# 隧道水压爆破中不同轴向装药结构的地表振动响应规律研究

赵立财[1,2]

（1.中铁十九局集团第三工程有限公司，辽宁 沈阳 110136；2.台湾科技大学营建工程系，台湾 台北 10607）

**摘要：**为探明隧道水压爆破中不同装药结构对地表振动响应特性的影响，依托沈白高速新宾隧道Ⅳ级围岩爆破开挖开展了相关现场试验，对比了常规装药、孔口水间隔装药、孔底水间隔装药及两端水间隔装药条件下爆破诱发地表振动峰值（PPV）及主频（DF），并借助数值模拟进一步分析了不同装药结构下地表振动响应规律。研究结果表明：相比于常规装药结构，水压爆破转化为爆破振动的能量降低，爆破诱发地表振动PPV减小而DF相对较高；沿隧道掌子面横断面5 m范围内，常规装药结构诱发的振动峰值会超过允许的振动峰值，不利于地表建构物振动安全控制；采用水压爆破时，在炮孔内布设水袋一端，爆炸转化为振动能的比例相对较小，诱发PPV降低；但沿炮孔内布设水袋一端反方向爆破诱发的PPV则相对较高。在隧道掘进爆破作业中，推荐使用两端水间隔装药以保证振动能量的均匀分布，降低炮孔两侧地表振动，从而减小爆破开挖对地表建构物的扰动。

**关键词：**隧道工程；地表振动；水压爆破；装药结构

**中图分类号：**U451$^{+}$.2；U455.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004-4523(2025)01-0172-08

DOI：10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.01.019

# Ground surface vibration response law of different axial charge structures in tunnel hydraulic blasting

ZHAO Licai[1,2]

（1.The Third Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group Corporation Limited，Shenyang 110136，China；
2.Department of Civil and Construction Engineering，National Taiwan University of Science and Technology，Taipei 10607，China）

**Abstract:** To investigate the influences of charge structures on the blast-induced ground vibration characteristics in hydraulic blasting，several onsite experiments were conducted in the context of Xinbin tunnel at the Shenyang to Jilin Expressway. Based on the onsite experiments，the peak particle velocity（PPV）and dominant frequency（DF）were analyzed under different kinds of charge structures，which includes the normal charge structure，the water bags located in the top of blasthole，the water bags located in the blasthole collar and the water bags located in the both ends of blasthole. In addition，the distribution laws of ground vibration under different charge structures were further studied using numerical simulation. The research results indicated that，compared with the normal charge structures，less explosive energy is converted into vibration energy in hydraulic blasting，resulting in smaller PPVs and higher DFs. Within 5 m of the cross section along the tunnel excavation face，the PPVs of blasting vibration under the normal charge structure exceed the vibration safety criteria，which is adverse for the safety control of ground structures. The converted vibration energy is relatively smaller along the direction of water bags in blasthole，but on the opposite direction of the blastholes more explosive energy is converted into vibration energy. In tunnel blasting excavation，the charge structure of the water bags located in the both ends of blasthole was recommended to promote the uniform distribution of vibration energy and minimize the disturbance to the surrounding structures.

**Keywords:** tunnel engineering；ground surface vibration；hydraulic blasting；charge structures

现阶段，钻孔爆破以其经济高效的特点仍是隧道施工中一种常见的开挖手段，且随着绿色、精细化爆破概念的提出，水压爆破正在被广泛应用于隧道施工[1-3]。实际工程中，水压爆破主要通过在炮孔内

**收稿日期：**2022-10-17；**修订日期：**2023-02-13

**基金项目：**辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目（XLYC2007146）；中铁十九局集团有限公司科技研究开发计划项目（2021-B03）

部添加水袋的方式以减少爆破产生的烟尘，改善爆破效果[4-6]。然而水压爆破中炮孔装药结构的不同势必会导致爆炸能量分配的差异，进而影响其爆破振动特性。

近年来，大量学者针对水压爆破开展了相关研究，如王海洋等[7]采用理论分析和数值模拟的方式揭示了层状岩体中水压爆破应力波的传播机理，并探究了层理面位置及其介质属性对水压爆破应力波传播的影响作用规律。王新明[8]依托青岛地铁1号线，对比了水压爆破及常规爆破技术在TBM导洞扩挖中的爆破效果及环境效益。邵珠山等[9]通过理论分析阐明了水压爆破过程中应力波在岩体中传播机制及岩石破裂的全过程，并总结了冲击波在水中的传播规律。蔡永乐等[10]采用超动态应变测试系统，分析了模拟煤体中的爆炸应变，并对比了水、空气两种不耦合介质对煤体爆破作用的影响。

岩石爆破中炮孔装药结构的不同也会导致爆炸能量分配的差异，进而影响爆破效果，赵晓明等[11]对光面爆破周边孔装药结构进行优化，并开展了相关数值模拟及现场试验验证了不同药卷间距下的爆破效果。HOU等[12]采用数值模拟和现场试验的方式，探究了不同装药结构下爆炸能量的分配情况，并提出了相应的炮孔优化措施。曹桂祥等[13]开展了相关现场爆破试验，分析了常规爆破及复合装药爆破的地震波传播规律。冯涵等[14]以Heelan理论解为基础，研究了水封装药结构下远场位置处振动速度的解析解，探究了不同水介质段长度与炸药段长度的比例对爆破振动的影响，并进行了现场试验。

