

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.010

硬岩圆形输水隧洞短直孔 + 楔形复合掏槽方案 爆破试验研究*

彭松林¹,董伟²,董千^{3a,3b},杨钊¹,姬付全¹,曹昂¹

(1. 中交第二航务工程局有限公司,武汉 430040;2. 中交二航局第二工程有限公司,重庆 404100;
3. 江汉大学 a. 精细爆破国家重点实验室; b. 爆破工程湖北省重点实验室,武汉 430056)

摘要: 在中小断面隧洞钻爆法施工中,采用传统楔形掏槽爆破方案,易受施工设备作业空间限制。空间受限会导致楔形掏槽孔与掌子面夹角过大。因此,掏槽区域岩石会受到较大夹制作用,易导致循环进尺短、炮孔利用率低,炸药单耗高等问题。本文结合理论分析和公式推导,比较楔形和直孔掏槽的优劣势。并在此基础上,进一步计算了直孔掏槽孔布置参数。最终设计了隧洞短直孔 + 楔形复合掏槽爆破方案,并在某水利枢纽工程的硬岩圆形发电隧洞进行了现场试验,结果表明:(1) 确定掏槽爆破参数中装药孔与空孔间距时,对于岩石的抗拉强度应考虑高应变率效应,以保证理论计算参数的合理性;(2) 设计的复合掏槽方案与原方案对比,单循环爆破进尺 1.7~1.8 m 提升到 2.0~2.1 m,炮孔利用率从 73.91%~78.26% 增长到 86.96%~91.30%,单循环进尺和炮孔利用率均有所提升,且炸药单耗两方案几乎一致,雷管单耗较原方案减小约 0.4 发/m³,其应用经济效益较大;(3) 采用短直孔 + 楔形复合掏槽方案,掌子面残眼更少、爆破块度更破碎,便于后续的出渣和下一循环钻孔作业。研究成果可为中小断面硬岩隧洞钻爆参数设计和施工提供参考依据。

关键词: 输水隧洞;复合掏槽爆破;爆破参数;圆形隧洞

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0089-08

Experimental Study on Blasting Using Short Burn-cut Hole Combined with Wedging Shot Scheme for Hard Rock Circular Water Conveyance Tunnel

PENG Song-lin¹, DONG Wei², DONG Qian^{3a,3b}, YANG Zhao¹, JI Fu-quan¹, CAO Ang¹

(1. CCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. China Communications 2nd Navigational Bureau 2nd Engineering Co., Ltd., Chongqing 404100, China; 3. a. State Key Laboratory of Precision Blasting; b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: The traditional wedge-shaped blasting scheme is restricted by the limited working space of construc-

收稿日期 (Date of reception): 2024-11-22

网络首发日期 (Published online): 2025-02-19

作者简介: 彭松林 (1998-), 男, 硕士, 从事岩土爆破、隧道爆破设计及施工技术的研究工作, (E-mail) pengsonglin1998@163.com。

通信作者: 董伟 (1993-), 男, 工学学士、工程师, 从事公路桥梁、隧道、水利水电工程施工技术研究及管理工作, (E-mail) 504526450@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52108368)

About the author: PENG Song-lin (1998-), Male, master's degree, engaged in the research of geotechnical blasting, tunnel blasting design and construction technology, (E-mail) pengsonglin1998@163.com.

Corresponding author: DONG Wei (1993-), male, bachelor of engineering, engineer, engaged in the research and management of construction technology of highway bridges, tunnels, water conservancy and hydropower projects, (E-mail) 504526450@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52108368)

tion equipment in small to medium-sized section tunnels, which would result in a large angle between the wedge-shaped blasting hole and the tunnel face. A greater confinement of the rock in the blasting area may lead to a short cycle advance, a low utilization rate of drill holes, and high explosive consumption, among other issues. In this paper, the advantages and disadvantages of the wedging shot and the burn cut were compared based on theoretical analysis and formula derivation. And then, the parameters of the burn-cut hole were further calculated. Finally, a short straight hole and wedge-shaped composite blasting scheme was designed, and a field test was conducted in a hard rock circular power tunnel of a hydropower hub project. The results indicate that the high-strain-rate effect should be considered when determining the tensile strength of rock to ensure the rationality of theoretical calculation parameters, particularly in determining the spacing between the charge hole and the empty hole in trench blasting parameters. Compared with the original scheme, the single-cycle blasting footage increases from 1.7 ~ 1.8 m to 2.0 ~ 2.1 m, the utilization rate of the blast hole increases from 73.91% ~ 78.26% to 86.96% ~ 91.30%, the single-cycle footage and the utilization rate of the blast hole are improved, and the unit consumption of explosives is almost the same as that of the two schemes. Additionally, the unit consumption of the detonator is reduced by approximately 0.4 rounds/ m^3 , and the economic benefits of its application are greater. It has fewer residual eyes on the tunnel face and higher fragmentation by adopting a combination of short burn-cut holes and wedging shots, which is convenient for subsequent slag removal and the next cycle of drilling operations.

