

开挖卸荷的瞬态特性研究

卢文波, 周创兵, 陈明, 金李, 严鹏

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对中、高地应力条件下的岩体爆破开挖, 通过岩体开挖荷载释放过程的力学分析及卸荷持续时间的计算, 提出并论证岩体开挖荷载的释放为瞬态卸荷的观点, 认为在中、高地应力条件下, 岩体开挖荷载的释放需要考虑荷载的瞬态特性及其动力效应。同时, 对与分段微差爆破对应的分步开挖荷载、瞬态卸荷方式、开挖卸荷诱发围岩振动及节理岩体瞬态卸荷松动机制等关键问题进行讨论。最后, 结合二滩和瀑布沟等高地应力地区水电站地下厂房开挖瞬态卸荷诱发围岩振动的实测资料及观察到的动力破坏现象, 对所提出的观点进行例证。

关键词: 岩石力学; 爆破; 开挖卸荷; 瞬态卸荷; 动力效应

中图分类号: TU 45; TV 542

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)11 - 2184 - 09

RESEARCH ON TRANSIENT CHARACTERISTICS OF EXCAVATION UNLOADING

LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, CHEN Ming, JIN Li, YAN Peng

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: On the basis of the analysis of process of excavation unloading and the calculation of its releasing duration, it is shown that the excavation unloading during rock blasting is a transient process under middle to high in-situ stress conditions. It is proposed that the transient characteristics of the excavation unloading and correspondingly induced dynamic responses of surrounding rock should be considered under middle to high in-situ stress conditions. Problems such as the determination of divisional excavation unloading corresponding to millisecond delay initiation, the path of transient releasing of excavation unloading, releasing of excavation unloading-induced vibration and the mechanism of dynamic loosening of jointed rock mass induced by the transient unloading of in-situ stress, etc. are also discussed. Finally, two historical cases of excavation unloading-induced vibration and dynamic failure of jointed rock mass in Pubugou and Ertan Hydropower stations are presented as verifications.

Key words: rock mechanics; blasting; excavation unloading; transient unloading; dynamic response

1 引言

我国正在兴建或待建的包括小湾、溪洛渡、锦

屏和虎跳峡等一大批特大或大型水电工程, 均需在复杂地质和高地应力条件下进行岩石高边坡、大跨度地下洞室群或超长深埋隧洞的大规模、高强度岩石开挖。开挖改变了原始岩体的几何形状, 使开挖

收稿日期: 2008 - 04 - 16; **修回日期:** 2008 - 07 - 09

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50725931); 国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539100); 国家自然科学基金面上项目(50779050); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET - 06 - 0616)

作者简介: 卢文波(1968 -), 男, 博士, 1990年毕业于武汉水利电力学院施工工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的教学与研究工作。E-mail: wblu@whu.edu.cn

面上的岩体应力全部或部分卸除, 引起岩体边界条件和荷载条件的变化; 伴随岩体开挖而发生的岩体赋存环境改变和变形又会导致岩体物理力学参数的劣化, 从而可能带来严重的岩体稳定或变形控制难题。因此, 近年来岩体的开挖卸荷及力学效应一直是国内外岩石力学研究与工程应用领域的热点问题。

国外对岩体开挖卸荷效应的系统研究始于 20 世纪 70 年代, 以满足地下核废料储存库建设、深部矿山开采及深埋隧道开挖等方面的需要^[1~4]。经过近 30 a 的深入研究, 已经在开挖卸荷效应及开挖损伤(扰动)区形成机制^[2, 5, 6]、开挖松动区岩体的力学特性^[7~11]、开挖松动范围现场检测与诊断技术^[12~15]等方面取得丰富的研究成果。国外研究结果表明, 岩体开挖松动区的主要形成原因是岩体初始应力场的开挖卸荷, 并受岩体初始应力大小、地质条件、力学特性、开挖与加固方法、地下洞室形态及布置等多方面因素影响^[1~3]。

自 20 世纪 90 年初, 国内开始重视岩体开挖卸荷效应方面的研究, 其中一个重要的工程背景是三峡工程永久船闸岩石高边坡开挖卸荷变形控制的难题^[16, 17]。目前, 体现开挖卸荷行为与效应的卸荷岩体力学问题研究已逐步得到认同, 并成为近年国内岩石力学与工程领域的研究热点^[18, 19]。

需要指出的是, 国内外学者在研究岩体开挖卸荷行为及力学效应过程中一般将开挖卸荷过程作为准静态条件处理。这种近似在岩体初始应力(开挖荷载)较低的条件是允许的, 但在中、高地应力条件下, 开挖卸荷的准静态处理可能会带来较大的误差^[20, 21]。

事实上, 国内外为数不多的相关研究成果已揭示了开展开挖卸荷释放的瞬态特性及动态效应研究的必要性。如 M. G. Abuov 等^[22]的研究结果表明, 掌子面上岩体爆破开挖引起的岩体应力快速卸荷, 有可能导致开挖面附近保留岩体的破坏; J. P. Carter 和 J. R. Booker^[23]针对长隧洞瞬间开挖理想条件下的围岩瞬态响应计算表明, 岩体初始应力的瞬态卸荷可以在围岩中激发动拉应力场; 王贤能等^[24, 25]则发现, 卸荷速率及动力扰动对岩爆的发生及规模有重要影响; 卢文波等^[20, 21, 26]的初步研究也表明, 中、高地应力状态下岩体爆破开挖引起的卸载波是导致岩体开挖松动的重要因素。

