

# 结构物爆破振动安全标准的探讨

庄金钊<sup>1</sup>, 杨仁树<sup>1</sup>, 李孝林<sup>2</sup>, 肖同社<sup>1</sup>, 侯敬峰<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京校区), 北京 100083; 2. 北京科技大学 北京 100083)

**摘要:**通过对露天矿和井下矿的爆破振动的测试分析,提出了比较全面、科学的爆破振动安全判据建议标准。评价结构物爆破振动安全性时不能只考虑质点振动峰值,还应包括爆破振动频率(结构固有频率和激励频率)。爆破振动安全指标应包括位移、速度或加速度等指标。

**关键词:** 爆破振动; 安全判据; 露天矿; 井下矿

## Discussion on Safety Criterion of Construction Blasting Vibration

ZHUANG Jin-zhao<sup>1</sup>, YANG Ren-shu<sup>1</sup>, LI Xiao-lin<sup>2</sup>, XIAO Tong-she<sup>1</sup>, HOU Jing-feng<sup>1</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Beijing Science and Technology University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on measurement and analysis of blasting vibration of surface mine and underground mine, all-round and scientific criteria of blasting safety are suggested. It is concluded that appraising the safety of construction blasting vibration include not only peak value of mass point, but also frequency of blasting vibration (natural frequency and driving frequency of construction). The safety criteria of blasting vibration consist of displacement, velocity and acceleration.

**Key words:** blasting vibration; safety criteria; surface mine; underground mine

描述爆破振动效应的参数较多,如振动速度、加速度、位移以及频率等,对于采用何种参数作为评判建筑物爆破振动安全标准,意见各不相同。以前人们普遍认为以振动速度为判据比较可靠稳定,但实践证明这是片面的。当前,国外评判标准的趋势已发展到不只以单一参数作为判据。如瑞典的评判标准综合考虑了振动速度、频率、位移和加速度等多项指标,美国矿务局、德国和芬兰引入振动速度和频率两个判据指标<sup>[1]</sup>。从物理意义上分析,振动速度可以代表振动幅值,幅值和频率是描述振动效应的最基本物理量。从振动响应方面分析,不同地基和结构物有不同的固有频率,考虑到共振反应,振动响应应包括频率参数。另外,对应于不同的频率范围,不同的结构物对爆破振动峰值(位移、速度和加速度)反应不同,因此,对于不同的结构物也应该用不同的峰值标准作为安全判据。

### 1 国内外对爆破振动评判标准的探讨

美国矿物局、瑞典和加拿大的研究发现<sup>[2]</sup>,在造成结构物实际损坏的情况中 97% 以上与 7.1 cm/s 或更高的地表振动速度有关。也有迹象表明地面振动速度为 13.7 cm/s 时,有 50% 的概率引起较小的破坏。结构物的允许振动速度主要取决于其本身的质量、结构

及场地的工程地质条件。由于问题的复杂性,针对不同的震源,有不同的标准。

目前,国内外表示质点振动强度的参量有位移、速度、加速度和频率。各国采用何种表示方法有所不同,主要有以加速度作为质点振动强度的参数<sup>[3]</sup>、以速度作为质点振动强度的参数<sup>[4]</sup>和以速度-频率作为振动强度的判据<sup>[1~2]</sup>。

我国爆破安全规程规定<sup>[5]</sup>,建筑物和构筑物的爆破安全性应满足以下安全速度要求:土窑洞、土坯房、毛石房为 1.0 cm/s;一般砖房、非抗震性的大型砌块建筑物为 2.0 ~ 3.0 cm/s;钢筋混凝土框架结构房屋为 5.0 cm/s;水工隧洞 10.0 cm/s;交通隧洞 15.0 cm/s。可以看到,我国的爆破振动安全判据采用的是单一指标,没有考虑不同结构物对不同频率地震波的振动响应存在差异,大量的工程实践已经表明该安全判据存在一定的局限性。

