

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.019

减震孔内气体填充对水下钻孔爆破地震波的 削减机制与参数优化研究*

王勇¹, 李军², 盛益明³, 刘广进³, 吴立³

(1. 长江航道局, 武汉 430000; 2. 长江重庆航道工程局, 重庆 400011;
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要: 水下钻孔爆破在航道整治等工程中应用广泛,但其产生的地震波对邻近建(构)筑物构成显著安全风险。为有效控制爆破振动,提出了在减震孔内充填气体的联合防控技术,系统分析了其减震机理,利用数值模拟方法研究了9种不同孔排距气体填充减震孔及不采用气体充填减震孔布置下的减震效果,并结合现场试验验证了气体充填措施的有效性。研究表明:减震孔通过改变岩体波阻抗分布,形成非连续界面,内部气体充填可进一步增强地震波的反射与衰减。数值模拟显示:在孔距0.6 m、排距1 m的布置下,减震效果最佳;若不采用气体充填,峰值振速上升10%~28%。现场试验中,气体充填减震孔对地震波的降幅最高达40%。本研究为水下爆破振动控制提供了可靠的理论依据与工程实践参考。

关键词: 水下钻孔爆破; 减震孔; 气体填充; 联合防控措施

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0187-11

Study on Attenuation Mechanism and Parameter Optimization of Blast-induced Seismic Waves in Underwater Drilling Blasting Via Gas-filled Vibration-reduction Holes

WANG Yong¹, LI Jun², SHENG Yi-ming³, LIU Guang-jin³, WU Li³

(1. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430000, China; 2. Changjiang Chongqing
Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400011, China; 3. Faculty of Engineering,
China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Underwater drilling and blasting are extensively employed in hydraulic engineering projects like waterway regulation, yet the induced seismic waves present substantial safety hazards to adjacent structures. This research introduces an integrated vibration mitigation strategy utilizing gas-cushioned shock-absorption boreholes for effective blast vibration control. The vibration attenuation mechanism was thoroughly examined through systematic analysis. Numerical simulations evaluated the vibration suppression performance across 9 distinct configurations of gas-filled shock-absorption holes with varying row and spacing arrangements, with comparative analysis against non-gas-filled conditions. Field test validation confirmed the practical efficacy of the gas-filled shock-absorption hole technology.

收稿日期(Date of reception): 2025-10-30

网络首发日期(Published online): 2025-12-22

作者简介: 王勇(1974-), 男, 江西南康人, 硕士、高级工程师, 主要从事航道整治工程建设管理, (E-mail) vdpaik@163.com。

通信作者: 吴立(1963-), 男, 湖南株洲人, 博士、教授、博士研究生导师, 主要从事爆破工程研究, (E-mail) lwu@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(41672260)

About the author: WANG Yong(1974-), born in Nankang city, Jiangxi province, master, senior engineer, mainly engaged in waterway regulation project construction management, (E-mail) vdpaik@163.com.

Corresponding author: WU Li(1963-), male, born in Zhuzhou city, Hunan province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in blasting engineering research, (E-mail) lwu@cug.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China(41672260)

The results demonstrate that shock-absorption holes modify the rock mass wave impedance distribution, generating discontinuous interfaces. Gas filling in these holes significantly improves wave reflection and attenuation. Numerical analysis identifies an optimal configuration with 0.6 m hole spacing and 1 m burden for maximum blast vibration reduction, and comparative data reveals 10% ~ 28% higher peak particle velocities in non-gas-filled scenarios. Finally, the field verification confirms up to 40% seismic wave reduction using gas-filled shock-absorption holes. This study provides a reliable theoretical basis and practical reference for vibration control in underwater blasting.

Key words: underwater drill blasting; shock-absorption holes; gas filling; integrated mitigation measures

水下钻孔爆破因其经济性高、效率突出且稳定性良好,已成为航道疏浚等工程中的主流施工技术^[1]。尽管该技术能创造显著的社会经济效益,但其产生的爆破振动可能对邻近建(构)筑物造成结构性损伤。相较于陆地爆破,水下爆破地震波的产生机制更为复杂:一方面炸药在岩土介质中爆炸时直接释放能量;另一方面,水中冲击波对水底岩体的剧烈冲击会诱发显著的二次地震效应^[2]。同时,由于水的不可压缩性限制了爆炸抛掷作用,加之水下堵塞效应显著,使得更多的爆炸能量转化为振动能,导致水下爆破产生的地震波强度通常高于陆地岩土爆破^[3]。

为降低水下爆破的地震波危害,国内外学者围绕减震方法与机理开展了系列研究。在防护结构与材料方面,Cao 等采用 FEM-SPH 耦合方法研究了钢纤维增强多孔混凝土防护结构在水下爆炸荷载下的损伤过程、动力响应及其保护效果^[4]。在数值模拟与工程效应分析方面,陈春晖等基于 ANSYS/LS-DYNA 平台对比了不同起爆方式及减震孔充填介质对邻近建筑物水下爆破的减震效果^[5];胡伟才等通过建立仿真模型^[6],重点分析了水下爆破荷载作用下临近桥墩的动力响应规律。在减震措施与优化方面,叶风明等运用 AUTODYN 软件并结合试验^[7],系统研究了气泡帷幕距离与供风量对水中冲击波峰值超压、比冲量等参数的影响规律;曹棉等则通过数值模拟与现场监测^[8],评估了减震孔与气泡帷幕协同作用下的减震效果及对桥墩安全性的影响。针对水下减震孔效果欠佳的问题,王勇等基于地震波跨介质传播特性^[9],提出了将水下减震孔与气泡帷幕联合布设的优化思路。

综合分析可见,现有研究主要集中于气泡帷幕对水中冲击波的削弱作用。然而在实际工程中,水击波的影响范围主要限于水中物体,而水下爆破产生的地震波通过水-岩耦合作用传递能量,不仅影响水底结构,更会进一步威胁岸上邻近建(构)筑物的安全。因此,针对水下爆破地震波传播特性及其减震措施的深入研究,对工程安全控制与环境保护具

