

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.020

近距离下穿既有隧道的地下爆破振动控制技术*

贾家银¹,曹贞洋²,周世均¹,吴晓东²,高兴¹,吴昊骏²,龚敏²

(1. 重庆中环建设有限公司,重庆 401120;2. 北京科技大学,北京 100083)

摘要: 为控制泄水洞开挖过程中的爆破振动,保护其上方距离2.30~3.10 m的既有隧道的安全,采用电子雷管毫秒微差爆破及孔内分段等技术优化爆破方案。首先根据现场下穿泄水洞之前的常规爆破情况,优化现场爆破方案,调整孔位参数,减少炮孔数目;在下穿段正式爆破前,在开挖面掏槽区附近开展单孔爆破试验,获取包含现场地质信息的单孔爆破振动波形;采用线性叠加法计算并对比炮孔按不同延时间隔起爆的振动波形,从中筛选出炮孔的最优延时间隔;同时,为改善掏槽爆破时的临空条件、降低掏槽爆破的振动,对掏槽区的首爆孔采用孔内分段爆破。通过现场试验和计算分析,综合爆破协同作用和减振效果,确定了掏槽孔、辅助孔的孔间延时为5 ms、排间延时为40 ms,周边孔的孔间延时为3 ms。将新爆破方案在现场进行应用和不断优化,最终实现泄水洞工程以1.5 m进尺、全断面爆破下穿既有隧道时,其正上方距离3.10 m的路面监测点的最大振动在4.0 cm/s以内,结构物得到了有效保护。利用电子雷管微差起爆和孔内分段爆破技术能有效控制现场的爆破振动、保护了临近建(构)筑物,为后续类似工程提供经验。

关键词: 泄水洞;既有隧道;微差爆破;最优延时间隔;孔内分段

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)02-0167-11

Blasting-induced Vibration Suppression Techniques for Close-proximity Undercrossing of Existing Tunnels

JIA jia-yin¹, CAO Zhen-yang², ZHOU Shi-jun¹, WU Xiao-dong², GAO Xing¹, WU Hao-jun², GONG Min²

(1. Chongqing Zhonghuan Construction Co. Ltd., Chongqing 401120, China;

2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To mitigate blasting vibration during the excavation of a drainage tunnel located 2.30~3.10 m beneath an existing tunnel, an optimized blasting scheme using millisecond blasting by electronic detonators and a sub-section in blasting holes was implemented. The field blasting scheme was initially adjusted based on the conventional blasting situation near the existing tunnel. This involved optimizing hole position parameters and reducing the number of holes. Before the formal blasting in the underpass section, a single-hole blasting test was then conducted near the excavation face to capture the vibration waveform and geological information. Using the linear superposition method,

收稿日期 (Date of reception): 2024-08-12

网络首发日期 (Published online): 2024-12-12

作者简介: 贾家银(1969-),男,四川简阳人,本科、高级工程师,从事隧道工程方面的工作,(E-mail) jiajiayin@cegc.com.cn。

通讯作者: 吴晓东(1992-),男,江西九江人,博士、讲师,从事地下工程爆破理论与技术方面的研究,(E-mail) wuxiaodong@ustb.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52304204) 滨海储油洞室电子雷管精确延时爆破破岩机理研究; 中国博士后科学基金会第74批面上基金(2023M740216) 硬岩巷道孔内分段掏槽爆破破岩机理及关键参数研究

About the author: JIA jia-yin(1969-), male, born in Jianyang, Sichuan Province, bachelor's degree, senior engineer, engaged in tunnel engineering, (E-mail) jiajiayin@cegc.com.cn.

Corresponding author: WU Xiao-dong(1992-), male, born in Jiujiang, Jiangxi Province, Ph. D, lecturer, engaged in underground engineering blasting theory and technology research, (E-mail) wuxiaodong@ustb.edu.cn.

Fund Programs: Youth fund of national natural science foundation projects, study on rock breaking mechanism of precise delay blasting using electronic detonator in coastal oil storage cavern(52304204), The China postdoctoral science foundation, the 74th instalment of the fund, Rock-breaking mechanism and key parameters of by blasthole segmented delay cut blasting in hard-rock tunnel (2023M740216)

the vibration waveform of various delay intervals was analyzed to select the optimal delay interval. To further improve blasting performance and reduce the vibration of the cut blasting, the first blasting in the cut area was performed by using the subsection blasting in the hole. Field tests and calculations determined that the optimal delay times were 5 ms for the same row of cut holes or spreader holes, 40 ms between rows, and 3 ms for contour holes. The new blasting scheme was implemented and optimized in the field. When the drainage tunnel was excavated at a footage of 1.5 m through the existing tunnel, the maximum vibration of the road surface monitoring point at a distance of 3.10 m directly above was maintained below 4.0 cm/s, ensuring structure safety. Using electronic detonators for precise initiation and sectional blasting successfully controlled site vibration, protected adjacent structures, and provided valuable insights for similar future projects.

Key words: drainage tunnel; existing tunnel; millisecond blasting; optimal delay interval; segmentation in hole

随着隧道工程建设的不断发展,在建隧道下穿既有隧道或建筑物的现象较为普遍^[1,2],且近年来施工隧道与既有隧道距离极近情况时有发生,对此若采用常规爆破方案很难控制爆破振动、保证既有隧道安全。爆破近区的振动控制已成为了诸多隧道施工的难点^[3],也是当前地下爆破技术研究的热点问题。

为控制与地面建筑物净距 27 ~ 42 m 的隧道下穿段的爆破振动,赵广平采取“先后上分区间隔爆破”分步开挖的顺序^[4],并增加导爆管雷管的段位、减小单段起爆药量,取得了较好效果。胡平在青岛地铁 3 号线隧道下穿净距 10.94 m 的万隆商厦时^[5],设计上台阶 0.5 m 进尺、下台阶 1.0 m 进尺分步爆破的方案,保护了城市建筑物安全。罗帅兵等为减小在建隧道爆破对其上方 9.18 m 处高架桥桥墩的影响^[6],采取了机械开挖与上下台阶爆破(进尺 1.0 m)相结合的方式,完成了下穿段的掘进。陈沛等采用上下台阶法开挖和 1.2 m 小进尺^[7],通过数值模拟确定排间延时,将净距 4.2 m 的人防洞室处振动控制在了 12.76 cm/s 左右。许怀面对泄水洞下穿净距 3.9 m 的铁路隧道时^[8],采用了超前预注浆加固地层,并将爆破进尺严格控制在 0.6 m 以内,从而控制了既有隧道的沉降,其他学者也针对类似工程进行了相关的研究与应用^[9-12]。

