

乔雄,黄锦聪,杨鑫,等.爆破振动传播规律及控制技术研究进展[J].地震工程学报,XXXX,XX(X):000-000.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240115001

QIAO Xiong, HUANG Jincong, YANG Xin, et al. Advances in blasting vibration propagation law and control technology[J]. China Earthquake Engineering Journal, XXXX, XX(X):000-000. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240115001

## 爆破振动传播规律及控制技术研究进展

乔雄,黄锦聪,杨鑫,扈士静

(兰州理工大学,甘肃兰州 730050)

**摘要:**在各种由爆破作业引起的危害中,爆破振动的危险性最大,对周围环境和结构安全构成显著威胁。为给爆破振动研究工作提供参考,首先回顾爆破振动理论在国内外的发展历程,详细介绍关键的理论研究进展和研究成果;在此基础上,总结爆破振动传播规律的研究现状,并对高程放大效应和空洞效应进行阐述;梳理不同国家关于爆破振动安全判据的标准。其次从能量源、传播介质和传播过程三个方面,对爆破振动控制技术进行细致的分类讨论,并介绍新型爆破技术在实际工程中的应用特点及其优势。最后对工程爆破技术的研究现状进行总结,指出现有研究在爆破振动衰减规律、安全判据制定以及爆破控制技术方面存在的不足,并对未来的研究方向提出具体的展望。

**关键词:**爆破振动;衰减规律;安全判据;振动控制;研究进展

中图分类号:TD235.3

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(XXXX)0X-0-16

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240115001

## Advances in blasting vibration propagation law and control technology

QIAO Xiong, HUANG Jincong, YANG Xin, HU Shijing

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Among various hazards caused by blasting operations, blast-induced vibrations pose the greatest risk, significantly threatening the safety of surrounding environments and structures. To provide a reference for research on blast vibrations, this paper first reviews the development of blast vibration theory both domestically and internationally, detailing key theoretical advancements and research findings. Building on this, the paper summarizes the current state of research on the propagation patterns of blast vibrations and elucidates the amplification effects of elevation and cavity effects. It also reviews different national standards regarding safety criteria for blast vibrations. Furthermore, the paper categorizes blast vibration control technologies from three aspects: energy sources, propagation media, and the propagation process, and discusses the characteristics and advantages of innovative blasting technologies in practical engineering applications. Finally, the paper concludes with a summary of the current state of engineering blasting technolo-

收稿日期:2024-01-15

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金资助项目(51768041)

第一作者简介:乔雄(1980-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事隧道与地下工程的科研教学。E-mail:qiaoxiong7599@qq.com。

通信作者:黄锦聪(1998-),男,硕士研究生,主要从事隧道爆破振动影响的研究。E-mail:751840775@qq.com。

gy research, highlighting deficiencies in the understanding of blast vibration attenuation, the establishment of safety criteria, and blasting control techniques, and proposes specific future research directions.

**Keywords:** blasting vibration; attenuation laws; safety criteria; vibration control; research progress

## 0 引言

爆破技术作为现代工程建设中不可或缺的一环,对促进建设事业的发展发挥了巨大作用。然而,爆破活动同时伴随着多种潜在的危害,如振动、释放有毒有害气体、噪声、飞石、粉尘、空气冲击波等,其中振动是公认负面影响最大的爆破有害效应。

基于爆破工程在施工时引发的地震动效应,相关的科研资料以及在爆破振动环境下的试验也在不断增加<sup>[1-3]</sup>。现阶段对于爆破振动量值研究的表征,广泛应用的是质点振动峰值速度。随着有限元数值模拟技术的高速发展,尤其在描述爆轰产物状态方程<sup>[4]</sup>(Jones-Wilkins-Lee Equation of State, JWL)提出后,因其能够高精度模拟爆轰过程中气体压力与体积的关系,使其对于质点的振动速度峰值、振动持续时间以及振动频率具有全历程预测的能力。在隧道爆破施工中,需要准确地对爆破振动进行实时监测与分析,并在必要时对爆破振动的传播规律进行预测,保证爆破振动环境下邻近建筑结构的完整性与安全性。此外,爆破施工常导致邻近建筑结构受损进而引发工程纠纷,表明爆破减震技术方面还需改进。因此,系统研究爆破振动传播规律、爆破振动安全判据、爆破振动控制技术等内容,不仅可以减少爆破振动所带来的负面影响,还对降低纠纷率、提高社会稳定性有重要意义。为此,通过国内外文献调研,总结爆破振动相关研究的发展历程和现状,以为爆破振动方面的研究提供借鉴。

## 1 爆破振动理论发展现状

国外学者对于爆破振动特性的研究始于二十世纪二十年代,Rockwell<sup>[5]</sup>发表了一篇采用现场试验来研究爆破振动对邻近建筑结构影响的文章。而后Henrych<sup>[6]</sup>基于岩体爆破对振动动力学进行研究,Attewell等<sup>[7]</sup>、Devine<sup>[8]</sup>在二十世纪中期对爆破振动进行了预测和评估,发现爆炸产生的能量主要作用于周围的岩石,使岩石破裂,剩余的能量对破裂范围外的岩石产生扰动,在岩石中产生应力波和爆破地震波,波的产生和传播是炸药爆炸产生的能量转化和传递的结果,并基于此提出了一系列的安全判定依据。这些研究成果经过不断改进与完善,至今

仍然是爆破振动理论分析与动力计算研究的基础。

我国对于爆破振动的研究始于二十世纪七十年代,1976年四川维尼纶厂<sup>[9]</sup>码头港池水下爆破开挖工程为我国爆破振动的研究开启了先河。卢文波等<sup>[10]</sup>对爆破地震波在岩体中的传播与衰减规律进行了研究,提出了用脉冲上升时间法、频谱比法及地震波衰减参数间关系类推法分别确定P波、R波和S波衰减参数的具体过程。朱德达等<sup>[11-12]</sup>提出了爆破振动环境下安全距离的计算方法以及减隔震的技术措施,并对微差爆破法进行了改良,大大降低了爆破产生的振动强度。

二十世纪末,关于爆破振动研究的方法和手段已经发展得相当成熟。随着人们研究的不断深入,所需要的技术手段也在不断地更新,谭忠盛等<sup>[13]</sup>在既有数据总结分析的基础上,利用动力有限元法DYNA-2D对复线隧道、既有隧道进行数值模拟,研究结果表明有限元软件能够较为全面地反映爆破过程中围岩的应力应变、振动速度以及加速度的变化规律和时间历程曲线。Jiang等<sup>[14]</sup>基于有限元软件ANSYS/LS-DYNA,并结合现场实测数据确定了爆破振动的安全允许标准。胡英国等<sup>[15]</sup>利用FORTRAN与LS-DYNA自定义接口将爆破振动损伤模型导入到LS-DYNA中,确定了岩体在爆破环境下的损伤范围。闫海真<sup>[16]</sup>通过有限元软件ABAQUS对炸药属性进行定义,并采用黏弹性人工边界条件对爆破施工进行模拟,提出了爆破地震波的预测公式并验证了预测公式的适用性。

爆破地震波包含了大量复杂的信息。近年来,He等<sup>[17]</sup>通过希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)模型对爆破动力响应信号的时频特征参数进行提取和分析,提出了振动有效持续时间的概念。Pak等<sup>[18]</sup>对爆破振动信号的现场数据进行小波分析后,发现在62.5~125 Hz频带内爆破振速峰值和能量均大于其他频带,大部分频段受爆源距离的影响,而单段药量的变化在0~62.5 Hz频段中体现较为明显。Hudaverdi<sup>[19]</sup>利用K-均值聚类(K-Means)和两步聚类(Two-Step Clustering)算法建立爆破振动的预测方程并验证了其适用性,证明了为一个特定的采石场或露天矿建立不同爆破

振动预测模型的可行性。Song 等<sup>[20]</sup>通过经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)消除高频和低频部分的干扰得到关联维数,后用分形维数进一步识别爆破地震波变换规律的特征,此方法有助于研究爆破信号的衰减规律。Yang 等<sup>[21]</sup>采取将短时平均过零率与偏振分析相结合的方法识别爆破地震波中的 S 波,对推导岩体动力参数、指导水利工程的建设具有重要意义。Zhang 等<sup>[22]</sup>通过数值和理论分析,推导出频率能量偏移的影响机理为:第一次爆破产生自由面,后续爆破产生的应力波与反射应力波和初始应力波叠加,缩短了叠加应力波在场区的上升时间和持续时间,且应力波的上升时间越快,高频比越大;应力波持续时间越长,低频比例越大。Wang 等<sup>[23]</sup>通过自适应噪声完备集合经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)对 HHT 的应用进行优化,并创造性地利用瞬时能量概念对爆破振动控制指标进行优化,该方法能定量考虑频率的影响以及爆破信号的持续时间和固有特性,表现出较强的适用性。后有 Rao 等<sup>[24]</sup>进一步提出 CEEMDAN-MPE-HHT 法,该方法能够有效抑制爆破振动信号处理过程中的模态混叠和信号噪声,且准确有效地从时频和能量角度识别地下水封隧道爆破振动特征,为提高爆破开挖质量和施工安全提供依据。

综上,学者们通过大量的理论分析对爆破地震波的产生机理、影响爆破振动强度的因素、爆破环境下地震波的传播与衰减特性、爆破振动安全控制标准等方面进行了研究,为研究爆破振动规律提供了可靠的理论基础。

