

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.012

基于微差起爆时序效应的地下厂房 爆破振动及块度控制研究*

李涛¹, 许国庆², 万新¹, 钱洪建³, 向才华¹, 李洪涛², 姚强²

(1. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 昆明 650216; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065;
3. 国家能源集团 金沙江旭龙水电有限公司, 甘孜 627950)

摘要: 地下厂房爆破开挖过程中, 为保护岩锚梁等关键构筑物, 往往采用较大微差间隔时间来避免爆破振动峰值叠加, 但也导致爆破后大块率偏高的问题, 为此基于微差爆破技术开展了振动控制与块度优化研究。基于爆破振动线性叠加原理, 建立了考虑孔数与岩体衰减特性的振动放大系数模型, 推导出了满足不同距离振动安全阈值的临界微差间隔时间计算公式。以旭龙水电站地下厂房开挖为工程背景, 通过现场试验验证了理论模型的适用性。研究表明: 相较于 100 ms 微差间隔方案, 优化后的 50 ms 微差间隔方案能将岩锚梁岩台处的爆破振动速度峰值控制在 2.8 cm/s, 同时, 该方案显著改善了爆破块度, 使中值粒径由约 75.5 cm 降低至 11.3 cm, 级配均匀性显著提升, 大块率有效降低。研究为解决地下工程爆破中振动安全与破碎效果的矛盾提供了理论依据和一种可行的临界微差时间选择方法。

关键词: 微差起爆; 振动控制; 群孔爆破; 爆破块度; 地下厂房

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)03-0121-08

Study on Blasting Vibration and Fragmentation Control of Underground Powerhouse based on Time-sequence Effect of Millisecond Delay Initiation

LI Tao¹, XU Guo-qing², WAN Xin¹, QIAN Hong-jian³, XIANG Cai-hua¹, LI Hong-tao², YAO Qiang²

(1. Sinohydro bureau 14th Co., Ltd., Kunming 650216, China;

2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. National energy Group Jinshajiang Xulong Hydropower Co., Ltd., Ganzi 627950, China)

Abstract: During underground powerhouses blasting excavation, extended inter-hole delay times are commonly employed to safeguard critical structures like rock-anchored beams by preventing blast vibration peak superposition. This method, however, results in elevated boulder rates. To address this issue, vibration control and fragmentation optimization studies were conducted using millisecond blasting techniques. Using the linear superposition principle for

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-09

网络首发日期 (Published online): 2026-01-15

作者简介: 李涛 (1982-), 男, 重庆市涪陵区人, 本科、高级工程师, 主要从事水利水电工程施工及岩土工程爆破工作, (E-mail) 15288307407@163.com。

通信作者: 李洪涛 (1979-), 男, 湖北省仙桃市人, 博士、教授、博士生导师, 主要从事工程爆破及水利工程施工相关的教学与研究, (E-mail) lmyht@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51809188) 基于能量吸收原理的爆破振动舒适性评价方法研究

About the author: LI Tao (1982-), male, born in Fuling district, Chongqing city, bachelor's degree, senior engineer, mainly engaged in hydraulic and hydropower engineering construction and geotechnical engineering blasting, (E-mail) 15288307407@163.com.

Corresponding author: LI Hong-tao (1979-), male, born in Xiantao city, Hubei province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in engineering blasting and hydraulic engineering construction related teaching and research, (E-mail) lmyht@126.com.

Fund Programs: National natural science foundation of China (No. 51809188) Research on blasting vibration comfort evaluation method based on energy absorption principle

blast vibrations, this study established a vibration amplification factor model that incorporates the number of holes and rock mass attenuation properties, and derived a computational formula for critical inter-hole delay times that meet vibration safety thresholds at varying distances. Field validation tests were conducted during the excavation of Xulong Hydropower Station's underground powerhouse, confirming the theoretical model's practical applicability. Results demonstrate that the optimized 50 ms inter-hole delay scheme, compared to the conventional 100 ms approach, maintains peak particle velocity at rock-anchored beam benches below 2.8 cm/s while achieving superior fragmentation performance. This configuration reduces the median fragment size from approximately 75.5 cm to 11.3 cm, significantly improving size-distribution uniformity and effectively minimizing boulder occurrence. The research establishes both theoretical foundations and practical methodologies for determining critical delay intervals to reconcile vibration safety and fragmentation quality in underground blasting operations.

