

某铅锌矿地下开采对邻近大坝稳定性影响研究

Study on the Influence of Underground Mining on the Stability of Adjacent Dam in a Lead-Zinc Mine

向省伟¹, 孙文勇¹, 王明¹, 张承², 陈帮洪³, 李坤⁴

(1. 四川鑫科创安安全科技有限公司, 四川 绵阳 621050; 2. 四川省川佑工程技术咨询服务有限公司, 四川 成都 610041; 3. 昆明有色冶金设计研究院股份公司, 云南 昆明 650202; 4. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:在工程建设快速发展的背景下,爆破技术广泛应用于基础设施项目,其对邻近关键水利设施(如水库大坝)稳定性的潜在影响不容忽视。本研究以西藏某邻近大坝的铅锌矿山为背景,结合现场调研与数值模拟方法,系统探究了地下不同中段采掘爆破对大坝稳定性的影响。研究建立了精细的地下爆破与大坝三维数值模型,并利用动力学软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟计算了三种典型爆破工况下采掘爆破对大坝稳定性的影响。重点从大坝坝体爆破振动波传播特性、剪应力分布特征及质点振动速度(PPV)与加速度等方面进行了分析。结果表明:随爆破振动波传播,坝顶受力逐渐增大,且坝肩与坝踵部位岩体应力显著高于其他区域;坝顶、坝肩和坝踵处单元最大剪应力为 0.73 MPa;各测点 X、Y、Z 三个方向的 PPV 值均小于 0.6 cm/s。综合分析表明,该铅锌矿在 3 230 m、3 300 m 及 3 350 m 中段的爆破作业对邻近大坝坝体稳定性未构成显著威胁。研究成果为地下工程爆破安全施工提供了理论参考与技术支持,同时为水库大坝的稳定性评估与风险管理提供了新思路与方法。

关键词:采掘工程; 大坝稳定性; ANSYS/LS-DYNA; 数值模拟

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0007-09

Abstract: Under the background of rapid development of engineering construction, blasting technology is widely used in infrastructure projects, and its potential impact on the stability of adjacent key water conservancy facilities (such as reservoir dams) cannot be ignored. In this study, a lead-zinc mine adjacent to a dam in Tibet was taken as the background. Combined with field investigation and numerical simulation methods, the influence of excavation blasting in different underground sections on the stability of the dam was systematically explored. A fine three-dimensional numerical model of underground blasting and dam is established, and the influence of mining blasting on dam stability under three typical blasting conditions is simulated by using dynamic software ANSYS/LS-DYNA. The propagation characteristics of blasting vibration wave, shear stress distribution characteristics, particle vibration velocity (PPV) and acceleration of dam body are analyzed. The results show that with the propagation of blasting vibration wave, the stress of dam crest increases gradually, and the stress of rock mass at dam abutment and dam heel is significantly higher than that in other areas. The maximum shear stress of the unit at the top, abutment and heel of the dam is 0.73 MPa. The PPV values of each measuring point in X, Y and Z directions were all less than 0.6 cm/s. The comprehensive analysis shows that the blasting operations in the 3 230 m, 3 300 m and 3 350 m sections of the lead-zinc mine do not pose a significant threat to the stability of the adjacent dam body. The research results provide theoretical reference and technical support for the safe construction of underground engineering blasting, and provide new ideas and methods for the stability evaluation and risk management of reservoir dams.

Key words: mining engineering; dam stability; ANSYS/LS-DYNA; numerical simulation

1 前言

矿产资源是国家经济建设和社会可持续发展的物质基础,高效安全地开采矿产资源对于国家经济建设具有重要的意义^[1-3]。目前,矿产资源开采过程中,爆破是一种重要手段。而在矿山进行爆破作业时,爆破地震波在传播过程中会对邻近周边构筑

[作者简介] 向省伟(1986—),男,从事矿山安全与采矿技术研究工作。

[基金项目] 四川省自然科学基金(编号:2022NSFSC1089);西南科技大学博士基金(21zx7157)

[引用格式] 向省伟,孙文勇,王明,等. 某铅锌矿地下开采对邻近大坝稳定性影响研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(5):7-15.

物造成较大的影响,因此,对地震波传播进行研究,对于工程安全具有重要意义^[4-6]。爆破振动研究一直是工程和科学领域内的研究焦点,鉴于爆破过程本身的复杂性和爆破条件的多样性,目前尚难以确立一个统一的标准来准确判别爆破振动的安全性。因此,深入探究爆破产生的地震波对水库大坝稳定性的影响,不仅具有重要的理论价值,更具备显著的工程实践意义,并且可以进一步填补爆破振动对于大坝稳定性方面影响研究缺失。