有重要意义。

聚焦于提升水下爆破地震波的减震效果,在现有减震孔方法基础上,提出采用气体充填增强减震效果的新思路。首先分析气体充填减震孔的减震机理;其次,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件,系统模拟 9 种不同孔排距气体充填方案及无气体充填条件下的地震波传播过程,对比分析其减震效果,明确最佳孔排距参数及气体充填对峰值振速的削减效应;最后,通过现场试验对气体充填减震孔的减震效果进行验证,以期水下爆破振动控制提供一种有效、可行的技术方案。

1 减振孔减振机理

减振孔通过增强岩体非均质性来改变波阻抗分布,从而扰乱地震波传播并降低透射能量,实现隔震^[10]。因其尺寸远小于爆破区,可视为非完全固结界面,故地震波传播问题转化为应力波与不连续界面的相互作用研究。采用节理刚度界面模型能有效表征该作用:将界面看作具位移间断的弹性接触面,其刚度(应力/位移间断值)可通过静载试验测定。该模型不仅能反映刚度变化对波传播的影响,还可揭示岩体界面的高频滤波特性(图 1)。

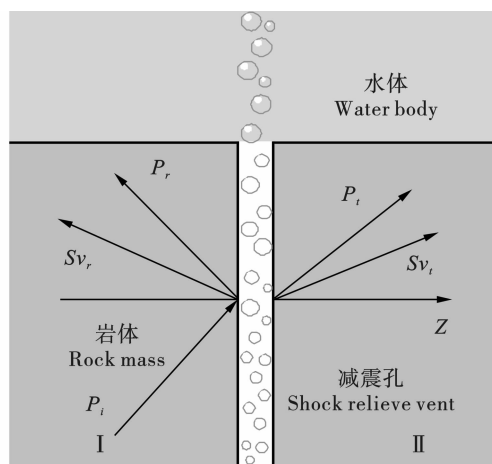


图 1 地震波入射图

Fig. 1 Schematic diagram of seismic wave incidence

图 1 中 P 和 SV 分别表示纵波和横波,下标 i 、 t 、

r 对应入射、透射和反射波。由于界面连续性假设(无裂缝存在),可建立以下关系式

$$\begin{cases} \sigma_{zz}(\text{I}) = \sigma_{zz}(\text{II}) = \sigma_{zz} \\ \sigma_{zx}(\text{I}) = \sigma_{zx}(\text{II}) = \sigma_{zx} \end{cases} \quad (1)$$

根据节理刚度的定义^[11],有

$$\begin{cases} u_z(\text{I}) - u_z(\text{II}) = \frac{\sigma_{zz}}{K_n} \\ u_x(\text{I}) - u_x(\text{II}) = \frac{\sigma_{zx}}{K_s} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 表示应力, u 表示位移; z 和 x 分别表示坐标轴方向;I 区代表减震孔入射侧岩体区域,II 区代表折射侧岩体区域; K_n 和 K_s 分别表示减震孔的法向刚度与切向刚度。

界面上的应力可以由胡克定律计算出^[12]

$$\begin{cases} \sigma_{zz} = \lambda \frac{\partial \mu_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \mu_x}{\partial z} \\ \sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial \mu_x}{\partial z} + \frac{\partial \mu_z}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ 表示拉梅常数; μ 代表泊松比; μ_x 为 x 轴向位移函数。

工程计算时,常将应力波简化为垂直入射减震孔的简化模型。当平面 P 波以正入射方式作用于减震孔界面时,仅存在反射 P 波与透射 P 波,不产生 SV 波转换。该工况满足如下边界条件

$$\begin{cases} A_r = \frac{-\omega \rho c_p}{2K_n + \omega \rho c_p} A_i \\ A_t = \frac{-2K_n}{2K_n + \omega \rho c_p} A_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_r 为反射 P 波的幅值; A_t 为透射 P 波的幅值; A_i 为入射 P 波的幅值; ω 分别为入射应力波的圆频率; ρ 为岩石的密度; c_p 为岩体纵波速。其中:

$\lambda_{ir} = \frac{-\omega \rho c_p}{2K_n + \omega \rho c_p}$, $\lambda_{it} = \frac{-2K_n}{2K_n + \omega \rho c_p}$, λ_{ir} 为反射系数, λ_{it} 为透射系数。

分析上式可知应力波通过减震孔有如下特征:

(1) 反射系数 $|\lambda_{ir}| = \frac{\omega \rho c_p}{2K_n + \omega \rho c_p} \leq 1$, 透射系数 $|\lambda_{it}| = \frac{2K_n}{2K_n + \omega \rho c_p} \leq 1$, 减震孔周边岩石的波阻抗差异是控制其隔震性能的关键因素,这种阻抗突变能有效衰减爆破地震波能量。岩石与空气比岩石与水的波阻抗差异更大,因此在减震孔内充填气体,减震效果更佳。

(2) 节理刚度参数直接影响透射波幅值:在刚度为零的极限条件下,减震孔退化为理想隔震屏障;

而当刚度趋近无限大时,为连续岩体,丧失隔震功能。

2 模型建立及参数设置

2.1 工程概况

长江重庆河段受天然条件限制,航道通航能力严重不足,主要表现为:河床存在大量石梁、突咀等碍航礁石,导致消落期末至汛期期间礁石区水域持续碍航;航道水流条件复杂,实际可航水域宽度不足,存在显著的通航安全隐患。鉴于该河段分布着众多需重点保护的水中及岸上构筑物,本研究选取该工程为对象,系统开展水下钻孔爆破减震孔与气泡帷幕的数值模拟及联合防控现场试验,对比分析单一措施与联合防控方案效果差异。

2.2 计算模型

为研究减震孔孔排距对减震效果的影响,确定减震孔最佳孔排距,建立了水下减震孔与气泡帷幕联合防控台阶单孔爆破模型。为提高计算效率,以炮孔中心线为轴线,建立 1/2 模型及对称边界。根据现场情况,模型长 25 m,宽 1.5 m、高 10 m,其中岩层高度 5 m,水深 5 m。采用不耦合装药,炮孔直径为 11 cm,药包直径为 8 cm,装药长度 4.4 m,堵塞长度为 0.6 m,减震孔长度 4 m,台阶长 2 m、宽 1.5 m、高 2 m。设置两排减震孔,减震孔内部设置气泡,气泡向上传递形成气泡帷幕,水中气泡帷幕高度 5 m,长度及宽度由孔排距决定,模型计算终止时间为 15000 μs 。不同工况条件下的减震孔孔排距见表 1 所示。模型采用孔底起爆,单孔爆破,分别建立 9 个工况下的三维模型。数值计算模型及监测点位置如图 2 所示。

