

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.009

水电站扩机工程中预裂孔与主爆孔诱发的 爆破振动比较分析*

周海孝¹,高启栋¹,王亚琼¹,冷振东²,陈明³

(1. 长安大学 公路学院,西安 710064;2. 中国葛洲坝集团 易普力股份有限公司 重庆市民用爆破器材
工程技术研究中心,重庆 401121;3. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室,武汉 430072)

摘要: 依托老挝南俄1水电站扩机工程爆破开挖,选取已有典型建筑设备,开展爆破振动跟踪监测,基于统计数据对比分析了主爆孔与预裂孔诱发爆破振动的差异;借助光滑粒子流(SPH)数值计算方法,从装药结构、起爆方式及抵抗线大小三个方面,分析了造成主爆孔与预裂孔爆破振动差异的原因。结果表明:预裂孔诱发的爆破振动峰值水平普遍高于主爆孔;装药结构、起爆方式和抵抗线大小均会影响爆破加载特性和爆破近区损伤的演化与分布,进而引起爆炸能量传输与分配的不同;预裂孔一般采用不耦合装药,并通常由导爆索侧向起爆,抵抗线也较大,其炮孔壁上的爆破荷载峰值低于主爆孔,炮孔附近的粉碎区范围和裂纹数量较少,且抵抗线方向上的岩石损伤程度较低,从而消耗于岩石破碎和抛掷的能量占比更小,使得更多的能量转化为振动能,故而预裂爆破诱发的振动水平要高于主爆孔。

关键词: 水电站扩机;爆破振动;预裂孔;主爆孔;振动特性

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0058-09

Comparative Study of Vibration Induced by Presplitting Blast-holes and Main Blast-holes During Extension of Hydropower Station

ZHOU Hai-xiao¹, GAO Qi-dong¹, WANG Ya-qiong¹, LENG Zhen-dong², CHEN Ming³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Gezhouba Group Explosive Co., Ltd., Chongqing 401121, China;

3. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering
Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: On the background of the extension of Nam Ngum 1 Hydropower Station in Laos, the blast vibration tracking of the existed buildings and equipment was implemented. The vibration characteristics of presplitting blast-holes and main blast-holes were compared by analyzing the statistical data. Besides, the smoothed particle hydrodynamics (SPH) numerical technique was used to study the causes of the vibration differences induced by presplitting blast-holes and main blast-holes from the views of charging structures, initiation modes and burden sizes. Results indicate that the peak particle velocity (PPV) induced by presplitting blast-holes is generally higher than that induced by main blast-holes. The charging structures, initiation modes and burden sizes all play a significant role on the explosion loading characteristics as well as the evolution and distribution of the nearfield blast damage, which further affects the transmission and distribution of explosion energy. The explosives in presplitting blast-holes are generally decoupled charging with the rock mass and laterally initiated by the detonating cord. Moreover, the burden of presplitting blast-holes is always larger than that of main blast-holes. The peak blasting pressure on presplitting blast-hole walls is lower than that on main blast-hole walls. For the presplitting blast-holes, the crush zone and the number of

cracks adjacent to the blast-hole, as well as the damage degree of the rock mass along the resistance direction, are all relative smaller. Thus, less explosion energy is consumed by rock fragmentation and throwing, allowing more energy to be converted into vibration energy. Consequently, the vibration induced by presplitting blast-holes is relative larger than that induced by main blast-holes.

Key words: extension of hydropower station; blast vibration; presplitting blast-holes; main blast-holes; vibration characteristic

水电站扩机工程通常会涉及新引水隧洞、厂房基础等的土石方爆破开挖,而爆破开挖所诱发的振动会不可避免的对已有建筑设备造成威胁^[1-3]。此外,运行中的水轮机组、发电机组及电气设施设备等对爆破振动的控制要求又极为严格^[4],如现行的爆破安全规程对于中心控制室设备的安全允许标准仅为0.5 cm/s。因此,对于水电站扩机工程,开展爆破振动的跟踪监测及相关问题的研究极为重要。

近年来,已有不少学者针对水电站扩机工程中的爆破振动控制问题展开研究,如张京等探讨了运行中水轮机组的爆破振动安全标准^[5],并提出通过控制装药量及调整爆心距的方式,避开水轮发电机组的自振主频;朱奎卫等通过室内试验^[6],研究了扩机过程中爆破振动对已有静态监测仪器设备的影响;王奋、朱华等评估了隧洞爆破地震波作用下临近水电站的安全性^[7,8];王红彬等以白鹤滩水电站地下厂房爆破开挖为背景,提出了一系列减振防护措施^[9]。

实际的岩石爆破常常涉及不同类型的爆破孔(主爆孔、缓冲孔及轮廓孔等),且鉴于不同的功能与目的,这些爆破孔在装药结构、起爆方式及抵抗线大小等方面差别显著^[10-12],其爆破动力效应也必然有所不同。胡英国等基于数值仿真^[13],研究了不同爆破孔的累积损伤演化特征,结果表明:光面爆破开挖方式下主爆孔爆破产生的累积损伤要明显大于光爆孔与缓冲孔,而预裂爆破开挖,保留岩体的损伤主要由预裂孔爆破产生;冷振东等对比分析了导爆索侧向起爆和雷管一端起爆条件下爆轰气体动能和势能的分配^[10],并提出通过改变起爆方式来提高爆破破岩能量的利用率;宗琦等、徐颖等研究了耦合装药以及不耦合装药对爆炸能量传递的影响^[14,15];饶宇等比较了不同炮孔爆破的振动频谱特征^[16]。

