

钻爆法隧道爆破振动传播规律数值模拟

——以深圳白芒河引排水隧道为例

张宝刚¹, 潘文博², 王军华¹, 王璐¹, 王帅峰²

¹中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州

²同济大学, 上海

收稿日期: 2022年5月5日; 录用日期: 2022年6月13日; 发布日期: 2022年6月20日

摘要

钻爆法隧道施工所引发的振动效应会对周边建构物 and 人居环境造成不利影响, 研究其传播规律对隧道安全施工具有重要意义。以深圳白芒河引排水隧道为研究对象, 采用二维通用离散元软件 UDEC 建立数值模型, 探究钻爆法隧道爆破施工过程中振动传播规律, 并结合现场爆破振动监测对周围环境受影响程度进行评估。研究表明, 质点峰值振动速度主要与爆心距有关, 并受地层交界面及地表散射作用的影响; 地层内部不同方向爆破振动的衰减规律差异明显; 质点主振动方向受质点 - 爆心连线与爆破荷载施加方向夹角的影响。最后, 结合模拟结果及监测数据给出地表、掌子面前方及洞室内壁爆破振动衰减系数、衰减指数及安全距离建议值。

关键词

钻爆法隧道, 振动传播规律, 数值模拟, 离散元, UDEC

Numerical Simulation on the Blasting Vibration Propagation Induced by Tunneling Using Drilling and Blasting Method

—A Case Study of Baimang River Water Storage and Sewerage Tunnel in Shenzhen

Baogang Zhang¹, Wenbo Pan², Junhua Wang¹, Lu Wang¹, Shuaifeng Wang²

¹China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Tongji University, Shanghai

Abstract

The blasting vibration induced by tunnel excavated using drilling and blasting method may impose adverse effect to the surrounding construction buildings and living environment. It is thus of fundamental importance to study the propagation of blasting vibration to ensure the safety of tunnel construction. Taking the Baimang River water storage and sewerage tunnel in Shenzhen as studied case, this paper uses the two-dimensional universal discrete element method-based software, *i.e.*, UDEC, to establish a numerical model to investigate the blasting vibration propagation during tunnel excavation using drilling and blasting method. Afterwards, we estimate the effect degree of surrounding environment based on the numerical results together with the *in-situ* vibration monitoring data. The simulation results show that the particle peak velocity is highly related to its distance to the explosion center. It also influenced by the stratum interfaces and the scattering induced by shallow surface. The attenuation of blasting vibration in the stratum varies significantly in different directions. The primary vibration direction is affected by the intersection angle between the point-explosion center line and the direction of blasting loads. Finally, based on the simulation results and the field monitoring data, the paper gives the attenuation coefficient and exponent index, as well as the estimation of safety distance for the surface, excavation face and the side wall.

Keywords

Drilling and Blasting Tunnel, Blasting Vibration Propagation, Numerical Simulation, Discrete Element Method, UDEC

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为新奥法施工的主要方法之一，钻爆法凭借成本低、效率高、地层适应性广的特点，仍然是我国山岭隧道建设的主要施工方法之一[1] [2] [3]。钻爆法施工不可避免地会对周围环境产生振动危害，尤其是在城市环境中，爆破所引发的振动效应对周边建构筑物 and 人居环境造成不利影响[4] [5] [6]。因此，针对性地研究钻爆法爆破振动传播规律，可以及时掌握爆破振动效应对周围环境的影响程度，并以此指导现场爆破设计及合理调整爆破参数，保证安全、高效地完成隧道贯通任务。

随着爆破振动监测系统和测试技术日趋成熟，借助于此，国内外学者依托多个隧道案例对爆破振动时程曲线特征、振动衰减规律、爆破振动影响范围等进行深入研究[7] [8] [9] [10]。工程中常采用萨道夫斯基地震动最大速度经验公式描述爆破振动随爆心距的衰减特征：

$$v = K \left(\sqrt[3]{Q}/R \right)^\alpha \quad (1)$$

式中： V 为质点最大速度，cm/s； Q 为最大单响装药量，kg，齐爆为总药量，延时爆破为最大单段药量； R 为质点距离爆源中心的距离，m； K 和 α 分别为与场地有关的衰减系数和衰减指数。钱正富等[1]、雷明峰等[7]、李清等[11]从现场获得的监测数据均与萨氏公式具有较好的拟合效果，但当监测点与爆源具

有一定高程差时,萨氏公式的预测精度较低。王超等[12]通过量纲分析,推导出考虑高差影响的萨氏公式;毕卫国等[13]提出一种动态优化的拟合模型,解除萨氏公式中的指数 $1/3$,而选用一个与误差最小相接近的指数,并随爆破进程不断更新 K 和 α 值;唐海等[14]较全面考虑了影响爆破振动的主要因素,运用神经网络原理,对质点爆破振动峰值速度进行预测。爆破波的叠加效应也影响其衰减规律。爆破波经地表自由面反射会引起地表附近围岩振动速度增大,且距地表越近反射叠加作用越强[12];凹形地貌对爆破波具有衰减作用,其衰减系数与最大段药量、爆源距及凹槽的宽度和深度有关;凸性地貌对爆破波具有放大效应,且垂直方向较水平方向放大效应更为明显[15]。