### 2 矿山爆破振动频响特性分析

露天矿与井下矿爆破的主要区别在:(1)起爆药量明显不同。露天矿山每次起爆药量大多在几十吨到上百吨,而井下矿山(无底柱采矿方法)只有几百公斤炸药;(2)传播途径不同。由于露天矿爆破药量大,

矿山办公楼及民用住宅离爆区都比较大,选择测试的地点也较远;井下矿山爆破地点大都在地下几百米,矿山办公楼及民房离爆区较近,而且传播介质主要是岩石和覆盖土层。

### 2.1 露天矿爆破振动的频响特性

本次测试地点距爆源较远,从爆破振动波形分析中发现,主频率都比较低(在4~10 Hz之间),与矿区办公楼及民用住宅楼的固有频率接近。图1所示典型的频谱图及响应谱(比例距离为64、最大一段药量6700 kg)。

由图1可见,露天矿爆破振动主频在5.5 Hz左右,与矿区建筑物固有频率接近。从文献[6]可知结构物的放大响应系数较大。

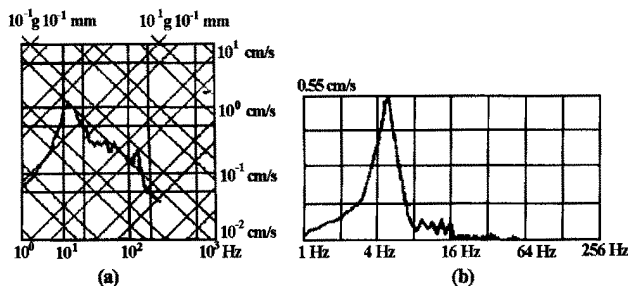


图1 典型露天矿爆破振动响应谱(a)及频谱(b)

### 2.2 井下矿的爆破振动频响特性

在金岭铁矿爆破振动测试中,分别对不同爆破地点、起爆药量等情况下的爆破振动进行了测试分析。图2是一次爆破的频谱和响应谱,爆破地点在-172 m水平,最大段药量178 kg,测试地点离爆破点的水平距离在100 m左右,测试建筑物为框架结构平房。

如图2所示,地面振动主频率在36 Hz左右。通过分析发现,测试房屋的自振频率在10~20 Hz之间,低于爆破振动的主频率。但墙体的自振频率在20 Hz左右,与爆破振动主频率接近。

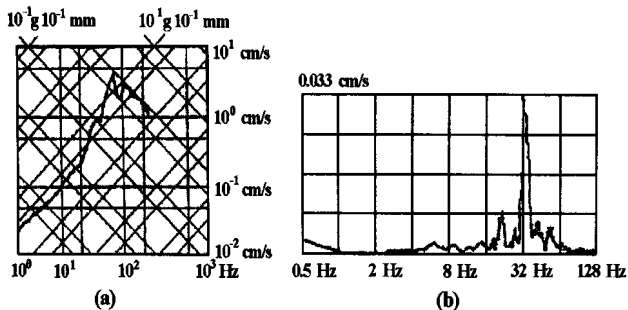


图2 井下矿爆破振动响应谱(a)及频谱(b)

## 3 响应谱及频率的重要性

对爆破振动响应谱的分析可知,结构物的固有频

率值远比EI Centro地震支配地面运动的频率值大或小时,其响应曲线各自集中在最大地面加速度和最大地面位移上(如图3)。将这一结果应用于对爆破振动响应具有高、低 $\beta$ 值的系统,用爆破振动的输入频率与结构系统的固有频率之比非常高或非常低的情况说明其响应曲线出现的集中现象。

### 3.1 响应谱界限

对于相对高的输入频率来说,结构的固有频率在地面运动(比如岩石上近距离爆破)响应谱的左边,如图3中曲线B。这种情况可以理想化为大质量系在软弹簧上,由于系统固有频率相对于输入运动较低(大 $\beta$ 值),系统的质量直至运动峰值通过后才起反应,在峰值运动冲击系统的瞬间,质量和地面之间的相对位移等于最大地面位移。这种情况可以看似为用手快速运动带有许多橡皮带的剪刀模型:剪刀总是不动。或者说,以高于结构固有频率的频率激励系统,使其产生小伸长或小应变<sup>[7]</sup>。

