

预裂爆破震动效应试验研究

唐海^{1,2}, 李海波², 周青春², 夏祥², 刘博², 李俊如²

(1. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为研究预裂爆破震动效应, 在山东石岛湾核电站基坑进行多次爆破和声波测试试验, 得到场地爆破震动衰减规律和爆孔下卧基岩的损伤范围。试验结果表明, 岩性相同时, 基岩损伤深度随最大段药量的增加而线性增加, 随质点峰值震动速度增加而呈指数增加; 离爆源越近, 岩体受损程度越大; 预裂爆破对爆孔上部岩体影响较大。同时, 在试验的基础上, 建立距爆源 30 m 处质点峰值震动速度与对应爆破影响下卧基岩深度的函数关系, 进而确定以质点峰值震动速度为参考指标的预裂爆破安全控制标准, 并在基坑边坡爆破中验证该控制标准的有效性。

关键词: 爆炸力学; 预裂爆破; 震动效应; 声波; 岩体损伤; 试验研究

中图分类号: O 38

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)11 - 2277 - 08

EXPERIMENTAL STUDY OF VIBRATION EFFECT OF PRESPLIT BLASTING

TANG Hai^{1,2}, LI Haibo², ZHOU Qingchun², XIA Xiang², LIU Bo², LI Junru²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In order to study the vibration effect of presplit blasting, blasting vibration and sound wave tests are conducted in the foundation pit of Shidao Bay Nuclear Power Station in Shandong Province, China. Based on the change rate of sound wave velocity before and after blasting, damage depth of bedrock is determined. The attenuation law of site blasting vibration is obtained through in-situ test. The test results indicate that, under the same lithology the bedrock damage depth increases linearly with maximum charge weight per delay interval, and increases exponentially with the increase in peak particle vibration velocity. The degree of rock mass damage increases with the reduction in distance from explosion source. Presplit blasting mainly affects the upper part of rock mass. Furthermore, based on field test, the relationship between damage depth of bedrock caused by blasting and peak particle vibration velocity of rock mass 30 m away from explosion source is established; and peak particle vibration velocity is adopted as the reference parameter to be the safety control standard of presplit blasting excavation. It is shown that the controlling method effectively ensures safety of rock mass under presplit blasting excavation in foundation pit slope.

Key words: mechanics of explosion; presplit blasting; vibration effect; sound wave; rock mass damage; experimental study

收稿日期: 2010 - 04 - 26; **修回日期:** 2010 - 07 - 05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50439030); 国家自然科学基金资助项目(50974059); 湖南省教育厅资助项目(08c325)

作者简介: 唐海(1970 -), 男, 博士, 2007年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事采矿和岩石力学方面的教学与研究。E-mail: tanghai707298@163.com

1 引言

一方面,在主爆孔起爆前,预裂爆破通过在主爆区和保护区之间形成一条具有一定宽度和深度的预裂缝,以阻断后续主爆孔爆破所产生的爆炸应力波向预留岩体传播,从而减少和阻隔爆破震动对保护区岩体的破坏;另一方面,主爆区伸向保护区的裂缝,在预裂缝处被切断,这样能维持保护区岩体的完整性。因此,预裂爆破以其较好的减震和阻隔作用得到广泛的应用^[1~6]。为弄清预裂爆破成缝、减震机制,建立岩体分析模型,R. Badal 等^[7~15]进行了很多研究。邹奕芳^[9]通过现场研究了预裂爆破减震效果,发现当有预裂缝存在时,离预裂缝的部位越近,减震效果显著;当爆心距增大时,隔震效果降低。张喆和王幸荣^[10]用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了预裂缝宽度对减震效应影响,研究结果表明:在一定范围内(即在 $r \leq r_0$, r_0 为定值),减震效果随着预裂缝缝宽的增加而增加,当缝宽 $r \geq r_0$ 时,缝宽对预裂缝减震效果的影响减弱。蔡路军和马建军^[11]认为增加预裂缝的长度和深度可更有效的减震。税承慧^[12]认为,预裂爆破的成功与否很大程度上取决于预裂孔的参数选择、装药量和装药结构。钱叶甫等^[13, 14]从预裂爆破不耦合装药进行分析,得出相邻炮孔贯穿裂缝的产生与发展,爆生气体的准静压力作用是形成最终裂缝的主要因素。钱叶甫^[13]、钟冬望和李寿贵^[15]分别运用断裂力学和 DYNA 程序研究预裂缝扩展,均得出预裂爆破裂缝首先从孔壁开始产生,并沿炮孔连心线扩展。但由于预裂爆破通常只有单自由面而受到夹制作用较大,导致预裂爆破本身产生震动较大,从而对保护区的岩体造成损伤。杨溢等^[16]运用灰色系统理论对一矿山预裂爆破的震动效应进行了多因素灰色关联分析,得出药量是影响预裂爆破震动效应的最大因素。谢永生等^[1, 17, 18]采用分节分段起爆预裂炮孔,通过控制预裂爆破药量来降低震动。卢文波^[19]认为,预裂爆破对保护区岩体损伤主要取决于炮孔内爆生气体压力随时间变化的历程曲线。杨年华^[20]用跨孔法超声波检测试验炮孔,发现预裂爆破比普通小孔径松动爆破对边坡内部岩体的损伤程度小。

