

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.024

隧洞开挖工业电子雷管分组延期起爆技术

杨玉银,王绍锋,赵素刚,张红年,朱广淼

(中国电建市政建设集团有限公司,天津 300384)

摘要: 在湖南犬木塘水库工程排山冲隧洞开挖中,为了解决隧洞出口垂直下穿 S227 省道、近距离存在居民区等复杂环境爆破问题,采用了工业电子雷管起爆网路,通过同类爆破孔分组起爆、合理设置各分组微差延期时间及掏槽孔起爆顺序,并控制单循环进尺,成功地将穿越省道最大质点振动速度控制在 7.1722 cm/s 以内,穿越居民楼最大质点振动速度控制在 1.6033 cm/s 以内。实践证明:在隧洞等地下工程施工中,通过同类爆破孔分组起爆,并合理设置起爆顺序、延期时间,可以在有效控制爆破振动的同时,达到同类爆破孔同时起爆的爆破效果。

关键词: 分组起爆;延期时间;起爆顺序;爆破振动控制;工业电子雷管;隧洞开挖

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0242-07

Grouped Delay Initiation Technology Using Industrial Electronic Detonators in Tunnel Excavation

YANG Yu-yin, WANG Shao-feng, ZHAO Su-gang, ZHANG Hong-nian, ZHU Guang-miao

(STECOL Corporation, Tianjin 300384, China)

Abstract: During the excavation of Paishanchong Tunnel of the Quanmutang Reservoir Project in Hunan Province, blasting operations were conducted under environmentally sensitive conditions, featuring direct undercrossing of Provincial Highway S227 at the portal section and adjacent residential structures. To address these safety challenges, a controlled initiation system utilizing industrial electronic detonators was implemented. Identical category blastholes were cluster-initiated with precisely calibrated millisecond delays between groups. The cutting hole initiation sequence was meticulously designed alongside strict regulation of the advance per blasting cycle. This approach successfully contained peak particle velocities to 7.1722 cm/s beneath the provincial highway and 1.6033 cm/s near residential areas. Field implementation demonstrates that in tunnel excavation and similar underground operations, cluster initiation of homogeneous blastholes with optimized initiation sequencing and delays effectively mitigates blast vibrations while maintaining fragmentation efficiency comparable to simultaneous detonation of identical holes.

Key words: grouped initiation; delay timing; initiation sequence; blast vibration control; industrial electronic detonators; tunnel excavation

在以往传统的隧洞等地下工程施工中,由于隧洞掏槽和周边孔的特殊性,为了达到良好的掏槽效果和周边孔光爆效果,均要求同一排成对掏槽孔同

时起爆,所有周边孔也要求同时起爆;掏槽孔和周边孔之间的各圈层崩落孔,为了给下一排爆破孔创造良好的临空面,也要求同时起爆。而在复杂环境隧

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-19

网络首发日期 (Published online): 2025-12-11

作者简介: 杨玉银 (1968-), 男, 河北遵化人, 正高级工程师, 主要从事地下工程及土石方明挖爆破技术方面的研究, (E-mail) 752153592@qq.com。

About the author: YANG Yu-yin (1968-), male, born in Zunhua city, Hebei province, senior engineer (professor-level), mainly engaged in underground engineering and open-cut rock and earth blasting technology, (E-mail) 752153592@qq.com.

洞爆破施工中为了有效控制质点振动速度,必须控制单响药量,这就需要对同类爆破孔分组起爆,分组起爆很可能影响整体爆破效果。如何在有效控制爆破振动的同时,同样达到良好的爆破效果,就成了本文研究的课题。

隧洞开挖爆破施工中,非电毫秒雷管由于延时误差问题^[1],常用段位一般在MS14以内,比如MS14段雷管的理论延期时间是760 ms,而同一批MS14段雷管的延时误差可达到110 ms。随着工业电子雷管的使用,由于其具有延时精度高、稳定性好、安全可靠的特点,为本课题的解决提供了一定的可能性,也为湖南犬木塘水库工程排山冲隧洞垂直下穿省道、近距离穿越居民区等复杂环境爆破问题的解决提供了有利条件。

1 工程概况

排山冲隧洞位于湖南省邵东市简家陇镇,全长1426.997 m,底坡 $i = 1/2000$,进口桩号SD0 + 606.289 m、底板高程 $\nabla 236.320$ m;出口桩号SD2