受限于现场施工环境复杂,现场振动监测具有一定局限性,而数值模拟可以作为现场监测的补充手段对振动传播规律及振动效应对周围环境的影响进行研究[2]。在各类数值模拟方法中,离散单元法擅于处理动力荷载作用下不连续地层的响应问题,计算效率较高。Universal Distinct Element Code (UDEC)是一款基于离散单元法的二维通用数值分析软件,擅于处理在静力或动力荷载作用下不连续地层的响应问题,采用“拉格朗日”求解法,能够有效地模拟块体系统的运动和变形行为[16]。刘亚群[17]等运用 UDEC 模拟爆破荷载作用下黄麦岭磷矿采场岩质边坡的动力响应,发现模拟结果与现场监测结果吻合较好,误差在 20% 以内。夏详[18]等根据福建牛头山水电站地基岩体爆破开挖监测,运用 UDEC 模拟节理岩体距爆源不同距离处质点的振动速度和频率的变化特征,发现计算得到的岩体振动特征和衰减规律与现场监测结果基本符合。唐海[15]运用 UDEC 模拟爆破振动波在不同地形地貌条件下的传播规律,揭示了地形地貌对爆破振动波传播的影响。上述研究表明,UDEC 可以较好的模拟爆破荷载作用下岩体的动态响应。

上述研究中一般将地层作为均质体,忽略地层交界面对爆破振动的影响,且缺少爆破波在地层内部不同方向上衰减规律的差异性分析。本文依托白芒河流域水环境综合治理工程引排水隧道工程,基于现场地勘报告和爆破施工方案,采用 UDEC 建立二维数值模型,进一步研究钻爆法施工爆破振动传播影响规律,并基于现场监测和数值模拟结果对振动效应影响范围进行评估。

2. 工程背景

白芒河流域水环境综合治理工程引排水隧道起点位于南光高速匝道路口、沙河西路西侧,向东穿越沙河西路(下穿铁石引水隧道),而后在西丽水库库区内沿沙河西路向南延伸,侧穿西丽水库库尾,出西丽水库后下穿西丽湖路(上穿地铁 7 号线)和九祥岭山体,最终汇入大沙河,如图 1 所示[19]。隧道总长度 3366 m,采用盾构法与钻爆法两种开挖方式由隧道两端相向施工,其中钻爆段长度 354 m。与盾构段相比,钻爆段岩性相对较硬,采用盾构法施工滚刀磨损严重且影响施工进度。此外,采用两种开挖方法同时相向施工可进一步缩短工期。

3. 计算模型及参数选取

3.1. 模型建立

为了揭示爆破波在地层中的传播规律,根据白芒河引排水隧道地形剖面图(桩号 K3 + 126 至 K3 + 286),建立计算模型如图 2 所示。地层由上至下依次为全风化、强风化、弱风化和微风化花岗岩,各地层物理力学参数详见表 1。隧道设计开挖直径为 6.98 m,为方便建模,本文中取隧道直径为 7.0 m,主要位于微风化花岗岩中。模型尺寸为 160 m × 48 m,该区域内隧道最大埋深为 21 m,模型底部距隧道拱底 20 m。根据现场爆破施工设计,炮孔直径 42 mm、深度约为 2.0 m,模型中选取同样的参数进行模拟。爆破设计为十段微差爆破,根据现场振动监测结果,前五段振动信号较后五段更为清晰,且前五段爆破产生的监测点峰值加速度和峰值速度均较后五段大,因此,数值模型模拟五段微差爆破,各段起爆时间按爆破施工设计取值,详见表 2。在各段中,通过将掌子面钻孔区域块体依照设计的炮孔直径切割为块体 I、块体

II 及炮孔块体 III，并将爆破荷载分别作用在块体 I 的下边界及块体 II 的上边界，模拟炮孔内炸药起爆后作用在炮孔壁的爆破荷载。



Figure 1. Overview of the field environment around the tunnel

图 1. 隧道区间现场环境概况图

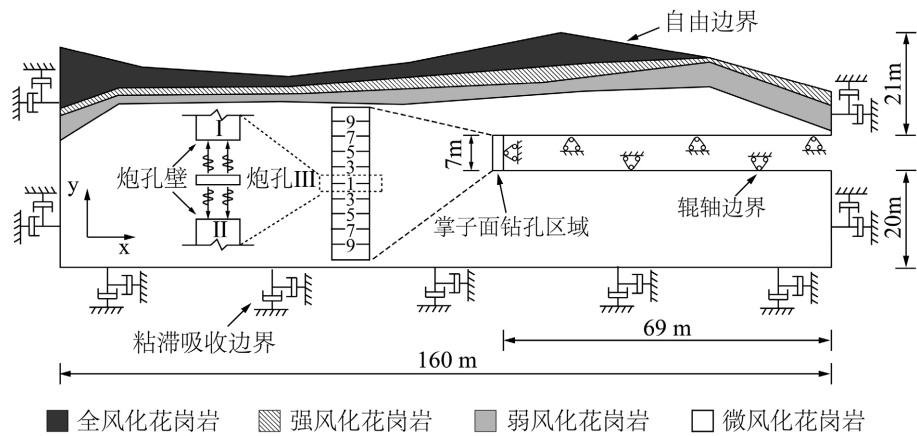


Figure 2. Schematic diagram of the numerical model

图 2. 数值模型示意图

模型底部及左右两侧均设置粘滞吸收边界，减小动荷载作用下边界反射波的影响。模型顶部为自由边界，允许爆破波发生反射，模拟半无限地层空间。已开挖的洞室内壁采用辊轴边界，模拟初衬支护效果，掌子面设置辊轴边界防止爆破荷载引起局部块体向临空面产生较大变形，影响模拟效果。通过 UDEC

中 GENERATE 命令划分有限差分三角形网格单元, 为精确模拟爆破波在地层中的传播, 掌子面钻孔区域最大网格尺寸为 0.5 m, 模型其余部分最大网格尺寸为 1.0 m。

监测点的布置如图 3 所示。自 y 轴逆时针旋转 0°、45°和 90°各布置一条测线, 地表测线沿地表地形布设, 并于隧道拱顶、拱底各布设一条测线。

Table 1. Stratum physical parameters

表 1. 地层物理参数

岩性	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比(μ)
全风化花岗岩	1800	3.25	0.40
强风化花岗岩	2530	8.68	0.30
弱风化花岗岩	2590	29.13	0.26
微风化花岗岩	2640	44.15	0.28