## 2 爆破振动传播规律

研究爆破地震波传播的规律,以达到对爆破地震波进行预测的效果,是降低爆破振动病害的有效方法之一。爆破地震波在传播过程中受多种因素影响,不仅表现出随着传播距离的增加而衰减的规律,也存在高程放大效应和空洞效应等现象。

### 2.1 爆破振动衰减规律

国外对于爆破振动衰减规律的研究开始于二十世纪五十年代。1950 年 Carlos 等<sup>[25]</sup>首次提出爆破振动质点最大位移衰减规律,通过将位移值与炸药量、振源距以及特征参数联系在一起,提出了经验公式:

$$D = K \frac{\sqrt{Q}}{R} \quad (1)$$

式中: $D$  为质点振动最大位移值(mm); $Q$  为单段最大装药量(kg); $R$  为振源距(m); $K$  为爆破现场的特征常数。

1954 年,Blair 等<sup>[26]</sup>通过将爆破地震波与药量、振源距结合在一起,并提出将药量进行开立方的形式,将质点振动速度峰值与振源距之间的经验关系式表示为:

$$v = K \left( \frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n} \quad (2)$$

式中: $v$  为质点振动速度峰值; $n$  为爆破场地的经验系数。

前苏联学者萨道夫斯基<sup>[27]</sup>根据式(2),在总结分析的基础上提出了经验公式:

$$v = K \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha} \quad (3)$$

式中: $\alpha$  为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的衰减指数。

当爆破场地特征系数  $K$  和衰减指数  $\alpha$  无法通过试验得到时,可根据表 1 参考选取。

表 1 爆区不同岩性的  $K$ 、 $\alpha$  值

Table 1  $K$  and  $\alpha$  values for different rock properties in the blast area

岩性	$K$	$\alpha$
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

随着爆破振动研究的不断深入,各个国家根据本国的地质条件制定出了适用于本国研究内容的经验公式。

1962 年,我国中科院地球物理研究所谢毓寿等<sup>[28]</sup>对爆破振动环境下质点速度进行了大量的研究,提出了以竖向最大振速作为衡量爆破振动强度的经验公式:

$$\lg v_{\perp} = K + 0.6 \lg Q - 1.8 \lg R \quad (4)$$

式中: $v_{\perp}$  为质点竖向最大振速(cm/s)。

1963 年,瑞典学者 Langefors 等<sup>[29]</sup>在萨道夫斯基公式的基础上进行了总结分析,提出了适用于本国研究内容的经验公式:

$$v = K \sqrt{\frac{Q}{R^{\frac{3}{2}}}} \quad (5)$$

1966 年,Devine<sup>[30]</sup>将爆破振动质点速度衰减公式修改为:

$$v = KQ^\beta R^{-a} \quad (6)$$

式中： $a$ 、 $\beta$  均为爆破现场的经验系数。

通过对上式进一步的完善与改进,Devine 得到了对于质点振动速度推测更加准确的经验公式<sup>[30]</sup>：

$$v = K \left( \frac{\sqrt[2]{Q}}{R} \right)^a \quad (7)$$

美国学者根据工程爆破实际研究内容提出预测爆破质点振动速度峰值的经验公式<sup>[31]</sup>：

$$v = 780 \left( \frac{\sqrt[2]{Q}}{R} \right)^{1.6} \quad (8)$$

2000年,科泽列夫等<sup>[32]</sup>为了探究爆破场地与所需要保护对象之间的介质中是否存在空洞对振动传播规律的影响,根据不同爆破作用影响区域提出了经验公式：

(1) 当爆破场地与所需要保护对象之间存在空洞时(位于影响半径小于1 000 m的外边界)：

$$v = 145K_{y,B}K_aK_r \left( \frac{R_\varphi}{\sqrt[3]{1.5q_{cr}}} \right)^{-1.034} \quad (9)$$

(2) 当爆破场地与所需要保护对象之间不存在空洞时(位于影响半径小于1 000 m的外边界)：

$$v = 207K_{y,B}K_aK_r \left( \frac{R_\varphi}{\sqrt[3]{1.5q_{cr}}} \right)^{-1.55} \quad (10)$$

式中： $K_{y,B}$ 是与现场爆破相关的系数； $K_a$ 是爆源至所需保护对象方向的系数； $K_r$ 是与振动环境下爆区覆盖层厚度有关的增强系数。

2002年,卢文波等<sup>[33]</sup>基于柱面波、子波以及Heelan解的理论分析基础上推导了爆破环境下岩石质点振动速度峰值公式：

$$v = v_0 \left( \frac{b}{R} \right)^a \quad (11)$$

式中： $v_0$ 为作用在炮孔壁上的振动速度峰值； $b$ 为炮孔的半径。该公式通过大量试验数据与数值模拟验证了其可行性以及可靠性,并且能够反映炮孔孔径、炸药类型和装药结构以及岩石特性等因素对爆破振动速度峰值的影响。

2007年,唐海等<sup>[34]</sup>以孔深、孔径、孔距、排距、最小抵抗线、最大段药量、最大单孔药量、总药量、堵塞长度、高程差和爆源距为爆破振速影响因素建立BP神经网络模型。该模型对振速的预测精度远高于萨道夫斯基公式。

近年来,Shi等<sup>[35]</sup>通过分析抵抗线的长度、自由面的面积等爆破振动主要影响因素,采用量纲分析法研究了深埋小净距隧道爆破振动衰减规律,得出扩展的爆破振动速度衰减公式：

$$v = v_0 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^{v_1} \left( \frac{A}{D^2} \right)^{v_2} \left( \frac{\omega}{d_b} \right)^{v_3} \quad (12)$$

式中：第一项 $v_0 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^{v_1}$ 与传统的萨道夫斯基公式完全相同,并给出了爆破振动速度与比例装药之间的关系；第二项 $\left( \frac{A}{D^2} \right)^{v_2}$ 综合了爆破开挖临空面面积对爆破振动强度的影响；最后一项 $\left( \frac{\omega}{d_b} \right)^{v_3}$ 考虑了最小抵抗线长度对爆破强度的影响,更适用于深埋小净距隧道工程的爆破振动速度预测。

此外,Yu等<sup>[36]</sup>采用不确定性概率分析法得出了岩石参数对振动衰减规律的影响,证明了该分析法具有很强的实用性；Xu等<sup>[37]</sup>提出了一种基于多元自适应回归样条、支持向量回归和黑盒优化算法的集成建模方法,用于预测峰值粒子速度(Peak Particle Velocity,PPV)和频率,该混合模型在处理复杂、多变量的非线性问题方面具有很大潜力。

另外,Sun等<sup>[38]</sup>对爆破振动主频的衰减进行了研究,表明爆破振动的主频主要由装药量、纵波波速、岩石密度、等效空腔半径和爆源到监测点的距离决定,主频随距离的增加而衰减,衰减程度主要取决于爆源发出的初始主频(在一定距离内,初始主频越高,主频衰减越快)。与爆源距离相比,装药量对主频衰减的影响较小,炮孔直径或不耦合比越小,则炮孔直径对主频衰减的影响比不耦合比更显著。后又通过理论分析和量纲分析,提出了预测主频衰减的方程,并通过现场试验验证了该公式的可靠性：

$$f = \frac{K}{\sqrt[2]{Q}} \left( \frac{\sqrt[2]{Q}}{r} \right)^a \quad (13)$$

式中： $f$ 为主频； $r$ 为振源距(m)。

上述学者研究所得的经验公式均是通过不同的试验以及数值模拟的方法,在不同环境的影响因素下推导所得,这也使得这些公式均存在一定的局限性。可以看出对爆破药量、爆破方式、炸药类型等主观影响因素的研究较多,对地形地貌、地质条件等客观影响因素的研究较少,对爆破振速的衰减规律研究较多,对振动频率变化规律研究较少,有必要增加客观因素对爆破振动影响的研究,并深化振动频率变化规律的探讨,以完善爆破振动的传播规律内容。

## 2.2 高程放大效应

高程放大效应指爆破引起的质点振动速度随着边坡高度的增大而出现一定增大的现象。目前已经有一些学者通过观察爆破地震波的传播规律总结了

高程放大效应的影响因素。

爆破振动速度的高程放大效应不仅与边坡岩体的岩性、坡度、爆破总体规模等因素有关,也与边坡山体的厚度有关,同时还受区域影响,当坡度大于 1:2 时,边坡的放大效应才出现,否则放大效应消失<sup>[39]</sup>。郭学彬等<sup>[40]</sup>、姚尧<sup>[41]</sup>、张涛等<sup>[42]</sup>通过研究发现高程放大效应实质是“坡面效应”,并指出沟槽具有良好的减隔震效果。Zhang 等<sup>[43]</sup>利用 LS-DYNA 的 FEM 程序建立有限元模型,模拟结果表明爆破振速并不会随着高程无限增大,而是随高程增大至某一极值后逐渐减小。石崇等<sup>[44]</sup>利用平面射线理论推导出高程放大效应的放大系数公式,并通过数值模拟验证了其合理性。许强等<sup>[45]</sup>通过 1:100 的大型振动台试验得出结论:高程对地震波具有明显的放大效应,但在同等强度的激振力作用下,竖向加速度最大放大倍数仅为水平向的 1/2 左右。陈明等<sup>[46]</sup>提出在“鞭梢效应”的影响下,爆破振动时边坡台阶边沿的振动速度较大,但应力、应变比同高程台阶脚处较小,边沿部位的振动速度不适宜评价边坡的稳定性。随后,张西良等<sup>[47]</sup>通过现场监测验证了边坡爆破确实存在“鞭梢效应”。万鹏鹏等<sup>[48]</sup>指出“鞭梢效应”具体在正高差边坡中较为明显,而在负高差边坡中爆破振动的效果更接近“坡面效应”。Guo 等<sup>[49]</sup>经过一系列实验,发现在覆土以下的岩石中测得的运动不存在垂直距离引起的高程放大效应,与峰值振速相比,振动频率在岩体中衰减较慢。