Key words: water conveyance tunnels; composite cut blasting; blasting parameters; circular tunnels

地下空间的开挖,尤其在较坚硬岩石隧洞掘进中,钻爆法作为最常用的施工方法被广泛应用,隧洞爆破掘进的特点是只有一个自由面,所受的夹制力很大,不利于爆破^[1,2];掏槽孔作为隧洞掘进爆破的“排头兵”,为后爆炮孔提供补偿空间和自由面,对爆破效果的好坏有着决定性影响^[3],合理的掏槽方案有利于提高爆破掘进效率^[4],最常用的掏槽形式是直孔掏槽和楔形掏槽,其中楔形掏槽结构在小断面隧洞中受到作业空间的限制,而直眼掏槽一般不受空间限制,但需要较多的炮孔和炸药^[5]。汪平总结了直孔掏槽的爆破原理和影响因素^[6],并通过试验得到3种不同掏槽方案下的爆破进尺情况,表明3空孔下炮孔利用率最高;黄宝龙在隧道中采用准直孔掏槽方式^[7],在隧道中线处掏槽区域增加一排装药直孔,爆破进尺有较大提高。杨玉银在现场试验中适当增大掏槽面积^[8],有效减小了周围崩落孔的抵抗线及夹制作用,降低了炸药单耗。李启月等对传统的直眼掏槽进行改进^[9],提高了循环进尺。裴启涛等采用双楔形掏槽方法结合光面爆破技术^[10],在硬岩和断面较大巷道显著减少炸药爆破单耗。杨岳阳、史秀志等通过空孔螺旋掏槽技术开展现场爆破试验^[11,12],取得了良好的试验效果。胡刚、范兴俊等运用数值模拟技术对隧洞直孔掏槽爆破进行了模拟分析^[13,14],结合现场试验表明空孔对炮孔利用率和炸药单耗均有所改善。

如何在中、小断面且围岩坚硬条件下,提高隧洞爆破循环进尺,国内外学者和爆破从业人员在不断进行探索和实践,而目前关于中小断面隧洞中短直

空孔复合掏槽爆破技术鲜有报道。因此,基于空孔效应和掏槽爆破理论,结合直孔掏槽和楔形掏槽爆破破岩机理,研发了短直孔+楔形掏槽的复合掏槽方案,并在中小断面硬岩隧道中进行了实践应用。

1 理论分析

1.1 常见掏槽结构

在隧洞钻爆法施工中,常用的掏槽爆破方案主要有直孔掏槽和斜孔掏槽两种,炮孔结构布置示意图1所示,直孔掏槽结构常用于中小断面隧道,斜孔掏槽常用于大断面隧道,但直孔掏槽抛掷机理与斜孔掏槽抛掷机理存在明显不同。

单孔爆破漏斗理论表明,岩石破碎有压缩阶段、应力波反向拉伸阶段及爆炸气体膨胀阶段,掏槽爆破中首先岩体在爆炸应力波作用下开裂破坏,随后含有较多能量的爆生气体侵入岩体裂隙,准静态膨胀做功,进而克服破碎岩体所受到的阻力,使其抛掷飞出,最终形成槽腔。

斜孔掏槽基于“应力波作用先行破坏岩石,爆生气体准静态作用后续抛掷”的两阶段,利用两孔装药同时爆炸产生的爆轰合力将岩石抛出。直孔掏槽炮孔垂直于自由面布置,同时布置一定数量的空孔,主炮孔连续装药,空孔的作用有:(a)爆炸应力波作用在空孔孔壁上产生应力集中,迫使岩体发生塑性变形;(b)自由面反射应力波,使岩石产生拉伸破坏;(c)提供补偿空间,便于形成空腔,使岩体充分破碎。

1.2 短直孔+楔形复合掏槽

在中断面、小断面隧道中由于作业空间狭小,无

法使用大型机械作业,人工作业楔形掏槽炮孔角度难以控制,往往造成掏槽孔与掌子面之间的夹角过大,掏槽区域结构岩石受夹制作用大,导致掏槽效果差,进而影响单循环的炮孔利用率。因此在中小断面中多采用直孔掏槽爆破方案,但直孔掏槽孔数量

较斜孔掏槽孔的数量会增多,且炸药单耗提高,同时掏槽部分残孔较深,掏槽效率不理想,进而影响单循环爆破进尺,这和现场实际生产的需要冲突,如何少打孔实现高效掏槽,更高的炮孔利用率为现场施工所迫切需要。