Key words: millisecond initiation; vibration control; multi-hole blasting; blast fragmentation; underground powerhouse

地下厂房爆破开挖时,为保护岩锚梁等关键构筑物,常采用数码电子雷管实施较大间隔的微差爆破,以避免爆破振动峰值叠加造成损害。然而,过长的微差间隔时间易导致大块率增高,影响后续石渣清运与利用效率。因此,有必要针对不同距离下的爆破振动安全要求,研究临界微差间隔时间,在确保振动安全的同时有效控制大块率。

微差延时时间决定了爆炸应力波、爆生气体与岩体相互作用的协同效应。吴立辉等通过实验研究指出^[1],毫秒延期时间的微小变化会显著改变岩石的破碎块度和裂纹扩展范围。曹永帮等通过研究进一步揭示了不同炮孔间距下^[2],微差爆破诱发的爆生裂纹扩展规律,强调了孔间应力场叠加对形成贯通裂隙网的关键作用。龚敏等探讨了掏槽药量与起爆时差的关系对合成振速的影响^[3],为通过时序设计降低振动提供了理论依据。周敏等和李洪伟等则通过数值模拟^[4,5],再现了数码电子雷管微差爆破网络的起爆过程,证明了精确延时在控制振动波形叠加方面的巨大潜力。于传泽等和李延龙等分别在露天矿山和无底部结构采矿中应用逐孔微差起爆技术^[6,7],显著改善了岩石破碎效果,降低了大块率。常建平等在高台阶爆破中的参数优化以及安龙等在厚大矿体中的精细控制方法^[8,9],均表明合理的微差时间是实现高效破碎的核心。叶海旺等和冷振东等研究了基于特定岩体条件或新型起爆器材的延时优化^[10,11],但其方法的普适性有待进一步验证。黄雪峰等和李昊明等对露天矿山台阶爆破合理微差时间的优选进行了研究^[12,13],但其目的主要是控制爆破块度,获取理想的级配。

现有研究在揭示应力波叠加机理、振动控制方法及爆破块度控制等方面取得了进展。然而,当前研究多集中于单一目标的参数优化,或局限于露天爆破等特定场景,对于地下厂房这类振动敏感环境,

如何在安全阈值约束下系统确定兼顾破碎效果的临界微差时间,仍缺乏具有普适性的理论方法与技术体系。

针对地下厂房爆破中振动安全与破碎效果的矛盾,研究基于弹性波传播理论和线性叠加原理,建立了考虑多孔延时起爆条件下振动速度峰值的预测模型,并结合萨道夫斯基公式与保护对象的振动安全阈值,提出了临界微差间隔时间的理论计算方法。进一步通过现场爆破试验,分析微差时间对岩石破碎效果及振动响应特性的影响,在保障安全的前提下提升开挖效率。

1 满足保护对象爆破振动安全的最小微差间隔时间确定

1.1 爆破振动线性叠加原理

爆破振动预测的理论体系建立在弹性波传播理论和工程实践经验的基础上^[14],根据爆破安全规程(GB 6722—2014),单个炮孔爆破产生的质点振动速度峰值通常用萨道夫斯基公式表示

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

式中: V 表示质点振动速度峰值,cm/s,直接反映爆破振动强度; Q 为单孔装药量,kg; R 为爆心距,m,反映振动波传播距离; K 和 α 是与岩体性质相关的经验系数,需要通过现场试验标定。工程实践表明,对于常见岩体, K 值变化范围为150~400,其中软弱岩体取值150~250,坚硬完整岩体取值250~400; α 值通常介于1.2~2.0之间,岩体完整性越好, α 值越大。

爆破振动在时域上的演化特征可以通过数学模型描述,为了分析振动在时域上的叠加效应,需建立振动速度的时程函数。对于中远区振动,其波形可简化为衰减正弦波模型,表达式如下

$$V_{(t)} = Ve^{-\beta(t-t_0)} \sin[\omega(t-t_0)] \cdot H(t-t_0) \quad (2)$$

式中: V 为振幅,由萨道夫斯基公式确定; β 为衰减系数,取值范围为 10~100,通常取 50; $\omega = 2\pi f$,其中 f 是振动主频; t_0 为起爆时间; $H(t-t_0)$ 为单位阶跃函数, $t < t_0$ 时, $H(t-t_0) = 0$, $t > t_0$ 时, $H(t-t_0) = 1$,从而保证 $t < t_0$ 时振动为 0。

若 N 个炮孔以同样的微差间隔时间延时起爆,若假定爆破振动波在传播介质中满足线性叠加条件,则监测点处的振动速度时程为各单孔振动速度时程的矢量和,即

$$V_{(t)} = \sum_{i=1}^N v_i(t) = \sum_{i=1}^N K \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \cdot e^{-\beta(t-t_i)} \sin[\omega(t-t_i)] H(t-t_0) \quad (3)$$

式中: t_i 为第 i 各炮孔的起爆时刻。

1.2 满足保护对象振动安全的临界微差间隔时间计算方法

当多个炮孔连续起爆时,各炮孔产生的振动波在时域上相互叠加,可能产生振动放大效应,临界微差间隔时间应确保叠加后的振动速度峰值不超过保护对象的安全允许阈值,根据萨道夫斯基公式可知,振动强度随距离增加而衰减,不同距离处的临界微差间隔时间需求不同。

考虑一个简化模型:设有 N 个炮孔,每个炮孔装药量均为 Q ,采用等时间间隔 Δt 依次起爆,则第 i 个炮孔在监测点处产生的振动速度时程表达式为

$$V_i(t) = V \cdot e^{-\beta[t-(i-1)\Delta t]} \cdot \sin[\omega[t-(i-1)\Delta t]] \cdot H[t-(i-1)\Delta t] \quad (4)$$

