

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.003

水下钻孔爆破水击波的传播规律及 气泡帷幕对水击波的削减作用^{*}

刘天云^① 龚书堂^② 胡伟才^③ 仲鹰维^③ 吴 立^②

①长江航道局(湖北武汉,430010)

②中国地质大学(武汉)(湖北武汉,430074)

③长江重庆航道工程局(重庆,400011)

[摘 要] 结合长江航道莲沱段炸礁工程,用 LS-DYNA 软件对水下钻孔爆破进行数值模拟,研究水击波的传播规律和气泡帷幕对水击波的削减作用,分析了水下钻孔爆破 3 个方向上水击波的传播特性。结果表明,水下钻孔爆破水击波在炮孔轴线方向衰减最为明显,其次是与炮孔轴线夹 45°角的方向,而最小抵抗线方向衰减最慢;且改变水深时,结论仍成立。同时,研究了不同位置的气泡帷幕对水击波峰值压力的削减效果。结果表明,气泡帷幕对水击波起到了良好的削减作用;且气泡帷幕离爆源较近时,对水击波的削减效果更好。

[关键词] 水下钻孔爆破;水击波;非线性拟合;气泡帷幕;削减

[分类号] TV542+.5

Propagation Law of Water Hammer Wave in Underwater Drilling Blasting and Reduction of Bubble Curtain on Water Hammer Wave

LIU Tianyun^①, GONG Shutang^②, HU Weicai^③, ZHONG Yingwei^③, WU Li^②

① Changjiang Waterway Bureau (Hubei Wuhan, 430010)

② Chinese University of Geosciences (Wuhan) (Hubei Wuhan, 430074)

③ Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau (Chongqing, 400011)

[ABSTRACT] Combined with the reef blasting project in Liantuo section of the Yangtze River channel, LS-DYNA software was used to numerical simulate the underwater drilling and blasting. Propagation law of water hammer wave and the reduction effect of bubble curtain on water hammer wave were studied, and propagation characteristics of water hammer wave in three directions of underwater drilling and blasting were analyzed. The results show that attenuation of water hammer wave in the direction of borehole axis is the most obvious, followed by that in the direction of 45° angle between the axis of borehole, and that in the direction of minimum resistance line is the slowest. The conclusion is valid when the water depth condition changes. At the same time, the reduction effect of bubble curtain at different positions on the peak pressure of water hammer wave was studied. The results show that the bubble curtain has a good reduction effect on the water hammer wave, and the effect is better when the bubble curtain is close to the explosion source.

[KEYWORDS] underwater drilling blasting; water hammer wave; nonlinear fitting; bubble curtain; reduction

引言

关于水下爆破水击波的研究多出现在水中兵器的破坏效应^[1-2]、舰船结构的抗爆破坏等军事研究

中^[3]。近几年来,随着航道治理工程的迅速发展和水下民用爆破技术的应用广泛,人们对水下爆破的安全性和破坏特征日渐关注^[4-6]。陈春歌等^[7]模拟研究了水下爆破冲击波危害及安全控制措施。邵鲁中等^[8]进行了削弱水下钻孔爆破水中冲击波负面

^{*} 收稿日期:2019-09-02
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41672260);中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2018086)
第一作者:刘天云(1978-),男,高工,研究方向为水下爆破施工及技术。E-mail:593543010@qq.com
通信作者:吴立(1963-),男,教授,博导,主要从事工程爆破和地下建筑工程理论技术研究。E-mail:lwu@cug.edu.cn

效应的试验研究。孙远征等^[9]对水下钻孔爆破水中冲击波进行了试验研究。

气泡帷幕技术对水击波具有较好的削减效果,在国外得到广泛的运用^[10-11]。谢达建等^[12]通过数值模拟手段研究了气泡帷幕对水下爆破冲击波的削减作用。然而,气泡帷幕技术在国内的实际应用较少,导致人们对气泡帷幕防护效果认识不充分。

