

# 松软岩体数码电子雷管深孔爆破高效成井研究\*

陈辉<sup>1</sup>, 张晓丹<sup>1</sup>, 佟晓勇<sup>2</sup>

(1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆乌鲁木齐 830017; 2. 新疆地质工程有限公司, 新疆乌鲁木齐 830023)

**摘要:** 针对松软岩体条件下传统分段爆破作业效率低、安全性差、成本高等问题, 开展了数码电子雷管深孔爆破高效成井技术研究。以备战铁矿6号切割井为工程背景, 针对19.3 m切割井深的松软破碎岩体, 创新设计两次分段上向深孔快速成井爆破方案。通过理论计算确定了孔间延时50 ms、层间延时300 ms等关键爆破参数, 采用大直径空孔127 mm作为补偿空间, 装药孔直径76 mm, 合理设计了炮孔布置和起爆顺序。现场试验结果表明: 爆破后顶断面规整, 顶板完整性好, 爆破块度均匀, 实测高度达到设计要求。技术经济分析显示: 相比普通法掘进, 深孔爆破法成本降低53%, 节约时间6天, 施工效率显著提高。2次分段爆破有效减少了对破碎岩体的频繁扰动, 避免了岩石垮落, 结合数码电子雷管的精确起爆控制, 大幅提升了作业安全性。

**关键词:** 深孔爆破; 高效成井; 松软岩体; 数码电子雷管

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.08.30.0002

**中图分类号:** TD824 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)01-0106-010

**引文格式:** 陈辉, 张晓丹, 佟晓勇. 松软岩体数码电子雷管深孔爆破高效成井研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2026, 43(1): 106-115.

**英文引文格式:** Chen Hui, Zhang Xiaodan, Tong Xiaoyong. Study on efficient well formation by digital electronic detonator deep hole blasting in loose and soft rock body[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2026, 43(1): 106-115.

## Study on Efficient Well Formation by Digital Electronic Detonator Deep Hole Blasting in Loose and Soft Rock Body

Chen Hui<sup>1</sup>, Zhang Xiaodan<sup>1</sup>, Tong Xiaoyong<sup>2</sup>

(1. School of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;

2. Xinjiang Geological Engineering Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830023, China)

**Abstract:** To address the low efficiency, poor safety, and high costs associated with traditional segmental blasting in soft rock conditions, research is conducted on high-efficiency deep-hole blasting techniques using digital electronic detonators. Taking the No. 6 cutting shaft at the Beizhan iron ore mine as the engineering context, an innovative two-stage upward-directed deep-hole rapid shaft sinking blasting plan is designed for the 19.3-meter-deep cutting shaft in soft, fractured rock. Through theoretical calculations, key blasting parameters are determined, including a 50-millisecond inter-hole delay and a 300-millisecond inter-layer delay. A large-diameter empty hole (127 mm) is utilized as a compensation space, with a charge hole diameter of 76 mm. The blast hole layout and initiation sequence are rationally designed. Field test results demonstrate: the top surface remains well-defined after blasting, with good roof integrity and uniform block size. The measured height meets design requirements. Technical-economic analysis reveals: compared to conventional tunneling methods, deep-hole blasting reduces costs by 53%, saves 6 days of construction time, and significantly improves operational efficiency. The two-stage blasting approach effectively minimizes frequent disturbance to the fractured rock mass, preventing rock falls. Combined with precise detonation control using digital electronic detonators, this method substantially enhances operational safety.

**Key words:** deep hole blasting; efficient well formation; a loose rock mass; digital electronic detonator

\* 收稿日期: 2025-08-30; 修回日期: 2025-12-20; 录用日期: 2025-12-27.

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区科技计划项目-重点研发专项“露天矿穿孔爆破全过程智能化关键技术及成套装备研发”(2024B01005); 新疆维吾尔自治区科技厅天山创新团队项目“关于精确延时破岩机理与关键技术的研究”(2020D14043).

**作者简介:** 陈辉(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿山开采与安全的研究, E-mail: chenhui@xju.edu.cn.

## 0 引言

新疆煤炭资源储量极为丰富,约占全国总量的40%<sup>[1]</sup>。随着浅部资源逐渐枯竭,矿山开采正向深部和复杂地质条件延伸,对高效、安全、低成本的开采技术需求日益迫切。天井施工是矿山开采工程中的关键环节,承担通风、提升、采矿切割及充填等重要功能,其工程量约占矿山年度掘进总量的20%~25%。然而,传统天井掘进方法普遍存在效率低、劳动强度大、安全风险高等问题。普通法、吊罐法或爬罐法工序繁琐、环境恶劣、成本高昂;钻井法工作环境相对安全,但施工机械有待完善,应用受限<sup>[2]</sup>。特别是在松软破碎岩体条件下,传统方法频繁扰动围岩,易引发垮落事故,施工人员长期暴露在直接顶板下作业,安全隐患突出。故研发适用于复杂地质条件的高效成井技术具有重要的现实意义。