根据线性叠加原理,总振动速度为

$$V_{total}(t) = \sum_{i=1}^N V_i(t) \quad (5)$$

最不利的振动叠加发生在个炮孔产生的振动波形其主振峰值在时间上完全对齐时,该条件要求微差间隔时间 Δt 为振动主振周期 T ($T = 1/f$) 的整数倍,即

$$\Delta t = mT (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

在此特定条件下,于某一时刻 t_p ,所有已激发炮孔的正弦函数值同时到达峰值。为确保所有波形均能参与叠加,将 t_p 取为最后一个炮孔起爆后的第一个峰值时刻

$$t_p = t_N + \frac{T}{4} = (N-1)\Delta t + \frac{T}{4} \quad (7)$$

在此时刻,第 i 个炮孔的振动波传播的时长为

$$\tau_i = t_p - t_i = (N-1)\Delta t + \frac{T}{4} - (i-1)\Delta t = (N-i)\Delta t + \frac{T}{4} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4),并考虑式(6)的相位条件 $\sin(\omega\tau_i) = 1$,可得第 i 个炮孔在 t_p 时刻的振动速度幅值为

$$V_i(t_p) = V \cdot e^{-\beta[(N-1)\Delta t + \frac{T}{4}]} \quad (9)$$

因此,在 t_p 时刻的总振动速度峰值为各孔贡献的代数和

$$V_{total}(t_p) = \sum_{i=1}^N V_i(t_p) = V \cdot e^{-\frac{\beta T}{4}} \cdot \sum_{i=1}^N e^{-\beta(N-i)\Delta t} \quad (10)$$

令 $j = N-i$,当 i 从 1 到 N 时,对 j 从 $N-1$ 到 0。则求和项可改写为

$$\sum_{i=1}^N e^{-\beta(N-i)\Delta t} = \sum_{j=0}^{N-1} (e^{-\beta\Delta t})^j \quad (11)$$

式(11)是公比为 $r = e^{-\beta\Delta t}$ 的等比数列,其前 N 项和为

$$S_N = \frac{1-r^N}{1-r} = \frac{1-e^{-N\beta\Delta t}}{1-e^{-\beta\Delta t}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),得到总振动速度峰值的最终表达式

$$V_{total}(t_p) = V \cdot e^{-\frac{\beta T}{4}} \cdot \frac{1-e^{-N\beta\Delta t}}{1-e^{-\beta\Delta t}} \quad (13)$$

定义合成振动放大系数为总振动速度峰值与单孔振动速度峰值之比

$$F_{(\beta, N, \Delta t)} = \frac{V_{total}(t_p)}{V} = \frac{1-e^{-N\beta\Delta t}}{1-e^{-\beta\Delta t}} e^{-\frac{\beta T}{4}} \quad (14)$$

在基于线性叠加原理的爆破振动峰值预测模型中,将振动波从起爆至达到首个峰值期间的能量衰减因子 $e^{-\frac{\beta T}{4}}$ 近似取值为 1,是一种广泛采用的工程简化方法。主要基于以下三方面考虑:从时间尺度而言,根据爆破安全规程,地下深孔爆破主振频率 f 在 30~100 Hz 之间,起峰时间 $T/4$ 极短(对应为 2.5~8.3 ms),在此瞬时段内由介质阻尼引起的振幅衰减量级相对有限;其次,该简化策略具有明确的保守性倾向,通过系统性地高估合成振速峰值(计算表明,当 $\beta = 50$, $f = 50$ Hz 时, $e^{-\frac{\beta T}{4}} \approx 77.9\%$,偏差约 22.1%),为振动安全控制提供了额外裕度,符合工程风险评估原则;同时,相较于模型中标定参数(如衰减系数 β 、场地系数 K 等)固有的变异性,此项简化引入的误差处于可接受范围,且能显著提升计算公式的简洁性与实用性,便于揭示微差时间与炮孔数目对叠加效应的主导规律。

因此,简化后的振动放大系数可表示为

$$F_{(\beta, N, \Delta t)} = \frac{1-e^{-N\beta\Delta t}}{1-e^{-\beta\Delta t}} \quad (15)$$

此时,总振动速度峰值可估算为

$$PPV_{total} \approx V \cdot F_{(\beta, N, \Delta t)} = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \cdot \frac{1 - e^{-N\beta\Delta t}}{1 - e^{-\beta\Delta t}} \quad (16)$$

为保证保护对象的爆破振动安全,要求合成振动速度峰值不超过其安全允许阈值 V_s 。

$$K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \cdot \frac{1 - e^{-N\beta\Delta t}}{1 - e^{-\beta\Delta t}} \leq V_s \quad (17)$$

由此可得到临界微差间隔时间 Δt_c 满足的不等式为

$$\frac{1 - e^{-N\beta\Delta t}}{1 - e^{-\beta\Delta t}} \leq \frac{V_s}{K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha} \quad (18)$$

