

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.006

深水条件下雷管的环境适应性研究*

李红旗 李启佳 邹永胜
长江重庆航道工程局(重庆,400010)

[摘要] 在航道建设工程中,施工重点在于对碍航滩段的综合性整治。目前,水下钻孔爆破已成为航道整治中效率最高的清礁方法。在进行水下钻孔爆破时,首先需考虑水深的影响,确定出适合工程的炸药和起爆器材,确保爆破效果。结合三峡-葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程,对深水条件下雷管的环境适应性进行研究,具体关注水深对雷管性能的影响。结果表明:在水下钻孔爆破施工时,当水深为0~40 m时,推荐使用高精度塑料导爆管雷管与数码雷管;同时,需根据工程实际情况选用雷管。当水深为50 m及以上时,推荐使用数码雷管,因为在高压与长时间浸水条件下,数码雷管性能的下落程度相对较小。

[关键词] 深水条件;水下钻孔爆破;雷管性能

[分类号] TQ560.9

Environmental Adaptability of Detonators under Deep Water Conditions

LI Hongqi, LI Qijia, ZOU Yongsheng
Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau (Chongqing, 400010)

[ABSTRACT] In the waterway construction project, the construction focus is on the comprehensive regulation of the obstructed section. At present, underwater drilling and blasting has become the most efficient approach for waterway regulation. During underwater drilling and blasting, the influence of water depth should be considered first to determine the suitable explosives and blasting equipment for the project, ensuring the blasting outcomes. Based on the waterway regulation project of the Liantuo section between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam, the environmental adaptability of detonators under deep water conditions was studied, with a specific focus on the impact of water depth on the performance of detonators. The results indicate that high-precision plastic nonel detonators and digital detonators are recommended for underwater drilling and blasting construction when the water depth is 0-40 meters. Detonators should be selected according to the actual situation of the project. When the water depth is 50 meters or more, it is recommended to use digital detonators. Because under high pressure and prolonged immersion conditions, the performance degradation of digital detonators is relatively small.

[KEYWORDS] deep water condition; underwater drilling blasting; performance of detonator

0 引言

三峡-葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程位于湖北省宜昌市夷陵区三峡枢纽和葛洲坝枢纽之间,全长约6.5 km,按内河I级航道标准建设。建设内容主要为炸除水下碍航岩嘴和河床,改善莲沱段通航水流条件。配套建设15.0 m钢质浮标船29座,8.5 m铝合金塔标84座,水位站10座。工程施工难点主要有:大部分炸礁点周边环境复杂,涉及民

房、沿江公路、过江渡口和桥梁;水下钻孔爆破时,施工水位较深;爆破岩层厚度大。

深水条件下,雷管能否起爆、起爆时的延时精度和起爆网路的可靠性等会受到深水压力的影响。为确保爆破效果,在深水施工中如何选择合适的雷管等问题,目前没有相关资料可供查阅^[1-6]。

在水下钻孔爆破中,对延时精度要求较低的情况下,常使用普通塑料导爆管雷管;而施工现场环境复杂、施工难度较大,需精确控制单段药量的起爆延期时间时,常使用的是高精度塑料导爆管雷管以及

* 收稿日期:2024-07-05

第一作者:李红旗(1972—),男,高级工程师,主要从事航道工程的水下爆破清礁和非爆施工技术研究。E-mail: 846266678@qq.com

数码雷管。以云南燃料一厂的 8# 高精度塑料导爆管雷管和数码雷管为例,了解深水条件下雷管的环境适应性。

1 起爆性能

为研究水下钻孔爆破施工中,水压对高精度塑料导爆管雷管和数码雷管性能的影响,对雷管进行起爆性能试验。

1.1 高精度塑料导爆管雷管

目前,常用铅板测试、隔板测试、钢块凹痕测试、输出压力测试等方法评价雷管对介质的破坏效果^[7-8]。结合现场实际情况,将采用铅板测试探究导爆管雷管在不同水深下的起爆性能。

1.1.1 试验方案

以三峡-葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程为工程依托,分别在长江流域 10.0、20.0、36.5 m(接近河底)水深处进行试验。测量铅板穿孔大小,可验证导爆管雷管在深水条件下能否完全爆破,从而研究导爆管雷管的抗水性和抗压性。为减小试验误差,在每一水深处测试 3 次。

