

基于爆破振动累积效应的高边坡开挖质点振速阈值与损伤深度研究

兰 天

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]根据损伤力学理论,对抽水蓄能电站高边坡开挖时多次爆破振动所造成的累积损伤效应进行了分析,研究了爆破振动累积效应的力学机理,得出岩体内部微裂纹萌生、扩展、贯通的演化规律。利用现场爆破振动监测和岩体声波测试来建立考虑累积效应的质点振速衰减模型,提出以累积损伤控制为基础的动态振速阈值确定方法。在此基础上,给出了累积损伤变量,并建立了其演化方程,推导出考虑累积效应的损伤深度计算公式,采用多因素耦合修正系数来提高预测精度,最后建立质点振速阈值和损伤深度的关系模型。

[关键词]爆破振动累积效应;高边坡;质点振速阈值;损伤深度

DOI: 10.33142/hst.v9i8.20441

中图分类号: TB533

文献标识码: A

Research on the Threshold of Particle Vibration Velocity and Damage Depth in High Slope Excavation Based on the Cumulative Effect of Blasting Vibration

LAN Tian

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: Based on the theory of damage mechanics, the cumulative damage effect caused by multiple blasting vibrations during the excavation of high slopes in pumped storage power stations was analyzed. The mechanical mechanism of the cumulative effect of blasting vibrations was studied, and the evolution law of microcracks initiation, propagation, and penetration inside the rock mass was obtained. Establish a particle velocity attenuation model considering cumulative effects using on-site blasting vibration monitoring and rock acoustic testing, and propose a dynamic velocity threshold determination method based on cumulative damage control. On this basis, the cumulative damage variable was given and its evolution equation was established. The damage depth calculation formula considering the cumulative effect was derived, and a multi factor coupling correction coefficient was used to improve the prediction accuracy. Finally, a relationship model between the particle vibration velocity threshold and the damage depth was established.

Keywords: cumulative effect of blasting vibration; high slope; particle vibration velocity threshold; depth of damage

引言

抽水蓄能电站高边坡开挖有规模大、周期长、爆破频繁的特点。多次重复爆破振动会在岩体内产生累积损伤效应,造成岩体力学参数变坏,完整性下降,从而影响边坡长期稳定性。现有的爆破振动安全控制标准大多是以单次爆破的最大质点振速为依据的,没有考虑到多次爆破的累积效应,在实际工程中常常出现虽然满足了振速控制标准但是仍然会发生边坡失稳或者超深损伤的情况。

1 爆破振动累积效应的力学机制

爆破振动累积效应指的是多次爆破振动波反复作用于岩体时,岩体内部损伤不断积累、力学性能逐渐变差的现象。本质上就是疲劳损伤的过程。每次爆破振动在岩体中产生瞬态动应力,当动应力超过岩体弹性极限时,微裂

纹就会产生;随后的振动使微裂纹继续扩展、贯通,直到形成宏观裂隙。从微观机制上看,岩体内部有很多原生微缺陷^[1]。爆破振动所引起的循环动应力会在裂纹尖端处产生应力集中,促使裂纹沿着最大的剪应力方向向前发展。根据断裂力学理论可知,裂纹扩展速率与动应力幅值、振动次数成正比。裂纹密度增大时,岩体等效弹性模量变小,波速减小,渗透性增大。从能量角度看,每次爆破所给岩体的能量一部分以弹性波的形式消耗掉,另一部分转变为损伤耗散能,用来形成和扩大微裂纹面。累积损伤程度同总输入能量、单次爆破能量、振动次数有关。当累积损伤达到临界值的时候,岩体会出现宏观破坏。不同种类的岩体累积效应敏感性不一样,脆性硬岩对高频振动比较敏感,以脆性裂纹扩展为主,软岩则表现为塑性变形累积。某抽