+033.286 m、底板高程 $\nabla 235.608$ m。隧洞开挖断面呈城门洞形,开挖断面宽2.40~3.06 m、高3.20~3.68 m。

本文研究的开挖洞段位于排山冲隧洞出口SD2 + 033.286 ~ SD1 + 953.286 m,该洞段出露围岩为泥质灰岩,属Ⅲ类围岩,开挖断面宽3.06 m、高3.68 m,节理裂隙较发育,岩层产状与隧洞轴线方向呈大角度斜交,对成洞有利,岩石坚固系数 $f = 4$;地下水主要为基岩裂隙水,不发育。

2 周围环境及爆破难点

2.1 周围环境

排山冲隧洞出口SD2 + 021.850 ~ SD2 + 016.350 m洞段正上方是现有S227省道公路,洞顶距路面垂直距离11.211 m,路面面层为沥青混凝土;SD2 + 007.510 ~ SD1 + 991.730 m洞段右侧是三层居民楼,砖混结构,距隧洞最近距离位于SD1 + 998.080 m,水平距离24.61 m,如图1所示。

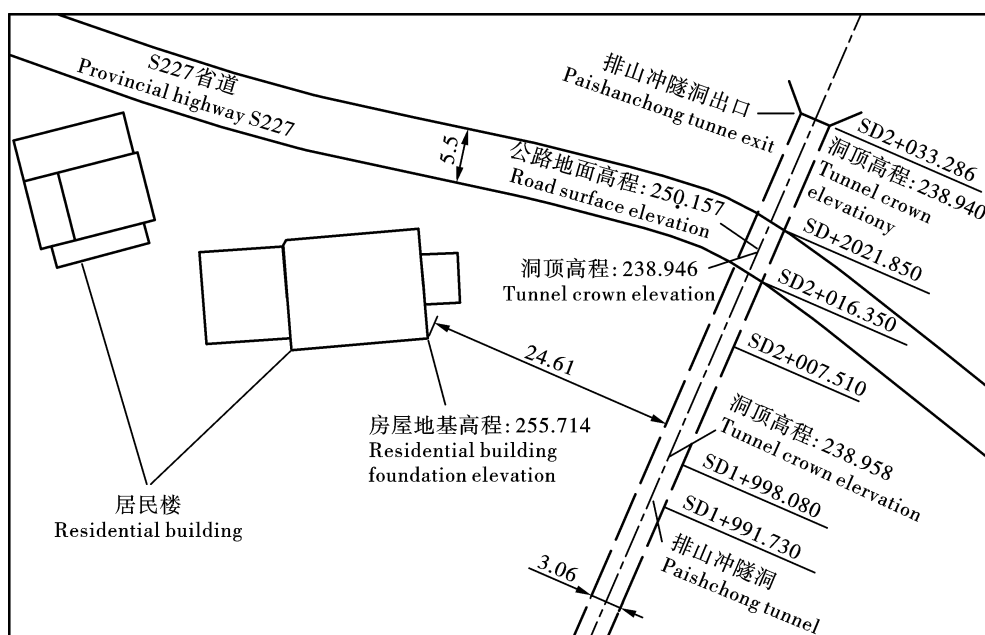


图1 隧洞出口周围环境平面图(单位:m)

Fig. 1 Site plan of the tunnel portal and its surrounding environment(unit:m)

2.2 爆破难点

排山冲隧洞出口洞顶正上方存在S227省道公路,洞顶附近存在居民区,且隧洞掌子面爆破区边缘距居民区小于100 m,属复杂环境爆破^[2]。具体爆破难点如下:

(1)洞顶正上方的S227省道为当地交通主干道,路面为沥青混凝土,不能因为爆破振动造成路面开裂破坏,影响顶部车辆通行。

(2)洞顶附近居民楼距隧洞水平距离仅24.61 m,爆破振动可能造成楼体开裂破坏,从而出现居民阻工、居民转移问题,进一步造成社会影响。

3 爆破振动控制思路

在隧洞开挖爆破施工中,传统上主要采用同一类爆破孔、同一圈层爆破孔同时起爆的方式。这种爆破方法往往同时起爆的炮孔数量较多。比如

102 m² 左右的隧洞开挖断面^[3], 多采用楔形掏槽, 同一组掏槽孔同时起爆的炮孔数量多在 12~20 个, 同时起爆的崩落孔 15~27 个, 同时起爆的周边孔数量可多达 49 个。如此数量同时起爆的炮孔, 即便掏槽孔单孔药量 0.8 kg、崩落孔单孔药量装 0.6 kg、周边孔单孔药量装 0.3 kg, 单响药量也在 9.0~16.2 kg。这在爆破振动控制要求比较高的复杂环境爆破施工中, 单响药量可能仍然超出了允许的最大单响药量。

目前, 随着工业电子雷管在隧洞开挖中的使用, 使控制单响药量的方法出现了更多的可能性, 具体可以采取以下措施:

(1) 同一类炮孔采用分组起爆方法。将成对掏槽孔按照单响药量控制需要, 分成多组起爆; 将同一圈层崩落孔或周边孔按照单响药量控制需要, 分成多组起爆。通过控制每一组起爆的炮孔数量, 使单响药量控制在允许药量范围内。

(2) 控制同类炮孔的起爆延时时间。隧洞开挖中常采用非电毫秒雷管, 尽管各段雷管延时均存在较大误差^[1], 比如各类掏槽孔常用的: MS1 段延时误差 13 ms、MS3 段延时误差 20 ms、MS5 段延时误差 30 ms, 但这一延时误差从以往的实践看, 爆破效果仍能满足施工需要。这说明, 延期时间误差在 20~30 ms 时, 并不影响同一段位的爆破效果。因此, 在采用延时精度很高的工业电子雷管时, 同一排成对掏槽孔、同一圈层崩落孔、周边孔的各分组间可采用较小的延期时间, 较小的延期时间仍能保证同一排或同一圈层的爆破效果。

(3) 适当增大排间延期时间。掏槽孔各排之间、崩落孔各排之间、外圈崩落孔与周边孔之间, 应有充足的时间间隔, 以保证前排孔爆破后充分脱离母岩, 为后排孔爆破创造充足的临空面, 更重要的是这样可以有效减少前后两排炮孔爆破振动叠加, 避免质点振动速度增大。

隧洞开挖爆破掏槽阶段最初只有掌子面一个临空面, 没有掏槽空腔, 因此, 掏槽爆破需要较大的药量, 单耗也较高, 产生的爆破振动通常情况下也会较大, 若前后两排间的时间间隔过短, 爆破振动会产生叠加, 导致振动速度增大。以往传统上掏槽多采用非电毫秒雷管 MS1、MS3、MS5 段, 时间间隔为 50 ms, 采用工业电子雷管可适当增加前后两排的起爆延期时间间隔^[4], 可采用 100 ms。崩落孔各排间、崩落孔与周边孔之间同样可以采用 100 ms。

4 爆破设计方案

根据以上分析, 排山冲隧洞出口洞段开挖采用

控制爆破设计, 全断面开挖, 掏槽采用楔形掏槽, 炮孔直径 $\phi 42$ mm, 炮孔深度控制在 1.2 m 以内, 各排炮孔采用分组起爆方式, 同一排炮孔相邻两组间采用短时差延期起爆^[5], 两排之间采用较长时差延期爆破, 同一组炮孔数量按照允许单响药量进行控制。

4.1 爆破器材

(1) 炸药: 选用易普力邵阳三化有限责任公司生产的 2 号岩石乳化炸药, 直径 $\phi 32$ mm、重 300 g、长 30 cm。

(2) 雷管: 选用易普力股份有限公司永州湘器生产点生产的无段位、钢质、8 号 XQ-A 型工业电子雷管^[6], 使用温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 延期时间根据爆破工程实际需要在 0~16000 ms 内任意设定, 最小设定时间间隔为 1 ms; 延期时间 ≤ 150 ms 时, 误差不大于 ± 1.5 ms; 延期时间 > 150 ms 时, 相对误差不大于 $\pm 1\%$; 起爆线选用 0.6 mm 电子雷管专用起爆线。