在响应谱的右边,如图3中曲线A,相对低的输入频率情况(小 $\beta$ 值),可以理想化为小质量系在硬弹簧上。由于在弹簧上只需要一个相对小的位移,传递的力就足以克服质量的惯性力,于是对于相对低的值来说,地面运动不能代替没有假设质量的弹簧。因此,相对位移随的减小而趋于0,质量与地面一起运动。

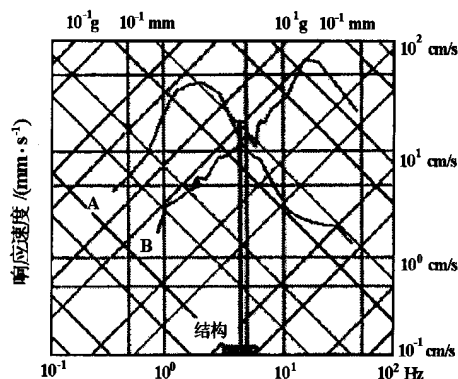


图3 输入频率对结构响应的影响

同样的解释,可用位移放大系数公式(1)来说明。

$$= 1 / \sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4 \zeta^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \quad (1)$$

式中 $\beta$ 为位移放大系数; $\zeta$ 为临界阻尼比。

在上式中,对于相对高的输入频率:大 $\beta$ 值, $\beta \rightarrow 0$ ,结构位移放大系数趋于0,即结构上部位移趋于0;而对于相对低的输入频率来说:小 $\beta$ 值, $\beta \rightarrow 1$ ,结构位移放大系数趋于1,即结构上部位移等于基础的位移。

因此说,同一结构对不同爆破振动响应的相对位移,随输入运动的支配频率(主频率)而变化。因为相对位移是造成破裂的主要原因,所以主频率将会影响

结构破裂的可能性。

对反应谱的分析发现,反应谱的高频段略平行于峰值输入加速度,响应谱的这个界限称为加速度界限,因为结构响应可以近似为某个放大系数与峰值地面加速度的乘积。同样的道理,反应谱的低频段略平行于峰值地面位移,响应谱的中间区域称为速度界限。因此,在高频段结构响应主要是爆破振动加速度,低频段主要是爆破振动位移,而中频段主要是爆破振动速度。

### 3.2 典型的结构频率与激励频率之比较

对激励频率和结构固有频率进行了比较,如图4所示。最左边是土中单段起爆产生的运动得到的响应谱,右边是近距离巷道爆破得到的响应谱,而中间的虚线表示在露天矿采场上一个典型的台阶爆破中,起爆单段药量91 kg、距离72 m远处实测的振动所计算的响应谱。

典型的结构基频用垂直实线表示,住宅结构固有频率为10 Hz,而无线电铁塔为4 Hz<sup>[8]</sup>。住宅上部结构和墙的频率范围由插图底边的阴影部分表示。

由图4可知,只要不是最罕见的爆破诱发的运动(核爆炸或土中爆破),激励频率与结构固有频率之比 $f/f_0$ 值始终是大的。换句话说,结构的固有频率常常回落在露天矿采场爆破的典型响应谱的位移界限上,而土中爆破将产生低频运动和 $f/f_0$ 的最小值。