西藏是我国的工程施工研究的重点领域,地质条件复杂,地势落差大,水库大坝较多。因此在地下工程施工特别是矿产资源开采时,地下采掘工程周边常常会存在许多重要的构筑物,如水库大坝、村庄、高架桥梁、地下管道、高压线等,因此在进行地下采掘工程爆破作业时,必须要在爆破作业之前对周边的构筑物安全稳定性进行研究分析。由于工程爆破对于邻近构筑物的影响存在许多条件限制,诸如地质条件、构筑物类型、构筑物材料结构种类、爆破作业药量以及作业位置等,因此许多学者对爆破在不同工程领域对邻近构筑物稳定性影响做了大量研究。一种是以布置监测点为手段的分析方法,如刘超英、高永祥等^[7-8]通过在水库大坝布置监测点分析了输水隧洞爆破施工对大坝的位移变形、振动速度及频率等变化情况,论证了爆破施工产生的爆破振动对大坝安全未产生明显的危害,为工程爆破振动安全评价提供科学依据;另一种是以数值模拟为手段的分析方法,如邓成发等^[9]采用三维有限元模型,深入分析了空库和满库状态下坝体的模态特性。通过对主振频率、振动能量、振动模态以及质点峰值振速的综合考虑,得出了爆破振动对该大坝安全影响较小的结论。韩辉等^[10]建立大坝振动响应的数值模型,对大坝在爆破振动过程中的变形和应力特征进行分析,得到了爆破振动对大坝的影响,最终提出合理的爆破参数和安全爆破距离。钱立等^[11]利用Flac3D建立高峰矿深部巷道模型,并对巷道施加爆破地震波进行动力分析计算,结果表明爆破震动对巷道顶板危害最大,底板次之,影响最小的为巷道两帮。尽管爆破振动对邻近重要构筑物稳定性影响方面已经取得许多成果^[12]。但仅针对小药量、浅埋工程对小距离构筑物的影响,并且周边环境条件都较为简单。对于地下矿产资源开采的采掘工程爆破对水库大坝的研究较少,且仅从布置测点方面简单分析,对大坝的稳定性缺乏定量的分析,并且采用动

力学软件LS-DYNA针对地下采掘工程爆破对水库大坝等构筑物的研究较为缺乏。

基于此本文以我国西部某铅锌矿为例,利用3DMINE建模结合动力学分析软件LS-DYNA研究其在采掘过程中的大坝坝体爆破应力波分布规律,揭示其大坝稳定性分析中的意义,并进一步结合质点振动速度判定邻近大坝在地下采掘工程爆破动态响应下的稳定性,研究具有重要的实际意义。

2 工程背景

矿区位于青藏高原东部“三江”峡谷北段,属平行岭谷地貌区。地势西北高、东南低,地形起伏剧烈,最高峰海拔4 044 m,最低河谷海拔3 250 m,相对高差达794 m,呈典型高山深切峡谷特征。水系属澜沧江北西向流域,主干流色曲(源于类乌齐县长毛岭)自NW向SE贯穿矿区,于察雅县卡贡汇入澜沧江。气候为高原寒温带半干旱型,具强日照、高辐射、大温差及低氧特征。

矿山主营铅锌矿(伴生Au、Ag、Cu)采选及硫酸生产。I号矿体呈条带状出露于地表3 400~3 630 m高程,走向NNE,延伸1 100.0 m,平均厚12.7 m。矿区中部发育近SN向主干断裂F₂,延伸1 000 m,宽<10.0 m,东倾60°~78°。

矿山东北侧550.0 m直距处建有混凝土重力拦河闸坝(图1、图2)。工程参数:坝高34.0 m,坝顶高程3 264.0 m,控制流域面积6 718.0 km²,总库容427.0万m³。坝基岩性以长石石英砂岩为主,局部夹页岩-粉细砂岩互层及煤线。场址地震基本烈度VII度,50年超越概率10%谱特征周期0.45 s,峰值加速度0.10 g。

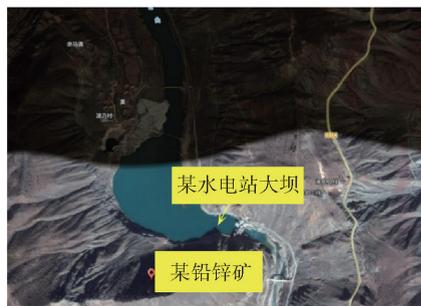


图1 某铅锌矿地理位置

3 地下采掘工程爆破作业方案分析

3.1 炸药用量

由于某铅锌矿矿区井下矿石回采工作主要采用三种采矿方法,即浅孔留矿嗣后充填法,沿走向布置

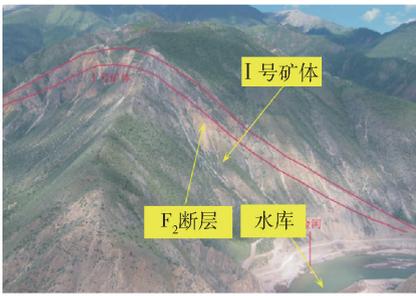


图2 某铅锌矿矿山地形全貌

的分段空场嗣后充填法和垂直走向布置的分段空场嗣后充填法。其中,浅孔采矿法炮孔深度小、其单次爆破总装药量较后两种方法小,因此,这里重点分析后两种回采工艺爆破作业所使用的炸药量。

沿走向布置的分段空场嗣后充填法的回采工艺为:在采准切割工程完成后,从切割槽开始,在分段凿岩巷道中 YGZ90 打扇形中深孔,孔径 60.0 ~ 65.0 mm,炮孔深度 5.0 ~ 12.0 m,炮孔排距 1.5 ~ 2.0 m,孔口距 0.5 m,孔底距 1.8 ~ 2.0 m。用 BQ-100 型装药器装炸药,非电导爆管起爆,每次爆破 2 ~ 3 排炮孔,爆破顺序是从上部向下部后退式回采。

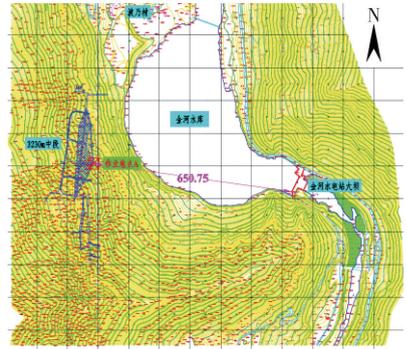
垂直走向布置的分段空场嗣后充填法的回采工艺为:从切割槽开始,在分段凿岩巷道中 YGZ90 打扇形中深孔,孔径 60 ~ 65 mm,炮孔深度 5.0 ~ 12.0 m,炮孔排距 1.5 ~ 2.0 m,孔口距 0.5 m,孔底距 1.8 ~ 2.0 m。用 BQ-100 型装药器装炸药,非电导爆管起爆,每次爆破 2 ~ 3 排炮孔,爆破顺序为从上部向下部后退式回采。