4.2 最大单响药量计算

最大单响药量可按式(1)计算

$$Q_{\max} = R^3 \left(\frac{v}{K} \right)^{\frac{3}{\alpha}} \quad (1)$$

式中: R 为爆破点与被保护对象间的距离, m; v 为被保护对象能承受的安全允许振速, cm/s; K 、 α 为爆破点至保护对象间与地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

根据《爆破安全规程》^[2] 及同类工程类比, 地表右侧居民楼安全允许质点振动速度取 2.0 cm/s; 文献[2]中 28 d 龄期的大体积混凝土在同类工况下的最低安全允许质点振动速度为 8.0 cm/s, 考虑到公路路面为沥青混凝土, 抗震性能要好于混凝土, 可取地表公路安全允许质点振动速度为 8.0 cm/s。隧洞围岩为 III 类泥质灰岩, 属中硬岩, 取 $K = 200$ 、 $\alpha = 1.65$ 。最大单响药量结算结果, 见表 1。

4.3 爆破设计

4.3.1 基本参数

(1) 钻孔直径 D : 采用 YT28 型手风钻钻孔, 钻孔直径取 $D = 42$ mm。

(2) 单循环进尺 L : 为控制爆破振动, 采用浅孔小药量爆破, 设计单循环进尺取 $L = 1.2$ m。

4.3.2 掏槽方式设计

(1) 掏槽方式选择^[7]: 鉴于围岩硬度较低、单循环进尺较短, 可采用楔形掏槽, 设置主掏槽孔和辅助掏槽孔。

(2) 主掏槽孔超深 ΔL : 鉴于围岩中硬偏软, 超深不宜过大, 取 $\Delta L = 20$ cm。

(3) 成对主掏槽孔的孔底距离 c : 考虑到爆破振

动控制需要,主掏槽孔内装药量较常规爆破偏小,孔底距离宜取小值,取 $c = 15\text{ cm}$ 。

(4)主掏槽孔与掌子面夹角 α :围岩坚固系数 $f = 4$,参照文献[7],取 $\alpha = 70^\circ$ 。

(5)主掏槽孔长度 L_1 : $L_1 = (L + \Delta L)/\sin \alpha = 148\text{ cm}$ 。

(6)主掏槽孔孔距 a_1 :鉴于主掏槽孔内装药量较常规爆破偏小,孔距不宜过大,主掏槽孔孔距取 $a_1 = 30\text{ cm}$ 。

(7)辅助掏槽孔:布置于主掏槽孔与临近崩落孔之间,主要用于克服崩落孔的孔底到主掏槽孔的抵抗线偏大的问题,根据需要设置。

表 1 最大单响药量计算表
Table 1 Calculation of maximum charge per delay

序号 No.	被保护建筑物 Protected structure	水平距离 Horizontal distance/m	垂直距离 Vertical distance/m	直线距 Direct distance R/m	允许质点振动速度 Allowable particle vibration velocity $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	K	α	允许单响药量 Maximum allowable charge per delay $Q_{\max}/\text{kg}$
1	地面公路 Ground road	0	11.211	11.211	8.0	200	1.65	4.048
2	右侧居民楼 Residential building on the right	24.61	16.756	29.773	2.0	200	1.65	6.097

4.3.3 崩落孔设计

(1)崩落孔孔深 L_2 :取 $L_2 = L = 1.2\text{ m}$

(2)崩落孔孔距 a_2 :本设计采用密孔小药量爆破,取 $a_2 = 70 \sim 80\text{ cm}$ 。

(3)崩落孔排距 b_2 :按照部位不同,选取 $b_2 = 40 \sim 80\text{ cm}$ 。

4.3.4 周边孔设计

周边孔按照光面爆破设计^[1,8,9]。

(1)周边孔孔深 L_3 :取 $L_3 = L = 1.2\text{ m}$ 。

(2)周边孔间距 E :围岩中硬偏软,根据文献[1],取 $E = 55\text{ cm}$ 。

(3)最小抵抗线(光爆层厚度) W :根据文献[9]及同类工程类比,本设计取 $W = (0.8 \sim 1.0)E$,取 $W = 50\text{ cm}$ 。