深孔爆破成井技术因高效、安全、经济等优势,逐渐成为天井施工的重要发展方向。研究表明,深孔爆破法成本仅为普通法的40%、钻井法的30%,效率达到普通法的141%、钻井法的128%<sup>[3]</sup>。该技术起源于20世纪50年代,经过数十年发展,在爆破参数优化、掏槽方式选择、延时时间计算等方面取得了显著进展。李祥龙等<sup>[4]</sup>通过数值模拟研究了分层一次爆破成井的精确延时参数,建立了基于爆破振动控制的延时优化方法。周传波等<sup>[5]</sup>针对坚硬岩石开展了掏槽方式的数值模拟研究,揭示了槽腔形成机理。董越权等<sup>[6]</sup>进行了盲天井掏槽爆破成腔试验,优化了补偿空间设计方法。近年来,数码电子雷管因精确延时、安全可靠、可编程控制等优势,在深孔爆破领域得到广泛关注。李洪伟等<sup>[7]</sup>通过相似模型试验与现场试验相结合的方法,研究了隧道爆破中掏槽孔与辅助孔之间的精确延时问题,验证了精确延时电子雷管的优越性,确定了最佳延时范围为15~25 ms,为爆破延时参数优化提供了依据。李文东等<sup>[8]</sup>在塞尔维亚紫金铜业成功应用了数码电子雷管中-深孔爆破一次成井技术,验证了其在复杂地质条件下的可靠性。然而,现有研究多集中在坚硬岩体或中等稳定岩体,针对松软破碎岩体的深孔爆破成井研究相对匮乏。松软岩体具有强度低、完整性差、易垮落等特点,对爆破参数设计、钻孔偏斜控制、补偿空间设置等提出了更高要求,传统爆破方法容易造成超欠挖、顶板失稳等问题,亟需开展针对性研究。

针对松软破碎岩体深孔爆破成井的技术难题,本文以备战铁矿6号切割井为工程背景,开展数码电子雷管深孔爆破高效成井技术研究。针对19.3 m切割井深的松软岩体,创新设计两次分段上向深孔快速成井爆破方案,通过理论计算确定孔间延时、层间延时等关键爆破参数,采用大直径空孔作为补偿空间,合理优化炮孔布置和起爆顺序。基于现场试验,系统分析松软岩体条件下的爆破效果和技术经济指标,验证数码电子雷管分段爆破在减少围岩扰动、提高施工安全、降低工程成本方面的显著优势。研究成果为松软破碎岩体条件下的深孔爆破成井提供了理论依据和实践参考,对推动数码电子雷管在复杂地质条件下的推广应用具有重要意义。

## 1 工程概况

备战铁矿位于中国新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州和静县,隶属和静县备战矿业有限责任公司。L3矿体总体呈中间厚、向周缘逐渐变薄的脉状矿体,局部出现膨大缩小、分支复合的特性。矿体呈近东西展布,产状北倾,总体表现为上陡下缓,平均倾角为53.5°。

备战铁矿L3矿体及其围岩属于典型的松软破碎岩体,给深孔爆破成井带来诸多技术难题。矿体顶底板岩性主要以绿帘石化砂卡岩、磁铁矿化砂卡岩、晶屑凝灰岩为主,还包括大理岩、凝灰岩、闪长岩、英安岩、集块岩等。矿体顶板多为软弱岩石,磁铁矿体为软弱岩石;矿体底板均为半坚硬岩石,个别为半坚硬岩石、坚硬岩石,岩石相对较破碎,岩体完整性差。磁铁矿体顶底板岩石稳固性属中等类别,部分属差类别。备战铁矿为裂隙充水为主、水文地质条件中等-复杂的矿床。

采场设计采用分段空场法,矿块垂直矿体走向布置,矿房宽度12 m,矿柱宽度8 m,中段高度48/60 m,凿岩分段高度24/18 m,矿块长度40 m,顶柱高度6 m。厚度大于40 m的矿体,按照上下盘划分盘区,盘区间柱8 m,由上盘向下盘后退式开采。CM3表示3号采场,深孔成井区域为破碎带,对钻孔带来一定挑战。传统普通法掘进需要频繁进入工作面作业,在爆破扰动作用下,松软岩体抗剪强度低,易发生片帮、冒顶等失稳事故。其右侧进行普通法(浅孔)成井施工,完成3个循环(6 m),但周围破碎岩体塌落,导致成井失败,存在较大风险。选用深孔爆破成井法可以减少对爆破岩体的频繁扰动,避免造成岩石垮落。故选此处进行深孔成井试验,深孔

成井位置如图1所示.



图1 深孔成井位置示意图

Figure 1 Schematic diagram of deep hole formation location

## 2 深孔爆破成井爆破参数

深孔爆破快速成井指按照天井的高度钻一组平行深孔,根据井深按照一次或多次装药爆破,完成掘进<sup>[7]</sup>.

### 2.1 堵塞方式、装药结构与延时时间设计

合理的炮孔堵塞与装药结构是高效利用爆破能量、形成预期槽腔的关键. 岩石破碎由爆炸冲击波和爆生气体共同作用完成<sup>[8]</sup>. 合理的炮孔堵塞长度有助于延长爆轰压力的作用时间,提高能量利用率,并减少有毒气体产生<sup>[9]</sup>. 结合理论计算与现场实践,确定炮孔堵塞位置距孔底距离为0.8~1.6 m. 具体堵塞方式为:孔底采用水泥塞封堵,使用铁丝将空矿泉水瓶吊放至孔底固定,再于孔口回填1.0~1.5 m的细河砂.

装药结构根据不同岩性选择不同爆速的炸药,并保证岩石顺利从掏槽中抛出<sup>[10]</sup>. 选好首响掏槽孔的相关参数至关重要,避免堵死<sup>[11]</sup>. 在松软破碎岩体中钻进时,钻孔容易沿软弱面偏斜,孔位精度难以保证. 孔位偏差直接影响装药结构和起爆网络设计,增加了爆破方案的不确定性. 为稳妥起见,试验采用多孔粒状铵油炸药进行快速装药. 该炸药在76 mm直径炮孔中的线装药密度分别为4.76 kg/m和6.53 kg/m. 装药时,炸药通常均匀布置,并采用空气间隔装药结合全程导爆索的结构.