综上，现有关于水压爆破及炮孔装药结构的研究已有大量成果，但水压爆破中水袋位置的不同亦会影响爆炸能量分配，进而导致爆破振动特性的差异，而关于水压爆破中不同装药结构对地表振动响应规律的研究少有报道。本文依托沈白高速新宾隧道Ⅳ级围岩爆破开挖，开展了相关现场试验，对比了不同装药结构下水压爆破诱发地表振动特性的差异。并借助有限元数值模拟进一步分析了水压爆破中装药结构对地表振动的影响作用规律，相关研究成果对于进一步推动水压爆破在复杂条件下隧道开挖中的应用具有重要意义。

## 1　现场爆破试验

### 1.1　工程概况

新宾隧道位于抚顺市新宾县，是沈白高速中的控制性工程。隧道全长10175 m，最大埋深为25 m。隧道穿越地层围岩以砾岩及泥质砂岩为主，节理裂隙极发育，围岩结构呈松软结构或松散角砾状碎块结构，围岩等级以Ⅳ级围岩为主。隧道上方为居民建筑保护区，存在大量土坯房及砖瓦房，且部分房屋墙体表面出现可见裂缝。为减小对既有建构物的扰动，防止爆破诱发振动导致建构物的失稳破坏，在隧道下穿施工中，采用了水压光面爆破技术，并针对不同的炮孔装药结构开展了相关对比试验。

### 1.2　现场试验设计

根据现场地质条件，隧道主要采用三台阶法进行开挖，而上台阶与保护区间距最小，爆破对既有建构物的扰动最大，故现场试验主要依托某段上台阶爆破开挖展开。图1为上台阶爆破炮孔布置图，可知上台阶爆破共包含84个炮孔，其中掏槽孔6个，扩槽孔10个，崩落孔39个，周边孔44个，各段炮孔间均采用毫秒微差雷管进行延时爆破。隧道循环进尺为3 m，为保证掏槽效果，掏槽孔深度设置为3.5 m，其余炮孔深度均为3.2 m。

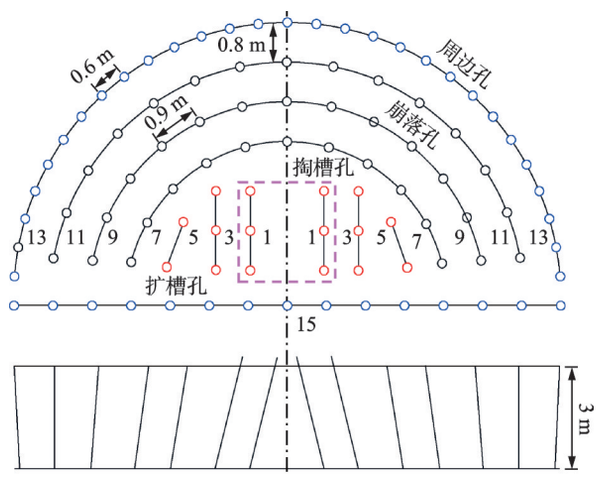


图1　上台阶炮孔布置图

Fig. 1　Layout of blastholes in upper step of the tunnel

掏槽孔爆破形成的槽腔质量往往决定了隧道爆破开挖效果的好坏，且相比于其他炮孔，掏槽孔炸药单响较大，爆破诱发的振动更易对既有结构产生扰动。故现场试验中，针对掏槽孔，设置了常规装药结构、两端水间隔装药结构、孔口水间隔装药结构及孔底水间隔装药结构，以探究水压爆破中不同装药结构对地表振动响应规律的影响，具体装药结构如图2所示。此外，于地表设置振动测点以监测现场爆破诱发的振动，测点位于隧道正上方，距离掌子面距离为5 m，具体位置分布如图3所示。现场测试中采用TC-4850型记录仪监测爆破诱发振动信号，并采用速凝石膏将传感器与基岩紧密粘接，现场振动监测点埋设和数据采集具体如图4所示。

