

# 某露天矿场爆破振动特性

李清正, 林大能\*

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为探究某露天矿山高陡边坡爆破振动特性, 根据该矿山的岩石性质和爆破规模, 对现场进行爆破振动测试, 采用 TC4850 爆破振动检测系统, 结合爆破试验区域的地势地形, 在不同高度的台阶布置测试点, 爆破作业后采集到相关数据. 基于 MATLAB 软件编程进行回归分析, 得出该矿区质点最大振速的拟合公式, 考虑高程效应后得到更为理想的拟合公式, 相关系数  $r^2$  为 0.942. 在一定范围内, 爆破振动强度与测点相对于爆心高程呈正相关, 放大效应与相对高程有关. 相对高程较小时放大效应明显, 考虑高程效应可以获得更准确的爆破振动特性.

**关键词:** 露天矿场; 回归分析; 爆破振动; 高程效应

**中图分类号:** TD235 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)03-0036-06

## On Blasting Vibration Characteristics of an Open Pit Mine

LI Qingzheng, LIN Daneng

(School of Resources & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To investigate the vibration characteristics induced by blasting on a high-steep slope within an open-pit mine, on-site blasting vibration tests are conducted, taking into account the rock properties and scale of the mine's blasting operations. Employing the TC4850 blasting vibration detection system and considering the terrain of the test area, testing points are strategically placed on steps of different heights, with relevant data collecting post-blasting. Utilizing MATLAB software programming, a regression analysis is performed to derive a fitting formula for the maximum vibration velocity of particles in the mining area. After accounting for the elevation effect, a more optimal fitting formula is obtained, yielding a correlation coefficient ( $r^2$ ) of 0.942. Within a defined range, the intensity of blasting vibration demonstrates a positive correlation with the relative elevation of the measuring point to the blast center. Additionally, the amplification effect is found to be associated with the relative elevation, particularly pronounced when the relative elevation is small, considering the elevation effect contributes to a more precise understanding of blasting vibration characteristics.

**Keywords:** open pit mines; regression analysis; blasting vibration; elevation effect

近年来,随着露天矿山的开采和城市化进程的推进,露天矿山边坡稳定性问题引起了广泛关注.许多国家都经历了露天矿山边坡滑坡事故,这些事故造成了一定的经济损失和环境污染甚至人员伤亡.由于这些问题的严重性,各国政府和监管机构已经着手规范和强化对露天矿山边坡稳定性的分析和监测.

目前,国内外众多学者对露天矿山边坡的爆破振动特性展开研究,所采用的方法包括现场测试、数值

模拟、回归分析等.范道林等<sup>[1]</sup>通过对检测数据回归分析得到了振动速度预测公式;安胜杰等<sup>[2]</sup>采用现场监测方法分析边坡的爆破振动响应特性;费鸿禄等<sup>[3]</sup>基于 ANSYS 软件,建立边坡模型并探究其爆破振动下的稳定性.传统的回归分析在高陡边坡中拟合效果较为一般,为获得更为理想的拟合效果,本文考虑高陡边坡的高程效应并对传统回归分析方法加以修正.

为掌握矿山爆破振动对高陡边坡的影响程度,优化爆破参数和起爆方式,尽量降低爆破振动的不利影响,以某露天矿山高陡边坡为工程背景,对该边坡进行爆破振动测试,采用 TC4850 爆破振动检测系统得到较为准确的监测数据;考虑高程效应,基于 MATLAB 软件编程进行回归分析,得出该矿区质点最大振速的拟合公式;基于软件绘图得出该区域爆破地震波的传播特性.以上研究内容可为生产规模与控制爆破振动这一矛盾的解决提供参考.

## 1 工程背景

某露天矿山东西长约 1.26 km,南北约 1.04 km.其边坡总体坡度为  $46^{\circ} \sim 48^{\circ}$ ,边坡平均高度 346 m,台阶高度 13~14 m.矿区所处位置降水量较少,昼夜温差大,且地质构造简单,周围无居民及建筑物,爆破条件良好.经历多次爆破作业后,边坡岩体的下滑力有一定程度增大,边坡稳定性下降,若不采取相应措施,边坡存在失稳的危险性.此外,爆破振动效应导致部分边坡岩体松动,存在不同程度的破坏.岩体结构变化后,强度降低,未来可能形成岩体松动带,边坡抗滑力持续衰减.高陡边坡由于岩层倾角和边坡坡度较大,边坡稳定性更易在爆破振动作用下遭到破坏.