延时时间的精确设计对保证先爆炮孔为后续爆破提供足够的补偿空间至关重要,其核心是确保岩渣充分排出后再起爆后续炮孔<sup>[12-13]</sup>. 合理的延时时间计算方式为

$$T = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{2w}{C_p} + \frac{L_f}{C_f} + \frac{B_w}{V_{cp}} + \frac{Y}{V_f}, \quad (1)$$

式中: $T$ 为有空孔掏槽爆破合理延时时间,s; $t_1$ 为槽腔内岩石破碎所需时间,s; $t_2$ 为岩石碎渣抛向空孔并充满槽腔的时间,s; $t_3$ 为岩石碎渣受爆生气体余压膨胀而排弃形成的有效爆腔时间,s; $w$ 为最小抵抗线,0.7 m; $C_p$ 为岩石纵波速度,4 000 m/s; $L_f$ 为裂缝长度,m, $L_f = 1.4w$ ; $C_f$ 为裂隙扩展平均速度,m/s, $C_f = 0.38C_p$ ; $B_w$ 为裂纹宽度,0.008~0.01 m; $V_{cp}$ 为岩块移动速度,20 m/s; $Y$ 为岩石抛掷距离,m(对于周边孔和辅助孔, $Y=w$ ;对于单阶掏槽孔或抛渣孔, $Y$ 为阶段高度,3.3 m); $V_f$ 为破碎岩石平均飞行速度,137~155 m/s.

通过式(1)计算得出,同层掏槽孔间合理延时时间应不小于25.6 ms. 为保证槽腔形成可靠,孔间延时时间取50 ms. 同理,计算层间延时时间:同层通常有4~6个段位,最后一段延期时间为200~300 ms,为稳妥起见,层间延时时间取300 ms.

### 2.2 炮孔参数设计及布置

松软岩体的力学参数离散性大,爆破作用下的裂纹扩展规律与坚硬岩体存在显著差异. 传统的爆破参数

计算公式多基于中等稳定岩体,直接用于松软岩体时适用性差.需结合现场试验,反复优化延时时间、装药结构、堵塞长度等关键参数.松软岩体爆破时,岩石松散系数较大,破碎后体积膨胀显著.如果补偿空间不足,易造成爆破“挤死”现象,影响后续炮孔起爆效果.需以空孔为自由面,保证应有的补偿空间,且有利于炮渣从炮孔中排出<sup>[14-15]</sup>.

对于松软岩石,一次爆破高度较大时可选用分段法爆破天井.掏槽爆破中,主要自由面为初始存在和前期爆破形成的自由面,由岩石的松散系数可知,非挤压爆破的补偿空间约为该次爆破体积的一半.掏槽爆破自由面少,夹制作用大.故在炮孔中间布置一圈空孔,可有效降低夹制作用,确保槽腔顺利形成.

利用大直径空孔形成槽腔,借助掏槽孔将其扩大,通过辅助眼和周边孔控制其形状最后成井.为形成足够的补偿空间,须选用大空孔作为自由面的平行炮孔掏槽方式.空孔大小取决于成井高度和控偏能力,掏槽孔孔径 $\phi 89$  mm,空孔孔径应为 $\phi 127\sim 156$  mm,考虑大直径空孔具有掏槽面积大、有利于槽腔爆破的特点,结合现场设备,本文选择空孔孔径 $\phi 127$  mm.

试验需要设置合理的首爆孔、空孔距离以及扩槽孔位置,扩槽孔有利于最后成井<sup>[16-17]</sup>.根据补偿空间理论,结合现场实际槽区布置了8个空孔,通过自由面系数和补偿空间计算,确定炮孔布置参数及起爆顺序以满足掏槽爆破要求.

### 1) 炮孔参数设计

切割槽区域打垂直上向平行孔,切割井直径为2.75 m,共计21个炮孔(均为垂直).其中:8个炮孔(K1~K8)为空孔,炮孔直径为127 mm;L1~L13号炮孔为装药孔,炮孔直径为76 mm,炮孔深度为19.3 m.中央掏槽区九孔区域孔网参数为 $0.63\text{ m}\times 0.63\text{ m}$ ,外面炮孔环形布置;第一圈为 $0.63\text{ m}\times 0.63\text{ m}$ ,布置5个孔,炮孔直径为76 mm、89 mm交错布置;第二圈为 $1.25\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ ,布置8个孔,炮孔直径为76 mm、89 mm交错布置;第三圈为 $2.75\text{ m}\times 2.75\text{ m}$ ,布置8个孔,炮孔直径为89 mm.炮孔参数设计如图2所示.