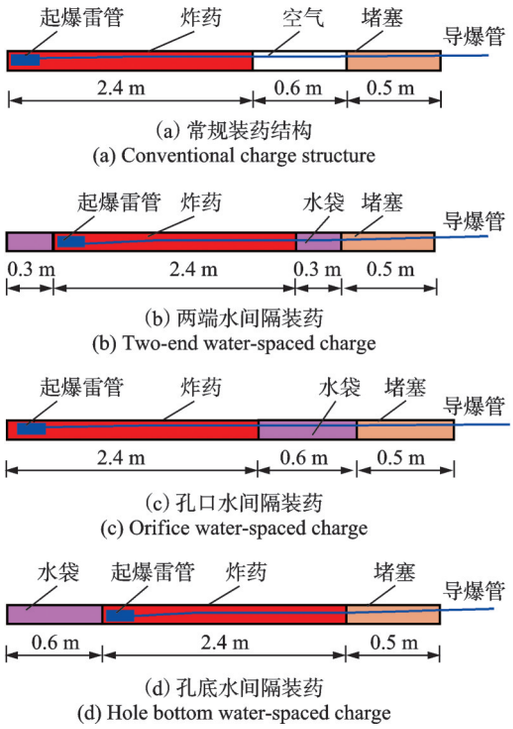


图 2 炮孔装药结构

Fig. 2 Charge structures of blastholes

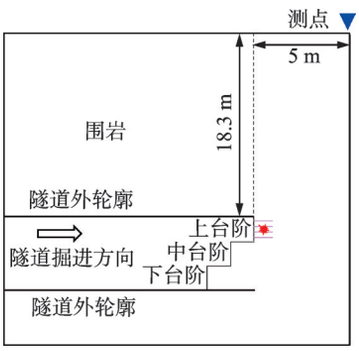


图 3 现场测点布置

Fig. 3 Layout of monitoring points in onsite experiments

图 4 现场振动监测

Fig. 4 Onsite vibration monitor

### 1.3 试验结果分析

图 5 为常规装药下测点监测振动时程曲线。由图 5 可知，前三段爆破振动波形分界明显，其中掏槽孔爆破诱发最大振动速度为 0.413 cm/s，明显大于其余段炮孔爆破诱发的振动速度。需说明的是，受爆破延时的影响，部分崩落孔及光爆孔诱发的振动产生叠加，故这里仅分析了前三段炮孔爆破诱发的振动。此外，表 1 统计了不同装药结构下，前三段炮孔爆破诱发的 PPV。由表 1 可知，不同装药结构下，掏槽孔爆破诱发的振动均大于其余段炮孔诱发的振动，这主要是由于第一段掏槽孔在单个自由面条件下起爆，炮孔所受夹制作用较大，进而导致更多炸药能量转化为振动能。此外，对于不同装药结构，常规装药爆破诱发的振动均大于水压爆破。

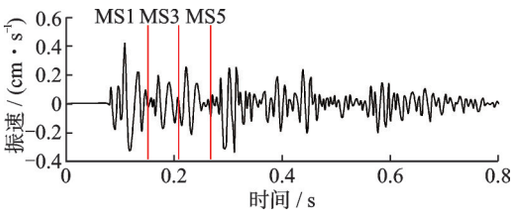


图 5 常规装药爆破振动时程曲线

Fig. 5 Blasting vibration velocity time-histories of conventional charge

**表 1 不同装药结构下爆破诱发 PPV**

**Tab. 1 Comparison of PPVs under different kinds of charge structures**

| 雷管段别 | 常规装药/(cm·s$^{-1}$) | 两端水间隔装药/(cm·s$^{-1}$) | 孔口水间隔装药/(cm·s$^{-1}$) | 孔底水间隔装药/(cm·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| MS1 | 0.413 | 0.340 | 0.365 | 0.331 |
| MS3 | 0.192 | 0.188 | 0.168 | 0.086 |
| MS5 | 0.251 | 0.077 | 0.109 | 0.057 |

图 6 采用时-能分析[15]的方式计算了不同装药结构下掏槽孔爆破诱发振动的时-能密度曲线，由图 6 可知，不同装药结构下能量峰值均出现在 0.11 s 左右，且不同装药结构下总能量存在显著差异。当采用常规装药结构时，振动总能量为 $5.4\times10^{-2}$ J，孔口水间隔装药与两端水间隔装药下振动总能量大体相同，分别为 $4.08\times10^{-2}$ J 及 $3.94\times10^{-2}$ J，而采用孔底水间隔装药时振动总能量为 $2.42\times10^{-2}$ J，明显小于其他装药结构。

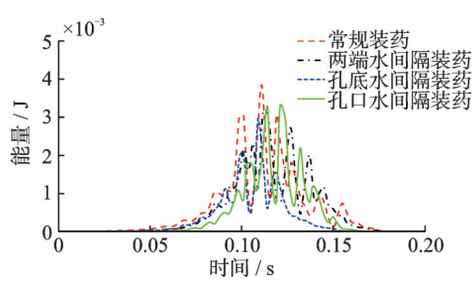


图 6 不同装药结构下掏槽孔时-能密度曲线

Fig. 6 Time-energy curves of cutting blastholes under different charge structures

当采用常规炮孔装药结构，即炮孔内部主要以空气为不耦合介质时，在炸药爆炸产生爆轰波的作用下，炮孔内空气被压缩，爆轰波能量产生较多损失。而当采用水压爆破时，炮孔内以水作为不耦合介质，相比于空气，水的流动黏度较大，且具有不可压缩性，爆轰波能量损失相对较小。此外，水的密度远大于空气的密度，炸药在水中爆炸后气体产物的膨胀速度比在空气中小得多，进而导致作用于炮孔壁上的荷载减小，持续时间增长，更多比例的爆炸能量用于使岩石破碎，转化为爆破振动的能量比例降低。对于不同的水压爆破装药结构，当采用孔底水间隔装药时，其爆破诱发的振动峰值及能量最小。这主要是由于当水袋位于孔底时，水介质会降低作用于孔底位置的爆破荷载，从而减小孔底方向转化为爆破振动的能量，降低隧道未开挖方向的爆破振动。