尽管现有研究对不同爆破孔的动力效应已有一定的认识,但从装药结构、起爆方式及抵抗线大小等不同角度来深入分析造成不同爆破孔振动差异的原因却鲜见有报道。基于南俄1水电站扩机工程中的爆破振动监测数据,比较分析了预裂孔与主爆孔诱发振动的差异,并借助 SPH 仿真技术,对造成两类爆破孔振动差异的原因进行了探讨分析。研究成果有助于深化对不同爆破孔振动特性的认识,可为水电站扩机工程中的爆破振动安全控制提供参考。

1 水电站扩机开挖爆破振动监测

1.1 工程概况

南俄1水电站位于老挝首都万象以北约70 km 湄公河左岸一级支流南俄河干流,于1971年建成投产,初期装机规模30 MW,先后经过三次扩机和升级,目前装机容量为155 MW。为进一步提升装机容量,对水电站进行了第四次扩建,并新增引水发电系统。其中,扩建工程土石方爆破开挖主要包括进水口边坡、引水隧洞、右岸坝顶公路以及新建厂房基础,具体位置分布如图1。

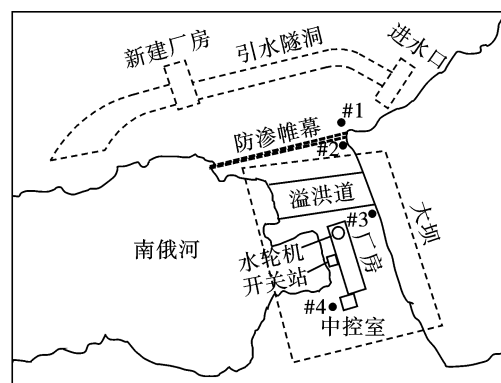


图1 水电站扩机工程中的主要建筑设备分布
Fig. 1 Layout of main buildings and equipments during the extension of hydropower station

新建引水发电系统附近存在大量既有建筑设备,爆破开挖会对这些建筑设备的安全和稳定产生不利影响。故针对不同的建筑设施设备,现场管理与工程技术人员制定了较为严格的控制标准,其中防渗帷幕距爆源中心距离最近,其允许振速为

收稿日期:2021-01-18

作者简介:周海孝(1994-),男,硕士,主要从事岩石爆破及地下工程方面的研究工作,(E-mail)hxzhou@chd.edu.cn。

通讯作者:高启栋(1991-),男,讲师、博士,主要从事工程爆破与岩石动力学方面的教学与科研工作,(E-mail)qdgao@chd.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(52009003,51809016);中央高校基本科研业务费专项基金(300102210123);水工岩石力学教育部重点实验室开放研究基金(EMHSE1903)

2.5 cm/s,溢流坝闸门与启闭机允许振速均为5.0 cm/s,开关站与中控室允许振速为0.5 cm/s,各主要建筑设备分布情况如图1所示。

1.2 爆破设计及测点布置

表1为进水口边坡开挖中,某次钻孔爆破装药参数,此次爆破共包含22个炮孔,孔间和排间分别采用MS3和MS5毫秒延迟雷管接力,起爆网路如图2,典型炮孔装药结构如图3。

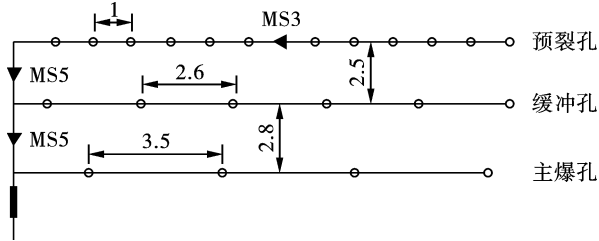


图2 起爆网路(单位:m)
Fig. 2 Initiation network(unit:m)

为及时反馈与评价扩机工程中爆破振动的影响,以实时指导爆破参数的设计与调整,分别于防渗帷幕、坝顶、闸门启闭机、开关站及中控室等处布置了爆破振动测点(见图1),并针对进水口边坡、右岸

坝顶公路及新建厂房基础三个部位的爆破开挖开展了爆破振动跟踪监测。

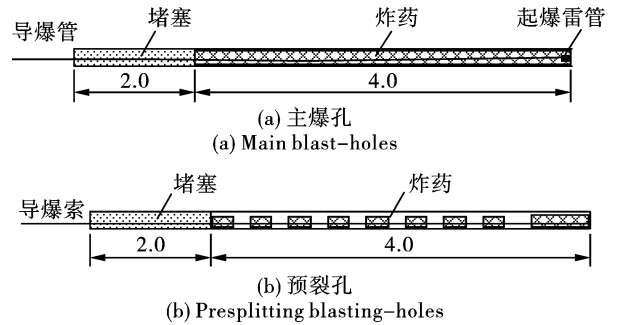


图3 装药结构示意图(单位:m)

Fig. 3 Charging structures(unit:m)