4.3.5 炮孔布置

按照以上孔网参数,典型炮孔布置图,如图 2 所示。

4.3.6 装药结构设计

(1)装药结构:鉴于孔深较浅,围岩硬度不高,掏槽孔、崩落孔、周边孔均采用 $\phi 32\text{ mm}$ 乳化炸药连续装药,工业电子雷管反向起爆。

(2)填塞长度:炮孔填塞采用人工制作土卷填塞,掏槽孔填塞长度要求不少于 70 cm ;崩落孔填塞长度不小于 60 cm 、周边孔填塞长度取 $30 \sim 35\text{ cm}$ 。

4.3.7 装药量计算

本设计采用密孔小药量设计,单孔药量计算如下:

(1)主掏槽孔装药量 Q_1 :装药系数按 $n_1 = 50\%$ 计算,则 $Q_1 = n_1, L_1 = 0.74\text{ kg}$,取 $Q_1 = 0.75\text{ kg}$ 。

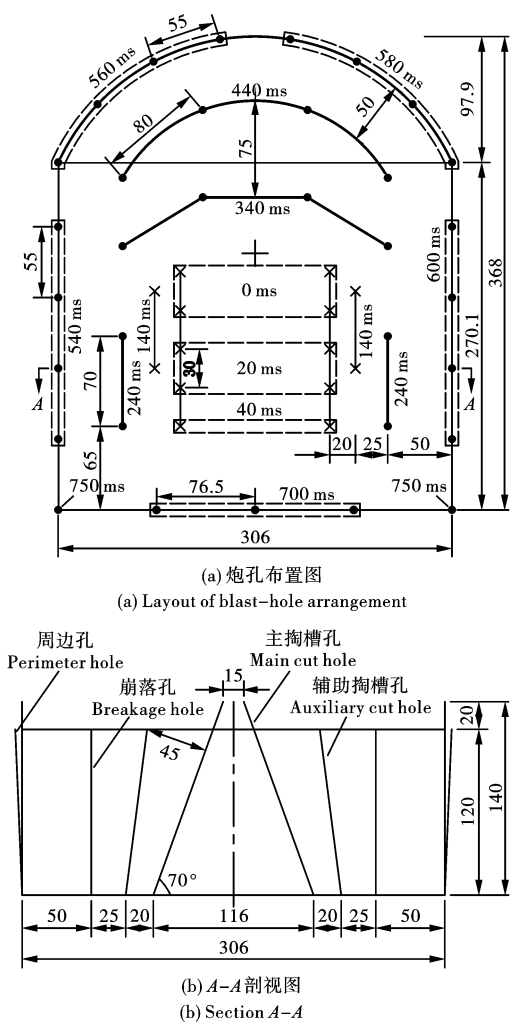


图 2 典型炮孔布置图(单位:cm)
Fig. 2 Typical blast-hole layout(unit:cm)

(2) 辅助掏槽孔装药量 Q_f : 如图 3(b) 所示, 与主掏槽孔相邻的崩落孔孔底到主掏槽孔的抵抗线达到 85 cm, 偏大。为了克服抵抗线偏大的问题, 设置了辅助掏槽孔, 辅助掏槽孔抵抗线 $W_f = 45$ cm, 孔内仅需少量炸药即可, 取 $Q_f = 0.3$ kg。

(3) 崩落孔装药量 Q_2 : 装药系数按 $n_2 = 40\%$ 计算, 则 $Q_2 = n_2 L_2 = 0.48$ kg, 取 $Q_2 = 0.45$ kg。

(4) 周边孔装药量 Q_3 : 围岩为中硬岩, 根据文献 [1], 周边孔线装药密度取 $q = 250$ g/m, 则单孔药量 $Q_3 = qL_3 = 0.30$ kg。

(5) 底板孔、底角孔装药量 Q_4 : 取 $Q_4 = Q_2 = 0.45$ kg。

具体装药量情况, 见表 2。

表 2 排山冲隧洞出口洞段典型爆破设计参数

Table 2 Typical blasting design parameters for the paishanchong tunnel portal section