1.1.2 试验准备及过程

1) 试块的准备。试验铅板直径为 35 mm,厚度为 5 mm。首先,在铅板靠近边缘处钻一个小孔,从而能使钢丝穿过后系上绳索,方便下沉与捞起;用绝缘胶布将雷管固定在铅板中心,雷管底部需贴紧铅板;最后,将铅板试块放入塑料袋中。塑料袋可避免铅板的丢失,且袋中可加入石块,使之下沉。

2) 试验中采用 CHA-1000 高能脉冲起爆器。

3) 雷管爆炸后,对铅板逐一进行检查,记录未能正常起爆的发数。

4) 用游标卡尺测量穿孔直径,每块铅板垂直测量 2 次。铅板的穿孔直径取 2 次测量结果的算数平均值。

1.1.3 试验结果

在 10.0、20.0 m 和 36.5 m 3 个不同水深条件下,分别对雷管的爆破性能进行 3 次测试,分别记为 1#、2#、3#,结果见表 1。其中,1# 铅板试验的穿孔效果见图 1。

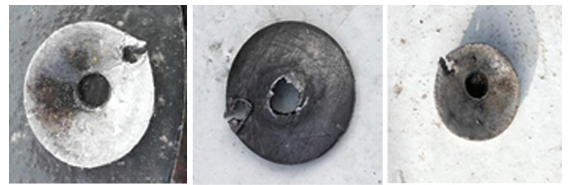
1.1.4 结果分析

由表 1 可知,铅板穿孔直径与水深负相关。导爆管雷管在深水中爆炸产生的能量总体上是微量下降的。在水深 10.0、20.0 m 处,铅板均被穿透;而在水深 36.5 m 处,铅板未完全穿透。起爆性能研究主要是验证导爆管雷管在深水条件下是否出现拒爆

表 1 导爆管雷管的铅板试验结果

Tab. 1 Lead plate test results of nonel detonators

编号	水深/m	穿孔直径/mm
1#	10.0	11.3
	20.0	9.8
	36.5	8.9
2#	10.0	10.9
	20.0	10.2
	36.5	9.1
3#	10.0	11.1
	20.0	10.1
	36.5	9.5



(a) 10.0 m (b) 20.0 m (c) 36.5 m

图 1 不同水深处铅板试验的穿孔效果

Fig. 1 Outcomes of lead plate test at different water depths

现象。从试验数据中可以看出,铅板的变形量波动较小,说明导爆管雷管试样的测试误差相对较小,且均能正常起爆,未出现拒爆,抗水、抗压性能较好。

1.2 数码雷管

结合现场的实际情况,采用铅板试验研究数码雷管在不同水深条件下的起爆能力。铅板试验前,用环氧树脂或密封胶对数码雷管的脚线接头进行防水处理,并采用浮体将雷管线夹浮于水面,避免线夹浸水。

参照高精度塑料导爆管雷管的铅板试验步骤,在 10.0、20.0 m 和 36.5 m 3 个不同水深条件下,对雷管的爆破性能进行 3 次测试,分别记为 4#、5#、6#,结果见表 2。

表 2 数码雷管的铅板试验结果

Tab. 2 Lead plate test results of digital detonators

编号	水深/m	穿孔直径/mm
4#	10.0	10.7
	20.0	10.1
	36.5	9.9
5#	10.0	10.1
	20.0	9.7
	36.5	9.6
6#	10.0	10.3
	20.0	10.1
	36.5	9.8

试验结果表明,在 10.0、20.0、36.5 m 水深条件下,铅板均被穿透,试验过程中未出现拒爆,数码雷管均能正常起爆,抗水和抗压性能较好。

2 延时精度

2.1 高精度塑料导爆管雷管

2.1.1 浸水前测试

采用延时测试仪,随机从 15、25、40、65 ms 和 400 ms 5 个段别中各抽取 10 发高精度塑料导爆管雷管进行测试。实际延期时间 t 用断开法检测,浸水前高精度塑料导爆管雷管的延期时间见表 3。