综合上述,对于在 10 m 以内下穿既有建筑的隧道施工,通常采用“短进尺、少装药、分步开挖”等方式,来降低爆破振动,但分步开挖会影响现场掘进效率,能够控制极近距离下爆破振动并兼顾掘进效率、实现全断面一次爆破成型的案例较少。虽然电子雷管微差爆破技术能够有效控制爆破振动^[13,14],但目前现场设计延时间隔主要基于经验或半周期减振等方法,未考虑到微差爆破时多个炮孔的波形精准叠加对振速峰值的影响,且应用于极近距防爆破振动控制的不多,因此尚未完全发挥该技术的降振优势。

在重庆城口-开州高速公路吴家梁泄水洞工程中,泄水洞下穿既有隧道长度 55.54 m,其中有 24 m 下穿区段与正在运营的吴家梁隧道底板净距小于 3.10 m,吴家梁隧道中心水沟正下方的岩层厚度仅 2.30 m。在这样极近距离下要实现隧道高效安全爆破开挖,目前可参考的工程案例很少。针对这一情况,本文以重庆吴家梁泄水洞工程为背景,提出基于延时爆破振动波叠加消波与孔内分段相结合的降振方法:根据 Anderson 原理,利用现场单孔试验和波形线性叠加法优选出最优延时间隔,基于最优延时间隔设计各炮孔起爆时序,并在掏槽孔采取孔内分段延时起爆技术进一步减少同段药量,在距爆源极近距离下大幅降低爆破振动并一次开挖成型。在上方隧道正常运营情况下进行下穿洞室爆破施工,在爆破振速不超过 4.0 cm/s 的同时循环进尺达到 1.5 m,实现了安全高效施工,这一方法可为类似工程的爆破振动控制提供参考和借鉴意义。

1 隧道工程概况

1.1 隧道工程施工环境概述

吴家梁泄水隧洞工程是重庆城口(陕渝界)至开州高速公路中的一部分,其起于开州区大进镇翠湖村,向南穿越雪宝山,终于吴家梁隧道集水仓,全长 976 m,用于吴家梁高速公路隧道排水泄洪。其中,泄水隧洞 K1 + 076.63 ~ K1 + 132.17 桩号段总长约 55.54 m,需下穿已营运的吴家梁隧道(如图 1)。下穿段距上部既有隧道路面净距离约为 3.10 m,距既有隧道中心水沟的最小净距离仅 2.30 m(如图 2)。为保证安全原定采用机械施工,但由于泄水洞需在 2024 年汛期前(5 月 1 日以前)完工,机械施工因种种原因难以实施,只能采用爆破开挖且不能影响上方隧道正常运营。

由图 2 可知,泄水洞下穿段的开挖将依次通过既有隧道右洞、左右洞之间的中夹岩、以及既有隧道

形式 $f(t)$ ^[15]

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^k (a_j \cos iwt + b_j \sin iwt) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为单孔波形的拟合函数; t 为时间; a_0 、 a_j 、 b_j 均为 Fourier 拟合系数; w 为基频; k 为 Fourier 拟合的级数。

在经典线性弹性理论中,多个振动波可以进行线性叠加,总振动波形是各个振动波形线性叠加的代数和。基于单孔波形函数,可计算出任意数量的炮孔按任意延时间隔起爆后产生的波形函数 $F(t)$ ^[16]

$$F(t) = \sum_{m=1}^M f(t - T_m) \quad (2)$$

式中: $F(t)$ 为 M 个炮孔逐孔起爆后的合成波形

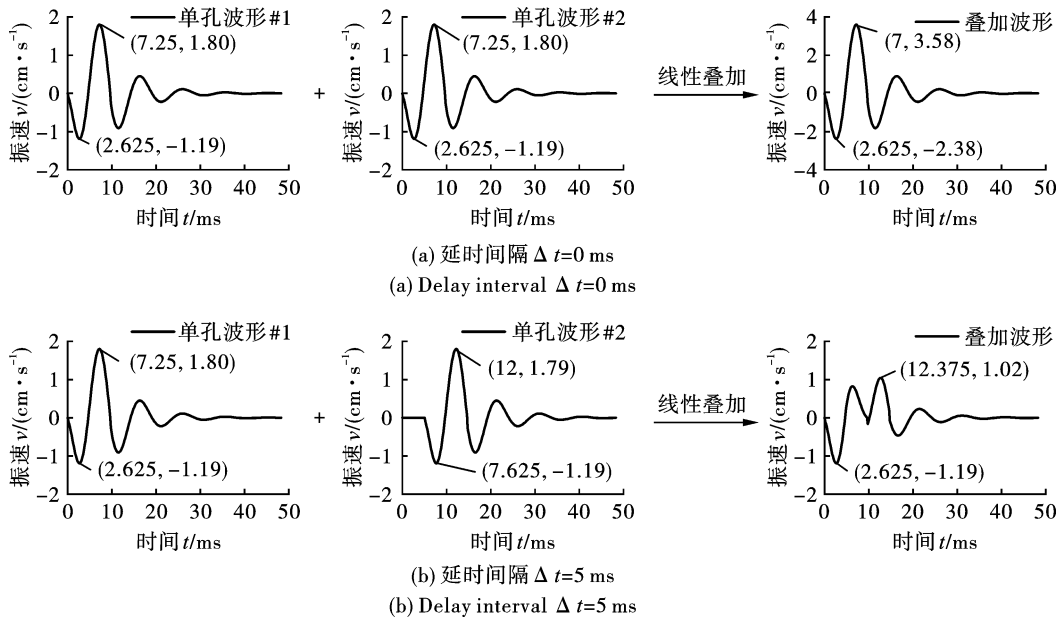


图4 不同延时间隔下的两孔波形叠加示意图

Fig. 4 The superposition diagram of two waveforms at different delay intervals

因此,在单孔爆破振动波形已知,且地质条件不变的情况下,需利用上述线性叠加方法,计算出多孔爆破在不同延时间隔下的振速峰值,从中选择使合成振速峰值最小的延时间隔,作为最优延时间隔,进而优化爆破方案。

3 爆破方案的优化

3.1 现场常规方案

泄水洞为直墙半圆拱隧道,开挖断面宽3.62 m,直墙段高2.66 m,半圆拱高1.81 m。图5为泄水洞工程在下穿既有隧道之前的常规爆破设计方案,设计进尺2 m。掏槽区采用复式掏槽,为1.3 m短掏槽+2.2 m长掏槽,排间延时为50 ms,起爆顺序为

