

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0324

下穿铁路隧道爆破振动衰减规律研究*

单仁亮¹, 赵岩¹, 王海龙^{1,2}, 董捷², 仝潇¹, 李兆龙¹, 王东升¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 河北建筑工程学院河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要: 基于 Heelan 短柱药包理论, 引入等效作用半径的概念, 得到内部瞬时激励荷载作用下爆破峰值振动速度的衰减模型方程, 并通过量纲分析进行验证。结合下穿隧道爆破工程, 研究不同雷管段位及不同炮孔类型对应的爆破峰值振动速度的衰减规律。此外, 讨论球形装药、柱状装药条件下改进公式的药量形式表达式, 结果显示, 利用等效作用半径作为拟合参考变量可以综合考虑不同雷管段位及不同炮孔类型对爆破振动规律的影响。统计数据表明, 利用改进公式得到的拟合效果最优, 可以为类似隧道爆破振动研究提供参考。

关键词: 爆破峰值振动速度; 衰减模型; 铁路隧道; Heelan 短柱药包理论; 量纲分析; 拟合效果

中图分类号: O389; TU751.9

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

Attenuation of blasting vibration in a railway tunnel

SHAN Renliang¹, ZHAO Yan¹, WANG Hailong^{1,2}, DONG Jie², TONG Xiao¹, LI Zhaolong¹, WANG Dongsheng¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Hebei Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance,

Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: In order to deeply explore the propagation and attenuation law of column charge blasting stress waves or seismic waves, and to improve the prediction model of the blasting peak vibration velocity, a theoretical study on the blasting peak vibration velocity was carried out. First of all, based on the Heelan short-column charge theory, the concept of the equivalent radius of action was introduced, and the attenuation equation for the blasting peak vibration velocity under the action of the internal instantaneous excitation load was obtained. Then, the concepts of the equivalent action radius and equivalent blasting load were applied to the theoretical derivation of the blasting peak vibration velocity. The attenuation laws of the blast-induced vibration in cutting hole sections and non-cutting hole sections were studied, respectively. Finally, based on the dimensional harmony theorem, the reliability and universality of the attenuation model were verified. Combined with an example of tunnel blasting project, the attenuation laws of the blasting peak vibration velocities corresponding to different segments of detonators and different types of blast holes were studied. The results show that the improved formula can well fit the peak velocities of the above two types of blasting vibrations, which can accurately reflect the transmission law of the tunnel blasting vibration. In addition, the expressions of the charge form of the improved formula under the conditions of spherical charge and columnar charge were discussed, and the prediction effects of various fitting models were compared. The comparison results show that using the equivalent radius of action as a fitting reference variable can comprehensively consider the influence of different detonator positions and different blast hole types on the blasting vibration attenuation law. The reference variables of the statistical data show that the fitting effect obtained by the improved formula is the best, which can provide a reference for similar research of tunnel blasting vibration.

* 收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(51878242); 河北省自然科学基金(E2020404007)

第一作者: 单仁亮(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, srl@cumtb.edu.cn

通信作者: 赵岩(1991—), 男, 博士研究生, zhaoyanlyp@163.com

Keywords: blasting peak vibration velocity; attenuation equation; railway tunnel; Heelan short-column charge theory; dimensional analysis; fitting effect

随着交通基础设施建设的迅猛发展, 地下空间利用率显著增长, 因建筑物分布密集, 公路、铁路隧道不可避免地会穿越村庄、城镇及既有干线等^[1-2]。钻孔爆破作为山岭隧道破岩掘进的主要方式, 诱发的爆破振动会对周边构筑物产生不利影响。因此, 研究岩石诱发的爆破振动衰减规律对周边构筑物的使用安全性, 具有重要意义^[3-4]。

目前, 研究大多以爆破峰值振动速度为指标、结合振动频率及持续作用时间进行评价, 并通过现场实测及数值模拟的方式对爆破振动响应特征展开研究^[5-7]。Yu 等^[8]利用相似模拟实验, 研究节理弱面对爆破振动传递的影响: 随着爆破振动传播路径上节理数量的增多, 爆破地质参数 k 及衰减参数 α 均呈增大的趋势; 此外, 节理弱面的存在会增加爆破振动能量中高频部分的比重。朱正国等^[9]深入研究总装药量对爆破振动强度的影响, 结果证实爆破振动强度与装药量及比例距离之间存在某种线性关系。Qin 等^[10]发现三台阶预留核心土开挖方法可以有效控制既有地铁隧道的爆破振动, 并通过 ANSYS/LS-DYNA 软件对实测结果进行了数值模拟验证。Jiang 等^[11]依托地铁隧道下穿工程, 研究地铁爆破振动对既有燃气管道的影响, 通过量纲分析得到反映管道正上方地面振动速度的物理方程, 基于第四强度准则计算了不同管道运行压力作用下运输管道的振动速度安全阈值。Lu 等^[12]通过现场实测及数值分析的方法, 研究了临空自由面数量对爆破振动衰减规律的影响: 1 个自由面的爆破振动速度远大于 2 个或 3 个自由面的爆破振动速度, 由数值计算得知, 1 个自由面的最大单响药量与 2 个自由面的最大单响药量的比小于 0.79 时, 爆破振动效果相近。刘彦涛^[13]则利用最小二乘拟合及数值模拟, 对隧道爆破振动信号特征进行研究, 详细划分了爆破振动的影响区域。

综上所述, 对爆破振动效应的研究大多通过现场实测或数值模拟的方式进行, 但针对爆破振动效应的理论分析很少见。爆破振动效应的理论研究对探讨爆炸应力波的传播规律, 有效控制爆破损伤均具有重要的意义。本文中, 首先, 依托下穿隧道爆破工程实例, 基于 Heelan 短柱药包理论的波动方程解析解, 推导适用于隧道爆破振动速度的衰减模型方程; 然后, 通过量纲分析对其进行验证; 最后, 分别讨论爆破振动拟合方程的两种药量表达形式, 对比不同拟合方法的预测效果。

1 理论分析

爆破施工过程中, 爆破振动能量以应力波的形式向外界传播。受爆源特征、围岩力学性质、地形地质条件等影响, 不同工程条件下的爆破振动衰减规律存在差异, 从应力波传递的角度出发研究爆破振动速度的演化规律是可行的。

由文献 [14] 可知: 目前, 通常通过萨道夫斯基公式和 USBM 模型, 拟合爆破峰值振动速度; 同时, 也采用印度标准协会标准、Langefors 等经典方法预测爆破振动速度。

表 1 为常用爆破峰值振动速度经验公式^[14]。表中, v_{\max} 为爆破峰值振动速度 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), R 为爆心距 (m), Q 为最大单响药量 (kg), k 、 n 、 β 、 α 为相关拟合参数。

以上经验公式中, 均只考虑了爆心距和装药量, 并未反映装药半径、钻孔半径、炮眼布置方式及岩体力学性质等对振动速度的影响^[15-17]。为此, 基于短柱药包激发的波动解析解, 本文中主要研究远场爆破振动强度的衰减规律, 并通过量纲分析进行验证。

表 1 爆破峰值振动速度的经验公式^[14]

Table 1 Prediction formulas of blasting peak vibration velocity^[14]

模型	公式
Sadov's formula	$v_{\max}=k(Q^{1/3}/R)^{\alpha}$
USBM	$v_{\max}=k(Q^{1/2}/R)^{\alpha}$
Indian Institute of Standards	$v_{\max}=k(Q/R^{2/3})^{\alpha}$
Langefors, et al	$v_{\max}=k(Q/R^{2/3})^{\alpha/2}$
Ghosh, et al	$v_{\max}=k(Q^{1/3}/R)^{-\alpha}e^{-\beta R}$
Roy	$v_{\max}=kQ^{1/2}/R+n$
Gupta, et al	$v_{\max}=k(Q/R^{3/2})^{\alpha/2}e^{-\beta R}$