基于以上分析可知,预裂爆破能减少和阻隔后续主爆破对保护区岩体的影响,但对预裂爆破本身引起的震动效应研究较少。目前对预裂爆破震动效应研究主要集中在初步理论分析和少量试验上,对

预裂爆破本身造成保护区的损伤和评价标准缺少系统的研究。结合山东石岛湾核电站基坑预裂爆破实例,研究了预裂爆破震动效应及震动造成保护区岩体损伤评价标准,为进一步研究预裂爆破震动效应提供思路。

2 预裂爆破损伤范围确定方法

2.1 钻孔声波法

在工程实践中,通常采用电力部门规定的钻孔声波观察法,判断爆破对保护岩体的影响。规范^[21]采用同部位的爆后波速(C_{P2})与爆前波速(C_{P1})的变化率(η)来判断爆破对岩体的影响程度,其变化率为

$$\eta = 1 - C_{P2} / C_{P1} \quad (1)$$

当 $\eta \leq 10\%$ 时,爆破对岩体无影响或影响甚微;当 $10\% < \eta \leq 15\%$ 时,爆破对岩体影响轻微;当 $\eta > 15\%$ 时,爆破对岩体有影响。

检验预裂爆破对保护区岩体影响时,需要剥离爆区的岩体,但岩体开挖伴随着岩体卸荷,此时,用钻孔声波法确定爆破对岩体损伤范围中,还包含了岩体因卸荷而引起的松弛影响^[22]。因此,采用钻孔声波法检测预裂爆破对岩体损伤时,应在剥离爆区的岩体之前进行。

2.2 质点峰值震动速度法

在爆破工程界,目前多采用质点峰值震动速度来判断爆破对岩体损伤,质点峰值震动速度判据的理论依据是一维应力波理论^[23]:

$$PPV = C_p [\varepsilon] \quad (2)$$

式中: PPV 为质点峰值震动速度, C_p 为岩体纵波速度, $[\varepsilon]$ 为岩体极限拉应变。

如已知预裂爆破所引起岩体质点震动速度,采用质点峰值震动速度判据能预测岩体损伤范围。卢文波等^[19, 22~27]研究了质点峰值震动速度与岩体损伤的对应关系。用质点峰值震动速度法预测爆破震动效应,必须要知道岩体质点震动速度,这样很难预测爆破震动对爆孔下卧基岩影响。

Y. Q. Zhang 等^[28, 29]认为,在爆破荷载作用下:爆孔以下损伤区的深度小于损伤区的半径,且损伤区半径与损伤区深度的比例约为 3:1。因此,在预裂爆破中只须控制爆孔下卧基岩损伤深度即可。

为克服钻孔声波法和质点峰值震动速度法检测

岩体损伤的缺陷, 并参照夏 祥^[30]的研究, 在预裂爆破后, 采用钻孔声波法检测爆孔下卧基岩损伤范围, 并取距爆源 30 m 质点峰值震动速度, 建立质点峰值震动速度与对应爆破影响下卧基岩深度的函数关系, 进而确定以速度为参考指标的预裂爆破安全控制标准。

3 工程概况及现场试验概述

山东石岛湾核电厂高温气冷堆核电示范工程厂址位于山东省威海市荣城市南偏东约 22 km 的宁津镇东南滨海的开阔地, 濒临黄海。厂区地层岩性主要由粉质黏土、花岗片麻岩、斜长角闪岩和闪长玢岩。其中, 核岛区地表多为残积土, 下伏基岩以花岗片麻岩为主, 斜长角闪岩和闪长玢岩呈脉岩状分布, 其物理力学参数见表 1。当开挖到设计场坪标高时, 岩体以全风化~强风化花岗片麻岩为主, 核岛区其余地段均为中等~微风化花岗岩, 对核岛区土石方主要采取爆破开挖方式。

试验地点分别选在核岛基坑和核岛基坑边坡处, 试验内容均分为爆破震动测试和声波测试两部分。在核岛基坑试验时: 爆破震动测试是布置 3~4 个速度监测点(测点与爆源中心大致在一直线上, 每个测点分别布置垂直向和水平向 2 个速度传感器, 其中一个测点布置在距爆源 30 m 处的基岩上), 结