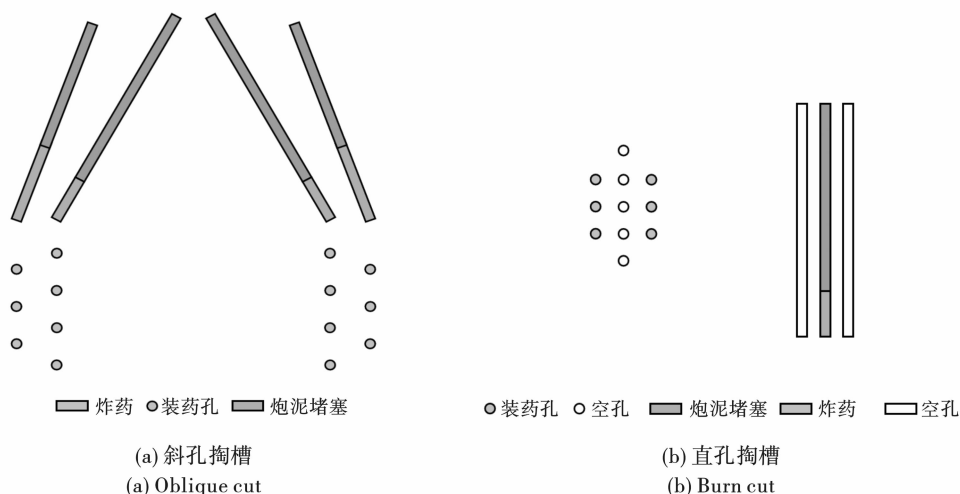


图 1 常见掏槽结构布置示意图
Fig. 1 Common cut structure diagram

试验了一种复合掏槽结构,如图 2 所示,在原楔形掏槽炮孔布置的基础上,增加中间短直孔。通过中间的短装药直孔和多个空孔,为后续炮孔爆破提供第二自由面,解决中小断面掏槽孔与掌子面之间的夹角过大,导致掏槽结构抛掷效果差的问题。并采用短直孔 + 楔形掏槽结构在中小断面硬岩圆形输水隧洞中开展了现场试验。

洞身段岩性以(J2s2-3)长石砂岩为主,岩层为单斜构造,倾向下游偏左岸,岩层产状 $235^{\circ} \angle 10^{\circ}$ 。岩体中无断层发育,主要构造形迹为构造裂隙、卸荷裂隙,除层面裂隙外,主要发育三组裂隙:①组产状为 $N35 \sim 45^{\circ}E/SE \angle 70 \sim 78^{\circ}$,裂面较平整,延伸长度大于 10 m,间距 1 ~ 2 m;②组产状为 $N78 \sim 88^{\circ}E/SE$ 或 $NW \angle 70 \sim 85^{\circ}$,裂面较平整,延伸长度大于 10 m,间距 1 ~ 2 m;③组产状为 $N65 \sim 85^{\circ}W/NE \angle 70 \sim 88^{\circ}$,裂面一般较平整稍粗糙,间距 1 ~ 3 m。洞身段以Ⅲ类围岩为主,Ⅲ类围岩开挖洞径 4.4 m,约占 79.5%,岩性为微新长石砂岩,岩石物理力学参数如表 1 所示。

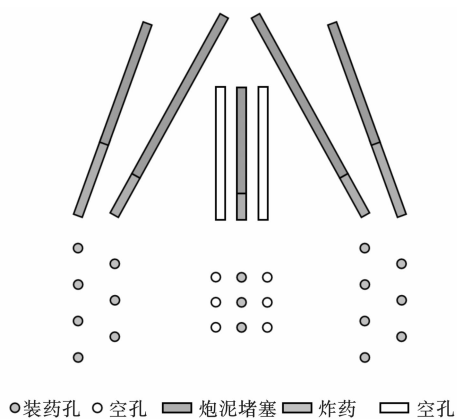


图 2 短直孔 + 楔形复合掏槽

Fig. 2 Burn-cut hole + wedging shot combined cut scheme

2 工程概况

2.1 围岩及地质情况

某水利工程枢纽工程发电洞全长 769.5 m,隧洞埋深 11.7 ~ 108.7 m,采用有压 + 无压泄流方式,

2.2 原爆破施工方案

发电洞开挖断面为圆形设计,洞径 4.4 m,开挖断面面积 15.2 m^2 ,原爆破设计采用楔形掏槽结构,乳化炸药药卷规格为 $\phi 32 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,单节重 300 g;凿岩设备采用 YT-28 型气腿式凿岩机,钻杆长度 2.5 m,成孔直径 40 mm。考虑到凿岩设备现场实际使用效率,掏槽孔孔深 2.4 m,辅助孔、周边孔 2.3 m;周边孔间距 45 cm,光爆层厚度 50 cm。设计总炮孔总数 67 个,炮孔内均采用连续装药,周边孔装药 0.9 kg、辅助孔 1.2 ~ 1.5 kg、掏槽孔 1.5 ~ 1.8 kg;段间起爆时差 50 ms,原爆破施工方案炮孔布置图如图 3 所示。

表 1 发电洞岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock mass for power generation

岩性	天然重度/ (kN · m ³)	岩石单轴抗压强度/MPa		岩体变形参数/MPa		抗剪强度/ MPa	泊松比	软化系数
		自然	饱和	变形模量	弹性模量			
长石砂岩	24.9	50 ~ 55	40 ~ 45	7 ~ 8	9 ~ 10	0.8 ~ 1.0	0.20 ~ 0.25	0.85