1.1 爆破振动衰减

当爆心距大于柱状药包的长度及应力波波长时, 可以将柱状装药简化为短柱药包的瞬时起爆。基于此, Heelan 等通过理论推导得到短柱空腔在瞬时内部荷载激励下远场低频波动的解析解^[18]。

如图 1 所示, 设内部瞬时激励荷载 $p_0 f(t)$ 作用在长 dL 、半径 r_b 的短圆柱空腔内壁, 则位移场为:

$$u_p = \frac{r_b^2 p_0 dL}{4G c_p R} \left(1 - \frac{c_s}{c_p} \cos^2 \theta \right) \frac{\partial f(t - (L - L_1)/D - R/c_p)}{\partial t} \quad (1)$$

$$u_s = \frac{r_b^2 p_0 \sin \theta \cos \theta dL}{2R G c_s} \frac{\partial f(t - (L - L_1)/D - R/c_s)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: u_p 为由压缩波(P波)引起的位移, u_s 为由剪切波(S波)引起的位移, p_0 为炮孔初始爆轰压力, $f(t)$ 为与激励荷载相关的时间函数, t 为作用时间, G 为岩石的剪切模量, c_p 、 c_s 分别为 P 波、S 波的传播速度, D 为爆轰波的传播速度, R 为爆心距, L_1 、 L_2 分别为 L 的计算上下限, $[0, L]$ 为瞬时荷载作用位置坐标。

由图 1, 短柱药包爆炸激发的径向位移 u_r 、竖向位移 u_z 分别为:

$$\begin{cases} u_r = u_p \sin \theta + u_s \cos \theta \\ u_z = -u_p \cos \theta + u_s \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

那么, 瞬时荷载激发的径向速度 v_r 、竖向速度 v_z 分别为:

$$v_r = \partial u_r / \partial t, \quad v_z = \partial u_z / \partial t \quad (4)$$

由文献 [19-20], S 波为爆破近区的主导波, 而 P 波在爆破近区及爆破远区均为其重要组成部分。本文中, 因主要考虑远区的爆破振动传播规律, 仅计算由 P 波诱发的爆破峰值振动速度:

$$v_p = \frac{k_1 p_0 dL}{\rho c_p R} \quad (5)$$

式中: ρ 为岩石密度, k_1 为计算待定系数。那么, 由短柱药包引起的爆破峰值振动速度为:

$$v = \int_L v_p ds \quad (6)$$

简化式 (6), 可得:

$$v = k_2 \frac{r_b}{R} \frac{p_0}{\rho c_p} \quad (7)$$

式中: k_2 为计算待定系数。

实际岩体具有黏弹性, 且具有一定的阻尼性质, 则岩体的爆破振动衰减方程修正为^[21]:

$$v = k_3 \left(\frac{r_b}{R} \right)^\alpha \frac{p_0}{\rho c_p} \quad (8)$$

式中: k_3 、 α 为计算待定系数。炮孔壁上振动峰值速度为^[21]:

$$v_0 = \frac{p_0}{\rho c_p} \quad (9)$$

则式 (8) 可简化为:

$$v = k \left(\frac{r_b}{R} \right)^\lambda v_0 \quad (10)$$

式中: k 为与场地条件有关的系数, λ 为衰减系数。

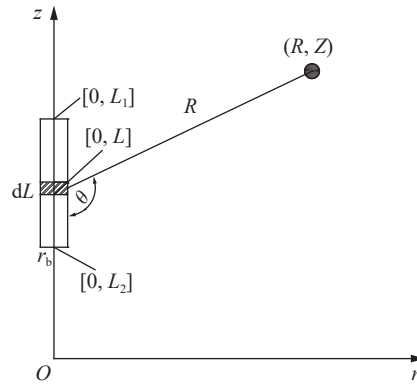


图 1 短柱瞬时荷载作用

Fig. 1 The instantaneous load action of a short column

1.2 改进拟合公式

由文献 [21], 式 (10) 适用于单孔爆破。隧道爆破工程中, 往往采用多孔多段起爆, 单孔爆破较少见。为此, 本文中试图寻求一种适用于隧道爆破的等效解决方法。

1.2.1 等效作用边界

根据应力状态的差异, 爆源附近的岩体可划分为粉碎区、破碎区和弹性振动区。实际爆破振动测试往往位于弹性振动区, 位于这个区域的岩体可以近似为弹性体, 而位于粉碎区和破碎区中的岩体受爆炸应力波破坏严重, 不能简单视为弹性体, 可以将非弹性区外边界视为爆破荷载等效作用边界^[22-23]。

柱状装药条件下, 粉碎区半径 r_1 和破碎区半径 r_2 分别为^[23]:

$$r_1 = \left(\frac{\rho c_p^2}{5\sigma_c} \right)^{1/2} \left(\frac{p_0}{\sigma^*} \right)^{1/4} r_b \quad (11)$$

$$r_2 = \left(\frac{\mu p_0}{(1-\mu)\sigma_t} \right)^{1/\beta} r_b \quad (12)$$

式中: σ_c 、 σ_t 分别为岩石的动单轴抗压强度、动单轴抗拉强度, σ^* 为多向应力条件下的岩体动抗压强度, p_0 为炮孔初始爆轰压力, β 为传播衰减系数, $\beta=(2-\mu)/(1-\mu)$, μ 为岩石的泊松比。通常, 粉碎区半径为装药半径的 3~5 倍, 破碎区半径为装药半径的 10~15 倍^[22]。

不考虑炮孔之间的相互作用时, 每个掏槽孔起爆可近似看作一个短圆柱空腔在半无限介质中受内部瞬态荷载的作用, 将掏槽段起爆的等效作用边界近似为多孔爆破破碎区的包络线是可行的。辅助孔、崩落孔、周边孔及底板孔等非掏槽孔则通过贯通相邻炮孔的轴线来破坏抛掷岩石, 可以将其形成的临空面近似为等效作用边界。这里, 定义 r_d 为等效作用边界半径。图 2 为掏槽孔爆破的等效作用边界示意图。

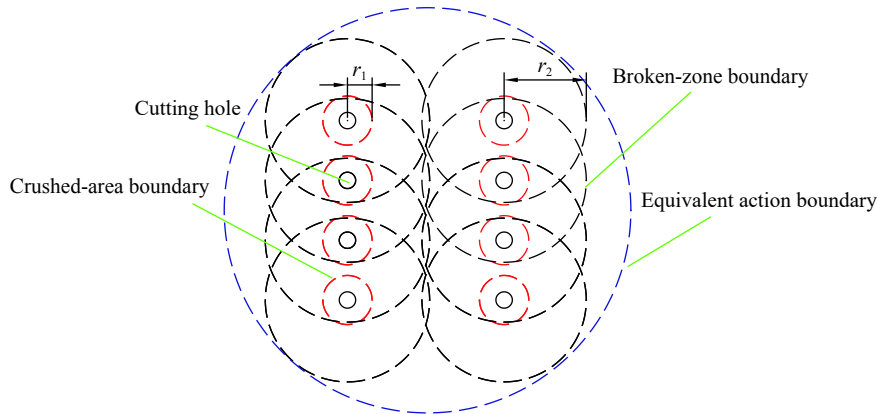


图 2 掏槽孔等效作用边界

Fig. 2 The equivalent boundary of cutting hole blasting

1.2.2 等效荷载

根据凝聚装药爆轰波 CJ 理论, 耦合装药时, 炮孔壁上的初始爆轰压力 p_0 为:

$$p_0 = \frac{\rho_c D^2}{2(\gamma+1)} \quad (13)$$

当不耦合系数较小时, 炮孔壁上的初始爆轰压力为:

$$p_0 = \frac{\rho_c D^2}{2(\gamma+1)} \left(\frac{d_a}{d_b} \right)^{2\gamma} \quad (14)$$