## 2 爆破振动测试

### 2.1 爆破振动强度参数

爆破振动强度的评估通常涉及多个物理量,包括质点的位移、速度、加速度和频率,在传统观点中,振动速度通常被认为是一个可靠的判据.不同国家和地区采用不同的标准来评估爆破振动强度,例如,瑞典对振速、频率、位移和加速度等多个参数统一考量后制定其评估标准,而德国、芬兰以及美国在制定爆破相关标准时更加侧重振速和频率参数,中国的《爆破安全规程》(GB 6722—2014)也考虑振速和频率这 2 个指标来评估爆破振动的危害程度.测试某点的质点振动速度,经过相关公式推导可以确定该点的动态应力或拉应力以及剪切应力,将所求应力与研究对象的介质强度做比对,以此来评估爆破振动的有害效应<sup>[4]</sup>,故本文选用质点振速作为爆破振动强度参数.

### 2.2 测试系统及测点布置

本次测试采用 TC4850 爆破振动检测系统.该系统已经广泛应用在公路与铁道建设、桥梁架设、堤坝修建、建筑、隧道掘进、石场矿山、定向拆除等领域,用于爆破施工时做振动检测<sup>[5]</sup>.查阅相关资料并结合实地情况,确定该矿山各测点坐标及各测点与爆破区域中心的距离.

为使一定区域内爆破振动参数的观测效果较为理想,应结合实际情况在距离爆炸中心由近及远的位置布置测点,测点的位置既要有代表性,也要方便测量装置的安放<sup>[6]</sup>,确保各测点数据的可比性.结合爆破试验区域的地势地形,将测试点布置在不同的高度,且保证各个测点地质条件相同.检测装置应安装在稳固的支撑结构上,防止装置本身受到振动或位移的影响.检测装置应保持一致的安置方法:用生石膏将传感器固定在平整的地面上,使传感器与地面较好地耦合,确保其牢固性,传感器的 X 方向统一与测点至爆破中心的连线垂直,传感器安放完毕后将传感器与记录仪连接.爆破开始前,打开仪器电源对其进行校准和测试,设置好采集参数,将仪器调到数据采集模式,做好采集数据准备工作,拍照留档<sup>[7]</sup>.各测点与爆破点的距离及实测数据见表 1.

表1 爆破振动测试数据统计

测点 编号	测距			段起爆 药量 Q/kg	三分量振速及频率					
	水平测 距 S/m	直线测 距 R/m	高程差/m		X方向		Y方向		Z方向	
					振速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	频率/Hz	振速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	频率/Hz	振速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	频率/Hz
1	331.13	351.98	142.52	460	0.74	16.13	0.69	22.35	0.75	39.12
2	157.58	206.53	152.06	460	2.75	29.79	2.72	24.43	2.80	35.87
3	252.92	265.61	137.75	460	1.08	19.37	1.05	23.63	1.10	31.94
4	26.59	30.60	15.16	460	11.83	31.25	11.22	17.47	12.22	26.57
5	237.98	247.90	148.87	460	1.12	15.47	1.05	20.21	1.15	29.59
6	359.87	408.08	194.52	460	0.33	11.34	0.27	32.16	0.38	31.34
7	299.05	311.02	203.14	460	0.77	12.73	0.82	14.24	0.89	10.45
8	177.22	202.03	118.43	460	1.56	28.14	1.83	45.84	1.91	30.13
9	330.08	349.88	125.27	460	0.74	14.43	0.72	14.41	0.76	11.35
10	195.24	222.47	159.43	460	1.57	23.24	1.64	38.91	1.69	30.34
11	197.43	205.33	150.95	460	1.42	29.84	1.38	24.47	1.49	36.01
12	508.52	645.83	220.86	460	0.51	13.81	0.43	14.51	0.52	13.71
13	240.67	252.70	148.75	460	1.07	15.51	1.04	20.19	1.13	30.11
14	585.74	636.61	105.01	460	0.14	15.16	0.15	17.21	0.17	15.73
15	197.95	211.81	158.92	460	1.46	23.61	1.43	39.02	1.53	30.41

### 3 爆破振动规律分析

#### 3.1 不考虑高程效应的 MATLAB 编程回归分析

《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 13.2.4 给出了爆破振动安全允许距离的公式(1)<sup>[8]</sup>,式(1)变形可得式(2):

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

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha} = K\eta^{\alpha}. \quad (2)$$

式中:R为测点与爆心的直线距离,m;K为与爆心至测点间的地形因素相关的系数;V为质点的峰值振动速度,cm·s<sup>-1</sup>;α为衰减指数,受地质条件影响;Q为段起爆最大药量,kg;η为比例药量。