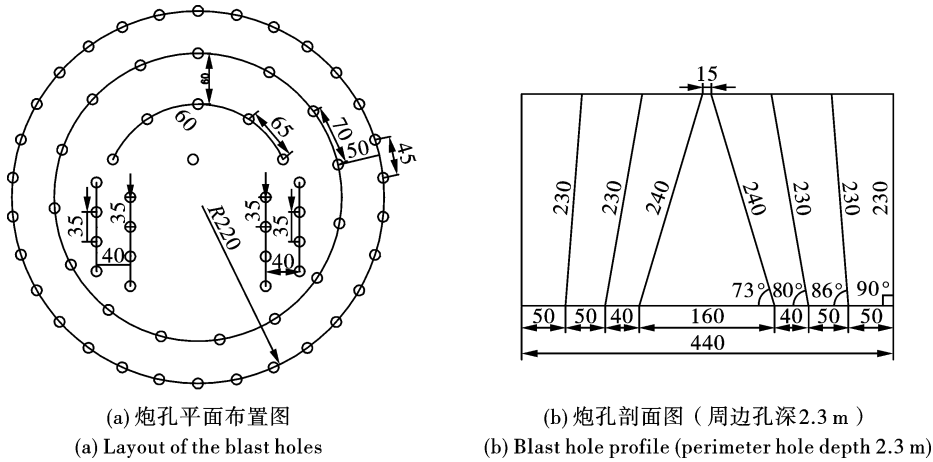


图 3 原爆破施工方案炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 3 Original blast hole layout(unit:cm)

2.3 原方案爆破效果

根据原设计楔形掏槽爆破方案,在硬岩段开挖了10循环,总进尺17.6 m,单循环进尺1.7~1.8 m,单循环消耗炸药72 kg、雷管70发。爆后成形轮廓可见半孔,掌子面围岩中有少量危石,掏槽部分呈阶梯状凹进,有部分残余孔,残孔深度如图4所示,掏槽结构抛掷岩体不充分,爆堆存在少量大块岩石,超欠挖量满足规定的标准。掌子面围岩坚硬,炮孔利用率较低,约为74%~88%,炸药单耗较大,约为2.74~2.90 kg/m³。

3 试验方案爆破(掏槽)参数

3.1 钻孔参数

在原放空洞爆破方案的基础上,只在掌子面中轴线直径位置增加短直孔,按照空孔直眼掏槽爆破机理,爆炸后产生的应力波在空孔孔壁形成的反射拉应力必须大于岩石的抗拉强度,即 $\sigma_{\theta \max} \geq \sigma_{\theta}$ 确定装药孔与空孔之间的距离^[15],保证空孔孔壁在拉应力的作用下有效破碎,其中装药孔与空孔的间距须满足^[16]

$$L \leq r_A \left[\frac{(1 + 3\lambda)}{[\sigma_{\theta}]} \right]^{\frac{1}{\alpha}} + r_B \tag{1a}$$

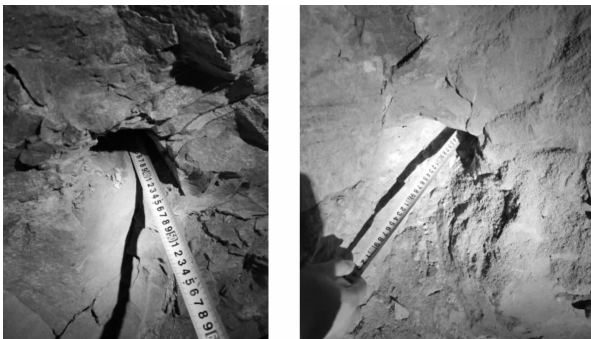
其中

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 2 - \mu_{\text{动}} / (1 - \mu_{\text{动}}) \\ \lambda &= \mu_{\text{动}} / (1 - \mu_{\text{动}}) \end{aligned} \right\} \tag{1b}$$

式中: r_A 为装药孔半径,取20 mm; r_B 为空孔半径,取20 mm; λ 、 α 分别为侧应力系数和应力波衰减系数,与岩石动泊松比 $\mu_{\text{动}}$ 有关;林英松等研究表明^[17] $\mu_{\text{动}} = \mu$; p 为孔壁处透射压力^[18],按式(2)计算; $[\sigma_{\theta}]$ 为岩石抗拉强度。

$$p = \frac{1}{8} \rho_e D^2 \left(\frac{r_e}{r_h} \right)^{2n} \tag{2}$$

式中: r_e 为药卷直径,取32 mm; r_h 为炮孔直径,取40 mm; ρ_e 为装药密度,取1.10 g/cm³; D 为炸药爆破轰击速度,取3500 m/s; n 为多方指数,一般情况



(a) 掏槽孔残孔40 cm
(a) Dead-hole length of 40 cm for burn-cut hole
(b) 周边孔残孔50 cm
(b) Dead-hole length of 50 cm for peripheral hole

