

# 某地下厂房同层及附属洞室爆破振动 衰减规律研究

胡云<sup>1</sup>, 陈焕杰<sup>2</sup>, 罗滔<sup>2</sup>, 傅少君<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 爆破振动衰减规律是控制爆破对临近工程危害的基础, 水电站地下厂房洞室群组成复杂, 临近洞室间爆破作业交叉影响突出。为探究某地下厂房主厂房爆破开挖过程中的爆破作业对主厂房内同层间围岩及对附属洞室围岩的影响差异, 监测相近高程的两类区域一定范围内围岩质点振动速度, 基于萨道夫斯基公式对监测数据进行回归分析, 对爆破振动在两类区域围岩中的衰减规律的差异进行对比, 并以此提出了爆破施工优化建议。结果表明: 当最大单响药量较小时, 两类区域振动速度差异不明显, 随最大单响药量的增长, 附属洞室振速较主厂房内同层围岩明显增大; 在相同峰值振速安全允许值及爆源距情况下, 爆破作业进行至附属洞室与主厂房连接处时应适当减小爆破参数中的最大单响药量。回归的振动峰值速度衰减公式  $R^2$  均大于 0.8, 精度满足需求。

**关键词:** 爆破振动; 水电站地下厂房; 衰减规律; 附属洞室

中图分类号: TV731.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0083-07

## Attenuation Law of Blasting Vibration in the Same Floor and Auxiliary Cavern of an Underground Powerhouse

HU Yun<sup>1</sup>, CHEN Huanjie<sup>2</sup>, LUO Tao<sup>2</sup>, FU Shaojun<sup>3</sup>

(1. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610066, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** The attenuation law of blasting vibration is the basis for controlling the hazards of blasting to adjacent projects. The composition of the cavern group in the underground powerhouse of the hydropower station is complex, and the cross-influence of blasting operations among adjacent cavern groups is prominent. To explore the differences in the influence of blasting operations during the blasting excavation process of the main powerhouse in a certain underground factory on the surrounding rock between the same floors in the main powerhouse and on the surrounding rock of the auxiliary cavern, the vibration velocities of surrounding rock particles within a certain range near two types of areas with similar elevations were monitored. Based on the Sadowski formula, regression analysis was conducted on the monitoring data to compare the differences in the attenuation laws of blasting vibrations in the surrounding rocks of the two types of areas. Based on this, suggestions for optimizing blasting construction were proposed. The results show that when the maximum single blow blasting charge is small, the difference in vibration velocity between the two types of areas is not obvious. With the increase of the maximum single blow blasting charge, the vibration velocity of the auxiliary cavern is significantly higher than that of the surrounding rock of the same layer in the main power plant. Under the same safety

收稿日期: 2025-06-09

修稿日期: 2025-12-11

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(19JK0913); 中国水利水电第五工程局有限公司科研项目(2022-05-009); 陕西省教育厅青年创新团队项目(24JPI97)

作者简介: 胡云(1994—), 男, 工程师, 主要从事水利水电工程方面的研究工作。E-mail: 2687388875@qq.com

通讯作者: 罗滔(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构安全与耐久性等方面研究工作。E-mail: luotao19870426@126.com

allowable value of peak vibration velocity and the distance of the explosion source, when the blasting operation reaches the connection between the auxiliary cavern and the main powerhouse, the maximum single blow blasting charge in the blasting parameters should be appropriately reduced. The vibration peak velocity attenuation formula  $R^2$  is all greater than 0.8, and the accuracy meets the requirements.

**Keywords:** blasting vibration; underground powerhouses of the hydropower station; attenuation law; auxiliary cavern

西南地区水电站受高山峡谷地形影响,通常将发电机组布置在两岸山体中的地下厂房内<sup>[1-2]</sup>。此类地下洞室结构规模较大,洞室纵横交错,且受岩体结构及地应力影响,一般采用“平面多工序、立体多层次”的爆破开挖形式施工<sup>[3-6]</sup>。爆破开挖过程中,爆破引起的振动对一定区域内围岩、喷护结构、混凝土结构等稳定性影响较大<sup>[7-9]</sup>。为优化爆破设计,控制爆破振动,保证地下厂房爆破开挖施工过程中的安全性,探究爆破振动传播及影响规律是十分必要的<sup>[10]</sup>。