图 7 采用傅里叶变换的方式[16]得到了常规装药下不同段掏槽孔爆破诱发振动幅频谱。由图 7 可知，受自由面条件的影响，掏槽孔爆破诱发的振动主频明显小于扩槽孔。图 8 又提取了不同装药结构下掏槽孔（MS1）爆破诱发的振动主频。图 8 表明当采用常规装药结构时，掏槽孔爆破诱发的振动主频为 36 Hz，而采用水压爆破时，不同装药结构下爆破振动主频基本一致，均集中在 50～60 Hz，明显小于常规装药。综上可知，相比于常规装药，不同装药结构下水压光面爆破诱发 PPV 较小，而 DF 则相对较大，更有利于减小对既有建构物的振动损伤。

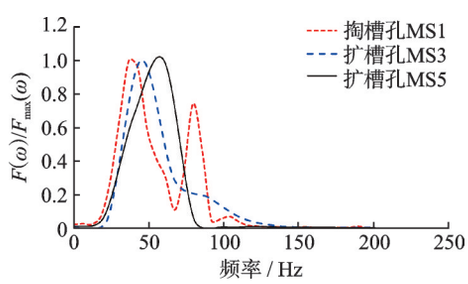


图 7　常规装药诱发的振动幅频谱

Fig. 7　Amplitude-frequency spectra under conventional charge

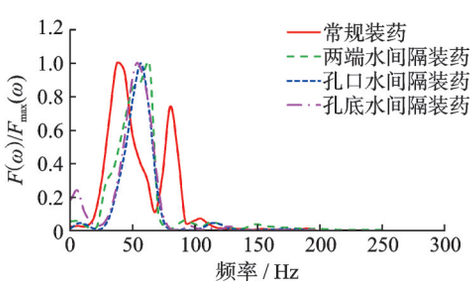


图 8　不同装药结构下掏槽孔诱发的振动幅频谱

Fig. 8　Amplitude-frequency spectra of cutting blastholes under different kinds of charge structures

## 2　不同装药结构下地表振动响应规律模拟分析

### 2.1　模型建立

为进一步探究不同装药结构下地表的振动响应特性，建立了如图 9 所示数值计算模型。模型尺寸为 60 m×60 m×40 m，炮孔半径为 42 mm，网格数量为 20377840 个单元。参考现场试验，隧道埋深设置为 18.3 m，初期支护厚度为 2 cm。模型上表面设置为自由面，其余边界均施加无反射边界条件，以避免模型边界产生反射拉应力波的影响。模型中炸药采用 ALE 网格，岩体采用 Lagrange 网格，两者之间的荷载通过流-固耦合算法实现。此外，在隧道正上方模型表面设置振动测点，测点间距为 5 m，沿隧道纵向及横向均匀分布，具体位置如图 9 所示。根据现场试验，建立了四种不同装药结构下的数值模型，具体炮孔装药结构如图 10 所示。掏槽孔间距为 0.8 m，堵塞长度为 0.5 m，不耦合介质（空气、水袋）

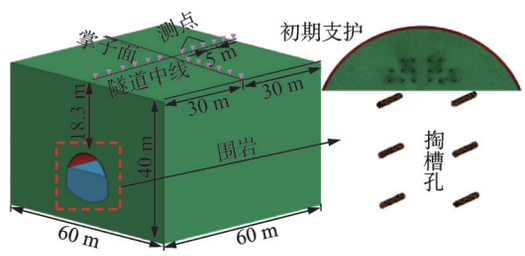


图 9　数值计算模型

Fig. 9　Numerical model

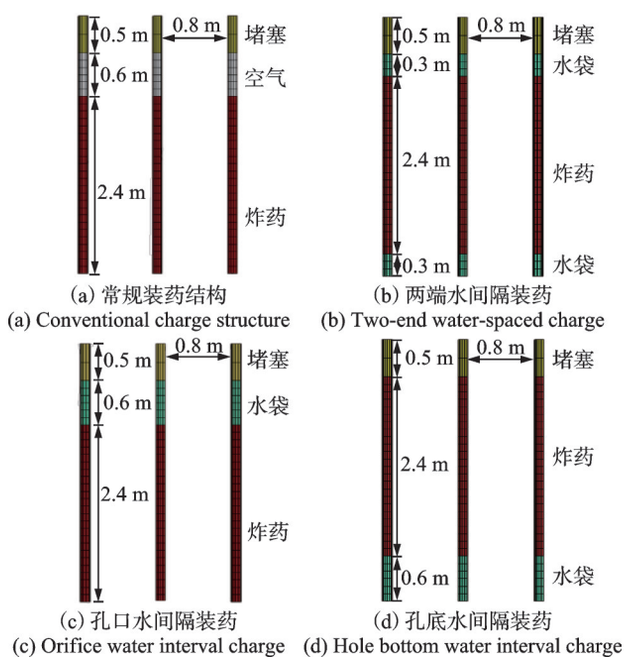


图 10　数值模型中不同炮孔装药结构

Fig. 10　Charge structures of cutting blastholes in numerical models

长度为0.6 m,炸药长度为2.4 m。由现场试验可知,隧道上断面掏槽孔爆破诱发振动PPV最大,且DF相对较低,易对既有建构物产生损伤扰动,故为提升计算效率,数值模拟中主要分析了掏槽孔爆破诱发振动。