其中,进水口边坡开挖共采集数据15次,6次含有预裂孔,最大单响范围在24.6~63.2 kg之间;右岸坝顶公路开挖共采集数据6次,4次含有预裂孔,最大单响在5.8~38 kg之间;厂房基础开挖共采集数据20次,2次含有预裂孔,最大单响在24~60.5 kg之间。现场监测采用成都中科测控生产的TC-4850爆破振动智能监测系统,其读数精度达到1‰,频响范围在5~500 Hz之间,采样率为1~50 kspa。

表1 钻孔爆破参数

Table 1 Drilling and blasting parameters

类型	孔径/mm	孔深/m	孔距/mm	排距/m	最大单响/kg	堵塞/m
预裂孔	76	6	1.0	/	24.6	2
缓冲孔	76	6	2.6	2.5	43.5	2
主爆孔	76	6	3.5	2.8	63.2	2

2 预裂孔与主爆孔诱发临近建筑设备振动比较分析

2.1 现场实测结果

图4以进水口边坡开挖为例,比较了各次爆破中预裂孔与主爆孔诱发的质点峰值振速(PPV)。需说明的是,对于含预裂孔的爆破,仅识取了预裂孔诱发的峰值振速,未计入当次主爆孔的振动数据,以避免两者之间的数据干扰。由图4可知,预裂孔爆破诱发PPV普遍大于主爆孔,其中,预裂孔诱发PPV最大为0.76 cm/s,出现在#1测点,对应的最大单响为45.3 kg;最小值为0.06 cm/s,出现在#4测点,最大单响为28.2 kg。主爆孔诱发PPV最大为0.45 cm/s,出现在#2测点,对应的最大单响为55.5 kg;最小值为0.06 cm/s,出现在#4测点,最大单响为56.7 kg。

2.2 爆破振动峰值比较分析

为进一步比较预裂孔与主爆孔诱发的爆破振动

峰值水平,基于萨氏公式(如式(1)所示)来定义当量质点峰值振速,从而消除最大单响药量的干扰。

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

式中: V 为质点峰值振速,cm/s; Q 为最大单响药量,kg; R 为爆心距,m; K 和 α 为现场地质条件相关的衰减系数; ρ 为比例药量。依式(1),可定义当量质点峰值振速为

$$\bar{V} = \frac{V^{1/\alpha}}{Q^{1/3}} \quad (2)$$

通过对现场某次不含预裂孔爆破实测数据进行拟合分析,得到现场爆破振动衰减系数 K 和 α 分别为42.6、1.17,拟合曲线如图5所示。据此,图6针对不同的爆破开挖部位,比较了不同测点处的当量质点峰值振速。由图6可知,进水口边坡、右岸坝顶公路以及厂房基础三个部位共包含12次预裂爆破,#1测点共记录8次数据,其中7次预裂孔当量质点峰值振速大于主爆孔;#2测点共记录10次数据,

9 次预裂孔当量质点峰值振速大于主爆孔;#3 测点共记录 11 次数据,9 次预裂孔当量质点峰值振速大于主爆孔;#4 测点共记录 10 次数据,7 次当量质点

峰值振速大于主爆孔,这表明在不考虑最大单向药量的影响条件下,预裂孔爆破诱发质点峰值振速要普遍大于主爆孔。

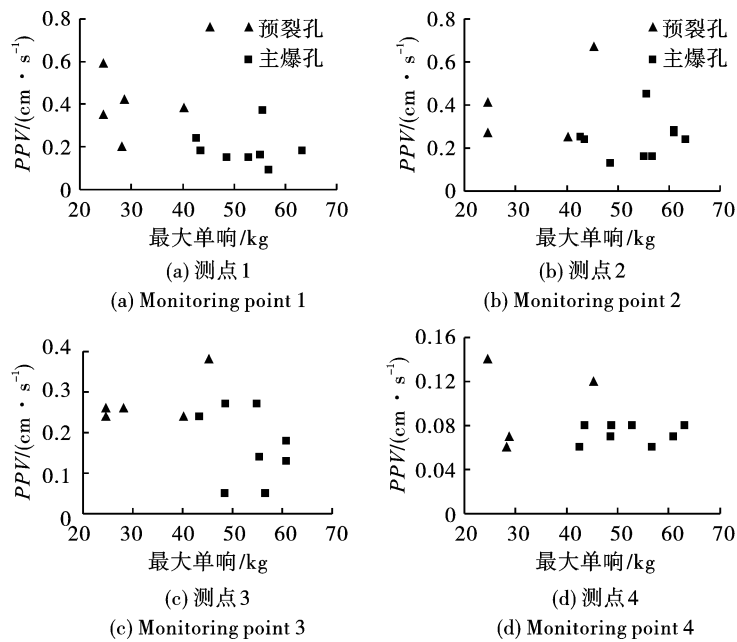


图 4 进水口边坡开挖中预裂孔与主爆孔爆破诱发的 PPV

Fig. 4 PPV induced by the presplitting and main blast-holes during the excavation of the intake slop