近年来,诸多学者对各类工程中爆破振动响应进行分析研究,积累了大量经验。Xue 等<sup>[11]</sup>以北山地下实验室为工程背景,对实验室坡道入口段爆破振动进行特性分析,利用小波包变换提取爆破振动速度及能量特征,基于等效弹性边界理论及岭回归方法得到爆破振动速度及主频的公式;杜军等<sup>[12]</sup>对露天采场台阶爆破进行萨道夫斯基公式回归分析过程中,针对最大单响药量及爆边距取值定义模糊的问题,采用比例距离概念,选取较合适的回归参数,使基于测点数据的回归公式更加准确;Wu 等<sup>[13]</sup>针对小净距隧道爆破开挖过程中,隧道间岩体夹层受爆破振动影响出现的损坏或失稳问题,提出保留减震层的四步开挖方法,并基于数值模拟手段对该方法施工时的岩体夹层爆破振动响应进行分析,后续在深圳莲塘隧道项目的爆破开挖施工应用中保证了夹层岩石稳定性;Xia 等<sup>[14]</sup>对现有衬砌存在缺陷的隧道受临近新建隧道爆破开挖影响情况进行研究,探究衬砌裂缝及空腔对振动速度、应力的响应程度和范围,并提出振动峰值速度、单次药量、延迟时间的控制标准和措施;周俊汝等<sup>[15]</sup>基于考虑介质阻尼项的黏性岩体爆破振动频谱表达式及有限元软件 LS-DYNA,分析了球状、柱状药包爆破振动频率的衰减规律,研究中表明,爆破振动的主频率在衰减过程中存在局部突变现象,振动平均频率则更具规律性;Tian 等<sup>[16]</sup>为探究爆破振动速度在地层中的传播规律,减少爆破振动对既有建筑物的影响,基于安六铁路地宗隧道工程进行系列爆破试验,总结超大断面浅层隧道爆破振动传播规律,并采用特定减震方案

将峰值振动速度控制在 1.12 cm/s 以下;涂颖等<sup>[17]</sup>对某地下试验厅上下层同时开挖过程中,上层爆破开挖对下层围岩影响进行研究,分析下层围岩峰值振动速度及频率特征,评价其动力稳定状态,结果表明与同距的上层底板围岩相比下层洞室顶拱围岩振动速度更高。

本文针对某地下厂房爆破开挖工程,监测主厂房内同层围岩及附属洞室围岩产生的质点振动峰值速度,回归各区域振动峰值速度衰减公式,对比分析爆破振动在大型地下洞室同层间围岩及附属洞室中的传播衰减规律差异,并给出后续厂房开挖的安全爆破设计参考建议。

## 1 工程概况

### 1.1 工程规模及布置

该水电站地下厂房地处西南地区雅砻江中游右岸山体内,厂房轴线为 N30°E,总装机容量 1 020 MW。地下厂房主要洞室包括主副厂房及主变洞,两洞室平行布置,由四条母线洞连通,主厂房机组段上游边墙连通四条压力管道,主副厂房洞长 227.90 m,高 75.77 m,岩锚梁以下宽为 26.00 m,以上宽为 28.60 m;主变洞总长 149.70 m,宽 15.50 m,高 19.60 m。厂区围岩以Ⅲ、Ⅳ类围岩为主,属于低—中等地应力区。

### 1.2 开挖方案

地下厂房采用钻孔爆破法进行整体开挖,主厂房分 10 层开挖,开挖顺序自上而下,最大开挖高度约为 75.8 m。如图 1(a)所示,第 1 层至第 10 层开挖高度分别为 12、4.3、9.8、6、8、8、9.5、6、5、7.2 m。与主厂房连通的母线洞和引水系统的压力管道在主厂房开挖至相应高程前完成开挖工作,随后开挖主厂房至下游边墙Ⅳ、Ⅴ层及上游边墙Ⅵ、Ⅶ层时与母线洞及压力管道分别连通。如图 1(b)所示,主厂房第Ⅵ层分层高度 8 m,分 4 m 高两小层开挖,单次爆破开挖长度为 8~12 m,采用“两侧边墙一次预裂先行,两小层半幅平推开挖”的方式施工,其他开挖层均采用此开挖策略。