炮孔名称 Blast hole type	雷管延时 Detonator delay/ms	孔径 Hole diameter/ mm	孔长度 Hole length/ cm	孔数/个 Number of holes	孔距 Spacing/ cm	排距或 抵抗线 burden/cm	药径 Charge diameter/ mm	单孔药量 Charge per hole/kg	总药量 Total charge/kg
主掏槽孔 Main cut hole	0 ~ 40	42	148	10	30	/	32	0.75	7.5
辅助掏槽孔 Auxiliary cut hole	140	42	125	4	60	45	32	0.30	1.2
崩落孔 Breakage hole									
周边光爆孔 Perimeter smooth- blasting hole	540 ~ 600	42	120	16	55	50	32	0.30	4.8
底板孔 Floor hole	700	42	120	3	76.5	65	32	0.45	1.35
底角孔 Floor corner hole	750	42	120	2	/	65	32	0.45	0.9
合计 Total				47					21.15

注: 开挖断面面积 10.42 m^2 , 炸药单耗: $21.15 / (10.42 \times 1.2) = 1.69 \text{ kg/m}^3$ 。

Note: Excavation cross-sectional area is 10.42 m^2 , and the specific charge (explosive consumption per unit volume) is: $21.15 / (10.42 \times 1.2) = 1.69 \text{ kg/m}^3$

4.3.8 起爆网路延期时间设计

延期时间设计原则: 既要保证质点振动速度控制要求, 同时要保证掏槽部位或同一圈层崩落孔、周边孔的爆破效果。单就爆破效果而言, 以楔形掏槽为例, 最好的效果是左右两排所有成对掏槽孔同时起爆, 但这就可能造成爆破质点振动速度超出安全允许值^[2], 因此, 必须采用分组延期起爆方式, 如图 2(a) 所示, 使每一组的质点振动速度控制在允许范围内。为了保证爆破效果, 使成对掏槽孔或同一圈层崩落孔、周边孔尽可能接近同时起爆, 应使同一排 (或同一圈层) 炮孔各分组按同一方向顺序起爆, 并采用较小的时差间隔, 以达到接近同时起爆的效果。

(1) 分组设置。根据表 1 允许最大单响药量计算结果, 本设计允许最大单响药量控制值以 4.048 kg 为准。表 3 中最大单孔装药量出现在主掏

槽部位: 0.75 kg/孔, 因此掏槽孔爆破按照 4 孔一组, 单响药量为 $3.0 \text{ kg} < 4.048 \text{ kg}$ 。为防止意外, 确保安全, 其他炮孔仍按照 2 ~ 4 孔一组。

(2) 各分组延期时间设置 T_1 。为确保掏槽孔、崩落孔、周边孔等分组爆破效果, 同一排孔各分组间应选取较小的延期时间。为选择合理的延期时间, 在同样的爆破分组、同样的单孔药量条件下选取了不同的延期时间进行爆破试验, 各类炮孔具体分组情况, 见图 2(a), 具体装药情况, 见表 2。试验洞段选择在靠近洞口 $SD2 + 030.80 \sim SD2 + 21.20 \text{ m}$ 洞段, 爆破振动测试位置设置在洞口右侧居民楼距离隧洞最近的部位, 分组延期时间分别选 $T_1 = 10 \text{ ms}$ 、 $T_1 = 20 \text{ ms}$ 、 $T_1 = 30 \text{ ms}$ 、 $T_1 = 40 \text{ ms}$ 四种方案, 每种方案进行两次爆破试验。测试结果, 见表 3。

表 3 爆破振动测试结果
Table 3 Results of blasting vibration test

项目 Item	方案 1 Option 1 $T_1 = 10\text{ ms}$	方案 2 Option 2 $T_1 = 20\text{ ms}$	方案 3 Option 3 $T_1 = 30\text{ ms}$	方案 4 Option 4 $T_1 = 40\text{ ms}$
第 1 次 1st test	0.5435 cm/s	0.5002 cm/s	0.7128 cm/s	0.7566 cm/s
第 2 次 2nd test	0.5539 cm/s	0.5136 cm/s	0.6917 cm/s	0.7899 cm/s
平均值 Average	0.5488 cm/s	0.5069 cm/s	0.7050 cm/s	0.7733 cm/s
试验洞段 Test tunnel section	SD2 + 030.80 ~ SD2 + 28.40 m	SD2 + 028.40 ~ SD2 + 26.00 m	SD2 + 026.00 ~ SD2 + 23.60 m	SD2 + 023.6 ~ SD2 + 21.20 m