水蓄能电站边坡主要是花岗岩,属于脆性硬岩,累积效应表现为振动次数增多使岩体波速逐渐降低,前10次爆破波速下降明显,以后趋于平缓。

2 高边坡开挖爆破质点振速阈值分析

2.1 累积效应下的振速衰减规律

传统的萨道夫斯基公式只给出了爆破振速随比例距离衰减的关系,没有考虑到累积效应。现场监测结果表明,在相同的爆破参数下,随着爆破次数的增多,同一个测点的质点振速会越来越大。由于累积损伤使岩体的波阻抗减小,所以振动能量更容易传开^[2]。根据某抽水蓄能电站高边坡25次开挖爆破的振动监测数据(测点距爆源30~50m),用回归分析得到累积效应修正的振速衰减公式:

$$v = k \cdot Q^\alpha \cdot R^{-\beta} \cdot e^{\gamma N} \quad (1)$$

式中, v 为质点振速(cm/s), Q 为单段药量(kg), R 为爆心距(m), N 为累积爆破次数, k 、 α 、 β 为场地系数, γ 为累积效应系数。该电站边坡场地系数 $k=182$, $\alpha=0.67$, $\beta=1.52$, $\gamma=0.023$ 。可见,当爆破次数 N 从1增至25时,振速增加约77%,累积效应显著。因此,仅以首次爆破确定的振速衰减关系进行安全控制,将低估后续爆破的实际振动强度。

2.2 基于累积损伤的振速阈值确定方法

传统的振速阈值是以边坡不发生宏观破坏为判断标准的,没有考虑累积损伤的过程。文章提出了基于累积损伤控制的动态阈值确定方法,用岩体声波波速下降率作为累积损伤的量化指标,通过建立累积爆破次数和临界振速的关系,反演各个施工阶段的振速阈值。在边坡典型剖面处布置声波测试孔,每次爆破后做跨孔声波测试,得到波速变化曲线。其次,设置累积损伤控制标准,根据工程经验,将波速下降率15%设为轻微损伤阈值,30%设为中等损伤阈值,45%设为严重损伤阈值。接着对不同的爆破次数下振速监测值和波速下降率进行统计分析,得到各个累积损伤阈值所对应的临界振速,最后求得临界振速和累积爆破次数的关系式。

表1 不同累积爆破次数下的质点振速阈值建议值

累积爆破次数N	轻微损伤阈值 (cm/s)	中等损伤阈值 (cm/s)	严重损伤阈值 (cm/s)
1~5	9.5	13.2	17.8
6~10	8.2	11.5	15.6
11~15	7.1	10.0	13.7
16~20	6.3	8.9	12.2
21~25	5.6	8.0	11.0

从表1可以看出,随着爆破次数的增加,各个损伤级别振速阈值都呈下降趋势。例如,轻微损伤阈值从初始的

9.5cm/s降至5.6cm/s,降幅达41%。因此后期爆破要严格控制振速,振速虽然绝对值不大,但累积效应仍然会造成较大的损伤。工程上可以将中等损伤阈值作为安全控制的上限,轻微损伤阈值作为预警值。

3 爆破振动累积损伤深度预测模型

3.1 累积损伤变量的定义与演化方程

定义累积损伤变量 $D = 1 - \left(\frac{V_p}{V_{p0}}\right)^2$,其中 V_{p0} 为初始岩体纵波波速, V_p 为经历 N 次爆破后的波速。 D 值介于0到1之间, $D=0$ 表示无损伤, $D=1$ 表示完全破坏。该定义基于弹性模量劣化与波速平方成正比的理论假设。

累积损伤演化遵循非线性疲劳损伤规律。等幅循环荷载下损伤演化分为初始加速阶段、稳定发展阶段、加速破坏阶段。对变幅爆破振动,用修正的Chaboche损伤演化方程表示为:

$$\frac{dD}{dN} = A \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^m \cdot (1-D)^{-\rho} \quad (2)$$

式中, σ 为爆破振动在岩体内产生的动应力幅值, σ_s 为岩体静态强度, A 、 m 、 ρ 为材料常数。动应力 σ 与质点振速 v 满足 $\sigma = \rho \cdot C \cdot v$ 为岩体密度, C 为波速。将振速衰减公式代入,可得损伤演化与爆破参数、累积次数及爆心距的关系。