Table 2. Blasting section detonation times

表 2. 微差爆破各段起爆时间

段号	1	3	5	7	9
起爆时间(ms)	0	50	110	200	310

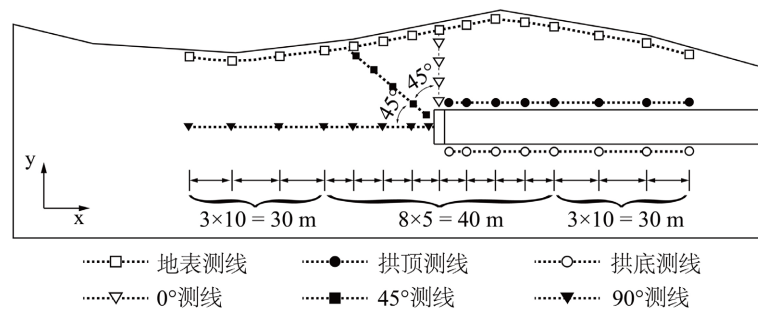


Figure 3. Schematic diagram of the monitoring points layout

图 3. 监测点布置示意图

3.2. 爆破荷载

岩体爆破是一个瞬时的复杂过程, 炸药在爆孔中爆炸, 瞬间产生高温高压气体, 在有限的空间中迅速膨胀, 产生爆炸冲击波, 作用于周围岩体, 并很快衰减为应力波, 整个过程持续数毫秒[18]。由于炸药在爆孔中爆炸机理及影响因素十分复杂, 很难还原爆炸过程的每一个细节。结合现有研究, 本文采用与实际脉冲波形相似的经验公式来描述爆炸冲击波的大小及衰减情况[20] [21]。

1) 单段爆压计算:

$$P_b = \frac{\rho V^2}{4} \quad (2)$$

式中: P_b 为最大爆轰压力, Pa; ρ 为炸药密度, 取 1000 kg/m³; V 为炸药爆速, 取 3600 m/s。

2) 孔壁压力峰值:

$$P_{\max} = \frac{2\rho_0 c_p}{\rho_0 c_p + \rho V} \cdot P_b \quad (3)$$

式中： ρ_0 为岩石密度， kg/m^3 ； c_p 为岩石纵波波速， m/s ，可通过岩石弹性模量 E 和岩石泊松比 $\mu_d = 0.8\mu$ 推算：

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu_d)}{\rho_0(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}} \quad (4)$$

3) 单孔不耦合间隔装药孔壁压力峰值：

$$P'_{\max} = \left(\frac{d}{D}\right)^{nv} \cdot \frac{kA_0}{A_1} \cdot P_{\max} \quad (5)$$

式中： d 为炸药药卷直径，取 0.03 m ； D 为炮孔直径，取 0.042 m ； n 为柱状装药系数，取 2.0 ； v 为气体多方指数，取 3.0 ； k 为炸药与炮孔长度比值，取 0.80 ； A_0 和 A_1 分别为药卷和炮孔横截面积， m^2 。

4) 爆破荷载时程函数：

$$P_t = P'_{\max} f(t) \quad (6)$$

式中 $f(t)$ 为数型时间滞后函数：

$$f(t) = P_0 \left(e^{-n\omega t/\sqrt{2}} - e^{-m\omega t/\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

式中， n 、 m 为与阻尼有关的无量纲参数，取 0.055 和 0.035 ； ω 是岩石纵波波速与爆孔直径的函数：

$$\omega = \frac{2\sqrt{2}c_p}{3D} \quad (8)$$

当 $t = t_R$ 时， $f(t) = 1$ ，因此：

$$P_0 = 1 / \left(e^{-n\omega t_R/\sqrt{2}} - e^{-m\omega t_R/\sqrt{2}} \right) \quad (9)$$

t_R 为 n 、 m 和 ω 的函数：

$$t_R = \frac{\sqrt{2} \ln(n/m)}{(n-m)\omega} \quad (10)$$

依据上述各式计算出爆破荷载时程曲线如图 4 所示。

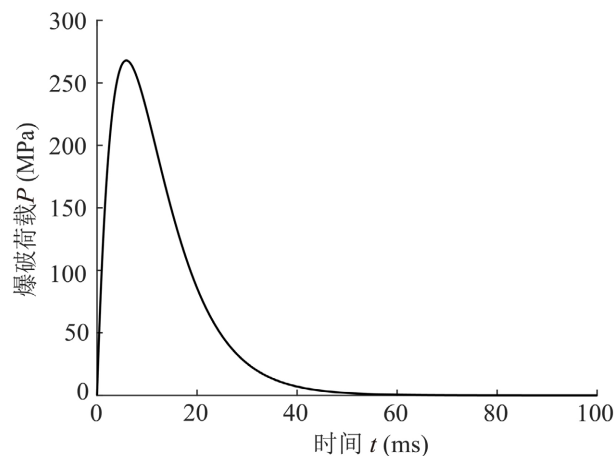


Figure 4. Temporal development of the blasting load

图 4. 爆破荷载时程曲线

3.3. 阻尼设置

采用 UDEC 中的 Rayleigh 阻尼:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (11)$$

式中: C 为阻尼矩阵; M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; α 为质量阻尼系数; β 为刚度阻尼系数。对于多自由度系统:

$$\alpha = \varepsilon_{\min} 2\pi f_{\min} \quad (12)$$

$$\beta = \varepsilon_{\min} / 2\pi f_{\min} \quad (13)$$

式中: ε_{\min} 为最小临界阻尼比; f_{\min} 为最小中心频率。质量阻尼项类似于将模型中的每个角点或网格点与地表连接的阻尼器, 刚度阻尼项则类似于连接模型中每个单元的阻尼器。振动频率较低时, 质量阻尼项起主要作用, 而振动频率较高时, 刚度阻尼项起主要作用[16]。由图 4 可知, 施加爆破荷载的中心频率约 200 Hz, 因此可仅设置刚度阻尼(即 $\alpha = 0$): $f_{\min} = 200$ Hz, $\varepsilon_{\min} = 0.05$ 。

