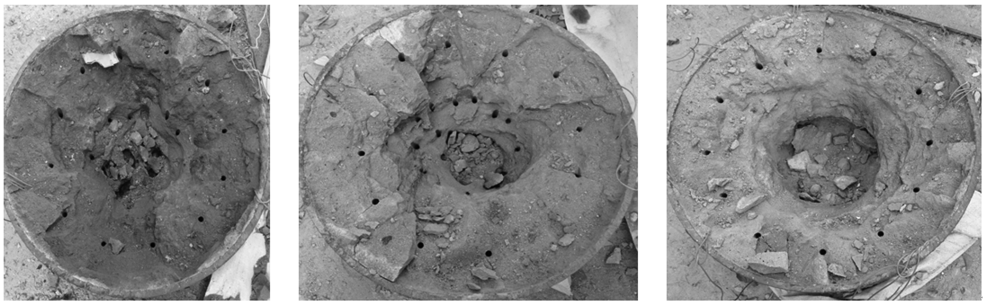
图 2 掏槽孔布置示意

通过对孔网参数和装药量的调整，优化了爆破参数，见表 2。

表 2 优化后的爆破参数

掏槽方法	分段数量/个	孔间距/mm	堵塞长度/mm	掏槽孔个数	辅助孔个数	掏槽孔药量/g	辅助孔药量/g	总药量/g
直眼掏槽	1	40～50	50	7	12	4	2	48
楔形掏槽	1	40～50	50	6	12	4	2	48
不掏槽	2	40～50	50	0	19	0	2.5	47.5

按照优化后的爆破参数，进行掏槽爆破与不掏槽爆破的模拟试验，试验结果得以准确展现，如图 3 所示。



(a)直眼掏槽爆破
平均残孔高度20.5 mm
炮孔利用率89.75%

(b)楔形掏槽爆破
平均残孔高度15 mm
炮孔利用率92.5%

(c)不掏槽爆破
几乎无残孔
炮孔利用率近100%

图 3 爆破效果对比

巷道模型中的水泥砂浆材料四周与底面受到无缝钢管强约束，只有顶部 1 个自由面。对于掏槽爆破，自由面首先由中心掏槽孔爆破形成。根据利文斯顿爆破漏斗理论，掏槽爆破属于减弱抛掷爆破漏斗，即漏斗半径 r＞最小抵抗线 W。掏槽爆破后，自由面的数量由 1 个增加到 2 个。因此，掏槽孔爆破效果直接影响自由面的形成。对于不掏槽爆破，群柱状药包同段起爆，使最小抵抗线 W 减小，即漏斗半径 r≥最小抵抗线 W，形成加强抛掷爆破漏斗。上段药柱爆破后，形成新的自由面，漏斗半径 r 仍然大于最小抵抗线 W，仍为加强抛掷爆破漏斗。因此，不掏槽爆破形成的槽腔体积大于掏槽爆破形成的槽腔，有利于提高炮孔利用率。

在相同的试验条件下，掏槽爆破和不掏槽爆破试验结果，充分证明在不掏槽爆破过程中，始终是加强抛掷爆破漏斗，因而爆破后，槽腔体积大，炮孔利用率高。

2 数值模拟

2.1 模型建立与参数选取

为了给煤矿巷道钻爆法施工中采用不掏槽爆破设计及参数选取提供科学依据，以 ANSYS 有限元分析软件的 LS-DYNAY 显示动力分析模块为依托，建立井下岩石爆炸破碎损伤模型，进行不掏槽爆破时的炮孔内岩石连续损伤演化累积过程模拟。

模拟研究主要涉及 3 种材料：岩石、炸药和空气。考虑到现场深部岩石力学特性复杂，同时为简化计算求解过程，将岩石假设为弹塑性材料，采用 HJC 损伤型本构模型，岩石物理力学参数根据测试结果确定，见表 3。

表 3　岩石物理力学参数

密度/（g·cm^{-3}）	失效应变	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
2.33	0.06	3.2	0.26	80	2.0

爆炸材料（炸药）模型选用 * MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN，定义 JWL High Explosive 为炸药方程，即

$$P_{\mathrm{eos}}=A\left(1-\frac{w}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{w}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{wE_0}{V}$$