岩体爆破开挖, 意味着岩体开挖荷载的瞬态卸荷及岩体所积累弹性应变能的快速释放。因此, 从

弹性应变能的快速释放观点看, 开挖动态卸荷、岩爆、采矿诱发的微地震等动力学现象具有相似性^[27~30]。

由上述分析可知, 开展岩体开挖荷载释放的瞬态特性及动力扰动效应研究, 对加深岩体开挖卸荷机制和岩体开挖动态响应等岩石力学基础问题的认识具有重要意义。

2 岩体开挖卸荷的瞬态过程

2.1 开挖荷载的释放时间估算

钻孔爆破仍是当前国内水电工程地下厂房洞室群和各类隧洞开挖的主要手段。从表象上看, 地下洞室的钻爆开挖过程是通过钻孔、装药和起爆, 达到破碎岩石、抛掷碎块、形成新开挖轮廓面的过程。按照传统的准静态岩体开挖卸荷理论, 岩体开挖是一个在新形成的围岩开挖轮廓面上进行开挖荷载缓慢释放的过程。从岩石动力学观点看, 钻爆开挖的实质是在岩体钻孔内施加爆炸荷载, 通过爆炸荷载和孔壁围岩相互作用, 达到破碎岩石、抛掷碎块, 并完成开挖轮廓面上开挖荷载瞬态释放的过程。

在岩体爆破开挖过程中, 裂纹首先在炮孔连线方向优先扩展。当两炮孔间裂缝面完全贯通, 岩体碎块抛离新形成的开挖面后, 岩体开挖荷载的释放过程完成。对于常采用的孔底起爆方式, 开挖荷载的释放过程包括以下 3 个阶段:

(1) 装药从孔底起爆, 爆轰波以爆速 D 在装药中传播, 同时在围岩中激起应力波。

(2) 炮孔壁上的爆生裂缝以速度 C_f 扩展, 在爆生裂缝尖端岩体发生局部的初始应力卸荷, 炮孔间裂缝进一步扩展并最终全部贯通。

(3) 高温高压的气体从炮孔间的贯通裂缝或堵塞物被冲出后的孔口高速逸出, 导致炮孔内爆生气体压力的快速卸压, 其中爆生气体中传播的卸载波以速度 C_a 回传至孔底, 导致炮孔内爆炸气体压力的第一次卸压; 同时炮孔内高温高压的气体以 V_a 的运动速度从孔口溢出, 导致炮孔内爆炸气体压力的进一步降低, 直至炮孔压力与大气压相等, 初始应力场开挖卸荷过程结束。上述过程, 可用图 1 所示的计算模型来表示。爆破开挖过程中开挖荷载释放持续时间为

$$T_u = \frac{L_1}{D} + \frac{\sqrt{\frac{1}{4}L_s^2 + L_1^2}}{C_f} + \max\left(\frac{L_1 + L_2}{V_a}, \frac{L_1 + L_2}{C_a}\right) \quad (1)$$

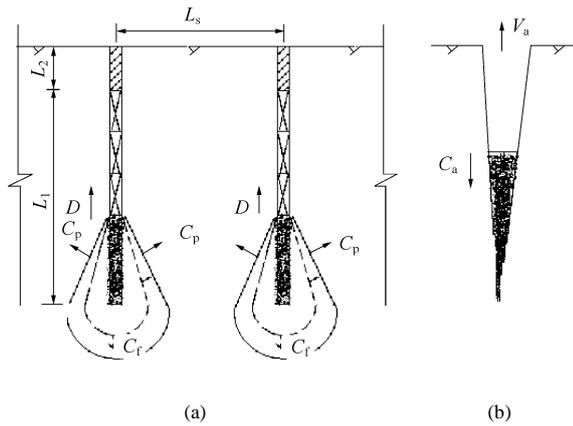


图1 开挖荷载释放持续时间计算力学模型

Fig.1 Mechanical model adopted to determine duration for excavation unloading

式中： T_u 为岩体开挖荷载(初始应力)的释放持续时间； L_s 为相邻两炮孔间距； L_1, L_2 分别为炮孔的装药段和堵塞段长度； D 为装药的爆轰速度； C_f 为爆炸荷载驱动下的裂缝平均扩展速度； C_a 为爆炸气体的卸载波速度； V_a 为爆炸气体的逸出速度。

式(1)右边的3项分别代表爆轰波在装药段内的传播时间、爆生气体驱动的炮孔间岩石裂缝扩展贯通时间和炮孔间裂缝贯通后高温高压爆炸气体的逸出时间。其中， C_a 和 V_a [31]可分别表示为

$$C_a = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho_a}} \quad (2)$$

$$V_a = \frac{2C_a}{\gamma + 1} \quad (3)$$

式中： P, ρ_a 和 γ 分别为炮孔内爆生气体的压力、密度和绝热等熵指数。

考虑到爆炸气体中传播的卸载波速度远大于爆炸气体的逸出速度，式(1)可修正为

$$T_u = \frac{L_1}{D} + \sqrt{\frac{1}{4}L_s^2 + L_1^2} \frac{1}{C_f} + \frac{L_1 + L_2}{V_a} \quad (4)$$

2.2 开挖卸荷引起的岩体应变率估算

判断一个荷载作用过程是否符合准静态条件的标准通常是应变率大小。一般认为，当加、卸载引起的应变率在 $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 范围时，属于准静态过程，此时可忽略介质惯性力；若应变率大于 10^{-1} s^{-1} ，则不能忽略惯性力 [32]。

水电工程露天深孔台阶爆破常采用的炮孔参数范围为：钻孔直径 $\phi 70 \sim 150 \text{ mm}$ ，孔间距 $2 \sim 5 \text{ m}$ ，