为了研究水下钻孔爆破水击波传播规律及气泡帷幕对水击波的削减作用,采用 LS-DYNA 软件建立水下钻孔爆破模型^[13-17],分别从最小抵抗线方向、与炮孔轴线夹 45° 角的方向和炮孔轴线方向分析水击波传播规律,并设置气泡帷幕距离爆源 6.5、8.5 m 和 10.5 m 3 个工况,研究气泡帷幕对水击波的削减作用。

1 工程概况

长江航道莲沱段位于湖北省宜昌市夷陵区,属于长江干线上游河段。该河段处于三峡枢纽和葛洲坝枢纽之间的中上段,上起下岸溪(长江上游航道里程36.3 km),下至茶园(长江上游航道里程29.8 km),全长约6.5 km。

长江莲沱段炸礁工程使用水下钻孔爆破清理水下暗礁,拓宽、拓深长江航道。施工区位于长江航道,过往船只、水中构筑物多。

2 水击波传播规律研究

2.1 数值模拟模型

长江航道莲沱段炸礁治理工程中采用了多排炮孔微差起爆的方式进行作业,前排药卷爆炸,周围岩体破碎后形成台阶平面,为后排炮孔提供了临空面。故建立水下钻孔台阶爆破模型。同时,为了在不降低精度的条件下减少计算量,建模时以炮孔中心轴线为基础,建立 $1/2$ 模型。

建模采用 cm- μ s-g 单位制,模型的计算域为 20 m \times 3 m \times 16 m。水底岩石层厚度为 1 m,台阶高度为 3 m。炮孔半径为 5 cm、孔深 5 m。其中,装药长度 4 m,堵塞长度 1 m,采用耦合装药。单个炮孔总装药量为 52 kg。起爆点设置在药卷中部,台阶上水深 10 m,如图 1 所示。

模型中的材料有 4 个部分,分别是岩石、炸药、水和堵塞物。它们都用实体单元 Solid164 进行网格划分。其中,岩石采用拉格朗日网格建模。炸药、水

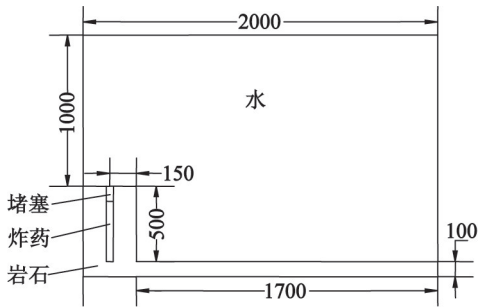


图1 模型尺寸示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of model size (unit: cm)

和堵塞物采用欧拉网格建模,单元算法为多物质 ALE 算法,且单元之间共节点接触。用关键字 *Constrained_Lagrange_In_Solid 对岩石与炸药、水、堵塞物之间进行耦合。

2.2 材料的参数及其状态方程

工程中使用的2[#]岩石乳化炸药,采用高能炸药材料模型,参数如表1所示。采用Mat_Null材料模型和Eos_Gruneisen状态方程模拟水,参数如表2所示。用塑性随动硬化模型模拟岩石,参数见表3。

表 1 炸药模型及状态方程参数

Tab. 1 Explosive model and state equation parameters

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	D / ($\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	$A \times 10^2$ / GPa	$B \times 10^2$ / GPa	R_1	R_2
1.3	0.4	2.144	0.001 82	4.2	0.9

表2 水模型及状态方程参数

Tab. 2 Water model and state equation parameters

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	C	S_1	S_2	S_3	ν_0
1.0	0.164 7	2.56	1.986	1.226 8	0.5

表3 岩石模型参数

Tab. 3 Rock model parameters

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	屈服应力/ MPa	泊松比	弹性模量/ MPa	切线模量/ MPa
2.56	3.908	0.183	0.164 7	3 500

2.3 结果分析

为了研究水击波特性和通过 LS-PrePost 软件调取数值模拟结果,分析压力云图和水击波峰值压力的变化规律。

2.3.1 压力云图

由图 2(a) 可知, 柱状药包自中间起爆以后, 炸药爆破的能量作用于炮孔周围的岩体中, 药包爆炸激起的爆轰冲击波迅速向药柱两端传播, 邻近炮孔中心的岩体压力最先出现衰减, 此时压力云图呈橄