## 2.2 参数选取

岩石本构采用一种与应变率相关且带有失效的弹塑性材料MAT_PLASTIC_KINEMATI。该模型能够描述岩石材料速率、随动强化及各向同性效应,经常用于模拟爆破荷载激励下岩石的本构[17-18]。模型的应力-应变关系近似可用两段直线表示,其中第一段直线的斜率可近似为材料的弹性模量,第二段直线的斜率则等于切线模量。MAT_PLASTIC_KINEMATI模型的屈服应力与塑性应变、应变率之间的关系可由下式表示:

$$\sigma_Y=\left(\sigma_0+\beta E_p\varepsilon_p^{eff}\right)\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right] \tag{1}$$

式中,$\sigma_0$为初始屈服应力;$\dot{\varepsilon}$为应变率;$\varepsilon_p^{eff}$为有效塑性应变;$\beta$为硬化参数;$E_p$为塑性硬化模量;$C$和$P$为应变率参数。其中,$E_p$可由下式表示:

$$E_p=\frac{EE_t}{E-E_t} \tag{2}$$

式中,$E$为材料的弹性模量;$E_t$为切线模量。

参考文献[18],具体的岩石的物理力学参数取值如表2所示。

**表2 岩体材料参数**

**Tab. 2 Calculation parameters of surrounding rock**

| $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $E$/GPa | $\mu$ | $\sigma_y$/MPa | $E_t$/GPa | $\beta$ | $C$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 600 | 2.9 | 0.32 | 220 | 1.1 | 0.5 | 0 | 4.0 |

初期支护采用Riedl-Hiermaier-Thoma模型(RHT模型)。RHT模型综合考虑了应变硬化、软化和应力偏量三不变量的影响,能够有效描述材料从弹性到失效的全过程。此外,该模型进一步采用弹性极限面、失效面及残余失效面来分别描述岩石的初始屈服强度、失效强度及残余强度的演化规律。该模型已被广泛用于混凝土等在冲击荷载作用下的振动响应特性。其失效方程具体如下:

$$\begin{cases}\sigma_{eq}^*(p,\theta,\varepsilon)=Y_{TXC}^*(p)R_3(\theta)F_{rate}(\varepsilon)\\ Y_{TXC}^*(p)=A\left[p^*-P_{spall}^*F_{rate}(\varepsilon)\right]^N\\ P_{spall}^*=P_{spall}/f_c\end{cases} \tag{3}$$

式中,$p$、$\theta$分别为压力和Lode角;$p^*$为归一化后的压力;$R_3(\theta)$为偏平面上的角偶函数;$F_{rate}(\varepsilon)$为应变率强化因子;$Y_{TXC}^*(p)$为压缩子午线上的等效应力强度;$f_c$为单轴抗压强度;$P_{spall}$为层裂强度;$P_{spall}^*$为标准化静水压力;$A$、$N$为材料常数;

此外该模型在HJC本构模型损伤演化基础上,引入了损伤变量$D$来描述参数失效面,并假定损伤是非弹性应变的累计,表达式如下:

$$\begin{cases}D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_p^{failure}}\\ \varepsilon_p^{failure}=D_1(p^*-p_{spall}^*)^{D_2}\geqslant\varepsilon_f^{min}\end{cases} \tag{4}$$

式中,$D_1$和$D_2$为损伤常数;$\varepsilon_p^{failure}$为失效应变;$\varepsilon_f^{min}$为最小失效应变。参考文献[19],初期支护RHT本构模型参数取值如表3所示。

**表3 初期支护RHT模型主要参数取值**

**Tab. 3 Parameters used in the RHT model for initial support**

| $\rho$/(g·cm$^{-3}$) | 体积模量$A_1$/GPa | 剪切模量$G$/GPa | 抗压强度$f_c$/MPa | 损伤常数$D_1$ | 损伤常数$D_2$ | 完整失效面常数$A$ | 完整失效面常数$N$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.75 | 35.2 | 16.7 | 35 | 0.04 | 1.0 | 1.6 | 0.61 |

采用Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程模拟炸药爆轰过程的压力、能量以及体积之间的关系。由JWL状态方程决定的爆轰产物的压力可由下式表示:

$$P_d=A_1\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B_1\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \tag{5}$$