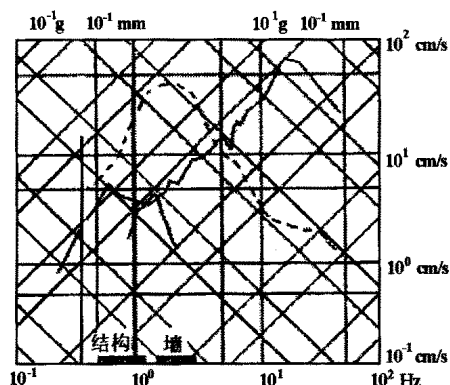


图4 固有频率和典型的响应谱

## 4 爆破振动安全评判标准的探讨

爆破振动的主频率范围一般在0.5~200 Hz。主频率的大小取决于地震波的传播介质,由于土壤的吸收系数比岩石大,高频的地震波在土壤中容易被吸收,所以在土壤中传播的距离比岩石中短。覆盖土层在对震波的吸收作用是由该介质的性质决定的。由于波导效应,地层能将某些频率的地震波传播的更远。在厚度大于2~3 m的土壤介质中,一般主频率为1~20 Hz,而在岩石介质中,地震波主频率一般为10~100 Hz。地下爆破引起的基础和地坪的振动远远小于地

面爆破,而且地下爆破引起的振动频率也较高,且主频带很窄,往往表现为单一频率的特征。

通过对实测数据分析发现,露天矿采场爆破由于其药量大、传播距离长等特点,振动主频率较低、频带较宽;而对于井下中深孔采场爆破来说,段药量小、传播介质为岩石-覆盖土层(井下爆破地面振动测量),距离较短,振动主频率较高、频带较窄。

通过爆破振动响应谱的分析发现,在激励频率和结构固有频率二者的变化范围内,对结构的爆破振动安全评价应分别以位移、速度和加速度为标准。

鉴于以上分析,对于爆破振动安全评价应考虑结构固有频率和激励频率的影响,建议: $f/f_0 < 1/4$ 时,采用位移和频率作为安全指标; $1/4 < f/f_0 < 3/2$ 时,采用速度和频率作为安全指标; $f/f_0 > 3/2$ 时,采用加速度和频率作为安全指标。结合实测数据并参考有关文献<sup>[8~11]</sup>,爆破振动安全判据建议如表1所示。

表1 爆破振动安全判据建议标准

建筑物分类	$f/f_0$	激励频率范围 / Hz	安全指标		
			位移 / mm	速度 / (mm s <sup>-1</sup> )	加速度 / (×9.8 m s <sup>-2</sup> )
陈旧危险建筑、历史性建筑	< 1/4	< 10	< 0.1		
		10 ~ 50	0.1 ~ 0.3		
		50 ~ 100	0.3 ~ 0.5		
	1/4 ~ 3/2	< 10		5	
		10 ~ 50		5 ~ 15	
		50 ~ 100		15 ~ 30	
土窑洞、毛石房屋	< 1/4	< 10	< 0.2		< 0.01
		10 ~ 50	0.2 ~ 0.5		0.01 ~ 0.05
		50 ~ 100	0.5 ~ 0.9		0.05 ~ 0.09
	1/4 ~ 3/2	< 10		8	
		10 ~ 50		8 ~ 20	
		50 ~ 100		20 ~ 30	
一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物	< 1/4	< 10			< 0.02
		10 ~ 50			0.02 ~ 0.05
		50 ~ 100			0.05 ~ 0.09
	1/4 ~ 3/2	< 10		15	
		10 ~ 50		15 ~ 30	
		50 ~ 100		30 ~ 50	
钢筋混凝土框架结构	< 1/4	< 10	< 0.5		< 0.05
		10 ~ 50	0.5 ~ 0.9		0.05 ~ 0.09
		50 ~ 100	0.9 ~ 1.0		0.09 ~ 0.1
	1/4 ~ 3/2	< 10		40	
		10 ~ 50		40 ~ 60	
		50 ~ 100		60 ~ 80	
> 3/2	> 3/2	< 10			< 0.1
		10 ~ 50			0.1 ~ 0.5
		50 ~ 100			0.5 ~ 0.9

(下转第17页)