函数; M 为起爆孔数量; m 为起爆孔顺序,取值范围为 $1, 2, 3, \dots, M$; t 为时间; T_m 为第 m 个炮孔的起爆时刻。

其中,各炮孔的延时间隔不同,叠加产生的总振动波形也不相同。以两孔爆破振动波形叠加为例,如图4所示,当两个炮孔的延时间隔为0时,两列波的波峰与波峰产生叠加,其振动峰值增大;当两个炮孔的延时间隔为5 ms时,两列波的波峰与波谷产生叠加,其振动峰值相应减小。当多个炮孔爆破时,振速峰值的大小更容易受到炮孔起爆延时间隔的影响,合理的延时间隔可以降低爆破振动,但延时间隔的优选更为复杂,1/2主振周期不一定是最优的延时间隔。

掏槽孔-辅助孔-周边孔-底脚孔的顺序。为减少爆破的总时长,设计了掏槽两侧的辅助与上部辅助同段起爆。

图6为开挖下穿段之前采用常规爆破时,既有隧道路面上的振动波形,其最大振速峰值为18.12 cm/s,接近《爆破安全规程》中的阈值,远大于工程部设定的安全振速允许值(5 cm/s),存在一定的安全风险。因此,为保证已经营运的吴家梁隧道的安全稳定,有必要优化泄水洞的爆破方案,降低爆破振动。

3.2 爆源与正上方隧道之间空间距离关系变化分析

泄水洞下穿段总长度达到了55 m左右,既有隧道左、右洞的跨度均为12 m,左右洞中夹岩厚度为

31.54 m。其中,处于隧道正下方的开挖段长度为 24 m,该段距上方既有隧道路面的距离不超过 3.10 m,距中心水沟的最小净距为 2.30 m;在左右洞之间的中夹岩区段,仍有 19 m 的区段与既有隧道的最小净距不超过 10 m。

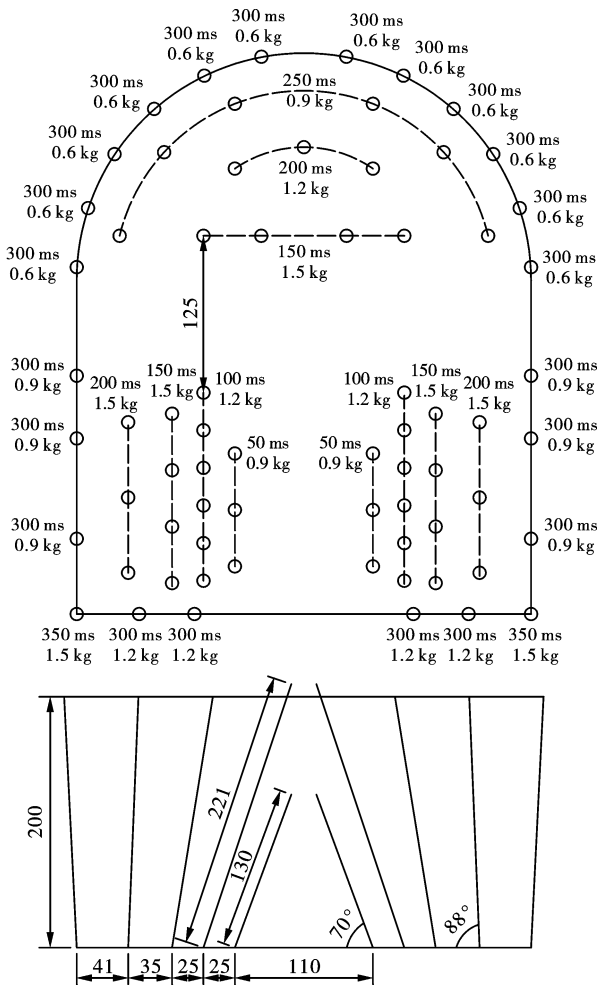


图 5 泄水洞工程常规爆破方案(单位:cm)

Fig. 5 Conventional blasting scheme of drainage tunnel project(unit:cm)

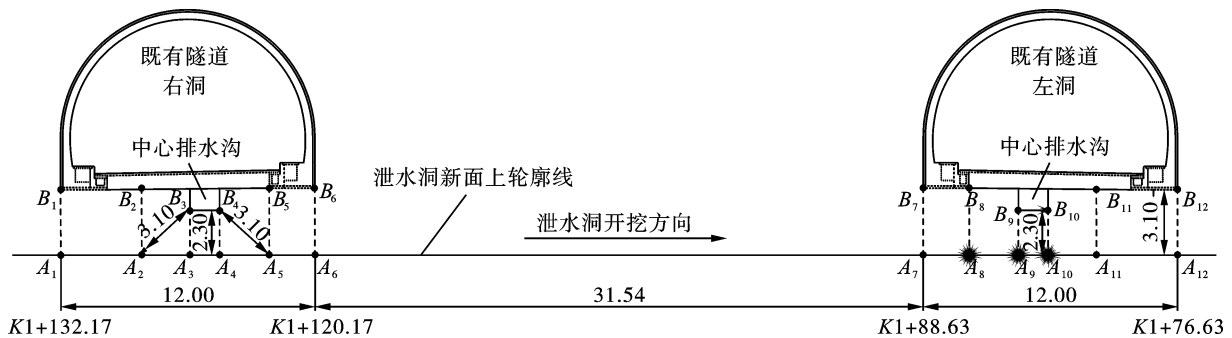


图 7 泄水洞下穿段与既有隧道的空间距离(单位:m)

Fig. 7 The distance between the undercrossing drainage tunnel and existing tunnels(unit:m)

掏槽区中间一对掏槽孔为首爆孔,起爆时只有一个临空面,爆破环境较差,且药量较多,容易引发

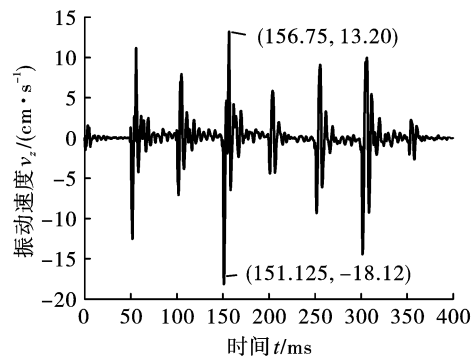


图 6 常规方案的爆破振动波形

Fig. 6 Blasting vibration waveform of conventional blasting scheme

在设计爆破方案时,需要同时考虑既有隧道路基、中心水沟和中夹岩等多个部位的安全,因此,有必要准确计算并分析爆源与正上方隧道之间的空间距离关系。下面以泄水洞下穿右洞为例,量化并分析在爆破掘进过程中,爆源与右洞隧道的净距变化情况。

泄水洞下穿段的起始桩号和结束桩号分别为 K1 + 132.17 和 K1 + 76.63,图 7 展示了下穿段与既有隧道空间距离的变化时各主要转折点 A₁ ~ A₁₂,图 8 展示下穿段经过既有隧道右洞时的净距变化情况。当完成中夹岩段施工后,隧道进入下穿左洞的阶段,开挖面与左洞隧道的净距变化曲线如图 9 所示。