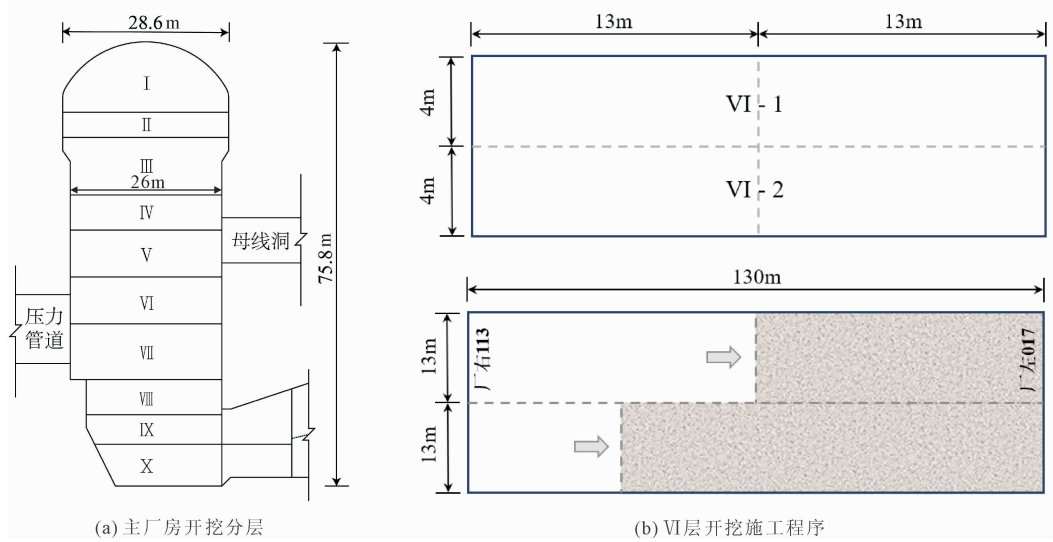


图 1 主厂房开挖方案示意图

## 2 爆破参数及振动监测方案

在厂房爆破开挖施工过程中,共进行 10 次爆破监测。其中对主厂房 V, VI 层厂房开挖爆破对纵向边墙围岩影响各进行 3 次监测,母线洞和压力管道受厂房爆破影响各监测 2 次。各次监测均在距离爆破区域 10~30 m 区间内设置 2 个测点。

### 2.1 爆破参数

监测区域开挖长度均在 8~12 m,阶梯高度 4~5 m,采用乳化炸药及高精度电子毫秒延期电雷管。爆破参数由工程初期爆破试验总结得出,预裂孔间选择 25 ms,主爆孔间选择 30 ms,预裂装药结构为间隔装药,主爆装药结构为连续装药。岩锚梁以下边墙爆破施工过程中为减小爆破对岩锚梁结构及边墙影响,在主爆孔及预裂孔间设置缓冲孔并减小其单孔药量。全部爆破监测的各类炮孔爆破参数如表 1 所示。

表 1 爆破参数

炮孔类别	孔距 /m	排距 /m	孔径 /mm	孔深 /m	单孔药量 /kg	雷管选择 /ms
主爆孔	2.0	1.5	90	5	8/6	30
预裂孔	0.7	—	90	8/9	6.2~7.8	25
缓冲孔	1.0	—	90	5	6/5	30

### 2.2 监测系统及测点布置

依托西南某水电站施工期地下厂房,旨在探究厂房爆破作业产生的振动在厂房区围岩传播衰减特性,采用纵向层间及附属洞室内围岩表面振动监测方案,监测爆破作业在同层间及与主厂房相连附属

洞室中的爆破振动衰减规律。分别监测数个相同层间爆破作业产生的振动速度和主厂房爆破作业在相连附属洞室产生的振动速度。图 2 所示为附属洞室与主厂房连通形式及现场施工过程。