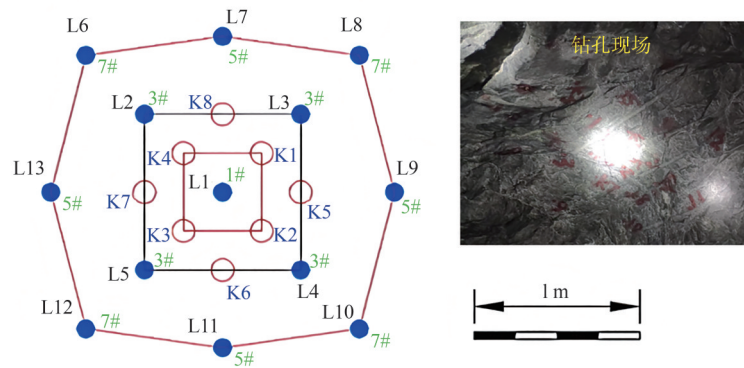


图2 炮孔布置示意图

Figure 2 Schematic layout of gun holes

### 2) 炮孔施工情况

在各分段凿岩硐室采用CYTC76矿用液压采矿钻车上向钻垂直孔,单钎杆长1.2 m,施工过程中以矿界为作业界限,不得超出采场界限.拉槽区每孔与上一分段打穿孔,深度约为19.3 m.炮孔实际施工情况如表1所示.首先,在空孔处钻直径为127 mm的孔;然后,施工周边的拉槽孔;最后,再施工周边孔.钻孔过程中实时监测孔位偏斜并准确记录岩体岩性及各孔返水情况.

## 3 深孔爆破成井现场试验

松软岩体条件下,一次爆破高度过大容易导致顶板大面积失稳.本工程采用分段爆破方式,将19.3 m井深分两次完成,既保证了施工安全,又提高了爆破效果.但分段爆破增加了施工工序,对起爆网络设计和现场组织提出了更高要求.针对上述技术难点,本文通过优化爆破参数、改进装药结构、采用数码电子雷管精确控制起爆顺序等措施,成功实现松软岩体条件下的深孔爆破高效成井.

表 1 炮孔实际施工表

Table 1 Table of actual construction of gun holes

序号	孔号	偏距/m	井高/m	炮孔长度/m
1	补1	1.364	19.3	19.35
2	L2	0.000	19.3	19.30
3	L3	0.000	19.3	19.30
4	L4	0.860	19.3	19.32
5	L5	0.710	19.3	19.31
6	L6	0.545	19.3	19.31
7	L7	0.620	19.3	19.31
8	L8	-	19.3	19.30
9	L9	0.485	19.3	19.31
10	L10	0.502	19.3	19.31
11	L11	0.594	19.3	19.31
12	L12	0.379	19.3	19.30
13	L13	0.630	19.3	19.31
14	补2	0.600	19.3	19.31
15	补3	1.330	19.3	19.35
16	补4	0.250	19.3	19.30

注：“-”表示因围岩垮落或炸药残留而堵塞的炮孔

### 3.1 3428中段6号切割井

由于钻孔偏斜,实际施工过程中采用两次分段爆破成井. 根据现场实际条件和安全要求,将 19.3 m 总井深分为两次爆破完成:第一次爆破成井高度约为 8.5 m,第二次爆破成井高度约为 10.8 m,两次爆破累计成井高度达到设计要求.

#### 3.1.1 第一次爆破

##### 1) 装药结构

采用多孔粒状铵油炸药(76 mm 直径炮孔 4.76 kg/m),装药高度为 8.5 m,孔口堵塞长度为 1.0~1.5 m,孔底堵塞 1 m 并装有数码电子雷管起爆网络,具体装药结构如图 3 所示.本次爆破完成下部约 8.5 m 的成井任务.

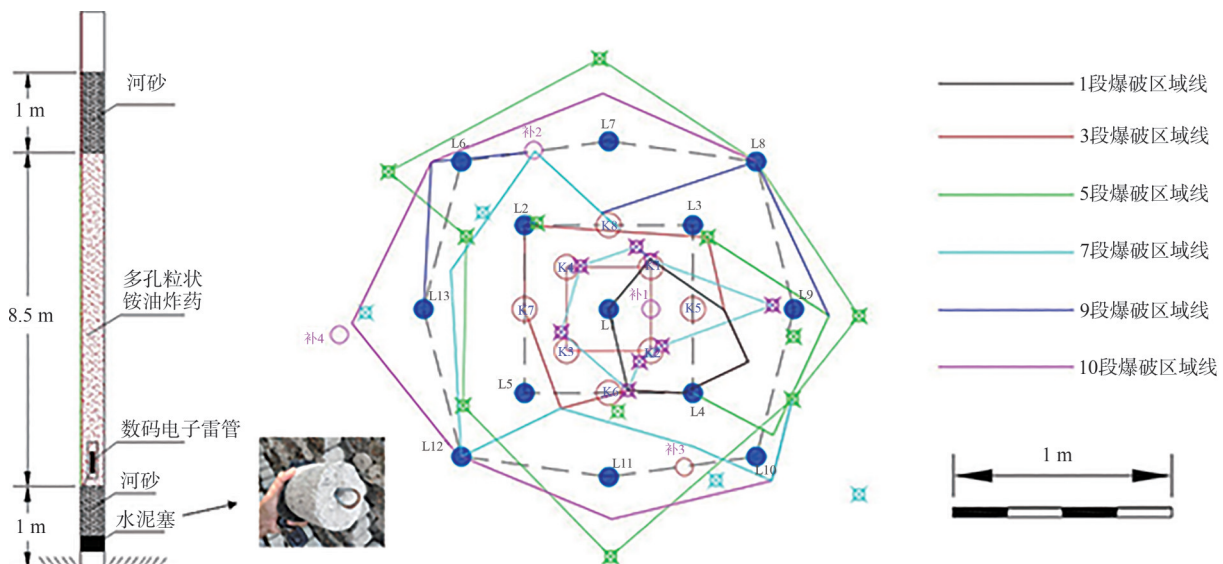


图 3 第一次爆破炮孔布置及装药结构图

Figure 3 First blast hole layout and charging structure diagram

##### 2) 起爆方式

采用数码电子雷管起爆网络,为更好产生自由面和补偿空间,延时间隔设为 50 ms.