当不耦合系数较大时, 爆生气体膨胀则需要经过两个过程: $p_0 \geq p_e, p_0 < p_e$ 。按照分段函数方式, 可以得到:

$$\gamma = \begin{cases} 3 & p_0 \geq p_e \\ v = \frac{4}{3} & p_0 < p_e \end{cases} \quad (15)$$

$$p_0 = \left(\frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} \right)^{v/\gamma} \left(\frac{d_a}{d_b} \right)^{2\gamma} p_e^{(\gamma-v)/\gamma} \quad (16)$$

式中: ρ_e 为炸药密度, γ 为炸药的等熵系数, d_a 、 d_b 分别柱状药卷、炮孔的直径, v 为爆生气体的等熵系数, p_e 为爆生气体的临界压力, 取为 200 MPa。

单个炮孔对应的等效爆破荷载 p_d 随爆心距 R 的变化为:

$$p_d = p_0 \left(\frac{R}{r_b} \right)^{-\alpha} \quad (17)$$

式中: α 为荷载传播指数。在粉碎区, $\alpha=2+\mu/(1-\mu)$, 在破碎区, $\alpha=2-\mu/(1-\mu)$ 。

考虑掏槽段多个炮孔同时起爆对等效爆破荷载的影响, 多孔同时起爆的爆炸荷载影响因数 η 为:

$$\eta = n \left(\frac{r_2}{r_d} \right)^2 \quad (18)$$

式中: n 为掏槽段炮孔的个数。

那么, 掏槽段对应的等效爆破荷载为:

$$p_d = \eta p_0 \left(\frac{r_1}{r_b} \right)^{-2-\mu/(1-\mu)} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{-2+\mu/(1+\mu)} \quad (19)$$

而对辅助孔、周边孔等非掏槽孔(见图 3), 可将爆破荷载等效作用在炮孔中心线与炮孔轴

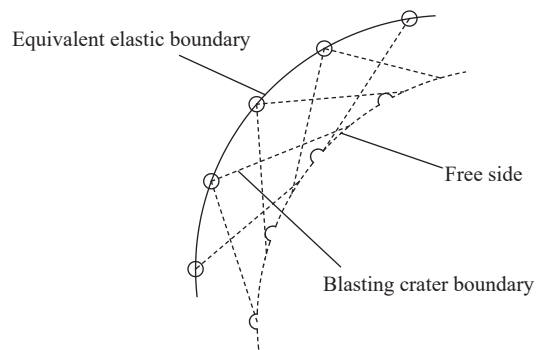


图 3 等效边界^[23]

Fig. 3 The equivalent elastic boundary^[23]

线所在的平面上, 等效荷载为^[23]:

$$p_d = 2p_0 \frac{r_b}{s} \quad (20)$$

式中: s 为相邻炮孔的距离。

与经验公式相比, 引入等效作用边半径 r_d 和等效作用荷载 p_d 替代 r_b 和 p_0 , 可体现炸药特性、装药半径及炮孔布置等条件, 更贴近工程实际。

综上所述, 改进的爆破峰值振动速度衰减方程为:

$$\begin{cases} v_0 = \frac{p_d}{\rho c_p} \\ v = k \left(\frac{r_d}{R} \right)^\lambda v_0 \end{cases} \quad (21)$$

1.3 量纲分析

为了验证式 (21) 的可行性, 且不失一般性, 利用量纲分析, 推导隧道爆破峰值振动速度的衰减方程。

选择岩体密度 ρ 、纵波传播速度 c_p 、爆心距 R 、岩体弹性模量 E 、等效作用半径 r_d 作为影响爆破振动速度的主要影响因素, 并选取 c_p 、 R 、 ρ 作为独立量纲进行量纲分析:

$$v = \varphi(\rho, c_p, R, r_d, E) \quad (22)$$

根据 Π 定理, 式 (22) 可以由 3 个无量纲数表示:

$$\pi_1 = \frac{v}{c_p}, \quad \pi_2 = \frac{r_d}{R}, \quad \pi_3 = \frac{E}{c_p^2 \rho} \quad (23)$$

则式 (22) 可以转换为:

$$\frac{v}{c_p} = \psi \left(\frac{E}{c_p^2 \rho}, \frac{r_d}{R} \right) \quad (24)$$

根据量纲和谐定理, 可得:

$$\frac{v}{c_p} = K \left(\frac{E}{c_p^2 \rho} \right)^\alpha \left(\frac{r_d}{R} \right)^\beta \quad (25)$$

针对特定工程, 可设围岩弹性模量、纵波传播速度、岩体密度均为定量, 则式 (25) 可以转换为:

$$v = K \left(\frac{r_d}{R} \right)^\omega \quad (26)$$

式中: K 为待定参数。可见, 式 (26) 与式 (21) 具有相同的形式, 验证了改进公式的可行性。

2 工 程

2.1 工程背景

以崇礼铁路工程中隧道爆破工程为例。隧道起止里程分别为 DK62+310、DK67+800, 全长 5 490 m, 洞身大段、山势陡峭, 地貌单元属于中低山区, 整体地形呈中间高、两侧低, 地势起伏较大。地质勘探显示, 隧道地层岩性主要为第四系全新统人工填土, 第四系上更新统坡洪积层新黄土、砾石土、卵石土及碎石土。主要岩性有粗面岩、流纹岩、凝灰质砾岩、粗面安山岩和斜长片麻岩等。隧道主洞部分区域下穿既有村庄, 下穿区域内隧道围岩设计为 III 级, 图 4 为下穿隧道平面地形图。

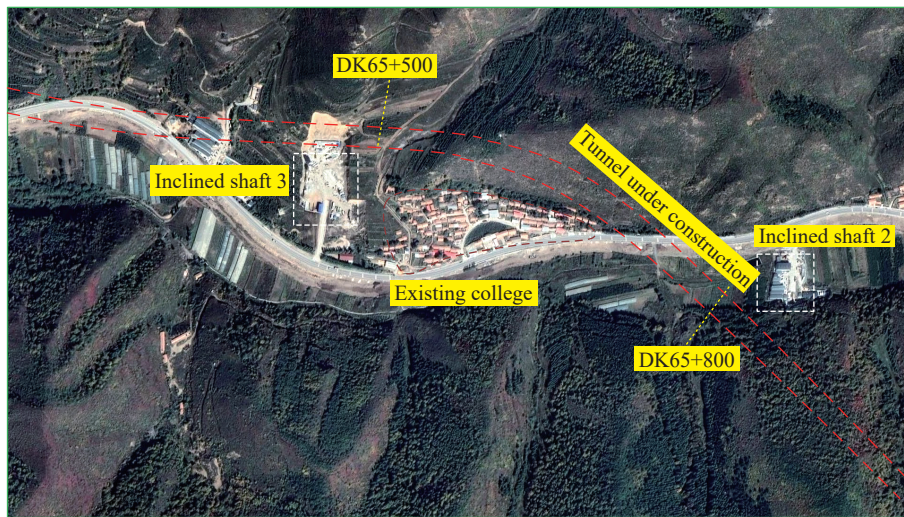


图 4 下穿隧道平面地形图

Fig. 4 Topographic map of the underpass section of the tunnel

2.2 施工方案

根据隧道的围岩等级、地质条件, 采用全断面法爆破掘进, 控制循环进尺为 2.8~3.6 m。围岩密度为 2 630 kg/m³, 纵波波速约为 4 500 m/s, 爆轰波波速约为 3 600 m/s。爆破施工采用 2#岩石乳化炸药, 炸药密度为 1 g/cm³, 药卷直径为 32 mm, 炮孔直径为 40 mm。根据循环进尺确定炮孔深度, 取范围为