榄状。

然后,高压爆炸的产物迅速向炮孔两端膨胀,突破炮孔堵塞,能量在水中形成了水击波;同样的,爆炸冲击波传播至岩体与水介质交界面时,冲击波发生折射,产生水击波,此时压力云图呈椭球状,如图 2(b)所示。

当 $t = 4\ 296.9\ \mu\text{s}$ 时,水击波的波阵面如图 2(c)所示,这时可以看出,各方向水击波的衰减并不一致,显然炮孔轴线方向水击波衰减更快。

水击波在水中继续传播和衰减,如图 2(d)所示。

2.3.2 水击波峰值压力

为了定量研究水击波衰减规律,调取模型上的典型单元压力时程曲线进行分析。

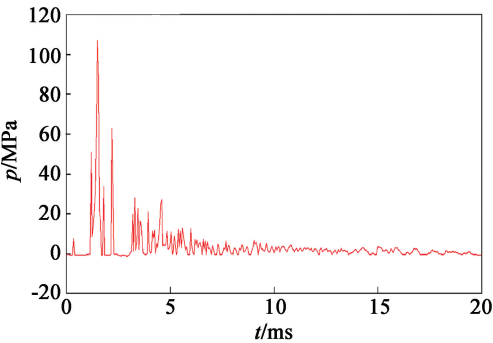
分别选取炮孔轴线上爆心距为 3 m 和 5 m 的两个炮孔近区水中典型单元,单元编号为 95751 和 95761,它们的压力时程曲线如图 3 所示。由于地震波传播速度大于水击波,故压力时程曲线中出现了前驱波。而水击波压力在非常短的时间内上升到峰值,随后呈指数规律衰减至静水压力,最后在静水压力附近不断地上下波动。

在对压力云图的分析中可知,水击波在各方向上衰减规律是不一致的。为进一步研究水击波衰减规律,在最小抵抗线方向、炮孔轴线方向、与炮孔轴线夹 45° 角的方向分别取爆心距 r 为 3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 m 的单元。得到各方向单元峰值压力随爆心距的变化,如图 4 所示。

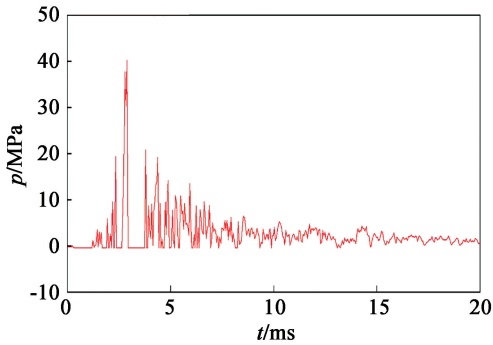
由图 4 知,在这 3 个方向上,水击波峰值压力随着爆心距的增大,均呈现出指数式的衰减趋势。在爆心距 3 ~ 12 m 范围内,炮孔轴线方向水击波衰减最为明显,峰值压力由 107.00 MPa 衰减到 12.50 MPa,衰减了 88.31%;其次是与炮孔轴线夹 45° 角的方向,峰值压力由 40.50 MPa 衰减到 4.92 MPa,衰减了 87.85%;而最小抵抗线方向,峰值压力由 59.70 MPa 衰减到 9.63 MPa,衰减了 83.87%。

Cole 提出水击波的衰减公式为:

$$p = a \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^b \tag{1}$$



(a)95751 单元



(b)95761 单元

图 3 典型单元的压力时程曲线

Fig. 3 Pressure time history curve of typical elements

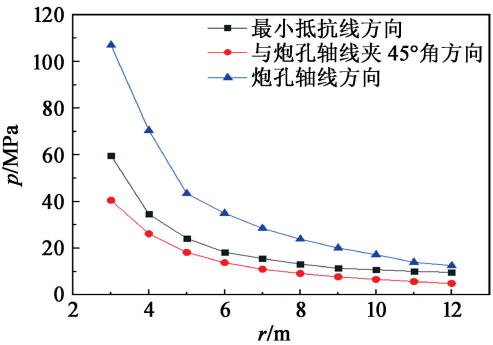
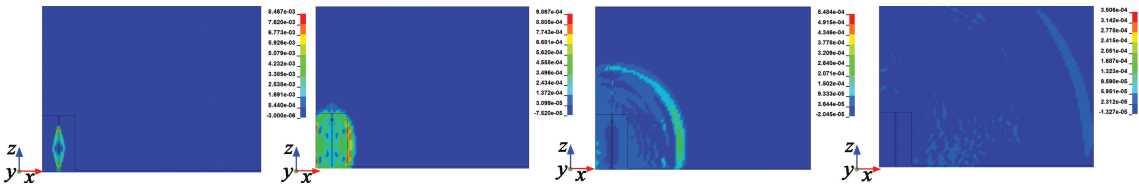


图 4 峰值压力随爆心距的变化

Fig. 4 Relationship between pressure peak and blasting center distance



(a)298.86 μs (b)1 198.2 μs (c)4 296.9 μs (d)11 997 μs

图 2 不同时刻水击波的压力云图

Fig. 2 Pressure nephogram of water hammer wave at different times

式中: p 为水击波压力; Q 为单孔装药量; r 为爆源距测点的距离。

基于式(1),对水击波压力峰值进行非线性拟合,所得拟合曲线如图5所示。

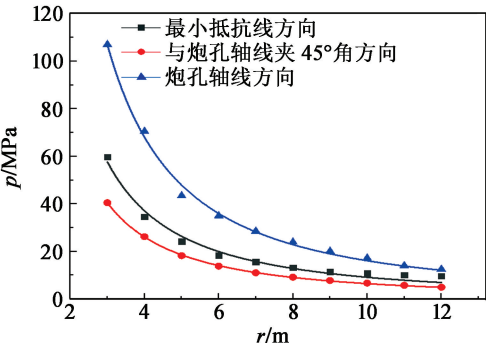


图5 水击波压力衰减拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of pressure attenuation of water hammer wave

在最小抵抗线方向,拟合参数 $a = 41.24, b = 1.531, s = 0.9849$ 。 s 为拟合相关系数, s 越接近 1,数据拟合就越好。该方向水击波衰减公式为:

$$p = 41.24 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.531} \quad (2)$$

与炮孔轴线夹 45° 角的方向, $a = 28.98, b = 1.526, s = 0.9997$ 。该方向水击波衰减公式为:

$$p = 28.98 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.526} \quad (3)$$

在炮孔轴线方向, $a = 75.87, b = 1.573, s = 0.9961$ 。该方向水击波衰减公式为:

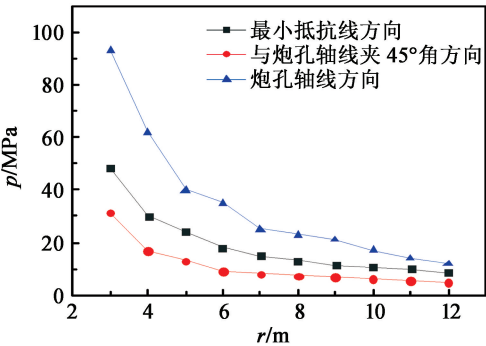
$$p = 75.87 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.573} \quad (4)$$

2.4 不同水深下水击波的传播规律

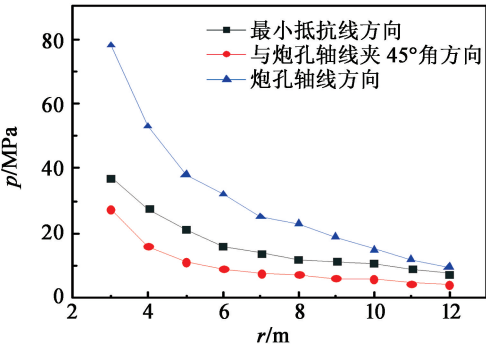
台阶上水深 10 m 情况下,水击波的传播有着一定的指向性。依据 2.1 数值模型,改变水深,分别建立台阶上水深为 15 m 和 20 m 的数值模型。模拟结果如图 6 所示。