在分析高程放大效应对振速的影响时,一些学者认为萨道夫斯基经验公式并没有将高程对爆破振动的影响考虑进去,对此提出了修正公式。唐海等<sup>[50]</sup>将高程对爆破振动的影响包含在内,与萨道夫斯基公式对比并进行量纲分析,得到能体现高程变化的爆破振动公式:

$$v = k_1 k_2 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{\beta_1} \left( \frac{H}{r} \right)^{\beta_2} \quad (14)$$

式中: $k_1$  为平整场地系数; $k_2$  为边坡等场地系数; $\beta_1$  为衰减系数; $\beta_2$  为高程差影响系数; $H$  为测点与爆源间的相对高度差。

蒋楠等<sup>[51]</sup>基于量纲分析的原理,考虑边坡坡度对爆破振动的影响得到爆破振动速度衰减规律的经验公式:

$$v = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{\beta_1} (i)^{\beta_2} \quad (15)$$

式中: $k$  为场地影响系数; $\beta_1$  为衰减系数; $\beta_2$  为边坡

坡度影响效应系数; $i$  为坡度。

武旭等<sup>[52]</sup>利用 LS-DYNA 软件进行数值模拟分析,结合其他学者提出的经验公式,给出了适用于台阶地形的爆破振动速度公式:

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \quad (16)$$

梁瑞等<sup>[53]</sup>参考了《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范(SL47—94)》<sup>[54]</sup>以及式(12),得到有关高程放大效应的式(17),并与经典萨道夫斯基公式进行对比分析,回归结果表明式(17)的精度更高。

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \quad (17)$$

式中: $D$  为起爆点至测点之间的水平距离; $H$  为起爆点至测点间的高程差; $\alpha$  是与水平距离相关的系数; $\beta$  是与高程相关的系数。

也有学者表示,式(3)中的系数  $K$ 、 $\alpha$  原本就是与爆破场地条件、地质条件有关的系数,高程的影响已包括在内,可以先根据  $K$ 、 $\alpha$  值与高程的关系重新确定  $K$ 、 $\alpha$  值,再用萨道夫斯基经验公式进行计算即可<sup>[55]</sup>。

总结上述文献可得,爆破振动的垂直振速放大效应要大于水平振速放大效应,说明爆破振速的放大效应以高程放大效应为主。而振速的放大系数并不会随着高程的增加而单调递增,高程差超过某临界值时放大系数就会逐渐减小,而目前能够系统地解释这一现象机理的研究较少,在高差较大情况下进行的试验也较少,需进一步对起伏地形中的地震波传播规律进行研究。

### 2.3 空洞效应

空洞效应是指在隧道爆破开挖过程中,已开挖区存在的空洞导致其上部地表振动速度大于未开挖区地表振动速度的现象。2005 年张继春等<sup>[56]</sup>发现浅埋隧道开挖区形成的空洞会导致其上方地表振速大于未开挖区地表振速,并命名这一现象为“空洞效应”,后国内诸多学者相继发现该现象,并对其展开研究。

空洞效应会随隧道埋深的减小,振速放大系数逐渐变大,但振速放大系数增大的幅度会逐渐变小,也会随隧道断面尺寸和隧道周壁爆破振动荷载的增大而增大<sup>[57-58]</sup>。Xia 等<sup>[59]</sup>在隧道轴向上考虑隧道埋深的影响,发现空洞效应在地面 30 m 范围内起作用,在地面 60 m 范围外时地表几乎不会产生振速放大现象,可忽略空洞效应,并提出了放大系数的经验公式:

$$f = 1 + a \left( \frac{B}{R} \right)^{-\alpha} e^{-0.5 \left( \frac{D-D_{\text{cri}}}{\omega} \right)^2} \begin{cases} \omega = \omega_1, & D \leq D_{\text{cri}} \\ \omega = \omega_2, & D > D_{\text{cri}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $B$  为隧道埋深;  $R$  为隧道半径;  $a$  和  $\alpha$  均为场地常数;  $D$  为任一对称点与隧道掌子面之间的水平距离;  $D_{\text{cri}}$  为临界距离;  $\omega$  为描述高斯函数半宽度信息的常数。

汪平等<sup>[60]</sup>对空洞效应在掌子面径向上的放大效应展开研究,依托某双侧壁导坑法施工隧道,得出沿隧道径向,随着距掌子面距离的增加,其正上方左、右两侧质点振动速度呈现衰减的规律,但由于分步开挖存在临空面,隧道径向已开挖区地表的峰值振动速度大于隧道径向未开挖区域地表的峰值振动速度,存在空洞效应。黄果等<sup>[61]</sup>通过数值模拟发现空洞效应的成因是地下空洞对面波能量的散射和转换,当埋深小于 0.2 倍主波长时洞顶会出现应力集中,产生较大的放大效应(放大倍数可达 12 倍),并用物理实验验证了其准确性。蔡军等<sup>[62]</sup>研究空洞效应对隧道围岩的影响,根据地震波反射、透射的传播规律,推导出开挖区与未开挖区隧道围岩振速计算公式,发现已开挖区围岩振速略大于未开挖区,并验证了公式的准确性。

关于空洞效应的研究较少,目前已确定其产生机理,并研究了隧道埋深、隧道断面尺寸和隧道周壁

爆破振动荷载等各种参数对空洞效应的影响,发现了其放大系数的变化规律。而该效应会对地表振动预测产生影响,危害邻近建筑物的安全,应对其控制措施展开研究,降低隧道爆破施工的危害性。

### 3 爆破振动安全判据

在实际工程进行爆破开挖时,由爆破施工而产生的地震波会在介质中向四周传播,当爆破振动强度超出一定的限值时,会对临近爆破场地的建筑结构产生振动影响,严重的甚至会导致建筑结构发生破坏而影响正常使用。最初国内外众多学者研究发现爆破振动的强度可以用质点的速度峰值(PPV)来表示,但随着研究的深入,发现爆破振动强度不仅取决于单一的质点振动速度峰值,还需结合质点振动加速度、振动主频以及质点峰值速度-主频综合评估,因此,各个国家根据当下研究内容采取了不同的安全判据。

#### (1) 我国爆破振动安全控制标准

我国采用质点峰值速度-主频这一双因素为爆破振动安全判别基准。根据我国现行标准:《爆破安全规程(GB 6722—2014)》<sup>[63]</sup>和《建筑工程容许振动标准(GB 50868—2013)》<sup>[64]</sup>规定,振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值,宜按表 2 和表 3 的规定采用。

表 2 爆破振动安全允许标准

Table 2 Blasting vibration safety-allowable standards

序号	保护对象类别	安全允许振速/(cm/s)		
		<10 Hz	10~50 Hz	>50 Hz
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15~0.45	0.45~0.9	0.9~1.5
2	一般民用建筑	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
3	工业和商业建筑物	2.5~3.5	3.5~4.5	4.2~5.0
4	一般古建筑与古迹	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5
5	运行中的水电站及发电厂中心控制室设备	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.9
6	水工隧道	7~8	8~10	10~15
7	交通隧道	10~12	12~15	15~20
8	矿山巷道	15~18	18~25	20~30
9	永久性岩石高边坡	5~9	8~12	10~15
10	新浇大体积混凝土:			
	龄期:初凝~3 d	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
	龄期:3 d~7 d	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~7.0
	龄期:7 d~28 d	7.0~8.0	8.0~10.0	10.~12.0

爆破振动监测应同时测定质点振动相互垂直的三个分量。

注:(1)表中质点振动速度为三个分量的最大值,振动频率为主振动频率;(2)频率范围根据现场实测波形确定或按如下数据选取:硐室爆破  $f < 20$  Hz,露天深孔爆破  $f$  在 10~60 Hz 之间,露天浅孔爆破  $f$  在 40~100 Hz 之间;地下深孔爆破  $f$  在 30~100 Hz 之间,地下浅孔爆破在 60~300 Hz 之间

#### (2) 美国爆破振动安全控制标准

美国露天矿务局在总结分析的基础上依据爆破振动安全要求,提出了如表 4 所列的安全判据<sup>[65]</sup>。

#### (3) 德国爆破振动安全控制标准

德国标准 DIN4150-3-1999<sup>[66-67]</sup>中规定各种振源对邻近建筑物的振动影响,其安全控制标准如表

5 所列。

瑞士通过对不同类型的建筑结构安全振动允许标准进行分类<sup>[68]</sup>,其安全控制标准如表 6 所列。

(4) 瑞士爆破振动安全控制标准

表 3 交通振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

Table 3 The allowable vibration value of traffic vibration affecting the building structure in the time domain