3.5~4.5 m。掏槽孔单孔装药为 2.7 kg, 辅助孔单孔装药为 1.5~2.4 kg, 底板孔单孔装药为 2.1 kg, 周边孔单孔装药为 1.2 kg, 在施工中动态调整, 确定合理的装药量。采用电子数码雷管起爆, 它可以精准控制各段炮孔的起爆时间, 本文中利用数码雷管将各段雷管的起爆微差时间间隔控制为 50 ms。隧道爆破采用柱状不耦合装药, 填塞长度不小于 0.3 m。具体装药量情况见表 2。图 5 为隧道断面炮孔布置。

表 2 隧道爆破装药情况
Table 2 Charges for tunnel blasting

炮孔类型	炮孔深度/m	雷管段位	炮孔数量	单孔装药量/kg	总装药量/kg
掏槽孔	4.0	H1	16	2.7	43.2
辅助孔	3.5	H3	14	2.4	33.6
辅助孔	3.5	H5	17	1.8	30.6
辅助孔	3.5	H7	25	1.5	37.5
辅助孔	3.5	H9	30	1.5	45.0
周边孔	2.5	H11	25	1.2	30.0
底板孔	2.5	H13	2	2.1	4.2
合计			129		224.1

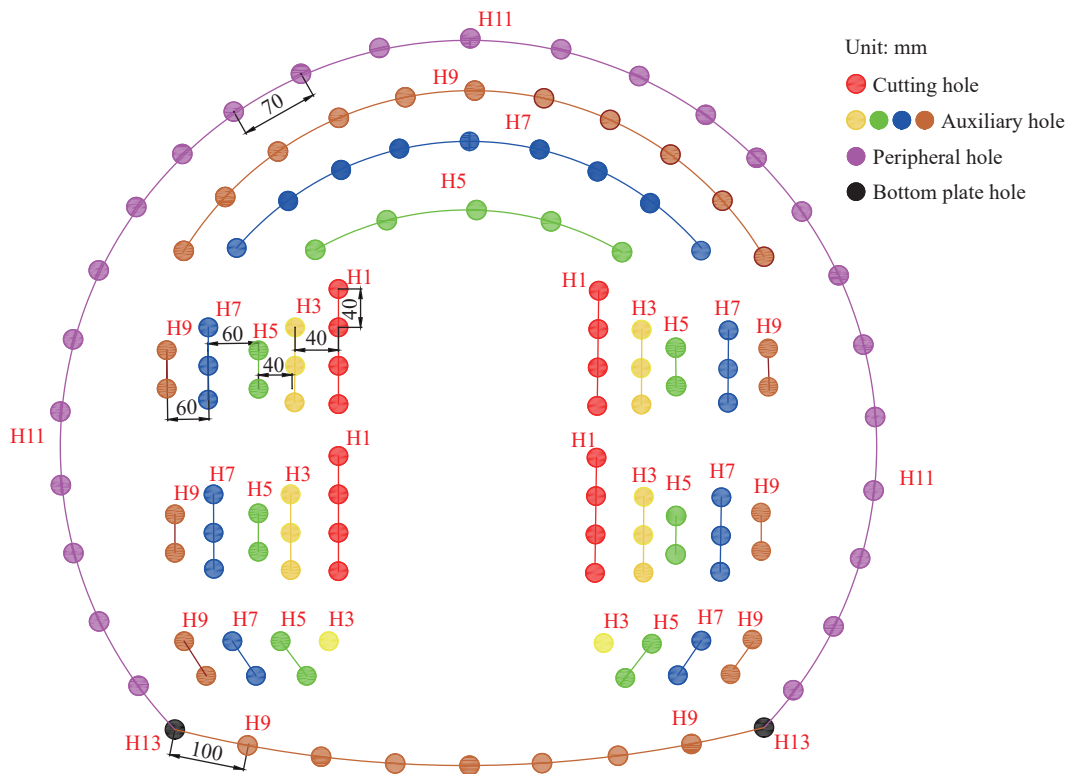


图 5 隧道炮孔布置

Fig. 5 The layout of the tunnel blast holes

2.3 监测方案

在村庄内部选择合适测点, 布置爆破测振仪, 组建光纤通讯系统, 完成自动化爆破振动监测。爆破振动监测采用中科测控公司的 TC-4850N 测振仪, 配套三轴向振动速度传感器 TCS-B3, 可同时采集 x 、 y 和 z 方向的爆破振动速度, 并通过系统软件实时上传、处理数据。具体测点布置见图 6。

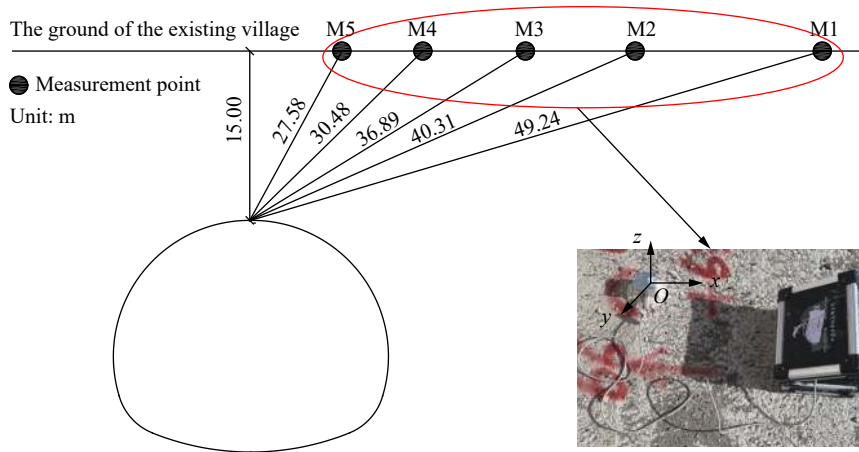


图 6 爆破振动测点布置

Fig. 6 Layout of the blasting vibration measurement points

3 数据的分析和拟合

3.1 数据分析

2020 年 10 月 31 日至 12 月 2 日, 进行了多次爆破振动现场监测, 典型爆破振动波形如图 7 所示。这里, 选取具有代表性的监测结果进行研究, 监测结果见表 3。