为验证减震孔气体充填的有效性,在上述确定的减震孔最佳孔排距条件下,研究还建立了不采用气体充填时(减震孔内全为水体)的数值计算模型,如图 3 所示。

LS-DYNA 中没有固定的单位制,模型采用 cm- μs -g 单位制。两个对称面设置对称边界,通过关键字 * BOUNDARY_SPC_SET 模拟对称约束。底面设置线约束与角约束以确保应力波不会在底面发生反射;其余两个面设置无反射边界条件并通过关键字 * BOUNDARY_NON_REFLECTING 模拟无限边界条件。实体建模采用 Solid164 单元,岩层为 Lagrange 单元,炸药、空气、水和堵塞材料为 Ale 单元;固体与液体使用 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 进行耦合。

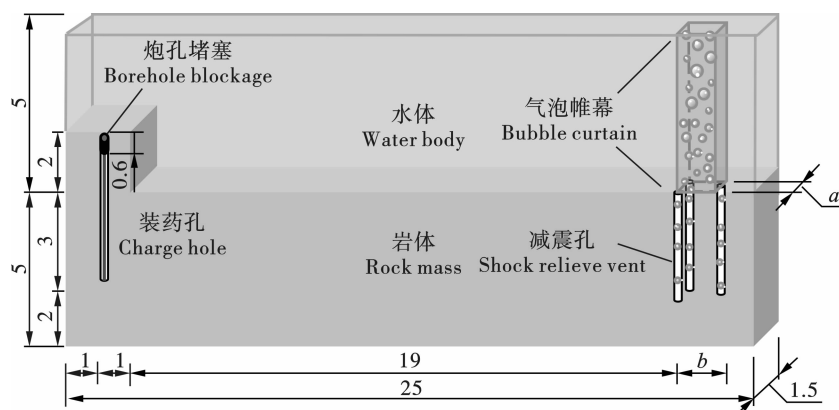


图 2 计算模型 1 尺寸(单位:m)

Fig. 2 Dimensions of model 1(unit:m)

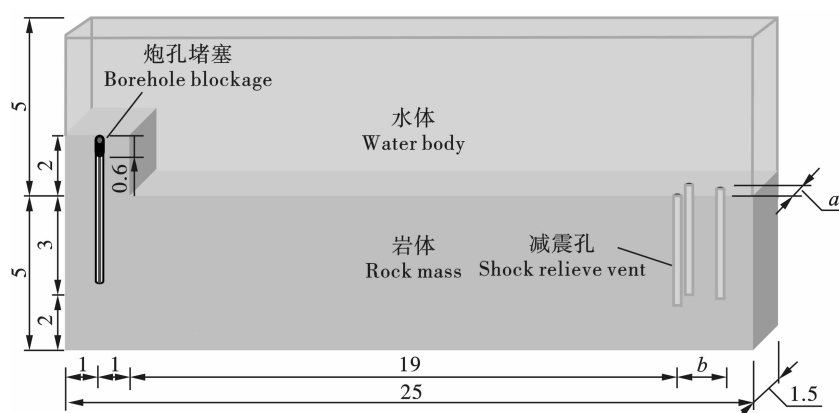


图 3 计算模型 2 尺寸(单位:m)

Fig. 3 Dimensions of model 2(unit:m)

表 1 减振孔孔排距

Table 1 Shock absorption hole row spacing

变量 Variable	工况 1 Working condition 1	工况 2 Working condition 2	工况 3 Working condition 3	工况 4 Working condition 4	工况 5 Working condition 5	工况 6 Working condition 6	工况 7 Working condition 7	工况 8 Working condition 8	工况 9 Working condition 9
孔距 Hole spacing a/m	0.6	0.6	0.6	1	1	1	1.5	1.5	1.5
排距 Burden b/m	2	1.5	1	2	1.5	1	2	1.5	1

2.3 材料计算参数选择

(1) 炸药材料

采用高能炸药材料模型 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 并选用 JWL 状态方程描述炸药的爆轰压力^[13,14]

$$P(V, E) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (5)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为 JWL 状态方程参数; E 为炸药的内能; V 为相对体积。

基于工程实际采用的乳化炸药特性参数, 确定

了数值模拟所需的炸药材料参数及其状态方程系数, 具体数值见表 2 所列。

(2) 水体及空气材料

LS-DYNA 中 * MAT_NULL 材料模型通常用来模拟空气及水这一类流体材料, 并选用线性多项式状态方程 * EOS_GRUNEISEN 和 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 分别模拟水体和空气, 状态方程如下^[15]

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (6)$$

$$p = C_0 + C_1\mu^1 + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (7)$$

式中:压力 p 表示介质所受的动压,Pa; E 代表单位体积内的比内能,J/m³; ρ 和 ρ_0 分别表示材料的瞬时密度和初始密度,kg/m³; c 为介质中的声速,m/s。

方程中的常数项包括 γ_0 (Grüneisen 常数)、 $S_1 \sim S_2$ (冲击波参数) 以及 $C_0 \sim C_6$ (多项式拟合系数)。 μ 定义为材料的比体积, α 是 Grüneisen 系数的修正项。
对于水体和空气这两种介质材料,其具体的状态方程参数分别列于表 3 和表 4 中。

表 2 岩石乳化炸药参数
Table 2 Parameters of rock emulsion explosive

密度 Density ρ / (g · cm ⁻³)	爆速 Detonation velocity/ (m · s ⁻¹)	C-J 压力 C-J pressure/ GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /GPa
1.15	4500	9.7	214.4	0.182	4.20	0.90	0.15	4.192

表 3 水材料状态方程计算参数
Table 3 EOS (Equation of State) parameters for water material

密度 Density ρ /(g · cm ⁻³)	C	S_1	S_2	S_3	γ_0	A	E	ν_0
1.025	0.1480	2.56	-1.986	0.2268	0.5	0	0	0