图 4 原方案爆破残孔

Fig. 4 Dead holes for the original blasting plan

下取3;计算得到 $p = 441.55 \text{ MPa}$ 。

一般岩石的抗拉强度为抗压强度的 $1/20 \sim 1/10$,结合表1发电洞岩体物理力学参数可取 5 MPa ,而爆破过程时间极短,属于高应变率动态过程,将公式(1)中的 $[\sigma_\theta]$ 岩石抗拉强度替换为岩石动态抗拉强度。茅蓉蓉通过 SHPB 对煤系砂岩开展抗拉力学性能研究^[19],表明:当应变率 ε 由 30.93 s^{-1} 增加到 108.93 s^{-1} ,岩样抗拉强度增幅达 125.34% ;爆破的应变率 ε 约在 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 之间,但关于爆破荷载下岩石的动态抗拉强度提升幅值还缺乏相关研究,为此本文在参考文献[19]结论上,选取爆炸荷载下岩石的动态抗拉强度增幅 200% 作为计算参数,取 $[\sigma_\theta]$ 为 15 MPa 。 $\mu_{\text{动}} = \mu$ 取值 0.225 ,将上述计算参数代入公式(1a)计算得到 $L \leq 443 \text{ mm}$ 。

在相关的生产实践及前人的研究中表明,间距过小,则易导致爆破产生气体过早外泄,影响抛掷效果^[6],而常用的直孔掏槽排距约为 20 cm 左右,为了确保短直孔掏槽的可靠性,参考成功经验且对上述计算值进一步缩小,因此现场试验中间装药孔与空孔之间的排距设置为 20 cm ,孔距 15 cm ,距离底板开挖线距离 1.5 m ,总计设置三排炮孔,共计 15 个,中间一排炮孔装药,两侧空孔作为补偿空间及自由面,岩石可以向空孔位置和掌子面(临空面)运动。底部岩石所受夹制作用最强,岩石破碎运动难度最大,对装药孔超深 10 cm 。为了避免与斜掏槽孔之间发生穿孔,设置装药孔孔深 1.6 m ,空孔孔深 1.5 m 。试验方案炮孔布置图如图5所示。

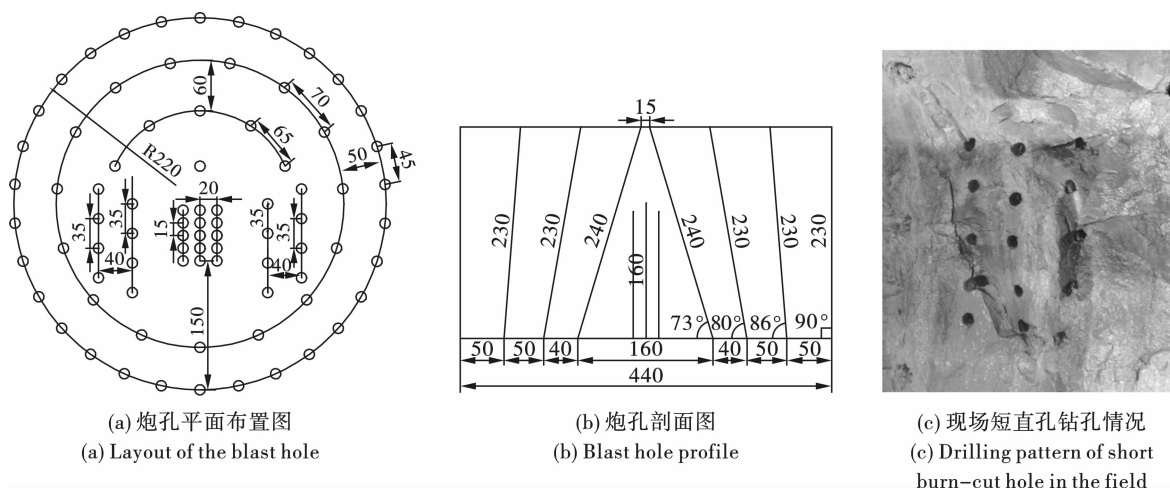


图5 爆破试验方案炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 5 Blast hole layout of the test blasting plan(unit:cm)

3.2 装药及起爆参数

试验方案的装药参数在原楔形掏槽爆破方案的基础上增加,单循环总装药量 84 kg ,增加半箱炸药 12 kg ,均连续装药,增加中间 5 个装药炮孔,雷管 70 发不变,参考龚伟毅、姚颖康按照炮孔布置和不同类型炮孔对炸药进行分配^[20],不同类型炮孔数目、装药量及起爆网路如表2所示,结合爆破实践进行检验修正,直到取得较好的爆破效果,起爆网路采用数码电子雷管控制起爆延期时间,共设置 8 个段别,段别延期时间 50 ms 与原方案保持一致。经过多次试验,考虑到炸药和雷管出库规则,雷管以 10 发整数出库,周边孔有 2 空孔不装药依然能取得较好的爆破效果。