4. 计算结果及分析

4.1. 质点峰值振动速度衰减规律

第 1 段炮孔起爆后 2~12 ms 内地层速度场随时间变化情况如图 5 所示。起爆后, 爆破荷载垂直作用

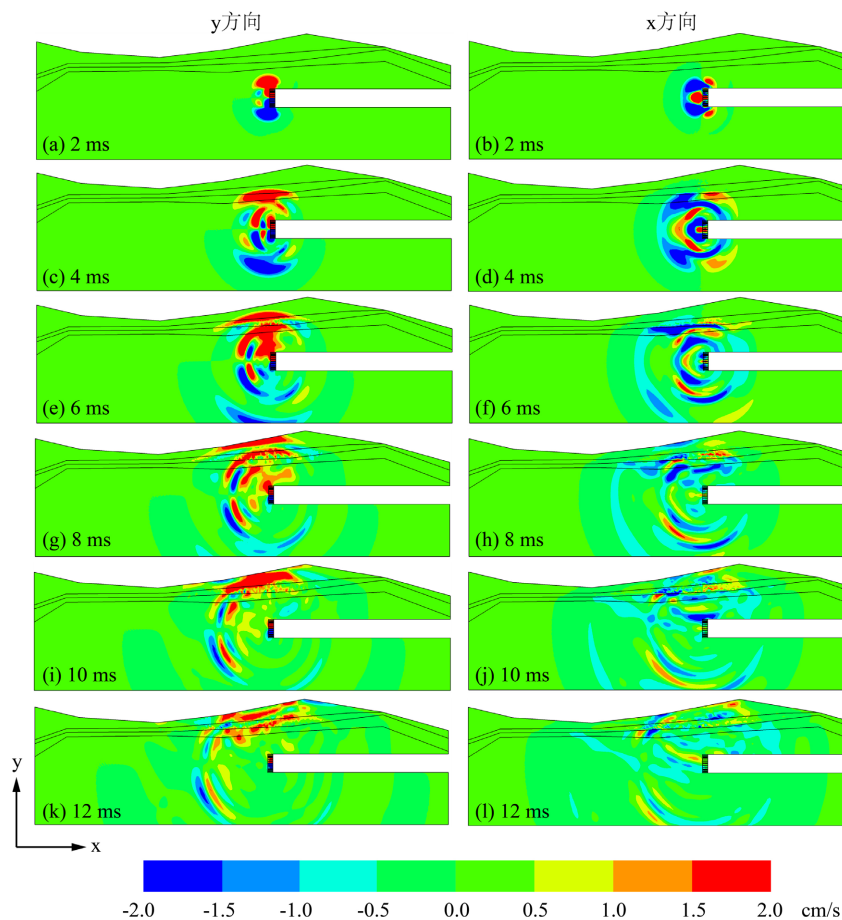


Figure 5. Velocity evolution of the stratum after the first borehole section detonated
图 5. 第 1 段炮孔起爆后地层速度场变化云图

于炮孔壁上, 形成沿炮孔轴线呈对称分布的 y 方向和 x 方向速度场。起爆后 4 ms 时, 爆破波穿越弱风化花岗岩地层, 进入强风化花岗岩地层, 波速发生较明显衰减。起爆 6 ms 时, 可以观察到地层界面对爆破波的散射作用, y 方向爆破波形成较明显的尾波, 地层交界面对 x 方向爆破波产生较强的反射作用。起爆 8 ms 时, y 方向爆破波到达地表, 并于 10 ms 明显捕捉到地表对爆破波的反射作用, 而传播至模型底部的爆破波由于粘滞吸收边界作用, 不再反射回地层中。起爆 12 ms 时, 炮孔上侧地层中, 尚未到达地表的爆破波与经地表反射的爆破波发生干涉, 在近地表附近局部区域干涉相消, 波速为 0。