3) 起爆顺序

中心孔先起爆,由内向外逐圈起爆. 如图3所示,各节点代表炮孔的平面位置,区域线将21个炮孔(包括8个空孔和13个装药孔)划分为不同的延时起爆区域. 起爆网络设计采用分区延时起爆方式,区域线将炮孔划分为不同的延时分组,每个区域对应一个特定的雷管段别. 中心掏槽孔(炮孔)采用MS1段(段别1)最先起爆,形成初始自由面;第一圈辅助孔采用MS3段(段别3),延时50 ms后起爆;第二圈采用MS5段(段别5),外圈炮孔依次采用MS7、MS9、MS10段. 这种由内向外、段号递增的起爆顺序确保了先起爆孔为后起爆孔提供充足的补偿空间,各段之间延时间隔为50 ms. 雷管段位分配如表2所示.

表 2 火工品消耗

Table 2 Consumption of pyrotechnic materials

序号	电子雷管		装药孔数/个	大包/kg	32药卷/kg
	段别	发数			
1	1	14			
2	3	4			
3	5	14	13	275	6
4	7	10			
5	9	6			
6	10	8			

4) 火工品消耗

采场装药总孔数13个,药量281 kg,数码电子雷管56发,装药高度为8.5 m,详细火工品如表2所示.

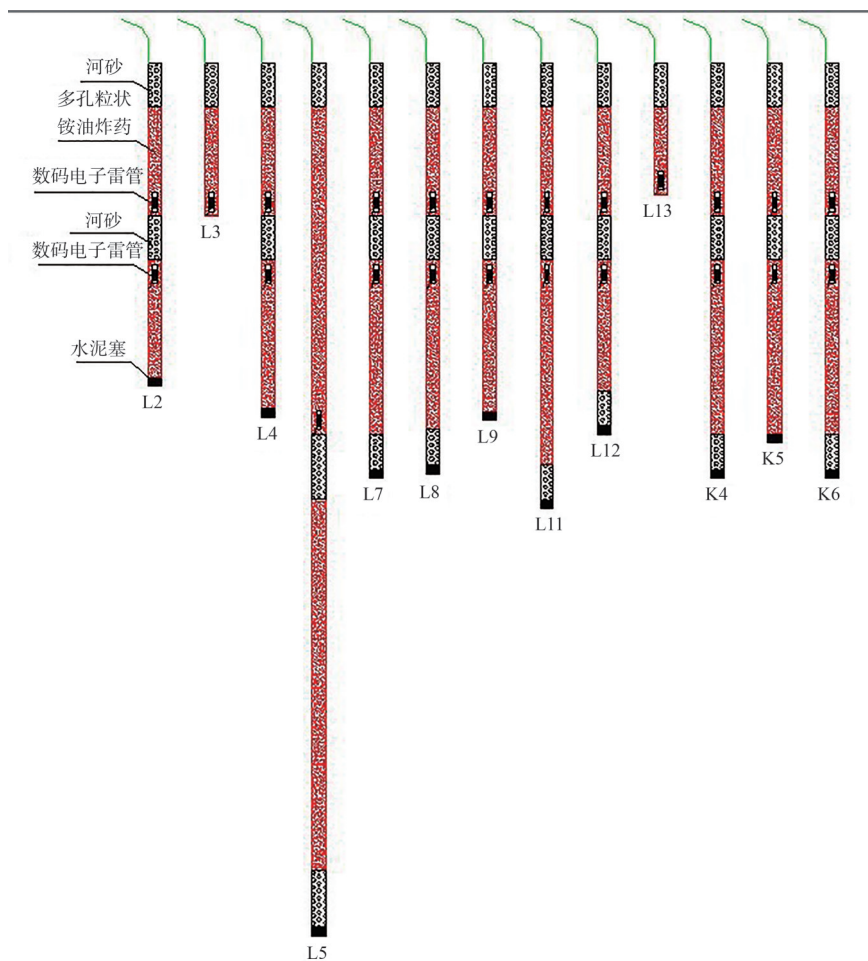


图 4 炮孔装药结构示意图

Figure 4 Schematic diagram of the loading structure of a shell hole

### 3.1.2 第二次爆破

#### 1) 装药结构

第一次爆破完成下部8.5 m成井后,由于部分炮孔堵孔,第二次爆破需完成剩余约10.8 m的上部成井任务.第二次爆破通过空孔装药.采用多孔粒状铵油炸药(76 mm直径炮孔4.76 kg/m、6.53 kg/m),孔口堵塞长度为1.0~1.5 m,具体装药结构如图4所示.

#### 2) 起爆方式

采用数码电子雷管起爆网络,延时间隔设为50 ms.

#### 3) 起爆顺序

遵循“由内向外、逐圈延时”的原则,即中心区域炮孔率先起爆,依次向外围扩展,确保先起爆孔为后起爆孔创造充分的自由面与补偿空间<sup>[18]</sup>.第二次爆破的起爆网络设计如图5所示,节点不仅标注了炮孔的孔口平面位置,还通过线段展示了炮孔由孔口至孔底的偏斜轨迹.由于第一次爆破后围岩垮落及炸药残留的影响,部分炮孔(如L6、L10、补1~4等,详见表3)已堵塞失效.实心节点代表本次爆破可用的装药孔,空心节点则代表已堵塞的炮孔或空孔.本次爆破根据可用炮孔分布,利用区域线划分为不同延时段别:中心区域(利用已有8.5 m深槽腔作为补偿空间)采用MS1段率先起爆;外围区域则依次使用MS3、MS5、MS7、MS9、MS10段,按孔间延时50 ms、层间延时300 ms的时序起爆.装药结构采用分段形式,各炮孔的具体装药参数、堵塞方式及段别分配如表3所示.