爆破振动监测采用成都交博科技有限公司制造的 L20-N 型号的爆破测振仪,监测系统由传感器、记录仪、计算机及专用 BVA-N 软件组成,如图 3 所示。监测仪器量程为 0.001~40 cm/s,频响范围 1~500 Hz,测量精度 0.0001 cm/s。量程设置考虑爆破可能产生较大振动峰值速度,而频响范围超过 500 Hz 则超出正常范围视为无效数据。监测仪器由传感器探头、数据线和记录仪组成,爆破前使用石膏将传感器黏贴在监测区域相近高程、一定距离的围岩表面,设置好参数后使用数据线将传感器和控制器连接,监测时在监测点附近设立警示牌并将记录仪放至手提箱中,防止人为操作干扰监测结果并保护设备免受飞石损坏。传感器能够同时监测三向振动速度: $x$  指向爆破作业区域, $z$  为铅锤线方向。每次监测采用 2 个同型号振动测试仪对不同监测点同时进行振动监测。

由图 3(c)可知,同层监测时,监测点布置在靠近待爆破开挖区域的厂房轴向方向的一侧边墙上;压力管道及母线洞此类附属洞室监测时,监测点布置在靠近待爆破开挖区域的该洞室的一侧边墙上。爆破区域附近为刚进行支护喷混的施工区,也为爆破振动影响的主要区域,故传感器距离爆破区边缘 10~30 m 范围内,爆源距视为爆破段的中心位置与监测点的水平距离,测点高程一般位于爆破区上平面竖直向上 1 m 以内,以减小振动传播受高程差异

影响。测点根据不同爆源位置不断调整。

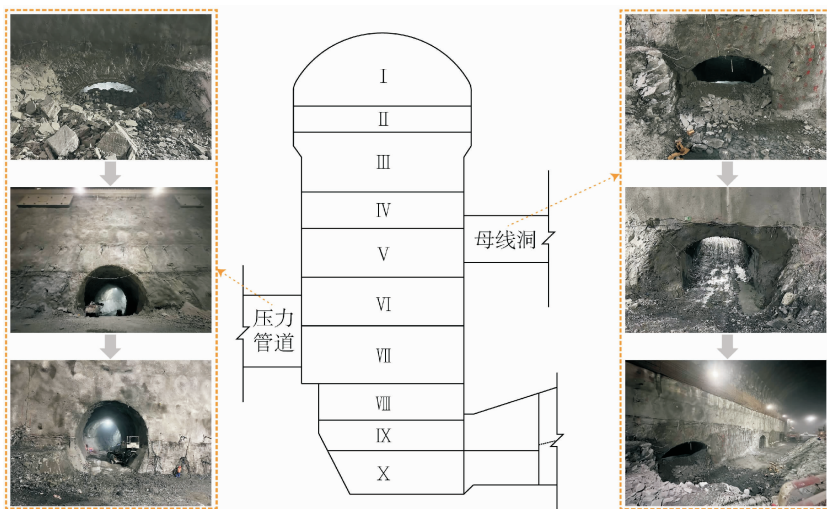


图 2 附属洞室开挖施工过程

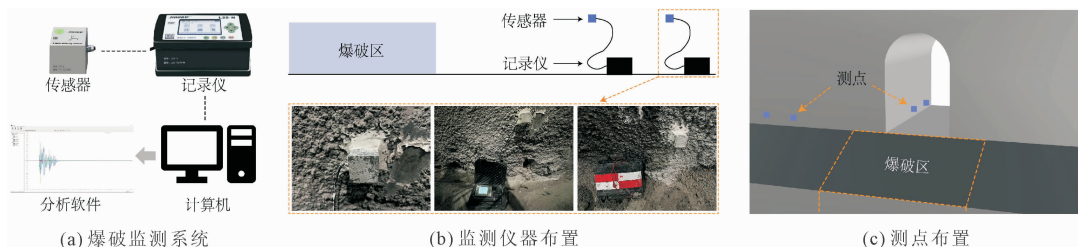


图 3 爆破振动监测方案

### 2.3 爆破振动衰减规律分析方法

工程上对爆破振动速度传播衰减规律分析时,通常以质点峰值振动速度为基准,考虑爆源距与最大单响药量影响,采用传统的萨道夫斯基经验公式进行分析<sup>[11-12]</sup>。同时结合爆源距增大,最大单响药量减小,而振动峰值速度减小的一般规律验证监测数据有效性。