由于要做线性回归分析,故对式(2)取常用对数得到式(3):

$$\lg V = \lg K + \alpha \lg \eta. \quad (3)$$

处理数据得到各测试点的条件参数,见表2。

表2 各测点条件参数

测点号	lg V			lg η	频率/Hz		
	X方向	Y方向	Z方向		X方向	Y方向	Z方向
1	-0.130 8	-0.161 2	-0.124 9	-1.658 9	16.13	22.35	39.12
2	0.439 3	0.434 6	0.447 2	-1.427 4	29.79	24.43	35.87
3	0.033 4	0.021 2	0.041 4	-1.536 7	19.37	23.63	31.94
4	1.073 0	1.050 0	1.087 1	-0.598 1	31.25	17.47	26.57
5	0.049 2	0.021 2	0.060 7	-1.506 7	15.47	20.21	29.59
6	-0.481 5	0.568 6	-0.420 2	-1.723 2	11.34	32.16	31.34
7	-0.113 5	-0.086 2	-0.050 6	-1.605 2	12.73	14.24	10.45
8	0.193 1	0.262 5	0.281 0	-1.417 8	28.14	45.84	30.13
9	0.130 8	-0.142 7	-0.119 2	-1.656 3	14.43	14.41	11.35

续表 2

测点号	lg V			lg η	频率/Hz		
	X 方向	Y 方向	Z 方向		X 方向	Y 方向	Z 方向
10	0.195 9	0.214 8	0.227 9	-1.459 7	23.24	38.91	30.34
11	0.152 3	0.139 9	0.173 2	-1.424 9	29.84	24.47	36.01
12	0.292 4	0.366 5	-0.284 0	-1.922 5	13.81	14.51	13.71
13	0.029 4	0.017 0	0.053 1	-1.515 0	15.51	20.19	30.11
14	-0.853 9	0.823 9	-0.769 6	-1.916 3	15.16	17.21	15.73
15	0.164 4	0.155 3	0.184 7	-1.438 4	23.61	39.02	30.41

通过 MATLAB 软件编程并进行多元线性回归计算,得到振速的垂向、水平径向和水平切向的函数关系式,分别为式(4)、式(5)和式(6).实测表明,垂直方向振速较大,故本文对垂直振速进行分析,多元线性回归拟合曲线如图 1 所示,相关系数  $r^2$  为 0.856,拟合效果有相当的提升空间.

$$V = 100.90 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.28}; \quad (4)$$

$$V = 97.58 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.10}; \quad (5)$$

$$V = 98.93 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.17}. \quad (6)$$

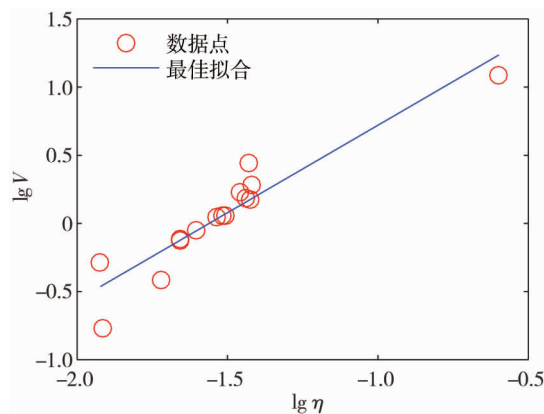


图 1 不考虑高程效应的多元线性回归拟合曲线

### 3.2 考虑高程效应的 MATLAB 编程回归分析

爆破引起的质点振动速度与测点和爆炸中心高程差在一定条件下呈正相关,即高程放大效应.在高陡边坡中,由于地形的变化和岩土材料的性质、地质力学和土力学等因素,边坡上下不同位置的变形和应力可能会有显著的差异,导致边坡上方和下方的位移、应力和变形之间存在高程放大效应.通常情况下,爆破振动速度随着开挖深度、高程及地震波传播距离的增加而衰减,只有在一定高度范围内,爆源能量较大且边坡岩体完整性较好时,高陡边坡质点振速会出现高程放大效应<sup>[9]</sup>.高陡边坡中,边坡爆破振动响应与坡度和坡面之间存在密切的关系,因为坡度和坡面的特征会直接影响边坡对振动的敏感性以及振动的传播方式.较大的坡度更易受到爆破振动的影响,即振动波在较陡的坡面上传播时会引发更大的振动速度.这是因为振动波在传播时会在坡面上反射和折射,而较大的坡度更容易引起这种现象,表现为振动波的强度增强、频率升高,从而使边坡的质点振动速度增大.研究表明,坡度大于 1:2 时,边坡会出现高程放大效应,而且坡面的形状也会对振动响应产生影响<sup>[10]</sup>.