式(18)是关于临界时间 Δt_c 的超越方程,不便应用于实际应用,可令 $C = \frac{V_s}{K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha}$, 则

$$\frac{1 - e^{-N\beta\Delta t_c}}{1 - e^{-\beta\Delta t_c}} \leq C \quad (19)$$

当 $N\beta\Delta t_c \gg 1$ 时, $e^{-N\beta\Delta t_c} \approx 0$, 此时式(19)可简化为

$$\frac{1}{1 - e^{-\beta\Delta t_c}} \leq C \quad (20)$$

对上述不等式进行求解,即可得

$$\Delta t_c \geq -\frac{1}{\beta} \ln \left(1 - \frac{1}{C} \right) \quad (21)$$

即

$$\Delta t_c \geq -\frac{1}{\beta} \ln \left[1 - K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \right] \quad (22)$$

式(21)在 $N\beta\Delta t_c \geq 5$ 时具有足够的精度,此时 $e^{-N\beta\Delta t_c} < 0.01$ 。

2 工程应用

2.1 工程概况

试验依托的旭龙水电站引水发电系统工程地下洞室群复杂,石方洞(井)挖量达 144.5 万 m^3 ,主厂房埋深 260 ~ 420 m,围岩以花岗岩为主,少部分混合岩、斜长角闪岩,以花岗岩及混合岩呈块状构造,斜长角闪岩脉体以次块状构造为主。试验区域位于主厂房第七层上游边墙。该层开挖的核心挑战在于,如何在确保上方岩锚梁岩台振动安全的前提下,实施精细爆破。为此,本次试验旨在通过优化爆破参数,确定安全的最低微差间隔时间,同步控制振动与改善块度,以期实现低振动、低大块率的爆破效果,从而保障岩台稳定并提高出渣效率。

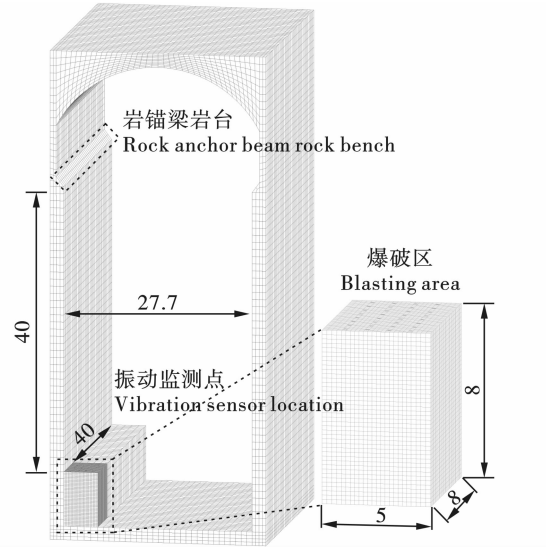


图 1 地下厂房爆破区域(单位:m)

Fig. 1 Blasting area of underground factory (unit:m)

2.2 爆破方案设计及优化

原爆破方案采用两孔一段,段间微差时间为 100 ms,爆破网路设计如图 2 所示,具体爆破参数见表 1。该方案设计基于传统经验,旨在通过较大的微差间隔时间避免爆破振动峰值叠加,从而保护上方岩锚梁岩台等关键构筑物的安全。然而,现场实践表明,该方案在振动控制方面虽具有一定效果,但爆破后石碴块度普遍偏大,大块率较高,严重影响后续清运和石碴的再利用效率。

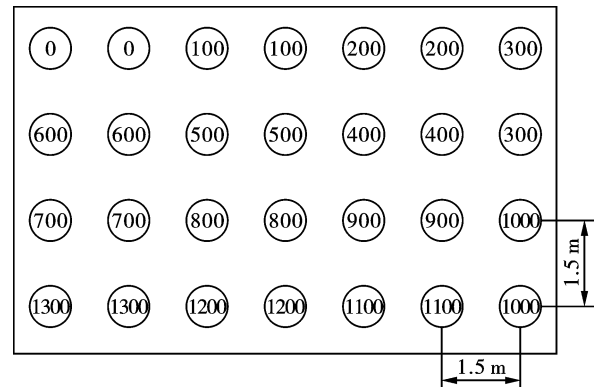


图 2 爆破网路设计(单位:ms)

Fig. 2 Blasting network design (unit:ms)

为优化爆破效果,在保证振动安全的前提下降低大块率,研究基于公式(22)对微差起爆间隔时间进行了优化。根据爆破安全规程(GB 6722—2014),对于中硬岩, K 取 150 ~ 250, α 取 1.5 ~ 1.8,厂房边墙进行了初喷混凝土支护,龄期 3 ~ 7 d,因此,具体的参数取值可为 $\beta = 50$, $K = 200$, $\alpha = 1.5$, $Q = 20 \text{ kg}$, $R = 40 \text{ m}$, $V_s = 5 \text{ cm/s}$ 。带入式(21)后计算

可得 $\Delta t_c \approx 24.6 \text{ ms}$, 此时 $e^{-N\beta\Delta t_c} \approx 3.56 \times 10^{-8} \ll 1$, 满足应用该公式的适用条件。