建筑物类型	顶层楼面处容许振动速度峰值/(mm/s)		基础处容许振动速度峰值/(mm/s)		
	1~100 Hz		1~10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
工业建筑、公共建筑	10.0		5.0	10.0	12.5
居住建筑	5.0		2.0	5.0	7.0
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	2.5		1.0	2.5	3.0

注:(1)表中容许振动值应按频率线性插值确定;(2)当无法在基础处评价时,评价位置可取最底层主要承重外墙的底部;(3)对于未达到国家现行抗震设防标准的城市旧房和镇(乡)村未经正规设计自行建造的房屋容许振动值,宜按表 3.2 中居住建筑的 70% 确定

表 4 美国露天矿务局爆破振动安全允许标准

Table 4 U.S.Surface Mining Service blasting vibration safety-allowable standards

频率范围/Hz	1~4	4~13	13~29	29 以上
振速峰值/(mm/s)	4.79~20	20	20~50	50

综合上述各国的爆破振动安全判据,可发现目前世界上主要采用振速峰值-频率的评判方式,只在数值方面有细微差别,结构的破坏与二者正相关。而与其他国家相比,我国的安全标准针对不同类型的建筑和爆破作业进行了更为细致的分类,提高了

表 5 德国交通振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

Table 5 The allowable vibration value of the influence of German traffic vibration on the building structure in the time domain

建筑物类型	顶层楼面处容许振动速度峰值/(mm/s)		基础处容许振动速度峰值/(mm/s)		
	1~100 Hz		1~10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
工业建筑、公共建筑	40.0		20.0	20.0~40.0	40.0~50.0
居住建筑	15.0		5.0	5.0~15.0	15.0~20.0
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	8.0		3.0	3.0~8.0	8.0~10.0

表 6 瑞士爆破振动安全限制

Table 6 Swiss blasting vibration safety limits

建筑物类型	频率范围/Hz	峰值振速/(mm/s)
钢结构、钢筋混凝土结构	10~60	30
	60~90	30~40
砖混结构	10~60	18
	60~90	18~25
砖石墙体、木结构	10~60	12
	60~90	12~18
历史及敏感性建筑	10~60	8
	60~90	8~12

取决于某单段的最大用药量。张艺峰等<sup>[70]</sup>采用灰色关联分析法计算得出对爆破振速影响最大的因素是高程差、炮孔超深和最大单段药量,相对来说,最简单有效的手段就是减小单段最大装药量。管志强等<sup>[71]</sup>在复杂环境下的大区深孔台阶爆破中采用逐孔起爆的方式,将总药量分成 932 段爆破,成功地将爆破振动影响控制在了安全范围内,避免了爆破振动对大坝和油罐的破坏。王海龙等<sup>[72]</sup>通过实测数据拟合得到的公式反推出工程的最大单段药量,将距振源 35 m 处的振速峰值控制在 0.85 cm/s 之内。

判据的适用性和针对性。

## 4 爆破振动控制技术

对爆破振动进行减震的目的是在炸药爆炸产生的能量下对需要保护的對象形成有效的防护,其可以从能量源、能量传播介质、能量传播过程三方面来考虑减少炸药爆炸后剩余能量的有害效应<sup>[69]</sup>。

### 4.1 能量源的控制

根据爆破减震理论:当边界条件相同时,爆破开挖的最大振动速度不取决于一次起爆的总药量,而

除了减小最大段装药量,也能通过选用合适的炸药类型、优化装药结构、调整同时起爆的药量、采用小循环进尺等手段来降低起爆时产生的最大瞬时能量。选择合适的炸药类型,使药包的波阻抗和岩石的波阻抗有一定差值,可以降低爆破冲击波的传播效应。对于装药结构,一般耦合装药的地震效应要大于不耦合装药。不耦合装药条件下,空气介质能延缓爆轰波作用到炮孔壁的时间,有效调整不耦合系数可以做到降低爆破振动效应。

## 4.2 能量传播介质的控制

在进行爆破作业时,爆破地震波在经过如河流、断层、沟渠、裂隙破碎带等天然屏障后强度会显著降低。利用好这些地形地质条件,可有效减小对保护对象的破坏作用。除了天然屏障外也可以人为制造屏障,来降低爆破振动的影响,如张志波等<sup>[73]</sup>在三峡大坝进行水下爆破时研究出气泡帷幕,并在实践中证明了其能有效吸收、减弱爆破振动所产生的水冲击波能量,是一种高效的水下减震措施。随后,曹棉等<sup>[74]</sup>研究发现减震孔与气泡帷幕协同作用的减震效果要优于两者单独作用。

目前应用较为广泛的水压爆破也属于对能量传播介质的控制,水压爆破技术即在容器类结构物中注水,将药包悬挂于水中适当位置,利用水的不可压缩性将爆炸产生的冲击波压力传递到结构物周壁上,使周壁介质均匀受力而破碎的爆破方法<sup>[75]</sup>。水作为一种极难压缩的介质,在压力为 100 MPa 时,其密度仅增大 5% 左右,在岩体中进行水压爆破时,水介质作为炸药爆炸能量载体进入岩体中的原生裂隙,以及炸药爆炸产生的径向裂隙,一方面会对裂隙进行“填塞”,防止爆生气体过早溢出造成能量流失,另一方面由于水的黏滞性大于空气,进入裂隙后流速更低。而且水介质与裂隙之间存在较大的摩擦力,从而在裂隙面产生法向压力迫使其开裂。同时,水介质会在裂隙尖端产生应力集中现象,使破岩效果增强<sup>[76-77]</sup>。因此,水压爆破能降低爆破振动、爆破飞石、空气冲击波等不良影响。在传统的爆破方法中加入水压爆破技术还能有效提高其他爆破方式的爆破效果,如光面爆破<sup>[78]</sup>、预裂爆破<sup>[79]</sup>、微差爆破<sup>[80]</sup>等。

水压爆破虽然在工程实际中应用较多,但使用时多以经验为主,缺乏相关的理论研究,有必要完善相关理论以突破相关技术问题<sup>[81-82]</sup>。

## 4.3 能量传播过程的控制

目前常见的减震方法如微差爆破、预裂爆破、减震沟槽等均属于对能量传播过程的控制。

### (1) 减震沟

陆文等<sup>[83]</sup>、方向等<sup>[84]</sup>为研究沟槽的减震效果,对爆破时有无沟槽的振速测试结果进行对比分析,得出开挖沟槽能有效降低爆破振速的结论。邹奕芳<sup>[85]</sup>对比预裂缝和减震沟的效果,证明减震沟的减震效果明显好于预裂缝。余德运等<sup>[86]</sup>通过研究减震沟对体波和表面波传播的影响,发现减震沟深度越大,距离测点越近,减震效果越好,而减震沟的宽

度对此影响较小。王晨龙等<sup>[87]</sup>通过模拟不同长度和深度尺寸的减震沟,分析发现减震沟的减震效果在一定范围内随其深度与长度的增加而增加,超出范围后减震率趋于稳定。王利军等<sup>[88]</sup>对不同实测方案进行对比后发现减震沟与爆破开挖区之间的水平距离和隧道埋深接近时,减震沟的减震效果最佳。Niu 等<sup>[89]</sup>基于大量现场试验,采用波形分段对应法和最小二乘法建立模型,试验与模拟结果表明减震沟在爆源区域附近减震效率最高,面波的衰减只与减震沟深度有关,验证了上述学者成果的正确性。而邹烽等<sup>[90]</sup>则通过采用将减震沟与减震孔结合的综合减震方法,取得了更加显著的减震效果。

减震沟的减震效果明显,施工便捷。施作减震沟时只需重点考虑其深度、长度和与振源间的距离就能取得良好的减震效果。

### (2) 微差爆破

微差爆破是把一次爆破的许多炮孔分为若干组按先后顺序起爆,引起多个爆源产生的地震波反向叠加,使地震波振幅减小的起爆方法。很多工程爆破的环境条件比较复杂,需要采用微差爆破技术来控制爆破振动强度<sup>[91]</sup>。李顺波等<sup>[92]</sup>通过模型试验验证了其提出的短毫秒延时计算公式的有效性,表明精确延时电子雷管进行的微差爆破具有良好的减震效果。钟冬望等<sup>[93]</sup>基于地震波线性叠加原理,采用 MATLAB7.0 编程用以优选爆破时差,使矿区居民房处爆破振速峰值降低至 0.332 cm/s 以内,且岩石爆破效果显著提高。

由于波形叠加的相位关系具有随机性,爆破地震波既可能产生反向叠加,也可能产生同向叠加;既可能削弱地震效应,也可能使地震效应加强。Zhang 等<sup>[94]</sup>开展双孔和多孔爆破多延时实验,结果表明随着起爆延迟时间的增大,爆破振动 PPV 先减小后增大,最后衰减至单孔 PPV,但在近区延迟时间达到一定值时,会产生较大的振动增强效应,产生的最大 PPV 约为单孔 PPV 的 1.8 倍,且在多孔爆破中会有多个短延迟时间产生增强效应,不能盲目采用短延迟时间进行减振。因此,应根据被保护建筑物与爆破区的距离,合理设置电子雷管的延迟时间,以达到爆破减振的效果。