表 3 浸水前高精度塑料导爆管雷管的延期时间

Tab.3 Delay time of high-precision plastic nonel detonators before immersion in water

序号	段别				
	15 ms	25 ms	40 ms	65 ms	400 ms
1 [#]	17.7	27.2	40.2	62.8	421.9
2 [#]	15.4	26.5	41.3	64.9	422.9
3 [#]	15.3	28.2	40.6	66.1	420.3
4 [#]	16.8	28.0	41.5	62.3	419.0
5 [#]	16.6	27.9	41.4	62.5	420.8
6 [#]	16.4	28.3	40.1	63.1	426.3
7 [#]	16.1	27.2	40.8	63.7	421.2
8 [#]	15.5	25.8	40.9	63.2	430.2
9 [#]	17.2	26.0	41.2	65.3	421.5
10 [#]	17.0	28.1	40.3	64.2	424.1
\bar{t}	16.4	27.3	40.8	63.8	422.8
t_{\max}	17.7	28.3	41.5	66.1	430.2
t_{\min}	15.3	25.8	40.2	62.3	420.3
标准差 S	0.8	0.9	0.5	1.3	3.3
平均偏差	1.4	2.3	0.8	1.5	22.8

由表 3 可知:15、25、40 ms 和 400 ms 段别雷管的标准值比实测延期时间偏小;65 ms 段别雷管的标准值比实测延期时间偏大;40 ms 段别雷管的标准差和平均偏差最小。

2.1.2 浸水后测试

随机从 15、25、40、65 ms 和 400 ms 5 个段别中各抽取 20 发高精度塑料导爆管雷管浸入 36.5 m 水深中。再平均分成两组,分别浸泡 8 h 和 24 h 后进行试验。两组雷管的延期时间测试结果分别见表 4、表 5。

对比表 4、表 5 的数据可知:在 36.5 m 水深中分别浸泡 8 h 和 24 h 后,15、25、40 ms 和 400 ms 段

表 4 浸水 8 h 后高精度塑料导爆管雷管的延期时间

Tab.4 Delay time of high-precision plastic nonel detonators after immersion in water for 8 hours

序号	段别				
	15 ms	25 ms	40 ms	65 ms	400 ms
1 [#]	17.1	28.1	40.7	63.0	425.9
2 [#]	16.2	26.7	41.5	64.8	423.9
3 [#]	17.8	28.2	41.3	66.0	421.3
4 [#]	16.4	27.8	42.4	62.1	420.1
5 [#]	17.4	28.9	42.7	62.7	420.7
6 [#]	17.2	29.0	41.2	62.9	424.9
7 [#]	17.3	28.2	41.6	63.8	422.3
8 [#]	18.1	26.9	41.9	65.6	430.2
9 [#]	16.6	29.8	42.3	63.2	425.5
10 [#]	17.3	28.6	42.1	63.5	424.1
\bar{t}	17.1	28.2	41.8	63.8	423.9
t_{\max}	18.1	29.8	42.7	66.0	430.2
t_{\min}	16.2	26.7	41.2	62.1	420.1
标准差 S	0.6	0.9	0.6	1.2	2.8
平均偏差	2.1	3.2	1.7	1.6	23.9

表 5 浸水 24 h 后高精度塑料导爆管雷管的延期时间

Tab.5 Delay time of high-precision plastic nonel detonators after immersion in water for 24 hours

序号	段别				
	15 ms	25 ms	40 ms	65 ms	400 ms
1 [#]	17.6	29.7	41.4	63.1	427.9
2 [#]	18.3	28.1	41.1	64.1	424.3
3 [#]	16.4	31.2	41.3	61.9	422.5
4 [#]	17.5	32.3	42.5	63.7	432.1
5 [#]	16.8	32.0	41.5	63.1	430.8
6 [#]	17.1	29.8	39.7	66.5	425.3
7 [#]	16.5	30.2	42.8	63.7	423.2
8 [#]	16.7	29.9	42.5	64.3	428.2
9 [#]	17.4	31.5	40.2	62.7	429.5
10 [#]	18.1	28.6	41.9	61.8	430.4
\bar{t}	17.2	30.3	41.5	63.5	427.4
t_{\max}	18.3	32.3	42.8	66.5	432.1
t_{\min}	16.4	28.1	39.7	61.9	422.5
标准差 S	0.6	1.3	1.0	1.3	3.2
平均偏差	2.2	5.3	1.5	1.8	27.4