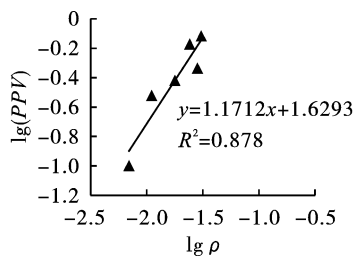


图 5 爆破振动衰减规律拟合分析

Fig. 5 Fitting analysis of the attenuation law of blast vibration

3 基于 SPH 仿真的预裂孔与主爆孔差异分析

3.1 计算模型与参数

岩石爆破中炸药的爆炸能量将会转化为岩石的破碎能、岩体的爆破振动能、岩石的抛掷能(岩石碎块的动能)及其它能量(空气冲击波、气体溢出散失的能量、噪声、岩石内能等)^[17]。因而,导致预裂孔与主爆孔爆破振动差异的本质原因应是爆炸能量分配的不同。工程实际中,预裂孔和主爆孔的差异主要体现在如下三个方面:

(1)装药结构的差异。预裂孔主要用于轮廓成型控制,并尽可能减轻对保留岩体的损伤,故采用不耦合装药,且不耦合系数较大,以通过空气隔层来削

弱施加于炮孔壁上的荷载峰值;主爆孔则采用耦合装药(采用成品药卷时,为便于装药,存在较小的不耦合系数)。

(2)起爆方式的差异。预裂孔一般采用空气间隔装药,故而采用导爆索起爆,导爆索的爆速远高于炸药,因此预裂孔内的炸药近似于同时起爆,相当于线起爆,同时导爆索一般敷设于药卷一侧,即为侧向起爆;主爆孔内的炸药一般由 1~2 发雷管起爆,之后随着爆轰波的传播而反应完毕,相当于点起爆。

(3)抵抗线大小的差异。预裂孔一般先于主爆孔起爆,起爆顺序为:预裂孔→第 1 排主爆孔→第 2 排主爆孔→...→缓冲孔,故其抵抗线大于主爆孔。

为进一步探讨引起预裂孔与主爆孔爆破振动差异的原因,基于 SPH 数值仿真技术,分别从装药结构、起爆方式和抵抗线大小三个方面,比较分析了炸药的爆轰加载特性及爆炸能量的分配。采用 AUTODY 动力计算软件,建立了如图 7 所示的数值模型,模型中炮孔直径为 105 mm,炮孔深度 10.0 m,堵塞长度 3.0 m。

采用 JWL 状态方程来描述炸药爆炸过程中爆轰产物的压力、能量和体积间的关系。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: P 为炮轰产物压力; E_0 为单位初始体积的内能; V 是爆炸产物的相对体积; A, B, R_1, R_2 以及 ω 均为JWL方程中的独立常数。参考相关文献[18],具体参

数的取值如下 $A = 586 \text{ GPa}, B = 21.6 \text{ GPa}, R_1 = 5.81, R_2 = 1.17, \omega = 0.28, E_0 = 7.38 \times 10^9 \text{ MJ/m}^3$ 。

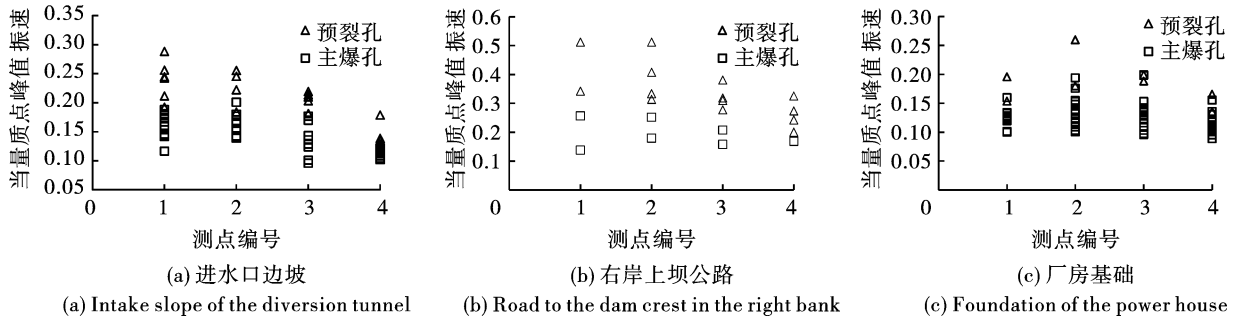


图6 预裂孔与主爆孔当量质点峰值振速比较

Fig. 6 Comparison of the equivalent PPV of presplitting and main blast-holes

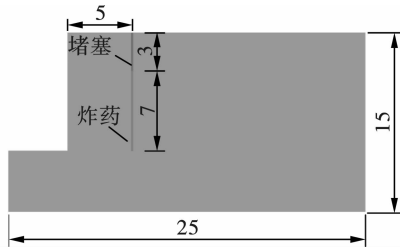


图7 SPH 计算模型(单位:m)

Fig. 7 SPH numerical model(unit:m)

岩石采用基于HJC本构模型发展而来RHT模型,该模型引入了最大失效面、残余失效面以及弹性极限面3个控制面,具体失效方程为

$$\begin{cases} \sigma_{eq}^*(p, \theta, \varepsilon) = Y_{TXC}^*(p) R_3(\theta) F_{rate}(\varepsilon) \\ Y_{TXC}^*(P) = A [P^* - P_{spall}^* F_{rate}(\varepsilon)]^N \\ P_{spall}^* = P_{spall} / f_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: p, θ, ε 分为压力、Lode角和应变率; $R_3(\theta)$

为偏平面上的角偶函数; $F_{rate}(\varepsilon)$ 为应变率强化因子; $Y_{TXC}^*(P)$ 为压缩子午线上的等效应力强度; f_c 为单轴抗压强度; P_{spall} 为层裂强度; P_{spall}^* 为标准化静水压力; A, N 为材料常数。