从表 3 不难看出,在排山冲隧洞出口的特定围岩岩性条件下,试验洞段的爆破振动测试结果均小于安全允许质点振动速度 1.5 cm/s,但当分组延期时间 $T_1 = 20\text{ ms}$ 时,相对质点振动速度较低,因此本设计可取 $T_1 = 20\text{ ms}$ 。

(3)排间延期时间设置 T_2 。为保证前排孔爆破为后排孔创造较好的临空面,各排间应选取较大的延期时间,本设计可取 $T_2 = 100\text{ ms}$ 。

(4)起爆顺序设置。掏槽孔各分组间自上而下连续起爆;崩落孔由内向外、自下而上逐层顺序起爆;周边孔从左侧墙到右侧墙环向起爆;然后起爆底板孔,最后起爆底角孔。

具体起爆延时和起爆顺序情况,见图 2 和表 2。

5 优化前后爆破效果对比

5.1 优化前爆破效果

在采用工业电子雷管前,2024 年 12 月 31 日洞口第一炮开挖采用了传统的非电毫秒雷管,由于非电毫秒雷管段位有限,无法进行合理的单响药量控制爆破,采用了同一排成对掏槽孔、同一圈层炮孔同时起爆的方法,炮孔同时起爆药量偏大,最终造成了洞门混凝土与洞脸边坡严重开裂、分离,裂缝宽度 5 ~ 15 mm,如图 3 所示,洞门混凝土实测质点振动速度达到 11.50 cm/s。



图 3 爆破后洞门混凝土开裂、分离情况
Fig. 3 Cracking and spalling of tunnel portal concrete after blasting

5.2 优化后爆破效果

在随后的开挖中,采用了工业电子雷管,并进行了上述爆破方案优化^[10],截止 2025 年 4 月 12 日,排山冲隧洞出口已完成 SD2 + 033.286 ~ SD1 + 953.286 m 洞段开挖,该洞段开挖期间,全程采用 LS-20 型爆破测振仪进行爆破振动监测。2 月 23 日开挖至地表公路正下方,实测最大质点振动速度为 7.1722 cm/s,见图 4(a);3 月 5 日开挖至距右侧居民楼最近部位,实测最大质点振动速度为 1.6033 cm/s,见图 4(b)。整个开挖过程中,地表公路未出现开裂破坏现象,未影响地表交通运行;右侧居民楼墙体、地基等均未出现振动开裂破坏,未出现居民阻止施工现象。

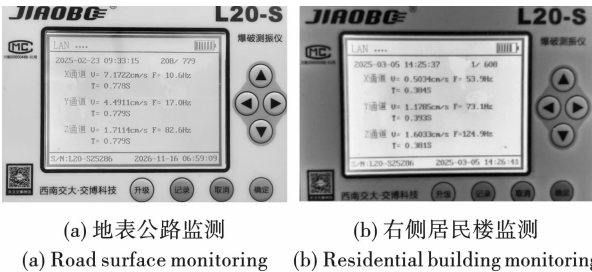


图 4 质点振动速度监测
Fig. 4 Monitoring of particle velocity

通过对比不难看出:采用工业电子雷管可根据需要灵活、有效控制单响药量,有效地将质点振动速度控制在允许范围内。工业电子雷管的应用从根本上改变了非电毫秒雷管段位不足,控制单响药量受限的问题。

6 结论

(1)在隧洞等地下工程施工中,为了满足安全允许质点振动速度要求,可以采用分组起爆的爆破方法。

(2)本次工程应用实践证明,同一排成对掏槽孔、同一圈层崩落孔、同一圈周边孔,各分组间延期

时间不大于 20 ms 时,可接近同时起爆的爆破效果。

(3)隧洞开挖爆破同一排成对掏槽孔、同一圈层崩落孔、同一圈周边孔采用分组起爆时,应按照同一方向临近次序顺序起爆。

参考文献 (References)