表 1 现场试验爆破参数
Table 1 Blasting parameters for field tests

孔数 Hole count	孔深 Hole depth	孔径 Hole diameter	孔距 Spacing	排距 Burden	药径 Explosive diameter	单孔药量 Single-hole charge	堵塞长度 Stemming length	单段药量 Charge per delay	总药量 Total amount of charge
28	8	90	1.5	1.5	70	10	1.5	20	280

根据计算结果对原方案进行调整,确定了微差间隔时间为 25 ms、50 ms、75 ms 以及 100 ms 的试验组。除微差时间外,其余爆破参数(包括孔深、孔径、孔距、排距、单孔药量等)均保持一致,以确保试验结果的可比性。调整后的方案通过数码电子雷管实现精确延时起爆,利用应力波叠加效应改善岩石破碎效果,同时通过振动监测验证其安全性。

2.3 爆破块度结果与分析

为系统探究微差间隔时间对爆破块度分布的影响,采用 Split-Desktop 图像识别处理软件对 25 ms、50 ms、75 ms 及 100 ms 四种工况下的爆破岩石碎块进行了图像采集与定量分析,如图 3 所示,同时获取了爆破后的颗粒级配曲线,如图 4 所示。

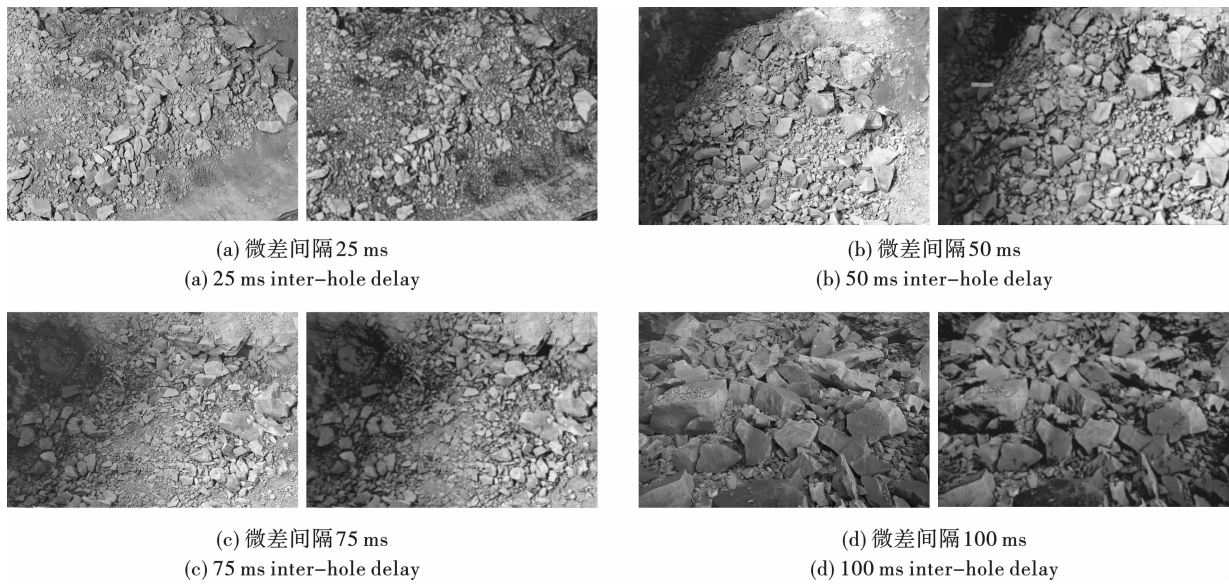


图 3 爆破块度对比

Fig. 3 Comparison of fragmentation size distribution

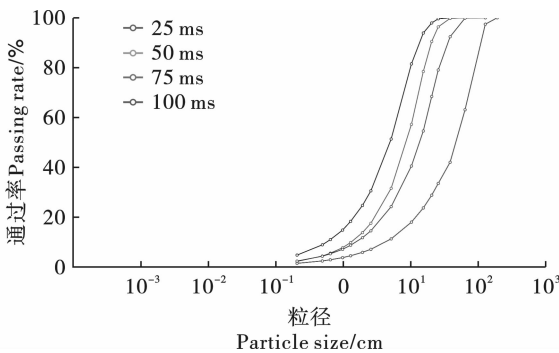


图 4 不同微差间隔时间下的级配曲线

Fig. 4 Gradation curves under different delay intervals

级配曲线数据表明,块度分布特征对微差间隔时间具有显著的依赖性。100 ms 工况的级配曲线

呈现出典型的粗粒化分布特征,在粒径 63.5 cm 处的累计通过率急剧降至 63.0%,而粒径小于 2.54 cm 的细颗粒累计百分比仅为 6.82%,反映出破碎能量利用不充分。当微差间隔缩短至 75 ms 和 50 ms 时,级配曲线系统性左移,中间粒径段(10.16 ~ 38.1 cm)的通过率显著提高,其中 50 ms 工况在 5.08 cm 粒径处的累计百分比为 31.36%,表明破碎程度明显增强。在 25 ms 工况下,级配曲线展现出最优的连续性,其在小粒径端(0.2032 cm)仍保持 4.47% 的累计通过率,在 10.16 cm 处的通过率高达 81.46%,体现了最广泛的粒径分布范围。