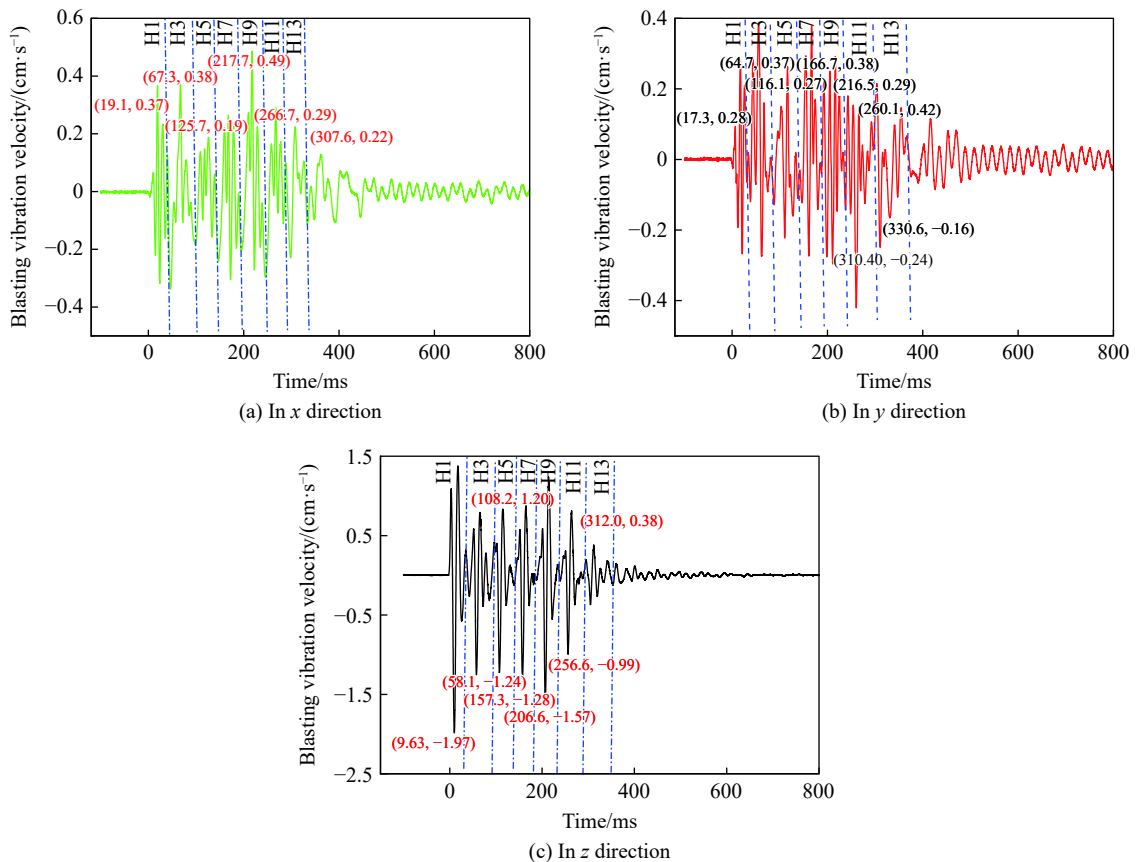


图 7 典型的爆破振动速度波形

Fig. 7 Typical blasting vibration velocity waveforms

表 3 爆破峰值振动速度及相关参数
Table 3 Blasting peak vibration velocity and related parameters

测点	监测次序	爆心距/m	爆破峰值振动速度/(cm·s ⁻¹)						
			掏槽孔		辅助孔			周边孔	底板孔
			H1	H3	H5	H7	H9	H11	H13
M5		27.58	1.99	1.04	1.22	1.29	1.58	0.84	0.38
M4		30.48	1.66	0.87	0.91	1.08	1.27	0.73	0.25
M3	1	36.89	1.54	0.72	0.46	0.89	1.23	0.62	0.20
M2		40.31	1.11	0.64	0.58	0.80	0.92	0.57	0.22
M1		49.24	0.98	0.56	0.48	0.61	0.76	0.46	0.23
M5		20.39	2.33	1.20	1.61	1.68	1.95	1.25	0.70
M4		21.54	2.22	1.03	1.24	1.65	1.67	0.99	0.48
M3	2	25.26	2.01	0.97	1.15	1.50	2.02	1.14	0.44
M2		28.28	1.96	0.88	0.91	1.16	1.35	0.85	0.34
M1		36.48	1.55	0.89	0.80	1.12	1.28	0.69	0.26
M5		30.55	1.86	0.85	1.14	1.15	1.35	0.65	0.27
M4		36.22	1.53	0.71	0.90	0.97	1.16	0.59	0.18
M3	3	42.16	1.46	0.67	0.65	0.84	1.01	0.46	0.16
M2		50.32	1.20	0.50	0.72	0.70	0.83	0.38	0.13
M1		57.84	0.92	0.45	0.63	0.64	0.74	0.33	0.12
M5		25.01	2.02	0.98	1.19	1.24	1.45	0.68	0.30
M4		31.33	1.62	0.86	1.18	1.12	1.32	0.63	0.27
M3	4	38.54	1.49	0.71	0.93	0.93	1.09	0.51	0.18
M2		41.66	1.30	0.69	0.86	0.88	1.02	0.42	0.15
M1		47.20	1.20	0.60	0.75	0.69	0.87	0.39	0.14
M5		29.02	1.92	0.90	1.15	1.18	1.41	0.62	0.26
M4		33.45	1.70	0.81	1.05	1.06	1.25	0.59	0.23
M3	5	38.04	1.52	0.73	0.93	0.94	1.11	0.50	0.17
M2		45.55	1.31	0.59	0.82	0.80	0.95	0.39	0.14
M1		50.03	1.17	0.56	0.75	0.73	0.83	0.32	0.10

按照 GB 6722—2014《爆破安全规程》, 应选取振动速度最大的进行研究。而在本文中, 爆破振动速度以 z 方向最大, 这里只对 z 方向的爆破峰值振动速度进行分析。采用电子数码雷管控制相邻段位的时间间隔均为 50 ms, 而由图 7 可以看出, 相邻雷管段位对应的振动速度的时间间隔也约为 50 ms。在 z 方向, 段位 1~13 雷管对应的时间分别为 9.63、58.1、108.2、157.3、206.6、256.6 和 312.0 ms, 相邻段位的时间间隔分别为 48.47、50.1、49.1、49.3、50.0 和 55.4 ms, 均分布在 50 ms 左右。由以上分析可知, 采用电子数码雷管起爆并未发生相邻雷管段位波形叠加的现象, 这有利于减小爆破振动对周边环境的影响。掏槽孔爆破只存在一个临空面, 爆破振动效应较大, 而掏槽段对应的振动速度并不一定最大, 由图 7 可以看出, x 、 y 方向的最大振动速度分别由段位 9、11 雷管起爆引起。

每个雷管段位对应的爆破峰值振动速度均随着爆心距的距离增大而减小, 且衰减速率随爆心距增大也呈减小趋势。段位 1 掏槽孔或段位 9 辅助孔或段位 11 周边孔对应的振动速度最大, 这与炮眼布置

情况、单孔装药量、爆心距及起爆顺序等有关。隧道爆破开挖过程中, 掏槽孔、辅助孔、周边孔及底板眼在装药条件、炮眼布置情况、临空面条件等都存在较大差异, 这导致不同类型炮孔诱发的爆破振动存在差异。

为了提高炮孔利用率, 隧道爆破中广泛使用空气柱间隔不耦合装药^[24]。实际应用中, 根据式(14)~(19), 以不耦合系数为分类依据, 可分别得到不同装药结构对应的等效爆破荷载 p_d , 并将 p_d 代入且改进获得式(21), 可以反映不同柱状装药结构对爆破振动衰减规律的影响。刘达等^[25]指出, 等效作用半径 r_d 的选取与隧道或隧洞的断面形式及炮孔布置方式有关: 当断面为圆形、炮孔布置大致规则逐圈爆破时, 各段同时起爆的炮眼形成的非弹性区包络线近似为闭合环形; 当断面为圆拱直墙型、某些炮孔连接线为矩形一条边不能形成闭合的圆形时, 将会影响峰值振速的拟合效果。如图 4 所示, 下穿隧道断面近似为圆形, 且均大致按逐圈布置炮孔, 因此式(21)理论上适用于本隧道爆破工程。按照临空面数可将隧道爆破炮孔划分为两大类: 掏槽孔起爆时只有前方掌子面一个自由面; 而辅助孔、周边孔及底板眼起爆时, 除掌子面以外, 掏槽爆破也可为他们增加一个临空面, 这有助于爆破振动波的传递及衰减。为了体现自由面对爆破振动拟合的影响, 对于掏槽孔及非掏槽孔, 在等效爆破荷载的计算过程中有区别(见式(19)~(20)), 对辅助孔、周边孔等非掏槽孔, 将爆破荷载等效作用在炮孔中心线与炮孔轴线所在的平面上, 荷载大小可根据力矩平衡原理计算得到。此外, 等效作用半径 r_d 的选取也应考虑临空面数的影响: 对掏槽孔起爆, 根据式(11)~(12)可得到粉碎区及破碎区半径; 对辅助孔、周边孔等非掏槽孔, 则可取各圈孔的圈径替代等效半径进行计算^[25]。综上所述, 为准确反映隧道爆破振动的衰减规律, 应依据不同雷管段位及不同炮孔类型分类进行研究。