表 1 经济比较汇总比较

序号	项 目	单位	方案	方案	方案	-	-	-
1	可比投资	万元	20 154. 20	16 089. 07	6 889. 73	4 065. 13	13 264. 47	9 199. 34
2	可比经营成本累计	万元	17 188. 87	17 049. 59	18 620. 07	139. 28	- 1 431. 20	- 1 570. 48
	含泥铝土矿运输费	万元	3 847. 48	4 535. 04	6 615. 79	- 687. 56	- 2 768. 31	- 2 080. 75
	洗后矿运输费	万元	2 860. 84	2 177. 00	334. 50	683. 84	2 526. 34	1 842. 50
	可比滤饼运输费	万元	568. 04	424. 67	719. 27	143. 37	- 151. 23	- 294. 60
	合格铝土矿运输费	万元	9 912. 51	9 912. 51	9 174. 57	0. 00	737. 94	737. 94
3	净现金流量累计	万元	37 343. 07	33 138. 66	25 509. 80	4 204. 41	11 833. 27	7 628. 86
4	净现值累计	万元	25 110. 30	22 929. 89	15 123. 76	2 180. 41	9 986. 54	7 806. 13
5	单位矿石累计净现金流量							
	以含泥铝土矿计	元/t	14. 70	13. 04	10. 04	1. 65	4. 66	3. 00
	以合格铝土矿计	元/t	35. 86	31. 83	24. 50	4. 04	11. 36	7. 33
6	单位矿石累计净现值							
	以含泥铝土矿计	元/t	9. 88	9. 03	5. 95	0. 86	3. 93	3. 07
	以合格铝土矿计	元/t	24. 12	22. 02	14. 52	2. 09	9. 59	7. 50

6 结 语

对于平面推进型矿山,扩大开采范围,延长洗矿厂的服务年限,能达到减少投入,充分利用资源的目的,本研究提供了扩大现有矿山开采范围的论证思路,具

有实际应用价值。

参 考 文 献

[1] 广西冶金勘探公司二 七队. 那豆矿区勘探总结报告, 1978  
[2] 长沙有色冶金设计研究院. 延长平果铝土矿一期服务年限, 2001  
[3] 广西冶金勘探公司二 七队. 那豆矿区补充勘探总结报告, 1983

(上接第 13 页)

5 结 语

通过对实测数据的分析,认为影响结构物爆破振动安全的不仅仅是质点振动峰值,而且与爆破振动频率有很大关系,包括结构固有频率和激励频率两方面。工程实践已经证明,我国目前使用的爆破振动安全判据并不完善,应充分考虑爆破振动频率的影响;对应于不同的结构固有频率与激励频率之比 / 值,爆破振动安全指标应包括位移、速度或加速度等指标。

参 考 文 献

[1] 于双久. 工程爆破地震安全问题. 工程爆破, 1995 (3) : 15 ~ 18  
[2] 黄吉顺,等. 爆破振动工程特性及安全技术措施. 见:工程爆破文集第六辑. 深圳:海天出版社, 1997. 747 ~ 751

[3] 焦永斌. 爆破地震安全评定标准初探. 爆破, 1995 (3) : 45 ~ 47  
[4] Richart F Jr, Hall J Jr, Woods R. Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, N J, 1970. 89  
[5] GB6722 - 86 爆破安全规程  
[6] 李孝林. 建(构)物对爆破振动响应的研究:[博士学位论文]. 北京:中国矿业大学, 2001  
[7] 王德胜. 爆破振动安全的研究. 有色金属(矿山部分), 1995 (3) : 47 ~ 49  
[8] Control of Construction Vibrations with an Autonomous Crack Comparometer. Proceedings World Conference on Explosives and Blasting Technique. European Federation of Explosives Engineers, Munich, 2000 : 158 ~ 162  
[9] Schwenzfeier A. 环境振动效应. 藏克勇 译. 隧道译丛, 1988 (11) : 5 ~ 11  
[10] 王 凯, 吴滕芳, 季茂荣. 微差爆破地震反应谱理论的研究. 爆破, 1997 (4) : 1 ~ 6  
[11] 张鸿儒,等. 土-建筑物对地震激励的随机响应. 交通运输系统工程理论与应用国际会议, 1996. 95 ~ 99