坡高较大时,在边坡高差、边坡坡比、地质状况和爆源能量等多种因素的作用下,各测点的振动速度一方面因边坡坡高和坡度的增加而升高,另一方面又因地震波传播距离的增加而有所降低,分析时应综合考虑振

动速度的变化情况。

爆破振动涉及地势平坦区域即坡高较小时,采用式(2)分析.本文研究区域高程差较大,需考虑爆破地震波传播的高程效应<sup>[11]</sup>,因此要对式(2)进行修正:

$$V = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left( \frac{R}{S} \right)^\beta \quad (7)$$

式中: $S$ 为爆心与测点间的水平距离,m; $\beta$ 为高程影响系数.线性回归分析时, $K, \alpha, \beta$ 为回归系数.

为方便运算记  $\varepsilon = R/S$ ,则式(7)可简化为

$$V = K \eta^\alpha \varepsilon^\beta \quad (8)$$

对式(8)取常用对数得到式(9):

$$\lg V = \lg K + \alpha \lg \eta + \beta \lg \varepsilon \quad (9)$$

各测点的  $\varepsilon$  参数见表3.

表3 各测点  $\varepsilon$  参数

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lg \varepsilon$	0.026 5	0.117 5	0.021 3	0.061 0	0.017 7	0.054 6	0.017 0	0.056 9
测点号	9	10	11	12	13	14	15	
$\lg \varepsilon$	0.025 3	0.056 7	0.017 0	0.103 8	0.021 2	0.036 2	0.029 4	

通过 MATLAB 软件编程并进行多元线性回归计算,得到振速的关系式为式(10),多元线性回归拟合图如图2所示,相关系数  $r^2$  为 0.942.

$$V = 112.25 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.30} \left( \frac{R}{S} \right)^{0.4027} \quad (10)$$

考虑高程效应时,相关系数  $r^2$  较高,故分析该区域爆破振动特性时应考虑高程效应,采用式(10)分析.

### 3.3 爆破振动特性分析

选取离爆心不同距离的测点1(351.98 m)、测点2(206.53 m)、测点3(265.61 m)、测点6(408.08 m)、测点7(311.02 m)进行分析,将各测点相关参数  $R$  和  $R/S$  分别代入式(10),利用 MATLAB 软件描绘函数图象,得到在相应地理条件和爆破方式下,段起爆最大药量增大时不同距离的测点振动速度的变化情况,如图3所示.测点距离爆心 200 m 以上,段起爆最大药量为 460 kg 时,各测点峰值振速均小于  $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,符合《国家爆破安全规程》(GB 6722—2014)允许的爆破振动控制标准.

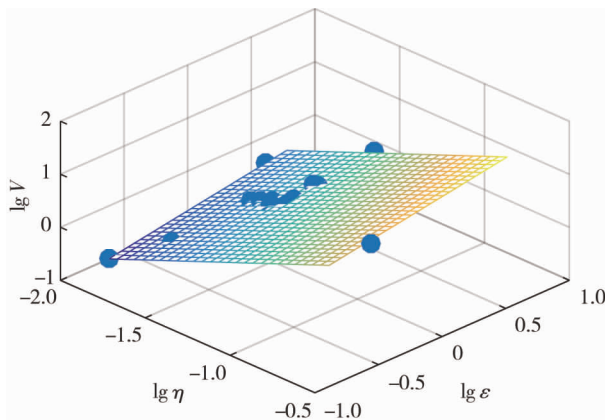


图2 考虑高程效应的多元线性回归拟合

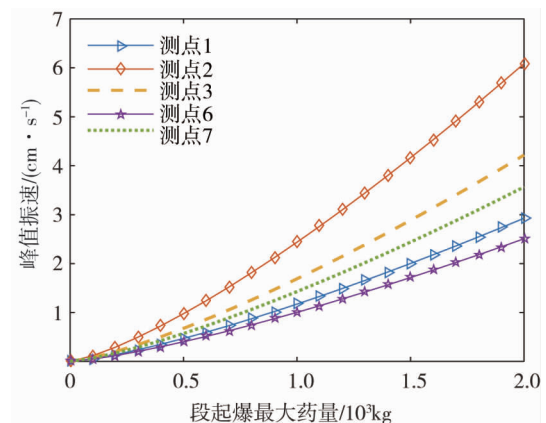


图3 不同距离测点的振动速度与段起爆最大药量关系

根据式(10)可以得出爆破振动的高程放大系数  $q$  为

$$q = \left(\frac{R}{S}\right)^{0.4027} \quad (11)$$

图4反映高程放大系数 $q$ 随 $R/S$ 的变化情况,图5反映高程放大系数的变化速率,当 $R/S$ 值较小时,高程放大系数随 $R/S$ 值的增大而增大,增加趋势由较快逐步变缓.即放大效应与测点相对于爆心的高程有关,爆破振动强度在相对高程上升到一定范围内呈加强趋势<sup>[12]</sup>.