残余失效面引入损伤变量 D 来表示,损伤假定是非弹性偏应变的积累

$$\begin{cases} D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^{failure}} \\ \varepsilon_p^{failure} = D_1 (p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \geq \varepsilon_f^{min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_1, D_2 为损伤常数; $\varepsilon_p^{failure}$ 为失效应变; ε_f^{min} 为最小失效应变。具体RHT本构模型参数如表2。

3.2 装药结构的差异

如图8所示,为比较装药结构的差异,分别计算了耦合装药和不耦合装药(不耦合系数为2.0)两种工况,即研究不耦合系数对炸药爆轰加载和爆炸能量分配的影响,起爆方式和抵抗线相同。

表2 RHT模型主要参数

Table 2 Parameters used in RHT model for rock

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积模量 A_1/GPa	剪切模量 G/GPa	抗压强度 f_c/MPa	损伤常数 D_1	损伤常数 D_2	完整强度 常数 A	完整强度 指数 N
2.75	35.2	16.7	35	0.04	1.0	1.6	0.61

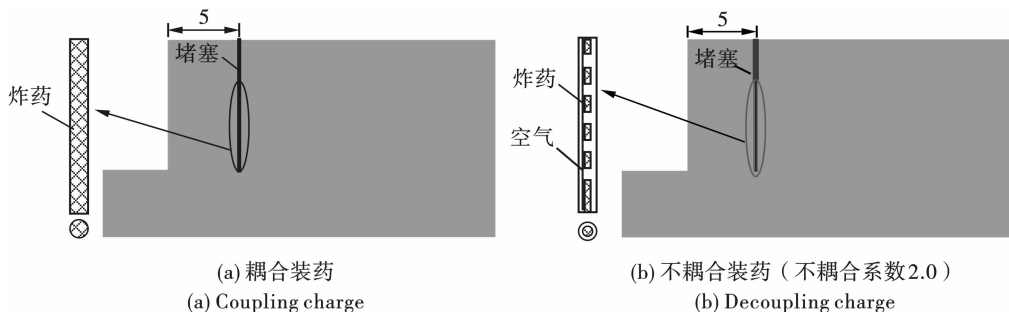


图8 不同装药结构下的的计算模型(单位:m)

Fig. 8 Numerical models under different charging structures(unit:m)

如图 9 所示,不同装药结构下的损伤云图差别显著,耦合装药情况下炮孔附近存在明显的粉碎区,裂纹数量也较多,且抵抗线方向上的岩石损伤程度较大,而不耦合装药情况下炮孔附近几乎无粉碎区,裂纹数量也较少,且抵抗线方向上的岩石仅有一些微裂纹,并无明显的损伤。这是因为不耦合装药条件下炸药与岩石之间的空气隔层削弱了施加于炮孔

壁上的荷载,计算结果显示(见图 10)耦合装药条件下孔壁荷载峰值为 1.3 GPa,而不耦合装药条件下孔壁的荷载峰值为 0.8 GPa。假设炸药释放的能量一定,则不耦合装药条件下消耗于岩石粉碎、破裂及抛掷的能量占比减少,从而使更多的能量转化为爆破振动能。

