

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.021

复杂环境下城市地铁暗挖通道爆破网路 优选及应用研究*

田成林^{1,2}, 赵子龙¹, 李中辉³, 张文锡³, 周悦龙³, 吴献明³, 曾旺³, 孙永¹

(1. 山东科技大学 资源学院, 泰安 271019; 2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 青岛 266590;
3. 中铁十四局集团 第四工程有限公司, 济南 250000)

摘要: 济南地铁四号线浆水泉路站隧道工程现场周边建筑物密集, 暗挖段距桥墩桩基的最小距离为 3.58 m, 为降低爆破振动带来的有害效应, 合理的爆破网路设置是有效举措之一。为此, 以该地铁隧道工程为依托, 选取风险系数较低的爆破区域为试验区, 开展了 S 形、同向、两侧向拱顶 3 种爆破网路的对比试验。在排间延期 50 ms、孔间延期 5 ms 的条件下, 对路面振速的监测及波形特征分析, 探究不同爆破网路下爆破振动的差异性; 同时对破岩效果进行了统计及分析。结果表明: 在其他爆破参数相同情况下, S 形起爆的爆破网路爆破引起的振速峰值最高, 为 0.87 cm/s; 同向起爆次之, 为 0.55 cm/s; 两侧向拱顶起爆最低, 为 0.41 cm/s。较 S 形起爆相比, 同向起爆振速降低 37%, 两侧向拱顶起爆的爆破网路减振效果最优, 可使振动峰值降低约 52%。同时, 通过统计爆后岩体破碎效果并分析发现, 两侧向中间起爆的大块率最低 (<25%), 细颗粒占比最高, 综合表现最优。最后, 选用两侧向拱顶起爆的爆破网路在距桥墩桩基最近、风险系数最高的爆破段进行应用, 进一步验证该结论。本研究可为复杂环境下城市地铁暗挖通道爆破的爆破网路优化及振动控制提供参考。

关键词: 爆破网路; 爆破振动; 波形分析; 应力波叠加; 隧道工程

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0190-13

Blasting Network Optimization and Application for Urban Subway Drift in Complex Environments

TIAN Cheng-lin^{1,2}, ZHAO Zi-long¹, LI Zhong-hui³, ZHANG Wen-xi³,
ZHOU Yue-long³, WU Xian-ming³, ZENG Wang³, SUN Yong¹

(1. School of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;
2. School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao 266590, China; 3. China Railway 14th Bureau Group fourth
Engineering Co., Ltd., Jinan 250000, China)

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-08

网络首发日期 (Published online): 2026-03-15

作者简介: 田成林 (1987-) 男, 山东泰安, 讲师, 主要从事爆破工程、深部煤岩工程、隧道通风及瓦斯防治等方面的教学与科研工作, (E-mail) skdtcl@126.com。

通信作者: 孙永 (1971-) 男, 山东临朐, 教授, 主要从事隧道工程、爆破工程等方面的教学与科研工作, (E-mail) skd996768@sdust.edu.cn。

基金项目: 山东省博士后创新项目 (SDCX-ZG-202400203); 青岛市博士后资助项目 (QDBSH20230202074); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开放基金资助项目 (2011DA105287-FW202203)

About the author: TIAN Cheng-lin (1987-), male, lecturer, born in Tai'an city, Shandong province, mainly engaged in teaching and scientific research in blasting engineering, deep coal and rock engineering, tunnel ventilation and gas prevention and control, (E-mail) skdtcl@126.com.

Corresponding author: SUN Yong (1971-), male, professor, born in Linqu city, Shandong province, mainly engaged in teaching and scientific research of tunnel engineering and blasting engineering, (E-mail) skd996768@sdust.edu.cn.

Fund Programs: The Shandong postdoctoral innovation project (SDCX-ZG-202400203), Qingdao Postdoctoral Project (QDBSH20230202074), the State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (No. 2011DA105287-FW202203)

Abstract: The Jiangshuiquan Road Station tunnel construction along Jinan Metro Line 4 is located in a highly urbanized area with building proximity constraints, featuring a critical minimum clearance of 3.58 m between the underground excavation zone and adjacent pier foundations. This study consequently established a controlled test section within the subway tunnel project, characterized by lower blasting risk potential, to conduct systematic comparative analyses of three distinct blast initiation network configurations: S-patterned, co-directional, and bilateral-oriented vaults. Under controlled blasting conditions with 50 ms inter-row and 5ms inter-hole, comprehensive monitoring of pavement vibration velocities and waveform characteristics was carried out to evaluate vibration differentials across distinct initiation networks systematically. Concurrent quantitative analysis of rock fragmentation effects revealed that, while maintaining identical blasting parameters, the S-patterned detonation network generated the highest peak particle velocity of 0.87 cm/s, followed by co-directional detonation (0.55 cm/s), with the lowest on both sides (0.41 cm/s). Comparative analysis reveals that co-directional detonation achieves a 37% reduction in peak vibration velocity compared to S-patterned detonation. In comparison, the bilateral crown-oriented detonation demonstrates optimal vibration attenuation, achieving approximately 52% peak reduction. Post-blast fragmentation analysis further indicates that the bilateral-to-center detonation method yields the lowest oversized fragment rate (<25%) and concurrently the highest fine particle proportion, thereby exhibiting superior overall fragmentation quality. Finally, the bilateral crown-oriented detonation network was implemented in the highest-risk blasting zone adjacent to pier foundations to validate these findings. This study establishes a methodological framework for optimizing initiation networks and controlling blast-induced vibrations in urban subway tunnel construction within a complex environment.

Key words: blasting network; blasting vibration; waveform analysis; stress wave superposition; tunnel engineering

地铁隧道爆破施工中, 爆破振动易对周边桥墩、路面及隧道既有结构产生不利影响, 因此对爆破振动的控制始终是爆破作业中的核心问题。爆破网路作为影响爆破能量释放与振动传播的关键参数, 其合理设计与选择直接关系到施工安全及爆破效果。济南地铁四号线浆水泉路车站位于城市密集区, 与周边建筑物及既有桥墩桩基距离较近, 故对爆破振动的控制要求较为严格。因此, 开展不同爆破网路的振动特性研究, 对优化施工方案、降低安全风险具有重要意义。

国内外学者针对爆破网路对爆破振动的影响已开展大量研究。严鹏等指出围岩振动响应与炮孔布置及爆破网路参数存在显著关联^[1]; 段继超等发现在露天台阶破碎中, 不同起爆顺序会导致爆破效果及振动特性产生明显差异^[2]; 周敏等在深孔露天微差爆破研究中^[3], 提出可优化爆破效果、减少爆破振动危害的微差爆破网路, 有效降低了爆破振速峰值; 杨超则从起爆网路、炮孔布置及装药结构等多维度^[4], 总结出降低露天台阶深孔爆破大块率的综合技术方法; 此外, 王俊新等通过现场试验对布孔方式、孔网参数及起爆网路进行协同优化^[5], 确定了能有效控制隆起与水平位移的最优方案; Mingnan X 等研究了不同爆震序列类型下爆破波相互作用和应力分布的影响^[6]; 郭明针对逐孔起爆、间隔起爆两种方式及不同微差间隔时间^[7], 研究了岩石损伤演化规律, 为减少大块率提供了理论依据; 范明等通过

优化周边眼控制爆破参数及炮孔起爆顺序等^[8], 显著提升了隧道工程的施工效率与成型质量; Xiaoming G 等为有效降低隧道爆破引发的振动影响^[9], 依据岩石破碎效应及波叠加理论, 提出了一种针对不同炮孔延期时间的计算方法; 在台阶爆破振动效应的控制方面, Wang S 等针对自由面条件的变化^[10], 提出了一种新的叠加方法; Ma H 等通过合理的爆破顺序有效降低了地表质点振动速度^[11], 同时发现爆破空腔具备一定的隔振能力。