图 6(a) 中,在 15 m 水深条件下,炮孔轴线方向水击波衰减最为明显,峰值压力由 93.00 MPa 衰减到 11.80 MPa,衰减了 87.31%;其次是与炮孔轴线夹 45° 角的方向,峰值压力由 31.40 MPa 衰减到 4.70 MPa,衰减了 85.03%;而最小抵抗线方向,峰值压力由 48.30 MPa 衰减到 8.50 MPa,衰减了 82.40%。

图 6(b) 中,20 m 水深时,炮孔轴线方向水击波峰值压力由 78.00 MPa 衰减到 9.50 MPa,衰减了 87.82%。其次是与炮孔轴线夹 45° 角的方向,峰值压力由 27.40 MPa 衰减到 4.20 MPa,衰减了 84.67%。



(a) 15 m 水深



(b) 20 m 水深

图6 不同水深时峰值压力随爆心距的变化

Fig.6 Relationship between peak pressure and blasting center distance in different water depths

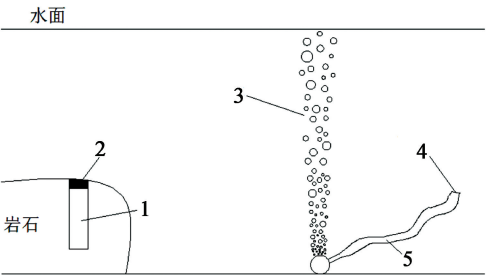
而最小抵抗线方向,峰值压力由 37.30 MPa 衰减到 7.50 MPa,衰减了 79.89%。

由此可知,水击波在炮孔轴线方向衰减最为明显,其次是与炮孔轴线夹 45° 角的方向,而最小抵抗线方向衰减最慢;且改变水深,这种规律仍然成立。

3 气泡帷幕对水击波的削减作用

3.1 气泡帷幕

气泡帷幕系统主要由供气子系统、减压子系统、管道系统及其附属装置组成。图 7 为气泡帷幕形成的示意图。



1 - 炸药;2 - 堵塞;3 - 气泡帷幕;
4 - 接空压机;5 - 高压胶管。

图7 气泡帷幕的形成

Fig.7 Bubble curtain formation

当水击波传播至气泡表面时,能量消散主要有两个方面:一是气泡对水击波的漫反射过程;二是水击波对气泡的压缩作用。

3.2 数值模拟计算模型

在 2.1 所建立的模型基础之上,增设气泡帷幕,与爆源水平距离为 6.5 m,如图 8 所示。

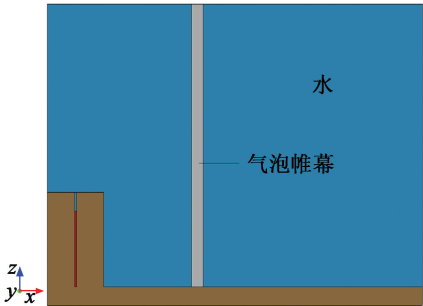


图 8 气泡帷幕模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of bubble curtain model

模拟气泡帷幕时,用空气进行等效替代,采用的材料模型和状态方程分别是 * Mat_Null 和 * Eos_Linear_Polynomial。

3.3 结果分析

图 9 为水击波穿过气泡帷幕时的应力云图。可以看出,气泡帷幕对水击波有削弱作用。在气泡帷幕迎爆侧设置距离水底面 2、4、6 m 的监测点,各点距气泡帷幕 0.4 m,单元编号分别为 96516、96506、18155;背爆侧设置距离水底面 2、4、6 m 的监测点,各点距气泡帷幕 0.4 m,单元编号分别为 105266、105256、44155。

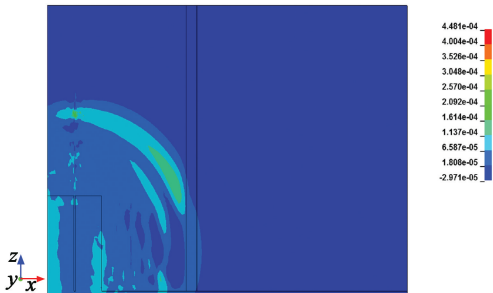


图 9 水击波穿过气泡帷幕时的应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of water hammer wave passing through bubble curtain