3.3 孔位及药量设计

结合现场的地质条件,在常规爆破方案的基础上对爆破孔位和药量进行优化设计,图 10 为下穿段爆破炮孔及药量设计图。由图 10 可知,设计进尺为 1.5 m,掏槽区设计了 5 对掏槽孔,掏槽孔排距为 30 cm;掏槽两侧分别设置 2 排周边孔,孔距 58 cm;掏槽区上方布设三排辅助孔,孔距设置在 70 cm 左右;周边孔孔距设置为 46 cm。

较大振动。因此在首爆孔采用孔内分段起爆:将炸药分为孔口段和孔底段,孔口段先爆,为孔底段提供更好的临空条件,孔底段后爆。为避免孔口段起爆时孔底段殉爆,同时提高破岩效果,在两部分药卷中间及孔口处均适用黄泥堵塞 20 ~ 30 cm。其他掏槽孔采用常规方式爆破。

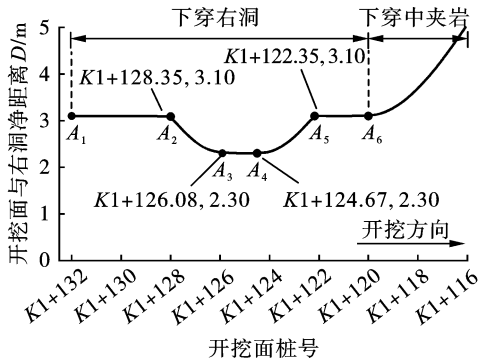


图 8 爆源与既有隧道右洞的净距变化曲线
Fig. 8 Variation of clear distance between blast source and existing right tunnel

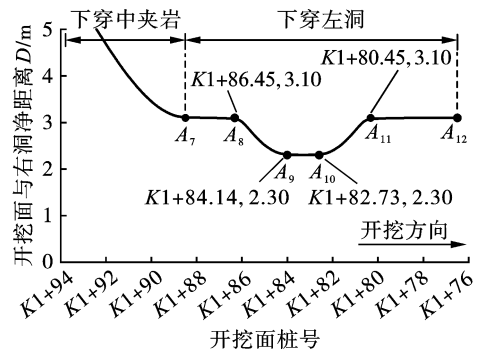


图 9 爆源与既有隧道左洞的净距变化曲线
Fig. 9 Variation of clear distance between blast source and existing left tunnel

与常规爆破方案相比,优化的下穿段爆破方案的炮孔布置更为均匀,且数量有所减少。经过计算,常规方案炸药单耗为 3.44 kg/m³,优化后方案的炸药单耗为 2.35 kg/m³,方案优化后炸药利用率得到了提高。

3.4 爆破最优延期时间计算

爆破延期时间的合理与否关乎到爆破振动的大小,可以基于现场实测单孔波形,利用线性叠加法比选出延期时间的最优值。

为获取真实、有效的单孔爆破振动波形,在下穿段全断面开挖之前,首先在断面掏槽区附近钻凿一个炮孔,进行单孔爆破试验。考虑到现场的工程条件,将 TC-4850 爆破测振仪布置在既有隧道的路面上,利用地勘资料中的桩号信息和现场工程 GPS 定

位测量仪,确定测振点在既有隧道路面的具体布设位置,确保每次爆破时测振点均位于爆源的正上方,测振点与开挖面拱顶的距离为 3.1 m。

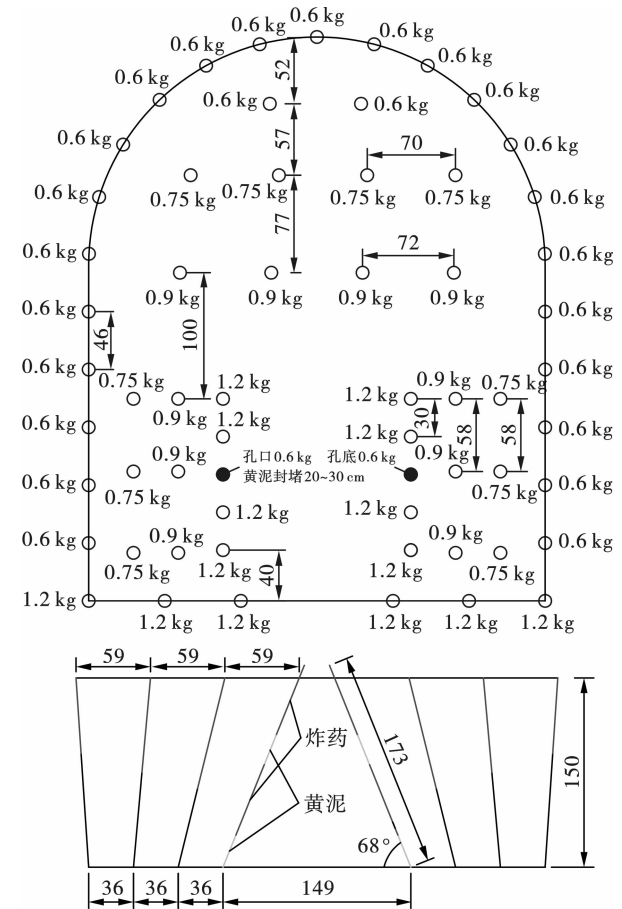


图 10 下穿段的孔位及装药情况(单位:cm)
Fig. 10 Hole location and charging in the undercrossing section(unit:cm)

为保证单孔爆破试验所得单孔振动波形能够用于爆破最优延期时间的计算,需要保证单孔爆破时的爆破条件与全断面爆破开挖时的爆破条件相同。因此,将单孔爆破试验的装药量设计为 1.2 kg,与全断面爆破时掏槽孔的单孔药量相同。同时,将单孔爆破试验的炮孔设置在全断面爆破时掏槽区附近,距离开挖面拱顶 3.5 m。根据地勘报告可知,整个下穿段岩性单一,以灰岩为主,未出现断层;因此,单孔爆破试验所处的地质条件与后续的全断面爆破开挖相同。

在泄水洞开挖面上开展装药量为 1.2 kg 的单孔爆破试验后,测振仪在爆源上方既有隧道路面上测得 X、Y、Z 三个方向的振动波形(如图 11),经过测算,爆源与测点的距离为 6.6 m。根据优化后全断面爆破方案可知,全断面爆破时掏槽孔与测振点距离为 6.0 ~ 7.1 m。由此可知,单孔爆破与全断