基于上述研究基础, 以济南地铁四号线浆水泉路车站为背景, 选取风险系数较低的爆破区域为试验区, 在试验区开展了 S 形、同向、两侧向拱顶三种爆破网路的对比试验。系统分析不同爆破网路形式下的振动速度峰值、波形特征及爆后岩体破碎效果, 旨在选出适用于本工程的爆破网路。最后, 选用该爆破网路在距桥墩桩基最近、风险系数最高的爆破段进行工程验证, 为复杂环境下城市地铁暗挖通道爆破的爆破网路优化和振动控制提供参考。

1 工程概况

浆水泉路车站位于经十路与浆水泉路交叉口南侧, 沿经十路东西向敷设。浆水泉路车站 B 出入口位于车站北侧, 其暗挖通道采用矿山法施工, 下穿经十路, 全长 92.6 m。该通道埋深 9~12.4 m, 断面内部宽为 10.0 m、净高为 6.7 m, 标准断面形式为直墙起拱断面(局部采用平顶直墙断面), 见图 1、图 2。



图1 浆水泉路站总平面布置图
Fig. 1 General layout of Jiangshuiquan Road Station

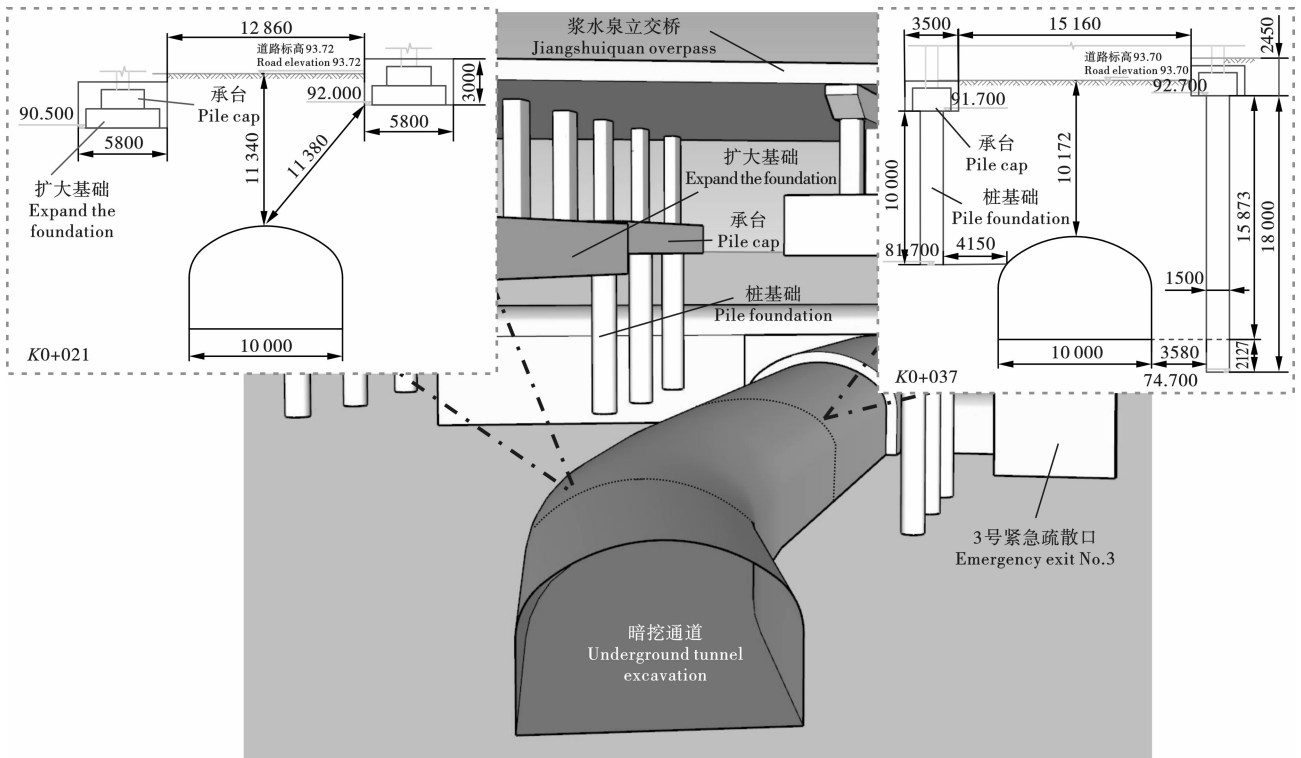


图2 浆水泉路站暗挖通道三维模型及关键点剖面图(单位:mm)
Fig. 2 Three-dimensional model and key point profile of the underground excavation channel of Jiangshuiquan Road Station(unit:mm)

拟建场地周边环境复杂,安全控制要求高。通道距北侧居民小区约40 m、距省妇幼保健院180 m;隧道上方分布有密集的地下管线,距开挖拱顶仅4.5~10.5 m;同时,隧道两侧邻近浆水泉立交桥桥墩,桥墩桩基距隧道的最小水平距离为3.58 m,对爆破振动控制要求极为严格。

工程地质情况复杂,主要不良地质作用为岩溶。勘察发现,在车站开挖及底板持力层范围内分布有全充填型溶洞,其垂直方向上分布无规律,内部充填物以可塑-硬塑状黏性土及碎石为主,充填物均匀性与稳定性差,对暗挖通道爆破施工围岩稳定性和地基安全构成显著风险。通道上方普遍分布的自稳性

差、承载力低的人工填土, 以及局部揭露、遇水易软化的中风化灰岩, 进一步增加了爆破施工的风险性。综上所述, 本工程具有周边环境复杂、地质风险突出、控制标准等的显著特点, 对暗挖通道爆破工程的安全控制提出了严峻挑战。

2 监测方案

在原方案中, 拱顶区域的爆破网络采用了 S 形起爆, 排间和孔间延期时间均为 5 ms。周边孔装药量为 0.3 kg, 内圈孔 0.2 kg, 掏槽孔及底板孔均是 0.4 kg, 其余辅助孔 0.3 kg。周边孔孔深 1.03 m, 掏槽孔孔深 1.62 m, 孔径 42 mm, 周边孔间距 0.6 m, 光爆层厚度 0.6 m, 循环进尺为 1 m, 炸药采用 2#岩石乳化炸药、直径为 32 mm。

2.1 测点布置

为精准捕捉爆破振动数据, 现场采用 iSensor 型号测振仪进行监测。该型号测振仪具有灵敏度高、响应速度快、测量精度高的特点, 能够精准采集爆破振动过程中的微小振动信号, 满足本工程对振动监测的高精度要求。试验共采用 7 台测振仪布置在掌子面正上方 12 m 左右的路面上, 使用石膏进行固定。测点布置如图 3 所示。

2.2 振动数据分析

在里程号 K0 + 020 段爆破时, 现场检测的 7 个

测点的爆破振速峰值如表 1 所示。由表 1 可知, 可以看出每个测点的 Z 向(垂直方向)振速峰值最大, X 向和 Y 向振速峰值相对较低。从图 3 还可知 2#测点和 3#测点, 6#测点和 7#测点与爆源的距离相等, 分别为 5 m、15 m, 但由于空腔效应的影响^[12], 在表 1 的监测数据中, 位于爆源前方的 2#、6#测点振速峰值分别大于相对应的 3#、7#测点; 3#、7#测点位于爆源之后, 岩体约束吸收强, 振速较小。综上所述 1#位于掌子面上方位置距爆源最近, 振速峰值最大, 所以爆破方案的优化是以 1#的 Z 向监测数据为判据。

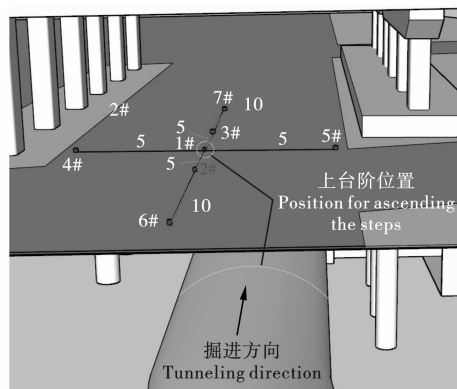


图 3 测点布置图(单位:m)