台阶高度 $8 \sim 16 \text{ m}$ 。对常用的 2# 岩石硝铵炸药或乳化炸药，其爆速为 $3500 \sim 4500 \text{ m/s}$ ；爆炸荷载作用下裂纹扩展平均速度取岩体纵波速度 C_p 的 $0.2 \sim 0.3$ 倍；高压爆炸气体的声波速度取 $1000 \sim 1500 \text{ m/s}$ 。由式(4)可以估算，在深孔台阶爆破中，新开挖面的形成时间为 $10 \sim 100 \text{ ms}$ ，该估算值与中等台阶高度的岩石爆破现场高速摄影资料相符合 [33, 34]。

考虑 $1 \sim 10 \text{ MPa}$ 量级的岩体开挖荷载水平，对弹性模量为 $10 \sim 100 \text{ GPa}$ 的中~硬岩石而言，可以估算岩体爆破开挖卸荷引起的应变率范围为 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。由此可知，对露天边坡开挖等开挖荷载水平不高的条件下，将开挖卸荷过程作为准静态条件处理是允许的。

但对于隧洞全断面开挖，由于一般采用钻孔直径为 $\phi 42 \text{ mm}$ 、孔间距为 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ 、孔深为 $3.0 \sim 5.0 \text{ m}$ 的浅孔爆破，炮孔布置较深孔爆破更密，其新开挖面形成时间要较深孔台阶爆破短；若岩体的初始地应力值较高，比如达到 $20 \sim 50 \text{ MPa}$ 量级，可以估算此条件下因开挖卸荷引起的围岩应变率将可达到 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 量级，甚至更高。可见，高地应力条件下隧洞钻爆开挖诱发的开挖荷载卸荷是一动态过程，必须考虑开挖荷载释放的瞬态特性及荷载作用引起的动力效应。

3 开挖荷载瞬态释放历程的描述

3.1 分步开挖荷载的确定

圆形隧洞全断面开挖中，开挖掌子面上的炮孔起爆顺序为掏槽孔、崩落孔、缓冲孔和周边孔，由内往轮廓方向逐圈以间隔时间 $25 \sim 50 \text{ ms}$ 的微差起爆。因此，隧洞全断面开挖中，必须考虑微差起爆顺序及间隔时间，确定与起爆顺序对应的分步开挖荷载。

如图 2(a)所示的圆形隧洞(MS 代表毫秒微差，后面数值为段别)直径为 $\phi 10 \text{ m}$ ，采用全断面钻爆法开挖。由里往外，开挖掌子面上依次布置了 2 圈掏槽孔、3 圈崩落孔、1 圈缓冲孔和周边光爆孔，分别采用国产 2 系列毫秒微差非电塑料导爆管雷管起爆。

对静水压力条件下，与隧洞全断面分段微差起爆顺序对应的岩体分步开挖荷载大小，可利用外径为无限大的厚壁圆筒在远场受压条件下的弹性应力公式计算：

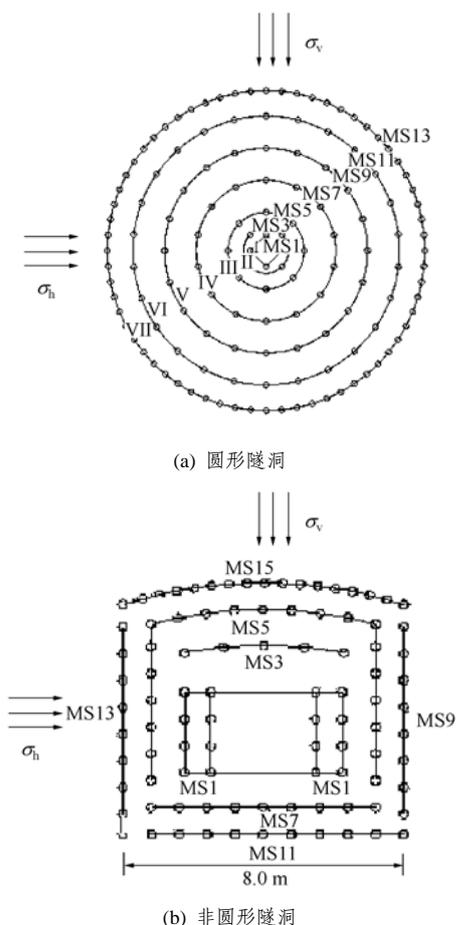


图 2 圆形隧洞开挖爆破设计示意图
Fig.2 Blasting design for tunnel excavation

$$P_{ri} = \left(1 - \frac{r_{i-1}^2}{r_i^2}\right) P_0 \quad (5)$$

式中: P_{ri} 为与第 i 段微差起爆顺序对应的岩体分步开挖荷载; r_{i-1} , r_i 分别为第 $i-1$ 和 i 段雷管起爆所形成的临时断面半径; P_0 为岩体的远场均匀初始应力。

对一般应力条件下的圆形隧洞或对如图 2(b)所示的非圆形隧洞开挖掌子面上的岩体分步开挖荷载, 可采用有限元等数值方法确定。此时, 开挖荷载的释放, 不仅限于垂直或水平向的正应力卸载, 还会出现切向剪应力的卸载。