关键级配参数的定量分析进一步揭示了块度分布的演变规律。中值粒径 d_{50} 随微差间隔缩短呈现

明显的单调递减趋势:100 ms 工况约为 75.5 cm, 75 ms 工况降至约 16.8 cm, 50 ms 工况进一步减小至约 11.3 cm, 25 ms 工况达到最小值约 4.88 cm。该变化规律表明缩短微差间隔能显著促进岩石的中等粒径破碎。同时,不均匀系数 C_u 由 100 ms 时的 13.74(级配不良)降低至 75 ms 时的 10.93 和 50 ms 时的 8.07(级配良好),但在 25 ms 时略有升高,约为 10.74,说明粒径分布均匀性随着微差间隔缩短整体呈下降趋势。细颗粒含量(粒径小于 4.9 cm)从 100 ms 时的 2.87% 逐步上升至 25 ms 时的约 12.5%,证实岩石破碎程度随微差间隔缩短而持续提高。

研究表明,微差间隔时间是控制爆破块度分布的关键参数。较短的微差间隔充分利用爆轰应力波的叠加效应,能有效降低中值粒径、提升细颗粒产率并改善级配均匀性,从而实现更理想的爆破破碎效果。

2.4 爆破振动监测结果与分析

为评估不同微差间隔时间对爆破振动的影响,在爆破试验过程中布置了振动监测点,如图 1 所示。图 5 展示了微差间隔为 25 ms 和 50 ms 时,监测点

处的爆破振动速度时程曲线,爆破后仪器安装位置按照与实际爆破区域的距离进行移动,微差时间 75 ms 和 100 ms 时振动水平较低,因此不再进行分析。从曲线可以看出,振动波形呈现出明显的多峰特征,各炮孔起爆产生的振动波在时域上部分叠加,但峰值振动速度仍控制在安全阈值以内。通过对监测数据的进一步分析,得到以下结论:

由表 2 可知,当微差间隔时间为 25 ms 时,监测点在 X 、 Y 、 Z 三个方向上的峰值振速分别为 4.19 cm/s、4.75 cm/s 与 3.0 cm/s,其中最大值(4.75 cm/s)低于安全允许阈值 5.0 cm/s,满足振动控制安全要求。该工况下振动主频分布于 58 ~ 201 Hz 之间,主要能量集中在 40 ~ 60 Hz 频段,远离周边关键构筑物的固有频率。当微差间隔时间增大至 50 ms 时, X 、 Y 、 Z 方向的峰值振速分别降至 1.63 cm/s、2.63 cm/s 与 1.64 cm/s,振动强度进一步减弱,安全裕度显著提高。振动主频范围拓宽为 20 ~ 119.75 Hz,但主要能量仍集中于中高频段,与结构固有频率保持安全距离,共振风险可控。

表 2 不同微差间隔时间下的爆破振动速度峰值

Table 2 Peak blasting vibration velocity at different micro difference interval times

微差时间 Delay interval	X 方向 X - direction		Y 方向 Y - direction		Z 方向 Z - direction	
	峰值振速	频率	峰值振速	频率	峰值振速	频率
	Peak vibration velocity/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Frequency/ Hz	Peak vibration velocity/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Frequency/ Hz	Peak vibration velocity/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Frequency/ Hz
25 ms	4.19	201	4.75	58	3.0	87
50 ms	1.63	20	2.63	27.5	1.64	119.75

综上,在设定的微差时间范围内,爆破振动均能得到有效控制,满足安全阈值要求。微差时间的缩短虽会引起振动峰值的小幅上升,但并未导致振动主频显著降低或引起共振风险,验证了通过合理设定微差间隔时间可实现爆破振动安全与岩石破碎效果之间的优化平衡。

3 结论

本文通过理论分析、现场试验与振动监测,系统研究了微差间隔时间对地下厂房爆破开挖中岩石破碎效果与爆破振动的影响,主要结论如下:

(1) 基于爆破振动线性叠加原理,建立了考虑孔数与岩体衰减特性的振动放大系数理论模型,提出了临界微差间隔时间的计算方法,为爆破参数优化提供了理论依据。

(2) 块度分析表明,微差间隔时间显著影响爆破破碎效果。中值粒径(d_{50})随间隔缩短呈单调递减趋势,由 100 ms 的 75.5 cm 降至 25 ms 的 4.88 cm;细颗粒含量(<4.9 cm)相应由 2.87% 提高至 12.5%。不均匀系数随间隔缩短整体呈下降趋势,在 50 ms 时达到最小值 8.07,表明合适的微差间隔可在改善破碎程度的同时优化级配均匀性。

(3) 爆破振动监测结果显示,在 25 ~ 50 ms 微差间隔范围内,各监测方向上的峰值振速均低于 5.0 cm/s 的安全阈值,且振动主频保持在 40 Hz 以上,远离关键构筑物的固有频率,共振风险可控。其中 50 ms 方案在保证破碎效果的同时,将岩锚梁岩台处的峰值振速控制在 2.8 cm/s,实现了振动安全与破碎效率的最佳平衡。