各监测点的压力时程曲线如图 10 所示。受到介质面反射作用的影响较大,在距离气泡帷幕迎爆面较近处的 3 个监测点出现了数次起伏十分大的波峰。随后,水击波的传播经过气泡帷幕的漫反射、吸波作用及折射,峰值压力迅速减小。距水底 2 m 处,水击波峰值压力由 27.06 MPa 削减到 8.92 MPa,削

减了 67.04%;距水底 4 m 处,水击波峰值压力由 23.01 MPa 削减到 8.12 MPa,削减了 64.71%,距水底 6 m 处,水击波峰值压力由 14.18 MPa 削减到 5.92 MPa,削减了 58.25%。

3.4 不同位置气泡帷幕的削减效果

为了探索距离爆源不同位置时气泡帷幕对水击波的削减效果和规律,设置 4 种工况进行研究。4 种工况分别为气泡帷幕距爆源 $l=6.5、8.5、10.5$ m 和不设置气泡帷幕的情况。前 3 种工况下,气泡帷幕背爆侧设置距离水底面 2、4、6 m 的监测点,各点距气泡帷幕 0.4 m。第 4 种工况作为对照。各点峰值压力记录在表 4 中。

分析可知:距离爆源 6.5 m 处,气泡帷幕对冲击波峰值压力的削减比例为 54.57% ~ 55.36%;距离爆源 8.5 m 处,气泡帷幕对冲击波峰值压力的削减比例为 53.94% ~ 55.50%;距离爆源 10.5 m 处,气泡帷幕对冲击波峰值压力的削减比例为 54.80% ~ 60.93%。

总的来说,气泡帷幕设置位置对其削弱水击波峰值压力的比例影响不大。就削弱效果而言,气泡帷幕距离爆源 6.5 m 时,水击波峰值压力削弱了 7.11 ~ 10.90 MPa;气泡帷幕距离爆源 8.5 m 时,水击波峰值压力削弱了 5.95 ~ 8.39 MPa;气泡帷幕距离爆源 10.50 m 时,水击波峰值压力削弱了 4.90 ~ 5.89 MPa。所以,距离爆源 6.5 m 时,气泡帷幕对水击波的削减效果最为明显。虽然气泡帷幕距离爆源越近,其削减水击波效果越好,但是实际工程中,气泡帷幕不可能无限接近爆源。因为离爆源越近,气泡帷幕生成系统被破坏可能越大,而这在数值模拟中很难呈现,有待进一步研究。

4 结论

结合工程实际,通过 LS-DYNA 软件模拟了水下钻孔爆破,研究了水击波传播规律和气泡帷幕对水击波的削减作用,得出了以下结论:

- 1) 水击波在各方向上的衰减规律是不一致的。在爆心距 3 ~ 12 m 范围内,炮孔轴线方向水击波衰减最为明显,其次是与炮孔轴线夹 45°角的方向,而最小抵抗线方向衰减最慢,这种现象在水深改变时仍然成立。基于 Cole 公式,进行非线性拟合,得出了 3 个方向上水击波传播规律。
- 2) 气泡帷幕对水击波有较好的削减作用,且气泡帷幕位置对其削弱水击波峰值压力的比例影响不大。就削弱效果而言,气泡帷幕距离爆源 6.5 m 时,