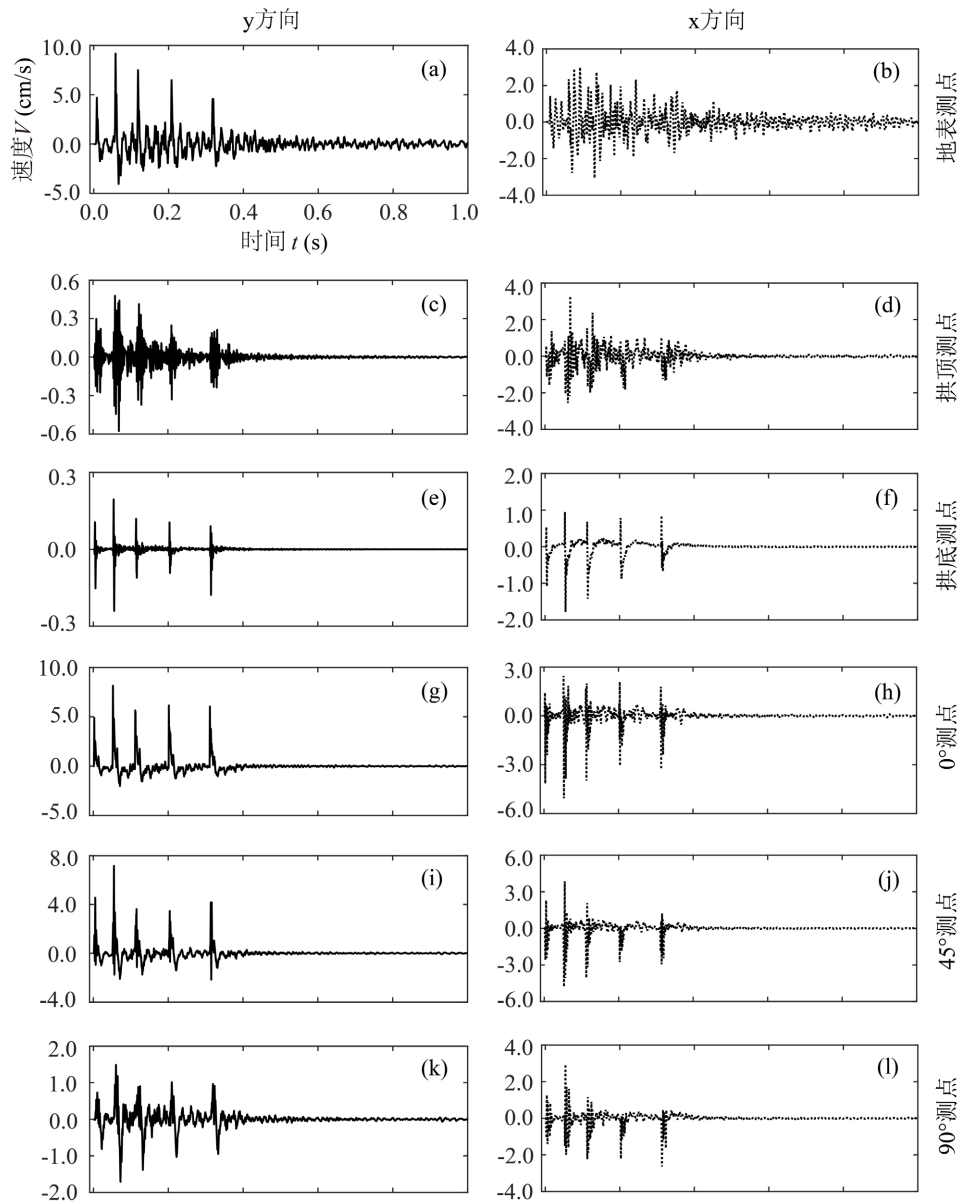


Figure 6. Typical temporal variation of the velocities at the monitoring points on each monitoring line
图 6. 各测线测点典型速度时程曲线

各测线典型测点速度时程曲线如图 6 所示。地表测线选取距爆心水平距离为 0 的测点, 其余测线均选取爆心距/距爆心水平距离为 10 m 的测点。各段起爆产生的爆破波并无明显叠加, 与张庆松等[22]介绍

的减震技术相符,即微差爆破时,应不使后一段爆破波与本段叠加,将下一段起爆时间控制在本段余相结束后。根据监测结果,各段起爆后质点振动速度迅速达到峰值,而后持续振荡一段时间,且振幅逐渐衰减。由于第1段为单孔起爆,质点峰值振动速度最小,第2段为双孔起爆,且两炮孔间距最小,因此质点峰值振动速度最大。由于地层界面及地表对爆破波的散射作用,地表附近爆破波尾波振幅较大,且持续时间较长。

各测线质点峰值振动速度(V_{peak})随爆心距/距爆心水平距离的衰减情况如图7所示。地表附近,距爆心水平距离-5 m处y方向质点峰值振动速度($V_{y\text{-peak}}$)最大,并向两侧逐渐衰减。而x方向质点峰值振动速度($V_{x\text{-peak}}$)在距爆心水平距离15 m处最大,通过图5(i)可知,地层界面散射的爆破波与地表反射的爆破波在该测点附近叠加,因此该点处质点峰值振动速度最大。隧道拱顶及拱底处, $V_{x\text{-peak}}$ 在0~15 m范围内衰减较快,而后衰减趋势减缓。而 $V_{y\text{-peak}}$ 在0~5 m范围内迅速衰减至较低值,而后在极小的速度范围内变化。通过将拱顶测线与拱底测线监测结果进行对比可以发现,地层界面散射及地表反射使拱顶测线质点峰值振动速度随距离的衰减曲线出现波动,从而导致两测线质点峰值振动速度衰减规律的显著差异。此外爆破波在地层内部不同方向上衰减规律有所差异。 0° 测线 $V_{y\text{-peak}}$ 随爆心距的增加在5~10 m迅速衰减,10~20 m缓慢衰减,而在近地表的测点(爆心距23 m)处增大,近地表附近爆破振动的局部增大主要由于地表附近缺少约束,且凸形地貌由于入射波和反射波的叠加效应对爆破振动具有放大效应[15][23]。唐海等[24]通过现场实验发现,凸形地貌对爆破振动波的放大效应具有方向性,垂直向的放大效应大于水平向,图7(d)中也观察到相似的现象。 45° 测线与 90° 测线x方向衰减规律相似, $V_{x\text{-peak}}$ 在0~10 m范围内迅速衰减,而后缓慢衰减。 45° 测线 $V_{y\text{-peak}}$ 在0~15 m范围内呈线性衰减,并在靠近地表附近略有增大。