回归计算中,基于各点实测数据,考虑最大单响药量及爆源距对振动速度影响,运用数理统计方法对萨道夫斯基公式线性回归:

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

$$M = \sqrt[3]{Q/R}, S = R/\sqrt[3]{Q} \quad (2)$$

对式(1)进行线性化,两边同时对数运算:

$$\ln V = \ln K + \alpha \ln(\sqrt[3]{Q/R}) \quad (3)$$

式中: $V$ 表示质点振动速度,cm/s; $K$ 表示场地系数,与爆破临空面条件、岩体性质及爆破设计有关; $M$ 表示比例药量, $\text{kg}^{1/3}/\text{m}$ ; $S$ 表示比例距离, $\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ ; $Q$ 表示最大一次单段爆破药量,kg; $R$ 表示爆源距,为测点至爆破区域中心或边缘距离; $\alpha$ 表示衰减指数,与地形地质条件有关。

地下厂房工程规模较大,纵向开挖高度可达数十米,开挖层间地质条件多变。研究中选择与母线洞及压力管道高程相近的V、VI两层作为同层间振动传播衰减规律分析的监测区域,对比同层间与附属洞室回归结果中的场地系数 $K$ 与衰减指数 $\alpha$ ,探究地下厂房中两类区域振动传播衰减规律区别。

## 3 爆破振动衰减规律分析

### 3.1 爆破振动监测结果分析

各次爆破监测区域均为主厂房机组段,爆破参数基本一致,引起的振动波形分布相似,故仅选取同层间与附属洞室中监测的典型波形图进行分析。图4为机组段五(I)层,桩号为厂右095至厂右110爆破作业监测中爆源距为15 m测点的振速随时间变化波形图。图4中截取了时长为200 ms的振动曲线,基本涵盖整次爆破作业对该测点引起的振动情况。由图4可知,爆破作业对厂房围岩引起的三向振动各不相同, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三向的峰值振动速度分别为10.786 9、6.822 0、8.926 7 cm/s,但同一侧点三向振动速度起伏分布特征基本一致。

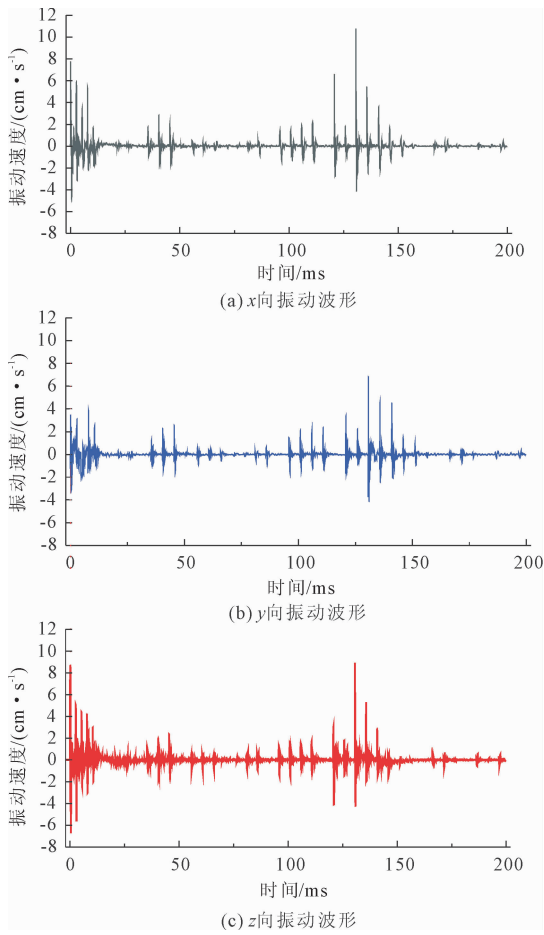


图 4 爆破监测典型振动波形图

爆破区域的装药结构及起爆时间严格按照各区域爆破设计执行,监测数据导入分析软件后,根据振动峰值所在时间对应设计中的相应炮孔,得到引起振动峰值速度的炸药量作为回归分析中的最大单响药量数据,监测质点桩号至爆破中心距离作为爆源距,取各测点获取的三向监测速度中最大值作为振动峰值速度。由于篇幅有限,各区域选取部分测点爆破振动实测值,如表 2 所示。