由此可见,微差爆破理论上存在最佳时间差,当设置最佳时间差进行爆破时能有效提高爆破效率并降低爆破振动的危害性,但目前还未有成熟的理论来计算这一最佳时间差。



### (3) 预裂爆破

预裂爆破多用于煤矿的开采中,因其能通过预裂缝的手段增加煤层裂隙,提高煤层透气性,促使瓦斯更容易从煤层中释放出来,从而提高瓦斯抽采效率,消除煤层的突出危险性<sup>[95-96]</sup>。

早期的预裂爆破由于理论不完善,致使其预裂成缝效果较差。唐海等<sup>[97-98]</sup>经研究发现预裂孔的控制以及预裂缝的成形质量是预裂爆破技术的关键,确定了预裂爆破参数设计的主要指标(矿岩强度、孔径、裂隙发育程度、炸药类型),并运用神经网络综合计算方法和 Matlab 语言设计了用于预裂爆破参数优化的网络模型和预裂爆破参数优化设计智能系统,随后验证了其可靠性。蔡路军等<sup>[99]</sup>用节理刚度模型和应力波理论阐述了预裂爆破的减震机理,分析了预裂缝长度和宽度对减震效果的影响,发现增加预裂缝长度和宽度能提升减震效果。张帅等<sup>[100]</sup>制定并实施了“预裂+光面”综合爆破的大断面爆破开挖方案,该方案有效降低了 0~100 Hz 低频段能量,提高了爆破安全性。

现阶段预裂爆破主要用于煤层切顶卸压方面<sup>[101-102]</sup>,对缓解顶板的危害已取得较好成果,但对于顶板预裂爆破的参数影响方面的研究仍显欠缺<sup>[103-104]</sup>。

## 4.4 其他爆破控制技术

除了传统的爆破技术,目前已发展出等离子爆破、CO<sub>2</sub> 气体爆破、静态爆破等能显著降低爆破振动效应的新型爆破技术。

### (1) 等离子爆破

等离子爆破技术(Plasma Blasting Technology, PBT)是一种潜在的替代化学爆破和机械切割的爆破方法,用于破碎天然岩石、混凝土、地质聚合物和其他类岩石材料。诺兰达技术中心于二十世纪九十年代初提出了该方法<sup>[105]</sup>,其原理如图 1 所示。在工作电压达 18 kV 的情况下,强电流进入电离质,瞬间产生的高温高压使其呈等离子状态,从而产生

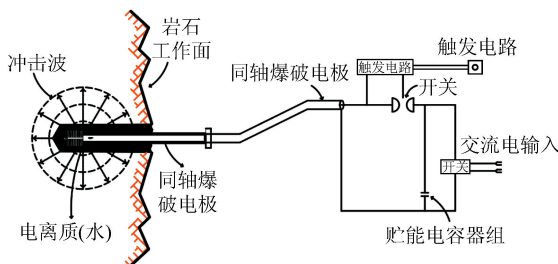


图 1 等离子爆破原理

Fig.1 Plasma blasting principle

能破碎岩石的冲击波。

与传统的化学爆破相比,PBT 本质上是安全的,对环境的影响很小,因为该技术引起的振动、噪声和粉尘等影响要小得多,并且由于它不使用化学物质,因此不会产生有害的气体、烟雾等污染物<sup>[106]</sup>。

### (2) CO<sub>2</sub> 气体爆破

CO<sub>2</sub> 气体爆破技术<sup>[107]</sup>是一种安全高效的致裂增透技术,其工作原理为:在温度小于 31 °C 或压强高于 7.35 MPa 时,CO<sub>2</sub> 为液体状态;当温度高于 31 °C 时,液态的 CO<sub>2</sub> 会在 20~00 ms 内转变为气体状态,体积瞬间膨胀 600 多倍,压力快速升高,且压力随温度而变化。利用 CO<sub>2</sub> 的这一特性,将液态 CO<sub>2</sub> 充装在一定容积的钢管内,通过加热装置(激发管)快速释放热量,使其发生液态至气态的相变,管内压力急剧升高,当达到定压剪切片泄放压力时,定压剪切片瞬间被剪切破坏,CO<sub>2</sub> 高压气体通过泄能通道,快速向外释放,对介质做功,达到对岩石等介质致裂破碎的目的。

CO<sub>2</sub> 气体爆破技术作为一种利用煤体物理特性进行松动破坏的新型破碎方法,解决了低透气性煤层瓦斯抽采困难的问题,与炸药爆炸时剧烈的化学反应相比,具有更好的安全性和更广阔的应用前景<sup>[108-109]</sup>,但目前仍缺乏相应的理论研究<sup>[110]</sup>。

### (3) 静态爆破

静态爆破是一种借助静态爆破剂的静力膨胀作用使被爆物体解体破坏的爆破方法。静爆剂是一种由钙、硅等氧化物及特殊的有机物按一定比例配料,经高温煅烧成熟料再加入外加剂一起磨细的粉末状物质。使用时,与水搅拌均匀,装入炮孔中即能产生 30.0~50.0 MPa 的膨胀力。随着时间推移,静爆剂产生的膨胀压力逐渐作用于孔壁四周,使岩石受到压缩变形,同时,与压缩应力垂直的方向产生拉伸应力。其原理如图 2 所示<sup>[111]</sup>。

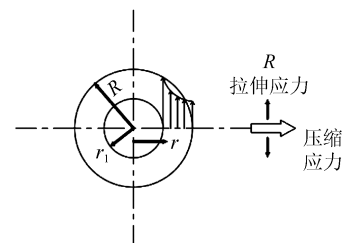


图 2 静态爆破原理

Fig.2 Static blasting principle

一般情况下,经过 4~24 h,静爆剂可产生 300~500 kg/cm<sup>2</sup> 的膨胀压力,该压力是岩石抗压强度

的 4~10 倍,膨胀作用使岩石产生龟裂,并不断传播、扩大,最后使岩石产生拉断变形而破坏。静爆剂膨胀压力的主要来源是氧化钙<sup>[112]</sup>。

静态爆破技术作业时振动和冲击小、噪声低且无粉尘,多应用于因特殊原因导致常规爆破方式受限的施工区域<sup>[113-114]</sup>,但由于其爆破致裂效果受地应力影响较大,爆破岩石存在围压时破坏半径会明显减小<sup>[115]</sup>,因此不适用于埋深较大的地下环境。

综上所述,直接控制能量源是最简单有效的减震方法,其本质是降低起爆时产生的最大瞬时能量。而能量传播介质主要由自然环境所决定,故相关研究较少,其中水压爆破具有良好的应用潜力。在能量传播过程的控制研究中,对减震沟的研究已经趋于完善,证明了其有良好的减震效果,而微差爆破和预裂爆破技术在实践和理论研究中仍有改进空间。相较于传统的化学炸药爆破方式,等离子爆破、气体爆破等新型爆破方式均具备扰动小、安全性高的特点,但这些新型爆破技术均存在缺乏理论基础的问题。而多种爆破控制技术联合使用时,往往比单独使用时更能降低爆破的危害性。

## 5 结论与展望

目前对于爆破振动的研究已具备良好的理论基础。但爆破振动是一个极其复杂的过程,仅仅依靠理论上的研究并不能解决高度复杂的岩体力学问题,需结合现场实测的数据对爆破振动进行实时的控制。

### 5.1 结论

(1) 现今最常用的爆破振速衰减公式为萨道夫斯基公式,为解决实际工程中的特定问题,学者们推导出多种新的经验公式可在具体的环境中应用。

(2) 针对爆破振动衰减规律,研究占比最多的是爆破药量、爆破方式、炸药类型等主观因素对爆破振速变化的影响,其他研究成果占比少。爆破振动的放大效应以高程放大效应为主,振速的放大系数并不会随着高程的增加而单调递增,高程差超过某临界值后,放大系数会逐渐减小。对于空洞效应的研究主要集中于其放大系数影响因素与变化规律方面。

(3) 我国的爆破振动安全判据与国外相似,主要采取振速峰值与频率相结合的评判方式,仅在数值方面有细微差别。相比国外,我国安全判据中划分的适用建筑类别与爆破类别更多,更具针对性。

(4) 爆破减震手段多元化,可分为控制能量源、控制能量传播介质、控制能量传播过程三方面。最简单有效降低爆破振速的方法是减小单段最大装药量。在能量传播介质的控制方面,水压爆破具有良好的应用潜力,但目前对其理论基础的研究尚不充分。在能量传播过程的控制研究中,已证实减震沟可以显著降低振动,而微差爆破和预裂爆破技术在实践和理论研究中仍有改进空间。目前存在不使用化学炸药的各种新型爆破方式均缺乏一定的理论基础,但因其更小的扰动和更高的安全性而具有良好的研究潜力。

(5) 合理的将多种爆破控制技术联合使用,如减震孔与气泡帷幕或减震沟协同作用、水压爆破与光面爆破相结合、预裂爆破与光面爆破相结合等,能够获得更好的爆破控制效果。

### 5.2 展望

(1) 目前缺乏对爆破振动客观因素的相关研究,未来应分别考虑不同地形地貌和地质条件对爆破振动的影响,以完善爆破振动传播规律的研究。此外,虽然大量研究关注了爆破振速的衰减规律,但很少有研究涉及振动频率的变化规律。因此,建议加强对振动频率规律的研究,以便更科学地应用现有安全判据。