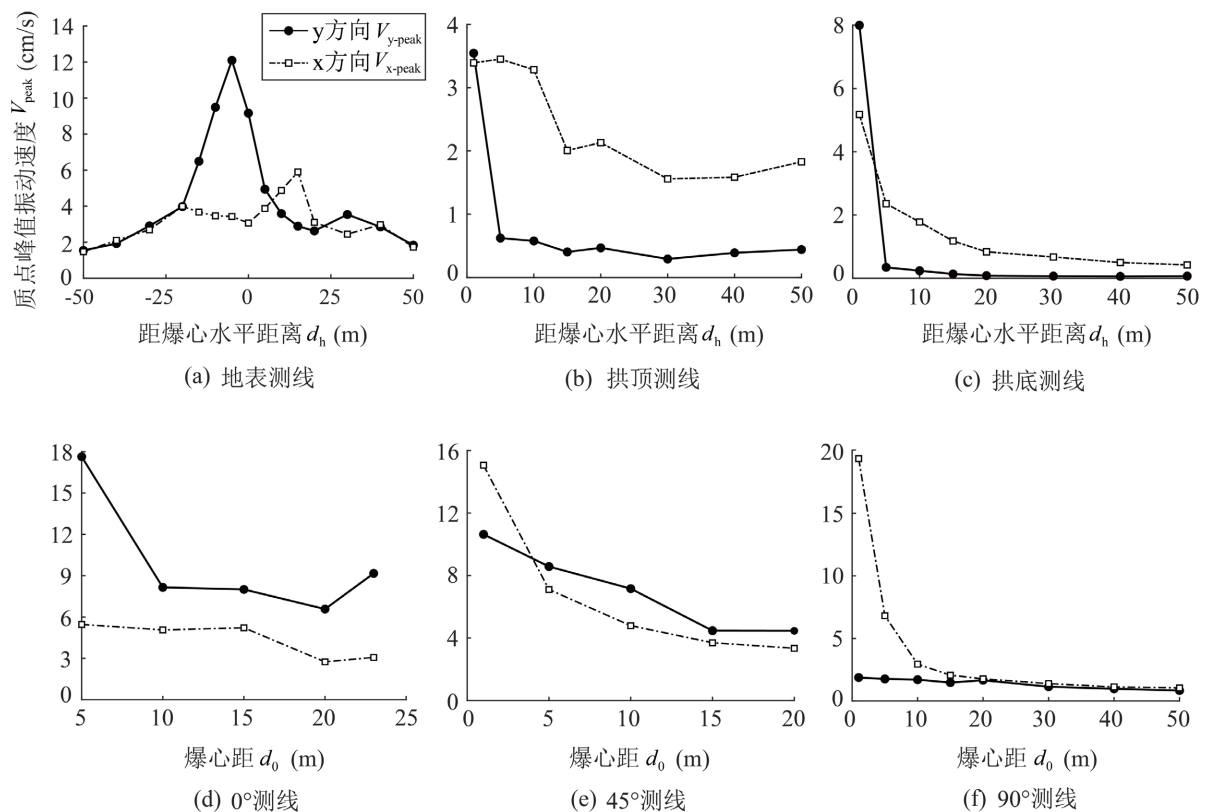


Figure 7. The attenuation of the peak velocity of the points on the monitoring line with distance

图7. 各测线质点峰值振动速度随距离的衰减

质点 - 爆心连线与爆破荷载施加方向夹角 θ 对质点主振动方向的影响如图8所示, 已知爆破荷载沿y轴方向作用在炮孔壁上。图8(a)描述了质点主振动方向峰值振动速度 $\max\{V_{y\text{-peak}}, V_{x\text{-peak}}\}$ 随 θ 的变化情况, 可知质点主振动方向与 θ 表现出明显的相关性。 $\theta \in [0, 22]$ 时, 质点以y方向(即爆破荷载施加方向)为主振动方向; $\theta \in [47, 90]$ 时, 质点以x方向(即垂直于爆破荷载施加方向)为主振动方向; 且存在一过渡区 $\theta \in (22, 47)$, 在此区域内, x与y均可能成为质点的主振动方向。需要指出的是, $\theta \in [47, 90]$ 范围内, 仍有部分测点以y方向为主振动方向, 但这部分测点x与y方向质点峰值振动速度相差较小, 即 $|V_{y\text{-peak}} - V_{x\text{-peak}}| < 1.5 \text{ cm/s}$, 如图8(b)所示。

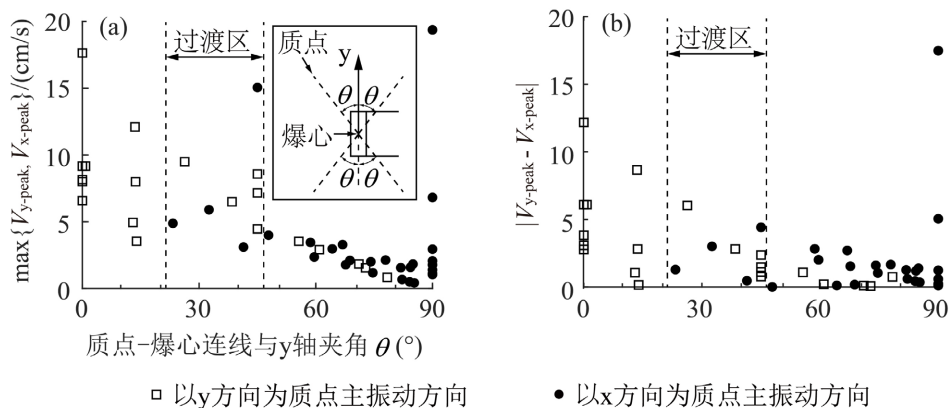


Figure 8. The influence of the intersection angle θ between the point-explosion center line and the direction of blasting loads on the main vibratory direction

图8. 质点 - 爆心连线与爆破荷载施加方向夹角 θ 对质点主振动方向的影响

4.2. 模拟结果与现场监测结果对比分析

施工现场采用 iSensor 三轴振动智能传感器及其配套的 iMS 专用采集和分析软件完成测点振动速度的测量和保存。将 iSensor 传感器安装于左右拱脚处, 首先用膨胀螺丝将角铁框与隧道初衬侧壁刚性连接, 通过设备底部 M5 粗口螺丝固定设备在角铁框内, 并加装保护盒以防止爆破产生的飞石砸坏传感器。将现场监测结果与模拟结果整理于图9中, 并对现场监测数据点采用式(1)进行拟合。