表 2 各区域爆破振动实测值

区域	测点	爆源距/m	最大单响药量/kg	振动峰值速度/(cm·s <sup>-1</sup> )
V 层间	1	15	10.0	10.7869
	2	20	10.0	6.9642
VI 层间	1	15	8.0	2.8930
	2	20	8.0	1.8965
压力管道	1	10	24.8	36.7127
	2	15	24.8	26.1637
母线洞	1	15	8.0	9.0867
	2	20	8.0	3.9173

由监测结果可以看出,振动峰值速度满足随爆源距增大或最大单响药量减小而减小的一般规律。由第 VI 层间与母线洞监测结果对比可以初步看出,相同最大单响药量及爆源距情况下,附属洞室内振动峰值速度明显大于厂房内层间监测值。根据《爆破安全规程》<sup>[18]</sup> (GB 6722—2014) 及现场施工设计要求质点振动峰值速度的安全允许值为 10 cm/s,压力管道的一次爆破监测中爆源距为 10 m 的测点振动峰值速度达 36.7127 cm/s, V、VI 两层间爆破作业引起的振动峰值速度也存在超限现象,故为保证地下厂房整体施工安全性,对附属洞室中振动传播衰减规律的研究是必要的。

### 3.2 纵向同层及附属洞室围岩振动衰减规律对比分析

按照十次不同爆破作业监测得到的如表 2 所示形式的振动数据,基于最小二乘法对式(3)中系数  $K$ 、 $\alpha$  进行线性回归,分别得到各类区域的萨道夫斯基公式中的场地系数  $K$  与衰减指数  $\alpha$ 。其中式(4)、式(5)、式(6)、式(7)分别为回归后的压力管道、母线洞、V 层间、VI 层间振动峰值速度衰减公式。根据式(4)~式(7)可知,附属洞室中场地系数  $K$  与衰减指数  $\alpha$  较相近区域的层间更大,意味着振动峰值速度受最大单响药量及爆源距影响更加敏感,更易发生超限现象。

$$V_1 = 1731.525 (\sqrt[3]{Q}/R)^{2.926} \quad (R^2 = 0.92) \quad (4)$$

$$V_2 = 2994.734 (\sqrt[3]{Q}/R)^{2.843} \quad (R^2 = 0.92) \quad (5)$$

$$V_3 = 146.973 (\sqrt[3]{Q}/R)^{1.355} \quad (R^2 = 0.83) \quad (6)$$

$$V_4 = 246.627 (\sqrt[3]{Q}/R)^{2.086} \quad (R^2 = 0.87) \quad (7)$$

监测数据代入式(2)求得比例药量  $M$  与比例距离  $S$ ,分别以两参数为横坐标,以振动峰值速度为纵坐标绘制振动峰值速度拟合曲线如图 5 所示。由图 5 可知,振动峰值速度随比例药量增大而增大,随比例距离增大而减小,符合一般规律。如图 5(a) 所示,母线洞与其相近高程的 V 层间拟合曲线在  $M = 0.13$  处相交,当比例药量较小时,两曲线振动峰值速度相对接近, $M > 0.13$  时母线洞中振动峰值速度增长速率明显增大;压力管道与 VI 层间拟合曲线呈现相似趋势, $M < 0.1$  时,两区域振动峰值速度相差极小,随着比例药量增大,压力管道中因爆破作业产生的振动峰值速度快速增长。图 5(b) 所示为振动峰值速度与比例距离关系曲线,因  $M$  与  $S$  为倒数关系,故呈现与图 5(a) 相同的分布特点。

