

成组爆破单元装药位置对破冰效果影响研究

薛伟¹, 张雪梅¹, 夏鹏飞¹, 朱克军¹, 谢志刚²

(1. 武汉雷神特种器材有限公司, 武汉 430200; 2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要:利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件研究了炸药入水深度为 0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m 和 3 m 水下成组爆破单元对破冰疏通通道效果的影响, 分析了成组爆破单元水下爆炸过程中的载荷类型及冲击波作用过程, 得出了有效破冰通道宽度与爆破单元入水深度和水域深度之间的拟合关系。模拟结果与破冰试验结果吻合良好, 在深度为 5 m 的水中, 装药位置在水下 1.5 m 处破冰效果最好, 破冰通道宽度大于冰洞直径。模拟结果显示, 在水深一定的情况下, 破冰有效宽度随爆破单元入水深度的增加呈先增大再减小的趋势, 在同等入水位置的爆破单元, 爆破单元所处环境水深越大, 其有效破冰宽度越来越小, 在深度小于 5 m 的水域中, 对于装药量 4 kg, 装药间距 5.5 m 的爆破单元位于水下 0.5 ~ 2 m 时, 能开辟的有效破冰通路宽度均达 6 m 以上。研究结果为防凌破冰设备的研制提供了理论依据。

关键词:水下爆破; 装药位置; 破冰宽度; 数值模拟

本文引用格式:薛伟, 张雪梅, 夏鹏飞, 等. 成组爆破单元装药位置对破冰效果影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(S2): 56-61.

Citation format: XUE Wei, ZHANG Xuemei, XIA Pengfei, et al. Research on Effect of Different Group Charge Position on Ice Blasting[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(S2): 56-61.

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)S2-0056-06

Research on Effect of Different Group Charge Position on Ice Blasting

XUE Wei¹, ZHANG Xuemei¹, XIA Pengfei¹, ZHU Kejun¹, XIE Zhigang²

(1. Wuhan Leishen Special Equipment Company Ltd., Wuhan 430200, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The effect on ice channel with the group charge at different depth value of 0 m, 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m and 3 m are simulated with the way of numerical simulation based on LS-DYNA, studying the load type of underwater explosion and the interrelated process of the shock wave, and the relationship between the water depth and the depth of blasting units in water to the ice-breaking channel width was obtained, and compared with the results of ice breaking experiment of Yellow River. the numerical simulation results are consistent with the experiment. According to simulation results, the optimized ice-breaking effect was obtained at the position 1.5 meter underwater when the water is deeper than 5.0 meters, the width of ice-breaking channel is larger than the diameter of the ice cave. In the case of certain water depth, the ice-breaking width firstly increased and then decreased with the increase of the water-entry depth of the blasting units. When the blasting units at the same location of the water, the width of ice-breaking became smaller and smaller as the water depth of the blasting units increasing. In the water

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目“黄河凌汛监测与灾害防控关键技术研究与示范”(2018YFC1508400)

作者简介: 薛伟(1990—), 男, 助理工程师, 主要从事武器系统安全防护技术研究, E-mail: 1273977831@qq.com。

通讯作者: 张雪梅(1980—), 女, 高级工程师, 主要从事江河破冰装备技术研究, E-mail: meixueyitian@163.com。

area of depth less than 5 m, the ice-breaking path width could reach 6.0 m, when the blasting units for 4 kg at the location of 0 ~ 2 m. The results would provides theoretical basis for the development of ice-jam breaking equipment.

Key words: underwater explosion; explosive position; ice-breaking width; numerical simulation

冰凌灾害严重危害河堤两岸人民的生命和财产安全,其危害主要表现为河道冰凌淤塞引起冰塞、冰坝,壅高水位,漫堤决口,形成凌汛险情^[1]。在冰河期采取防凌破冰措施是十分必要的,在众多破冰手段中,爆破法因具有立竿见影的效果,而被广泛应用^[2]。冰凌定点爆破与火炮覆盖、飞机投弹相比,具有控制精准、次生危害小,机动灵活等优点,在防凌减灾工作中应用越来越广泛,具有重大的研究意义。目前国内外对于冰层和 underwater 爆破排凌的理论研究与应用开展取得了丰厚的硕果,美国陆军工程兵团 Mellor 基于多年水下爆破试验数据,运用回归分析开展炸药量、冰层厚度和冰洞半径的研究^[3-4]。梁向前研究了黄河内蒙古段冰面接触聚能爆炸和冰下水中爆炸两种破冰方式下,炸药爆破的振速和水中冲击波压力的变化^[5]。张明芳以黄河包头地区开河期爆破破冰试验数据为依据,总结了药量、破冰体积、破冰孔距、排距等技术参数之间的关系及有关计算公式^[6]。Shin Y S^[7]建立了一艘实体船的三维有限元模型并对其在炸药载荷作用下的动态响应进行了数值模拟。