分析上述两种回采工艺可以看出,两者所使用的爆破参数基本一致,为了合理地评估爆破振动对邻近建筑物的影响,本文研究取各参数的最大值计算最大爆破炸药用量,即:孔径为 65 mm,炮孔深度为 12 m,炮孔排距为 1.5 m,孔口距和孔底距分别为 0.5 m 和 1.8 m,每次爆破 3 排。此外,通过查询 BQ-100 型装药器工作参数,其装药密度为 950 ~ 1 000 kg/m³,此处取 1 000 kg/m³。最终计算得到某铅锌矿回采过程中爆破作业的最大炸药用量约为 9 850 kg,为了保证对水库大坝的绝对安全,本文保守取一次爆破药量为 1 000 kg 进行模拟分析。

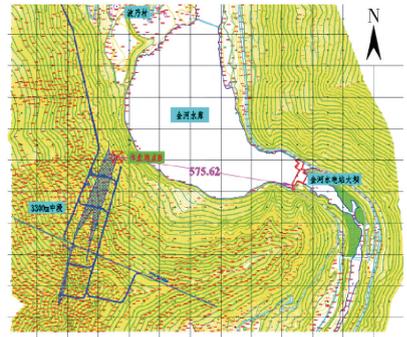
3.2 爆破作业地点

根据某铅锌矿采选工程初步设计中 3 230 m 中段、3 300 m 中段和 3 350 m 中段的设计平面图与矿山地形地质图,通过复合确定各中段距离大坝最近

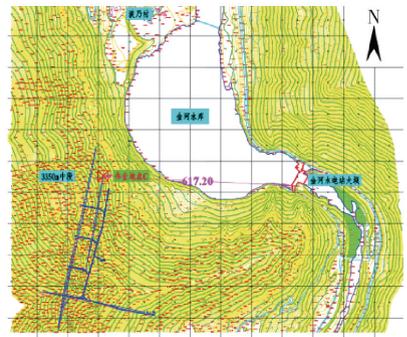
的爆破作业地点,各作业地点位置如图 3 所示。



(a) 3 230 m中段



(b) 3 300 m中段



(c) 3 350 m中段

图3 各中段爆破作业地点平面位置

3.3 研究方案确定

由于矿山地质条件较为复杂,为了便于分析计算,对矿山地质条件、受力条件等作必要的简化处理,特作如下假设:①矿体和围岩的本构材料模型均选择为理想的弹塑性体材料模型,并且忽略矿体和围岩中的其他节理裂隙;②矿区内地层单一,呈单斜产出,矿区附近并无断层、褶皱等构造。因此,忽略断层、节理裂隙的影响,且未考虑除 F₂ 断层之外的其余地质构造。

根据矿区及大坝的实体模型,采用 3DMINE-ANSYS 软件生成用于本次数值模拟计算的分析模型,模拟采用 SOLID164 三维实体单元对模型进行

网格划分。

对某铅锌矿回采工艺爆破作业进行综合分析,为了合理地评估爆破振动对大坝的影响,模拟均取各参数的最大值计算最大爆破炸药用量,模拟爆破药量按 1 000 kg 进行分析。

为了细致、合理地评估该铅锌矿采掘施工对大坝的影响,本文将爆破作业炸药用量和作业地点两个因素进行组合,进而确定各爆破作业工况,具体见表 1。

表 1 爆破作业工况

工况编号	爆破作业地点	所处中段	爆破炸药用量/t	与大坝的最小直距/m
1 [#]	A	3 230 m 中段	1.00	651.64
2 [#]	B	3 300 m 中段	1.00	576.75
3 [#]	C	3 350 m 中段	1.00	623.16

4 矿山井下采掘工程对大坝稳定性影响数值模拟研究

为了分析矿山井下采掘工程对大坝稳定性的影响,采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件分析,首先用 3DMINE 软件建立三维模型,导入数值模拟软件中分别计算分析 3 种工况下爆破对大坝影响的数值模拟模型,得到其影响结果。

4.1 材料模型及力学参数确定

材料的本构关系模型是影响数值模拟结果准确

性的关键因素之一,它也是研究的一个热点和难点。因此,本次模拟在相关地质资料的基础上,优先选择应用较为广泛且更加接近实际情况的材料本构模型,所选择的各种材料本构模型及其状态方程见表 2。

表 2 材料模型定义关键字

序号	物质	材料模型	状态方程
1	炸药	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	EOS_JWL
2	ALE 空间	MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	EOS_JWL
3	I号矿体	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	—
4	F ₂ 断层	MAT_SOIL_AND_FOAM	—
5	围岩	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	—
7	大坝坝体	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	—
8	水库蓄水	MAT_NULL	EOS_GRUNEISEN

1) 2[#]岩石炸药

炸药采用 LS-DYNA 提供的高能炸药材料模型及状态方程,它能够准确的模拟整个冲击波的传播过程和结构的瞬态响应过程,炸药爆破时产生的爆轰压力由公式(1)表征^[13],根据矿山的 2[#]岩石炸药性能结合式(1)得到炸药的状态方程参数见表 3。

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

式中: E 为内能常量; V 为相对体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 是与炸药本身特性有关的参数。