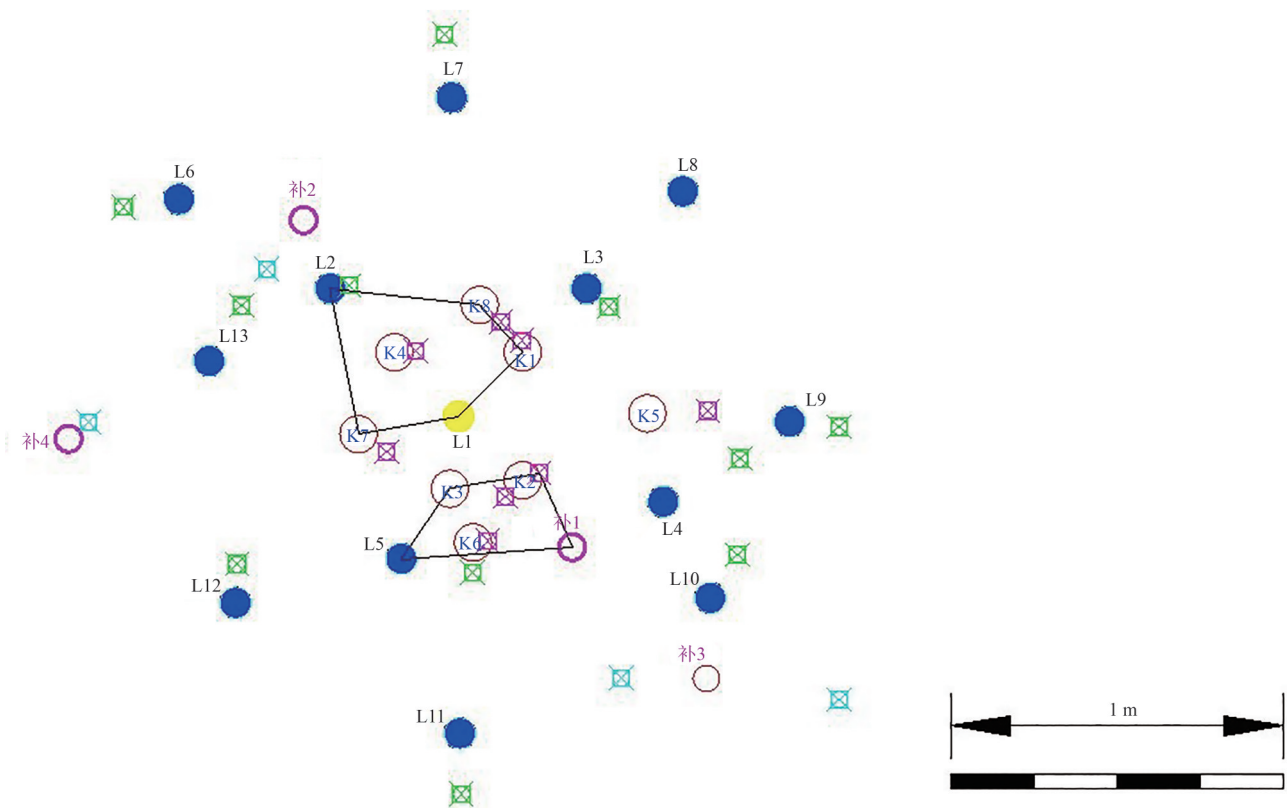


图5 第二次爆破孔口孔底复合图及起爆区域图

Figure 5 Composite diagram of orifice and bottom hole positions and initiation zones for second blasting

#### 4) 火工品消耗

采场装药总孔数13个,药量297.6 kg,数码电子雷管46发,爆破时出现部分堵孔,填塞深度和装药长度对应图4,“1+2.5+1+2.7+0”依次对应“河砂+多孔粒状铵油炸药+河砂+多孔粒状铵油炸药+河砂”,依此类推.详细火工品消耗如表3所示.

表3 高效成井钻孔实测统计及火工品消耗

Table 3 Measured statistics of high-efficiency borehole formation and consumption of pyrotechnic materials

序号	孔号	孔深/m	数码电子雷管	填塞深度和装药长度/m	装药量/kg	备注
1	L2	7.2	MS3/MS7	1+2.5+1+2.7+0	20.8	堵
2	L3	3.5	MS5	1+2.5	10.0	堵
3	L4	8.1	MS5/MS9	1+2.5+1+3.6+0	24.4	堵
4	L5	9.0	MS5	1+7.5+1.5+8.5+1.5	30.0	堵
5	L6	1.5	-	-	-	堵
6	L7	9.5	MS9/MS10	1+2.5+1+4+1	26.0	通
7	L8	9.4	MS7/MS10	1+2.5+1+3.9+1	29.6	通
8	L9	8.0	MS7/MS10	1+2.5+1+3.5+0	20.0	堵
9	L10	0.0	-	-	-	堵
10	L11	10.2	MS7/MS10	1+2.5+1+4.7+1	28.8	通
11	L12	7.5	MS5/MS9	1+2.5+1+3+0	22.0	堵
12	L13	3.0	MS5	1+2	8.0	堵
13	补1	1.0	-	-	-	堵
14	补2	3.0	-	-	-	堵
15	补3	5.0	-	-	-	堵
16	补4	2.5	-	-	-	堵
17	K1	9.6	-	-	-	通
18	K2	10.1	-	-	-	通
19	K3	0.0	-	-	-	堵
20	K4	9.5	MS1/MS5	1+2.5+1+4+1	26.0	通
21	K5	8.5	MS3/MS7	1+2.5+1+4+0	26.0	堵
22	K6	9.5	MS1/MS5	1+2.5+1+4+1	26.0	堵
23	K7	9.5	-	-	-	通
24	K8	8.7	-	-	-	通
合计		153.8	46发		297.6	