面爆破掏槽区的爆破条件相近。因此,可利用单孔 期时间。
爆破振动波形数据开展波形叠加计算,筛选最优延

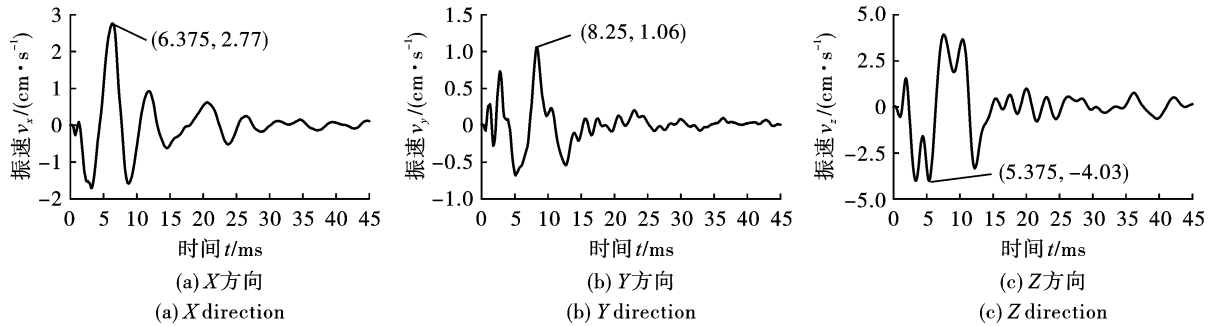


图 11 单孔爆破振动波形

Fig. 11 Vibration waveform of single hole blasting

分析图 11 可知,单孔爆破在 X、Y、Z 三个方向的振动波形峰值大小有所不同,三个方向的爆破振速分别为 2.77 cm/s、1.06 cm/s、4.03 cm/s。其中, Z 方向(与地面垂直方向)与振动波传播方向相同,具有较大振速峰值,因此将 Z 方向作为数据分析和降振的主要方向。

利用傅里叶级数对 Z 方向单孔波形进行高阶拟合,并根据线性叠加法计算 10 孔爆破在不同延时间隔下(0 ~ 20 ms)的最大振速峰值,图 12 为几种典型延时间隔(0 ms、3 ms、5 ms、10 ms、15 ms、20 ms)

下 10 个炮孔爆破的叠加计算波形。由图 12 可知,当延时间隔为 0 ms 时,10 个炮孔同时起爆,波峰与波峰产生叠加,计算所得合成振速峰值达到了 40 cm/s,这种情况产生的振速最大。当延时间隔为 3 ms、5 ms、10 ms 时,计算所得合成振速峰值要有所减小,其中 5 ms 较 3 ms 和 10 ms 的减振效果更好;结合图 11 中 Z 方向的振动波形和图 12 可知,当延时间隔为 15 ms 和 20 ms 时,各炮孔爆破的主振段波形相互错开,未发生明显的叠加,因此这两种延时间隔下的最大振速峰值在 4.0 cm/s 左右。

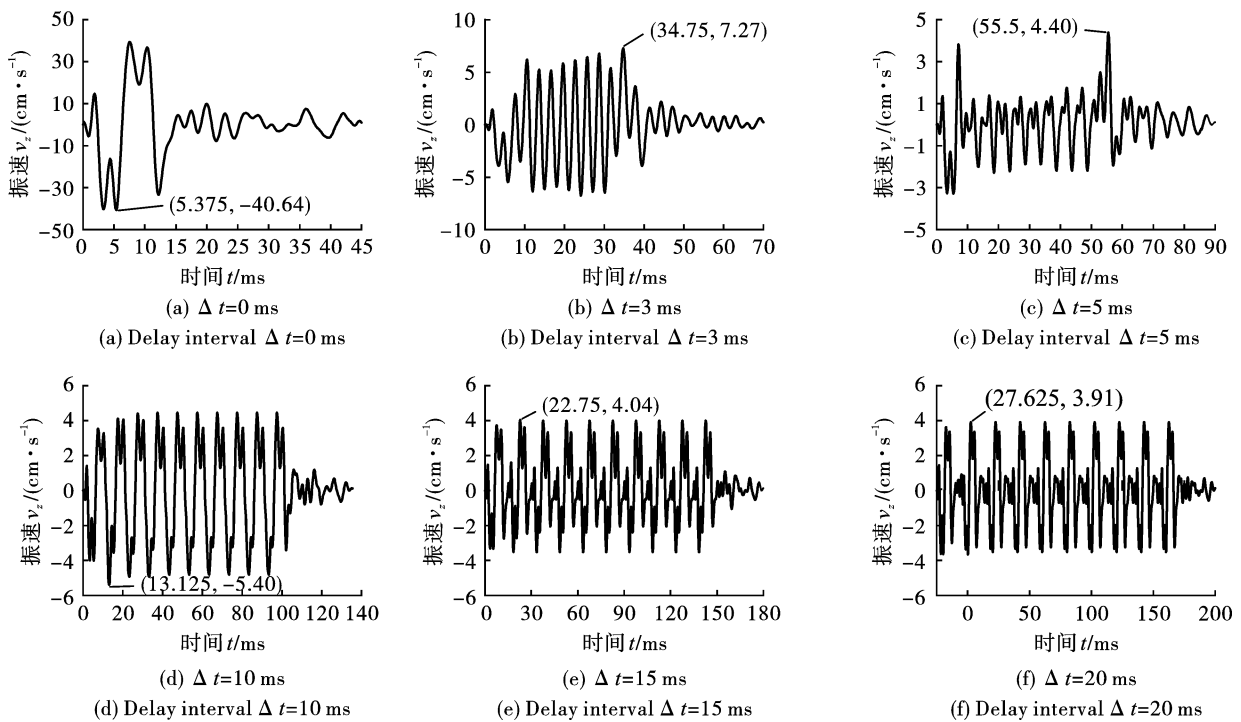


图 12 典型延时间隔下的 10 孔爆破叠加计算波形

Fig. 12 Superposed waveforms of 10-hole blasting at typical delay intervals

图 13 为 10 孔微差爆破时最大振速峰值随延时间隔(1 ~ 20 ms)变化的曲线。当延时间隔取 1 ~

2 ms 时,合成的最大振速仍然为较大值;当延时间隔为 5 ms 时,正向最大振速和负向最大振速均较小;当延时间隔大于 5 ms 时,振速的减幅较小,甚至在某些取值处 ($\Delta t = 8 \text{ ms}, 9 \text{ ms}$) 会有所增加;当延时间隔大于 10 ms 时,计算的 10 孔叠加振速峰值逐渐趋于稳定,且取值较小,但是较长的延时间隔不利于同排炮孔爆破协同破岩。因此,为了兼顾降振效果和破岩效果,将同排炮孔的孔间延时设置为 5 ms。