合基坑施工爆破, 求出场地爆破震动衰减规律; 声波测试是通过对比爆破前后预裂炮孔声波速度变化, 求出爆破对下卧基岩损伤深度。测点布置见图 1。在基坑试验的目的是为了求出爆破对下卧基岩损伤深度在允许范围的爆破震动安全阈值。在核岛基坑边坡试验时, 爆破震动测试是在距爆源 30 m 处基岩面上布置一个测点控制震动速度, 研究爆破震动对下卧基岩的影响; 声波测试是通过对比预裂爆孔后方声波孔在爆破前后速度变化, 求预裂爆破对保护岩体损伤范围。在核岛基坑边坡试验目的是检验基坑试验成果的可靠性。

在基坑试验中, 炸药为 2# 岩石乳化炸药, 孔径均为 89 mm, 施工区爆破参数为: 炮孔深度为 6 m, 孔距为 3.5 m, 排距为 3 m, 装药结构为耦合装药。预裂孔爆破参数为: 孔深为 8 m, 孔距 0.8 m, 距第一排主爆孔距离为 3.5 m, 线装药量为 $q = 0.28 \text{ kg/m}$, 底部 1 m 加强装药为 $2q$, 堵塞长度为 2 m, 装药结构为不耦合装药, 药卷直径为 32 mm。预裂炮孔超前主爆孔 110 μs 同时起爆, 齐次起爆药量大于主爆孔的最大段药量。

声波试验为单孔法, 采用孔内一发双收探头, 声波仪采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RSM-SY5 型声波仪。选靠近测线的 4 个预裂炮孔兼做声波孔, 比设计深度超深约 2 m(见图 1)。爆破前进行声波试验, 每间隔 20 cm 进行声波测试得到

表 1 核岛地基岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical properties of rock mass in foundation of Shidao Bay Nuclear Power Station

岩性	风化程度	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动弹性模量 E_d / GPa	动剪切模量 G_d / GPa	泊松比 μ	抗压强度 σ_c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / MPa	纵波波速 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	剪切波波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	阻尼比 $\beta / \%$
花岗片麻岩	中风化	2 580	14.08	5.33	0.32	25.30	30	12	2 656	1 432	6.00
	微风化	2 630	50.32	19.96	0.26	129.21	55	21	4 828	2 739	1.47
斜长角闪岩	中风化	2 470	44.57	5.55	0.32	10.00	40	13	2 651	1 376	2.88
	微风化	2 870	53.41	24.45	0.26	63.44	55	23	4 776	2 707	3.23

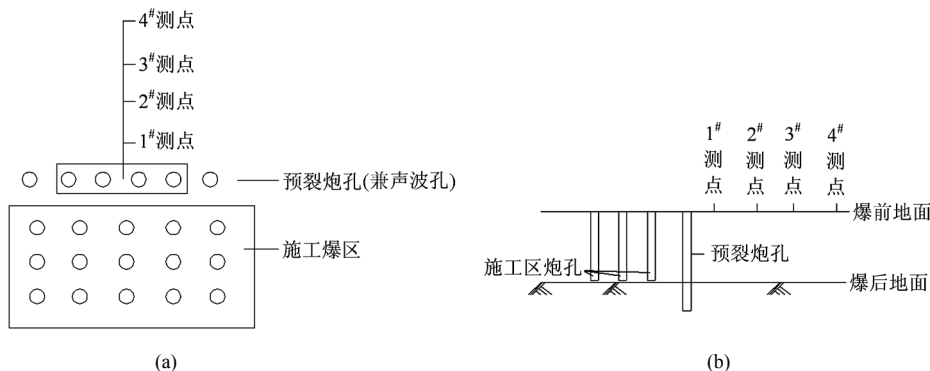


图 1 测点布置示意图

Fig.1 Layout of monitoring points

基岩爆前声波波速值 $V_{前}$ 。然后，将声波孔孔底超深部分用细沙填塞至装药设计标高，装填炸药实施爆破。爆后清渣完毕清除声波孔孔底填塞物，进行爆后声波试验，得到相应爆后各测点基岩声波波速值 $V_{后}$ 。当基岩的爆前与爆后声波变化率 $\eta \leq 10\%$ ，认为预裂爆破对下卧基岩无影响。