表 4 空气材料状态方程计算参数
Table 4 EOS parameters for air material

密度 Density ρ /(g · cm ⁻³)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E	ν_0
1.18×10^{-3}	-1.00E-06	0	0	0	0.4	0.4	0	2.500E-06	1.0

(3) 岩体与堵塞材料

岩体和堵塞本构模型采用 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 双线性随动硬化模型,该模型能够同时表征岩体的弹塑性变形特征和强化效应,具体包括:1)考虑随动强化和各向同性强化两种硬化机制;2)反映材料应变率效应;3)具备失效判断功能。这种本构关系较好地描述了岩体在动载作用下的力学响应特性^[16,17]。屈服应力 σ_y 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 存在如下关系

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] \cdot \left[\sigma_0 + \beta \frac{E_0 E_{tan}}{E_0 - E_{tan}} \epsilon_p^e \right] \quad (8)$$

式中: σ_0 表示岩体初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 代表加载应变率; C 和 P 是 Cowper-symonds 应变率模型的材料参数; E_0 为岩体杨氏模量; E_{tan} 表征切线模量; β 为硬化比例参数(取值范围 0 ~ 1,用于确定各向同性硬化与随动硬化的混合比例); ϵ_p^e 则用于描述材料的有效塑性应变。这些参数共同构成了岩体在动载作用下的弹塑性本构关系。

基于工程现场采样和室内物理力学试验结果,确定爆破区域主要岩层(中风化砂岩)的材料参数如表 5 所示。

表 5 岩石材料计算参数
Table 5 Computational parameters for rock material

密度 Density ρ / (g · cm ⁻³)	弹性模量 Elastic modulus E /GPa	泊松比 Poisson's ratio μ	屈服应力 Yield stress σ_y /MPa	剪切模量 Shear modulus G /GPa	硬化系数 Hardening coefficient β
2.31	23	0.16	30	21.00	0.5

3 计算结果及分析

3.1 爆破地震波传播过程

采用底部起爆方式时,爆轰波自炮孔底端向上高速传播,其动态过程及爆压分布特征如图 4 所示。

根据图 4 的数值模拟结果,炸药爆炸过程的爆轰波压力随时间的演化过程为: $t = 0 \mu s$ 时刻炸药在炮孔底部被引爆,孔底压力急剧增大; $t = 49.9 \mu s$ 时刻,炮孔底部单元出现明显的爆轰压力;当 $t = 249.9 \mu s$ 时刻,炸药爆轰波传至炮孔中部,炮孔单元压力持续

增加;当 $t = 1000 \mu\text{s}$ 时刻,炸药爆轰波传至堵塞处,并在孔口和台阶处产生水击波,炮孔单元压力增大至峰值;当 $t = 2699.8 \mu\text{s}$ 时刻,水击波传播至水面处,水平方向水击波继续传播;当 $t = 5548.1 \mu\text{s}$ 时

刻,水击波基本完成消散,地震波继续向前传播;当 $t = 7049.6 \mu\text{s}$ 时刻,爆破压力传递至减振孔,并继续向后传播。

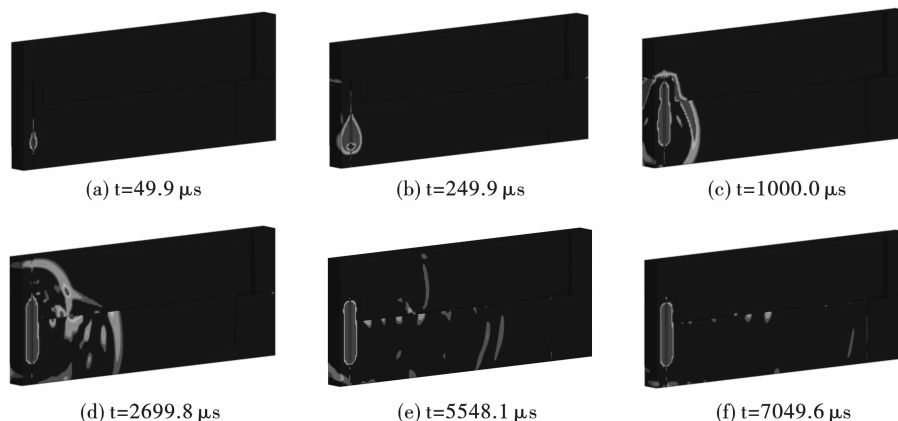


图4 不同时刻炸药爆轰压力

Fig. 4 Detonation pressure distribution at different times

3.2 爆破地震波传播结果及对比分析

为研究地震波传播及衰减规律,沿岩层中部设置测线,共包括4个监测点,爆心距 R 分别为6 m、12 m、18 m、24 m。其中24 m为减振孔外监测点。各监测点峰值振速 v 统计数据如表6所示,各测点三个方向及合速度的峰值随爆心距衰减曲线如图5所示。

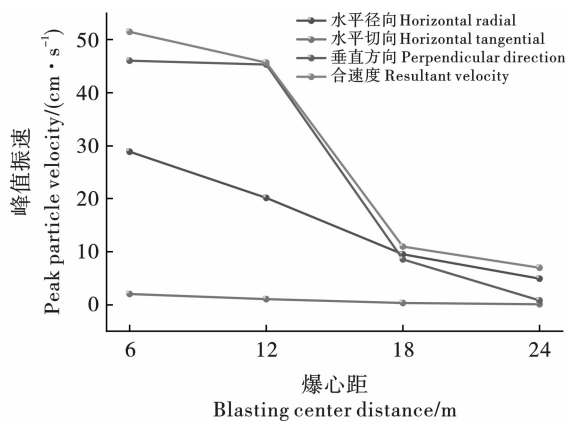


图5 工况1各方向峰值振速衰减曲线

Fig. 5 Peak vibration velocity attenuation curves in all directions

根据监测点位置(6 m、12 m、18 m位于减振孔前,24 m位于减振孔后),表6和图5中工况1的数据清晰揭示了地震波传播规律及减振孔的显著作用。在减振孔前区域,地震波呈现典型的自然衰减趋势:合速度从6 m处的51.483 cm/s衰减至18 m处的10.940 cm/s。但振动能量的主导分量在此过程中发生了明显转变,在6 m和12 m处垂直方向振