Fig. 3 Layout of measuring points(unit:m)

表 1 各测点振速峰值汇总表

Table 1 Peak particle velocities of each measurement point

测点编号 Measurement point number	X		Y		Z	
	频率 Frequency/ Hz	振速峰值 Peak particle velocity/(cm · s ⁻¹)	频率 Frequency/ Hz	振速峰值 Peak particle velocity/(cm · s ⁻¹)	频率 Frequency/ Hz	振速峰值 Peak particle velocity/(cm · s ⁻¹)
1	122.43	0.57	79.34	0.53	198.85	1.09
2	21.82	0.63	94.48	0.64	121.82	1.07
3	93.38	0.52	146.36	0.46	106.45	0.94
4	198.12	0.50	198.73	0.67	198.12	1.05
5	200.43	0.46	200.43	0.56	200.19	1.02
6	121.83	0.22	94.48	0.17	121.83	0.41
7	126.58	0.25	112.67	0.19	75.68	0.33

路面 1#位置的振速波形如图 4 所示, I 区域为一层区域, II 区域为拱顶区域。由于拱顶区域与地表的相对位置较近, 爆破振动在该区域的爆破活动中变化更为明显。在掏槽孔单孔装药量为 0.4 kg, 周边孔单孔装药量为 0.3 kg 的情况下, 出现拱顶区域的爆破振速峰值(1.02 cm/s)大于掏槽位置的振速峰值, 故对拱顶区域的爆破振动控制展开试验研究。

3 爆破网路试验设计

在爆破作业中, 电子雷管凭借其高效、精准、安全等显著优势, 已在各类工程中得到广泛应用^[13-15]。故本工程采用数码电子雷管实现微差爆破, 为避免逐孔起爆所引起的波峰叠加, 将延期时间调整为排间 50 ms, 孔间 5 ms。

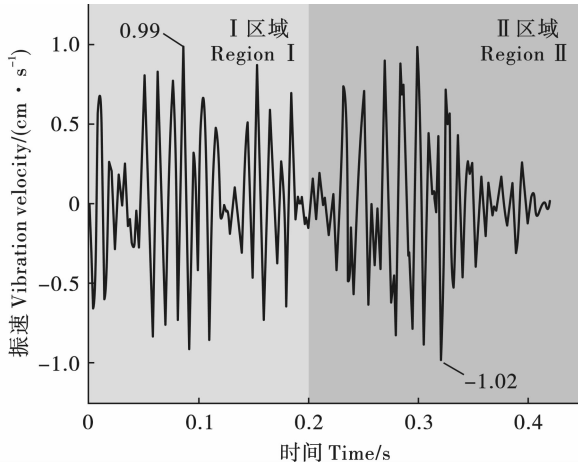


图4 原方案振动曲线图

Fig. 4 Vibration waveform of the original scheme

3.1 试验区域界定

下穿经十路暗挖通道 K0+021 ~ K0+035 段两侧的桥墩桩基为扩大基础(见图5),距离爆源的直线距离相对较远为 11.4m(见图2),安全风险系数较低,故选取该段为试验段。针对上台阶拱顶区域的爆破网路参数进行设计。

3.2 爆破网路设计

上台阶炮孔布置如图6、图7、图8所示,虚线以下部分为一层,三种爆破网路的炮孔布置及起爆顺序一致,爆破顺序按排号依次起爆,排间延期时间为 50 ms,左右两侧相同排号为为一组,由左及右,由下及上,孔间延期时间为 5 ms。三种不同爆破网路的差异主要体现在虚线以上的拱顶区域。

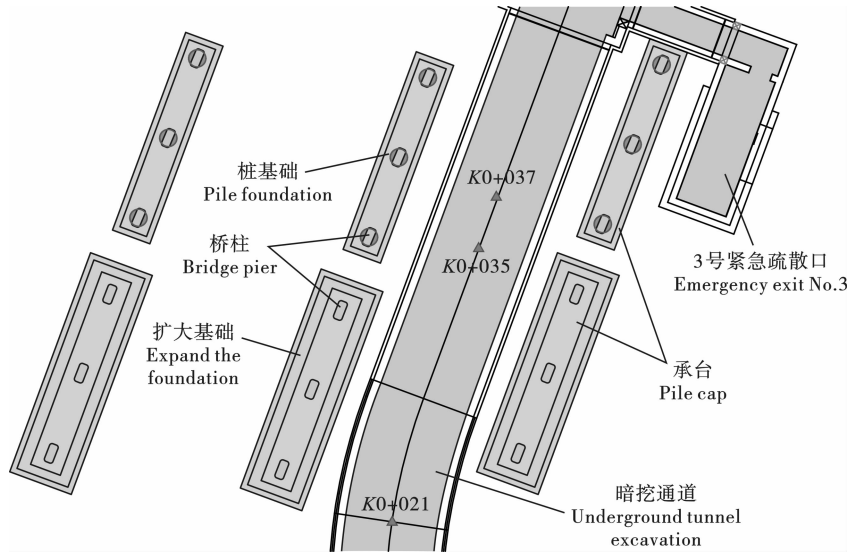


图5 爆破区域周边桥柱基础平面示意图

Fig. 5 Plan view of bridge pier foundations around the blasting area

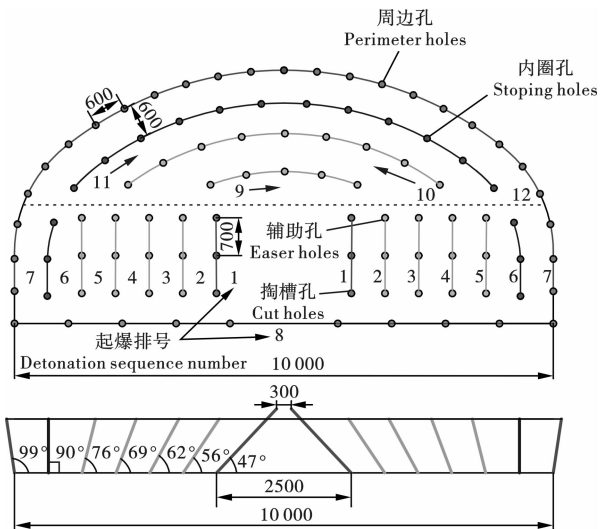


图6 S形起爆炮孔布置图及起爆顺序(单位:mm)

Fig. 6 S-shaped detonation hole layout diagram and detonation sequence(unit:mm)

S形起爆:拱顶区域的周边孔与内圈孔各为一排,以最底层压炮孔(9排)一侧为起点,按“S”路径(9排从左到右,10排从右到左,11排从左到右,12排从右到左)顺序起爆,周边孔最后起爆,孔间延期 5 ms,排间延期 50 ms,如图6所示。

同向起爆:拱顶区域的周边孔与周边孔也各为一排,由压炮孔到周边孔(9→10→11→12)且每排炮孔均从左侧开始沿顺时针方向依次起爆,排间延期时间 50 ms,孔间延期时间 5 ms,如图7所示。

两侧向拱顶起爆:拱顶区域周边孔(13排、14排)与内圈孔(11排、12排)以轴线为中心分为左右两排,最底层的两排压炮孔与同向起爆顺序相同(9→10),周边孔和内圈孔均从两侧拱脚向拱顶中心起爆,由左排及右排,由内圈孔到周边孔(11→12→13→14)。排间延期 50 ms,孔间延期 5 ms,左右两排到拱顶的最后炮孔间的延期时间差≤50 ms,如图8所示。