4 试验结果及分析

4.1 场地爆破震动衰减分析

表 2 给出了峰值震动速度试验结果(表中： $V_{垂直}$ 为质点垂直向峰值震动速度， $V_{水平}$ 为质点水平向峰值震动速度)。

表 2 峰值震动速度试验结果

Table 2 Test results of peak velocity of blasting vibration tests

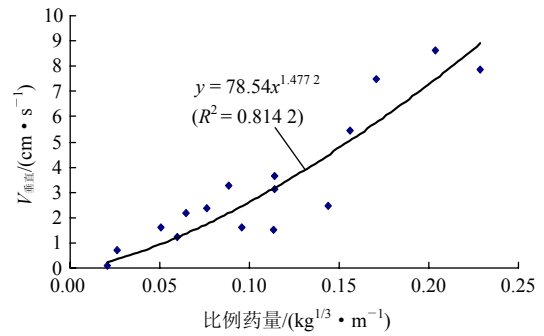
放炮编号	测点编号	最大段药量 Q/kg	爆源距 R/m	峰值震动速度/($cm \cdot s^{-1}$)	
				$V_{垂直}$	$V_{水平}$
1	1	28	30	3.11	3.190
	2	28	53	2.17	1.550
	3	28	130	0.69	0.400
2	1	40	20	7.48	7.410
	2	40	30	3.65	3.390
	3	40	57	1.25	1.060
3	1	80	38	1.51	3.100
	2	80	30	2.46	4.450
	3	80	45	1.61	2.260
4	1	103	23	8.62	6.720
	2	103	30	5.44	4.010
	3	103	53	3.26	0.902
5	1	12	10	7.88	6.820
	2	12	30	2.38	1.790
	3	12	45	1.62	1.460
	4	12	110	0.09	0.091

试验场地地形平坦，可按常用的萨氏公式^[31]进行回归分析。由表 2 实测数据结果，可回归出现场爆破震动衰减规律(见图 2)。

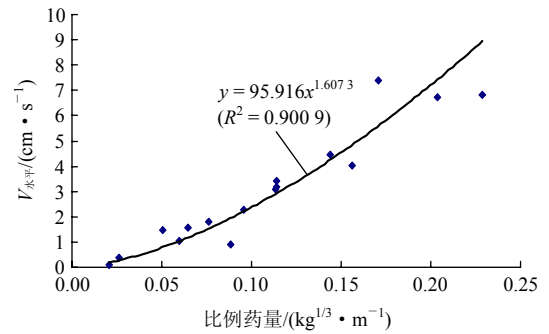
由图 2 可得出震动速度衰减公式为

$$V_{垂直} = 78.54 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.4772} \quad (R^2 = 0.8142) \quad (3)$$

$$V_{水平} = 95.916 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.6073} \quad (R^2 = 0.9009) \quad (4)$$



(a) 垂直向



(b) 水平向

图 2 比例药量与峰值震动速度的衰减规律

Fig.2 Attenuation laws of ratio charge and peak vibration velocity

式(3), (4)可作为以后爆破设计参考，但考虑爆破震动响应受岩性、地质地形、地貌、装药结构等诸多因素的影响，实测值与依照公式得出的计算值有一定的偏差，因此，尽可能进行多次爆破试验，得出较准确的爆破场地震动衰减规律。

4.2 场地声波结果分析

表 3 给出了声波试验结果，表中的损伤深度为试验区每组 4 个炮孔下卧基岩的影响深度均值。

表 3 声波试验结果

Table 3 Results of sound wave tests

试验编号	最大段药量 /kg	损伤深度 /m	30 m 处质点峰值震动速度/($cm \cdot s^{-1}$)
1	28	0.31	3.19
2	40	0.41	3.65
3	80	0.62	4.45
4	103	0.78	5.44
5	12	0.22	2.38

根据表 3 的数据，可以得到炮孔下基岩的损伤深度与最大段药量、30 m 处质点峰值震动速度之间关系(见图 3, 4)。

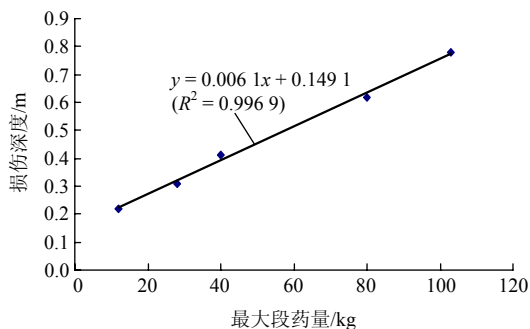


图 3 损伤深度与最大段药量的关系

Fig.3 Relationship between damage depth and the maximum charge weight per delay interval

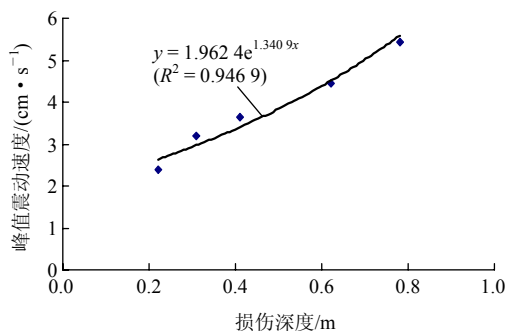


图 4 损伤深度与 30 m 处质点峰值震动速度关系

Fig.4 Relationship between damage depth and peak particle vibration velocity at depth of 30 m