速占主导地位,但到18 m和24 m处,水平径向振速已超过垂直方向,成为新的主导分量,这反映了地震波在岩体介质中传播时能量分布的动态重分配特性。在跨越减振孔后(24 m监测点),所有方向的振速均出现阶跃式下降,特别是垂直方向振速从18 m处的8.523 cm/s急剧降至0.754 cm/s,降幅超过90%。这一现象明确证实了减振孔通过形成波阻抗不连续界面,阻隔和反射了垂直方向的振动能量。这种衰减机制使得减振孔后方的振动环境发生改变,达到了地震波降速的目的。研究结果为优化减振孔布置参数提供了重要的理论依据。

根据表6和图6中不同工况下爆心距24 m处的峰值振速数据,可以观察到减振孔孔排距对减震效果的显著影响。总体而言,孔排距越小,峰值振速越低,减震效果越好。当孔距为0.6 m、排距为1 m时(工况3),合速度峰值振速最低(6.608 cm/s),而随着孔排距增大,工况4(孔距1 m、排距2 m)和工况7(孔距1.5 m、排距2 m),振速分别上升至7.081 cm/s和7.516 cm/s。这一趋势表明,较小的孔排距能够增强应力波在减振孔之间的反射和干涉,从而更有效地衰减地震波能量。但过小的孔排距在实际施工中面临诸多挑战。钻孔密度增加会显著延长施工时间,提升成本;且在河道水流较急的环境中,套管偏移加剧,过小的孔排距容易导致穿孔或卡钻现象,增加施工风险和安全隐患。因此,单纯追求最小孔排距并非最优选择,需在减震效果与施工可行性之间寻求最佳选择。

表 6 各监测点峰值振速
Table 6 Peak particle velocity at monitoring points

工况 Working condition		工况 1 (0.6 m * 2 m) Working condition 1				工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
						(0.6 m * 1.5 m)	(0.6 m * 1 m)	(1 m * 2 m)	(1 m * 1.5 m)	(1 m * 1 m)	(1.5 m * 2 m)	(1.5 m * 1.5 m)	(1.5 m * 1 m)
						Working condition	Working condition	Working condition	Working condition	Working condition	Working condition	Working condition	Working condition
						2	3	4	5	6	7	8	9
爆心距 R/m		6	12	18	24	24	24	24	24	24	24	24	24
峰值 振速 Peak particle velocity $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	水平径向 Horizontal radial	28.875	20.184	9.565	4.879	4.699	4.627	4.912	4.893	4.735	5.338	5.062	4.874
	水平切向 Horizontal tangential	2.055	1.042	0.287	0.111	0.094	0.088	0.143	0.129	0.026	0.294	0.206	0.188
	垂直方向 Perpendicular direction	46.027	45.360	8.523	0.754	0.493	0.413	0.876	0.862	0.566	0.974	0.897	0.483
	合速度 Resultant velocity	51.483	45.680	10.940	6.945	6.698	6.608	7.081	7.024	6.987	7.516	7.095	6.955

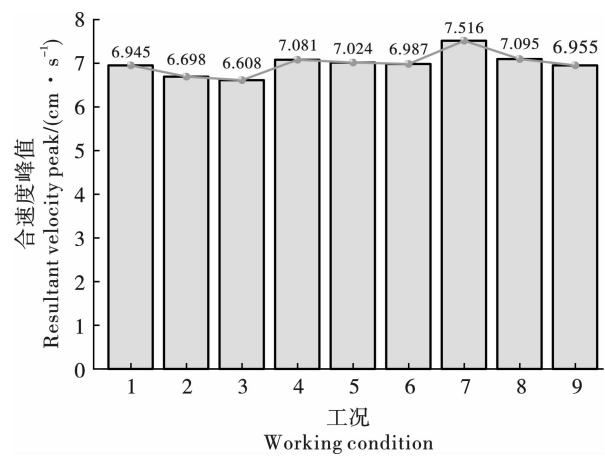


图 6 各工况减震孔后合速度峰值振速对比
Fig. 6 Comparison of peak vibration velocity of resultant velocity

为对比分析减震孔内充填气体对减震效果的影响,采用模型 2(减震孔内含水)进行数值计算,得到爆心距 24 m 处的峰值振速,见表 7 所示。

若减震孔内未实施气体充填,三个方向及合速度的峰值振速将普遍上升 10% 至 28%,具体增幅受孔排距布置与振动方向共同影响。该现象的根本原因在于充填介质的波阻抗特性:空气的波阻抗显著低于水体和岩体,能够在界面处形成强烈的波阻抗失配,从而促使更多爆破应力波能量发生反射与散射;而水的波阻抗介于空气与岩体之间,与岩体更为接近,导致更多波动能量透射传播。

对比表 6 与表 7 数据可知,无论在气体充填还是水体充填条件下,工况 3(孔距 0.6 m × 排距 1 m)均表现出最佳的减震效果。值得注意的是,在气体充填条件下(表 6),工况 2(0.6 m × 1.5 m)的减震效果与工况 3 差距不大;而在无气体充填条件下(表 7),两者差距更为明显。这说明在采用气体充填时,工况 2 的孔排距布置已能接近工况 3 的降振效能。因此,在施工条件允许且可实现气体充填的情况下,建议优先采用工况 3 的孔排距参数;若现场水流速度较高,为保障施工安全而需适当增大孔距时,亦可采用气体充填下的工况 2 参数,在安全性与减震效果之间取得平衡。

在实际施工中,对减震孔进行气体充填,实质上是向孔内引入大量气泡,破坏水介质的连续性,形成以气泡为主导的“气-液”混合界面。这些界面因波阻抗差异而产生强烈的应力波散射效应。气泡比例越高,界面散射作用越显著,从而进一步提升减震效果。

4 现场试验验证

4.1 试验设备及布置方式

试验分为水面上和水面下两部分,水面上由驳船、空压机和主输气管组成;水面下方由减震孔,次输气管、出气管组成,如图 7 所示。

试验采用耐高压橡胶软管作为主/次输气管道,

通过气管卡箍实现管道连接。出气导管采用铁质水管制作,其下部焊接配重块并钻孔,上部与次输气管相连,管身设有多组出气孔。主输气管一端连接驳船空压机(水面以上),另一端与多组次级管道相连