式中：P_{eos}为爆轰产物压力；A，B，R_1，R_2，w 为与炸药性质相关的常数；V 为相对体积；E_0为初始比内能。

采用煤矿三级许用水胶炸药，具体参数见表 4。

表 4　炸药状态方程参数

密度/（g·cm^{-3}）	爆速/（m·s^{-1}）	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	w	E_0/GPa
1 200	4 000	420	0.44	3.55	0.16	0.41	3.15

忽略空气介质作用，炸药和岩石 2 种材料均采用欧拉网格来建立模型，单元采用多物质 ALE 算法。计算中所采用的单位：长度为 cm，质量为 g，时间为 μs；导出单位：密度为 g/cm^3，应力为 10^5 MPa，速度为 cm/μs，能量为 10^5 J。

根据工程实际，采用 SOLID164 单元，建立三维立体模型，模型尺寸 5 m×1 m×1 m。模型上面、后面和 2 个侧面施加无反射边界条件；后面与 2 个侧面进行固定约束，来模拟爆破时受到的夹制作用。模型下面为对称面，在该面节点上，施加对称约束。炮孔直径 42 mm，长度 3 m。药卷直径 35 mm，正向装药，装药长度 2.5 m，堵塞长度 500 mm（孔口 300 mm，中间 200 mm），初始应力波压力 10 MPa。

2.2　模拟结果与分析

炸药起爆后，不同时刻的岩体损伤分布云图如图 4 所示。图中，t 为起爆后时间。由图中可知，炸药起爆后，岩体损伤区及破碎区不断扩展。当 $t=50$ μs 时，岩体损伤半径为 12.92 cm；当 $t=100$ μs 时，岩体损伤半径为 21.87 cm。

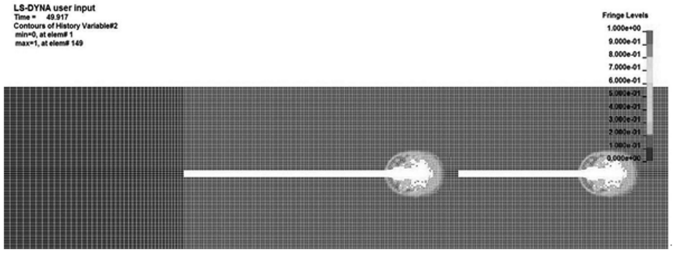
炸药起爆后，不同时刻对应的岩体损伤半径分布如图 5 所示。由图中可知，$t=0\sim200$ μs 时，岩体损伤半径与时间成正比，且扩展速率基本恒定；$t=200\sim500$ μs 时，损伤区半径扩展速率逐渐变慢，直至减小到 0。炸药起爆后，造成炮孔周围岩体破碎、破裂，破裂区半径为 0.5 m 左右。

由图 4(e)(f)可知，炮孔周围岩体内损伤区是以孔口为端点，呈类似椭圆体分布，装药段范围大，堵塞段开始收缩，表明爆炸形成的破裂区也是呈类似椭圆体分布；在孔底形成一定程度超挖，上层爆破会冲压下层堵塞体和炸药，改变炸药装填线密度，影响爆破效果。因此，应选择低于正常线装药密度作为上层爆破参数，以减小上层先爆破对下层炸药的冲击作用；应选择足够密实的堵塞体、合理的堵塞长度和合适的炸药装填线密度，作为下层爆破参数，以防因炸药密度过大而形成瞎炮。

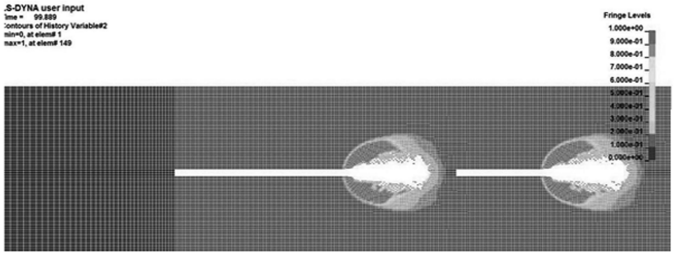
3　工程实例

下山巷道断面为直墙半圆拱形，净断面尺寸为 5.0 m×4.0 m（宽×高），设计长度 1 710.4 m，设计坡度 8°下山、18°下山，0‰、3‰下坡。巷道处于结构简单的 10 煤底板中，煤层厚度 2.0～3.85 m，平均 2.9 m。巷道围岩以粉砂岩和细砂岩为主，煤（矿）尘有爆炸危险性，赋存煤炭为Ⅱ类易自燃煤。巷道掘进过程中，无冲击地压影响。