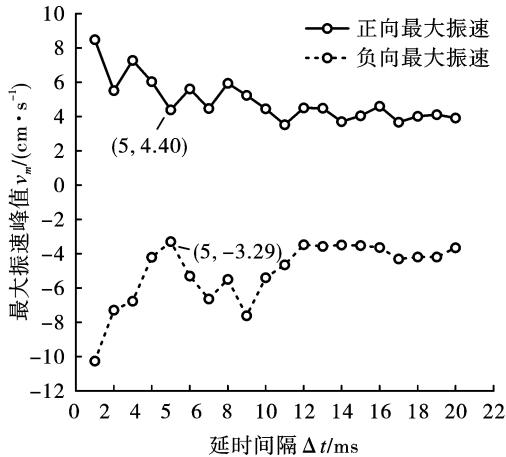


图 13 最大振速峰值-延时间隔变化曲线
Fig. 13 Variation of PPV with delay interval

结合图 11 可知,当振动持续时间达到 20 ms 时,爆破振动的主振段基本结束,可据此对掏槽孔孔内分段的延时作如下设置:首先是两个炮孔的孔口段依次起爆,延时间隔为上述计算出的孔间延时 5 ms,即起爆时刻分别为 0 ms 和 5 ms;第二个炮孔的孔口段起爆 20 ms 后,两个炮孔的孔底段依次起爆,起爆时刻分别为 25 ms 和 30 ms。继续分析图 11 可得,当振动持续时间 40 ms 时,爆破振动数值已经衰减至 0 cm/s 左右,因此将排间的延时间隔设置为 40 ms。周边孔爆破主要利用相邻孔爆破协同作用、形成相互贯通的裂缝,使断面轮廓成型,考虑到周边孔爆破时第二自由面已经形成、爆破条件得到改善,为了在控制爆破振动的同时利用短延时优

化爆破成型效果,将周边孔的延时间隔设置为 3 ms。综上,可得到各炮孔具体的延期时间如图 14 所示。

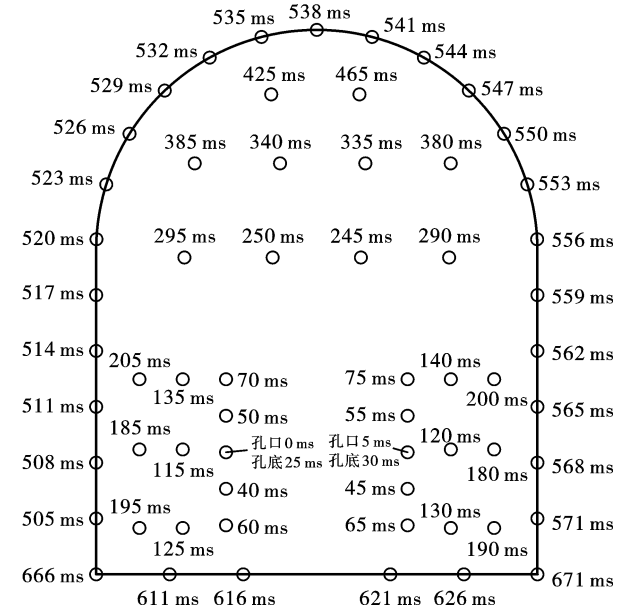


图 14 微差爆破炮孔延期时间设计
Fig. 14 Initiation design for millisecond delay blasting

4 现场实施及振动监测

将上述优化方案(包括进尺、孔位、药量及延期时间等)应用在泄水洞下穿段,并在既有隧道的路面、爆源的正上方位置,布置 TC4850 爆破测振仪监测爆破振动。表 1 分别为桩号 K1 + 131、K1 + 125 和 K1 + 122 处爆破开挖的实际装药参数,以及测振仪所测得的最大振速。结合图 6 可知,桩号 K1 + 131 和 K1 + 122 爆破位置处于排水沟左下方 ($A_1 \sim A_2$ 段)和右下方 ($A_5 \sim A_6$ 段),其上方岩层厚度均为 3.1 m,因此开挖面拱顶与既有隧道内测振点的距离为 3.1 m;桩号 K1 + 125 开挖面爆破部位处于既有隧道排水沟的正下方 ($A_3 \sim A_4$ 段),其上方岩层厚度仅为 2.3 m,排水沟深度为 0.8 m,由于现场条件限制,测振点同样布置在既有隧道的路面上,与开挖面拱顶距离为 3.1 m。

表 1 典型断面实际装药参数与振速测量值

Table 1 Actual charge parameters and vibration velocity measurements in typical section

断面桩号	爆破位置	实际总药量 Q/kg	炸药单耗 $q/$ (kg/m^3)	最大振速/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		
				X 方向 v_x	Y 方向 v_y	Z 方向 v_z
K1 + 131	排水沟左下方	52.50	2.35	4.60	3.46	5.72
K1 + 125	排水沟正下方	50.70	2.27	1.39	0.34	3.63
K1 + 122	排水沟右下方	52.20	2.34	1.16	0.54	3.32

由表 1 可知,三次爆破的最大振速分别为 5.72 cm/s、3.63 cm/s 和 3.32 cm/s,均出现在爆源

正上方测点的 Z 方向,相较常规方案的振速 (18.12 cm/s),爆破振动得到了极大程度的控制。

图15为三次爆破Z方向的振动波形,结合图14分析排水沟左下方开挖面爆破的振动波形,其最大振速(5.72 cm/s)是延期时间为425 ms的辅助孔产生的。为进一步控制后续爆破的最大振速,将延期时间为425 ms、465 ms的辅助孔单孔装药量从0.6 kg

减小为0.45 kg,由图15可知,后续两次爆破(排水沟正下方、排水沟右下方)在425 ms时刻的振速明显减小,最大振速也有所降低,分别为3.63 cm/s和3.32 cm/s,控制在了4 cm/s以内。