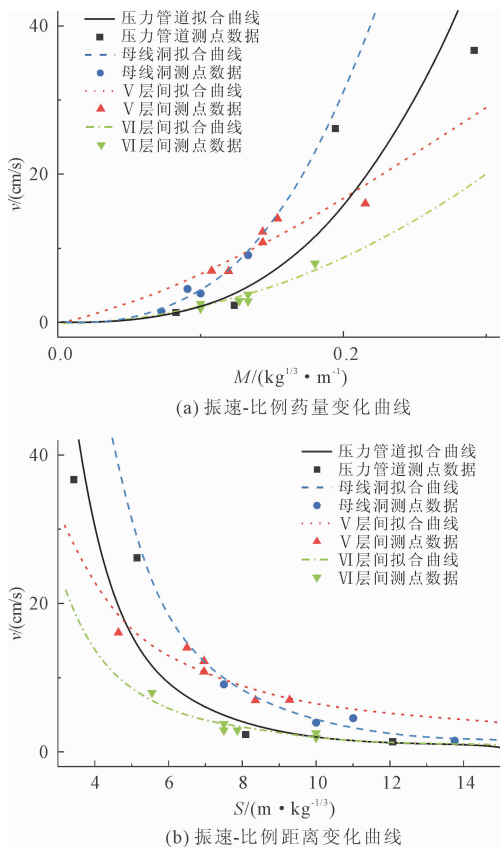


图 5 振动峰值速度拟合曲线

综上所述,最大单响药量大于一定数值时,母线洞及压力管道中因主厂房爆破作业引起的振动峰值速度明显大于相近高程的同层间围岩振速。此类与厂方直接连通的附属洞室在连通处塑性区较发育,围岩稳定性相对较差,而又对振动峰值速度存在一定放大效应,故应对主厂房中与附属洞室较近的爆破作业区域进行特定爆破参数设计,加强爆破安全监测。

### 3.3 围岩安全爆破建议

隧道及地下工程围岩爆破安全评价中,通常采用振动峰值速度作为评价指标,围岩中的振动峰值速度依据规范及工程经验设定安全阈值,当质点振动峰值速度超过此阈值,认为围岩可能产生损伤、裂纹扩展,甚至失稳破坏。根据式(1)萨道夫斯基经验公式可得爆破振动损伤安全药量的计算公式:

$$Q = R^3 (V/K)^{\frac{3}{\alpha}} \quad (8)$$

由式(8)可知,基于不同区域回归所得振动峰值速度传播衰减公式,在已知场地系数  $K$  值和衰减系数  $\alpha$  值,围岩振动安全药量主要由爆源距  $R$  和振动峰值速度安全阈值  $V$  决定。根据《爆破安全规程》<sup>[18]</sup> (GB 6722—2014) 及现场施工设计要求质点

振动峰值速度的安全允许值为  $10 \text{ cm/s}$ 。将振动峰值速度安全允许值及不同区域爆破振动峰值速度传播衰减公式(4)一式(7)代入式(8)得到安全药量计算公式如下:

$$Q_1 = 5.065R^3 \times 10^{-3} \quad (9)$$

$$Q_2 = 2.437R^3 \times 10^{-3} \quad (10)$$

$$Q_3 = 2.606R^3 \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$Q_4 = 9.951R^3 \times 10^{-3} \quad (12)$$

式(9)一式(12)分别代表压力管道、母线洞、V层间及VI层间安全药量计算公式,分析易得,在一定距离区域的附属洞室围岩较高程相近的同层间围岩所能适用的安全药量明显减小。依托地下厂房工程的爆破振动安全监测、评价、及优化过程中,拟设定爆源距  $R = 15 \text{ m}$  处围岩所受爆破作业影响产生超出振动峰值速度安全阈值  $10 \text{ cm/s}$  的情况为不安全状态。故根据式(9)一式(12)可知,各区域爆破设计中最大单响药量  $Q$  应分别小于  $17.10$ 、 $8.23$ 、 $8.80$ 、 $33.59 \text{ kg}$ 。考虑爆破的不确定性,同时为保证爆破作业的安全性,在实际最大单响药量应用时建议适当减小  $10\%$ ,当爆破作业进行至附属洞室与主厂房连接处时应适当减小爆破参数中的最大单响药量。

对于地下厂房的爆破开挖工程而言,其单次爆破作业时时空差异较大,后续对爆破振动峰值速度传播衰减公式过程中,还可以增加更多相关影响因素,如临空面参数、装药结构、监测点间地质条件等,从而使经验公式能更加精确的反映爆破振动对围岩的影响。