3.2 改进公式的拟合

以下拟合式中, 距离、药量和速度的单位均分别为 m、kg 和 cm/s。

由实测数据(见表 3), 利用最小二乘法回归分析, 拟合结果见表 4, 拟合线如图 8 所示。由表 4 可知, 不同段位雷管诱发的峰值振动速度采用式(21)的拟合效果良好, 相关系数 r^2 均大于 0.8^[26-28], 证明改进公式可以反映下穿隧道施工诱发爆破振动衰减的规律。

表 4 爆破峰值振动速度采用式(21)的拟合效果

Table 4 Fitting effects of equation (21) for the blasting peak vibration velocity			
炮孔类型	雷管段位	拟合方程	相关系数 r^2
掏槽孔	H1	$v_{\max}=30.205(r_d/R)^{0.934}$	0.942
	H3	$v_{\max}=10.755(r_d/R)^{0.935}$	0.844
	H5	$v_{\max}=13.401(r_d/R)^{1.053}$	0.819
辅助孔	H7	$v_{\max}=11.764(r_d/R)^{0.998}$	0.947
	H9	$v_{\max}=10.692(r_d/R)^{0.961}$	0.922
	H11	$v_{\max}=6.876(r_d/R)^{1.124}$	0.940
底板孔	H13	$v_{\max}=3.721(r_d/R)^{1.354}$	0.907

由图 8 可知, 相同类型炮孔对应的峰值振动速度基本可以由相同方程表示, 如段位 3、5、7、9 雷管组成的辅助孔对应的爆破峰值振动速度与等效作用半径及爆心距有良好的拟合关系, 相关系数 r^2 为 0.875。这说明, 将相同类型炮孔诱发的振动速度统一进行拟合分析是可行的, 这样不仅可以节省运算时间, 而且可得到更符合工程的爆破振动衰减规律。综上所述, 引入等效作用半径 r_d 作为拟合变量, 不仅可准确预测不同段位雷管对应的爆破峰值振速, 而且适用于不同类型炮孔对应的爆破振动速度的拟合分析。

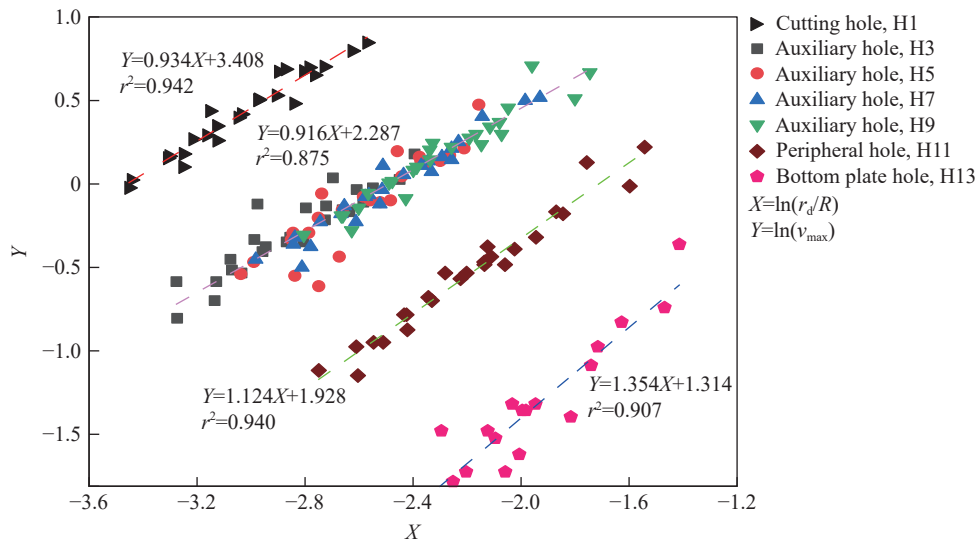


图 8 爆破峰值振动速度采用式 (21) 的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of equation (21) for the blasting peak vibration velocity

3.3 几种拟合公式的比较

为了验证本文中改进拟合方程的可行性和普适性, 通过常见的球形装药和柱状装药表达式展开对比分析。

对球形装药一次爆破, 装药量与等效作用半径的关系为^[25]:

$$Q = \frac{4}{3} \pi r_d^3 q \tag{27}$$

式中: q 为岩体的体积药量, Q 为最大单响药量。因此, 对球形装药, 式 (21) 可以改写为:

$$\begin{cases} v_0 = \frac{p_d}{\rho c_p} \\ v = k \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\lambda v_0 \end{cases} \tag{28}$$

对柱状装药, 装药量与等效作用半径的平方成正比^[25], 则式 (21) 可以改写为:

$$\begin{cases} v_0 = \frac{p_d}{\rho c_p} \\ v = k \left(\frac{Q^{1/2}}{R} \right)^\lambda v_0 \end{cases} \tag{29}$$

采用式 (28)~(29), 对两次爆破振动实验数据进行回归分析, 对比式 (21) 与式 (28)~(29) 的拟合效果。拟合结果的对比见表 5, 拟合线如图 9~10 所示。

由表 5 可知, 式 (28)~(29) 的相关系数 r^2 均小于式 (21) 的。根据对应雷管段位的数量, 可以将炮孔类型分为两大类, 其中掏槽孔、周边孔及底板孔仅对应唯一的雷管段位, 而辅助孔由段位 3、5、7 和 9 组成, 受多个起爆雷管的影响。由统计数据可知, 对仅对应唯一雷管段位的炮孔, 尽管式 (28)~(29) 的拟合效果不如改进公式, 但其相关系数大于 0.8^[26-29], 可以满足预测精度的基本需要。然而, 由段位 3~9 雷管组成的辅助眼, 通过式 (28) 和 (29) 得到的相关系数分别为 0.646 和 0.446, 远小于式 (21) 的, 拟合效果差。

以上分析结果证明, 爆破振动衰减公式的药量形式对掏槽孔、周边孔、底板孔对应的爆破振动速度的拟合效果较好, 但并不适用于由多段雷管组成的辅助孔的振动拟合分析。产生这种差异可能是由于,

掏槽孔、周边孔等起爆主要受单段装药量的影响, 而辅助孔由多段雷管组成, 对应的爆破振动速度受各段装药量、自由面及雷管段位等多个因素的综合影响, 所以若简单以最大单响装药量作为参考变量进行拟合分析并不能反映真实的爆破振动衰减规律。