从图 3, 4 可看出, 基岩损伤深度随最大段药量的增加而线性增加, 随质点峰值震动速度增加而呈指数增加, 这与夏祥等^[30, 32]的研究有相似的结论。从图 4 还可得出损伤深度与 30 m 处质点峰值震动速度具有如下关系式:

$$V_{30m} = 1.9624e^{1.3409h} \quad (R^2 = 0.9469) \quad (5)$$

式中: V_{30m} 为 30 m 处质点峰值震动速度(cm/s), h 为炮孔下基岩的损伤深度(m)。

4.3 基坑边坡预裂爆破分析

如图 5 所示, 在基坑边坡布置 4 排炮眼: 从临

空面往里, 依次为 2 排主爆孔, 1 排缓冲孔, 1 排预裂孔。炸药为 2[#]岩石乳化炸药, 孔径均为 89 mm, 施工区爆破参数为: 总装药量为 930 kg, 最大单响药量 55 kg, 其中主爆孔的孔深 5~14 m, 孔距 3.5 m, 排距 3 m, 堵塞长度为 2.5~4 m, 单耗 0.32 kg/m³, 装药结构为耦合装药; 缓冲孔距主爆孔 3 m, 孔深 14 m, 孔距 3 m, 堵塞长度为 4 m, 单耗 0.30 kg/m³, 装药结构为不耦合装药, 药卷直径 70 mm。预裂孔的爆破参数为: 距缓冲孔 2 m, 孔深 14.6 m, 孔距 0.8 m, 角度 79°, 线装药量为 $q = 0.28$ kg/m, 底部 1.5 m 加强装药为 $2q$, 中部 8 m 正常装药, 上部 2.9 m 减弱装药为 $0.5q$, 堵塞长度为 2.2 m, 装药结构为不耦合装药, 药卷直径为 32 mm。预裂炮孔超前主爆孔 110 μ s 同时起爆, 药量为 209.16 kg。

距预裂孔 1 m 布置 4 个声波孔, 排距 1 m, 间距 3 m, 1[#], 3[#]孔深均为 15 m, 2[#], 4[#]孔深均为 6 m, 声波孔角度为 79°。同时在距爆源中心 30 m, 布置一个监测点(垂直向和水平向各 1 个速度传感器), 见图 5 所示。

核电厂要求在核岛基坑边坡爆破对下卧基岩的影响不超过 1 m, 即 $h < 1$, 按式(5)计算可得安全阈值 $V_{30m} = 7.5$ cm/s, 即距爆源 30 m 处质点峰值震动速度不超过 7.5 cm/s。该次预裂爆破, 最大段药量为 209.16 kg, 按式(3), (4)可预测: $V_{30m} = \max(V_{垂直}, V_{水平}) = \max(7.2, 7.1) = 7.2$ cm/s < 7.5 cm/s。因此, 预裂爆破一次起爆 209.16 kg 药量对下卧基岩的影响不会超过 1 m。

爆后, 现场监测点的峰值震动速度为 6.8 cm/s, 低于预测值 7.2 cm/s。测声波孔爆后波速时, 由于往孔内注水压力大, 速度过快, 引起 1[#]孔声波部分堵塞, 各孔的测试结果如图 6 所示。