综合块度分布与振动响应分析,推荐在本工程

条件下采用 50 ms 微差间隔时间,既可显著改善爆破提供可借鉴的参数优化范例。
破块度,又能有效控制振动,可为类似地下厂房开挖

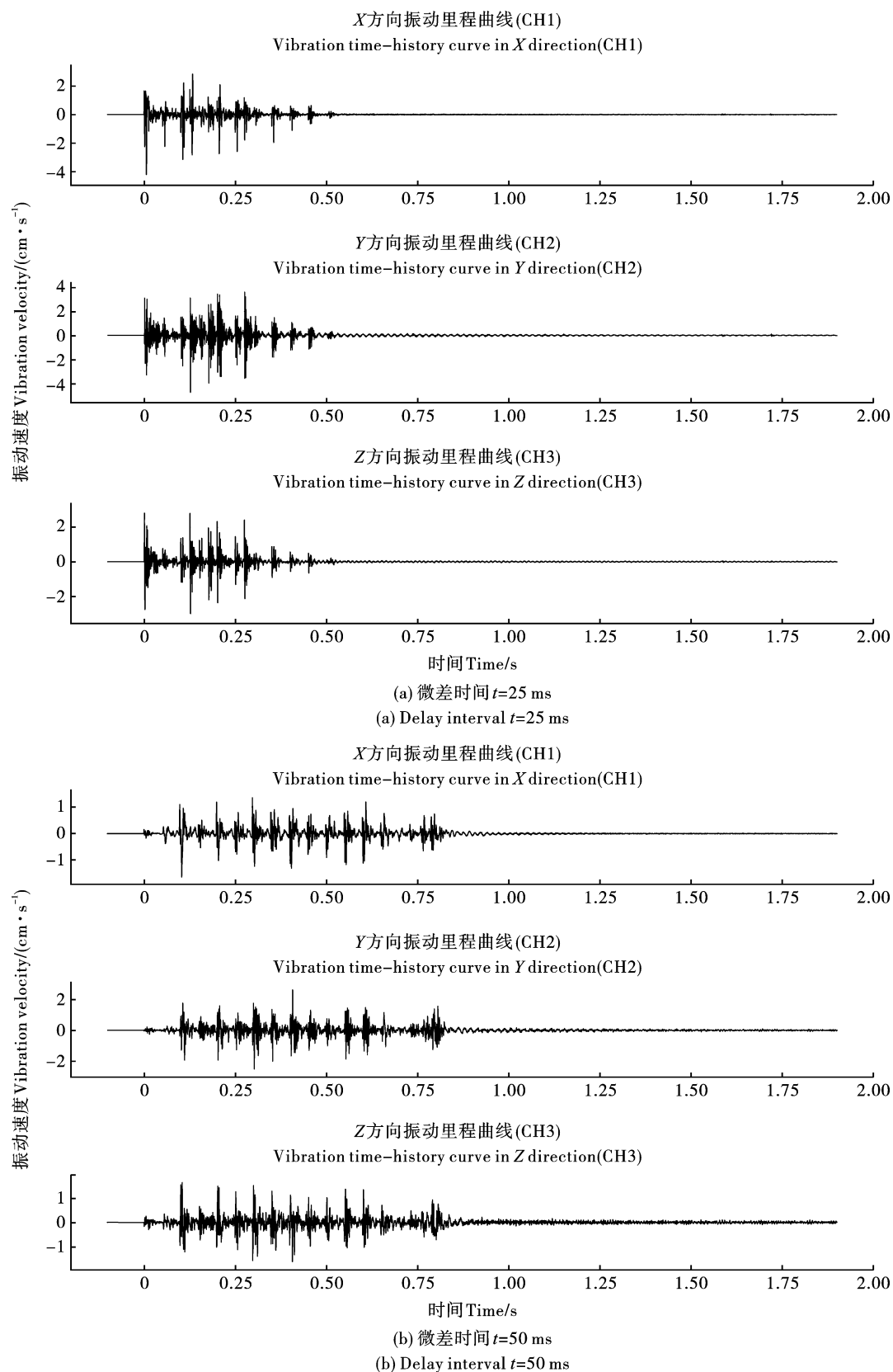


图5 监测点处的爆破振动时程曲线

Fig. 5 Blast vibration time-history curve at a delay interval of 50 ms at the monitoring point

参考文献 (References)