式中,$P_d$为爆轰产物的压力;$A_1$、$B_1$、$R_1$、$R_2$、$\omega$均为与炸药性质相关的独立常数;$V$为爆轰产物的相对体积;$E_0$为初始体积内能。参考文献[18],炸药的相关参数取值如下:初始爆轰压力$P_{d0}$=5.15 GPa,$A_1$=48 GPa,$B_1$=1.8 GPa,$R_1$=3.9,$R_2$=1.11,$\omega$=0.33,密度$\rho$=980 kg/m$^3$,初始爆轰速度$c_d$=4500 m/s。

参考文献[20],空气状态方程采用*Eos_LINEAR_POLYNOMIAL进行定义,主要参数取值为$\rho$=1.025 kg/m$^3$,$\gamma$=1.403,$C_4$=0.403,$C_5$=0.403。

水的状态方程也采用*Eos_LINEAR_POLYNOMIAL进行定义,其主要参数取值为$\rho$=1000 kg/m$^3$,$C_1=2.0\times10^9$ Pa,$C_2=8.4\times10^9$,$C_3=8.0\times10^9$,$C_4$=0.439,$C_5$=1.393 7,$E_0=2.06\times10^9$,$V_0$=1.0。

## 2.3 对比验证

图11将现场试验常规装药下第一段掏槽孔爆破诱发的振动波型与数值计算结果展开对比。可以看出现场实测振动PPV为0.413 cm·s$^{-1}$,而数值模拟计算振动PPV为0.61 cm·s$^{-1}$。现场实测振动峰

值要小于数值计算结果，考虑应是实际岩体中往往存在大量微裂隙或缺陷，而数值模拟中则假定模型材料各向均匀，但数值计算结果与现场实测波形的变化趋势及持续时间基本一致。由此说明，本文所采用数值模型及计算参数是合理的。

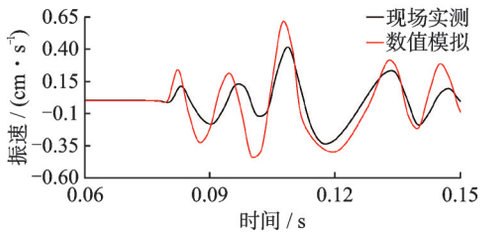


图 11　数值模拟与现场实测波形对比

Fig. 11　Comparison of numerical results and experimental results

## 2.4　数值计算结果分析

图 12 为常规装药结构下隧道已开挖方向与未开挖方向爆破开挖诱发 PPV。不同开挖方向，随着与掌子面距离的增加，PPV 均逐渐降低，且衰减速度呈现出先增大后减小的趋势。此外，隧道已开挖方向 PPV 最大值为 0.448 cm/s，而未开挖方向最大 PPV 为 0.61 cm/s，这主要是由于相对于已开挖方向测点，隧道未开挖方向测点与爆源中心的距离较近，故爆破诱发 PPV 相对较大。

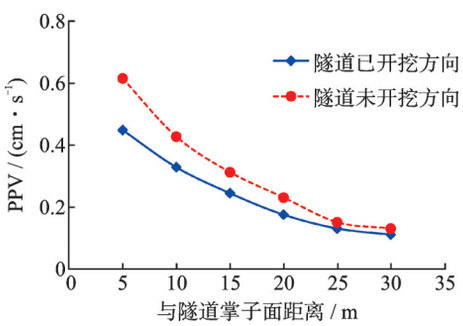


图 12　常规装药结构下已开挖与未开挖方向 PPV 对比

Fig. 12　Comparison of PPVs in the excavated and unexcavated direction under normal charge structure

图 13 为不同装药结构下沿隧道纵向爆破振动 PPV 的变化规律。由图 13 可知，沿不同方向，常规装药结构下爆破诱发 PPV 均明显大于水压爆破。相比于常规装药结构，水压爆破中采用水作为不耦合介质，由于水具有不可压缩性，且其流动黏度较大，水中爆轰产物膨胀速度降低，作用于炮孔壁上的荷载减小，持续时间增长，进而导致爆破诱发 PPV 降低。此外，水压爆破中，针对不同的装药结构，爆破诱发振动变化规律也有所不同。对于隧道未开挖方向，孔口水间隔下爆破诱发振动 PPV 最大为 0.41 cm/s，明显大于两端水间隔装药及孔口水间隔装药，但随着与掌子面距离的增加，PPV 快速衰减，并最终稳定在 0.1 cm/s 左右；而对于隧道已开挖方向，孔底水间隔装药下爆破诱发振动 PPV 则要大于两端水间隔装药及孔口水间隔装药。由此可见，水压爆破中不同装药结构会导致爆破能量分布的差异，对于炮孔内布设水袋一侧，爆破荷载作用峰值低、时间长，更多的能量用于岩石的破碎，进而导致转化为爆破振动的能量降低。