(水面以下),试验时,在减振孔与气泡帷幕作用范围内的岸上区域布设爆破测振设备。具体布置方式及实际气泡产生效果见图 7(a)。

表 7 模型 2 爆心距 24 m 处的峰值振速

Table 7 Peak particle velocity at 24 m from the blast center in model 2

工况 Working condition	工况 1 (0.6 m * 2 m) Working condition 1	工况 2 (0.6 m * 1.5 m) Working condition 2	工况 3 (0.6 m * 1 m) Working condition 3	工况 4 (1 m * 2 m) Working condition 4	工况 5 (1 m * 1.5 m) Working condition 5	工况 6 (1 m * 1 m) Working condition 6	工况 7 (1.5 m * 2 m) Working condition 7	工况 8 (1.5 m * 1.5 m) Working condition 8	工况 9 (1.5 m * 1 m) Working condition 9
	Horizontal radial	Horizontal tangential	Perpendicular direction	Resultant velocity	Horizontal radial	Horizontal tangential	Perpendicular direction	Resultant velocity	Horizontal radial
峰值 振速 Peak particle velocity $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.099	5.545	5.09	5.993	5.676	5.352	6.833	6.125	5.702
	0.139	0.111	0.097	0.174	0.151	0.029	0.376	0.249	0.221
	1.443	0.942	0.654	1.509	1.321	0.902	1.807	1.505	0.905
	8.681	7.904	7.269	8.639	8.148	7.895	9.62	8.585	8.137

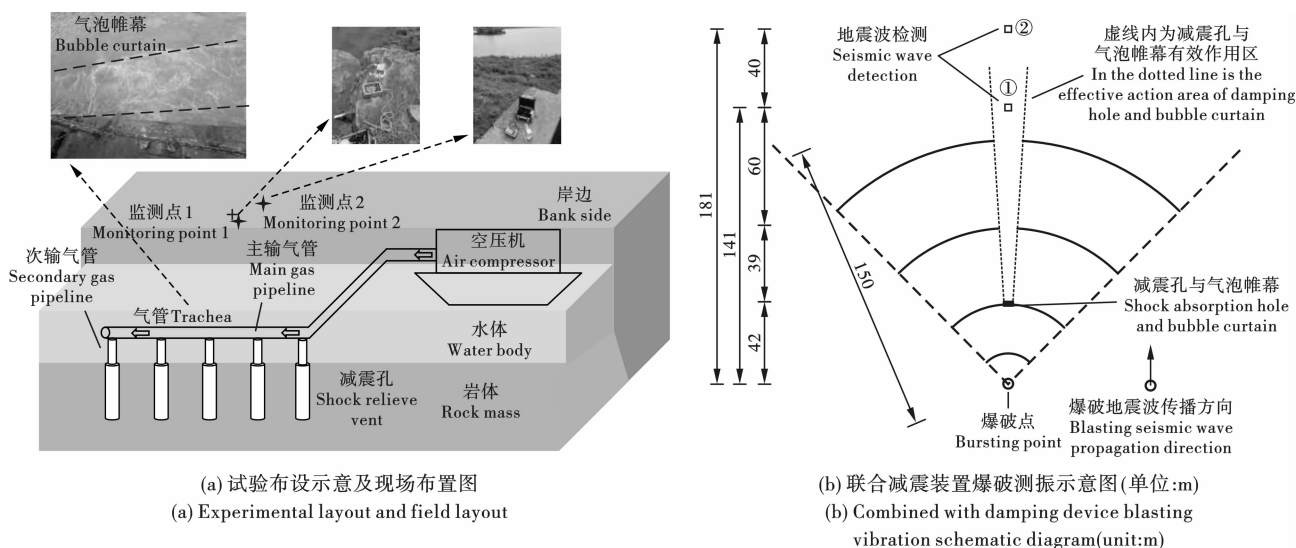


图 7 试验布设原理示意及现场布置图

Fig. 7 Experimental layout principle and field layout

试验设置两种工况:第 1 次同时启用减振孔与气泡帷幕联合降振装置,第 2 次仅设置减振孔。每种工况下分别采用 20 kg、30 kg 和 40 kg 三种装药量进行爆破试验,现场采用 2 号岩石乳化炸药,单卷炸药长度为 50 cm,质量为 2 kg,装药孔分别为 2 个、3 个和 4 个,均为同时起爆。其中联合降振装置分别进行开启和关闭状态下的对比测试,共完成 6 组

试验。各测点与爆源的距离及对应装药量详见表 8。

4.2 结果与分析

4.2.1 地震波监测结果

爆破后,在有减振孔与气体充填的情况下,三次爆破测点的地震波峰值分别为 0.35 cm/s、0.51 cm/s 和 0.54 cm/s,在去除气体充填措施,仅有水下减振

孔的情况下,三次爆破测点的地震波峰值分别为 数据如图 8 所示。
0.47 cm/s、0.63 cm/s 和 0.72 cm/s。其中一组监测

表 8 爆源及监测点参数

Table 8 Parameters of blast source and monitoring points

炸药量 Explosive charge/kg	孔数 Hole count	炮孔深度 Blasthole depth/m	减震孔深度 Damping hole depth/m	爆心距 Distance from blast center/m	
				第 1 次 Test 1	第 2 次 Test 2
20	2			135	129
30	3	3	4	129	123
40	4			125	119