注：“-”表示因围岩垮落或炸药残留而堵塞的炮孔

### 3.2 松软岩体深孔爆破成井成效

图6为3428中段6号采场切割井的掏槽爆破效果图.爆后槽区断面规整,实测高度为19.3 m.槽区断面和高度均达到设计要求,顶板完整性好、破坏小,且爆破块度均匀.此次试验后槽区其他拉槽炮孔爆破时以切割井为自由面,依次向外爆破,整体取得了良好爆破效果,说明上向中-深孔(切割井炮孔)爆破掘进方案可行.

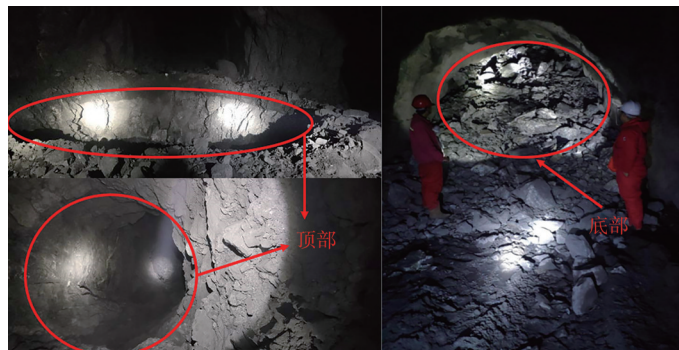


图6 现场爆破效果图

Figure 6 On-site blasting effects

## 4 爆破技术经济指标分析

以3428中段6号切割井爆破成井试验对深孔爆破高效掘进法和普通爆破成井法进行技术经济指标分析.具体如表4所示.凿岩装药人工成本计算方式为:700(凿岩) $\times$ 3(人) $\times$ 2(天)+342.5(凿岩多余米数) $\times$ 4(机手1名,多1米2元;辅工2名,多1米1元)+700(装药人工2个半天) $\times$ 5=9 070元.

表 4 切割井爆破成井试验经济分析

Table 4 Economic analysis of cut-and-blast well formation tests

项目	每循环进尺/m	炸药用量/kg	雷管量/发	人工/人次	用时/天	备注
19.3 m 深孔爆破 高效掘进法	用量/用时	10	430	88	4	切割井断面为 2.0 m×2.0 m
	总成本	430×10.88(炸药单价)+88×32(电子雷管单价)+9 070(人工)=16 564.4元				
19.3 m 普通法	用量/用时	2	320	200	20	切割井断面为 2.0 m×2.0 m
	总成本	320×10.88(炸药单价)+200×32(电子雷管单价)+700(人工)×20=23 881.6元				

综上,深孔爆破高效掘进切割井断面较普通法大,多出的矿石量矿方结算为5 328.5元,故深孔爆破高效掘进切割井成本为:16 564.4 - 5 328.5=11 235.9元.分析表明,深孔爆破高效掘进法的成本仅为普通法的47%,单次工程可节约成本12 645.7元.该方法在形成更大掘进断面的前提下,还节约了6天的掘进时间,显著提升了施工效率.

## 5 结语

针对松软破碎岩体条件下传统分段爆破成井技术存在的效率低、安全风险高、成本控制难等问题,本文以备战铁矿6号切割井为工程背景,系统开展了数码电子雷管深孔爆破高效成井技术研究.通过创新设计两次分段上向深孔爆破方案,结合理论计算与现场试验,确定了孔间延时50 ms、层间延时300 ms等关键爆破参数,采用大直径空孔( $\phi 127$  mm)作为补偿空间,装药孔径为76 mm,并优化了炮孔布置与起爆顺序.

工程实践表明:该技术方案有效减少对围岩的频繁扰动,避免岩体垮落,实现爆破过程的精确控制.现场爆破后,切割井断面规整,顶板完整性良好,岩块块度均匀,成井高度达到设计要求的19.3 m.技术经济分析显示:相比传统普通法掘进,深孔爆破成井法成本降低约53%,工期缩短6天,施工效率显著提升,同时大幅降低作业人员在直接顶板下的暴露风险,提升施工安全性.

然而,当前掏槽形式与爆破参数的设计仍较多依赖工程经验类比,缺乏系统、精确理论计算支撑,导致炮孔轨迹控制存在一定偏差,成井效果仍具不确定性.未来研究应进一步深入分析爆破作用机理,加强爆破参数优化设计与理论建模,提高成井工艺的可靠性、适应性与环境协调性,以推动该技术在中等坚硬以上岩体及更复杂地质条件下的广泛应用.