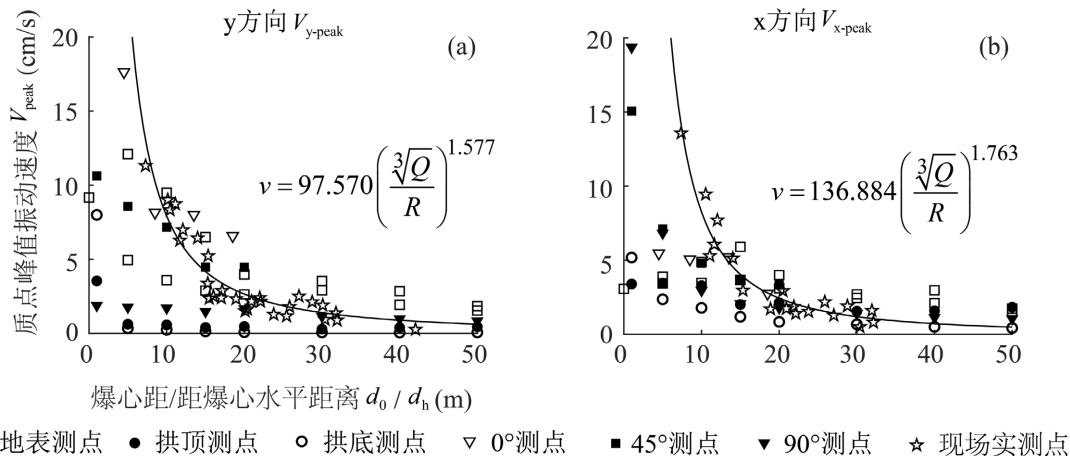


Figure 9. Comparison of the numerical simulation results with the field monitoring results

图9. 模拟结果与现场监测结果对比

由图9可知,在距爆心不同位置处,y方向质点峰值振动速度 $V_{y\text{-peak}}$ 的现场监测结果均在模拟结果范围内,而x方向质点峰值振动速度 $V_{x\text{-peak}}$ 在7~12 m范围内的现场监测结果高于模拟结果。需要说明的是:1) 掌子面爆破产生的能量除了以应力波的方式在岩体中传播外,炸药的爆轰作用和爆破产生的飞石会引发空气波动从而产生空气波,而当前的数值模型无法捕捉作用于拱顶和拱底衬砌的空气波,导致拱顶及拱底测线监测结果相较于实测结果偏低(尤其是 $V_{x\text{-peak}}$),通过现场监测数据弥补了数值模型的不足。2) 由3.1节可知,不同测线的爆破波衰减规律并不相同,仅用一组衰减系数 K 与衰减指数 α 无法表征爆破波在整个地层中的传播与衰减。

白芒河引排水隧道采用对向同步施工策略,钻爆法施工段为隧道出口,进口段所在区域地层较差,选用盾构机掘进施工。同时,址区地表有少量民房存在。因此,本工程重点关注爆破振动对爆破段隧道初衬、地表民房及对向盾构施工的影响。需要注意的是,萨氏公式对于爆源和监测点在同一水平面预测较为准确,而当爆源与监测点存在高程差时往往预测精度较低,需参考考虑高程差影响的萨氏公式[12]:

$$v = k \left(\sqrt[3]{Q}/r \right)^{\beta_1} (r/H)^{\beta_2} \quad (14)$$

式中, k 为场地影响系数, r 为质点距爆心水平距离, β_1 为衰减系数, β_2 为与高程差有关的影响系数。同一水平面上,质点峰值振动速度随质点距爆心水平距离 r 的衰减规律可退化为萨氏公式初始形式:

$$\left. \begin{aligned} v &= K \left(\sqrt[3]{Q}/r \right)^{\alpha} \\ \alpha &= \beta_1 - \beta_2 \\ K &= k \left(\sqrt[3]{Q}/H \right)^{\beta_2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

忽略地表起伏,根据现场监测和数值模拟结果,参考式(15)给出地表、掌子面前方及洞室内壁爆破振动的衰减系数 K 和衰减指数 α 建议值,并根据《爆破安全规程》中爆破振动安全允许标准给出安全距离的建议值,如表3所示。

Table 3. Recommended values for attenuation factor, attenuation index and safety distance

表 3. 衰减系数、衰减指数及安全距离建议值

	y 方向		x 方向		控制标准 V_{peak} (cm/s)	安全距离 r (m)
	K	α	K	α		
地表	106.12	1.325	--	--	1.0	62.81
					1.5	54.19
					2.0	46.31
掌子面前方	--	--	141.35	1.718	1.0	52.87
					1.5	27.56
					2.0	17.52
洞室内壁	97.57	1.577	136.884	1.763	1.0	37.48
					1.5	31.52
					2.0	26.38

注: --表示爆破波在该振动方向衰减规律不符合萨氏公式。

5. 施工建议

采用钻爆法进行岩石隧道施工时, 爆破产生的爆破波在岩体中的传播具有方向性和不可逆性, 减小爆破振动对周围环境的影响, 通常可以从爆源、传播路径和保护对象三个方面入手, 而最为常见和有效的方法是对爆源采取减震措施, 从而降低其对周围环境的影响。针对白芒河引排水隧道钻爆法施工, 本文根据数值模拟和现场监测内容进行如下建议: 1) 在距对向盾构段掌子面 80~50 m 范围, 逐渐降低爆破长度, 保证盾构段质点峰值速度低于 1.0 cm/s, 尽量降低爆破施工对盾构段管片、机械设备和人员的影响; 2) 适当减小单孔最大装药量, 这是控制爆破振动强度的最有效手段; 3) 优化药孔内装药结构, 选用间隔装药方式, 以延长爆炸产生气体的作用时间和降低爆炸对围岩的影响。采用该建议后, 白芒河引排水隧道钻爆法施工段爆破施工过程中未对周围建构筑物和对向盾构机及隧道衬砌造成破坏, 隧道顺利于 2021 年 8 月 29 日贯通。