3.2 开挖荷载瞬态释放的方式

开挖轮廓面上, 岩体应力(开挖荷载)的卸载过程是一个复杂的三维动力问题。岩体开挖荷载的瞬态释放伴随炮孔间裂缝和新开挖面的形成、发展而进行。

由于爆破破岩过程裂纹扩展、爆生气体运动及其高速逸出等问题的复杂性, 以应力边界条件和应

力初始条件准确描述伴随岩体新开挖面(卸荷边界)形成与发展而发生的开挖荷载瞬态释放的方式、开始部位及其空间演化规律, 具有相当的难度。

确定了开挖荷载瞬态释放的分步开挖荷载和卸荷持续时间后, 作为一种简化或逼近, 参考爆炸荷载的处理, 开挖荷载的瞬态卸荷过程可采用线性卸荷、负指数卸荷和 1/4 余弦波卸荷等不同卸荷方式进行拟合, 如图 3 所示(曲线 1, 2 和 3 分别代表线性卸荷、负指数卸荷和 1/4 余弦波卸荷)。

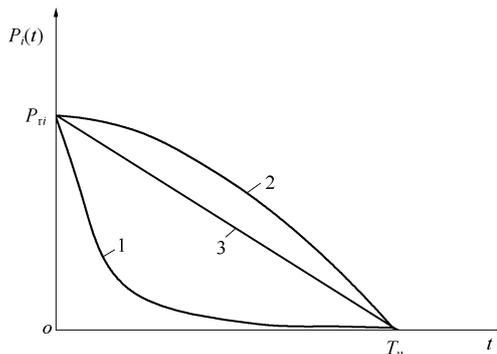


图 3 开挖荷载的卸荷方式
Fig.3 Paths for the transient unloading of in-situ stress

图 3 中的曲线 1~3 对应的函数关系可以分别表示为

$$P_i(t) = P_{ri} \left(1 - \frac{t}{T_u}\right) \quad (6)$$

$$P_i(t) = P_{ri} e^{-\frac{\alpha t}{T_u}} \quad (7)$$

$$P_i(t) = P_{ri} \cos\left(\frac{\pi t}{2 T_u}\right) \quad (8)$$

式中: $P_i(t)$ 为开挖卸荷面上应力, α 为衰减指数。

工程应用中, 首先假设卸荷历程曲线, 而后进行围岩振动响应模拟, 然后将模拟结果和实测数据进行对比, 据此对假设的岩体开挖卸荷历程曲线进行修正。初步的研究表明, 作为一种简化, 开挖荷载线性卸荷假定可满足一般工程计算精度要求。

4 开挖荷载瞬态释放的动力效应

4.1 开挖瞬态卸荷诱发的围岩振动

针对图 2(a)的圆形隧洞, 本文曾采用动力有限元法模拟了爆炸荷载及开挖荷载瞬态卸荷诱发的围岩动力响应^[21]。计算过程中, 爆炸荷载采用三角形荷载, 其荷载上升时间和正压作用时间分别取 0.05

和 0.75 ms；开挖瞬态卸荷过程采用线性荷载方式(见图 3 中的曲线 1)，开挖瞬态卸荷的持续时间取 2.0 ms。

计算结果表明，在隧洞的全断面钻孔爆破中，通常最外一圈崩落孔(第 V 圈炮孔)起爆在围岩中激起的质点峰值振动速度(*PPV*)最大。对第 V 圈炮孔起爆过程，爆炸荷载(其等效爆炸荷载幅值为 11.8 MPa)和岩体初始应力分别为 20, 10, 5 和 2 MPa 条件下开挖瞬态卸荷诱发围岩振动对比见图 4(BL 和 IS 分别代表爆炸荷载和开挖荷载卸荷诱发的振动)。

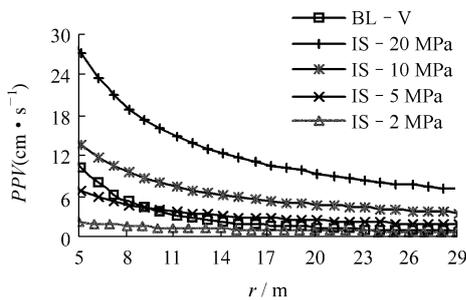


图 4 开挖瞬态卸荷诱发围岩振动与爆破振动的对比
Fig.4 Comparison between *PPV* induced by transient unloading and blasting

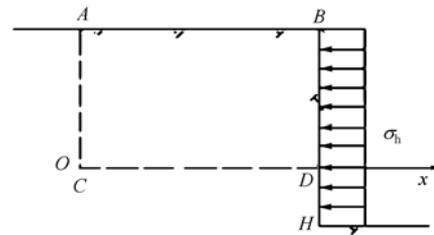
由图 4 可知，在初始应力为 2 MPa 的低应力条件下，围岩振动主要由爆炸荷载引起。随着岩体初始应力提高到 5 MPa，尽管在一定深度的围岩范围内，爆炸荷载引起的振动仍超过开挖卸荷诱发的振动，但在距隧洞中心 10.5 m 以外开挖卸荷诱发的振动已超过爆炸荷载引起的振动。如果岩体初始应力进一步增大，本例中超过 10 MPa，开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动远大于爆炸荷载引起的振动。