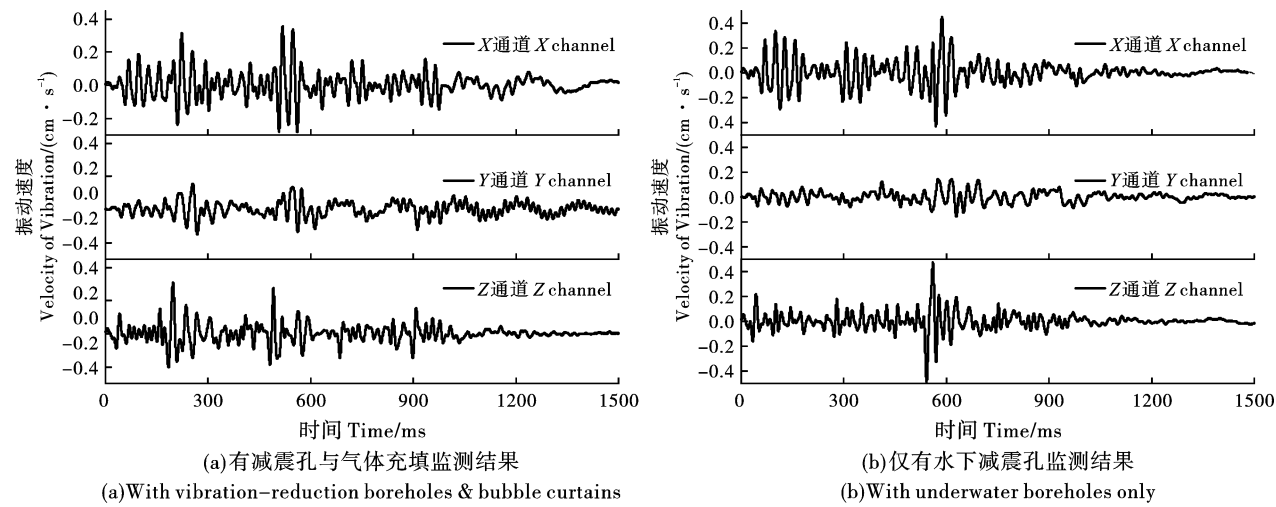


图 8 地震波峰值速度监测结果

Fig. 8 Monitoring results of seismic wave peak velocities

4.2.2 结果分析及效果评价

试验过程中爆源位置发生 6 m 偏移,导致监测点与爆源的相对距离发生变化,使得两次爆破测得的地震波峰值速度无法直接进行对比分析。为解决这一问题,研究采用该区域历史爆破测振数据,基于萨道夫斯基公式进行回归分析,得出试验场地的 k 、

α 系数,拟合公式如式(9)

$$A = 200 \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.5} \quad (9)$$

根据已知 k 、 α 系数和单段最大药量,可计算出不同爆心距下的预测振速。试验中两次爆破在不同爆心距下的预测振速与实测振速对比结果见表 9。

表 9 不同爆心距监测点预测与实测振速

Table 9 Predicted vs measured PPV at different distances

减震孔与气泡帷幕 With shock-absorption holes and bubble curtains				只存在减震孔 Combined with Damping Device			
爆心距 Distance from blast center/m	预测振速 Predicted PPV/ (cm · s ⁻¹)	实测振速 Measured PPV/ (cm · s ⁻¹)	降幅 Reduction	爆心距 Distance from blast center/m	预测振速 Predicted PPV/ (cm · s ⁻¹)	实测振速 Measured PPV/ (cm · s ⁻¹)	降幅 Reduction
135	0.57	0.35	39%	129	0.61	0.47	23%
129	0.75	0.51	32%	123	0.80	0.63	21%
125	0.90	0.54	40%	119	0.97	0.72	26%

由表 9 数据可知:单独采用水下减震孔时,地震波振速降幅分别为 23%、21% 和 26%;而采用减震孔与气体充填联合防控方案时,振速降幅提升至

39%、32% 和 40%;两者相比,联合防控措施的减震效率比单独采用水下减震孔,增强了 16%、11% 和 14%。试验结果表明:联合防控方案的减震效果显

著优于单一措施,说明气体充填与减振孔形成互补效应。进一步说明了气体充填在减振孔内形成气-液两相介质,阻断能量向岩体传递路径。

5 结论

通过理论分析、数值模拟与现场试验相结合的方法,系统研究了减振孔内气体填充对水下钻孔爆破地震波的削减机制与布设参数优化,主要结论如下:

(1)明确了气体填充增强减震效果的机理。气体填充使减振孔形成远低于水体和岩体的波阻抗界面,显著提高界面的反射系数与能量散射比例,从而有效阻隔爆破应力波的传播路径,其减震性能优于传统水体充填方式。

(2)揭示了减振孔布设参数与气体填充对降振效果的协同影响规律。数值分析表明,孔距 0.6 m、排距 1 m(工况 3)的布置方案减震效果最优;在优化孔排距基础上,气体填充相较水体填充可使峰值振速进一步降低 10%~28%。此外,气体填充条件下孔排距为 0.6 m×1.5 m(工况 2)亦能获得接近最优工况的减震效果,为工程适应性布置提供了依据。

(3)验证了气体填充减振孔与气泡帷幕联合应用的实际效能。现场试验表明:该联合防控方案可使地震波峰值振速降低 32%~40%,减震效果显著优于单一水下减振孔措施(降幅 21%~26%)。气体填充形成的“气-液”双相界面可有效增强振动能量的散射与衰减,具有较好的工程适用性与推广价值。

参考文献 (References)