- [1] 吴立辉,李洪伟,聂华君,等. 毫秒延期时间对岩石破碎效果影响的实验研究[J]. 火工品,2020(4):52-56.
- [1] WU Li-hui,LI Hong-wei,NIE Hua-jun,et al. Experimental study on the influence of millisecond delay time on rock fragmentation effect[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(4):52-56. (in Chinese)
- [2] 曹永帮,黄俊红,王自旭,等. 不同炮孔间距下微差爆破诱发爆生裂纹扩展规律研究[J]. 爆破,2025,42(2):81-87,96.
- [2] CAO Yong-bang,HUANG Jun-hong,WANG Zi-xu,et al. Study on the propagation law of blast-induced cracks under millisecond blasting with different borehole spacing[J]. Blasting,2025,42(2):81-87,96. (in Chinese)
- [3] 龚敏,陈哲,吴昊骏,等. 掏槽药量与起爆时差的关系对隧道爆破合成振速的影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2016,24(6):1110-1124.
- [3] GONG Min,CHEN Zhe,WU Hao-jun,et al. Influence of the relationship between cutting charge amount and initiation time difference on the synthetic vibration velocity of tunnel blasting[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2016,24(6):1110-1124. (in Chinese)
- [4] 周敏,张云鹏,胥国强. 数码雷管露天深孔微差爆破网络数值模拟[J]. 中国矿业,2021,30(S2):261-265.
- [4] ZHOU Min,ZHANG Yun-peng,XU Guo-qiang. Numerical simulation of digital detonator millisecond blasting network in open-pit deep hole blasting[J]. China Mining Magazine,2021,30(S2):261-265. (in Chinese)
- [5] 李洪伟,吴延梦,潘乐,等. 基于 DIC 的露天矿山微差爆破模型试验及数值模拟[J]. 金属矿山,2024(3):131-139.
- [5] LI Hong-wei,WU Yan-meng,PAN Le,et al. Model test and numerical simulation of millisecond blasting in open-pit mine based on DIC[J]. Metal Mine,2024(3):131-139. (in Chinese)
- [6] 于传泽,郭连军,邓丁,等. 露天矿山孔间延时起爆条件下的岩石破碎效果研究[J]. 爆破,2024,41(2):1-7.
- [6] YU Chuan-ze,GUO Lian-jun,DENG Ding,et al. Study on rock fragmentation effect under inter-hole delay initiation in open-pit mine[J]. Blasting,2024,41(2):1-7. (in Chinese)
- [7] 李延龙,申燕元. 无底部结构下向深孔逐孔微差起爆技术研究及应用[J]. 中国有色金属,2023(S1):305-310.
- [7] LI Yan-long,SHEN Yan-yuan. Research and application of hole-by-hole millisecond initiation technology with downward medium-length holes without bottom structure[J]. China Nonferrous Metals,2023(S1):305-310. (in Chinese)
- [8] 常建平,张鹏飞,段军,等. 高台阶孔内微差爆破参数的确定与爆破效果分析[J]. 金属矿山,2020(12):81-87.
- [8] CHANG Jian-ping,ZHANG Peng-fei,DUAN Jun,et al. Determination of in-hole millisecond blasting parameters and analysis of blasting effect in high bench[J]. Metal Mine,2020(12):81-87. (in Chinese)
- [9] 安龙,符洲云,张家华,等. 低品位厚大矿体下向扇形深孔爆破精细控制与参数寻优方法[J]. 金属矿山,2025(5):89-98.
- [9] AN Long,FU Zhou-yun,ZHANG Jia-hua,et al. Fine control and parameter optimization method for downward fan deep hole blasting in low-grade thick ore bodies[J]. Metal Mine,2025(5):89-98. (in Chinese)
- [10] 叶海旺,杨坤,马宝臣,等. 基于排间延时的柱状节理岩体爆破块度优化研究[J]. 工程爆破,2024,30(6):1-8.
- [10] YE Hai-wang,YANG Kun,MA Bao-chen,et al. Research on blasting fragmentation optimization of columnar jointed rock mass based on row delay[J]. Engineering Blasting,2024,30(6):1-8. (in Chinese)
- [11] 冷振东,张程娇,邓小英,等. 台阶爆破工业电子雷管精确延时爆破设计与应用[J]. 工程爆破,2024,30(5):216-225.
- [11] LENG Zhen-dong,ZHANG Cheng-jiao,DENG Xiao-ying,et al. Design and application of precise delay blasting with industrial electronic detonators in bench blasting[J]. Engineering Blasting,2024,30(5):216-225. (in Chinese)
- [12] 黄雪峰,储亚坤,杨赛群,等. 露天矿山台阶爆破合理微差时间优选及应用[J]. 煤矿爆破,2024,42(1):15-20.
- [12] HUANG Xue-feng,CHU Ya-kun,YANG Sai-qun,et al. Optimization and application of reasonable millisecond delay time for bench blasting in open-pit mine[J]. Coal Mine Blasting,2024,42(1):15-20. (in Chinese)
- [13] 李昊明,李祥龙,王建国,等. 露天矿山台阶松动爆破延时时间优化与效果评价[J]. 工程爆破,2025,31(2):98-105,168.
- [13] LI Hao-ming,LI Xiang-long,WANG Jian-guo,et al. Optimization and effect evaluation of delay time for bench loosening blasting in open-pit mine[J]. Engineering Blasting,2025,31(2):98-105,168. (in Chinese)
- [14] 全国安全生产标准化技术委员会非煤矿山安全分技术委员会(SAC/TC 288/SC 2). GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [14] National Technical Committee for Standardization of Work Safety, Subcommittee for Non-coal Mine Safety (SAC/TC 288/SC 2). GB 6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing:Standards Press of China, 2014. (in Chinese)