3.2 考虑累积效应的损伤深度计算方法

损伤深度定义为从边坡临空面向内,累积损伤变量 D 超过设定阈值(如0.15)的最大垂直深度。基于弹性半空间理论,爆破振动在岩体中随深度衰减的规律可表示为 $v(z) = v_0 \cdot \exp(-\eta z)$,其中 v_0 为临空面振速, η 为衰减系数, z 为深度。

将损伤演化方程和振速随深度衰减公式结合起来,通过积分可以得到损伤深度 h_d 满足的方程为:

$$\int_0^{h_d} \left[\frac{dD}{dN} \right]_{v(z)} dz = D_{th} \quad (3)$$

其中 D_{th} 为损伤阈值。对于多次爆破,需对每次爆破的损伤增量求和。简化的实用计算公式为:

$$h_d = \frac{1}{\eta} \ln \left(\frac{v_0}{v_{th}} \right) + \Delta h(N) \quad (4)$$

式中, v_{th} 为对应损伤阈值的临界振速,可由现场试验标定; $\Delta h(N)$ 为累积效应引起的附加损伤深度,其经验形式为 $\Delta h(N) = a \cdot \ln(N+1)$, a 为拟合系数。该电站边坡的拟合结果为 $a = 0.42m$, $\eta = 0.15m^{-1}$ 。

3.3 多因素耦合下的损伤深度修正

实际工程中,损伤深度受多种因素耦合影响,需引入

综合修正系数 K 。考虑因素包括：岩体完整性系数 K_v 、爆破孔网参数 K_b 、地形坡度 K_s 、地下水 K_w 。综合修正系数 $K = K_v \cdot K_b \cdot K_s \cdot K_w$ ，取值范围 0.5-1.5。修正后的损伤深度为 $h'_d = K \cdot h_d$ 。对于某抽水蓄能电站边坡，岩体完整性较好($K_v=0.9$)，爆破参数合理($K_b=1.0$)，地形坡度 45° ($K_s=1.1$)，地下水不发育($K_w=1.0$)，综合修正系数 $K=0.99$ ，接近 1.0，说明原始预测值可靠性较高。但在节理发育或富水区域，修正系数可达 1.3~1.5，此时累积损伤深度将显著增加，需特别关注。

3.4 质点振速阈值与损伤深度的关联模型

建立振速阈值与损伤深度的定量关联是实现安全控制的关键。对于设定的安全损伤深度 H_{safe} ，相应的允许振速 v_{allow} 可通过求解逆问题得到： $v_{allow} = v_{th} \cdot \exp[\eta \cdot (H_{safe} - \Delta h(N))]$ 。结合表 1 中的振速阈值，可计算不同爆破次数下的允许损伤深度。

表 2 不同质点振速阈值对应的损伤深度预测值 ($N=15$ 时)

质点振速 (cm/s)	损伤深度 (m)	损伤等级	工程建议
5.0	1.2	轻微	可正常施工
6.3	2.4	轻微-中等	加强监测
7.1	3.5	中等	优化爆破参数
8.0	4.6	中等-严重	调整施工方案
10.0	6.8	严重	暂停爆破评估

如表 2 所示，当质点振速从 5.0cm/s 增至 10.0cm/s 时，损伤深度从 1.2m 增至 6.8m，呈指数增长关系。对高边坡，坡面浅层 2~3m 内损伤可采用锚喷支护，但超过 5m 的深层损伤会影响边坡的整体稳定。因此可以认为中等损伤阈

值对应着约 3~4m 的损伤深度为安全控制界限。

图 1 中，当质点振速由 5.0cm/s 增大到 10.0cm/s 的时候，损伤深度由原来的 1.2m 增大到现在的 6.8m，呈指数增长关系。对高边坡坡面浅层 2~3m 内存在损伤可以采用锚喷支护的方式进行处理，但是当坡面深层损伤大于 5m 时，将严重影响边坡的整体稳定，所以把中等损伤阈值所对应的损伤深度当作安全控制界限。