表 5 爆破峰值振动速度的拟合效果

Table 5 Fitting effects of the blasting peak vibration velocity

拟合公式	炮孔类型	拟合方程	相关系数 r^2
式(21)	掏槽孔	$v_{\max}=30.205(r_d/R)^{0.934}$	0.942
	辅助孔	$v_{\max}=9.845(r_d/R)^{0.916}$	0.875
	周边孔	$v_{\max}=6.876(r_d/R)^{1.124}$	0.940
	底板孔	$v_{\max}=3.721(r_d/R)^{1.354}$	0.907
式(28)	掏槽孔	$v_{\max}^{\max}=10.957(Q^{1/3}/R)^{0.851}$	0.896
	辅助孔	$v_{\max}^{\max}=5.197(Q^{1/3}/R)^{0.694}$	0.646
	周边孔	$v_{\max}^{\max}=11.705(Q^{1/3}/R)^{1.234}$	0.837
	底板孔	$v_{\max}^{\max}=26.762(Q^{1/3}/R)^{1.534}$	0.789
式(29)	掏槽孔	$v_{\max}^{\max}=7.308(Q^{1/2}/R)^{0.682}$	0.788
	辅助孔	$v_{\max}^{\max}=3.016(Q^{1/2}/R)^{0.567}$	0.446
	周边孔	$v_{\max}^{\max}=5.812(Q^{1/2}/R)^{1.234}$	0.878
	底板孔	$v_{\max}^{\max}=19.298(Q^{1/2}/R)^{1.534}$	0.802

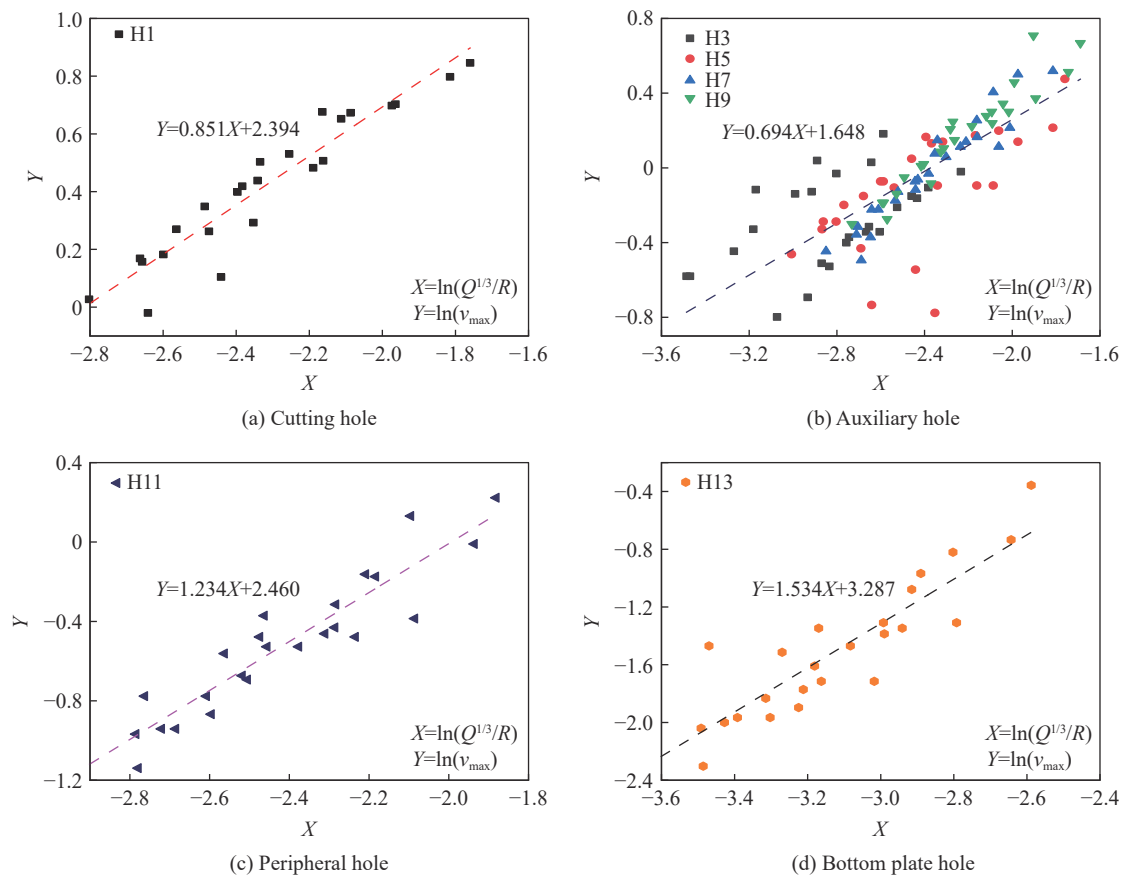


图 9 爆破峰值振动速度采用式 (28) 的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of equation (28) for the blasting peak vibration velocity

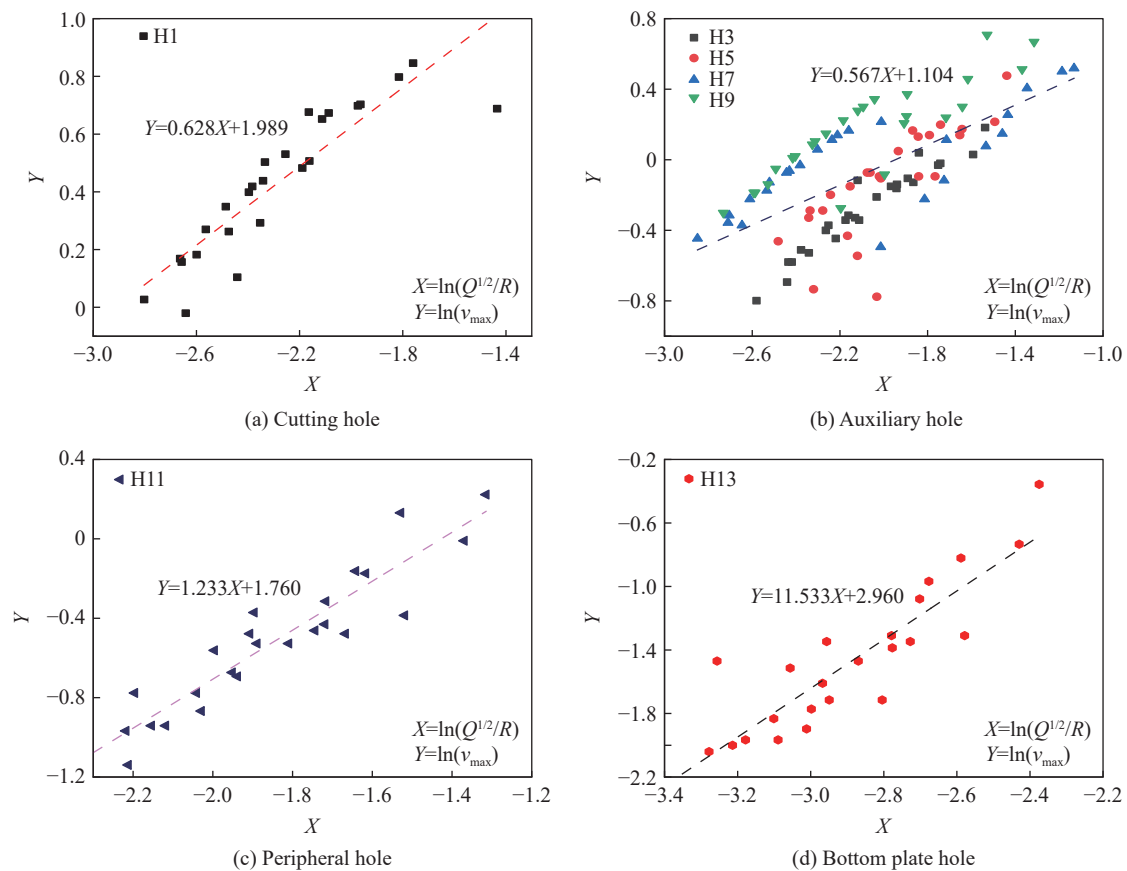


图 10 爆破峰值振动速度采用式 (29) 的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of equation (29) for the blasting peak vibration velocity