4 试验方案爆破效果分析

4.1 功效对比

从钻孔数量上来看,原楔形掏槽设计方案 67 个

炮孔,短直孔+楔形复合掏槽试验方案 82 个炮孔,钻孔数量增加 15 个,占比 22.39% ,但增加炮孔均为浅孔,平均孔深 1.5 m ,增加钻孔深度约 22.5 m ,原方案总孔深约 154 m ,增加孔深占比 14.61% ;钻孔安排 6 人同时作业, 5 台 YT-28 型气腿式凿岩机,原方案单个循环钻孔作业时长约 2.5 h ,现场 $1.5 \sim 1.6 \text{ m}$ 浅孔约 2 min 完成一个,考虑一台设备单独作业,多钻 15 个浅炮孔较原方案作业时长增加 20% ,实际现场钻孔设备可平行作业,实际作业时长增加较小,整体来看新方案未明显影响钻孔、装药、起爆总时长。试验方案在火工品消耗方面,炸药增加 12 kg ,多次试验发现周边孔 2 炮孔不装药,雷管总消耗量不变,依然能取得较好的爆破效果,爆破效果如图6所示。

4.2 主要技术指标对比

针对两种掏槽方式,在发电洞 III 级围岩平洞段

开展了数次试验,对主要技术经济指标对照分析,如表 3 所示。从单循环爆破进尺来看,原楔形掏槽每循环进尺 1.7 ~ 1.8 m,炮孔利用率 73.91 ~ 78.26%,短直孔 + 楔形复合掏槽方案每循环进尺 2.0 ~ 2.1 m,炮孔利用率 86.96% ~ 91.30%,比较而言试验方案每循环可提高进尺约 0.3 m,炮孔利

用率增加 10% 以上;从单循环火供品单耗来看,炸药单耗两方案几乎一致,试验方案雷管单耗较原方案减小约 0.4 发/m³,经济效益较好;短直孔 + 楔形复合掏槽方案增加的钻孔长度 22.5 m 较小影响成本支出,但单循环钻孔作业时长稍微增加,会增加炮工安全施工风险。

表 2 试验爆破参数设计

Table 2 Design of test blasting parameters

炮孔类型	孔数	单孔装药量/kg	合计装药量/kg	起爆时差/ms	起爆网路图(单位:cm)
掏槽孔(直孔)	5	0.9(3 节)	4.5	25(1#)	
掏槽孔(楔形)	8	1.5(5 节)	12	75(2#)	
辅助掏槽孔	9	1.2(4 节)	10.8	125(3#)	
辅助孔 1	5	1.2(4 节)	6	175(4#)	
辅助孔 2	5	1.2(4 节)	6	225(5#)	
辅助孔 3	10	1.2(4 节)	12	275(6#)	
底板孔	9	1.5(5 节)	13.5	325(7#)	
周边孔	21	0.9(3 节)	18.9	375(8#)	
合计	72	/	83.7	/	

表 3 主要技术经济指标对照表

Table 3 Comparison of main technical and economic indicators

类别	循环进尺/m	炮孔利用率/%	炸药单耗/(kg · m ⁻³)	雷管单耗/(发 · m ⁻³)	单循环钻孔总长/m
原楔形掏槽	1.7 ~ 1.8	73.91 ~ 78.26	2.79 ~ 2.63	2.56 ~ 2.71	154
短直孔 + 楔形复合掏槽	2.0 ~ 2.1	86.96 ~ 91.30	2.76 ~ 2.63	2.19 ~ 2.30	176.5
差异情况	+0.3m	+10%以上	几乎持平	-0.4 左右	+22.5m



图 6 试验方案爆破效果

Fig. 6 Blasting effect of the test scheme

4.3 爆破块度对比

从爆破效果看,在原楔形掏槽爆破方案中出现了严重的残孔现象,中间掏槽不充分,影响了辅助孔的抛掷,偶尔会有大块产生;短直孔 + 楔形复合掏槽试验方案破碎碎块较均匀,便于扒渣机出渣,掌子面残眼更少,便于下一循环钻孔作业;同时项目枢纽工程大坝填筑工程需要过渡料,对放空洞爆渣去除少

量超过 30 cm 直径块石进行粒径筛分,筛分曲线如下图所示,从筛分数据来看,其中小于 200 mm 直径质量百分比为 92%,小于 60 mm 直径质量百分比为 39.3%,经过分析试验方案爆渣可做为过渡料上坝填筑使用。

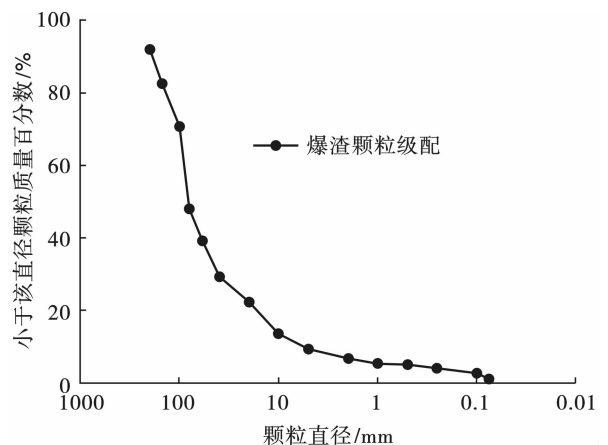


图 7 爆渣颗粒级配曲线

Fig. 7 Gradation curve of fragmentation

5 结论

基于某水利工程枢纽工程发电洞硬岩隧洞钻爆开挖,结合理论分析和公式推导,采用了短直孔+楔形复合掏槽方案并开展爆破试验,与原楔形掏槽方案进行对比分析,从功效、主要技术指标、爆破块度探讨了复合掏槽爆破方案的爆破效果,主要得出如下结论:

1)采用短直孔+楔形复合掏槽方案将隧洞单循环爆破进尺1.7~1.8 m提升到2.0~2.1 m,炮孔利用率从73.91%~78.26%增长到86.96%~91.30%,较原楔形掏槽方案,试验方案每循环可提高进尺0.3 m,炮孔利用率增加10%以上,炸药单耗两方案几乎一致,但试验方案雷管单耗较原方案减小约0.4发/m³,经济效益较好。

2)采用短直孔+楔形复合掏槽方案后,隧道掌子面残眼更少、爆破块度更破碎,便于后续的出渣和下一循环钻孔作业;基于现场的粒径筛分数据表明:III类围岩中小隧洞采用此方案爆破,爆渣可考虑作为大坝填筑的过渡料使用。

参考文献 (References)

- [1] 杨仁树,王雁冰,张召冉,等.井巷工程掏槽爆破新技术及应用[J].中国科学基金,2022,36(1):120-127.
- [1] YANG Ren-shu, WANG Yan-bing, ZHANG Zhao-ran, et al. New technology and application of trench excavation and blasting in urban engineering[J]. Chinese Science Foundation, 2022, 36(1): 120-127. (in Chinese)
- [2] 黄宝龙.岩巷掘进掏槽爆破理论与技术研究进展[J].中国矿业,2014,23(10):103-106.
- [2] HUANG Bao-long. Research progress on theory and technology of trenching and blasting in rock roadway excavation[J]. China Mining Journal, 2014, 23(10): 103-106. (in Chinese)
- [3] 李新翰.小断面地质探洞爆破掏槽方式现场试验[J].河南科技,2024,51(17):46-49.
- [3] LI Xin-han. Field test of blasting trenching method in small cross-sectional geological exploration[J]. Henan Science and Technology, 2024, 51(17): 46-49. (in Chinese)
- [4] 刘小鸣,陈士海.隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形预测[J].岩土工程学报,2019,41(9):1731-1737.
- [4] LIU Xiao-ming, CHEN Shi-hai. Waveform prediction of surface vibration caused by slotting hole blasting in tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1731-1737. (in Chinese)
- [5] 陈元利,付玉华,郭丽艳,等.“小构造”复杂岩石条件下掏槽爆破的试验研究[J].矿业研究与开发,2020,40(6):23-27.
- [5] CHEN Yuan-li, FU Yu-hua, GUO Li-yan, et al. Experimental study on trenching and blasting under complex rock conditions[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6): 23-27. (in Chinese)
- [6] 汪平.某地下金属矿直眼掏槽爆破试验及控制措施[J].金属矿山,2021(8):52-56.
- [6] WANG Ping. Straight cut blasting test and control measures of an underground metal mine[J]. Metal Mine, 2021(8): 52-56. (in Chinese)
- [7] 黄宝龙.准直孔掏槽技术在大断面隧道开挖中的应用[J].爆破,2014,31(1):65-68.
- [7] HUANG Bao-long. Application of collimated hole grooving technology in large-section tunnel excavation[J]. Blasting Blasting, 2014, 31(1): 65-68. (in Chinese)
- [8] 杨玉银.掏槽面积对隧洞开挖钻孔利用率影响试验研究[J].爆破,2013,30(2):100-103.
- [8] YANG Yu-yin. Experimental study on the influence of cut area on the utilization rate of tunnel excavation[J]. Blasting, 2013, 30(2): 100-103. (in Chinese)
- [9] 李启月,吴正宇,黄武林.直眼掏槽空孔效应的计算模型改进与分析[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):925-930.
- [9] LI Qi-yue, WU Zheng-yu, HUANG Wu-lin. Improvement and analysis of the calculation model of hole effect in straight cut[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(5): 925-930. (in Chinese)
- [10] 裴启涛,陈建宏.双楔形掏槽方法和光面爆破技术的综合设计[J].矿业研究与开发,2009,29(1):75-77.
- [10] PEI Qi-tao, CHEN Jian-hong. Comprehensive design of double wedge cutting method and smooth blasting technology[J]. Mining Research and Development, 2009, 29(1): 75-77. (in Chinese)
- [11] 杨岳阳,莫苏鹏.大空孔螺旋掏槽爆破成井技术在铜坑矿的应用[J].采矿技术,2016,16(3):80-82.
- [11] YANG Yue-yang, MO Su-peng. Application of large hole spiral cut blasting in Tongkeng Mine[J]. Mining Technology, 2016, 16(3): 80-82. (in Chinese)
- [12] 史秀志,周英烈,邱贤阳.多空孔单螺旋掏槽一次爆破成井技术实践[J].采矿技术,2011,11(5):113-115.
- [12] SHI Xiu-zhi, ZHOU Ying-lie, QIU Xian-yang. Practice of one-time blasting with multi-hole and single spiral cut[J]. Mining Technology, 2011, 11(5): 113-115. (in Chinese)
- [13] 胡刚,费鸿禄,国志雨.大空孔复式筒形直眼掏槽力学机制与数值模拟分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(9):129-135.