由此可知，在高地应力条件下，岩体开挖荷载瞬态卸荷诱发的振动是围岩动力响应中的不可忽视的组成部分，甚至可以成为控制围岩振动大小的关键因素。

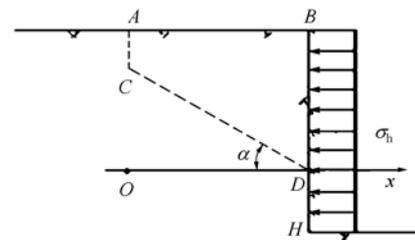
4.2 开挖荷载瞬态卸荷引起的岩体松动

为解释和揭示三峡工程永久船闸中隔墩顶部岩体开挖卸荷引起的动态松动机制，建立如图 5 所示的节理岩体开挖瞬态引发岩体卸荷松动的简化平面计算模型^[20]。

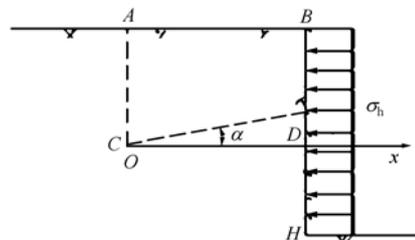
设 *BDH* 为待通过爆破开挖而形成的中隔墩直立坡面。在图 5(a)中，岩体被 *AC* 和 *CD* 两组正交节理切割；在图 5(b), (c)中，岩体被垂直节理 *AC* 和倾斜节理 *CD* 切割。假设爆破前开挖面上的水平



(a) 存在两组正交节理



(b) 存在顺坡节理面



(c) 存在反坡节理面

图 5 动态卸载松动计算模型示意图^[20]

Fig.5 Scheme of calculating models for loosening of jointed rock mass induced by transient unloading^[20]

向初始地应力为 σ_h ；节理面上没有黏结强度。另外，为突出说明开挖瞬态卸荷诱发节理岩体松动的机制，假设母岩的刚度很大，忽略其弹性回复变形的影响。岩块的弹性模量为 E ，岩块的水平向长度为 L 。

(1) 准静态卸荷过程

假设图 5(a)直立坡面 *BH* 上的水平向初始地应力 σ_h 以准静态的方式卸载，忽略摩擦阻力的作用，那么岩块在直立坡面 *BD* 处的最大水平位移为 $\sigma_h L / E$ ；而在岩块的左侧结构面 *AC* 处，其水平位移则为 0。

若水平节理面 *CD* 存在摩擦阻力，那么根据能量守恒原理可得

$$u = \frac{\sigma_h^2 L}{E(\sigma_h + \rho g L f)} \quad (9)$$

式中： u 、 ρ 、 g 和 f 分别为岩块在直立坡面 *BDH* 的水平位移、岩石密度、重力加速度和摩擦因数。

显然, 此时的岩体在直立坡处的最大水平位移小于 $\sigma_h L/E$; 而在岩体的左侧边界, 即结构面 AC 部位, 其水平位移仍为 0。这表明在准静态卸载条件下, 对岩体结构面 AC 而言, 不会发生结构面的拉开现象, 即不会出现岩体的侧向松动。

(2) 瞬间卸荷过程

如图 5(a)所示, 考虑瞬态卸载条件, 即假设在初始时刻($t = 0$)时, 瞬间释放水平向初始地应力 σ_h 至 0。如果初始水平应力足够大, 卸载后岩块中弹性变形能的释放能够使岩块产生向左的运动, 此时岩块中积累的应变弹性能一部分转变为岩块的动能, 一部分用于克服摩擦力做功; 当卸载波到达岩块左端 AC 后, 岩块脱离母岩向右运动, 结构面 AC 拉开; 此后岩块的动能全部用于克服摩擦阻力做功, 直至岩块的运动过程结束。

岩块 $ACDB$ 的刚体位移, 也即结构面 AC 的水平向张开位移, 可直接由能量守恒方程求得

$$\Delta = \frac{1}{2} \frac{\sigma_h^2}{E \rho g f} - \frac{1}{2} \frac{\sigma_h L}{E} \quad (10)$$

式中: Δ 为岩块的水平向刚体位移。

对于底滑面为非水平的图 5(b), (c)情况, 同样由能量守恒方程可得到结构面 AC 的张开位移:

$$\Delta = \frac{(\sigma_h^2 - \rho g f \sigma_h L)}{2E \rho g (f - \tan \alpha)} \quad (11)$$

由上述的分析和计算可以发现: (1) 在准静态卸载条件下, 岩块 $ACDB$ 仅有弹性回复位移产生, 没有刚体位移出现, 在岩体结构面 AC 处不会出现结构面的拉开现象。(2) 瞬间卸载条件下, 岩块 $ACDB$ 除了有弹性回复位移产生, 还会出现水平向的刚体位移, 导致岩体结构面 AC 被拉开, 产生通常所谓的松动现象。(3) 若滑动面为顺层面, 此时结构面 AC 的张开位移将大于水平底滑面的情况; 对于反坡向结构面, 此时 $\alpha < 0$, 只要岩体初始应力足够大, 在结构面 AC 处仍然可产生张开位移, 显然此时的张开位移值较水平底滑面要小。

由式(10)和(11)同时可以看出, 在瞬间卸载条件下, 若岩体初始应力足够大, 岩块的水平刚体位移远大于弹性回复变形值, 那么岩体结构面的张开位移值近似与初始应力的平方成正比。由上面的分析与讨论可知, 岩体开挖荷载瞬态卸荷的作用机制能够解释直立坡岩体的卸荷松动机制及现象。

5 工程例证

5.1 开挖卸荷诱发振动实测资料

在建的瀑布沟水电站, 装机容量 3 300 MW, 其地下厂房洞室群由引水隧洞、主厂房、主变室、调压井和尾水隧洞等组成, 6 条平行布置的引水隧洞中心间距为 28.9 m, 2 条尾水隧洞的中心间距为 85.0 m, 如图 6 所示。引水洞采用洞径为 10.7 m 的圆型断面, 尾水洞则为城门洞型, 其断面尺寸为 20.0 m×24.2 m。地下厂房区围岩为花岗岩, 波速为 4 500~5 500 m/s。