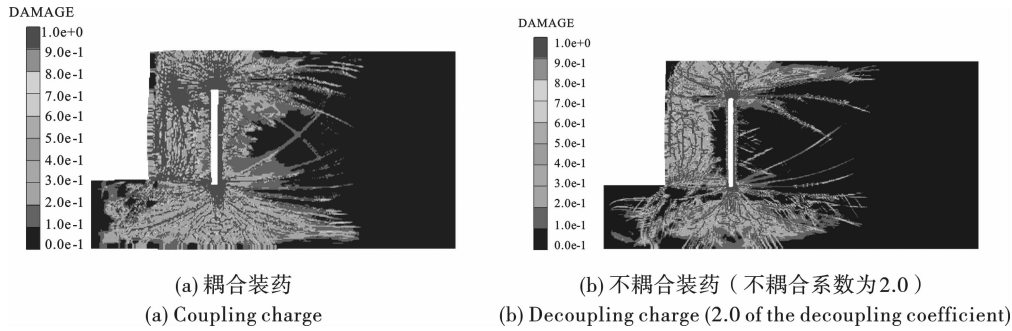


图 9 不同装药结构下的损伤云图

Fig. 9 Damage contours under different charging structures

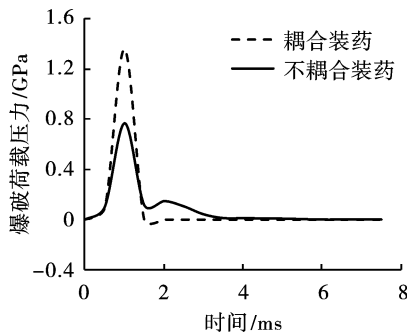


图 10 不同装药结构下的爆破荷载峰值曲线

Fig. 10 Blasting pressure curves under different charging structures

3.3 起爆方式的差异

如图 11 所示,为比较不同起爆方式下的爆轰加载特性和爆炸能量分配,分别计算了起爆雷管一端起爆和导爆索侧向起爆两种工况,均采用耦合装药,

且抵抗线大小均为 5 m。

如图 12 可知,在一端(底端)起爆条件下,炮孔附近存在明显的粉碎区,但爆破损伤偏向于孔口发育,这与柱状药包爆炸能量的轴向不均匀分配有关^[19],且一端起爆情况下侧向临空面和上部自由面附近岩石损伤程度均比较大;在侧向起爆条件下,炮孔附近的粉碎区范围很小,虽在抵抗线方向上有裂缝形成,但岩石损伤程度并无一端起爆情况下高,故而侧向起爆情况下转化为岩石破碎的能量相对较少,则转为振动的能量增加。此外,由图 13 可知,侧向起爆条件下的炮孔壁荷载峰值为 1.3 GPa,低于一端起爆条件下的荷载峰值 3.1 GPa,这是因为炸药起爆后,需经过一定长度(3~6 倍炮孔直径)以后才会形成稳定爆轰,药包直径仅有 105 mm,侧向起爆条件下炸药的反应以非理想爆轰为主^[20],从而会使爆轰压力降低,进一步影响爆炸能量的分配。

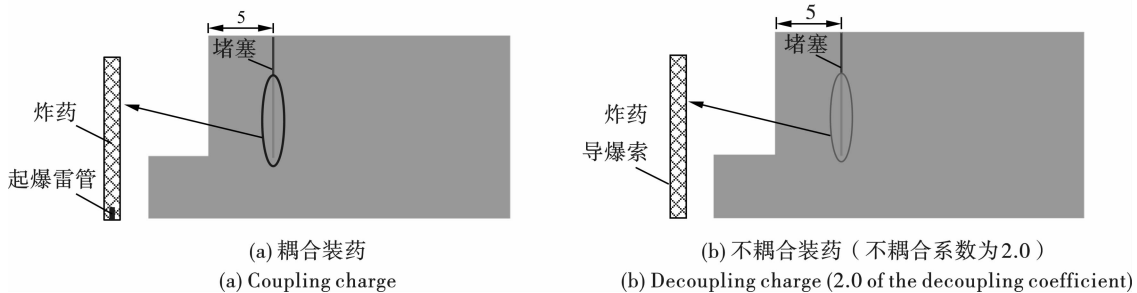


图 11 不同起爆方式下的计算模型(单位:m)

Fig. 11 Numerical models under different initiation modes(unit:m)

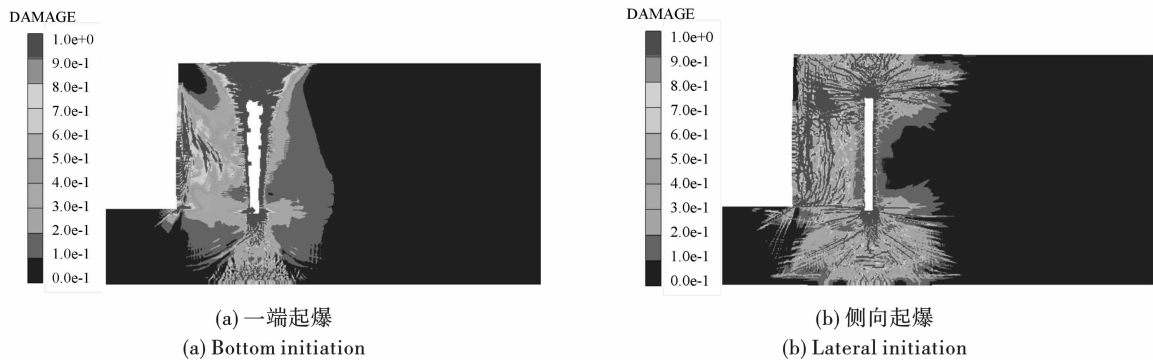


图 12 不同起爆方式下的损伤云图

Fig. 12 Damage contours under different initiation modes

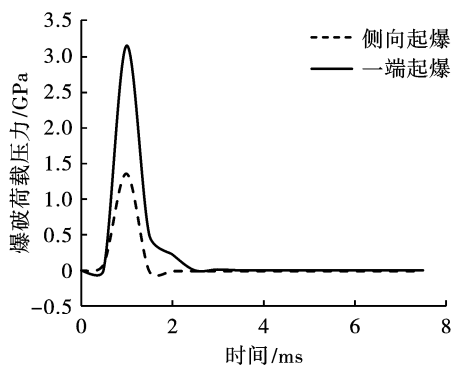


图 13 不同起爆方式下的爆破荷载峰值曲线

Fig. 13 Blasting pressure curves under different initiation modes

3.4 抵抗线大小的差异

如图 14 所示,为比较抵抗线大小对爆轰加载特

性和爆炸能量分配的影响,在装药结构以及起爆方式相同的条件下,分别计算了抵抗线为 3 m 和 5 m 两种工况。

由图 15 可知,抵抗线为 3.0 m 时,抵抗线方向上岩石损伤程度较大,表明侧向临空面的反射拉伸作用比较明显;抵抗线为 5.0 m 时,抵抗线方向上岩石也发生了破碎,即侧向临空面的反射拉伸也发挥了作用,但岩石损伤程度相对较低。事实上,抵抗线大小反映的是岩体夹制作用,当抵抗线较大时,岩体夹制作用较大,岩石不易破碎和抛掷,从而抵抗线方向上岩石的损伤程度也较低,消耗于岩石破碎和抛掷的能量也较少,说明当抵抗线增大时,将有更多的能量转化为振动能。