表 3 2[#]岩石炸药及状态方程参数

密度/kg·m ⁻³	爆速/m·s ⁻¹	爆压/MPa	EOS-JWL				
			A	B	R_1	R_2	ω
1.18 × 10 ³	4.2 × 10 ³	3.48 × 10 ³	2.22 × 10 ¹¹	1.8 × 10 ⁸	4.20	0.8	0.15

2) I号矿体

根据某铅锌多金属矿岩石力学参数,I号矿体矿岩以坚硬、半坚硬岩石为主。因此,本次模拟采用理想弹塑性材料本构模型描述其力学特性,对应的关键字为 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC,该模型中材料的屈服强度按公式(2)进行计算^[14]。

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p \tag{2}$$

式中: σ_y 为屈服强度; σ_0 为初始屈服强度; E_p 为塑性硬化模量; ε_{eff}^p 为有效塑性应变。

其中,塑性硬化模量由公式(3)进行计算:

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \tag{3}$$

式中: E 为弹性模量; E_t 为切线模量。

本次模拟根据西藏某铅锌多金属矿地质资料及岩石力学测定实验的相关内容,确定 I 号矿体力学参数,具体见表 4。

表 4 I号矿体力学参数

密度/ kg·m ⁻³	单轴抗压 强度/MPa	单轴抗拉 强度/MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	失效 应变
3 × 10 ³	21.2	2.1	2.74 × 10 ⁴	0.18	0.04

3) F₂断层

F₂断层内的主要充填物质为碎石和泥岩,因此,采用关键字 MAT_SOIL_AND_FORM 材料模型对其

进行定义,其主要物理力学参数见表5。

表5 F₂断层力学参数

密度/ kg·g ⁻³	G	K	a ₀	a ₁	a ₂	P _c
1.8 × 10 ³	1.61 × 10 ³	1.33 × 10 ¹⁰	3.3 × 10 ⁹	1.31 × 10 ⁴	0.1232	0.0

4) 围岩

围岩采用理想弹塑性材料本构模型围岩对其进行描述,并通过 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 关键字定义其力学特性,围岩的主要物理力学参数见表6。

表6 围岩力学参数

密度/ kg·m ⁻³	单轴抗压 强度/MPa	单轴抗拉 强度/MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	失效 应变
2.6 × 10 ³	22.5	2.3	2.91 × 10 ⁴	0.18	0.042

5) 大坝坝体

该铅锌矿邻近大坝为重力型大坝,坝体为钢筋混凝土结构,为了简化计算,此次模拟未考虑坝体内钢筋的影响。大坝坝体采用理想弹塑性材料本构模型描述其力学行为,其主要力学参数见表7。

表7 大坝坝体力学参数

密度/ kg·m ⁻³	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	失效 应变
2.40 × 10 ³	13.4	1.54	2.55 × 10 ⁴	0.2	0.04

6) 水库

大坝水库蓄水以 LS-DYNA 自带的 MAT_NULL 材料模型及 Gruneisen 状态方程描述水压力与体积的相互关系,其状态方程及相关参数见式子(4),具体参数见表8。

$$\begin{cases} P_w = \frac{\rho_w C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \left(\frac{\mu^2}{\mu + 1} \right) - S_3 \left(\frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right) \right]^2 + (\gamma_0 + a \mu) E_w} \\ \mu = \frac{\rho}{\rho_w} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:P_w 为水的压力;ρ_w 为的密度;C, S₁, S₂, S₃ 为用户自定义参数;E_w 为水的初始内能。

表8 水的材料模型及其状态方程参数

密度/kg·m ⁻³	EOS-Gruneisen				
	C	S ₁	S ₂	S ₃	E _{w0}
1.02 × 10 ³	1.65	1.92	-0.96 × 10 ⁻¹	0.00	0.00

4.2 边界条件施加

在爆破作业模拟中,地震波在边界处会发生反射,影响计算精度。为减少这种影响,可在边界附近设置无反射边界,使地震波能量在此消散,从而提高模拟准确性,即约束 X = 0 m, X = 1 400 m, Y = 0 m, Y = 1 600 m 和 Z = 0 m 位置处平面的法向位移,并在这五处平面位置处设置无反射边界条件,模型顶部则设置为自由边界。

本次模拟通过 LS-DYNA 动力松弛功能施加初始重力荷载,即通过在 k 文件当中定义关键字 *LOAD_BODY_Z 及 *DEFINE_CURER 的相关参数完成这一工作。其中,重力加速值设置为 9.8m/s²,将其施加到模型中除炸药和 ALE 空间材料以外的物质上面。

本次模拟采用流固耦合算法处理炸药与岩石之间的相互作用关系,利用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义炸药与固体之间的耦合关系。其中,炸药和 ALE 空间为流体模型, I 号矿体、F₂断层、表土层和围岩为固体模型。同时炸药和 ALE 空间共节点, I 号矿体、F₂断层及围岩共节点。

4.3 数值分析模型建立结果

结合矿山现场实际情况,同时为了保证计算结果的准确性,本次数值模拟采用三维模型建模,单位制为 kg-m-s 国际单位制。模拟分析范围示意图4所示,其次, X 轴指向东方,最大距离为 1 400 m, Y 轴指向北方,最大距离为 1 600 m, Z 轴指向地表方向,其最大距离为 720 m,即本次分析范围对应的相对标高范围为 0 ~ 720 m。模型网格划分如图5所示。