4 高边坡爆破振动累积损伤控制对策

4.1 振速阈值的动态调整策略

按照累积效应的发展规律来创建分阶段的振速动态控制体系。将爆破施工分成初期、中期、后期三个阶段，各个阶段所用的振速阈值不同。后期的阈值比初期降低 30%~40%，因为累积损伤造成岩体的抗振能力下降，如果保持原来的阈值就会产生超深损伤。施工时每 5 次爆破后根据声波测试结果重新设定阈值参数，达到闭环控制的目的。当实测振速接近预警值时，用减小单孔药量、增加起爆段别等方法。该电站边坡在实行动态阈值控制之后，第 20 次爆破时实际的振速为 6.0cm/s，比最初的阈值 9.5cm/s 降低了 37%，损伤深度控制在 2.8m 之内，没有出现超限损伤。另外根据边坡不同高程区设置不同的阈值，坡脚处由于应力集中、振动反射叠加，取标准值的 0.8 倍；坡顶处由于自由面效应明显，取标准值的 0.9 倍。动态调整策略的关键之处在于把累积次数当作控制变量，而不是一个固定不变的振速限值，这样才更符合累积损伤的演变规律。

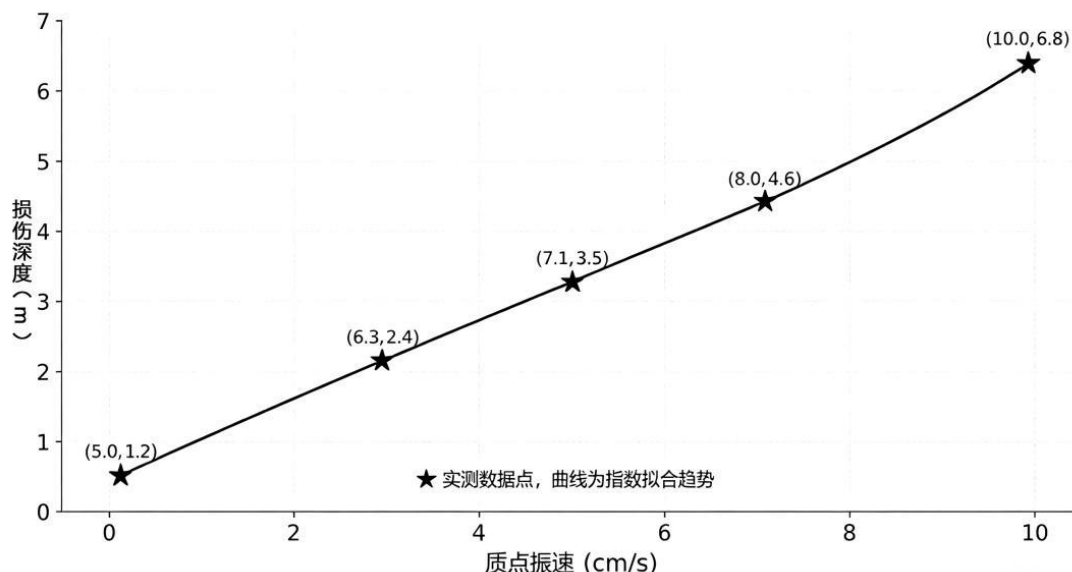


图 1 质点振速与损伤深度关联曲线 ($N=15$)

4.2 爆破参数的优化设计原则

根据累积损伤最小化原则来确定爆破参数,采取“多打孔、少装药、微差起爆”方式,减小一次爆破的振动能量,防止能量集中。具体参数优化为单孔药量控制在常规设计的70%~85%,孔距由2.5m加密到2.0m,排距由2.0m加密到1.6m,用增加钻孔数量来弥补总药量不足对破碎效果的影响^[3]。合理确定微差间隔时间,一般取50~100ms,使相邻段别振动波形不叠加,该电站现场试验结果表明,75ms微差比25ms微差能将峰值振速降低32%,累积损伤变量D减小0.08。对于高边坡,坡脚处应力集中、损伤积累最严重,所以该区段单孔药量不应大于15kg。边坡马道、平台处设置减振孔,孔径90mm,孔深8m,孔距1.0m,形成局部减振带。爆破参数优化之后,该电站单次爆破振速峰值由优化前的11.2cm/s降低到7.6cm/s,15次累积爆破波速下降率由原来的18%降到11%,效果明显。