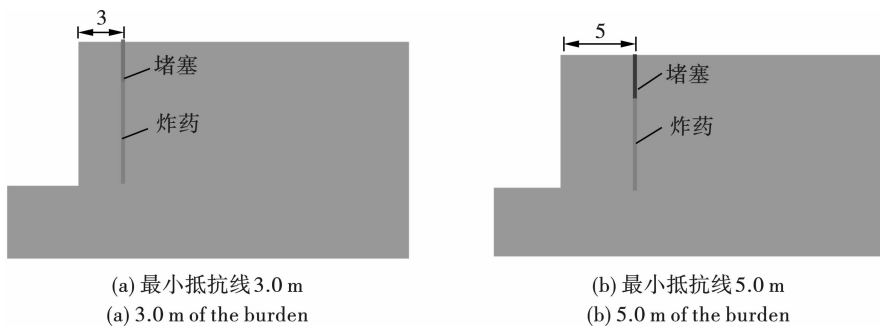


图 14 不同抵抗线条件下的计算模型(单位:m)

Fig. 14 Numerical models under different burdens(unit:m)

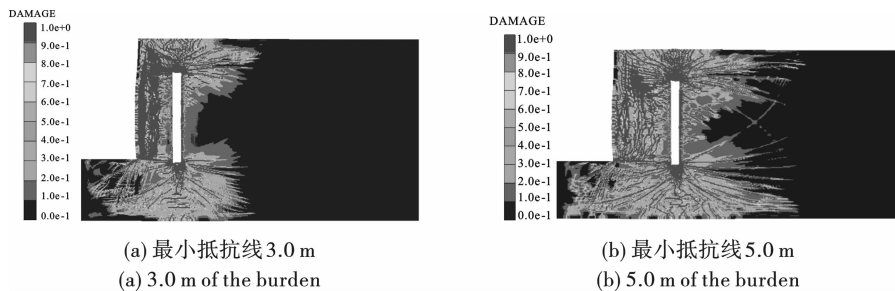


图 15 不同最小抵抗线条件下的损伤云图

Fig. 15 Damage contours under different burdens

4 结论

以南俄1水电站扩机工程为背景,并借助SPH数值仿真技术,从装药结构、起爆方式以及抵抗线三个方面,对主爆孔和预裂孔爆破振动差异的原因进行分析,主要得出如下结论:

(1)装药结构、起爆方式以及抵抗线大小均会影响炸药的爆轰加载特性和爆炸能量的传输与分配,进而导致预裂孔与主爆孔爆破诱发振动的差异。

(2)相对于主爆孔,因预裂孔采用不耦合装药,且通常由导爆索侧向起爆,同时抵抗线较大,炮孔附近的粉碎区范围和裂纹数量较少,抵抗线方向上岩石的损伤程度相对较低,消耗于岩石破碎和抛掷的能量占比更小,更多的能量转化为振动能。

预裂孔与主爆孔爆破诱发的振动存在明显差异,本文主要分析并解释了峰值振速的差异,但关于预裂孔与主爆孔诱发振动的频谱特性,还有待更进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] 杨小林,王梦恕,王树仁. 爆破对岩体基本质量的影响及试验研究[J]. 岩土工程学报,2000(4):461-464.
- [1] YANG Xiao-lin, WANG Meng-shu, WANG Shu-ren. Blasting effects on basic quality of rock mass and its experimental investigations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000(4):461-464. (in Chinese)
- [2] 卢文波,李海波,陈明,等. 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1513-1520.
- [2] LU Wen-bo, LI Hai-bo, CHEN Ming, et al. Safety criteria of blasting vibration in hydropower engineering and several key problems in their application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8):1513-1520. (in Chinese)
- [3] 贺永超,陈秋南,衣利伟,等. 隧道爆破振动对新浇超短龄期混凝土二衬的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(2):507-513.
- [3] HE Yong-chao, CHEN Qiu-nan, YI Li-wei, et al. Influence of tunnel blasting vibration on secondary lining of new ultra short age concert[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(2):507-513. (in Chinese)
- [4] GB/6722—2014 爆破安全规程[S].
- [5] 张京,严鹏,杨润强,等. 扩机爆破振动对运行中水轮机组的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(4):299-304,313.
- [5] ZHANG Jing, YAN Peng, YANG Run-qiang, et al. Influence of blasting vibration on turbine units[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(4):299-304, 313. (in Chinese)
- [6] 朱奎卫,王科峰,李俊富,等. 施工爆破对大坝已有静态监测仪器的振动影响[J]. 工程爆破,2014,20(3):53-55,42.
- [6] ZHU Kui-wei, WANG Ke-feng, LI Jun-fu, et al. Construction blasting vibration effects on the static monitoring instrument installed in the dam[J]. Engineering Blasting, 2014, 20(3):53-55, 42. (in Chinese)
- [7] 王奋,范勇,周宜红,等. 隧洞爆破地震波作用下临近水电站的安全性评估[J]. 爆破,2017,34(2):132-137.
- [7] WANG Fen, FAN Yong, ZHOU Yi-hong, et al. Safety evaluation of adjacent hydropower station under tunnel blasting seismic wave[J]. Blasting, 2017, 34(2):132-137. (in Chinese)
- [8] 朱华,李进,邓成发. 隧道爆破对大坝振动影响监测分析[J]. 工程爆破,2013,19(S1):20-23.
- [8] ZHU Hua, LI Jin, DENG Cheng-fa, Monitoring and analysis for vibration influence of the tunnel blasting on dam[J]. Engineering Blasting, 2013, 19(S1):20-23. (in Chinese)
- [9] 王红彬,沈德虎,石焱炯,等. 高应力开挖卸荷下洞室岩壁梁爆破施工工艺[J]. 爆破,2020,37(1):68-73.
- [9] WANG Hong-bin, SHEN De-hu, SHI Yan-jiong, et al. Excavation blasting construction technology of crane beam under high stress and unloading failure conditions in large underground caverns[J]. Blasting, 2020, 37(1):68-73. (in Chinese)
- [10] 冷振东,卢文波,范勇,等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响[J]. 爆炸与冲击,2017,37(4):661-669.
- [10] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, FAN Yong, et al. Explosion energy distribution by side initiation and its effects on rock fragmentation[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(4):661-669. (in Chinese)
- [11] 丁银贵,孙钰杰. 大规模岩土爆破工程施工技术[J]. 工程爆破,2020,26(1):43-47.
- [11] DING Yin-gui, SUN Yu-jie. Construction technology of large-scale rock blasting engineering[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(1):43-47. (in Chinese)
- [12] 李波,雷晓军,马元军. 向家坝水电站右岸横向围堰爆破拆除技术[J]. 工程爆破,2018,24(4):46-52.
- [12] LI Bo, LEI Xiao-jun, MA Yuan-min. Explosive demolition technology of transverse cofferdam at right bank in xiajiaba hydropower station[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(4):46-52. (in Chinese)
- [13] 胡英国,卢文波,陈明,等. 不同开挖方式下岩石高