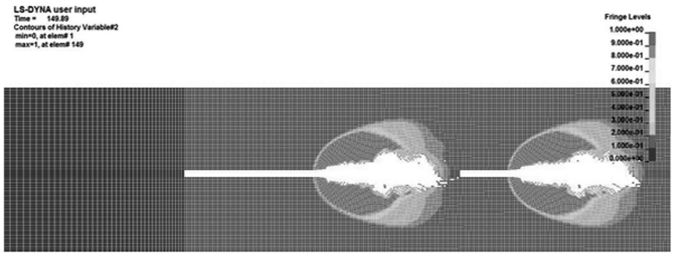
不掏槽爆破原理：将掏槽、崩落和周边光爆 3 步改为崩落和周边光爆 2 步。其中崩落用于形成洞身，使掘进向前推进；周边光爆用于修整洞壁，形成较规整的断面轮廓。工作面除周边孔外，所有炮孔均匀布置和装药，孔间实施群柱状药包同段起爆；孔内利用微差爆破原理，按一定的微差间隔，分段顺序起爆，从而实现爆破岩体分段破岩、抛掷，降低夹制力，增加有效破碎力。



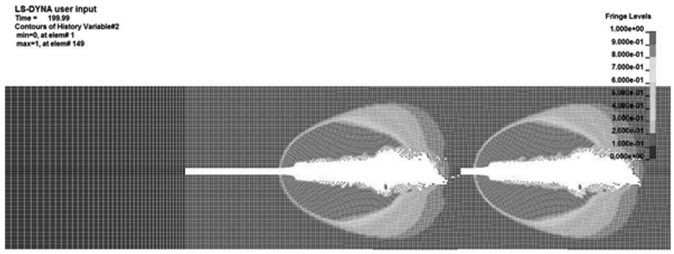
(a)t=0. 05 ms



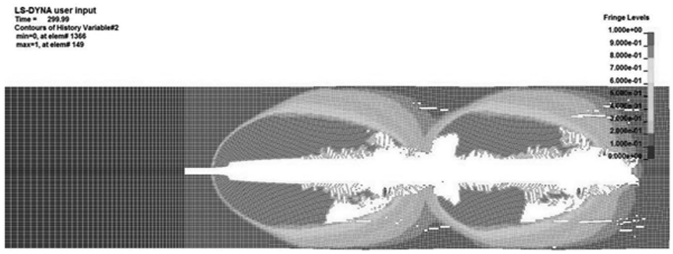
(b)t=0. 10 ms



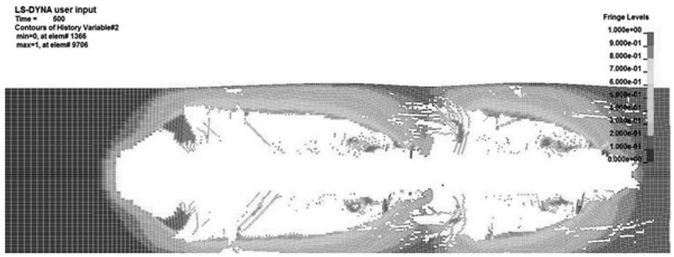
(c)t=0. 15 ms



(d)t=0. 20 ms



(e)t=0. 30 ms



(f)t=0. 50 ms

图 4 起爆后不同时刻对应的岩体损伤分布云图

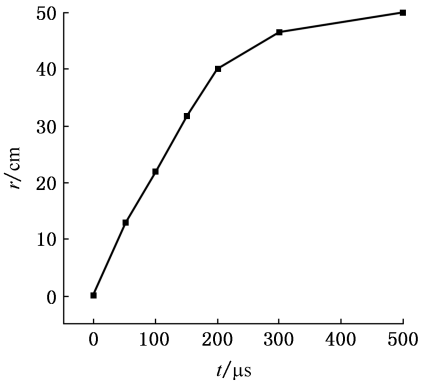


图 5　起爆后不同时刻对应的岩体损伤半径分布

试验采用 2 种爆破掘进方案：一种为楔形与直眼结合掏槽爆破，掏槽孔深度 2 m，其余炮孔深度 1.8 m，掏槽孔先起爆；另一种为均匀布孔，分层装药，同层同时起爆，所有炮孔深度均为 2 m。2 种爆破方案的底孔倾角均为 84°，周边孔倾角均为 87°；掏槽孔和辅助孔直径均为 40 mm；均使用 ϕ32 mm 水胶药卷、8 号工业瞬发电雷管。2 种爆破方案爆破参数及效果见表 5。