## 4 结 论

依托某水电站地下厂房爆破开挖工程,对压力管道、母线洞及高程与两附属洞室相近的第V层、VI层部分区域进行爆破监测,获得了各区域内质点振动峰值速度,基于监测数据线性回归萨道夫斯基公式,探究了爆破振动在该工程不同区域围岩中的传播衰减规律,对比了附属洞室与主厂房内同层间振动传播规律的区别,并为后续爆破设计提供优化建议,得出以下主要结论:

(1) 地下厂房爆破开挖过程中,主厂房的爆破作业产生的振动对附属洞室中围岩的影响大于同层间围岩,且附属洞室与主厂房连通处塑性区较发育,应对此区域进行特定的爆破安全控制。

(2) 基于该水电站地下厂房的压力管道、母线洞及与附属洞室相近高程的V层、VI层的爆破振动

监测数据回归振动峰值速度衰减公式,  $R^2$  均大于0.8,精度满足需求,两类区域振动速度随最大单响药量的增长,附属洞室振速明显增大的趋势。

(3) 在质点振动峰值速度的安全允许值为10 cm/s,参考爆源距为15 m情况下,压力管道、母线洞、V层、VI层最大单响药量应分别小于17.10、8.23、8.80、33.59 kg,爆破作业进行至附属洞室与主厂房连接处时应适当减小爆破参数中的最大单响药量。

### 参考文献:

- [1] He Benguo, Meng Xiangrui, Feng Xiating, et al. Effect of intermediate principal stress on the failure characteristics of an underground powerhouse[J]. Engineering Geology, 2022,311:106914.
- [2] Li Ang, Liu Yi, Dai Feng, et al. Deformation mechanisms of sidewall in layered rock strata dipping steeply against the inner space of large underground powerhouse cavern[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2022, 120:104305.
- [3] 王仁坤,邢万波,杨云浩. 水电站地下厂房超大洞室群建设技术综述[J]. 水力发电学报,2016,35(8):1-11.
- [4] 杨明举,常艸东. 超大型地下洞室群施工开挖程序及围岩稳定分析[J]. 西南交通大学学报,2000,35(1):34-37.
- [5] 肖明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2000,22(4):421-425.
- [6] 傅建. 尚义抽水蓄能电站地下厂房开挖与支护施工[J]. 人民长江,2024,55(S2):202-207.
- [7] 马淑娜,刘新宇,王丹. 大型洞库开挖爆破振动对混凝土衬砌的影响分析[J]. 工程爆破,2008,14(1):8-11,77.
- [8] 王丰,饶宇. 地下厂房洞室群爆破对岩锚梁浇筑质量影响研究[J]. 人民长江,2019,50(S1):312-316.
- [9] 张国华,陈礼彪,夏祥,等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1610-1619.
- [10] Lu Wenbo, Chen Ming, Geng Xiang, et al. A study of excavation sequence and contour blasting method for underground powerhouses of hydropower stations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2012,29:31-39.
- [11] Xue Kejun, Yue Zhongwen, Ren Meng, et al. Analysis of blasting vibration responses in the ramp section of the Beishan Underground Research Laboratory[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2024,153:105999.
- [12] 杜军,花良奎,厉美杰,等. 露天采场台阶爆破萨道夫斯基公式的线性回归分析[J]. 爆破,2024,41(4):181-186,204.
- [13] Wu Xiaodong, Gong Min, Wu Haojun, et al. Vibration reduction technology and the mechanisms of surrounding rock damage from blasting in neighborhood tunnels with small clearance[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023,33(5):625-637.
- [14] Xia Junying, Wang Bo, Guo Xinxin, et al. Vibration response and safety control for blasting vibration of the existing tunnel with defects[J]. Underground Space, 2024:1576-1589.
- [15] 周俊汝,卢文波,张乐,等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(11):2171-2178.
- [16] Tian Xiaoxu, Song Zhanping, Wang Junbo. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126:105813.
- [17] 涂颖,杨建华,代金豪. 大型地下洞室上层爆破开挖对下层围岩振动特性的影响[J]. 长江科学院院报,2020,37(9):110-114.
- [18] 爆破安全规程:GB 6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.