引水隧洞和尾水隧洞开挖过程中分别在本洞底板和正对开挖掌子面的邻洞侧壁上进行了围岩振动跟踪监测。尾水隧洞振动监测洞段的水平向和垂直向围岩初始应力均为 20 MPa 左右; 引水隧洞振动监测洞段的围岩初始应力约为 10 MPa, 大概为尾水洞监测段的一半。

1#尾水洞上层的中导洞开挖爆破设计如图 2(b)所示。炮孔直径为 $\phi 42$ mm, 孔深为 3.5 m, 掏槽孔、崩落孔和光爆孔的药卷直径分别为 35, 32 和 25 mm。在相邻的 2#尾水洞内正对 1#尾水洞开挖掌子面岩壁上的实测径向振动时程曲线见图 7(a)(BL 为爆破振动, IS 为开挖瞬态卸荷诱发振动, MS 后接数字代表雷管的段别)。

由于围岩条件较差, 3#引水洞进口段掘进炮孔深度仅为 1.5 m, 装药参数与尾水洞相似, 总装药量为 48 kg, 分 3 段起爆, 最大单响药量为 20 kg。在相邻的 2#引水洞内正对 3#引水洞开挖掌子面岩壁上实测的径向振动时程曲线见图 7(b)。

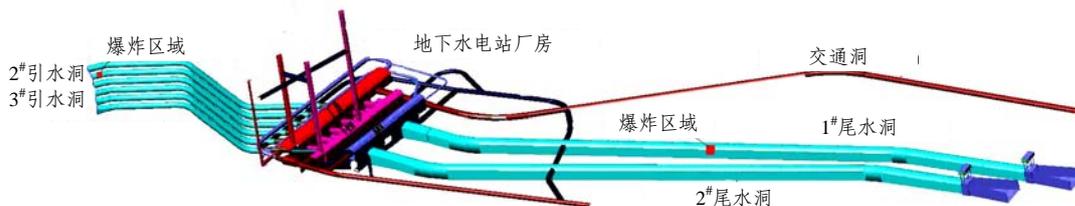
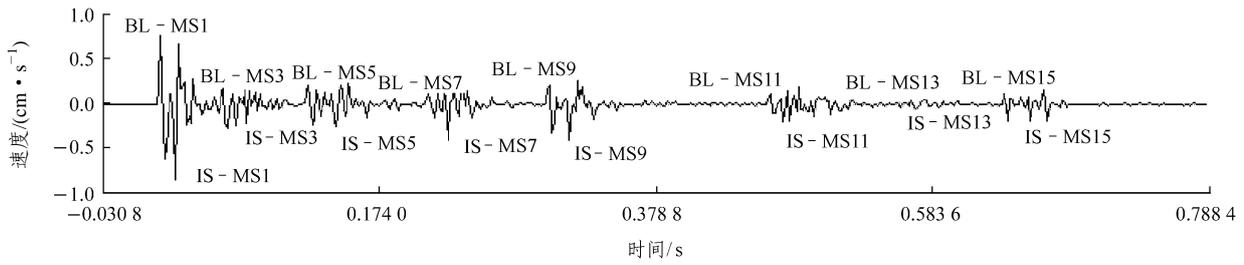
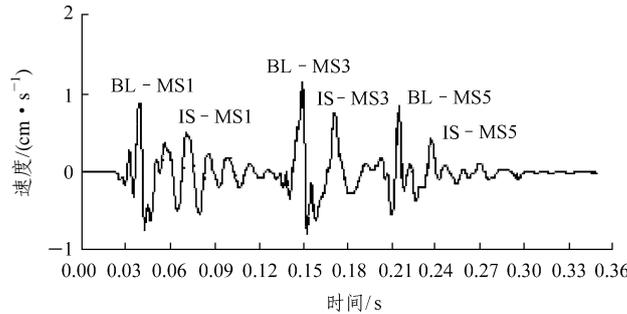


图 6 瀑布沟水电站地下厂房洞室群布置示意图

Fig.6 Scheme of underground tunnel and chamber group layout for Pubugou Hydropower Station



(a) 相邻尾水隧洞内的实测振动曲线



(b) 相邻引水隧洞内的实测振动曲线

图7 相邻隧洞内的实测围岩振动时程曲线

Fig.7 Monitored vibration time-history curves in adjacent tunnels

由于爆破振动监测点正对开挖掌子面，可以推断实测振动波形中不含瑞利面波。通过图7(a)，(b)所示的直达P，S波和开挖卸荷诱发振动的到达时差分析^[35]，可以推断，每一段振动均是由爆破振动和后续的岩体开挖瞬态卸荷诱发振动叠加而成，具体见表1。

