

# 水下钻孔爆破的爆炸冲击波测试与分析

柯松林<sup>1</sup>, 李琳娜<sup>2</sup>, 司剑峰<sup>2</sup>, 钟冬望<sup>2</sup>

(1. 中铁港航工程局集团有限公司, 广州 510800; 2. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065)

**[摘要]** 以厦门港古雷航道水下炸礁为例, 分析了水下钻孔爆破的水击波形成特征, 并通过爆破区的水中冲击波压力监测, 实测了不同距离处的水击波压力大小和变化规律, 研究了水中冲击波压力幅值、正压作用时间等作用特性, 得到了水击波传播衰减公式。研究成果对指导工程设计施工和环境安全评估具有参考意义。

**[关键词]** 水下钻孔爆破; 水中冲击波; 压力特性

**[中图分类号]** TD235 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0103-04

## 1 前言

随着我国近几年对外经济贸易的快速发展, 许多巨轮深水码头不断投入建设, 致使水下钻孔爆破工程规模越来越大, 港池越炸越深, 爆破区离岸越来越远, 对爆破设计、施工及安全不断提出新的要求。水下爆破存在水击波的危害作用, 水击波在水中传播具有冲量大、衰减慢的特点<sup>[1,2]</sup>, 会对水中建筑物及船舶和潜水作业人员的安全形成较大的威胁。它是水下工程爆破的一种主要危害, 工程实践中必须引起足够重视, 其产生机理、传播规律、动力响应、安全标准、对周围环境的影响和控制措施急需认真研究<sup>[3]</sup>。

本文以厦门港古雷航道二期疏浚项目水下炸礁为例, 采用美国PCB公司ICP水下冲击波测量长型传感器对水下爆炸冲击波进行数据采集试验, 对冲击波波形及峰值压力进行分析研究, 得到水下爆炸冲击波传播特性相关规律。为进一步研究深水水下爆炸冲击波的产生和传播特性以及水下结构物

在爆炸荷载作用下的动态响应积累了经验。

## 2 工程概况

厦门港古雷航道二期工程是在现有古雷10万吨级航道的基础上进行扩建的工程。施工区域为航道, 炸礁施工区总长约3.5 km, 工程量4.959×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>, 施工范围较大, 施工区域距离岸边建筑物平均距离在1 km以上, 岸边建筑物多为混凝土结构。航道附近已投产使用的码头有: 南-1#泊位、一德码头、力通码头, 在建码头有南2#泊位、南9#泊位、南11#泊位和南10#泊位。由于爆破中心距附近建筑和水产养殖区的距离较近, 施工区域又为正运行的主航道, 且爆破装药量较大, 为确保安全, 需对水下爆炸冲击波监测, 得到水下爆炸冲击波传播特性相关规律, 为水下爆破施工提供依据<sup>[4,5]</sup>。

炸礁区平均水深18 m, 平均高潮位3.28 m, 平均低潮位0.99 m, 平均潮差3.96 m, 实测最大涨潮流速0.92 m/s, 实测最大落潮流速1.1 m/s。岩石以强风化花岗岩为主(占72%), 其余的为中风化花岗岩

**[收稿日期]** 2014-09-01

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(51174147); 湖北省自然科学基金资助项目(2012FFA135)

**[作者简介]** 柯松林, 1968年出生, 男, 湖北鄂州市人, 高级工程师, 从事工程力学相关的科研工作; E-mail: linda020329@163.com

(占19%)及微风化花岗岩(占9%),岩石试验强度分别为12~23 MPa, 30~60 MPa, 60~100 MPa, 礁石岩性为8~9级和12级以上, 坚固性较大。

本工程炸礁采用水下钻孔爆破施工方法, 边钻孔边装药, 达到一定数量的炮孔数后一次起爆, 再重新定位钻孔; 工程钻孔作业平台采用800 t平台式及飘浮式钻爆施工船舶。钻孔直径 $\phi$  120 mm, 孔深3~14 m, 平均超深2.0 m, 垂直钻孔, 孔距2.5 m, 排距2.0~2.5 m, 堵塞长度1~1.5 m。炸药选用ZY95-5型震源药柱, 雷管选用高精度防水抗压非电毫秒雷管, 导爆管为双层抗拉高强塑料管制成, 抗拉力强, 能够抵抗一般水流冲击作用。每孔分别于底部和中部布置2~4个雷管, 全部炮孔装药完毕后联线、移船、警戒、起爆, 每次爆破2~3排。