表 5　2 种爆破方案爆破参数及效果对比

项目名称	掏槽爆破	分层爆破	变化量
炮孔深度/m	1.8	2.0	11.1%
炮孔利用率/%	83.3	85.0	2.0%
循环进尺/m	1.5	1.7	13.3%
光面爆破效果	较好	较好	—
抛掷距离/m	8	15	87.5%
放炮时间/h	6	6	0
破碎块度	大块多	块度小且均匀	—
循环药量/(kg·m^{-1})	28.7	30.2	5.2%
雷管用量/(发·m^{-1})	55.6	63.0	13.3%
使用雷管段数	4	3	−1

4　结　　语

(1)进行了“不掏槽、直眼掏槽与楔形掏槽爆破的实验室模拟对比试验”。试验结果充分证明了不掏槽爆破过程中，始终是加强抛掷爆破漏斗，因而爆破后，槽腔体积大，炮孔利用率高。

(2)不掏槽孔爆破时，爆炸形成的破裂区以孔口为端点，呈类似椭圆体分布，在孔底形成超挖。上层爆破一定程度上会冲压下层堵塞体和炸药，改变炸药装填线密度，影响爆破效果。因此，应选择足够密实的堵塞体、合理的堵塞长度和合适的炸药装填线密度，以防因炸药密度过大而形成瞎炮。

(3)分层均匀爆破参数选取：炮孔 46 个，不设掏槽孔，断面均匀布置。炮孔水平间距 600 mm，排距 500 mm。炮孔深度 2～2.2 m，每个炮孔内装药 2 段，2 发雷管起爆。各段连续正向装药，以黄泥、水炮泥作为封堵材料；中间炮泥根据情况，封堵长度为 300～400 mm。爆破网路采用左右对称串联，再行并联。分层均匀爆破能取得良好的爆破效果，爆破块度均匀、无大块，抛渣距离远，可减少工作面矸石堆积。

受爆破器材及试验现场条件限制，本文结论仅为分层不掏槽爆破机制研究提供了定性和半定量化信息；还需对分层不掏槽爆破方式继续开展理论研究和进行更多现场应用，包括机械化钻孔、优化爆破参数、全断面一次爆破等，并收集钻、爆、运于一体的综合成本数据。

参考文献：

[1]　王文龙．钻眼爆破[M]．北京：煤炭工业出版社，1984：222-226.

[2]　董方庭，姚玉煌，黄　初，等．井巷设计与施工[M]．徐州：中国矿业大学出版社，1994.

[3]　钱七虎．岩石爆炸动力学的若干进展[J]．岩石力学与工程学报，2009，28(10)：1945-1968.

[4]　张　奇，杨永琦，员永峰，等．直眼掏槽爆破效果的影响因素分析[J]．岩土力学，2001，22(2)：144-147.

[5]　宗　琦，任庆峰．煤矿硬岩下山巷道掘进中深孔爆破技术试验研究[J]．爆破，2011，28(2)：49-52.

[6]　袁自仲．小断面硬岩巷道快速掘进[J]．建井技术，2011，32(6)：23-24.

[7]　马宏伟，王梦想，宗　琦，等．关于煤矿下山巷道掘进全断面一次爆破若干技术问题研究[J]．安徽理工大学学报，2016，36(5)：11-14.

[8]　单仁亮，黄宝龙，魏振廷，等．岩巷掘进准直眼掏槽爆破模型实验研究[J]．岩石力学与工程学报，2012，31(2)：256-264.

[9]　单仁亮，周纪军，黄宝龙，等．巷道掏槽爆破影响因素分析[J]．煤炭科学技术，2010，38(2)：25-27.

[10]　李廷春，刘洪强．煤矿下山巷道爆破掘进技术试验研究[J]．岩石力学，2012，33(1)：35-40.

[11]　王昌建．井巷不掏槽爆破模拟试验研究[D]．淮南：安徽理工大学，2001.

[12]　杨　帆．煤矿巷道无掏槽掘进的实验研究[D]．淮南：安徽理工大学，2015.

[13]　左进京，杨仁树，肖成龙，等．煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J]．矿业科学学报，2018，3(4)：335-341.

[14]　潘井澜．利文斯顿爆破漏斗理论及其应用[J]．隧道译从，1978(5)：14-18.