表1 实测振动波形中不同性质波到达的时间差分析

Table 1 Delay time analysis of different waves in measured vibration curves

测点部位	爆心距/m	S波滞后P波理论时差/ms	诱发振动滞后P波实测时差/ms
尾水隧洞	65	9.9~11.2	30
引水隧洞	23	3.5~4.0	11

由于引水隧洞振动监测洞段的围岩初始应力仅为尾水洞监测段的一半，导致引水隧洞岩体开挖瞬态卸荷诱发的相对振动幅值(与爆破振动的比值)也较尾水洞内的小。

5.2 开挖瞬态卸荷诱发围岩大变形和岩爆实例

为加快开挖进度，目前大型地下厂房开挖大多采用三大洞室上部开挖和底板以下尾水洞开挖并行进行、最后底板一次贯通的开挖程序，如图8所示。

由于开挖卸荷和围岩应力重分布的影响，底板岩体在贯通前水平向应力高度集中，并积累了很大

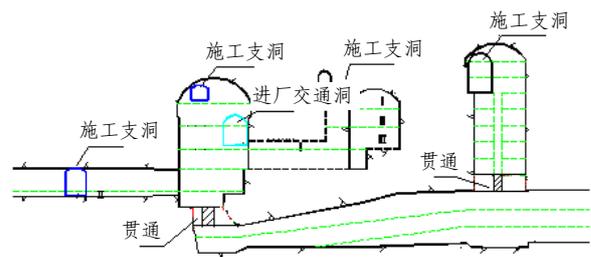


图8 地下厂房洞室群开挖程序示意图

Fig.8 Scheme of excavation procedure of underground hydropower station

的弹性应变能。大规模的底板爆破贯通，引起底板岩体应力(开挖荷载)的快速释放，导致围岩瞬态卸荷回弹、突发大变形，并可能进一步诱发邻近围岩的剧烈岩爆。

二滩水电站地下厂房开挖过程中，曾出现了2次大范围围岩变形突变并伴随剧烈岩爆^[36, 37]：第一次由2#尾调室南端台阶开挖高程989~1010 m一次性贯穿所引起，造成了2#尾调室上游边墙中上部岩体变形量一次性增加30~60 mm，同时诱发了附近岩体大范围开裂及岩爆，特别是1#~2#尾水管之间，岩柱中段因严重岩爆而抛射的方量达150 m³；第2次大范围围岩变形突变及岩爆由2#机窝从高程979.8~998.0 m一次性贯穿引起，诱发了厂房桩号0+60~0+130段中下部台阶岩体大变形，最大变形增加量达24.0~41.5 mm；造成邻近衬砌钢筋混凝

土开裂、厂房吊顶上抬及 4 根 1 750 kN 级锚索拉断。需要说明的是, 该 2 次岩爆均是伴随底板的爆破贯通瞬间发生的。

瀑布沟水电站地下厂房开挖过程在岩壁吊车梁下游厂(横)0+107~0+117 边墙之间曾出现一条宽 2 cm 左右、深约 0.5 m 的裂缝, 该裂缝开度变化与其下部每层开挖时间完全对应; 随着下部岩体开挖进行, 裂缝开度呈台阶状跳跃, 并以突发性为主^[38]。此类变形的跳跃性发展也主要由下部岩体的开挖荷载瞬间释放所引起。

6 结论与展望

通过以上分析和讨论, 可取得以下认识和结论:

(1) 伴随岩体爆破开挖发生的岩体开挖荷载释放属于动态卸荷过程, 在中、高地应力条件下, 岩体开挖荷载的卸荷需要考虑荷载作用过程的瞬态特性及其动力效应。

(2) 开挖荷载瞬态释放历程可以用与分段微差爆破对应的分步开挖荷载、瞬态卸荷方式及卸荷持续时间等三方面的参数进行描述。

(3) 开挖荷载瞬态释放的动力效应主要体现在开挖卸荷诱发围岩振动及开挖卸荷诱发节理岩体瞬态卸荷松动 2 个方面。

(4) 二滩和瀑布沟等高地应力地区水电站地下厂房开挖过程中开挖卸荷诱发围岩实测振动资料及观察到的动力破坏现象验证了论文观点。

本文的工作仅是开挖荷载瞬态卸荷及动力效应问题研究的初步结果, 对开挖荷载瞬态卸荷机制、开挖荷载瞬态卸荷过程的三维时空描述、天然裂隙岩体的动态卸荷松动力学模型与数值方法、卸荷速率对诱发振动的影响以及爆破振动与开挖卸荷诱发振动间的分离等诸多问题尚待进一步研究。

参考文献(References):

[1] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1 251 - 1 275.

[2] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1 413 - 1 426.

[3] BACKBLOM G. Recent experiments in hard rocks to study the excavation response: implications for the performance of a nuclear waste geological repository[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(3): 377 - 394.

[4] NGUYEN T S, BORGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Hydro-mechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit—the Kamaishi Mine experiment in Japan[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(1): 79 - 94.

[5] SAYERS C M. Orientation of microcracks formed in rocks during strain relaxation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(5): 437 - 439.

[6] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 833 - 847.

[7] KESALL P C, CASE J B, CHABANNES C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(3): 123 - 135.

[8] ENQELDER T, PLUMB R. Changes in in-situ ultrasonic properties of rock on strain relaxation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(2): 75 - 82.

[9] BOSSART P, MEIER P M, MOERI. Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus clay of the Mont Terri Rock Laboratory[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(1): 19 - 38.

[10] MITAIM S, DETOURNAY E. Damage around a cylindrical opening in a brittle rock mass[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1 447 - 1 457.

[11] MOLINERO J, SAMPER J, JUANES R. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(4): 369 - 386.

[12] MAEJIMA T, MORIOKA H, MORI T, et al. Evaluation of loosened zones on excavation of a large underground rock cavern and application of observational construction techniques[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(2/3): 223 - 232.

[13] MAXWELL S C, YOUNG R P, READ R S. A micro-velocity tool to assess the excavation damaged zone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(2): 235 - 247.

[14] YOUNG R P, COLLINS D S. Seismic studies of rock fracture at the underground research laboratory, Canada[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(6): 787 - 799.

[15] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from micro-seismic event monitoring[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1 135 - 1 145.