(2) 爆破振动安全判据中需考虑建筑新旧程度的影响,结合建筑自身的抗震性能来判断是否安全,另有空洞效应和微差爆破中的地震波叠加等类似问题存在,也会对现有爆破安全判据的适用性产生影响,有待进一步完善。

(3) 在实际工程爆破中,联合使用多种控制技术以达到综合减震效果将是一个重要的研究方向。土木和建筑行业也在寻求新的、经济有效且安全的岩石切割和破碎技术。未来应加强对不同爆破技术的研究,尤其是能从根本上改变能量源的技术,如水压爆破、气体爆破、等离子爆破和静态爆破技术。这些爆破技术均具备安全高效的特点,将成为未来重点发展方向。

## 参考文献(References)

- [1] 杨年华.爆破振动理论与测控技术[M].北京:中国铁道出版社,2014.  
YANG Nianhua. Blasting vibration theory and measurement and control technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [2] 闫鸿浩,李晓杰.城镇露天爆破新技术[M].北京:中国建筑工业

- 出版社,2015.
- YAN Honghao, LI Xiaojie. New technology of urban open-pit blasting[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [3] 杨年华, 刘慧. 近距离爆破引起的隧道周边振动场[J]. 工程爆破, 2000, 6(2): 6-10.
- YANG Nianhua, LIU Hui. Vibration field at tunnel contour induced by a close-in blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2000, 6(2): 6-10.
- [4] 徐锡申, 张万箱. 实用物态方程理论导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- XU Xishen, ZHANG Wanxiang. Theoretical guidance of practical equation of state[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [5] ROCKWELL E. H. Vibrations caused by quarry blasting and their effect on structures[J]. *Rock Products*, 1927, 30(3): 58-61.
- [6] HENRYCY J. The dynamics of explosion and its use[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Compang, 1997.
- [7] ATTEWELL P B, FARMER I W, HASLAM D. Prediction of ground vibration parameters from major quarry blasts[J]. *Mining and Mineral Engineering*, 1965, 5: 621-626.
- [8] DEVINE J F. Avoiding damage to residences from blasting vibrations[J]. *Highway Research Record*, 1966(135): 35-42.
- [9] 四川维尼纶厂建厂指挥部, 交通部工程指挥部, 四川维尼纶厂码头水下爆破安全观测成果[J]. 水运工程, 1976(8): 7-12.
- Construction Command Center of Sichuan Vinylon Factory, Engineering Command Center of the Ministry of Transport. Safety observation results of underwater blasting at the dock of Sichuan Vinylon Factory[J]. *Port & Waterway Engineering*, 1976(8): 7-12.
- [10] 卢文波, 董振华, 朱传云. 爆破地震波传播过程中衰减参数的确定[J]. 工程爆破, 1997, 3(4): 12-16.
- LU Wenbo, DONG Zhenhua, ZHU Chuanyun. Calculating of attenuation parameters of rock mass during the propagation of blasting seismic wave[J]. *Engineering Blasting*, 1997, 3(4): 12-16.
- [11] 朱德达, 柯吉恩. 微差爆破地震效应的研究[J]. 爆破, 1984, 1(1): 26-32.
- ZHU Deda, KE Jiken. Study on seismic effect of millisecond blasting[J]. *Blasting*, 1984, 1(1): 26-32.
- [12] 朱德达. 我国爆破地震效应的研究[J]. 长沙矿山研究院季刊, 1988, 8(1): 39-46.
- ZHU Deda. The research on the blasting vibration effects in China[J]. *Mining Research and Development*, 1988, 8(1): 39-46.
- [13] 谭忠盛, 杨小林, 王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 281-285.
- TAN Zhongsheng, YANG Xiaolin, WANG Mengshu. Effect of blast in double line tunnel on existing tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 281-285.
- [14] JIANG N, ZHOU C B. Blasting vibration safety criterion for a tunnel liner structure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 52-57.
- [15] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. 岩石爆破损伤模型的比选与改进[J]. 岩石力学, 2012, 33(11): 3278-3284.
- HU Yingguo, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Comparison and improvement of blasting damage models for rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3278-3284.
- [16] 闫海真. 爆破施工过程中邻近管道动力响应及减振措施的研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- YAN Haizhen. Study on dynamic response and vibration reduction measures of adjacent pipelines during blasting construction[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [17] HE R, JIANG N, LI D W, et al. Dynamic response characteristic of building structure under blasting vibration of underneath tunnel[J]. *Shock and Vibration*, 2022, 2022: 9980665.
- [18] PAK T U, JO G R, HAN U C. Prediction of characteristic blast-induced vibration frequency during underground excavation by using wavelet transform[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2022, 16(8): 1029-1039.
- [19] HUDAVERDI T. Development of blast vibration predictors based on K-Means and Two Step clustering techniques and evaluation of site factors[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(6): 205.
- [20] SONG X L, GAO W X, LI J Y, et al. Analysis of fractal features of blasting vibration signal based on EEMD decomposition[J]. *IOP Conference Series (Earth and Environmental Science)*, 2021, 719(3): 032038.
- [21] YANG Z W, HU Y G, LIU M S, et al. Study of S wave identification based on measured blasting vibration signals and its application under engineering scale[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(12): 1158.
- [22] ZHANG X Y, YAN P, LU W B, et al. Frequency spectrum characteristics of blast-induced vibration with electronic detonators in ground blasting[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 74: 106892.
- [23] WANG H L, ZHAO Y, SHAN R L, et al. Safety evaluation and application of blasting vibration based on an improved Hilbert-Huang Transform[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(6): 3971-3991.
- [24] RAO X K, HUANG S X. Identification of the blasting vibration characteristics of groundwater-sealed tunnel[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 13557.
- [25] CARLOS L J, EMILIO L J, FRANCISCO A C. Drilling and blasting of rocks[M]. Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1995.
- [26] BLAIR B E, DUVALL W I. Evaluation of gages for measuring displacement, velocity, and acceleration of seismic pulses[M]. Washington D. C.: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1954.

- [27] (苏)萨多夫斯基.地震预报[M].陈英方,张炜,译.北京:地震出版社,1986.  
Садовский. Earthquake prediction [M]. CHEN Yingfang, ZHANG Wei, tran. Beijing: Seismological Press, 1986.
- [28] 谢毓寿,王耀文.工业爆破的地震效应[J].地球物理学报, 1962, 5(2):154-163.  
XIE Yushou, WANG Yaowen. Seismic effect of construction blasting[J]. Chinese Journal of Sinica, 1962, 5(2):154-163.
- [29] LANGEFORS U, KIHILSTROM B. The modern technique of rock blasting[M]. New York: Wiley, 1963.
- [30] DEVINE J F. Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting [M]. Washington, D. C.: U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1966.
- [31] 龙维祺.爆破手册[M].北京:冶金工业出版社,1986.  
LONG Weiqi. Blasting manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
- [32] 科泽列夫 C A, 扎普罗日茨 B Ю, 捷尔希科夫 C Г, 等.地下大爆破对地面建筑物的震动影响[J].国外金属矿山, 2000(2): 32-36.  
SECCOZE LEV C A, ZAPROZIC B Ю, GORSHKOV C Г, et al. Large-scale underground blasting induced vibration effect of surface buildings[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 2000 (2):32-36.
- [33] 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.  
LU Wenbo, HUSTRULID W. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity[J]. Engineering Blasting, 2002, 8(3):1-4.
- [34] 唐海,石永强,李海波,等.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, 26(增刊1):3533-3539.  
TANG Hai, SHI Yongqiang, LI Haibo, et al. Prediction of peak blasting vibration velocity based on neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (Suppl01):3533-3539.
- [35] SHI J J, GUO S C, ZHANG W. Expansion of blast vibration attenuation equations for deeply buried small clearance tunnels based on dimensional analysis[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10:889504.
- [36] YU C, LI H B, YUE H Z, et al. A case study of blasting vibration attenuation based on wave component characteristics[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(5):1298-1311.
- [37] XU G Q, WANG X Y. Support vector regression optimized by black widow optimization algorithm combining with feature selection by MARS for mining blast vibration prediction[J]. Measurement, 2023, 218:113106.
- [38] SUN P C, LU W B, ZHOU J R, et al. Comparison of dominant frequency attenuation of blasting vibration for different charge structures[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(2):448-459.
- [39] 舒大强,何蕴龙,董振华.岩质高边坡开挖爆破震动荷载及其对边坡稳定性影响的研究[J].工程爆破, 1996, 2(4):39-43.  
SHU Daqiang, HE Yunlong, DONG Zhenhua. Research on vibration load from excavation blasting and its influence on stability of rock high-slope[J]. Engineering Blasting, 1996, 2(4): 39-43.
- [40] 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, 20(1):83-87.  
GUO Xuebin, XIAO Zhengxue, ZHANG Zhicheng. Slope effect of blasting vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1):83-87.
- [41] 姚尧.爆震的放大效应与二元回归分析[J].爆破, 1992, 9(4): 5-8.  
YAO Yao. Amplification effect of detonation and binary regression analysis[J]. Blasting, 1992, 9(4):5-8.
- [42] 张涛,郭学彬,蒲传金,等.边坡爆破振动高程效应的实验分析与研究[J].江西有色金属, 2006(4):10-13.  
ZHANG Tao, GUO Xuebin, PU Chuanjin, et al. Experimental analysis and studies of elevate effect of slope blasting vibration[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2006(4):10-13.
- [43] ZHANG Y J, WANG G Z, ZHANG H J. Study on numerical simulation of bench blasting and its elevation amplification effect[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 215-216: 1228-1231.
- [44] 石崇,周家文,任强,等.单面边坡高程放大效应的射线理论解[J].河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(2):238-241.  
SHI Chong, ZHOU Jiawen, REN Qiang, et al. Ray theory solution of the elevation amplification effect on a single-free-face slope[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(2):238-241.
- [45] 许强,刘汉香,邹威,等.斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(12):2420-2428.  
XU Qiang, LIU Hanxiang, ZOU Wei, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12):2420-2428.
- [46] 陈明,卢文波,李鹏,等.岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究[J].岩石力学与工程学报, 2011, 30(11):2189-2195.  
CHEN Ming, LU Wenbo, LI Peng, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (11):2189-2195.
- [47] 张西良,仪海豹,辛国帅,等.高程对某露天矿边坡爆破振动传播规律的影响[J].金属矿山, 2017(7):55-59.  
ZHANG Xiliang, YI Haibao, XIN Guoshuai, et al. Influence of elevation on the blasting vibration law in the slope of an open-pit mine[J]. Metal Mine, 2017(7):55-59.
- [48] 万鹏鹏,璩世杰,许文耀,等.台阶爆破质点振速的高程效应研究[J].爆破, 2015, 32(2):29-32, 63.  
WAN Pengpeng, QU Shijie, XU Wenyao, et al. Study of elevation effect of bench blasting particle vibration velocity[J].