- [1] 国家能源局. 水工建筑物地下开挖工程施工技术规范 DL/T5099—2011[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [1] National Energy Administration, China. Technical specification for excavation underground works on hydraulic structures DL/T5099—2011 [S]. Beijing: China Power Press,2011. (in Chinese)
- [2] 中国工程爆破协会. 爆破安全规程 GB6722—2014 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [2] China Society of Explosives and Blasting. Safety regulations for blasting GB6722—2014 [S]. Beijing: Standards press of china,2015. (in Chinese)
- [3] 杨玉银,陈长贵,陈 斌,等. 境外长大隧洞快速掘进施工技术[J]. 爆破,2016,33(4):84-89.
- [3] YANG Yu-yin, CHEN Chang-gui, CHEN Bin, et al. Speedy excavation technology for long and big tunnels in overseas projects[J]. Blasting,2016,33(4):84-89. (in Chinese)
- [4] 杨玉银,杨仕杰,张艳如,等. 宽孔距破技术在大断面硬质岩石隧洞开挖中的应用[J]. 工程爆破,2024,30(1):66-73.
- [4] YANG Yu-yin, YANG Shi-jie, ZHANG Yan-ru, et al. Application of wide-space blasting technology during the excavation in large-section hard rock tunnel[J]. Engineering Blasting,2024,30(1):66-73. (in Chinese)
- [5] 徐菲菲,宋恩周. 复杂环境下铁路隧道控制爆破新技术[J]. 工程爆破,2025,31(3):124-129,150.
- [5] XU Fei-fei, ZHANG Xiao-jun, SONG En-zhou. New technology for controlled blasting of railway tunnels in complex environments [J]. Engineering Blasting, 2025, 31(3):124-129,150. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业电子雷管 WJ/T 9085—2024[S]. 北京:[s. n.],2025.
- [6] Ministry of industry and information Technology of the People's Republic of China. Industrial digital electronic detonator WJ/T 9085—2024[S]. Beijing:[s. n.],2025. (in Chinese)
- [7] 杨玉银,张艳如,杨仕杰,等. 隧洞开挖典型掏槽设计方法[J]. 工程爆破,2021,27(3):63-69,101.
- [7] YANG Yu-yin, ZHANG Yan-ru, YANG Shi-jie, et al. Typical cutting design methods in tunnel excavation[J]. Engineering Blasting,2021,27(3):63-69,101. (in Chinese)
- [8] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:360-363.
- [8] WANG Xu-guang. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 353-354. (in Chinese)
- [9] 杨玉银,陈长贵,黄 浩,等. 隧洞开挖光面爆破装药结构的改进与应用[J]. 工程爆破,2016,22(4):77-81.
- [9] YANG Yu-yin, CHEN Chang-gui, HUANG Hao, et al. The improvement and application of smooth blasting charging structure in the tunnel excavation[J]. Engineering Blasting,2016,22(4):77-81. (in Chinese)
- [10] 王逸轩,张春瑜,王立川,等. 隧道平导贯通段钻爆施工安全控制技术[J]. 工程爆破,2025,31(4):172-180.
- [10] WANG Yi-xuan, ZHANG Chun-yu, WANG Li-chuan, et al. Safety control technology for drill and blast construction in the through section of tunnels with parallel pilot tunnel[J]. Engineering Blasting,2025,31(4):172-180. (in Chinese)

(上接第 137 页)

- [12] 刘 一,马灿璇,湛 龙,等. 基于无人机技术的露天矿山越界开采监测与评估方法[J]. 中国矿业,2024,33(1):105-113.
- [12] LIU Yi, MA Can-xuan, ZHAN Long, et al. Monitoring and evaluation method for cross border mining in open-pit mines based on drone technology[J]. China Mining Magazine,2024,33(1):105-113. (in Chinese)
- [13] 何兴贵. 岩溶地区三维地质模型建立及其在爆破设计中的应用[D]. 贵阳:贵州大学,2017.
- [13] HE Xing-gui. Three dimensional geological model of karst area established and its application in blasting design[D]. Guiyang:Guizhou University,2017. (in Chinese)
- [14] 颜子涵. 自由面条件影响爆破效果的数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [14] YAN Zi-han. Numerical simulation research on the effect of free surface conditions on blasting action[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2021. (in Chinese)
- [15] Eunkyung Jang, Woonchul Kang. Estimating riparian vegetation volume in the river by 3D point cloud from uav imagery and alpha shape[J]. Applied Sciences. 2024; 14(1):20.
- [16] R C dos Santos, M Galo, A C Carrilho. Extraction of building roof boundaries from LiDAR data using an adaptive alpha-shape algorithm[J]. IEEE geoscience and remote sensing letters,2019,16(8):1289-1293.