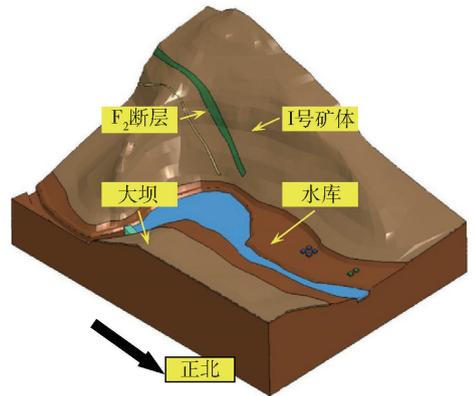


图4 数值分析实体模型

4.4 模拟结果分析

1) 爆破地震波传播特征分析

炸药起爆后会在周围岩石中首先形成冲击波,



图5 数值分析网格模型

随着传播距离的增大,冲击波会逐渐演化成地震波。在本文所分析的3种爆破工况中,不同作业地点炸药爆破产生的爆破地震波传播规律大致相同,此处,采用后处理LS-Prepost软件绘制出距离大坝最近的作业地点实施爆破作业时大坝的应力云图,以此分析爆破地震波的传播特征。

图6所示为某铅锌矿3230m中段作业地点A进行爆破作业时大坝坝体不同时刻的应力云图,对其进行分析可以看出,炸药爆炸后形成的爆破地震波首先作用在距离爆源最近的大坝坝肩一侧位置,随后均匀地向四周扩散。随着爆破地震波的传播,大坝坝顶受力逐渐增大,通过对比可以发现,大坝坝肩及坝踵位岩体所受应力高于其他位置的岩体所受应力,表明该铅锌矿采掘施工作业所引起的爆破振动对大坝坝肩和坝踵的影响相对较大。

2) 剪应力时程演化特征分析

为了进一步分析爆破地震波作用下大坝坝体受力情况,分别在大坝坝肩、坝顶和坝踵位置布置三个测点进行动态监测,即#1测点、#2测点和#3测点,各测点位置如图7所示。

通过对各测点的监测,绘制得到在某铅锌矿3230m中段作业地点A、3300m中段作业地点B和3350m中段作业地点C进行爆破作业时大坝坝体单元剪切应力时程曲线,具体如图8所示。

通过分析以上各图可以看出,某铅锌矿各个中段进行爆破作业时,大坝坝体单元所受剪切应力时程演化规律基本相同,且坝顶位置单元所受剪切应力略小于坝肩位置和坝踵位置单元所受剪切应力。在1~3#爆破工况下,大坝坝顶、坝肩和坝踵位置处单元所受到的剪切应力最大为0.73MPa。根据混凝土结构设计规范(GB 50010—2010),此处大坝坝

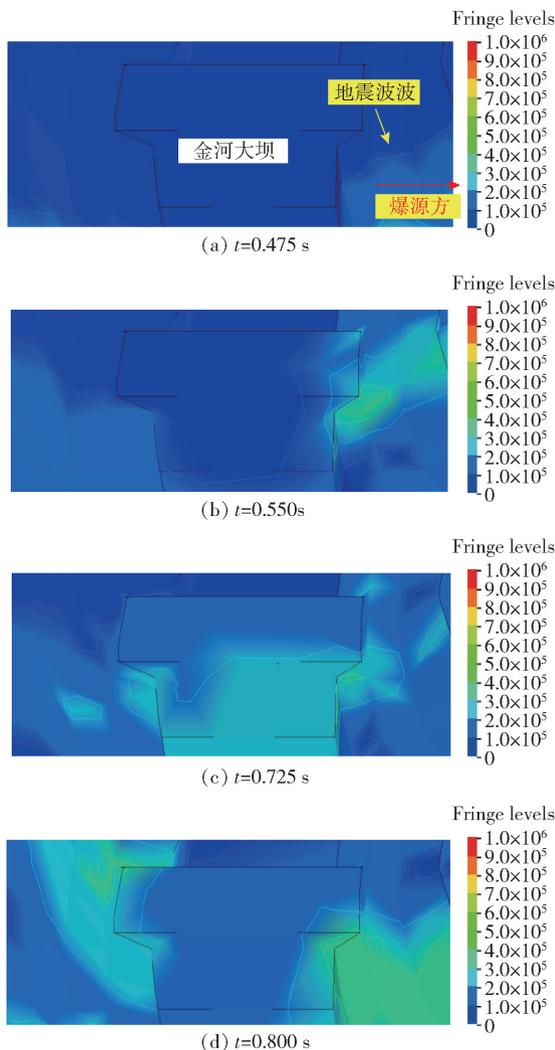


图6 2#爆破工况下大坝坝体应力云图

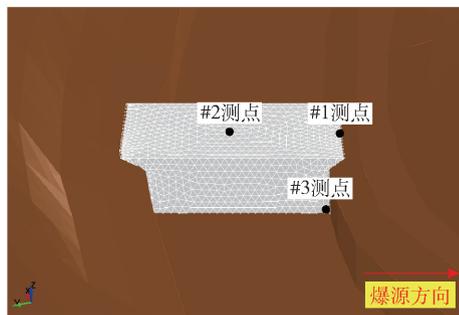


图7 大坝坝体测点布置示意图

体按C20强度混凝土强度进行取值,即剪切强度设计值为1.76MPa,该值大于某铅锌矿1~3#爆破工况下大坝坝顶、坝肩和坝踵位置处单元所受最大剪切应力值,表明该铅锌矿3230m中段、3300m中段和3350m中段采掘施工中的爆破作业不会引起大坝坝体单元剪切破坏。