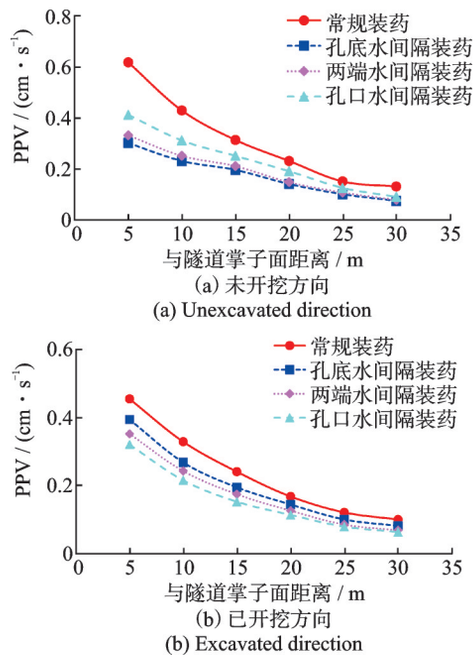


图 13　不同装药结构下沿隧道纵向 PPV 变化规律

Fig. 13　Variations of PPVs along the vertical direction of tunnel under different charge structures

图 14 为不同装药结构下 PPV 沿隧道横向的变化规律。参考现有的振动安全控制标准[21]，不同振动主频范围内所允许的爆破振动速度不同。由 1.3 节的分析可知，常规装药诱发振动主频为 36 Hz，且现场保护区主要以土坯房及砖瓦房为主，故其允许振速应为 0.9 cm/s，而水压爆破诱发振动主频介于 50～60 Hz，其允许振速应为 1.5 cm/s。由图 14 可知，常规装药结构下爆破诱发振动 PPV 最大为

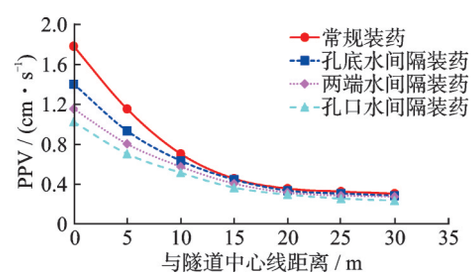


图 14　不同装药结构下沿掌子面横向 PPV 变化规律

Fig. 14　Variations of PPVs along the cross section of the tunnel under different kinds of charge structures

1.78 cm/s,明显大于现有爆破振动安全控制标准[21]中的允许振速0.9 cm/s,当距离隧道中心线5 m时,爆破诱发PPV衰减为1.18 cm/s。故对于常规装药,爆破诱发振动主要影响隧道中心线两侧5 m范围内的建构物。而水压爆破时,由于爆破诱发振动主频相对较高,且不同装药结构下爆破诱发PPV最大值均小于1.5 cm/s,故水压爆破基本能够满足现有的振动安全控制标准。

由上述分析可知,相比于常规装药结构,采用水压光面爆破更能够有效降低爆破开挖对地表建构物的扰动。且针对不同的水压爆破装药结构,爆破诱发振动也有所不同,当采用孔底水间隔装药时,受水介质的影响,炮孔孔底位置用于岩石破碎的爆炸能量增多,转化为爆破振动的能量减少,但孔口位置转化为爆破振动的能量相对较多;而采用孔口水间隔装药虽能保证孔口位置地表振动满足标准要求,但孔底位置爆破诱发振动相对较大。因此,实际工程推荐采用两端水间隔装药,以保证振动能量的均匀分布,从而降低对地表建构物的扰动。

## 3 结 论

本文依托沈白高速新宾隧道,采用现场试验及数值模拟的方式对比了水压爆破中不同装药结构下地表振动响应特性,主要得出了以下结论:

相比于常规装药结构,水压爆破中采用水作为不耦合介质,提高了爆炸能量利用率,减小了转化为爆破振动的能量,爆破诱发地表振动峰值较低,而主频相对较高,更有利于降低爆破开挖对地表建构物的振动扰动。

水压爆破中不同装药结构会导致爆破振动能量分布的差异,炮孔内布置水袋一端,受水介质的影响,爆炸能量转化为振动能的比例相对较小。

采用孔底(孔口)水间隔装药会对炮孔内无水袋一侧地表建构物产生较大扰动,不利于振动安全控制,现场实际中推荐使用两端水间隔装药以保证振动能量的均匀分布,降低炮孔两侧地表振动。

需说明的是本文仅分析了隧道单次爆破开挖地表振动响应特性,而实际工程中隧道开挖往往会涉及到多次循环爆破,故在接下来的研究中还需开展相关现场试验以得出更具普适性的结论。

**参考文献:**

[1] 李广涛,李大春.隧道掘进水压爆破技术发展新阶段[J].爆破,2022,39(3):82-87.
LI Guangtao, LI Dachun. New development stage of water pressure blasting technique in tunnel excavation[J]. Blasting, 2022, 39(3): 82-87.

[2] ZHANG Yabin, CHEN Chao, ZHANG Yunpeng, et al. Numerical simulation study on hydraulic blasting based on LS-DYNA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170-173: 3245-3249.

[3] 何广沂.隧道掘进水压爆破技术发展[J].工程爆破,2021,27(5):53-58.
HE Guangyi. Development of hydraulic blasting technology for tunnel excavation[J]. Engineering Blasting 2021, 27(5): 53-58.

[4] 余志奇,朱镕,柯波.团山隧道水压爆破技术研究[J].爆破,2021,38(3):50-57.
YU Zhiqi, ZHU Rong, KE Bo. Study on hydraulic blasting technology of Tuanshan tunnel[J]. Blasting, 2021, 38(3): 50-57.