由图 6 可知: 1[#], 3[#]孔的声波变化率 η 较 2[#], 4[#]孔大, 表明离爆源越近, 岩体受损程度越大; 各

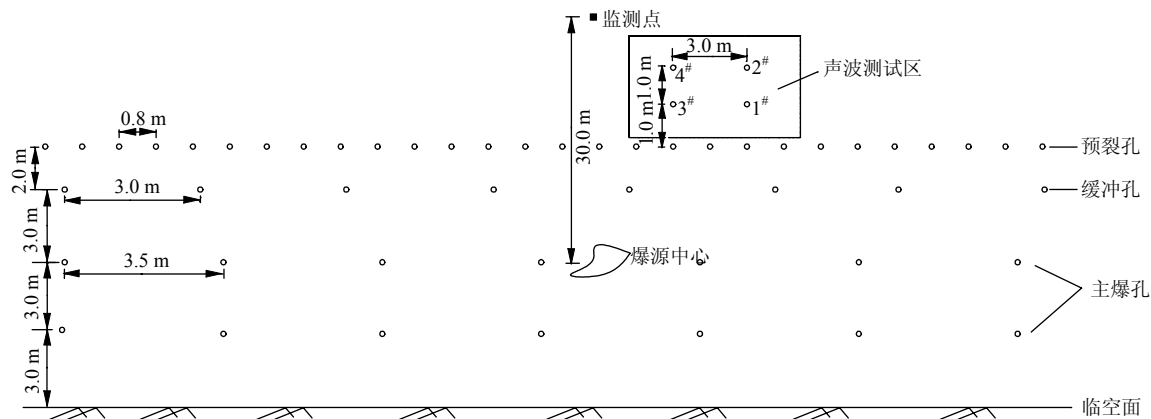


图 5 炮孔及测点布置示意图

Fig.5 Layout of blast holes and monitoring points

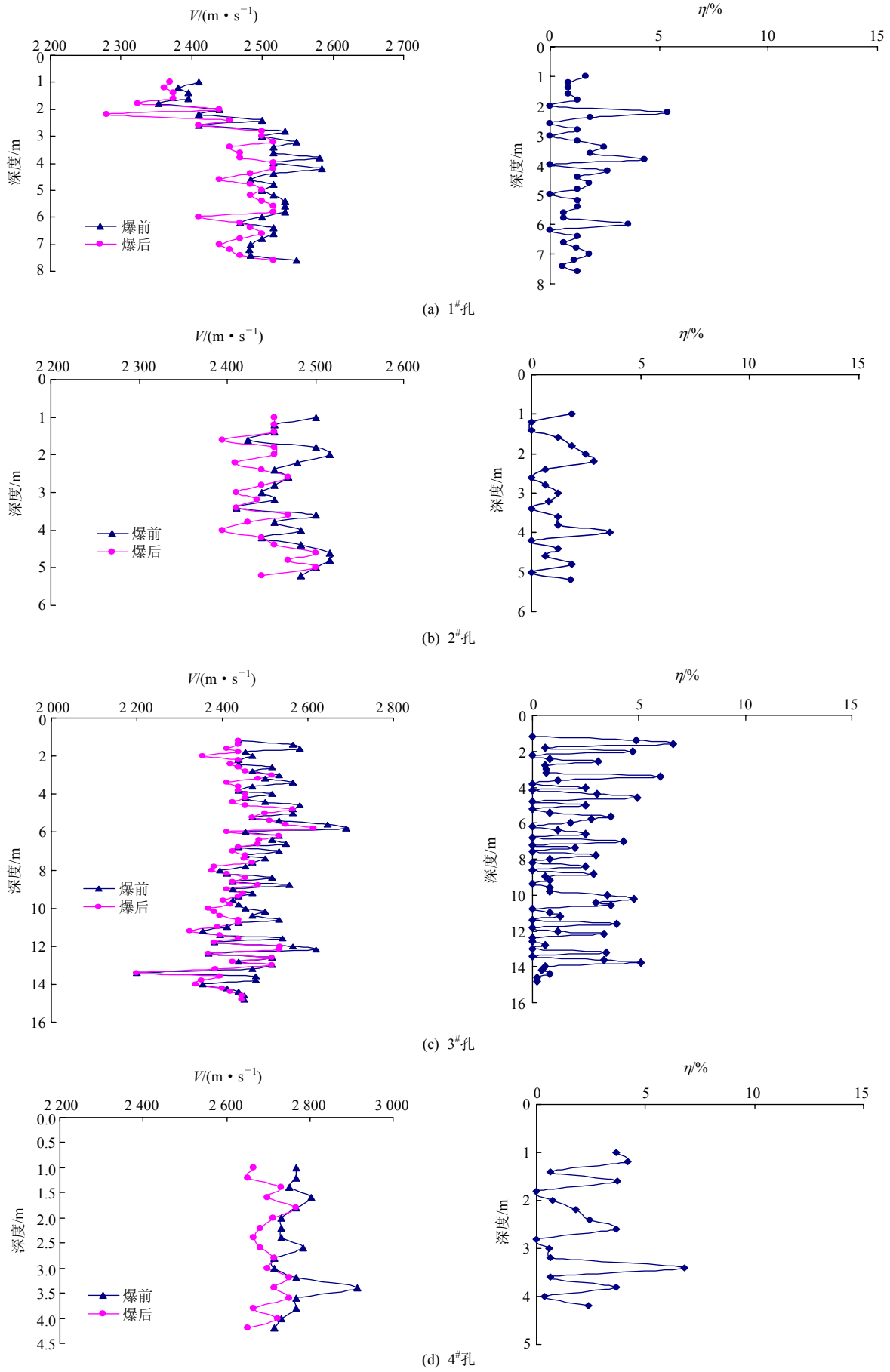


图 6 各孔声波波速、声波变化率与深度的关系

Fig.6 Relationships of sound wave velocity and its rate with depth of various holes

孔 η 随孔深的增加,总体趋向是先增加后减小直至稳定,且 η 最大值在孔深1.6~3.4 m处,表明预裂爆破对爆孔上部岩体影响较大;各孔声波变化率最大的仅是7%,均小于10%,表明预裂爆破震动对保留岩体几乎无影响。另外,3[#]孔14~15 m处声波波速几乎无变化,表明预裂爆孔孔底损伤半径小于1 m,按照Y. Q. Zhang等^[28, 29]中爆孔以下损伤区的深度小于损伤区的半径的观点,可得知预裂爆破对下卧基岩的影响不超过1 m。

图7为基坑边坡预裂爆破开挖成型图,可以看出,半壁残孔率高,壁面整洁、光滑。



(a) 正面

(b) 侧面

图7 基坑边坡预裂爆破开挖成型图

Fig.7 Graphs of foundation pit slope by presplit blasting excavation

5 结论

为研究预裂爆破对岩体震动效应,在山东石岛湾核电站进行了多次爆破和声波试验,得到了以下几点结论:

(1) 通过爆破试验,得到了场地预裂爆破震动衰减规律(见式(3), (4))。爆破震动响应通常受岩性、地质地形、地貌、装药结构等诸多因素的影响,在基坑边坡监测点的实测值与依照公式得出的计算值有一定的偏差,因此,尽可能进行多次爆破试验,得出较准确的预裂爆破场地震动衰减规律。

(2) 通过声波测试,得到了岩性相同时基岩损伤深度随预裂爆破最大段药量的增加而线性增加,随质点峰值震动速度增加而呈指数增加,并回归现场实测数据得出了预裂爆孔下卧基岩的岩体损伤深度与30 m处质点峰值震动速度关系。

(3) 结合基坑边坡试验,验证了在基坑试验中获得的场地爆破震动衰减规律及预裂爆破对岩体震动损伤规律。同时还发现:离爆源越近,岩体受损越大;预裂爆破对爆孔上部岩体的影响较大。

(4) 建立以30 m处质点峰值震动速度为参考指标的预裂爆破安全控制标准不仅是可行的,而且还可以获得较好岩壁成型。

参考文献(References):

- [1] 谢永生. 预裂爆破技术在边坡保护中的应用[J]. 冶金矿山设计与建设, 1999, 31(5): 20 - 22.(XIE Yongsheng. Application of pre-split blasting technique in slope protection[J]. Metal Mine Design and Construction, 1999, 31(5): 20 - 22.(in Chinese))
- [2] 张树堂, 李茂林, 傅盛国, 等. 大连三道沟山体预裂爆破降震效果[J]. 东北地震研究, 1997, 13(1): 59 - 63.(ZHANG Shutang, LI Maolin, FU Shengguo, et al. Shocking reduction by pre-split demolition of Sandaogou hill body[J]. Seismological Research of Northeast China, 1997, 13(1): 59 - 63.(in Chinese))
- [3] 张志呈, 肖正学, 张渝疆, 等. 工程爆破地震波的裂隙效应[J]. 西南科技大学学报, 2004, 19(3): 57 - 60.(ZHANG Zhicheng, XIAO Zhengxue, ZHANG Yujiang, et al. The crack effect of the earthquake wave from the engineering blasting[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2004, 19(3): 57 - 60.(in Chinese))
- [4] 卢文川, 庄世勇, 高洪亮. 爆破震动危害的控制[J]. 矿业工程, 2004, 2(3): 35 - 37.(LU Wenchuan, ZHUANG Shiyong, GAO Hongliang. Reducing of damage caused by blasting activities[J]. Mining Engineering, 2004, 2(3): 35 - 37.(in Chinese))
- [5] 王玉杰, 梁开水, 田新邦. 周宁水电站地下厂房开挖爆破地震波衰减规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4 111 - 4 114.(WANG Yujie, LIANG Kaishui, TIAN Xinbang. Study on attenuation regulation of underground digging blasting vibration of Zhouning hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4 111 - 4 114.(in Chinese))
- [6] 戴会超, 朱红兵, 严鹏. 三峡船闸综合控制爆破技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4 426 - 4 431.(DAI Huichao, ZHU Hongbing, YAN Peng. Comprehensive controlled blasting technique for TGP shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4 426 - 4 431.(in Chinese))
- [7] BADAL R. Controlled blasting in jointed rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1994, 31(1): 79 - 84.
- [8] SOEJIMA M. Analysis of the influence of crack in coke on the fracture[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 2001, 87(5): 245 - 251.
- [9] 邹奕芳. 预裂缝和减震槽减震效果的爆破试验研究[J]. 爆破, 2005, 22(2): 96 - 99.(ZOU Yifang. Experimental study on the vibration-isolating effect of pre-split crack and vibration-isolating slot[J]. Blasting, 2005, 22(2): 96 - 99.(in Chinese))
- [10] 张喆, 王幸荣. 预裂缝宽度对减振效果影响规律的数值分析[J]. 爆破, 2006, 23(3): 22 - 24.(ZHANG Zhe, WANG Xingrong. Numerical simulation analysis of the effect of pre-splitting crack width on damping vibration[J]. Blasting, 2006, 23(3): 22 - 24.(in Chinese))
- [11] 蔡路军, 马建军. 预裂爆破减震机制及效果分析[J]. 中国矿业, 2005, 14(5): 56 - 58, 62.(CAI Lujun, MA Jianjun. The shock absorption