### 3 试验研究

#### 3.1 测试系统

爆破冲击波信号具有时间短, 能量大的特点<sup>[6]</sup>, 因此测量系统要有很好的动态响应。另外, 该信号是非周期脉冲信号, 具有低至零, 高至无穷大的连续频谱。因此, 测量系统要有很宽的频率响应。

试验所采用的水下冲击波测量长型传感器, 对容积变化敏感的电气石晶体, 内置集成电路放大器。具有无谐振、高电压输出、可驱动长电缆等特点。所能承受静压范围为:  $P_{\max} \leq 345$  MPa。测试系统主要由压力传感器、信号变换及放大电路、记录器等组成。数据采集处理系统为成都佳仪科技发展有限公司的PCI4712数据采集和分析系列产品。配套分析软件具有实时测量、回放分析、数据转换等功能。为保证足够的安全距离, 试验中通过特殊延长线连接传感器与记录仪。通道编号及传

感器技术参数见表1。

表1 通道编号及传感器参数

Table 1 Channel numbers and sensor parameters

通道编号	传感器参数	
	垂直传感器编号	灵敏度系数
1	138A25	29.82
2	138A50	14.51
3	138A01	743.8
4	138A10	74.04

根据爆破区环境条件和水深情况, 在钻爆船上布置了水击波测点, 试验方案布置如图1所示。

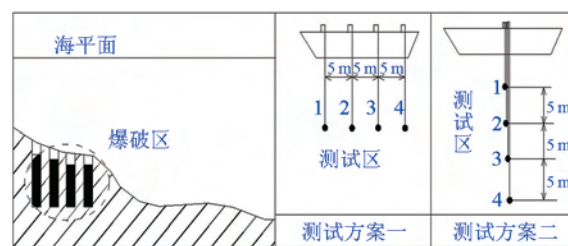


图1 监测方案示意图

Fig. 1 Monitoring solution schemes

#### 3.2 试验

此次爆破冲击波测试历时23天, 共测得有效数据60组, 大致分为两组: a. 控制爆心距, 改变监测深度进行冲击波的测量; b. 控制测深, 改变爆心距进行冲击波的测量。单段药量110~585 kg; 一次总药量最高达4.71 t。实测数据见表2。对水下钻孔爆破多段延时起爆产生的冲击波进行测试, 典型波形图见图2, 单段冲击波典型波形如图3所示, 典型功率谱图见图4。

表2 距海底10 m处距爆源不同距离的冲击波压力峰值

Table 2 Peak pressure of shock wave at 10 m above the sea bottom

		H=10 m								
R/m		84	87	90	91.5	125	127	145	159	167
Q/kg		110	110	120	195	585	415	255	255	255
$\sqrt[3]{Q}/R$		0.057	0.055	0.055	0.063	0.067	0.059	0.044	0.04	0.038
P/MPa		0.861	0.655	0.310	0.85	1.12	0.79	0.292	0.13	0.135

#### 3.3 结果分析

1) 如图3所示, 冲击波波形上升迅速, 正压作用时间较短仅为零点几毫秒, 峰值出现后冲击波压力

迅速衰减。波峰后面水中冲击波波形具有“白噪声”的特性, 其强度不大且为变向压力。

2) 从图4功率谱图中可以看出, 钻孔爆破冲击

波的频段在 20~180 Hz。

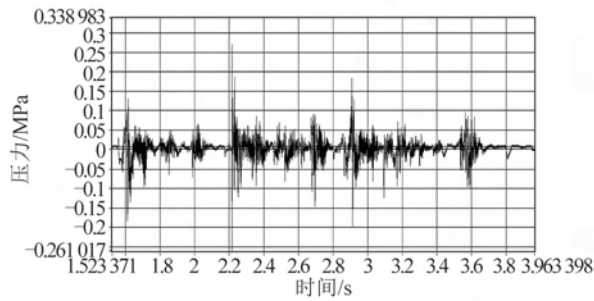


图2 钻孔爆破多段装药冲击波测试时程图

Fig. 2 Test schedule chart of shock wave for multi stage loading drilling blasting