- [1] 万佳伟,钟冬望,徐顺香,等.水下爆破减振孔对减振效果的影响研究[J].爆破,2025,42(2):158-166,177.
- [1] WAN Jia-wei,ZHONG Dong-wang,XU Shun-xiang,et al. Effects of underwater blasting vibration-reducing holes on vibration reduction[J].Blasting,2025,42(2):158-166,177. (in Chinese)
- [2] 张占峰.复杂城市环境下水下钻孔爆破安全控制研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [2] ZHANG Zhan-feng. Research on safety control of underwater drilling blasting in complex urban environments [D].Guangzhou:South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] 刘屹硕,蔡子勇,乔世范,等.引水工程水下钻孔爆破水击波特性[J].爆破,2023,40(4):132-141.
- [3] LIU Yi-qi,CAI Zi-yong,QIAO Shi-fan,et al. Characteristics of water shock waves in underwater drilling blasting for water diversion projects[J].Blasting,2023,40(4):132-141. (in Chinese)
- [4] CAO Ke-lei,TANG Chang-xing,ZHAO Yu,et al. Evaluation of the performance and effect of steel fiber reinforced cellular concrete for underwater blast protection under contact explosion loading[J].Engineering Fracture Mechanics,2025,313:110668.
- [5] 陈春晖,吴立,赵均文,等.水下钻孔爆破对紧邻建(构)筑物安全性影响研究[J].爆破,2016,33(2):117-122.
- [5] CHEN Chun-hui,WU Li,ZHAO Jun-wen,et al. Study on the safety influence of underwater drilling blasting on adjacent buildings and structures [J].Blasting,2016,33(2):117-122. (in Chinese)
- [6] 胡伟才,李国徽,郭铭芳,等.水下钻孔爆破影响下桥墩的动力响应特征及减震控制[J].工程抗震与加固改造,2019,41(5):42-48.
- [6] HU Wei-cai,LI Guo-hui,GUO Ming-fang,et al. Dynamic response characteristics and vibration reduction control of bridge piers under underwater drilling blasting[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2019,41(5):42-48. (in Chinese)
- [7] 叶凤明,王天照,杜明燃,等.气泡帷幕距离与供风量对水中冲击波衰减特性的影响研究[J].火工品,2025(2):82-90.
- [7] YE Feng-ming,WANG Tian-zhao,DU Ming-ran,et al. Research on the influence of bubble curtain distance and air supply volume on shock wave attenuation characteristics in water[J].Initiators & Pyrotechnics,2025(2):82-90. (in Chinese)
- [8] 曹棉,李嘉龙,邹永胜,等.水下钻孔爆破减振孔与气泡帷幕协同减震效果研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2020,42(4):42-47.
- [8] CAO Mian,LI Jia-long,ZOU Yong-sheng,et al. Study on synergistic vibration reduction effect of underwater drilling blasting with vibration-reduction holes and bubble curtains [J].Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2020,42(4):42-47. (in Chinese)
- [9] 王勇,彭高峰,李军,等.水下减振孔与气泡帷幕联合防控减震效果研究[J].人民长江,2025,56(9):206-212. (in Chinese)
- [9] WANG Yong,PENG Gao-feng,LI Jun,et al. Research on combined vibration reduction effect of underwater vibration-reduction holes and bubble curtains[J].Yangtze River,2025,56(9):206-212. (in Chinese)
- [10] 张如.新建隧道近距离上跨既有隧道段爆破振动控制技术研究[D].西安:长安大学,2017.
- [10] ZHANG Ru. Research on blasting vibration control technology for newly-built tunnel crossing over existing tunnel

- nel at close range[D]. Xian:Chang'an University,2017. (in Chinese)
- [11] 伍堂锐,叶 青,柳 伟. 煤岩体巷道壁面钻孔减震吸能性能研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(4):81-86.
- [11] WU Tang-rui, YE Qing, LIU Wei. Study on vibration reduction and energy absorption performance of borehole walls in coal-rock roadway[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(4):81-86. (in Chinese)
- [12] 杨长卫,张建经,周德培. SV波作用下岩质边坡地震稳定性的时频分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(3):483-491. (in Chinese)
- [12] YANG Chang-wei, ZHANG Jian-jing, ZHOU De-pei. Time-frequency analysis method for seismic stability of rock slopes under SV waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3):483-491. (in Chinese)
- [13] XIE Lun-xin, LU Wen-bo, ZHANG Qian-bing, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 66:19-33.
- [14] 吴 亮,刘 琳,余 创,等. 抵抗线对水下台阶爆破效果影响的模型试验及其数值分析[J]. 爆破,2025,42(1):56-62.
- [14] WU Liang, LIU Lin, YU Chuang, et al. Model Experiment and numerical analysis of the effect of resistance line on underwater step blasting [J]. Blasting, 2025, 42(1):56-62. (in Chinese)
- [15] SONG Sen-sen, HUO Run-ke, LIANG Yan-ling, et al. Numerical simulation and application research of straight-hole cut blasting with empty holes in railway tunnels [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(4):04024037.
- [16] 梁 禹,吴 立,左清军,等. 水下钻孔爆破堵塞长度的数值模拟研究[J]. 爆破,2011,28(1):92-94,97.
- [16] LIANG Yu, WU Li, ZUO Qing-jun, et al. Numerical simulation of the blocking length of underwater drilling blasting[J]. Blasting, 2011, 28(1):92-94, 97. (in Chinese)
- [17] 刘兵兵,季日臣,吕生玺. 基于 ANSYS/LS-DYNA 水下钻孔爆破数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27):11776-11782.
- [17] LIU Bing-bing, JI Ri-chen, LV Sheng-xi. Numerical simulation of underwater drilling blast in ANSYS/LS-DYNA [J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(27):11776-11782. (in Chinese)

(上接第63页)

- [7] 任少峰,杨 静,张义平,等. 降低深孔台阶爆破大块率的试验研究[J]. 爆破,2018,35(4):58-62.
- [7] REN Shao-feng, YANG Jin, ZHANG Yi-ping, et al. Experimental study on reducing boulder yield in deep-hole bench blasting [J]. Blasting, 2018, 35(4):58-62. (in Chinese)
- [8] Silva J, Worsey T, Lusk B. Practical assessment of rock damage due to blasting[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(3):379-385.
- [9] 余业清. 某石灰岩矿露天台阶爆破设计及安全分析[J]. 中国矿业,2024,33(9):186-194.
- [9] YU Ye-qing. Design and safety analysis of open-pit bench blasting in a limestone mine[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(9):186-194. (in Chinese)
- [10] 陈鹏辉,雷 涛. 基于 ALE 算法的单孔台阶爆破数值模拟研究[J]. 有色金属(矿山部分),2016,68(1):72-76.
- [10] CHEN Peng-hui, LEI Tao. Numerical simulation study on single-hole bench blasting based on ALE algorithm[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2016, 68(1):72-76. (in Chinese)
- [11] 王 敏,陈 新,缪玉松. 混装乳化炸药参数与岩石爆破阻抗匹配的试验研究[J]. 科技创新与应用, 2016(2):31-32.
- [11] WANG Min, CHEN Xin, MIAO Yu-song. Experimental study on the matching between mixed emulsion explosive parameters and rock blasting impedance[J]. Technology Innovation and Application, 2016(2):31-32. (in Chinese)
- [12] 卢博雅,黄胜松,李金山. 现场混装乳化炸药性能与岩石阻抗匹配性试验研究[J]. 采矿技术,2020,20(3):140-142.
- [12] LU Bo-ya, HUANG Sheng-song, LI Jin-shan. Experimental study on performance of on-site mixed emulsion explosive and rock impedance matching[J]. Mining Technology, 2020, 20(3):140-142. (in Chinese)