- mechanism and its effect analysis of pre-splitting blasting[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(5): 56 - 58, 62.(in Chinese))
- [12] 税承慧. 边坡预裂爆破中的减震措施[J]. 采矿技术, 2003, 3(1): 58 - 60.(SHUI Chenghui. Shock absorption measures of pre-splitting blasting in slope[J]. Mining Technology, 2003, 3(1): 58 - 60.(in Chinese))
- [13] 钱叶甫. 光面、预裂爆破成缝原理[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1994, 17(1): 126 - 130.(QIAN Yefu. The mechanism of smooth and pre-cracking blasting[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 1994, 17(1): 126 - 130.(in Chinese))
- [14] 刘柳明, 朱传云, 李伟, 等. 预裂爆破轴向不耦合系数的分析计算[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2002, 36(1): 47 - 49.(LIU Liuming, ZHU Chuanyun, LI Wei, et al. Analysis and calculation in theory of axial decoupling coefficient[J]. Journal of Huazhong Normal University(Natural Science), 2002, 36(1): 47 - 49.(in Chinese))
- [15] 钟冬望, 李寿贵. 预裂爆破数值模拟及其应用研究[J]. 爆破, 2001, 18(3): 8 - 11.(ZHONG Dongwang, LI Shougui. An application study on numerical simulation pre-splitting blasting[J]. Blasting, 2001, 18(3): 8 - 11.(in Chinese))
- [16] 杨溢, 张智宇, 庙延钢, 等. 灰色关联分析在预裂爆破震动分析中的应用[J]. 云南冶金, 2001, 30(5): 1 - 3.(YANG Yi, ZHANG Zhiyu, MIAO Yangang, et al. Application of gray association analysis for analyzing vibration in pre-splitting blasting[J]. Yunnan Metallurgy, 2001, 30(5): 1 - 3.(in Chinese))
- [17] 李彬峰. 爆破地震效应及其控制措施分析[J]. 爆破, 2003, 20(2): 83 - 85.(Li Binfeng. Analysis of controlling measurement and blasting vibration effect[J]. Blasting, 2003, 20(2): 83 - 85.(in Chinese))
- [18] 张新民, 舒大强. 预裂爆破震动规律的试验研究[J]. 爆破, 2001, 18(3): 18 - 20.(ZHANG Xinmin, SHU Daqiang. Experimental study on vibration law of pre-splitting blasting[J]. Blasting, 2001, 18(3): 18 - 20.(in Chinese))
- [19] 卢文波. 三峡工程临时船闸与升船机开挖中的爆破方案优化和爆破振动控制[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(LU Wenbo. Optimization of blasting procedure and vibration control during excavation of temporary ship lock and ship lift in Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [20] 杨年华. 预裂爆破对边坡岩体损伤的试验研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(3): 96 - 99.(YANG Nianhua. Experimental study on rock damage in the slope caused by presplit blasting[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(3): 96 - 99.(in Chinese))
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5389 - 2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5389 - 2007 Construction technical specifications on rock foundation excavating engineering of hydraulic structures[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.(in Chinese))
- [22] 卢文波, 赖世骧, 朱传云, 等. 三峡工程岩石基础开挖爆破震动控制安全标准[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 67 - 71.(LU Wenbo, LAI Shixiang, ZHU Chuanyun, et al. Safety standards of blast vibrations adopted in rock base excavation of Three Gorges Project[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 67 - 71.(in Chinese))
- [23] 熊海华, 卢文波, 李小联, 等. 龙滩水电站右岸导流洞开挖中爆破损伤范围研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 432 - 436.(XIONG Haihua, LU Wenbo, LI Xiaolian, et al. Study on blast-induced damage zone for excavation of diversion tunnel at right bank of Longtan Hydroelectric Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 432 - 436.(in Chinese))
- [24] BAUER A, CALDER P N. Open pit and blast seminar[R]. Kingston: Mining Engineering Department, Queens University, 1978.
- [25] MOJITABAI N, BEATTI S G. Empirical approach to prediction of damage in bench blasting[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy(Section A), 1996, 10(5): 75 - 80.
- [26] SAVELY J P. Designing a final blast to improve stability[C]// Proceedings of the SME Annual Meeting. New Orleans: [s.n.], 1986: 80 - 86.
- [27] 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): 1 513 - 1 520.(LU Wenbo, LI Haibo, 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): 1 513 - 1 520.(in Chinese))
- [28] ZHANG Y Q, HAO H, LU Y. Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading[J]. International Journal of Engineering Science, 2003, 41(9): 917 - 929.
- [29] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 广东岭澳核电站爆破开挖岩体损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 510 - 2 516.(XIA Xiang, LI Junru, LI Haibo, et al. Study on damage characteristics of rock mass under blasting load in Ling'ao nuclear power station, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 510 - 2 516.(in Chinese))
- [30] 夏祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.(XIA Xiang. Study of damage characteristics and safety threshold of rock vibration by blast[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [31] 唐海. 地形地貌对爆破振动波影响的试验和理论研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.(TANG Hai. Field experimental and theoretical study on blasting wave propagation characteristics under different terrains[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.(in Chinese))
- [32] 谢冰, 李海波, 刘亚群, 等. 宁德核电站核岛基坑爆破开挖安全控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 571 - 1 578.(XIE Bing, LI Haibo, LIU Yaqun, et al. Study of safety control of foundation pit excavation by blasting in Ningde nuclear power plant[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 571 - 1 578.(in Chinese))