- [13] HU Gang, FEI Hong-lu, GUO Zhi-yu. Mechanical mechanism and numerical simulation analysis of large hollow compound cylindrical straight-hole cut[J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14(9): 129-135. (in Chinese)
- [14] 范兴俊, 陈 斌, 夏 军, 等. 中部间隔装药直眼掏槽爆破成腔过程数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(9): 88-92.
- [14] FAN Xing-jun, CHEN Bin, XIA Jun, et al. Numerical simulation of cavity-forming process by straight cut blasting with intermediate interval charge[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(9): 88-92. (in Chinese)
- [15] 王玉杰. 爆破工程[M]. 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
- [15] WANG Yu-jie. Blasting engineering [M]. 2nd Edition. Wuhan: Wuhan University of Technology Publishing House, 2018. (in Chinese)
- [16] 汪海波, 宗琦, 赵要才. 立井大直径中空孔直眼掏槽爆炸应力场数值模拟分析与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3223-3229.
- [16] WANG Hai-bo, ZONG Qi, ZHAO Yao-cai. Numerical simulation analysis and application of explosion stress field of vertical cut with large diameter hollow hole in vertical shaft[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3223-3229. (in Chinese)
- [17] 林英松, 葛洪魁, 王顺昌. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 216-222.
- [17] LIN Ying-song, GE Hong-kui, WANG Shun-chang. Experimental study on dynamic and static mechanical parameters of rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 216-222. (in Chinese)
- [18] GEGLIO M. Spherical vessel subjected to explosive detonation loading [J]. International Journal of Pressure Vessel & Piping, 1997, 74(2): 83-88.
- [19] 茅蓉蓉. 高应变率下煤系砂岩抗拉性能及损伤破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [19] MAO Rong-rong. Study on tensile properties and damage and fracture mechanism of coal-bearing sandstone under high strain rate [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 龚伟毅, 姚颖康, 杜宇翔. 中等断面隧道长进尺直孔掏槽爆破开挖与超欠挖控制现场试验[J]. 爆破, 2024, 41(2): 32-39.
- [20] GONG Wei-yi, YAO Ying-kang, DU Yu-xiang. Field test on blasting excavation and over-under-excavation control of long-cut straight hole in medium-section tunnel[J]. Blasting, 2024, 41(2): 32-39. (in Chinese)

科技论文写作小知识——摘要

摘要是以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有独立性和自明性, 并且拥有与文献同等量的主要信息, 即不阅读全文, 就能获得必要的信息。一篇完整的论文都要求写随文摘要, 按摘要的不同功能来划分, 大致有如下 3 种类型:

(1) 报道性摘要

报道性摘要是指明一次文献的主题范围及内容梗概的简明摘要, 相当于简介。报道性摘要一般用来反映科技论文的目的、方法及主要结果与结论, 在有限的字数内向读者提供尽可能多的定性或定量的信息, 充分反映该研究的创新之处。科技论文如果没有创新内容, 如果没有经得起检验的与众不同的方法或结论, 是不会引起读者的阅读兴趣的, 所以建议学术性期刊(或论文集)多选用报道性摘要, 用比其他类摘要字数稍多的篇幅, 向读者介绍论文的主要内容, 以“摘录要点”的形式报道出作者的主要研究成果和比较完整的定量及定性的信息, 篇幅以 300 字左右为宜。

(2) 指示性摘要

指示性摘要是指明一次文献的论题及取得的成果的性质和水平的摘要, 其目的是使读者对该研究的主要内容(即作者做了什么工作)有一个轮廓性的了解。创新内容较少的论文, 其摘要可写成指示性摘要, 一般适用于学术性期刊的简报、问题讨论等栏目以及技术性期刊等只概括地介绍论文的论题, 使读者对论文的主要内容有大致的了解, 篇幅以 100 字左右为宜。

(3) 报道-指示性摘要

报道-指示性摘要是以报道性摘要的形式表述论文中价值最高的那部分内容, 其余部分则以指示性摘要形式表达, 篇幅以 100~200 字为宜。

论文发表的最终目的是要被人利用, 如果摘要写得不好, 在当今信息激增的时代论文进入文摘、杂志、检索数据库后, 被人阅读、引用的机会就会少得多, 甚至丧失, 一篇论文价值很高, 创新内容很多, 若写成指示性摘要, 也可能会失去较多的读者。所以一般地说, 向学术性期刊投稿, 应选用报道性摘要形式, 只有创新内容较少的论文, 其摘要可写成报道-指示性或指示性摘要。