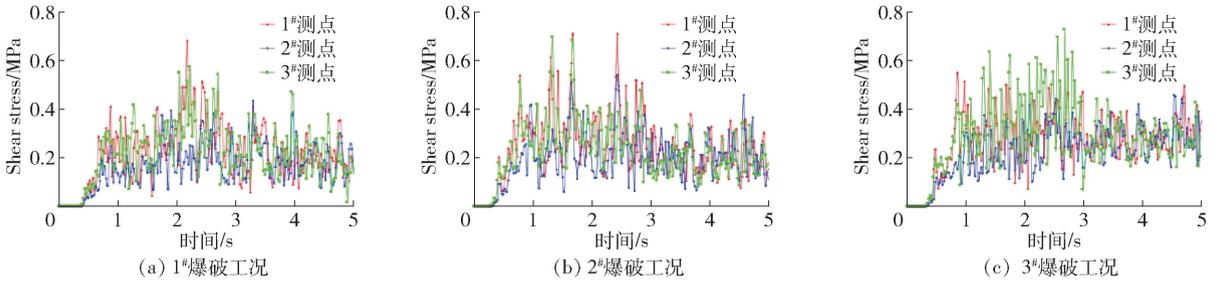


图8 大坝坝体单元剪切应力时程曲线

3) 质点爆破振动速度与加速度

为了深入分析爆破荷载作用下大坝的动力响应特性,绘制得到不同爆破工况条件下大坝各测点的质点振动速度及加速度曲线,具体如图9至图14所示。其中,对不同爆破工况下大坝坝体不同位置得质点振动加速度演化特征分析,分析得到不同工况条件下爆破质点振动加速度时程曲线,如图12~

图14所示所示。统计不同爆破工况下,各测点X、Y、Z方向上得最大PPV值见表9。

分析以上各图可以看出,在某铅锌矿1#、2#和3#爆破工况下,邻近大坝坝肩、坝顶和坝踵位置处质点振动速度和振动加速度时程演化规律大致相同,只是在不同工况下峰值存在一定差异。在3种爆破工况下,大坝坝体质点X方向振动加速度最大为