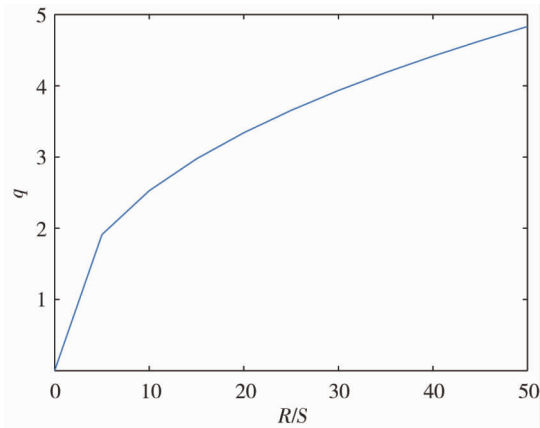


图4 高程放大系数变化趋势

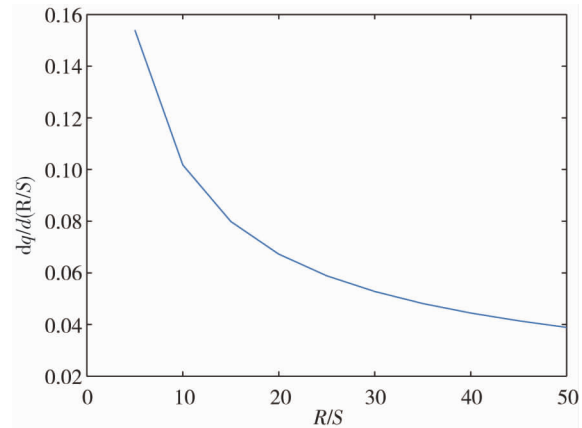


图5 高程放大系数变化速率

## 4 结论

1) 基于某矿山的爆破振动实测数据及 MATLAB 编程回归分析,得出该矿区质点最大振速的拟合公式为  $V = 112.25 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.30} \left(\frac{R}{S}\right)^{0.4027}$ , 该公式可用于分析各点应力及评估爆破振动灾害效应。

2) 在高陡边坡中,合理考虑高程放大效应可以获得拟合效果更理想的拟合公式和更准确的爆破振动特性,本文拟合公式相关系数为 0.942,拟合度极佳。

3) 高程效应与边坡的地形因素有关,高程放大系数与测点到爆心的直线测距与水平测距的比值存在非线性关系。

## 参考文献:

- [1] 范道林,郑祥,孙鹏昌,等.叶巴滩水电站岩石高边坡爆破振动控制研究[J].人民长江,2022,53(增刊1):81-84.
- [2] 安胜杰,易吉祥,池恩安,等.爆破地震波传播规律试验研究[J].爆破,2021,38(2):32-36.
- [3] 费鸿禄,苑俊华.基于强度折减法的边坡动力稳定性研究[J].爆破,2016,33(4):140-145.
- [4] 朱天星.露天矿山爆破安全评估要素分析[J].工程爆破,2019,25(2):86-90.
- [5] 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.
- [6] 林海松.高边坡爆破振动传播规律及其控制技术[J].工程爆破,2020,26(2):69-74.
- [7] 雷振,李卓,雷兴海,等.爆破振动作用下高层建筑振速变化规律研究[J].工程爆破,2022,28(2):7-14.
- [8] 全国安全生产标准技术委员会非煤矿山安全分技术委员会.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [9] 郭飞,侯克鹏.考虑高程放大效应的边坡动力稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):71-78.
- [10] 崔年生,危剑林,钟源,等.露天矿台阶爆破振动环境效应分析[J].内蒙古煤炭经济,2022(24):130-132.
- [11] 包松,郭连军,莫宏毅,等.考虑高程效应的露天边坡加权振级预测方法[J].矿业研究与开发,2022,42(2):115-118.
- [12] 杨如孜,张光权,司凯凯,等.考虑高程放大效应的爆破振速预测研究[J].工程爆破,2023,29(1):144-152.