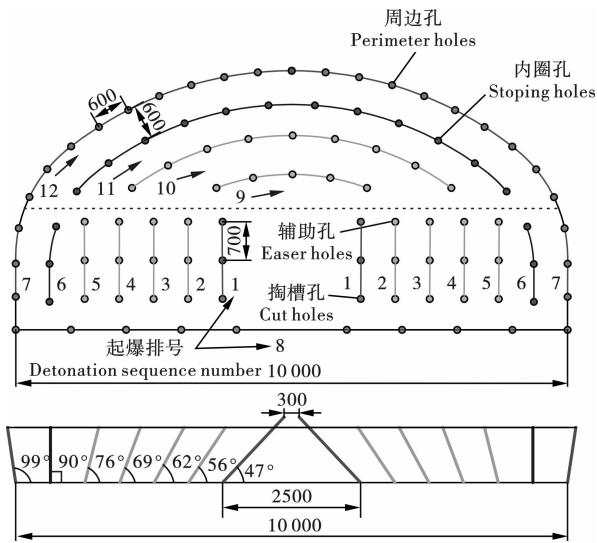


图 7 同向起爆炮孔布置图及起爆顺序(单位:mm)

Fig. 7 Layout diagram of co-directional detonation holes and detonation sequence(unit:mm)

破方案的炮孔参数,如表 2 所示。

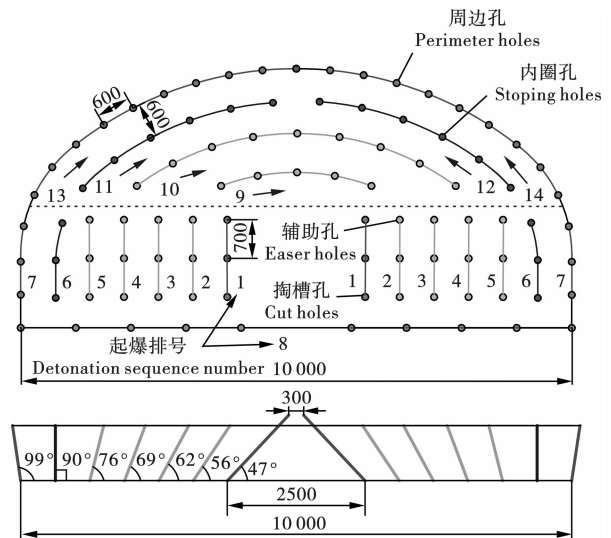


图 8 两侧向拱顶起爆炮孔布置图及起爆顺序(单位:mm)

Fig. 8 Layout diagram and detonation sequence of detonation holes on both sides of the vault(unit:mm)

3.3 炮孔参数

为控制研究变量,三种爆破网路均采用了原爆

表 2 炮孔参数表

Table 2 Blast hole parameter table

开挖部位 Excavation section	炮孔名称 Blasthole types	炮孔个数 Number of holes	孔长 Hole length/m	孔径 Hole diameter/mm	间距 Spacing/cm	药卷直径 Cartridge diameter/mm	单孔装药量 Charge per hole/kg
上台阶 Upper bench	掏槽孔 Cut holes	6	1.62	42	70	φ 32	0.40
	辅助孔 Easer holes	31	1.10	42	70	φ 32	0.30
	内圈孔 Stopping holes	16	1.00	42	70	φ 32	0.20
	周边孔 Perimeter holes	26	1.01	42	60	φ 32	0.30
	底板孔 Bottom holes	10	1.03	42	100	φ 32	0.40

4 不同爆破网路振动特性分析

为探究 S 形起爆、同向起爆及两侧向拱顶起爆三种爆破网路对爆破振动效应的影响,基于本工程背景开展现场试验。为消除特例存在的影响,每种爆破网路各进行 5 个爆破循环的试验,选取拱顶区域的拟合振动曲线即 400 ms 之后数据(见图 9)进行对比,不同爆破网路的振动峰值与波形特征呈现显著差异。

鉴于爆破现场环境复杂,过往大型车辆造成的干扰以及测振仪自身存在的误差通常会对爆破振动信号产生影响,进而导致采集的数据失真^[16-19]。为

了更准确地分析各爆破网路的振动信号差异性,基于互补集合经验模态分解(CEEMD)对原始信号进行降噪处理^[20,21]。具体流程如图 10 所示。

首先,利用 CEEMD 将原始信号分解为四个分量($IMF_1 \sim IMF_4$)及余量(IMF_5)得到图 11。

如图 11,IMF 分量按频率从高到低依次排列,高频分量通常对应信号中的噪声或干扰,低频分量则更贴近信号的真实振动特征。为更加准确的筛选有效振动信号,利用相关系数法求出三种不同爆破网路下的各 IMF 分量及余量的相关系数,见图 12。

实践表明^[19,22],相关系数法在有效去除噪声方面效果显著,因此,我们依据 IMF 分量与原始信号的

相关系数进行降噪处理^[22-24],选取相关系数超过0.5的IMF分量作为敏感分量进行重构后得到图13。

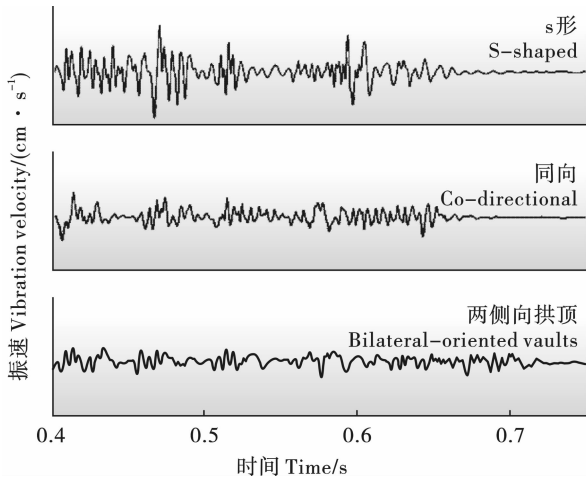


图9 三种爆破网路下的爆破振动曲线
Fig. 9 Blasting vibration waveforms under three blasting networks

图13给出了经降噪处理后三种爆破网路重构信号的振动曲线及对应的三维联合时频图,下面从波形特征及时频分布两方面进行分析。

在振动峰值及波形特征方面,从图13(a)中可以看出,S形起爆网路的振动波形最为复杂,表现为两个密集且幅值较高的峰值,同时其诱发的振速峰值最高,达0.87 cm/s。从图13(c)中可以看出,同向起爆网路的波形相对平滑,主振峰特征较为突出,峰值为0.55 cm/s,较S形起爆网路降低约37%;整体波峰数量及波形复杂度均低于S形起爆网路。从