4 结 论

基于 Heelan 短柱药包理论, 推导了爆破峰值振动速度的衰减公式, 并通过量纲分析进行校核。结合隧道爆破工程进行回归分析, 得到以下结论。

(1) 基于 Heelan 短柱药包理论, 引入等效作用半径的概念, 理论推导得到适用于隧道爆破振动峰值振速的衰减模型方程, 并通过量纲分析验证其可靠性。

(2) 引入等效作用半径作为拟合参变量, 不仅可以准确预测不同雷管段位对应的爆破峰值振动速度, 而且适用于不同炮孔类型对应的爆破峰值振速的拟合分析。

(3) 推导得到振动衰减模型的药量表达形式, 对比发现振速衰减模型的药量表达式的拟合效果不如改进公式。引入改进公式可以综合考虑装药量、装药结构及雷管段位等因素的影响。

参考文献:

- [1] 苏建遥. 小净距交叉隧道开挖爆破振动监测及控制技术研究 [D]. 河北张家口: 河北建筑工程学院, 2018.
SU J Y. Research on monitoring and control technology of small clear distance cross tunnel blasting vibration [D]. Zhangjiakou, Hebei, China: Hebei University of Architecture, 2018.
- [2] 王海龙, 赵岩, 王永佳, 等. 新建京张高铁立体交叉隧道爆破振动控制研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62(7): 130-134. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201710120003.
WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Study on blasting vibration control of three-dimensional cross tunnel on Beijing to Zhangjiakou high-speed railway [J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(7): 130-134. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201710120003.

- [3] 杨学奇. 基于无中墙单洞法的连拱隧道设计与施工技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2019.000460.
YANG X Q. Research on desing and construction technology of multi-arch tunnel based on the single-hole method without middle wall [D]. Chengdu, Sichuan, China: Southwest Jiaotong University, 2019. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2019.000460.
- [4] HUANG D, CUI S, LI X Q. Wavelet packet analysis of blasting vibration signal of mountain tunnel [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 117: 72–80. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.11.025.
- [5] 单仁亮, 宋永威, 白瑶, 等. 基于小波包变换的爆破信号能量衰减特征研究 [J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(2): 119–128. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.003.
SHAN R L, SONG Y W, BAI Y, et al. Research on the energy attenuation characteristics of blasting vibration signals based on wavelet packet transformation [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(2): 119–128. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.003.
- [6] 何理, 钟东望, 李鹏, 等. 下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(7): 075201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0255.
HE L, ZHONG D W, LI P, et al. Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7): 075201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0255.
- [7] 王海龙, 赵岩, 王海军, 等. 基于 CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(5): 055202–137. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0123.
WANG H L, ZHAO Y, WANG H J, et al. De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(5): 055202–137. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0123.
- [8] YU C, YUE H Z, LI H B, et al. Scale model test study of influence of joints on blasting vibration attenuation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(1): 533–550. DOI: 10.1007/s10064-020-01944-2.
- [9] 朱正国, 孙明路, 朱永全, 等. 超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(12): 3747–3752, 3759. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.12.037.
ZHU Z G, SUN M L, ZHU Y Q, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3747–3752, 3759. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.12.037.
- [10] QIN Q H, ZHANG J. Vibration control of blasting excavation of large cross-section highway tunnel over metro line [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(17): 868. DOI: 10.1007/s12517-020-05836-3.
- [11] JIANG N, ZHU B, HE X, et al. Safety assessment of buried pressurized gas pipelines subject to blasting vibrations induced by metro foundation pit excavation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 102: 103448. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103448.
- [12] LU W B, LENG Z D, HU H R, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of blast-generated free surfaces on blasting vibration [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, 22(11): 1374–1398. DOI: 10.1080/19648189.2016.1262285.
- [13] 刘彦涛. 下穿寺庙隧道爆破振动影响的数值模拟与分析 [J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 53(2): 160–166. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2021.02.002.
LIU Y T. Numerical simulation and analysis of the influence of blasting vibration in the tunnel crossing under a temple [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(2): 160–166. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2021.02.002.
- [14] ONGEN T, KARAKUS D, KONAK G, et al. Assessment of blast-induced vibration using various estimation models [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 145: 267–273. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.05.004.
- [15] ZHAO Y, SHAN R L, WANG H L. Research on vibration effect of tunnel blasting based on an improved Hilbert-Huang transform [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(5): 206. DOI: 10.1007/s12665-021-09506-9.
- [16] PENG Y X, LIU G J, WU L, et al. Comparative study on tunnel blast-induced vibration for the underground cavern group [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(2): 68. DOI: 10.1007/s12665-020-09362-z.
- [17] JAYASINGHE B, ZHAO Z Y, CHEE A G T, et al. Attenuation of rock blasting induced ground vibration in rock-soil interface [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(4): 770–778. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.12.009.
- [18] HUSTRULID W A. Blasting principles for open pit mining: general design concept [M]. Rotterdam, the Netherlands: Balkema Publishers, 1999.

- [19] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 垂直孔爆破诱发地震波的成分构成及演化规律 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(1): 18–27. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0824.
GAO Q D, LU W B, YANG Z W, et al. Components and evolution laws of seismic waves induced by vertical-hole blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(1): 18–27. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0824.
- [20] YANG J H, CAI J Y, YAO C, et al. Comparative study of tunnel blast-induced vibration on tunnel surfaces and inside surrounding rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(11): 4747–4761. DOI: 10.1007/s00603-019-01875-9.
- [21] 卢文波, HUSTRULID W. 质点峰值振动速度衰减公式的改进 [J]. *工程爆破*, 2002, 8(3): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2002.03.001.
LU W B, HUSTRULID W. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity [J]. *Engineering Blasting*, 2002, 8(3): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2002.03.001.
- [22] DENG X H, WANG J Y, WANG R, et al. Influence of blasting vibrations generated by tunnel construction on an existing road [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2020, 18(12): 1381–1393. DOI: 10.1007/s40999-020-00549-w.
- [23] 杨建华, 卢文波, 陈明, 等. 岩石爆破开挖诱发振动的等效模拟方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0157-07.
YANG J H, LU W B, CHEN M, et al. An equivalent simulation method for blasting vibration of surrounding rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0157-07.
- [24] 王海龙, 赵岩, 王永佳, 等. 草帽山隧道爆破振动监测与分析 [J]. *铁道建筑*, 2017, 57(12): 67–70. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.12.18.
WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Blasting vibration monitoring and analysis of Caomaoshan tunnel [J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(12): 67–70. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.12.18.
- [25] 刘达, 卢文波, 陈明, 等. 隧洞钻爆开挖爆破振动主频衰减公式研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(9): 2015–2026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0311.
LIU D, LU W B, CHEN M, et al. Attenuation formula of the dominant frequency of blasting vibration during tunnel excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(9): 2015–2026. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0311.
- [26] HASANIPANAH M, NADERI R, KASHIR J, et al. Prediction of blast-produced ground vibration using particle swarm optimization [J]. *Engineering with Computers*, 2017, 33(2): 173–179. DOI: 10.1007/s00366-016-0462-1.
- [27] GOU Y G, SHI X Z, ZHOU J, et al. Attenuation assessment of blast-induced vibrations derived from an underground mine [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 127: 104220. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104220.
- [28] MATIDZA M I, ZHANG J H, GANG H, et al. Assessment of blast-induced ground vibration at Jinduicheng molybdenum open pit mine [J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(2): 831–841. DOI: 10.1007/s11053-020-09623-5.
- [29] ZHAO Y, SHAN R L, WANG H L, et al. Regression analysis of the blasting vibration effect in cross tunnels [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(18): 1925. DOI: 10.1007/s12517-021-08257-y.

(责任编辑 丁峰)