别雷管的标准值比实测延期时间均偏小;65 ms 段别雷管的标准值比实测延期时间偏大;40 ms 和 65 ms 段别的实测延期时间平均偏差最小。各段别的雷管浸泡 8 h 组比浸泡 24 h 组的平均实测延期时间偏小,但两组平均实测延期时间相差不大。两组雷管的延期时间偏差满足设计精度(偏差不超过 15%)要求。

浸泡后的实测延期时间的平均偏差比不浸泡的平均偏差大,但两者差值较小,具体影响原因还有待研究。

2.2 数码雷管

随机抽取 4 批数码雷管浸入 36.5 m 深水中,前 2 批浸泡 8 h,后 2 批浸泡 24 h。浸水 8、24 h 后,数码雷管的延期时间见表 6~表 9。

表 6 中的最大偏差为 -2.77 ms,最小偏差为 -0.06 ms;表 7 中的最大偏差为 -4.21 ms,最小偏

表 6 浸水 8 h 后数码雷管的延期时间(第 1 批)

Tab.6 Delay time of digital detonators after immersion in water for 8 hours (Batch 1)

数据线序号	设置时间	实测时间	偏差
1 [#]	0	0	0
2 [#]	126	125.94	-0.06
3 [#]	1 232	1 231.73	-0.37
4 [#]	2 436	2 436.12	-0.88
5 [#]	3 590	3 588.69	-1.31
6 [#]	4 682	4 680.36	-1.64
7 [#]	5 823	5 821.16	-1.84
8 [#]	6 842	6 839.81	-2.19
9 [#]	7 682	7 679.23	-2.77

表 7 浸水 8 h 后数码雷管的延期时间(第 2 批)

Tab.7 Delay time of digital detonators after immersion in water for 8 hours (Batch 2)

数据线序号	设置时间	实测时间	偏差
1 [#]	0	0	0
2 [#]	10	9.96	-0.04
3 [#]	8 654	8 651.12	-2.88
4 [#]	9 871	9 867.98	-3.02
5 [#]	11 123	1 119.40	-3.56
6 [#]	12 356	1 235.11	-3.89
7 [#]	13 487	13 483.97	-3.09
8 [#]	14 426	14 422.66	-3.34
9 [#]	15 682	15 677.79	-4.21

表 8 浸水 24 h 后数码雷管的延期时间(第 3 批)

Tab.8 Delay time of digital detonators after immersion in water for 24 hours (Batch 3)

数据线序号	设置时间	实测时间	偏差
1 [#]	0	0	0
2 [#]	216	215.95	-0.05
3 [#]	2 089	2 087.19	-0.81
4 [#]	4 036	4 034.12	-1.88
5 [#]	6 240	6 237.89	-2.11
6 [#]	8 162	8 159.78	-2.22
7 [#]	1 060	1 058.16	-1.84
8 [#]	12 342	12 339.72	-2.28
9 [#]	14 197	14 194.16	-2.84

表 9 浸水 24 h 后数码雷管的延期时间(第 4 批)

Tab.9 Delay time of digital detonators after immersion in water for 24 hours (Batch 4)

数据线序号	设置时间	实测时间	偏差
1 [#]	0	0	0
2 [#]	1 571	1 570.93	-0.07
3 [#]	3 654	3 652.12	-1.88
4 [#]	5 871	5 867.96	-3.04
5 [#]	7 123	7 119.81	-3.19
6 [#]	9 356	9 352.66	-3.34
7 [#]	11 487	11 483.26	-3.74
8 [#]	13 426	13 422.66	-3.34
9 [#]	15 682	15 677.63	-4.37

差为 -0.04 ms;表 8 中的最大偏差为 -2.84 ms,最小偏差为 -0.05 ms;表 9 中的最大偏差为 -4.37 ms,最小偏差为 -0.07 ms。数码雷管的延期时间偏差符合设计精度(偏差不超过 15%)的要求。