## 参考文献:

- [1] 张东升,刘洪林,范钢伟. 新疆伊犁矿区保水开采内涵及其应用研究展望[J]. 新疆大学学报(自然科学版),2013,30(1):13-18.  
Zhang D S, Liu H L, Fan G W. Prospects for the connotation and application research of aquifer-protection mining on Yili mining area of Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition),2013,30(1):13-18. (in Chinese)
- [2] 陈胜云,张麇,吴华杰,等. 深孔一次爆破成井技术研究及应用[J]. 矿业研究与开发,2017,37(10):5-10.  
Chen S Y, Zhang A, Wu H J, et al. Research and application of shaft excavation technology by once deep-hole blasting[J]. Mining Research and Development,2017,37(10):5-10. (in Chinese)
- [3] 陈旭. 深孔爆破法施工天井在大红山铁矿的应用[J]. 中国矿业,2019,28(增刊1):205-208.  
Chen X. Application of deep hole blasting method in construction of patio in Dahongshan iron mine[J]. China Mining Magazine,2019,28(S1):205-208. (in Chinese)
- [4] 李祥龙,颜世骞,王建国,等. 分层一次爆破成井精确延时爆破参数研究[J]. 高压物理学报,2024,38(2):025302.  
Li X L, Yan S Q, Wang J G, et al. Precise time-delay blasting parameters of stratified single blasting well completion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2024,38(2):025302. (in Chinese)
- [5] 周传波,吕国鹏,蒋楠. 爆破振动效应研究若干进展[J]. 工程爆破,2024,30(5):61-74.  
Zhou C B, Lyu G P, Jiang N. Progress in the study of blasting vibration effects[J]. Engineering Blasting,2024,30(5):61-74. (in Chinese)

- [6] 董越权,徐万寿,钱正乾,等. 盲天井掏槽爆破成腔试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(4):1169-1176.  
Dong Y Q,Xu W S,Qian Z Q,et al. Experimental research on cutting blasting into cavity from blind raise[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(4):1169-1176. (in Chinese)
- [7] 李洪伟,吴延梦,吴立辉,等. 电子雷管起爆条件下隧道掏槽孔与辅助孔的延时优化试验研究[J]. 高压物理学报,2023,37(1):015301.  
Li H W,Wu Y M,Wu L H,et al. Experimental study on delay time optimization of tunnel cutting holes and caving holes under electronic detonator initiation condition[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2023,37(1):015301. (in Chinese)
- [8] 李文东,简锡明,潘勇. 塞尔维亚紫金铜业JM矿中深孔爆破一次成井技术[J]. 矿业研究与开发,2023,43(4):50-53.  
Li W D,Jian X M,Pan Y. Research on the one-time shaft excavation by medium-deep hole blasting in the JM mine of Serbia Zijin copper DOO[J]. Mining Research and Development, 2023,43(4):50-53. (in Chinese)
- [9] 李启月,李夕兵,范作鹏,等. 深孔爆破一次成井技术与应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(4):664-670.  
Li Q Y,Li X B,Fan Z P,et al. One time deep hole raise blasting technology and case study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(4):664-670. (in Chinese)
- [10] Li Q Y,Liu K,Li X B,et al. Cutting parameter optimization for one-step shaft excavation technique based on parallel cutting method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2018,28:1413-1423.
- [11] 刘恺,李夕兵,李启月,等. 直孔掏槽一次成井的改进TOPSIS-CV掏槽方式评价模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(9):2484-2490.  
Liu K,Li X B,Li Q Y,et al. Improved TOPSIS-CV method of cut blasting mode evaluation in one-step raise excavation with burn cut[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2017,48(9):2484-2490. (in Chinese)
- [12] Liu X L,Luo K B,Li X B,et al. Cap rock blast caving of cavity under open pit bench[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2017,27:648-655.
- [13] 李廷春,刘洪强,王超. 超深孔一次成井微差爆破技术研究[J]. 岩土力学,2012,33(6):1742-1746.  
Li T C,Liu H Q,Wang C. Study of millisecond blasting technology of shaft excavation by one-step deep-hole blasting[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(6):1742-1746. (in Chinese)
- [14] 李廷春,刘洪强. 一次成井掏槽爆破炮孔合理封堵长度研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(3):384-389.  
Li T C,Liu H Q. Optimized cut hole stemming length for shaft excavation using one-step deep-hole blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2012,41(3):384-389. (in Chinese)
- [15] 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 C B,Gu R G,Luo X D. Numerical simulation on cutting mode of shaft excavation by one-step deep-hole blasting in hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(13):2298-2303. (in Chinese)
- [16] 姜科. 切割井一次爆破成井实践[J]. 金属矿山,2003(1):11-12+47.  
Jiang K. Practice of cut-raise formation by one blasting[J]. Metal Mine,2003(1):11-12+47. (in Chinese)
- [17] 李启月,刘冰川,陈亮,等. 深孔爆破一次成井炮孔合理堵塞长度[J]. 科技导报,2013,31(19):15-19.  
Li Q Y,Liu B C,Chen L,et al. Blast-hole reasonable stemming length for raise excavation using one-step deep-hole blasting[J]. Science & Technology Review,2013,31(19):15-19. (in Chinese)
- [18] 周礼,柳小胜,周爱民,等. 高阶段矿石溜井快速形成技术研究[J]. 矿业研究与开发,2016,36(8):21-23.  
Zhou L,Liu X S,Zhou A M,et al. Study on fast drifting technology of high-level ore chute[J]. Mining Research and Development,2016,36(8):21-23. (in Chinese)

责任编辑:张自强