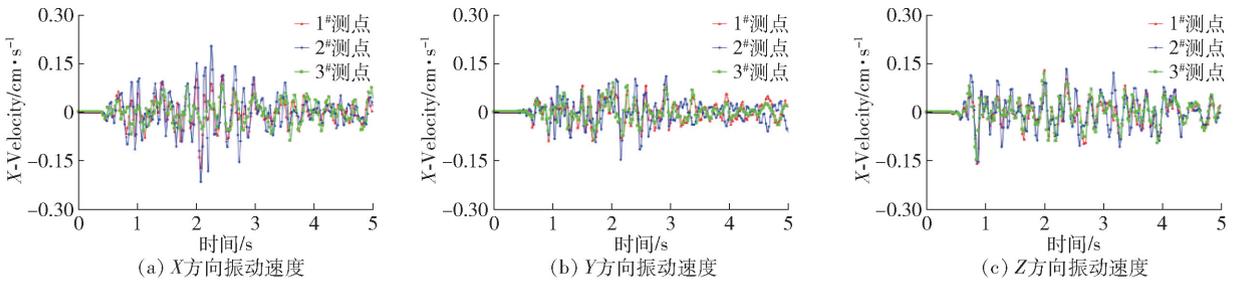


图9 1#爆破工况下大坝坝体质点振动速度时程曲线

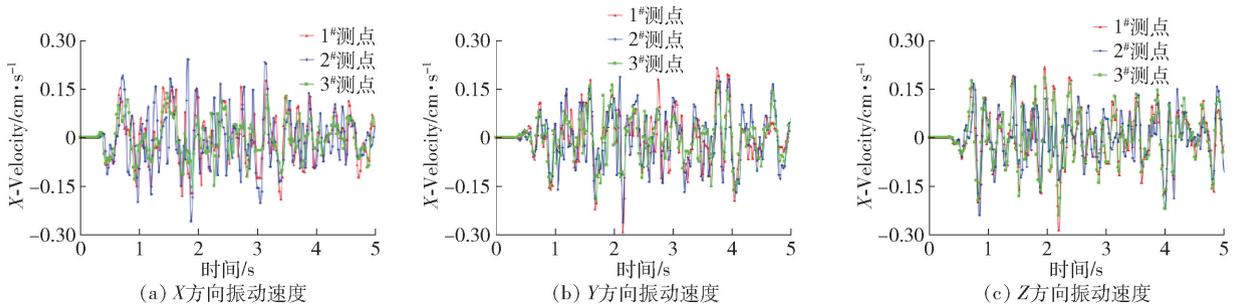


图10 2#爆破工况下大坝坝体质点振动速度时程曲线

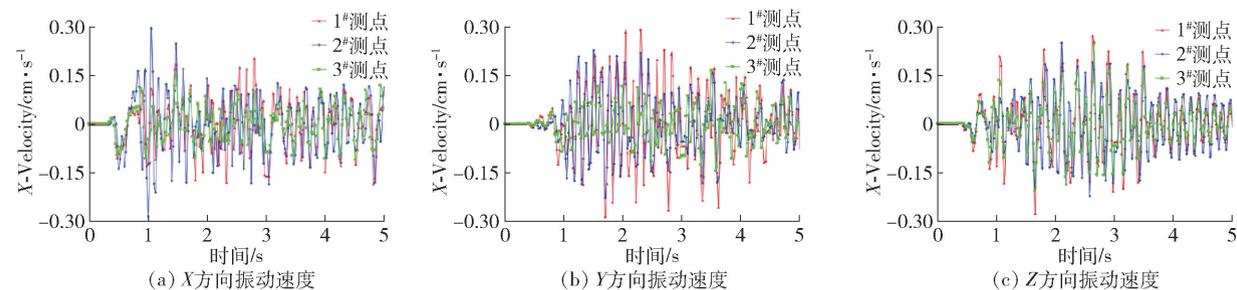


图11 3#爆破工况下大坝坝体质点振动速度时程曲线

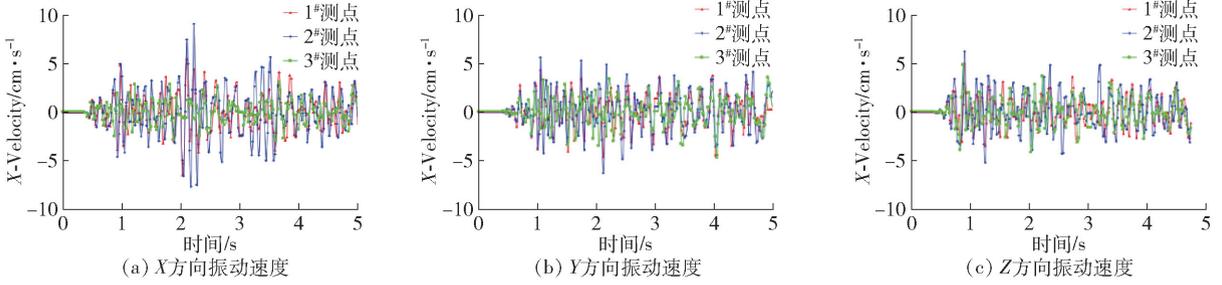


图 12 1#爆破工况下大坝坝体质点振动加速度时程曲线

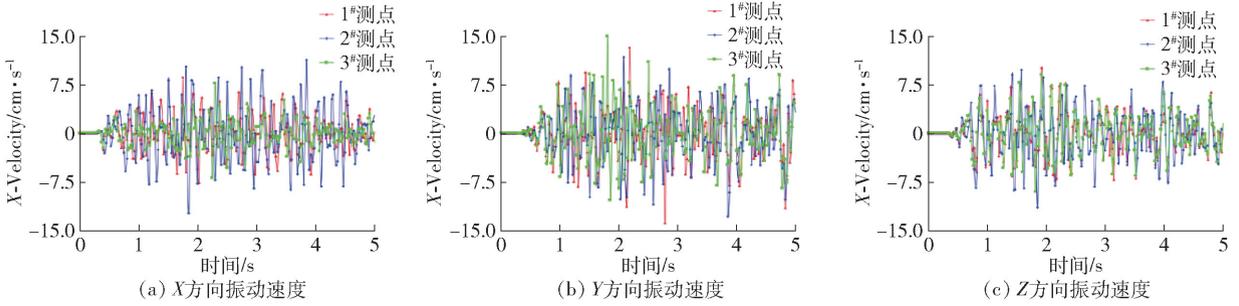


图 13 2#爆破工况下大坝坝体质点振动加速度时程曲线

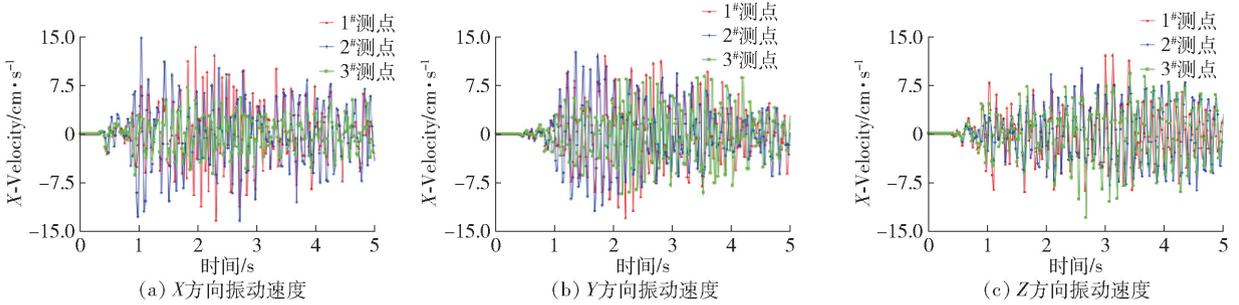


图 14 3#爆破工况下大坝坝体质点振动加速度时程曲线

14.86 cm/s², Y 方向最大质点振动加速度为 14.89 cm/s², Z 方向最大质点振动加速度为 12.94 cm/s²。其次,如表 9 所示在 1# 爆破工况下,大坝坝体质点在 X 方向上 PPV 值最大为 0.21 cm/s,在 Y 方向上 PPV 值最大为 0.15 cm/s,在 Z 方向上 PPV 值最大为 0.16 cm/s,在 2# 爆破工况下,大坝坝体质点在 X 方向上 PPV 值最大为 0.26 cm/s, Y 方向的 PPV 值最大为 0.29 cm/s, Z 方向的 PPV 值最大为 0.29

cm/s,在 3# 爆破工况下,大坝坝体质点在 X 方向上 PPV 值最大为 0.30 cm/s, Y 方向的 PPV 值最大为 0.29 cm/s, Z 方向的 PPV 值最大为 0.28 cm/s。3 个测点在 X, Y, Z 三个方向上的 PPV 值均小于 0.6 cm/s,表明在某铅锌矿 3 230 m 中段、3 300 m 中段和 3 350 m 中段的爆破作业不会对邻近大坝坝体稳定性造成过大的影响,满足《爆破安全规程》(GB 6722—2014)相关要求。