- 边坡损伤演化过程比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1176-1184.
- [13] HU Ying-guo, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Comparison of damage evolution process of high rock slop excavated by different methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2013, 32(6): 1176-1184. (in Chinese)
- [14] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(4): 641-645.
- [14] ZONG Qi, MENG De-jun. Influence of different kinds of hole charging structure on explosive energy transmission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics of Engineering, 2003(4): 641-645. (in Chinese)
- [15] 徐颖, 孟益平, 程玉生. 装药不耦合系数对爆破裂纹控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(12): 1843-1847.
- [15] XU Ying, MENG Yi-ping, CHENG Yu-sheng. Study on control of blast crack by decoupling charge index [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics of Engineering, 2002(12): 1843-1847. (in Chinese)
- [16] 饶宇, 夏元友, 胡英国, 等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 191-198.
- [16] RAO Yu, XIA Yuan-you, HU Ying-guo, et al. Influence of pre-splitting crack on spectrum distribution characteristics of blasting vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 191-198. (in Chinese)
- [17] SANCHIDRIÁN J A, P Segarra, L M López. Energy components in rock blasting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 130-147.
- [18] 杨建华, 孙文彬, 姚池, 等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(7): 118-127.
- [18] YANG Jian-hua, SUN Wen-bin, YAO Chi, et al. Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stress rock masses [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 118-127. (in Chinese)
- [19] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. Effect of initiation location on distribution and utilization of explosion energy during rock blasting [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3433-3447.
- [20] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Explosion energy transmission under side initiation and its effect on rock fragmentation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 245-254.

英文编辑: 黄刚

(上接第3页)

- [13] 张九龙. 爆破飞散物的预防控制[J]. 采矿技术, 2014, 14(5): 157-160.
- [13] ZHANG Jiu-long. Preventive measures of flyrock [J]. Mining Technology, 2014, 14(5): 157-160. (in Chinese)
- [14] 高旭. 拆除爆破飞散物防护工程实例研究[J]. 工程爆破, 2009, 15(4): 74-77.
- [14] GAO Xu. Case study on flying debris protection in blasting demolition [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(4): 74-77. (in Chinese)
- [15] 李本伟, 陈德志, 周应军, 等. 基于故障树分析法的拆除爆破飞散物事故风险分析[J]. 爆破, 2015, 32(2): 147-151.
- [15] LI Ben-wei, CHEN De-zhi, ZHOU Ying-jun, et al. Risk analysis of blasting flyingrock based on FTA [J]. Blasting, 2015, 32(2): 147-151. (in Chinese)
- [16] VLADISLAV Keckojevic, MARK Radomsky. Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents [J]. Safety Science 2005(43): 739-750.
- [17] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2): 1-12.
- [17] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology [J]. Blasting, 2019, 36(2): 1-12. (in Chinese)
- [18] LI Xin-ping, HUANG Jun-hong, LUO Yi, et al. Numerical simulation of blast vibration and crack forming effect of rock-anchored beam excavation in deep underground caverns [J]. Shock and Vibration, 2017(3): 1-13.
- [19] LI Xin-ping, HUANG Jun-hong, LUO Yi, et al. A study of smooth wall blasting fracture mechanisms using the Timing Sequence Control Method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2017, 92: 1-8.
- [20] HUANG Xiao-ling, QI Sheng-wen, WILLIAMS Ann, et al. Numerical simulation of stress wave propagating through filled joints by particle model [J]. International Journal of Solids and Structures, 2015.

英文编辑: 陈东方