此外, 针对同类型工程, 还可对微差延时设计参数、炮孔结构和爆破方向等进行优化, 并结合预裂孔爆破、开挖减震沟和减震槽等被动减震措施来进一步降低爆破对于周围环境及保护对象的影响。

6. 结论

本文以深圳白芒河引排水隧道钻爆施工段爆破工程为背景, 利用离散单元法模拟爆破波在地层中的传播规律, 并与现场监测数据进行对比分析, 研究发现:

1) 爆破波整体上呈现出在爆心附近衰减较快, 随着爆心距的增加, 衰减趋势减缓的特征。由于地层交界面对爆破波的散射及地表对波的反射, 引起地层中局部质点峰值振动速度增大。地层内部不同方向上爆破波的衰减规律差异明显。

2) 爆破荷载沿 y 轴方向作用在炮孔壁上, 质点主振动方向受质点 - 爆心连线与爆破荷载施加方向夹角 θ 的影响, $\theta \in [0, 22]$ 时, 质点以 y 方向为主振动方向, $\theta \in [47, 90]$ 时, 质点以 x 方向为主振动方向, 且存在一过渡区 $\theta \in (22, 47)$, 在此区域内, x 与 y 均可能成为质点的主振动方向。

3) 模拟结果与现场监测结果较为相符, 并通过现场监测数据弥补了数值模型的不足。结合模拟结果及监测数据, 给出地表、掌子面前方及洞室内壁三个部位爆破振动衰减系数、衰减指数及安全距离的建议值。

参考文献

- [1] 钱正富, 徐金峰, 周应新, 周彪, 谢雄耀. 红层软岩无中导洞连拱隧道爆破振动控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3): 167-174+188.
- [2] 关振长, 朱凌枫, 俞伯林. 隧道掘进排孔爆破的精细化数值模拟[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 154-162.
- [3] Salum, A.H. and Murthy, V.M.S.R. (2019) Optimising Blast Pulls and Controlling Blast-Induced Excavation Damage Zone in Tunnelling through Varied Rock Classes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **85**, 307-318. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.029>
- [4] 朱利明, 吴志强, 邢世玲, 苗宁宁. 隧道爆破开挖施工对古建筑振动速度的影响[J]. 建筑结构, 2019, 49(10): 26-29.
- [5] Zhou, J., Luo, Y., Li, X.P., Guo, Y. and Liu, T. (2017) Numerical Evaluation on Dynamic Response of Existing Underlying Tunnel Induced by Blasting Excavation of a Subway Tunnel. *Shock and Vibration*, **2017**, Article ID: 8628671. <https://doi.org/10.1155/2017/8628671>
- [6] Duan, L., Lin, W., Lai, J., Zhang, P. and Luo, Y. (2019) Vibration Characteristic of High-Voltage tower Influenced by Adjacent Tunnel blasting Construction. *Shock and Vibration*, **2019**, Article ID: 852056. <https://doi.org/10.1155/2019/8520564>
- [7] 雷明锋, 张运良, 彭立敏. 城市小间距交通隧道爆破安全监测及结果分析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(1): 61-64+69.
- [8] 王源, 刘松玉, 谭跃虎, 毕佳, 王冰, 段建立, 等. 九华山隧道爆破施工对明城墙振动影响的监测与分析[J]. 岩

- 石力学与工程学报, 2007(z1): 3584-3589.
- [9] Kuzu, C. (2007) The Mitigation of the Vibration Effects Caused by Tunnel Blasts in Urban Areas: A Case Study in Istanbul. *Environmental Geology*, **54**, 1075-1080. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0875-7>
- [10] Ramulu, M., Chakraborty, A.K. and Sitharam, T.G. (2009) Damage Assessment of Basaltic Rock Mass Due to Repeated blasting in a Railway Tunnelling Project: A Case Study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**, 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.08.002>
- [11] 李清, 马润东, 周睿, 徐文龙, 高正华, 霍树森. 大断面高铁隧道掘进爆破振动传播规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 27-33.
- [12] 王超, 周传波, 路世伟, 陈思远, 吴超. 城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 158-162.
- [13] 毕卫国, 石崇. 爆破振动速度衰减公式的优化选择[J]. 岩土力学, 2004(S1): 99-102. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2004.s1.024>
- [14] 唐海, 石永强, 李海波, 李俊如, 王晓炜, 蒋鹏灿. 基于神经网络的爆破振动速度峰值预报[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(z1): 3533-3539.
- [15] 唐海. 地形地貌对爆破振动波影响的实验和理论研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007.
- [16] Itasca Consulting Group, Inc. (2020) UDEC (Universal Distinct Element Code) User's Manual, Version 7.0. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- [17] 刘亚群, 李海波, 李俊如, 周青春, 刘广胜. 爆破荷载作用下黄麦岭磷矿岩质边坡动态响应的 UDEC 模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3659-3663.
- [18] 夏祥, 李俊如, 李海波, 刘亚群, 周青春. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 50-56.
- [19] 张宝刚, 麻歆, 李昊, 王军华, 王璐. 盾构隧道穿越地层断裂带稳定性与加固效果研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(4): 411-426. <https://doi.org/10.12677/AG.2022.124043>
- [20] 余红燊. 城市浅埋暗挖车站下穿既有建筑物控制爆破减震技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [21] Zeng, G., Li, N. and Swobods, G. (1991) Blasting Induced Vibrations in Discontinuous Rock. *Proceeding of the 7th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Australia.
- [22] 张庆松, 李利平, 李术才, 丁万涛, 洪卫良. 小间距隧道爆破动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2655-2660+2666.
- [23] 郭学彬, 肖正学, 张志呈. 爆破振动作用的坡面效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(1): 83-87.
- [24] 唐海, 马谕杰, 夏祥, 朱帅帅, 姜威振. 负高差地形爆破振动规律研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(5): 16-25. <https://doi.org/10.19931/j.EB.20200181>