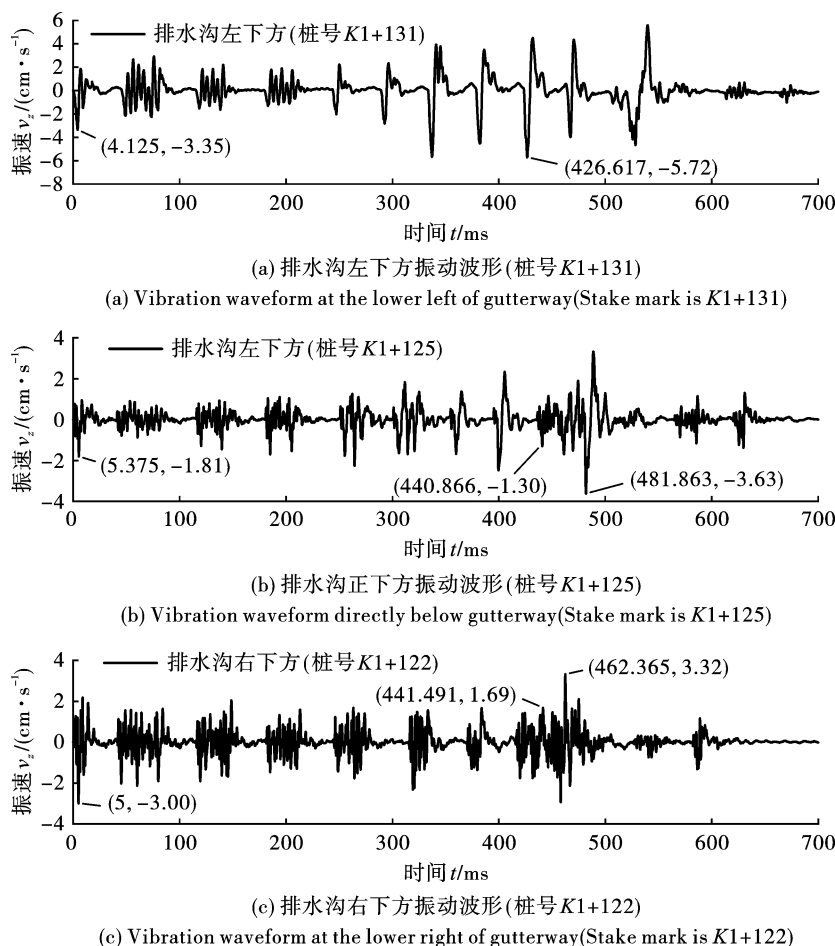


图15 下穿段典型爆破振动波形

Fig. 15 Vibration waveform of blasting in the underpass section

同时,掏槽孔采用孔内分段和微差起爆的方式后,掏槽区的爆破振动也得到了有效的控制。由图15可知,三次爆破掏槽区的最大振速分别为3.35 cm/s、1.81 cm/s和3.00 cm/s。其中,处于排水沟正下方的断面爆破时,其掏槽孔最大振速仅为1.81 cm/s,为分段爆破的孔口段产生。在设计为孔内分段的掏槽孔起爆后,后续掏槽孔爆破产生的振动均小于此值,这说明首爆掏槽孔起爆后为后续掏槽孔提供了更好的临空条件,降低了掏槽区的爆破振动。整个泄水洞工程施工期间,现场未因爆破作业产生坍塌、沉降等安全风险或事故,实现了下穿隧道施工的安全目标,同时保证了既有隧道的正常安全运营。

5 结论

依托吴家梁隧道泄水洞工程,针对近距离下穿既有隧道的爆破工程,开展了电子雷管微差爆破方案设计、实验与现场应用,得到以下结论:

1) 利用线性叠加法处理现场单孔爆破振动波形、计算延时间隔的方法,准确获取了适用于现场的最优延时,通过现场应用证明,辅助孔孔间延时间隔5 ms、排间延时间隔40 ms、周边孔延时间隔3 ms,能够有效降低爆破振动。

2) 在炮孔微差爆破降振的基础上,对掏槽区首爆孔采用孔内分段技术,设置孔口、孔底间隔20 ms起爆,将首爆孔爆破振速控制到1.81 cm/s,进一步

降低了掏槽区的爆破振动。

3)在上方隧道正常运营情况下进行下穿洞室爆破施工中,采用逐孔微差爆破和孔内分段技术相结合的降振方法,充分发挥了该技术的降振优势,精准控制了爆破振动在4 cm/s以下,同时实现了断面的一次爆破成型,为后续类似工程提供了参考。

参考文献 (References)

- [1] 马跃原,何宏海,张勇,等.小净距大断面隧道先行洞爆破振动响应特性分析及其安全控制[J].爆破,2023,40(2):172-179,216.
- [1] MA Yue-yuan, HE Hong-hai, ZHANG Yong, et al. Analysis of blasting vibration response characteristics and safety control of front tunnel with small clear distance and large Section[J]. Blasting, 2023, 40(2): 172-179, 216. (in Chinese)
- [2] 彭悦森,钟冬望,王朝振,等.极小净距隧道先行洞振动响应特性及衰减规律研究[J/OL].爆破:1-15. [2024-9-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240116.1618.004.html>.
- [2] PENG Yue-sen, ZHONG Dong-wang, WANG Chao-zhen, et al. Research on vibration response characteristics and attenuation rule of advance tunnel with minimum clear distance[J/OL]. Blasting: 1-15. [2024-9-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240116.1618.004.html>. (in Chinese)
- [3] 傅洪贤,孔恒,吴进科.复杂环境下隧道爆破施工控制技术[J].土木工程学报,2017,50(S2):286-291.
- [3] FU Hong-xian, KONG Heng, WU Jin-ke. Controlled technology of tunnel blasting in complex environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 286-291. (in Chinese)
- [4] 赵广平.下穿城区隧道先后上下法控制爆破快速施工技术[J].隧道建设(中英文),2024,44(S1):368-380.
- [4] ZHAO Guang-ping. Rapid construction technology of controlled blasting for tunnels passing through urban areas using the method of first descending and then ascending[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(S1): 368-380. (in Chinese)
- [5] 胡平.复杂地质条件下地铁隧道下穿建筑物减振爆破技术[J].工程爆破,2022,28(3):122-128.
- [5] HU Pin. Blasting vibration reduction technology for subway tunnels beneath buildings in complex geological conditions[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(3): 122-128. (in Chinese)
- [6] 罗帅兵,蒋楠,周传波,等.地铁联络通道下穿爆破邻近高架桥动力响应[J].振动、测试与诊断,2022,42(1):49-55;193-194.
- [6] LUO Shuai-bin, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Dynamic response to blasting of subway link beneath adjacent viaduct[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2022, 42(1): 49-55; 193-194. (in Chinese)
- [7] 陈沛,吴剑锋,蒙云琪,等.地铁隧道小净距下穿地下洞室振速控制研究[J].工程爆破,2021,27(3):94-101.
- [7] CHEN Pei, WU Jian-feng, MENG Yun-qi, et al. Research on vibration velocity control of metro tunnel through underground cavern at a short net distance[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(3): 94-101. (in Chinese)
- [8] 许怀.泄水洞超小净距下穿高速铁路隧道设计[J].铁道工程学报,2018,35(6):41-46.
- [8] XU Huai. Design of high speed railway tunnel with ultra-small net distance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(6): 41-46. (in Chinese)
- [9] 龚伦,仇文革.既有铁路隧道受下穿引水隧洞近接施工影响预测[J].中国铁道科学,2007,28(4):29-33.
- [9] GONG Lun, QIU Wen-ge. Prediction of existing railway tunnel affected by close construction of underpass diversion tunnel[J]. China Railway Science, 2007, 28(4): 29-33. (in Chinese)
- [10] 仇文革,凌昊,龚伦,等.引水隧洞下穿既有铁路隧道爆破施工振动影响及对策[J].中国铁道科学,2009,30(6):46-53.
- [10] QIU Wen-ge, LIN Hao, GONG Lun, et al. Vibration influence and countermeasures of blasting construction of existing railway tunnel under diversion tunnel[J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 46-53. (in Chinese)
- [11] 高宇璠,傅洪贤.近距离下穿既有盾构隧道的隧道钻爆降振技术研究[J].振动工程学报,2021,34(2):321-328.
- [11] GAO Yu-fan, FU Hong-xian. Research on tunnel drilling and blasting vibration reduction technology for penetrating the existing shield tunnel at short distance[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 321-328. (in Chinese)
- [12] 柳之森.地铁隧道下穿黄鹤楼景区爆破振动效应分析[J].爆破,2023,40(2):190-198.
- [12] LIU Zhi-sen. Blasting vibration effect of subway tunnel underpassing scenic spot of Yellow Crane Tower[J]. Blasting, 2023, 40(2): 190-198. (in Chinese)
- [13] 何理,殷琳,钟冬望,等.爆破振动强度、波形与频谱研究综述:预测及主动控制[J/OL].爆破:1-17. [2024-9-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240104.1057.008.html>.
- [13] HE Li, YIN Lin, ZHONG Dong-wang, et al. Research review on blast vibration intensity, waveform and spectrum: prediction and active control[J/OL]. Blasting: 1-17. [2024-9-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240104.1057.008.html>. (in Chinese)
- [14] 冷振东,范勇,涂书芳,等.电子雷管起爆技术研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2023,25(1):142-154.
- [14] LENG Zhen-dong, FAN Yong, TU Shu-fang, et al. Electronic detonator initiation technology: research progress and development strategies[J]. Strategic Study of CAE,