3 起爆网路的可靠性

为研究水下钻孔爆破施工中水压对高精度塑料导爆管雷管和数码雷管的性能影响,对雷管进行可靠性试验。

3.1 高精度塑料导爆管雷管

3.1.1 露天起爆网路的准爆性

从 15、25、40、65 ms 和 400 ms 5 个段别的高精度塑料导爆管雷管中随机抽取 10 发,在 36.5 m 水深下浸泡 24 h 后,全部取出,进行网路测试。首

先,用工具刀将导爆管剖开。观察发现,管壁无潮湿现象,没有发生漏水。然后,将导爆管雷管密封好,并联成网路后起爆。所有雷管全部准爆。

3.1.2 水下起爆网路的准爆性

从15、25、40、65 ms和400 ms 5个段别的高精度塑料导爆管雷管中随机抽取60发进行试验。其中,30发雷管在36.5 m水深下浸泡8 h后取出,检查外观是否严密、无破损;然后,在传爆网路主线上布置30个节点,每个节点支路布置1发雷管,分成3组平行网路组成接力试验网路;最后,将整个网路固定在铁丝网上,浸入36.5 m水深后起爆;待起爆完毕后,将网路取出。观察发现,整个网路完全准爆,雷管塑料卡口无明显损坏现象。另外30发雷管在30 m水深下浸泡24 h后取出,按同样的方法联接水下起爆网路,浸入36.5 m水深后,起爆网路,得到相同效果。

3.2 数码雷管

试验前,用环氧树脂或密封胶对数码雷管的脚线接头进行防水处理,并采用浮体将雷管线夹浮于水面,避免线夹浸水。参照高精度塑料导爆管雷管的起爆网路可靠性试验步骤进行起爆。观察发现,整个网路完全准爆,雷管塑料卡口无明显损坏现象。抽检网路的延时精度发现,整体起爆网路的延时偏差满足施工要求。

4 结论

1) 试验表明,在深水条件下,高精度塑料导爆管雷管和数码雷管整体起爆网路均具有较好的准爆性和可靠性。

2) 在深水条件下,高精度塑料导爆管雷管的延期时间与标准值相差不大,偏差满足设计精度要求。数码雷管的延期时间与标准值的偏差符合设计精度要求,且延期时间标准偏差小于高精度塑料导爆管雷管。

3) 在水下钻孔爆破施工时,当水深为0~40 m时,推荐使用高精度塑料导爆管雷管与数码雷管。

同时,需根据工程实际情况选用雷管。当水深为50 m及以上时,推荐使用数码雷管,在高压与长时间浸水条件下,数码雷管性能的下陷程度相对较小,适用于大水深条件下水下钻孔爆破施工。

参考文献

- [1] 赵根. 深水条件下围堰拆除爆破技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
ZHAO G. Study on technology of the cofferdam demolition blasting in deep water conditions [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [2] 张韩涛. 电子雷管在内河航道水下炸礁中的应用[J]. 采矿技术, 2024, 24(1): 56-58.
- [3] 刘东, 李颖, 张琬. 工业电子雷管及其起爆系统的安全性能探讨[J]. 产品可靠性报告, 2024(1): 85-87.
- [4] 丁群. 水下钻孔爆破技术在水运工程建设中的应用[J]. 珠江水运, 2022(15): 22-24.
- [5] 吴国群. 环境温度对数码电子雷管延期时间的影响研究[J]. 煤矿爆破, 2020, 38(1): 26-28.
WU G Q. Research on the influence of ambient temperature on the delay time of digital electronic detonator [J]. Coal Mine Blasting, 2020, 38(1): 26-28.
- [6] 刘文胜, 陈能革, 朱未琳, 等. 数码雷管高精度延时对爆破振动影响试验研究[J]. 金属矿山, 2021(9): 37-43.
LIU W S, CHEN N G, ZHU M L, et al. Test study on the effect of digital detonator high precision delay time on blasting vibration [J]. Metal Mine, 2021(9): 37-43.
- [7] 徐园园. 水压对爆炸器材爆炸性能的影响研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
XU Y Y. Study on the effect of water pressure on explosion performance of explosion materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [8] 熊苏. 雷管起爆能力测试方法的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
XIONG S. Research on determination method of detonator initiating capability [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.