4.3 累积效应抑制的施工措施

采用综合施工措施来抑制累积效应。合理安排爆破顺序,先开挖顶面台阶,后开挖底面台阶,防止多次振动同一个地方反复影响边坡。具体施工时将边坡分成5个开挖层,每层高8~10m,上层全部爆破并支护后下层再进行施工,层间施工间隔不少于7天,使岩体内孔隙水压力消散、微裂纹局部闭合。在完成支护区域周边爆破后,增大安全距离到30m以上,采用松动爆破,单位耗药量控制在0.25kg/m以下。采用柔性垫层爆破,炮孔上部铺一层0.3m厚的沙袋或锯末,减小振动能量向边坡直接传递,实测结果为垫层可使坡面振速下降18%~25%。对已经出现明显累积损伤的部位,及时采用注浆加固的方法,注浆压力为0.5~1.0MPa,水泥浆水灰比为0.8,注浆后声波波速恢复率大于75%。另外,控制单日爆破次数,每天不超过2次,两次爆破间隔不小于6h,给岩体损伤局部恢复留出时间窗口。该电站用上述施工措施使累积损伤深度预测值和实测值的偏差小于0.3m,说明措施是有效的。

4.4 损伤深度的监测与反馈机制

创建“爆破振动+声波检测+宏观检查”三者相辅相成的监测体系。每次爆破都进行振动监测,重点部位设置临时测点,用TC850型爆破测振仪采样频率5kHz。每3到5次爆破后进行跨孔声波测试,在边坡典型剖面布置3

组测试孔,孔间距2m,孔深10m,用RSM SY6型声波仪,计算损伤变量D、损伤深度 h_d ,与图1所示关联曲线的预测值比较。每天安排专人巡查边坡有无新出现的裂缝或者原有裂缝的扩展,用钢尺和裂缝计测量,精度为0.1mm。当监测到损伤深度超过预警值时,马上启动反馈程序,首先检查本次爆破振速监测数据是否超过阈值,然后改变以后爆破参数,把单孔药量减小10%,若需继续施工则暂停施工,采用注浆加固或者设计变更^[4]。监测数据及时录入数据库,每次爆破后对预测模型的参数进行修正,如调整式中累积效应系数 γ 和附加损伤深度拟合系数a。该电站运行该反馈机制期间,共发出预警3次,都及时采取了调整措施,没有造成深层损伤。监测和反馈的闭环控制是保证累积损伤可以预防、可控的重要环节。

5 结束语

爆破振动累积效应属于抽水蓄能电站高边坡开挖中的重要控制要素。文章从理论分析和工程实践中得出累积效应的力学机理,建立了考虑累积效应的振速衰减公式,给出了基于累积损伤的动态振速阈值确定方法。建立了涵盖损伤变量的定义、演化方程、损伤深度的计算、多因素修正的完整的预测模型,得到了振速阈值和损伤深度之间定量的关系,提出的动态调整策略、参数优化原则、监测反馈机制有工程实用价值。研究成果用到某抽水蓄能电站高边坡爆破施工中,明显减小了累积损伤程度,保证了边坡稳定安全。

[参考文献]

- [1]王子一,吴桂义,罗畅,等.多次爆破振动下陡边坡振动响应及稳定性研究[J].爆破,2023,40(3):158-169.
- [2]王元民,由松江,马章印,等.进路充填采场爆破损伤深度计算及爆破参数优化[J].现代矿业,2023,39(3):55-60.
- [3]何丽平,汪晓俊,郭剑雄,等.砂泥岩互层岩质边坡爆破振动衰减规律现场试验研究[J].高压物理学报,2023,37(5):174-183.
- [4]彭波,蔡铖,刘韬.隧道施工爆破诱发的围岩累积损伤规律研究[J].工程建设,2024,56(6):32-38.

作者简介:兰天(1988—),男,高级工程师,毕业于中国石油大学(北京),现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目执行经理,主要从事大型水电站、抽水蓄能项目管理工