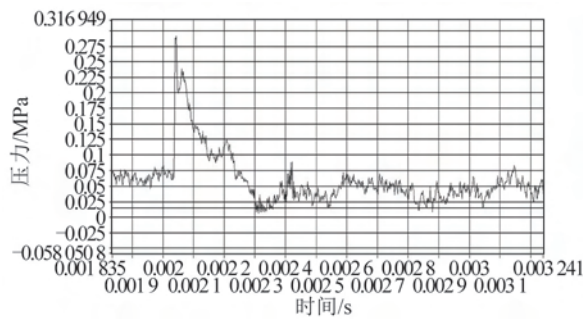


图3 钻孔爆破冲击波时程图

Fig. 3 Test schedule chart of shock wave for drilling blasting

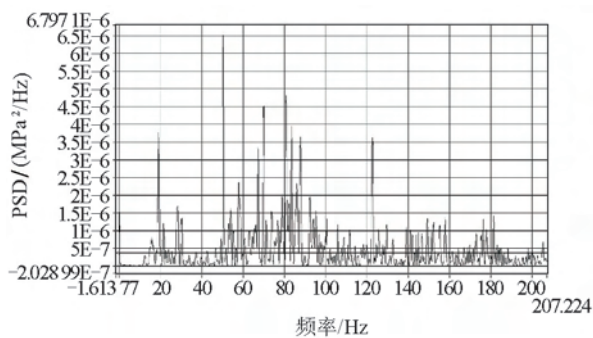


图4 钻孔爆破冲击波功率谱全图

Fig. 4 Power spectrum map of shock wave for drilling blasting

3) 水中冲击波压力随时间变化的关系<sup>[7]</sup>:

$P(t) = P_m e^{-\frac{t}{\theta}}$ , 式中,  $P_m$  为水中冲击波初始峰值, Pa;  $\theta$  为衰减时间常数, 即由  $P_m$  衰减到  $P_m/e$  所需的时间, s。提取冲击波典型压力时程进行水平轴放大并进行指数拟合得到图 5, 得出冲击波指数衰减规律为:

$$P(t) = 0.943 6e^{-28.262t} \quad (1)$$

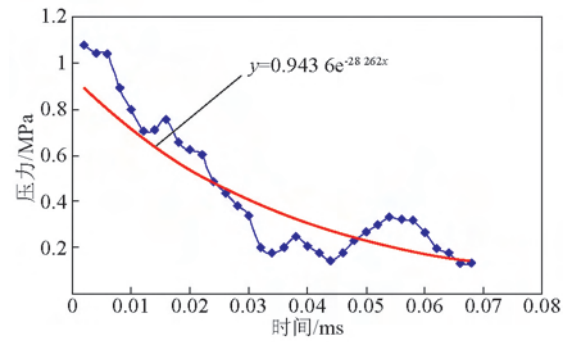


图5 水下钻孔爆破冲击波指数衰减规律

Fig. 5 Exponential decay law of single shock wave for drilling blasting

4) 装药在水域中爆炸的峰值压力计算, 大多采用 Cole P 的经典峰值压力公式形式:

$$P_m = K(Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (2)$$

式(2)中, 量单位为  $10^5$  Pa;  $Q$  为装药量;  $R$  为距爆心的距离;  $K$ 、 $\alpha$  为和炸药及环境条件相关的系数。通过对表 2 中数据进行拟合, 得到水下钻孔爆破时所产生水中冲击波峰值压力的半理论半经验公式:

$$P_m = 206.29(Q^{1/3}/r)^{1.2489} \quad (3)$$

监测结果表明, 冲击波上升迅速, 正压作用时间较短仅为零点几毫秒, 峰值出现后冲击波压力迅速呈指数形式衰减。

将表 2 中数据整理分析可得出水下爆破冲击波峰值压力随  $\sqrt[3]{Q}/R$  的变化规律, 作出趋势图见图 6, 冲击波峰值随  $\sqrt[3]{Q}/R$  整体呈指数增大趋势, 如图 6 中虚线所示; 然而在 AB 段, 冲击波峰值随  $\sqrt[3]{Q}/R$  的增大并不明显, 若能准确预测 A、B 两点, 将  $\sqrt[3]{Q}/R$  控制在 AB 段内, 则能最大程度增大药量和减小安全距离而使得压力峰值变化平缓, 其将对冲击波峰值控制的研究有重要意义。

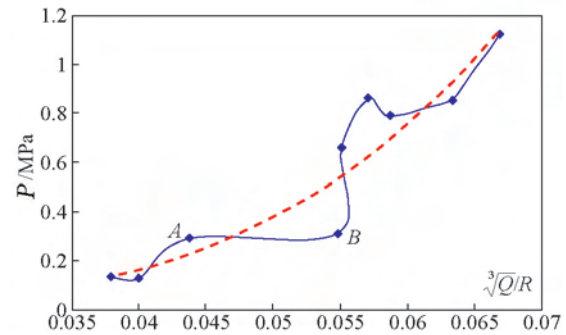


图6 水下爆破冲击波峰值压力随  $\sqrt[3]{Q}/R$  的变化

Fig. 6 The peak pressure attenuation of underwater explosion wave with  $\sqrt[3]{Q}/R$

## 4 结语

厦门港古雷航道二期工程海况差,地形、地质条件复杂,工程量大而且集中,加上海上来往船舶较多,施工干扰大,施工对爆破安全要求高。如何高效、安全、快速完成炸礁任务,是工程施工的重点和难点。为控制水中钻孔爆破冲击波对周围环境的影响,深入分析了水下钻孔爆破的水击波特性,在爆破区实施了水击波压力监测。根据监测结果,从压力幅值、正压作用时间等方面进行了分析,得出了水下钻孔爆破的水击波计算公式。研究成果对我国迅速发展的漫长海岸线上的水工工程具有参考意义。

## 参考文献

- [1] 陆遐龄,梁向前,胡光川.水中爆炸的理论研究与实践[J].爆破,2006,23(2):9-14.
- [2] 王玉杰,陶明.水下钻孔爆破水击波衰减规律的研究[D].武汉:武汉理工大学,2009.
- [3] 孙远征,龙源,邵鲁中,等.水下钻孔爆破水中冲击波试验研究[J].工程爆破,2007(12):15-19.
- [4] 高明涛,李昕,周晶.水下钻孔爆破水中冲击波的数值模拟研究[J].水电能源科学,2009,27(4):138-142.
- [5] 邵鲁中,龙源,孙远征,等.水深因素对水下钻孔爆破冲击波压力峰值的影响[J].爆破器材,2008,37(3):4-6.
- [6] 张振华,朱锡,白雪飞.水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2004,24(2):182-188.
- [7] 钟帅,张立.深水下8号雷管爆炸冲击波参数的研究[J].煤矿爆破,2007(1):4-6.

# Monitoring and analysis on shock wave in water during water drilling blasting

Ke Songlin<sup>1</sup>, Li Linna<sup>2</sup>, Si Jianfeng<sup>2</sup>, Zhong Dongwang<sup>2</sup>

(1. China Railway Port and Channel Engineering Group Co., Ltd, Guangzhou 510800, China; 2. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**[Abstract]** Taking underwater reef blasting in Gulei sea channel of Xiamen Port as an example, the forming characteristic of shock wave in water for underwater drilling blasting is analyzed. By field monitoring, the pressure of shock in water for different distances is attained, the major parameter, such as pressure amplitude and positive action time, and the propagation attenuation rule of shock in water are researched in this paper. The result can be helpful for engineering design and construction and environmental safety assessment.

**[Key words]** underwater drilling blasting; shock wave in water; pressure characteristics