- Blasting, 2015, 32(2): 29-32, 63.
- [49] 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;
- [50] 唐海, 李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 820-824.  
TANG Hai, LI Haibo. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 820-824.
- [51] 蒋楠, 周传波, 平雯, 等. 岩质边坡爆破振动速度高程效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 237-243.  
JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, PING Wen, et al. Altitude effect of blasting vibration velocity in rock slopes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1): 237-243.
- [52] 武旭, 张云鹏, 郭奇峰. 台阶地形爆破振动放大与衰减效应研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1017-1022.  
WU Xu, ZHANG Yunpeng, GUO Qifeng. Amplification and attenuation effect of blasting vibration on step topography [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1017-1022.
- [53] 梁瑞, 王树江, 周文海, 等. 基于回归分析的边坡爆破振速高程效应研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(2): 107-115.  
LIANG Rui, WANG Shujiang, ZHOU Wenhai, et al. Research on elevation effect of slope blasting vibration based on regression analysis [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(2): 107-115.
- [54] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范: SL47—94[S]. 北京: 水利电力出版社, 1994.  
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Construction technical specification on rock foundation excavating engineering of hydraulic structures: SL47—94[S]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.
- [55] 谭文辉, 贻世杰, 毛市龙, 等. 边坡爆破振动高程效应分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 619-623.  
TAN Wenhui, QU Shijie, MAO Shilong, et al. Altitude effect of blasting vibration in slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 619-623.
- [56] 张继春, 曹孝君, 郑爽英, 等. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4158-4163.  
ZHANG Jichun, CAO Xiaojun, ZHENG Shuangying, et al. Experimental study on vibration effects of ground due to shallow tunnel blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4158-4163.
- [57] 喻军, 刘松玉, 童立元. 浅埋隧道爆破振动空洞效应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 176-179.  
YU Jun, LIU Songyu, TONG Liyuan. Hollow effect induced by blasting vibration in shallow tunnels [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 176-179.
- [58] 杨云凌. 浅埋隧道爆破振动空洞效应研究[J]. 爆破, 2012, 29(3): 127-130.  
YANG Yunling. Hollow effect induce by blasting vibration in shallow tunnels [J]. Blasting, 2012, 29(3): 127-130.
- [59] XIA X, LI H B, LIU Y Q, et al. A case study on the cavity effect of a water tunnel on the ground vibrations induced by excavating blasts [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 292-297.
- [60] 汪平, 吉凌. 浅埋地铁隧道爆破振动速度传播规律及预测[J]. 工程爆破, 2021, 27(2): 108-113, 134.  
WANG Ping, JI Ling. Propagation law and prediction of blasting vibration velocity of shallow buried subway tunnel [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2): 108-113, 134.
- [61] 黄果, 刘争平, 刘茂洋. 地下空洞的面波场地效应数值模拟研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(2): 468-475.  
HUANG Guo, LIU Zhengping, LIU Maoyang. Numerical simulation of site effect of surface wave in underground cavities [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 468-475.
- [62] 蔡军, 苏莹, 邱秀丽. 爆破荷载作用下空洞效应对围岩振动速度的影响[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 10-13, 17.  
CAI Jun, SU Ying, QIU Xiuli. Influence of cavity effect on vibration velocity of surrounding rock under blasting load [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(5): 10-13, 17.
- [63] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [64] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban—Rural Development of the People's Republic of China. Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [65] 吴杨勇. 地铁隧道下穿砖混结构建筑物爆破振动控制[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.  
WU Yangyong. Blasting vibration control of subway tunnel passing through brick-concrete structure building [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [66] Structural vibration part 3: effects of vibration on structures: DIN 4150-3 [S]. Germany: Building and Civil Engineering Standards Committee of DIN Germany Institute, 1999.
- [67] 丑亚玲, 刘文高, 乔雄, 等. 基于交通振动环境下建筑结构损伤机理及减振隔振的研究现状[J]. 地震工程学报, 2021, 43(3): 654-662, 686.  
CHOU Yaling, LIU Wengao, QIAO Xiong, et al. Research status of damage mechanism of building structures and associated vibration reduction and isolation in traffic vibration environment [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 654-662, 686.

- [68] 培契曼 H, 艾曼 W. 人和机械引起的结构振动[M]. 北京: 北京建筑科学出版社, 1990.  
PECHMAN H, AYMAN W. Structural vibrations caused by human and mechanical[M]. Beijing: Editorial Department of Architectural Science, 1990.
- [69] 宋光明. 爆破地震效应与减震方法的探讨[J]. 世界采矿快报, 1999(1): 26-29.  
SONG Guangming. Approach to effect of blast vibration and methods to decrease vibration[J]. World Mining Express, 1999(1): 26-29.
- [70] 张艺峰, 姚道平, 谢志招, 等. 爆破地震效应主控因素分析及减震措施探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 304-308.  
ZHANG Yifeng, YAO Daoping, XIE Zhizhao, et al. Analysis of master control factor of blasting seismic effect and discussion on shock absorption measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 304-308.
- [71] 管志强, 张中雷, 王林桂, 等. 复杂环境大区露天深孔台阶爆破技术在岙山油库区开挖中的应用[J]. 爆破, 2011, 28(2): 63-67.  
GUAN Zhiqiang, ZHANG Zhonglei, WANG Lingui, et al. Application of large open deep hole bench blasting in aoshan oil reservoir excavation on complex environment[J]. Blasting, 2011, 28(2): 63-67.
- [72] 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.  
WANG Hailong, ZHAO Yan, WANG Yongjia, 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.
- [73] 张志波, 李春军, 李红勇, 等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. 爆破, 2003, 20(2): 75-76, 89.  
ZHANG Zhibo, LI Chunjun, LI Hongyong, et al. Application of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting[J]. Blasting, 2003, 20(2): 75-76, 89.
- [74] 曹棉, 李嘉龙, 邹永胜, 等. 水下钻孔爆破减震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.  
CAO Mian, LI Jialong, ZOU Yongsheng, et al. Study on the synergistic effect of shock relieve vent and air bubble curtain in underwater drilling blasting[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(4): 42-47.
- [75] 张友勇. 隧道掘进水压爆破技术应用与效果[J]. 隧道建设, 2007, 27(5): 64-66.  
ZHANG Youyong. Application and effect of hydraulic blasting technology in tunnel driving[J]. Tunnel Construction, 2007, 27(5): 64-66.
- [76] HUANG B X, LIU C Y, FU J H, et al. Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 976-983.
- [77] 陈士海, 林从谋. 水压爆破岩石的破坏特征[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 24-29.  
CHEN Shihai, LIN Congmou. Failure characteristics of rock by hydraulic blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 24-29.
- [78] 李淮, 孙卫星, 宋鹏伟, 等. 基于 C 型聚能管的聚能水压光面爆破技术原理及应用[J]. 爆破器材, 2023, 52(1): 50-57.  
LI Huai, SUN Weixing, SONG Pengwei, et al. Principle and application of shaped energy water pressure smooth blasting technology based on C-shaped energy-concentrating tube[J]. Explosive Materials, 2023, 52(1): 50-57.
- [79] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破与定向水压致裂防冲适用性对比分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 706-719.  
ZHAO Shankun. A comparative analysis of deep hole roof pre-blasting and directional hydraulic fracture for rockburst control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 706-719.
- [80] 林育峰. 微差及水压爆破技术在连体虾池拆除中的应用[J]. 爆破器材, 2000, 29(1): 29-31.  
LIN Yufeng. Application of MS blasting and hydraulic blasting to the demolishing of chain shrimp pools[J]. Explosive Materials, 2000, 29(1): 29-31.
- [81] 盖梦飞, 仇安兵, 王思杰, 等. 不同装药结构水压爆破应变场变化的模型试验研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(2): 42-50.  
GAI Mengfei, QIU Anbing, WANG Sijie, et al. Experimental model study on the change of water pressure blasting strain field of different charge structures[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(2): 42-50.
- [82] 王海洋, 万鑫鑫, 陈祥, 等. 应力差和节理角度对水压爆破岩体损伤影响研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(1): 1-8.  
WANG Haiyang, WAN Shengxin, CHEN Xiang, et al. Study on the influence of stress difference and joint angle on rock mass damage caused by hydraulic blasting[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(1): 1-8.
- [83] 陆文, 郭学彬. 爆破地震效应中的沟槽减震作用研究[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(1): 11-12, 52.  
LU Wen, GUO Xuebin. Shock absorption of a gully in explosive earthquake[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2001, 28(1): 11-12, 52.
- [84] 方向, 高振儒, 龙源, 等. 减震沟对爆破震动减震效果的实验研究[J]. 工程爆破, 2002, 8(4): 20-23, 42.  
FANG Xiang, GAO Zhenru, LONG Yuan, et al. Experimental study on the effect of damping ditch on reduction of blasting vibration[J]. Engineering Blasting, 2002, 8(4): 20-23, 42.
- [85] 邹奕芳. 预裂缝和减震槽减震效果的爆破试验研究[J]. 爆破, 2005, 22(2): 96-99.  
ZOU Yifang. Experimental study on the vibration-isolating effect of pre-split crack and vibration-isolating slot[J]. Blasting, 2005, 22(2): 96-99.
- [86] 余德运, 杨军, 赵明生. 减震沟对台阶爆破地震波减震机理探讨[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 244-247.  
YU Deyun, YANG Jun, ZHAO Mingsheng. Study on the ab-