图13(e)中可以看出,两侧向拱顶起爆网路的波形则最平滑、最简单,通常无显著突出的峰值,振动速度峰值仅为0.41 cm/s,较S形起爆网路降低约52%。

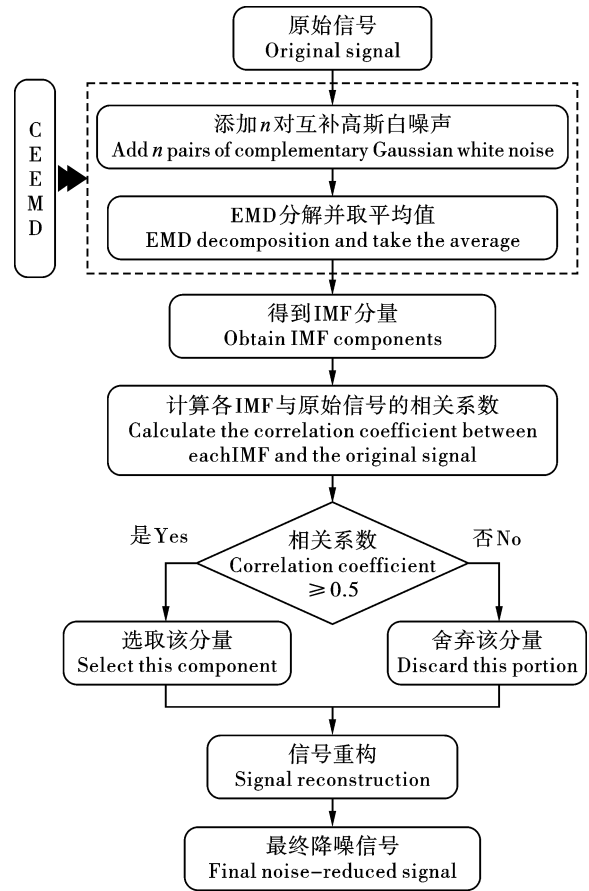


图10 振动信号处理流程图
Fig. 10 Vibration signal processing flow chart

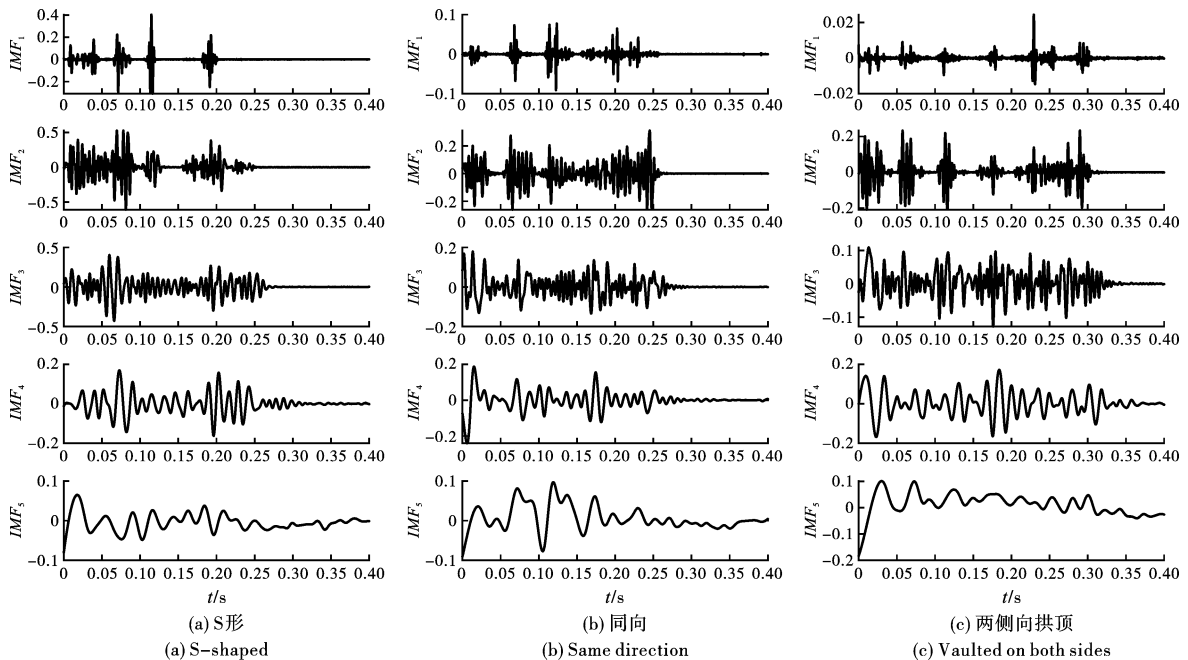


图11 各爆破网路振动信号分解的分量及余量

Fig. 11 Components and margins of vibration signal decomposition of each blasting network

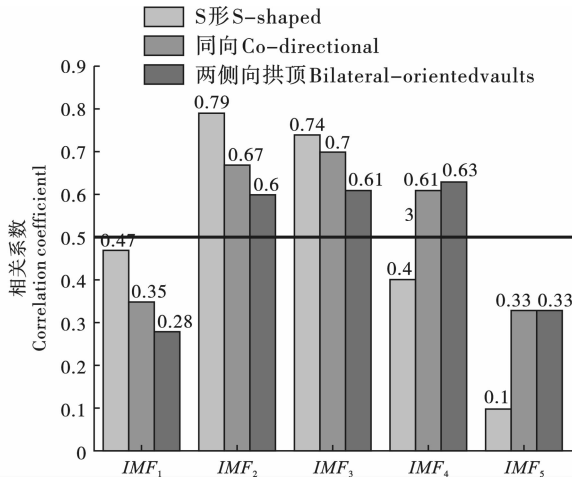


图 12 各分量与原始信号的相关系数
Fig. 12 Correlation coefficients between each component and the original signal

在时频分布方面,从图 13(b)中可以看出,S形起爆能量集中在 100 Hz 左右且高频部分(150 ~

300 Hz)相较其他两种爆破网路能量偏高。从图 13(d)中可以看出,同向起爆多集中在 100 ~ 150 Hz。从图 13(f)中可以看出,两侧向拱顶起爆的爆破网路所引起的振动信号能量较分散,分布在 50 ~ 200 Hz 区域内。

从安全控制角度而言,所有工况的振动速度峰值均低于《爆破安全规程》(GB6722—2014)中规定的民居建筑物安全阈值(1.5 ~ 2.0 cm/s),满足基本安全要求。但需特别注意的是,在复杂地质条件下可能因岩体应力集中或波速放大效应导致振动强度异常增加,所以复杂环境下优先采用两侧向拱顶起爆的爆破网路进行爆破。

5 不同爆破网路爆后效果分析

爆破网路设计是影响岩体破碎效果的核心因素。为量化评估拱顶区域三种爆破网路的爆后效果,对各爆破网路进行爆破后的爆堆形态进行观测与块度分析,如图 14 和表 3 所示。

表 3 各爆破网路的爆后效果统计表
Table 3 Statistics of post-explosion effects of each blasting network

评价指标 Performance indicators	S 形起爆 S-shaped	同向起爆 Co-directional	两侧向拱顶起爆 Bilateral-oriented vaults
大块率(≥30 cm) Boulder rate	58%	37%	23%
细颗粒率(≤10 cm) Fines content	6%	15%	16%
爆堆集中度 Muckpile concentration	中	优	中

图 14(a)表明 S 形起爆网路由于其 S 形起爆的特点,爆破后的爆堆较为分散。同时,图 14(b)块度统计表明,由于两侧延时间隔过长(尤其周边孔和内圈孔)导致前排岩体位移后,后排爆破应力波无法有效作用于已移动岩块,削弱了二次破碎效应,导致能量利用率下降与块度不均匀性。其大块率达到 58%,显著高于其他网路;小于 10 cm 的细颗粒仅为 6%。

图 14(c)表明同向起爆网路段间延时设定为 50 ms 时,由于起爆方向一致,爆堆分布较为集中,但两侧拱脚位置易出现大块岩体堆积。由图 14(d)可知块度分布呈单峰特征,10 ~ 30 cm 中等块度占比约 50%,但大块率较高为 37%,细颗粒占比为 15%。

图 14(e)表明两侧向拱顶起爆网路的爆堆也较为分散,但岩石碰撞破碎效果较好,无明显大块聚集。通过图 14(f)块度统计表明,其细颗粒(< 10 cm)占

比显著高于其他网路,而大块率(> 30 cm)可控制在 25% 以下。

总体上,拱顶区域采用两侧向拱顶起爆的爆破网路能够优化应力波叠加,在块度均匀性与能量效率方面较 s 形起爆和同向起爆具有显著优势。工程实践中可选取两侧向拱顶起爆的爆破网路保证岩体破碎效果。

6 工程应用

为进一步验证两侧向拱顶起爆的爆破网路在实际工程中的可行性,在本工程里程 K0 + 037 段进行了现场应用。该段地质条件复杂,邻近浆水泉立交桥桩基已达最小距离(3.58 m),对振动控制要求极高。现场监测的爆破振动及爆后效果统计如图 15、图 16 所示。

通过对比图 4 及图 15 爆破振动曲线可知,两侧向拱顶起爆的爆破网路避免了拱顶区域(Ⅱ区域)

振动峰值大于一层(I区域)掏槽位置的现象。同时,在其他爆破参数不变时,拱顶区域使用该方法有效降低了拱顶区域的爆破振动,由 1.02 cm/s 降低到 0.55 cm/s ,降低约46%,由于现场监测数据存在噪音干扰影响,故与试验结果存在轻微偏差,但基本

一致,能够保证拱顶附近的既有桥墩桩基的安全。通过图16可以看出,爆后碎石块度较为均匀,大块率约为25%,细颗粒率约为20%,且较为集中在中部,与试验结果基本一致。破碎效果良好,满足出渣要求。