- 2023,25(1):142-154. (in Chinese)
- [15] 刘翔宇,龚敏,吴昊骏,等. 多因素耦合影响下隧道电子雷管爆破参数的计算与实践[J]. 振动与冲击, 2021,40(5):24-32.
- [15] LIU Xiang-yu, GONG Min, WU Hao-jun, et al. Calculation and practice of blasting parameters of electronic detonator in tunnel under the influence of multi-factor coupling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 24-32. (in Chinese)
-
- (上接第166页)
- [6] 管晓明,王旭春,安建永,等. 隧道微差爆破的延时计算及电子雷管减振应用[J]. 隧道建设, 2018,38(12): 1941-1947.
- [6] GUAN Xiao-ming, WANG Xu-chun, AN Jian-yong, et al. Time-delay calculation of tunnel millisecond blasting and application of vibration reduction of electronic detonators [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(12): 1941-1947. (in Chinese)
- [7] 朱志国. 多起爆点小直径药卷光面爆破技术的应用[J]. 现代矿业, 2023,39(10):77-80,86.
- [7] ZHU Zhi-guo. Application of smooth blasting technology of multi-point small-diameter cartridge[J]. Modern Mining, 2023,39(10):77-80,86. (in Chinese)
- [8] 张亮,王海亮,周宜. 工程爆破振动有害效应控制的研究[J]. 市政技术, 2016,34(3):97-99,103.
- [8] ZHANG Liang, WANG Hai-liang, ZHOU Yi. On harmful effect control of engineering blasting vibration[J]. Journal of Municipal Technology, 2016, 34(3): 97-99, 103. (in Chinese)
- [9] 王建国,刘文治,李鹏飞,等. 预裂爆破在尖山磷矿高边帮开采中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(1):50-53.
- [9] WANG Jian-guo, LIU Wen-zhi, LI Peng-fei, et al. Application of pre-splitting blasting in mining under the high slope of JianShan Phosphate[J]. Non-ferrous Metals(Mining Part), 2017, 69(1): 50-53. (in Chinese)
- [10] 梁开水,陈天珠,易长平. 减震沟减震效果的数值模拟研究[J]. 爆破, 2006(3):18-21.
- [10] LIANG Kai-shui, CHEN Tian-zhu, YI Chang-ping. Numerical simulation for vibration-isolating effect of vibration-isolating slot [J]. Blasting, 2006(3): 18-21. (in Chinese)
- [11] 王利军,何忠明,蔡军. 减震沟参数对地铁隧道爆破减震效果的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018,49(3):747-755.
- [11] WANG Li-jun, HE Zhong-ming, CAI Jun. Analysis of effect of damping ditch parameters on blasting vibration reduction effect of metro tunnel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 747-755. (in Chinese)
- [12] 张超逸,武飞,丁言鑫,等. 多排减振孔对台阶爆破地震波减振作用的研究[J]. 工程爆破, 2021,27(6): 121-126.
- [12] ZHANG Yi-chao, WU Fei, DING Yan-xin, et al. Study on the vibration damping effect of multi-row vibration damping holes on the seismic wave of bench blasting[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6): 121-126. (in Chinese)
- [13] 张奇,高金石. 爆破理论与爆破优化[M]. 西安:西安地图出版社,1992.
- [14] K HAGIMORI, YOSHIO TAKECHI, K FURUKAWA, et al. Low vibration blasting methods with continuous slots [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1988:142-150.
- [15] 徐亮. 多排密集钻孔爆破减振理论及设计方法研究[D]. 泉州:华侨大学,2014.
- [15] XU Liang. Study of the blasting damping theory and the design method of multi-row drilling holes [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014. (in Chinese)
- [16] 赵蕊. 爆破减振孔减振效应的试验与数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2020.
- [16] ZHAO Rui. Experimental and numerical simulation study on vibration reduction effect of blasting barrier holes [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [17] 吕江,赵晖,姚康,等. 基于减振孔的爆破振动主动控制研究[J]. 山西建筑, 2022,48(3):135-138.
- [17] LV Jiang, ZHAO Hui, YAO Kang, et al. Research on active control of blasting vibration based on damping holes [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(3): 135-138. (in Chinese)
- [18] 杨磊,钟冬望,何理,等. 阳逻港水下钻孔爆破地震波测试及小波包分析[J]. 工程建设与设计, 2013(5):80-83.
- [18] YANG Lei, ZHONG Dong-wang, HE Li, et al. Seismic wave test of Wuhan Yangluo Port underwater drilling blasting and wavelet packet analysis [J]. Construction & Design for Engineering, 2013(5): 80-83. (in Chinese)