[5] YE Qing, JIA Zhenzhen, ZHENG Chunshan. Study on hydraulic-controlled blasting technology for pressure relief and permeability improvement in a deep hole[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 159: 433-442.

[6] HUANG Bingxiang, LI Pengfeng, MA Jian. Experimental investigation on the basic law of hydraulic fracturing after water pressure control blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47: 1321-1334.

[7] 王海洋,陈祥,卢保东,等.层理面对水压爆破应力波传播规律的影响[J].工程爆破,2022,28(1):17-25.
WANG Haiyang, CHEN Xiang, LU Baodong, et al. Influence of bedding planes on stress wave propagation in hydraulic blasting[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(1): 17-25.

[8] 王新明.基于TBM法的地铁大断面水压爆破技术[J].工程爆破,2021,27(5):47-52.
WANG Xinming. Water pressure blasting technology for a metro large cross section based on the TBM method[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(5): 47-52.

[9] 邵珠山,杨跃宗,米俊峰,等.水压爆破中波衰减规律及致裂机理的理论研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(6):820-826.
SHAO Zhushan, YANG Yuezong, MI Junfeng, et al. Theoretical study on the wave attenuation law about water pressure blasting[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 49(6): 820-826.

[10] 蔡永乐,付宏伟.水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究[J].煤炭学报,2017,42(4):902-907.
CAI Yongle, FU Hongwei. Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 902-907.

[11] 赵晓明，杨玉民，蒋楠，等．深埋引水隧洞光面爆破周边孔装药结构优化试验研究[J]．高压物理学报，2022，36(4)：206-216.
ZHAO Xiaoming，YANG Yumin，JIANG Nan，et al. Optimization of charging structure of surrounding holes in smooth blasting of deep diversion tunnel[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2022，36(4)：206-216.

[12] HOU Xiaofeng，SHI Xiuzhi，QIU Xianyang，et al. Rock damage control for large-diameter-hole lateral blasting excavation based on charge structure optimization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2020，106：103569.

[13] 曹桂祥．炮孔复合装药对爆破地震波影响的试验研究[J]．工程爆破，2003，9(4)：14-17.
CAO Guixiang. Study on seismic wave caused by a compound charge in a blasthole[J]. Engineering Blasting，2003，9(4)：14-17.

[14] 冯涵，张学民，王立川，等．隧道钻爆法水封装药结构爆破引起振动计算分析[J]．振动与冲击，2020，39(7)：93-100.
FENG Han，ZHANG Xuemin，WANG Lichuan，et al. Calculation and analysis for water-sealed charge structure blasting vibration in tunnel drilling and blasting construction[J]. Journal of Vibration and Shock，2020，39(7)：93-100.

[15] 凌同华，李夕兵．基于小波变换的时-能分布确定微差爆破的实际延迟时间[J]．岩石力学与工程学报，2004，23(13)：2266-2270.
LING Tonghua，LI Xibing. Time-energy analysis based on wavelet transform for identifying real delay time in millisecond blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(13)：2266-2270.

[16] 周俊汝．爆破地震波传播过程中振动主频的衰减规律研究[D]．武汉：武汉大学，2017.
ZHOU Junru. Study on attenuation of dominant frequency of blast-induced vibration[D]. Wuhan：Wuhan University，2017

[17] 孙海利．基于 ANSYS/Ls-dyna 仿真模拟对条形药包爆破地震效应的研究[D]．西安：长安大学，2015.
SUN Haili. The study of linear charge blasting seismic effect based on Ansys/Ls-dyna simulation[D]. Xi'an：Chang'an University，2015.

[18] 袁晓龙．隧道楔形掏槽爆破技术研究[D]．淮南：安徽理工大学，2014.
YUAN Xiaolong. Research on blasting technology of wedge-shaped cutting for rock tunnel[D]. Huainan：Anhui University of Science and Technology，2014.

[19] 冷振东，卢文波，胡浩然，等．爆生自由面对边坡微差爆破诱发振动峰值的影响[J]．岩石力学与工程学报，2016，35(9)：1815-1822.
LENG Zhendong，LU Wenbo，HU Haoran，et al. Studies on influence of blast-created free face on ground vibration in slope blasts with millisecond-delays[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2016，35(9)：1815-1822.

[20] LEE S G，BAEK Y H，LEE I H，et al. Numerical simulation of 2D sloshing by using ALE2D technique of LS-DYNA and CCUP methods[C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. Division of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering. Korea Maritime University，Busan，Korea；Department of Naval Architecture & Ocean Engineering，Seoul National University，Seoul，Korea，2010.

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会．爆破安全规程：GB 6722—2014[S]．北京：中国标准出版社，2014.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China，National Standardization Administration. Safety regulation for blasting：GB 6722—2014[S]. Beijing：Standards Press of China，2014.

**通信作者：**赵立财(1985—)，男，博士，正高级工程师。
E-mail：zhaolicai1314@foxmail.com