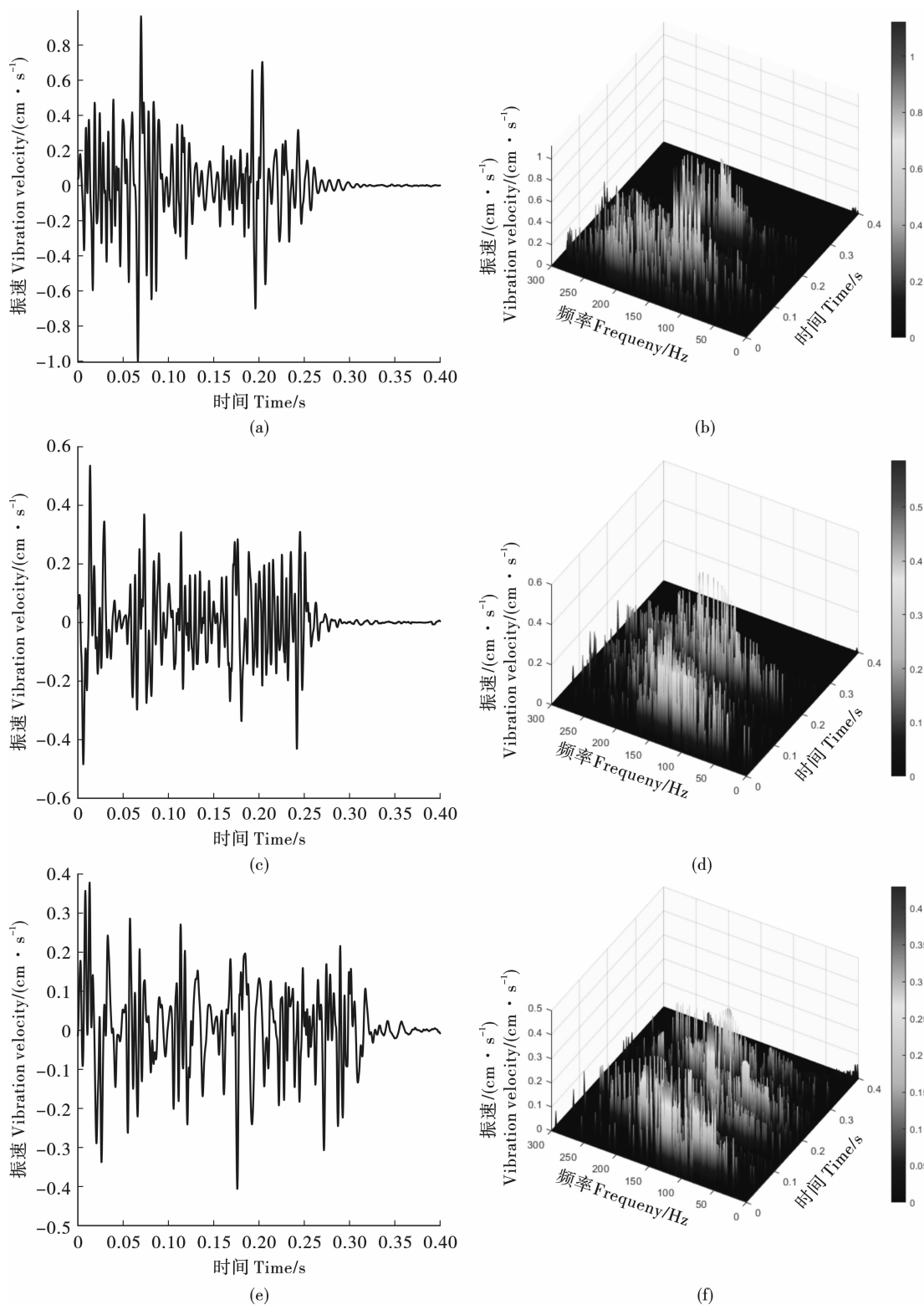


图13 重构信号

Fig. 13 Reconstructing the signal

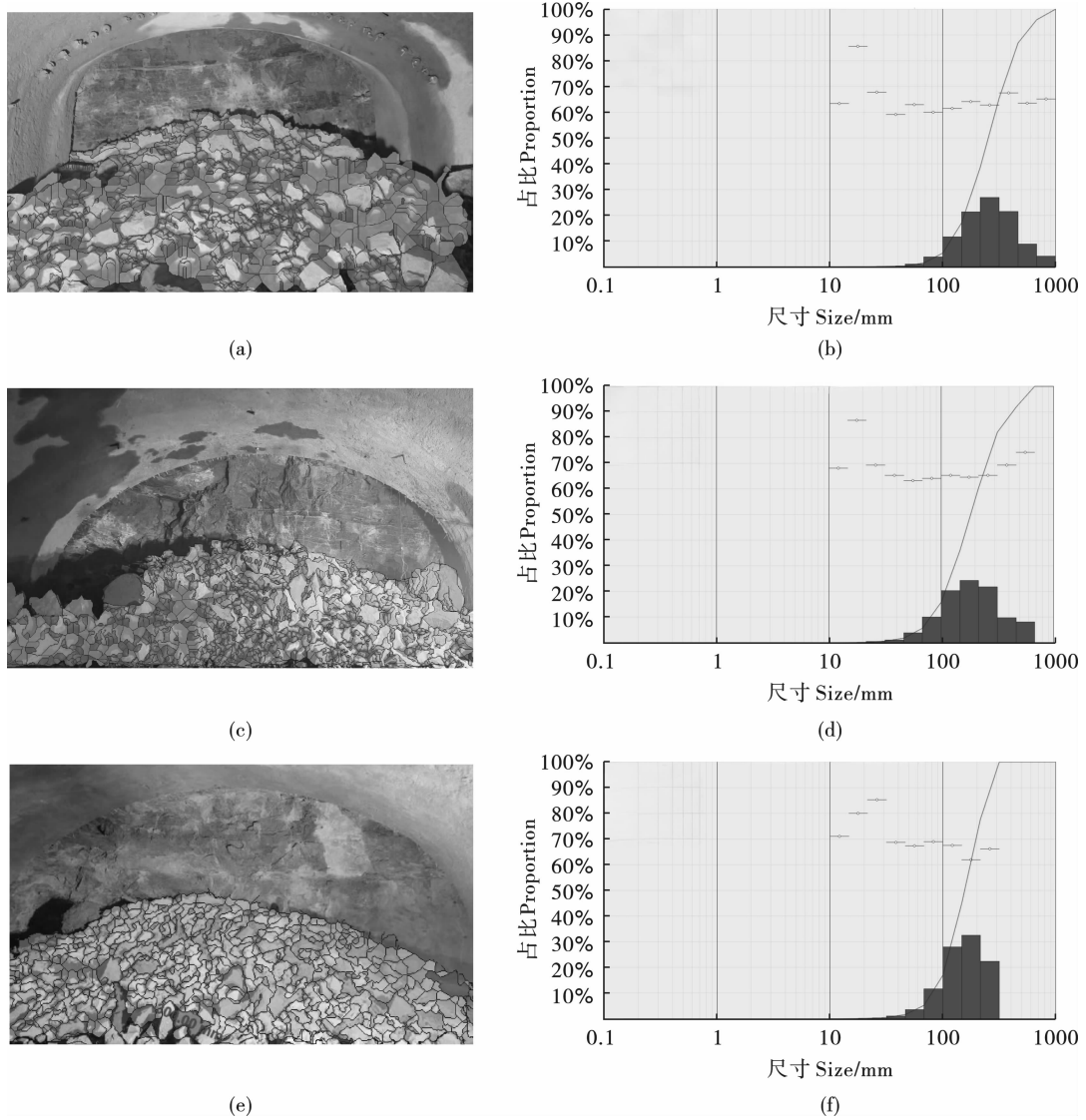


图 14 三种爆破网路爆后的爆堆识别图
Fig. 14 Identification diagram of three

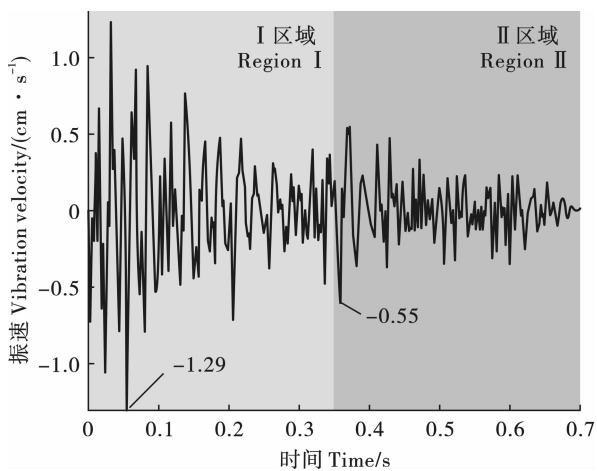


图 15 爆破振动曲线
Fig. 15 Blasting vibration waveform

7 结论

为保证复杂环境下城市地铁暗挖通道爆破效果并有效控制爆破振动危害, 本文以济南地铁四号线浆水泉站 B 通道暗挖段爆破工程为背景, 对比分析了三种爆破网路的振动效应和爆破效果并进行现场应用验证, 主要结论如下:

(1) 在爆破振动特征方面, 不同起爆网路的振动特征存在显著差异。S 形起爆能量集中在 100 Hz 左右且高频部分 (150 ~ 300 Hz) 相较其他两种爆破网路能量偏高, 振速波形存在两个明显且较大的峰值; 同向起爆多集中在 100 ~ 150 Hz; 而两侧向拱顶起爆的爆破网路所引起的振动信号能量较分散, 分布在 50 ~ 200 Hz 区域内, 且振速波形平滑无明显峰值。

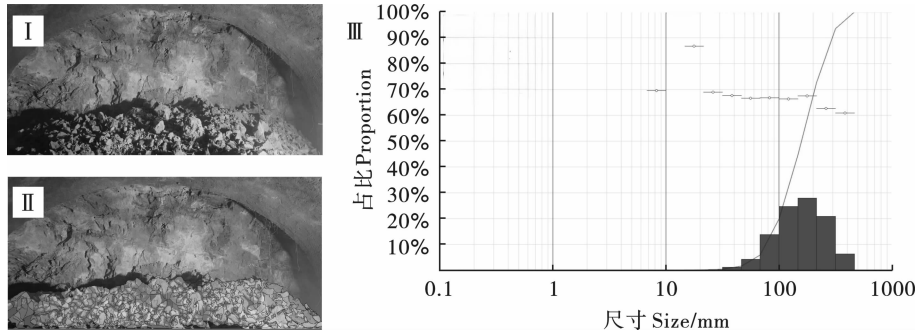


图 16 爆后效果

Fig. 16 Post-explosion effect

(2)在爆破振动控制方面,拱顶区域周边孔单孔装药量为 0.3 kg 的情况下,通过对比降噪后的三种爆破网路的重构信号,两侧向拱顶起爆网路减振效果更为突出。S 形起爆因波峰叠加效应导致振动峰值最高,达 0.87 cm/s;同向起爆的峰值振速为 0.55 cm/s,振速峰值有所降低;两侧向拱顶起爆网路的振速峰值振速降至 0.41 cm/s,较 S 形起爆降低 52%,爆破振动控制效果最佳。

(3)在爆破效果方面,两侧向拱顶起爆网路的块度分布更符合工程要求,细颗粒占比最高且大块率最低 (<25%),岩块碰撞充分,破碎均匀性显著优于其他方式;S 形起爆因两侧段别延期间隔过大,导致应力波作用存在滞后效应,大块率高达 58%,细颗粒占比仅 6%,破碎效果最差;同向起爆的块度呈单峰分布(10~30 cm 区间占比 50%),但大块率仍达 37%,且拱脚区域易形成大块。

(4)通过工程应用的爆后效果来看,应用结果与试验基本一致。应用两侧向拱顶起爆网路后,相比原方案 S 形起爆的爆破网路,在爆破振动控制(峰值降幅 46%)与破岩质量(大块率降低约 30%)方面均展现出显著优势。为复杂环境下城市地铁暗挖通道爆破的爆破网路优化和振动控制提供了参考与实践依据。

对城市地铁暗挖通道爆破的不同爆破网路进行了对比分析,并以地表振动及爆后效果为评价依据进行优选研究。然而,由于城市地铁结构和地质条件的复杂性,仅以两方面作为评价依据具有一定局限性,后续可增加周边构筑物如桥墩桩基、桥梁、隧道内部结构的损伤来进一步验证试验结论的准确性。

参考文献 (References)

- [1] 严 鹏,卢文波,李洪涛,等. 地应力对爆破过程中围岩振动能量分布的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2):182-188.
- [1] YAN Peng, LU Wen-bo, LI Hong-tao, et al. Effect of in-situ stress on vibration energy distribution of surrounding rock during blasting [J]. *Blasting and Shock*, 2009, 29(2):182-188. (in Chinese)
- [2] 段继超,宗 琦,汪海波,等. 起爆顺序对台阶岩石破碎块度及爆破振动影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2):192-199. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033. 2024.02.0319.
- [2] DUAN Ji-chao, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Research on the influence of detonation sequence on step rock fracture block size and blasting vibration[J]. *Chinese Journal of Safety Sciences*, 2024, 34(2):192-199. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033. 2024.02.0319. (in Chinese)
- [3] 周 敏,张云鹏,胥国强. 数码雷管露天深孔微差爆破网络数值模拟[J]. 中国矿业, 2021, 30(S2):261-265.
- [3] ZHOU Min, ZHANG Yun-peng, XU Guo-qiang. Numerical simulation of digital detonator open-pit deep-hole differential blasting network [J]. *China Mining Industry*, 2021, 30(S2):261-265. (in Chinese)
- [4] 杨 超. 露天矿山台阶深孔爆破大块成因及解决措施 [J]. 工程爆破, 2019, 25(6):32-37, 55.
- [4] YANG Chao. Causes and solutions of large blocks of deep hole blasting in open-pit mines [J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(6):32-37, 55. (in Chinese)
- [5] 王俊新,王 璞,黄永辉,等. 露天金矿控制矿体位移爆破数值模拟与生产试验研究 [J]. 工程爆破, 2023, 29(2):87-94. DOI:10.19931/j.EB.20220368.
- [5] WANG Jun-xin, WANG Pu, HUANG Yong-hui, et al. Numerical simulation and production experiment research on controlled ore body displacement blasting in open-pit gold mine [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(2):87-94. DOI:10.19931/j.EB.20220368. (in Chinese)
- [6] XU Ming-nan, LI Xin-ping, WANG Yang, et al. Study on the crack propagation between blastholes under different detonating sequence using finite element method [J]. *Eu-*