- sorption mechanism of damping ditch to the vibration wave in bench blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2):244-247.
- [87] 王晨龙,张世平,张昌锁.边坡爆破开挖中减震沟合理尺寸确定[J].爆破,2013,30(1):50-53,95.  
WANG Chenlong, ZHANG Shiping, ZHANG Changsuo. Determination of damping ditch size in slope blasting excavation[J]. Blasting, 2013, 30(1):50-53, 95.
- [88] 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.  
WANG Lijun, HE Zhongming, 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.
- [89] NIU J Y, XIE Q, ZHANG X H, et al. Effect of damping ditch on blasting vibration reduction by field experiment and numerical simulation[J]. Journal of Vibroengineering, 2022, 24(6):1098-1115.
- [90] 邹烽,席田,胡业红,等.爆破振动综合减震措施的减震效应研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):119-126.  
ZOU Feng, XI Tian, HU Yehong, et al. Research on damping effect of comprehensive damping measure for blasting vibration[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6):119-126.
- [91] 郭学彬,张继春,刘泉,等.微差爆破的波形叠加作用分析[J].爆破,2006,23(2):4-8,49.  
GUO Xuebin, ZHANG Jichun, LIU Quan, et al. Analysis of waveform superimposed action of millisecond blasting[J]. Blasting, 2006, 23(2):4-8, 49.
- [92] 李顺波,杨军,陈浦,等.精确延时控制爆破振动的实验研究[J].爆炸与冲击,2013,33(5):513-518.  
LI Shunbo, YANG Jun, CHEN Pu, et al. Experimental study of blasting vibration with precisely-controlled delay time[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(5):513-518.
- [93] 钟冬望,何理,操鹏,等.爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选[J].爆炸与冲击,2016,36(5):703-709.  
ZHONG Dongwang, HE Li, CAO Peng, et al. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5):703-709.
- [94] ZHANG X Y, YAN P, HE H X, et al. Experimental investigations of the effect of millisecond-delay time on the blast vibration reduction with electronic detonators[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(17-18):4204-4215.
- [95] 刘健,刘泽功,石必明,等.突出煤层快速掘进深孔预裂爆破顶抽瓦斯技术[J].煤炭科学技术,2008,36(8):45-48.  
LIU Jian, LIU Zegong, SHI Biming, et al. Technology of gas pre-drainage with deep borehole pre-cracking blasting for gateway rapid excavation in seam with outburst[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(8):45-48.
- [96] 霍中刚.二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J].煤炭科学技术,2015,43(2):80-83.  
HUO Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):80-83.
- [97] 唐海.岩石预裂爆破成缝分析及爆破参数确定的智能研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.  
TANG Hai. Intelligent study on crack formation analysis and blasting parameters determination of rock presplitting blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [98] 唐海,袁超,梁开水.基于神经网络的预裂爆破参数智能设计[J].工程爆破,2012,18(1):11-15.  
TANG Hai, YUAN Chao, LIANG Kaishui. Intelligent design of parameters based on neural network in presplitting blasting [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(1):11-15.
- [99] 蔡路军,马建军.预裂爆破减震机理及效果分析[J].中国矿业,2005,14(5):56-58,62.  
CAI Lujun, MA Jianjun. The shock absorption mechanism and its effect analysis of pre-splitting blasting [J]. China Mining Magazine, 2005, 14(5):56-58, 62.
- [100] 张帅,薛江龙,杨健康,等.基于 HHT 分析的大断面软岩隧道爆破振动控制效果研究[J].工程爆破,2023,29(6):158-166.  
ZHANG Shuai, XUE Jianglong, YANG Jiankang, et al. Study on blasting vibration control effect of large section soft rock tunnel based on HHT analysis [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(6):158-166.
- [101] 段宝福,陈佳华,柴明星,等.深孔聚能预裂爆破切顶卸压机理与应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(1):1-10.  
DUAN Baofu, CHEN Jiahua, CHAI Mingxing, et al. Mechanism and application of roof cutting and pressure relief in deep-hole shaped charge presplit blasting [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 43(1):1-10.
- [102] 孙得志,郭俊庆,杨永康,等.水介质预裂爆破顶板裂纹的扩展[J].工程爆破,2023,29(6):100-109.  
SUN Dezhi, GUO Junqing, YANG Yongkang, et al. Crack extension in the top plate of water-mediated pre-cracking blasting[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(6):100-109.
- [103] 常凯.沿空留巷切顶卸压预裂爆破关键参数优化研究[D].西安:西安科技大学,2021.  
CHANG Kai. Study on optimization of key parameters of roof cutting and pressure relief presplitting blasting for gob-side entry retaining[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [104] 王宏伟.顶板预裂爆破防治冲击地压参数设计方法研究与应用[D].北京:煤炭科学研究总院,2021.  
WANG Hongwei. Research and application of parameter design method for preventing rockburst by roof presplitting

- blasting[D].Beijing:China Coal Research Institute,2021.
- [105] HABIB K M, SHNORHOKIAN S, MITRI H. Evaluating the application of rock breakage without explosives in underground construction; a critical review of chemical demolition agents[J]. Minerals, 2022, 12(2): 220.
- [106] KUZNETSOVA N, ZHGUN D, GOLOVANEVSKIY V. Plasma blasting of rocks and rocks-like materials; an analytical model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 150: 104986.
- [107] 沈占军. 二氧化碳爆破在露天矿山开采中的影响因素与参数优化[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.  
SHEN Zhanjun. Influencing factors and parameter optimization of carbon dioxide blasting in open pit mining [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2023.
- [108] LI J W, PAN H Y, GONG W L, et al. Study on rock breaking characteristics of stress wave and blast-induced gas during CO<sub>2</sub> gas blasting[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 219: 111142.
- [109] WANG X F, HU S B, WANG E Y. Study of slope vibration site effects and energy analysis from CO<sub>2</sub> static blasting[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(1): 210-224.
- [110] 孙可明, 辛利伟, 吴迪. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂机理实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 302-308.  
SUN Keming, XIN Liwei, WU Di. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 302-308.
- [111] 郭学彬, 肖正学. 刻槽孔静态爆破的应变测量及爆破机理探讨[J]. 爆破, 1987, 4(2): 13-18.  
GUO Xuebin, XIAO Zhengxue. Strain measurement and blasting mechanism of static blasting of slot hole[J]. Blasting, 1987, 4(2): 13-18.
- [112] 林本川. 静态爆破技术在矿山巷道施工中应用问题的探讨[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1989, 17(4): 125-130.  
LIN Benchuan. Inquiry into application of static state blast technology to mine tunnel construction [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 1989, 17(4): 125-130.
- [113] 闫煦, 宁波, 周博. 静态爆破技术在拆除既有铁路挡墙中的应用[J]. 铁道建筑, 2013, 53(4): 113-114.  
YAN Xu, NING Bo, ZHOU Bo. Application of static blasting technology in demolition of existing railway retaining wall [J]. Railway Engineering, 2013, 53(4): 113-114.
- [114] 石思, 邹雪晴. 静态爆破在危岩崩塌防治中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(B06): 202-204.  
SHI Si, ZOU Xueqing. Application of static blasting in prevention and control of dangerous rock collapse [J]. Yangtze River, 2017, 48(B06): 202-204.
- [115] 李志鑫, 高召宁, 许文松, 等. 基于静态爆破的硬岩掘进预裂技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(6): 2091-2100.  
LI Zhixin, GAO Zhaoning, XU Wensong, et al. Research on hard rock excavation fracturing technology based on static blasting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(6): 2091-2100.

(本文编辑:张向红)