表 9 质点峰值振动速度模拟结果

爆破工况	#1 测点的 PPV 值/cm·s ⁻¹			#2 测点的 PPV 值/cm·s ⁻¹			#3 测点的 PPV 值/cm·s ⁻¹		
	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
1# 爆破工况	0.170 8	0.087 9	0.158 5	0.214 0	0.146 4	0.154 2	0.087 5	0.090 7	0.146 5
2# 爆破工况	0.190 9	0.291 2	0.285 4	0.257 8	0.260 8	0.238 7	0.152 6	0.198 5	0.239 4
3# 爆破工况	0.202 0	0.291 6	0.276 8	0.295 6	0.228 3	0.249 6	0.155 3	0.165 7	0.244 2

5 矿山井下采掘方案优化建议

根据模拟结果分析,同时结合某铅锌矿的实际情况可以看出,该铅锌矿井下采掘施工爆破作业对邻近建筑物大坝的影响程度受两个因素的制约,一是爆破作业地点与邻近建筑物之间的距离,二是爆破作业时所使用的炸药用量。因此,为了更加合理地分析爆破振动对邻近建筑物稳定性的影响,本文确定该铅锌矿井下采掘施工时爆破炸药用量及爆破作业地点的基础上优化相应的地下采掘爆破方案。

根据萨道夫斯基公式理论计算大坝爆破振动允许安全距离为 386.40 m 和数值模拟的分析结果,同时考虑数值模拟计算本身的局限性,认为当炸药量(齐发爆破为总药量,延时爆破为最大单段药量)不超过 1 000 kg 时,铅锌矿 3 230 m 中段、3 300 m 中段和 3 350 m 中段的采掘施工爆破作业不会对金河大坝坝体的稳定性造成高强度爆破振动影响,爆破作业符合相关国家标准要求;

为了尽可能地减少爆破振动对大坝坝体的影响,建议采用延时分段爆破技术(单次爆破 ≥ 8 段,段间延时 20 ± 5 ms(避开地震波叠加周期 $15 \sim 25$ ms),从而尽可能地削弱爆破地震波的能量;在实际爆破作业时,应在条件允许的情况下调整炮孔布置方位使爆破地震波的传播方向与 F_2 断层界面相垂直、临断层爆破区增设缓冲孔,以便尽可能地利用 F_2 断层削弱爆破地震波的能量,从而取得更好的降振效果。

6 结论

本研究通过耦合地质调查与动力数值模拟对西藏某邻近大坝铅锌矿地下采掘工程爆破对大坝稳定性进行了数值模拟仿真与计算,系统评估了高海拔矿区地下爆破对邻近水利枢纽的扰动效应得到的研究结论为:

(1)在某铅锌矿 I 号矿体地下各中段采掘施工过程中,当炸药量(齐发爆破为总药量,延时爆破为最大单段药量)不超过 1 000 kg 时,某铅锌矿采掘工程爆破作业不会对大坝坝体稳定性产生高强度的爆破振动影响,并且大坝坝体最大质点振动速度为 0.30 cm/s 远低于国家标准要求的 0.60 cm/s。

(2)随着爆破地震波的传播,大坝坝顶受力逐渐增大,大坝坝肩及坝踵位岩体所受应力高于其他位置的岩体所受应力,大坝坝顶、坝肩和坝踵位置处单元所受到的剪切应力最大为 0.73 MPa,远小于规

范要求下混凝土结构剪应力设计值 1.76 MPa,并且坝顶位置单元所受剪切应力略小于坝肩位置和坝踵位置单元所受剪切应力。

(3)采用 3DMINE 联合 LS-DYNA 进行大型复杂条件下的爆破动态响应分析是一种较为可行的手段,不仅可以得到复杂模型的爆破动力学演化过程和测点力学特性变化曲线,还可以直接观测到受爆破地震波影响较大的部位。

[参考文献]

- [1] 张焱,印振华,张根全,等.近坝库岸古滑坡体稳定性及其对大坝安全的影响研究[J].水力发电,2019,45(8):23-26+75.
- [2] 周继华.合理开发和有效保护矿产资源[J].中国矿业,2005(4):11-13+27.
- [3] 毕志刚,李旭哲,李子钦,等.渗流-应力耦合下隧道爆破开挖对邻近水坝影响因素分析[J].水电能源科学,2024,42(6):148-152.
- [4] 宋健,唐春安,亢方超.深部矿产与地热资源协同开采模式[J].金属矿山,2020(5):124-131.
- [5] 张义平,吴桂义.爆破地震波特性研究[J].矿业研究与开发,2007(6):68-72.
- [6] 李志文,李建春,洪胜男,等.考虑黏性效应的爆破震动区的理论分析[J].振动与冲击,2018,37(17):107-114.
- [7] 刘超英,葛双成.水库输水隧洞施工爆破振动对大坝安全影响监测及分析[J].地震工程学报,2015,37(2):367-371.
- [8] 高永祥.水库引水隧洞爆破施工对大坝影响监测分析[J].水利技术监督,2023,(5):57-59+173.
- [9] 邓成发,许昌,葛国昌.大坝爆破振动响应评估分析[J].长江科学院院报,2012,29(4):26-29+39.
- [10] 韩辉,祁长青,甘飞飞,等.近距离爆破开挖对大坝稳定性影响分析[J].河南科学,2021,39(10):1562-1569.
- [11] 钱立,王文杰.深部开采爆破震动对巷道稳定性影响的数值模拟研究[J].化工矿物与加工,2014,43(7):27-31.
- [12] 王峥峥,张杨生.基于 ALE 算法的隧道开挖爆破振动特性数值分析[J].大连理工大学学报,2017,57(3):279-284.
- [13] 庞宁波,杨永康.地应力下岩石多孔爆破损伤演化数值模拟[J].矿业研究与开发,2023,43(10):119-125.
- [14] 王景琛,张晓伟,张庆明,等.非圆截面弹体斜侵彻薄靶的动态载荷特性研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(1):127-135.