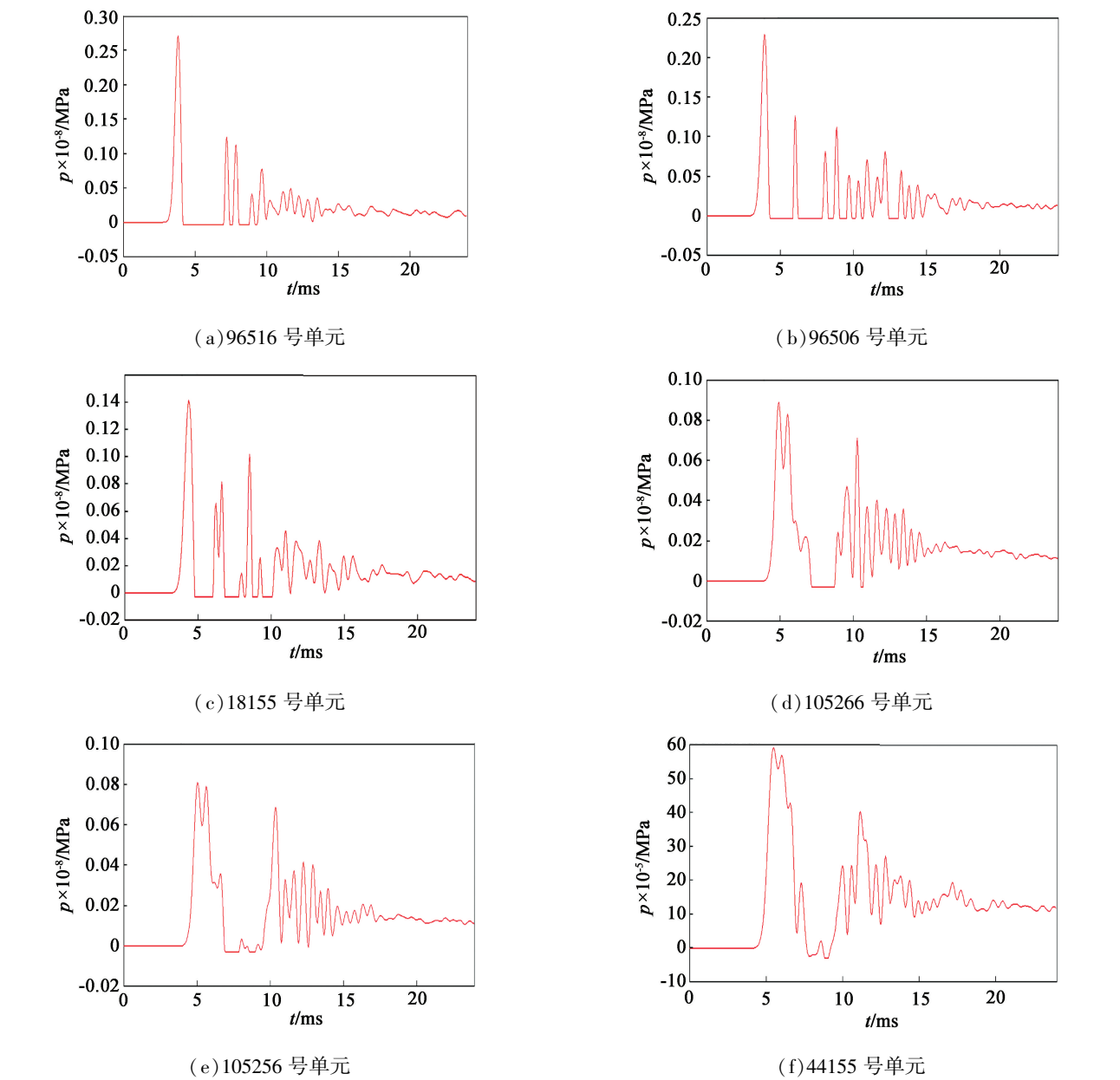


图 10 监测点压力时程曲线

Fig. 10 Pressure time history curve of monitoring points

表 4 气泡帷幕的消减效果

Tab. 4 Reduction effect of bubble curtain

l/m	测点距水底距离/ m	峰值压力/ MPa	无气泡帷幕时峰值压力/ MPa	削减比例/ $\%$
6.5	2	8.92	19.82	54.99
	4	8.12	18.19	55.36
	6	5.92	13.03	54.57
8.5	2	6.86	15.25	55.01
	4	6.15	13.82	55.50
	6	5.08	11.03	53.94
10.5	2	4.53	10.06	54.97
	4	4.18	10.07	60.93
	6	4.04	8.94	54.80