- ropean Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(15):4311-4336.
- [7] 郭明. 多孔微差爆破下岩石损伤演化规律研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(3):40-43, 72.
- [7] GUO Ming. Research on the evolution of rock damage under porous differential blasting[J]. Railway Construction Technology, 2024(3):40-43, 72. (in Chinese)
- [8] 范明,何春博,朱景全. 高速公路隧道掘进爆破施工技术运用研究[J]. 工程建设与设计, 2025(12):169-171. DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.06.255.
- [8] FAN Ming, HE Chun-bo, ZHU Jing-quan. Research on the application of highway tunnel tunnel blasting construction technology[J]. Engineering Construction and Design, 2025(12):169-171. DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.06.255. (in Chinese)
- [9] GUAN Xiao-ming, GUO Cai-xia, MOU Ben, et al. Tunnel millisecond-delay controlled blasting based on the delay time calculation method and digital electronic detonators to reduce structure vibration effects. [J]. Public Library of Science ONE, 2019, 14(3):e0212745.
- [10] WANG Si-jie, GONG Min, WU Hao-jun, et al. Vibration control in multi-hole delay bench blasting considering variations in blast-hole positions and free surfaces[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025 (prepublish):1-22.
- [11] MA He, WANG Hai-liang, He Chuang, et al. Influences of blasting sequence on the vibration velocity of surface particles: a case study of Qingdao Metro, China [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(1):485-492.
- [12] 蔡路军,邹朋来,赵云鹏,等. 极小净距大断面隧道两台阶法控制爆破方法[J]. 工程爆破, 2025, 31(2):54-64, 74. DOI:10.19931/j.EB.20240118.
- [12] CAI Lu-jun, ZOU Peng-lai, ZHAO Yun-peng, et al. Two-step controlled blasting method for extremely small clearance large section tunnels [J]. Engineering Blasting, 2025, 31(2):54-64, 74. DOI:10.19931/j.EB.20240118. (in Chinese)
- [13] 王建. 数码电子雷管在露天矿山中的应用[J]. 世界有色金属, 2024(21):214-216.
- [13] WANG Jian. Application of digital electronic detonator in open-pit mines [J]. World Nonferrous Metals, 2024(21):214-216. (in Chinese)
- [14] 秦绍兵,许自栋,王道银,等. 井下小断面开挖融合延时起爆网路试验研究[J]. 爆破, 2024, 41(4):174-180.
- [14] QIN Shao-bing, XU Zi-dong, WANG Dao-yin, et al. Experimental research on underground small section excavation and fusion delayed detonation network [J]. Blasting, 2024, 41(4):174-180. (in Chinese)
- [15] 崔立明,隋湘滨,周义德. 数码电子雷管在预裂爆破中的应用研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(4):108-112. DOI:10.19931/j.EB.20220124.
- [15] CUI Li-ming, SUI Xiang-bin, ZHOU Yi-de. Research on the application of digital electronic detonator in pre-cracking blasting [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4):108-112. DOI:10.19931/j.EB.20220124. (in Chinese)
- [16] 花汉兵. 基于小波包的振动信号去噪应用与研究[J]. 噪声与振动控制, 2007(6):19-21.
- [16] HUA Han-bing. Application and research of vibration signal denoising based on wavelet packet [J]. Noise and Vibration Control, 2007(6):19-21. (in Chinese)
- [17] Deng Zu-hua, Meng Jun-yu, Deng Yong-feng, et al. Analysis of vibration signals near ground surface during blasting excavation of a tunnel in fractured rock [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):21909-21909.
- [18] 赵一聪,韩风雷,肖东辉,等. 基于 CEEMD-HHT 的公路隧道爆破洞外空气噪声时频能量分析[J]. 振动与冲击, 2025, 44(4):198-206. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.04.021.
- [18] ZHAO Yi-cong, HAN Feng-lei, XIAO Dong-hui, et al. Time-frequency energy analysis of air noise outside highway tunnel blasting tunnel based on CEEMD-HHT [J]. Vibration and Shock, 2025, 44(4):198-206. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.04.021. (in Chinese)
- [19] 田婕,张云鹏,闫鹏,等. 基于 CEEMD 的露天深孔爆破振动信号降噪光滑模型[J]. 爆破, 2024, 41(2):143-150, 159.
- [19] TIAN Jie, ZHANG Yun-peng, YAN Peng, et al. Smooth model for noise reduction of vibration signal in open-pit deep hole blasting based on CEEMD [J]. Blasting, 2024, 41(2):143-150, 159. (in Chinese)
- [20] 翟瑞森,肖佳辰,陈宇轩,等. 基于 CEEMD 的相控阵超声信号压缩感知方法[J]. 测控技术, 2025, 44(7):19-25. DOI:10.19708/j.ckjs.2025.04.218.
- [20] ZHAI Rui-sen, XIAO Jia-chen, CHEN Yu-xuan, et al. Phased array ultrasonic signal compression sensing method based on CEEMD [J]. Measurement and Control Technology, 2025, 44(7):19-25. DOI:10.19708/j.ckjs.2025.04.218. (in Chinese)
- [21] 孙旭,熊鸣,王丽婕. 基于 CEEMD-小波阈值的低频振动信号降噪研究[J]. 信息与电脑, 2024, 36(23):49-53.
- [21] SUN Xu, XIONG Ming, WANG Li-jie. Research on noise reduction of low-frequency vibration signals based on

- CEEMD-Wavelet Threshold [J]. Information and Computer, 2024, 36(23): 49-53. (in Chinese)
- [22] 洪 果, 庄 严, 吴玉箫, 等. 基于 CEEMD 及相关系数法的 GIS 振动信号研究 [J]. 电工电气, 2025(6): 49-55.
- [22] HONG Guo, ZHUANG Yan, WU Yu-xiao, et al. Research on GIS vibration signal based on CEEMD and correlation coefficient method [J]. Electrical and Electrical, 2025(6): 49-55. (in Chinese)
- [23] FLORIAN M, ANDREA C, RAMIRO S. Linking Lag-1 correlation coefficients between field-related quantities in a reverberation chamber [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 62(4): 1-3.
- [24] 王吉林, 孟垂懿. 基于 EEMD 的变压器振动与声音信号 IMF 峭度特征量提取方法 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 183-187. DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2019. 09. 047.
- [24] WANG Ji-lin, MENG Chui-yi. IMF kurtosis feature extraction method for transformer vibration and sound signals based on EEMD [J]. Hydropower and Energy Science, 2019, 37(9): 183-187. DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2019. 09. 047. (in Chinese)

(上接第 170 页)

5 爆破效果

经过精心设计, 严密施工, 本次靠船墩的拆除施工取得了圆满成功, 爆破效果和预估基本一致, 爆后周边环境安全, 码头及周边船舶安然无恙, 爆破飞石比预期更加理想。施工过程中没有发生任何安全事故, 达到设计目标和总体技术要求。

靠船墩爆破后, 整体产生下塌并向外膨胀, 少部分钢板桩倒伏于水底。但不足的是印度产乳化炸药受水压影响爆轰不充分, 部分处于爆燃状态, 未达到完全爆轰状态, 起爆时产生了大量黄烟, 爆速大幅度下降, 导致靠船墩顶部有部分大块混凝土, 需要后期利用炮机进行破碎。但是四周的钢板桩大部分只是倾斜, 没有倒伏, 可在水面使用振动拔桩设备进行拔除。不用在水下拔除, 效果更好。

6 结语

(1) 国外项目使用的爆破器材一般只局限于当地能够采购的产品, 但当地水下爆破施工很少见, 因此这些爆破器材的实际抗水压性能都只是理论数据, 没有经过实践检验。因此, 对爆破器材尽早进行抗水压试验和爆破试验是保证爆破效果的基本条件。

(2) 对于拆除对象的结构和地质情况不明时, 爆破前需要想办法进行钻孔取芯探测, 以保证爆破参数的精准, 必要时可通过爆破试验效果来优化调

整。目的是必须一次爆破成功, 否则后期处理困难, 经济代价巨大。

(3) 墩台拆除的爆破单耗应按松动爆破或者减弱松动爆破取值, 这样爆渣不会抛掷出来而导致外围钢板桩全部倒伏, 增加后期钢板桩的拔除难度。

(4) 本项目的钻孔超深是针对新建码头的要求深度来取值的。但从爆破后钢板桩的振拔效果来看, 以后遇到类似项目, 可以将钻孔超深加大, 以加快钢板桩的振拔效率。

参考文献 (References)

- [1] 汪旭光. 爆破手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [1] WANG Xu-guang. Blasting manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 齐世福, 李尚海, 胡良孝, 等. 松花江旧铁路大桥桥墩的水下爆破 [J]. 工程爆破, 2004(1): 26-29.
- [2] QI Shi-fu, LI Shang-hai, HU Liang-xiao, et al. Underwater blasting of the piers of the old railway bridge over the songhua river [J]. Engineering Blasting, 2004(1): 26-29. (in Chinese)
- [3] 李 泉. 几种水下钻孔爆破炸药单耗计算公式的分析与比较 [J]. 爆破, 2012(1): 94-97.
- [3] LI Quan. Analysis and comparison of several calculation formulas for unit consumption of underwater drilling blasting explosives [J]. Blasting, 2012(1): 94-97. (in Chinese)