[16] 哈秋龄. 岩石边坡工程与卸载非线性岩石(体)力学[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(4): 386 - 391.(HA Qiuling. Rock slope engineering and unload in nonlinear rock mass mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(4): 386 - 391.(in Chinese))

[17] 陈德基, 余永志, 马能武, 等. 三峡工程永久船闸高边坡稳定性研

- 究中的几个主要问题[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 7 - 15.(CHEN Deji, YU Yongzhi, MA Nengwu, et al. Some main problems on the stability of high permanent shiplock slope for Three Gorges Project[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(1): 7 - 15.(in Chinese))
- [18] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(LI Jianlin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [19] 吕爱钟, 焦春茂. 岩石力学中两个基本问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4 095 - 4 098.(LU Aizhong, JIAO Chunmao. Discussion on two elementary problems in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4 095 - 4 098.(in Chinese))
- [20] 卢文波, 金 李, 陈 明, 等. 节理岩体爆破开挖过程的瞬态卸荷松动机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 653 - 4 657.(LU Wenbo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on mechanism of loosening of jointed rock mass caused by dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 653 - 4 657.(in Chinese))
- [21] 卢文波, 陈 明, 严 鹏, 等. 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩振动特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 293 - 3 299.(LU Wenbo, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on vibration characteristics of surrounding rock induced by tunnel excavation under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 293 - 3 299.(in Chinese))
- [22] ABUOV M G, AITALIEV S M, ERMEKOV T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations[J]. Soviet Mining Science, 1989, 24(6): 581 - 590.
- [23] CARTER J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(2): 129 - 132.
- [24] 王贤能, 黄润秋. 岩石卸载破坏特征与岩爆效应[J]. 山地研究, 1998, 16(4): 281 - 285.(WANG Xianneng, HUANG Runqiu. Analysis of deformation and failure features characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rock burst[J]. Mountain Research, 1998, 16(4): 281 - 285.(in Chinese))
- [25] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 等. 静荷理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机制的初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 255 - 1 262.(XU Zemin, HUANG Runqiu, LUO Xingchun, et al. Limitations of static load theory in rockburst research and preliminary analysis of dynamics mechanism of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 255 - 1 262.(in Chinese))
- [26] 易长平, 卢文波, 许红涛, 等. 岩体开挖过程初始应力的瞬态卸荷效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 750 - 4 754.(YI Changping, LU Wenbo, XU Hongtao, et al. Dynamic unloading effect study of initial stress field in excavation process of large-scale rock mass structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 750 - 4 754.(in Chinese))
- [27] HAZZARD J F, YOUNG R P. Dynamic modeling of induced seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(12): 1 365 - 1 376.
- [28] TANG C A, KAISER P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure—part I: fundamentals[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 113 - 121.
- [29] KAISER P K, TANG C A. Numerical simulation of damage accumulation and seismic energy release during brittle rock failure—part II: rib pillar collapse[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 123 - 134.
- [30] 徐则民, 吴培关, 王苏达, 等. 岩爆过程释放的能量分析[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 104 - 110.(XU Zemin, WU Peiguan, WANG Suda, et al. Analysis of energy released in process of rockburst[J]. Journal of Nature Disaster, 2003, 12(3): 104 - 110.(in Chinese))
- [31] 陶振宇, 董振华, 卢文波. 敞口炮孔压力变化历程的理论分析与计算[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(4): 394 - 399.(TAO Zhenyu, DONG Zhenhua, LU Wenbo. A theoretical analysis and calculation of pressure course of unstemmed borehole[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1994, 27(4): 394 - 399.(in Chinese))
- [32] 于亚伦. 岩石动力学[M]. 北京: 北京科技大学出版社, 1990.(YU Yalun. Rock mass dynamics[M]. Beijing: Science and Technology University Beijing Press, 1990.(in Chinese))
- [33] FELICE J J, BEATTIE T A, SPATHIS A T. Face velocity measurements using a microwave radar technique[C]// Proceedings of the Conference on Explosives and Blasting Technique. [S. l.]: [s. n.], 1991: 71 - 77.
- [34] PREECE D S, EVANS R, RICHARDS A B. Coupled explosive gas flow and rock motion modeling with comparison to bench blast field data[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Vienna, Austria: [s. n.], 1993: 239 - 246.
- [35] 严 鹏, 卢文波, 周创兵. 非均匀应力场中初始应力动态卸载所诱发的围岩振动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 773 - 781.(YAN Pen, LU Wenbo, ZHOU Chuangbing. Study on impactation of initial geostress field on vibration of surrounding rock during excavation with drilling and blasting method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 773 - 781.(in Chinese))
- [36] 蔡德文. 二滩地下厂房围岩的变形特征[J]. 水电站设计, 2000, 16(4): 54 - 61.(CAI Dewen. Deformation characteristics of surrounding rock during excavation in Ertan Underground Hydropower Station[J]. Design of Hydropower Station, 2000, 16(4): 54 - 61.(in Chinese))
- [37] 李正刚. 二滩水电站地下厂房系统洞室围岩变形研究[J]. 四川水力发电, 2004, 23(1): 43 - 47.(LI Zhenggang. Study on surrounding rock deformation of underground chambers at the system of Ertan Hydropower Station[J]. Sichuan Water Power, 2004, 23(1): 43 - 47.(in Chinese))
- [38] 宋旭东, 向涌涛, 段 伟. 浅析瀑布沟水电站地下厂房系统洞室群围岩变形[J]. 四川水力发电, 2007, 26(4): 68 - 70.(SONG Xudong, XIANG Yongtao, DUAN Wei. Surrounding rock deformation of caverns in underground powerhouse complex at Pubugou Hydropower Station[J]. Sichuan Water Power, 2007, 26(4): 68 - 70.(in Chinese))