其在水击波的削减效果最为明显。

参 考 文 献

- [1] 李金河,赵继波,谭多望,等. 炸药水中爆炸的冲击波性能[J]. 爆炸与冲击,2009,29(2): 172-176.
LI J H, ZHAO J B, TAN D W, et al. Underwater shock wave performance of explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29 (2): 172-176.
- [2] 庞军. TNT 装药水中爆炸的数值模拟[J]. 火炸药学报,2009,32(5):37-40.
PANG J. Numerical simulation of TNT charge underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2009, 32(5): 37-40.
- [3] 刘科种,徐更光,辛春亮,等. AUTODYN 水下爆炸数值模拟研究[J]. 爆破,2009,26(3):18-21.
LIU K Z, XU G G, XIN C L, et al. Research on numerical simulation in underwater explosion by AUTODYN [J]. Blasting, 2009, 26(3): 18-21.
- [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):138-141, 214.
GAO M T, LI X, ZHOU J. Numerical simulation of shock wave in water of underwater drilling blasting [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4): 138-141, 214.
- [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.
SHAO L Z, LONG Y, SUN Y Z, et al. The effect of depth to the pressure peak value of underwater drilling blasting shock wave[J]. Explosive Materials, 2008, 37 (3): 4-6.
- [6] 赵根,季荣,郑晓宁,等. 乳化炸药水中爆炸冲击波传播规律试验研究[J]. 爆破,2011,28(2):1-4.
ZHAO G, JI R, ZHENG X N, et al. Experimental investigation on propagation rule of shock wave by emulsion explosives underwater blasting [J]. Blasting, 2011, 28 (2): 1-4.
- [7] 陈春歌,申志兵,张贤凯,等. 水下爆破冲击波危害及安全控制措施的模拟分析[J]. 安全与环境工程, 2011,18(1):58-61.
CHEN C G, SHEN Z B, ZHANG X K, et al. Simulation of underwater explosion shock hazards and safety control [J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18 (1): 58-61.
- [8] 邵鲁中,龙源,孙远征,等. 削弱水下钻孔爆破水中冲击波负面效应的试验研究[J]. 工程爆破,2008,14 (3):13-17.
SHAO L Z, LONG Y, SUN Y Z, et al. Experimental investigation of weakening negative effect of shock wave in water of underwater drilling blasting [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3): 13-17.
- [9] 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,2007,13(4):15-19.
SUN Y Z, LONG Y, SHAO L Z, et al. Experimental investigation of shock wave in water of underwater drilling blasting [J]. Engineering Blasting, 2007, 13(4): 15-19.
- [10] 张志波,李春军,李红勇,等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. 爆破,2003,20(2):75-76,89.
ZHANG Z B, LI C J, LI H Y, et al. Application of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting[J]. Blasting, 2003, 20(2): 75-76,89.
- [11] 周睿,冯顺山. 气泡帷幕对水中冲击波峰值压力衰减特性的研究[J]. 工程爆破,2001,7(2):13-17.
ZHOU R, FENG S S. Study on weakening peak pressure of underwater shock wave by bubble curtain [J]. Engineering Blasting, 2001, 7(2): 13-17.
- [12] 谢达建,吴立,洪江,等. 气泡帷幕对水下爆破冲击波的削减作用研究[J]. 人民长江,2018,49(8):72-77.
XIE D J, WU L, HONG J, et al. Study on weakening effect of bubble curtain on water shock wave in underwater blasting [J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 72-77.
- [13] 刘涛,杨凤鹏. 精通 ANSYS [M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [14] 殷秀红,钟冬望,黄小武,等. 水下钻孔爆破岩石各区应力的数值模拟[J]. 爆破,2014,31(4):11-15,53.
YIN X H, ZHONG D W, HUANG X W, et al. Numerical simulation of rock stress of underwater drilling blasting [J]. Blasting, 2014, 31(4):11-15,53.
- [15] 刘欣,顾文彬,陈学平. 气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的数值模拟研究[J]. 爆破,2015,32(3):79-84.
LIU X, GU W B, CHEN X P. Numerical simulation study of attenuation characteristics of water shock wave under bubble curtain [J]. Blasting, 2015, 32(3): 79-84.
- [16] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [17] 齐世福,刘新波,李裕春. 水下钻孔爆破的数值模拟[J]. 工程爆破,2010,16(4):13-17.
QI S F, LIU X B, LI Y C. Numerical simulation of underwater drilling blasting [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4): 13-17.