现有的研究大多集中在单个爆破单元上,而对成组或多组群爆单元的研究较少。成组或多组爆破单元在冰下的位置与爆破效能及排凌通道宽度尚未明确。本文以“黄河凌汛监测与灾害防控关键技术与示范”项目之课题“凌汛险情快速抢护关键技术与成套装备研发”为支撑,以“线”式破冰方式为设计宗旨,通过对水下爆破破冰理论分析,并结合有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立三维计算仿真模型,对成组爆炸单元下,冰下爆破位置对破冰效果及开辟排凌通道宽度进行研究,旨在为冰下爆破带疏通排凌通道技术及装备研究及悬浮定深机构研发提供技术支持。

1 水下爆炸冲击波

当炸药被起爆后,瞬间产生高温高压的爆轰产物,爆轰产物膨胀强烈压缩周围水介质,导致水的密度和压力急剧升高,产生水中初始冲击波,当冲击波的压力到达峰值后,近似于指数型衰减,持续时间短暂,一般不超过数毫秒。爆轰产物在膨胀高速推动周围水介质运动的过程中,会伴随有气泡的产生^[8]。

根据 Cole 经验公式冲击波可近似表示为

$$P(t) = K_1 \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^A \cdot e^{-\lambda R}$$

$$\lambda = K_2 \cdot W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^B$$

式中: W 为炸药的当量 (kg); R 为离爆源中心的距离 (m); λ 为冲击波计算衰减指数; K_1 、 K_2 、 A 、 B 为冲击波特异性常数,本

课题选用 TNT 为主装药,4 个常数分别取 52.12, 0.089 5, 1.18, -0.185。

2 试验研究

2.1 施工工艺

1) 药包装药形式

战斗部主要由模压壳体、半圆注装药、传爆药柱、壳体、防水芯管组成,结构简图如图 1。半圆药柱为注装 TNT,质量 4 kg,密度为 1 600 g/m³,传爆药柱为环状压制钝化黑索金,质量 0.05 kg。芯管壁厚为 0.3 mm;药包连接部位通过环氧树脂粘接后,蘸入石蜡密封。芯管中间穿入三根 WD414 军用导爆索,用以起爆整体装药模块。装药单元最终通过圆织机整体织入锦丝线带内使用,间距为 5.5 m,试验样品如图 2 所示。

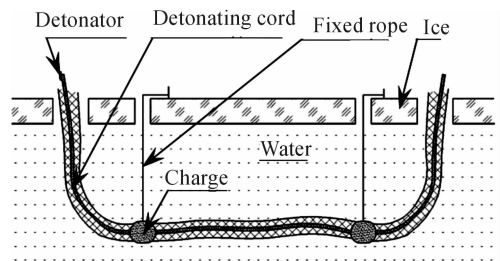


图 1 药包结构简图

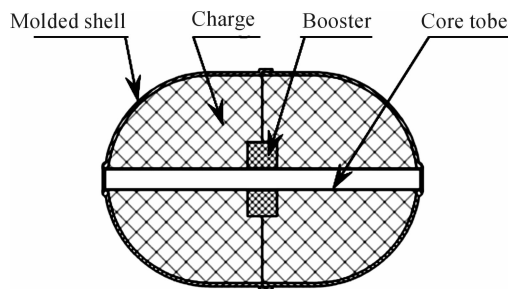


图 2 试验样品

2) 起爆方式

使用螺旋内燃钻机预先在冰上打孔,打孔直径约 400 mm,按照设计置入冰层下不同入水深度,通过绳索固定,药包通过引出冰面的导爆索连接电雷管起爆,试验布设如图 3 所示。

2.2 试验结果及分析

根据上述试验方法进行了药包位于冰下 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m 的水中爆破破冰试验,测量并计算冰洞最大半径和有效破冰通道宽度,以有效破冰通道宽度评价最终的破

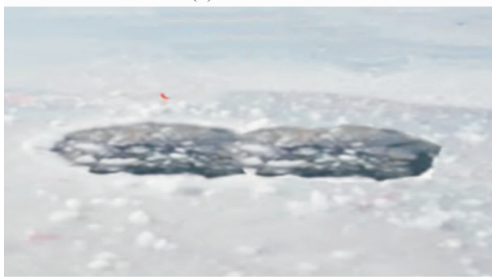
冰效果,其中冰洞最大半径为单个破冰单元爆炸在冰面造成的最大孔洞尺寸,有效破冰通道宽度是成组爆破单元爆炸后在冰面上形成的可供浮冰流过的最小冰层宽度。图4为冰下1.5 m水中爆破试验结果。



图3 试验布设



(a) 破冰现场



(b) 破冰效果

图4 水中1.5 m冰层破坏结果

两装药单元同时起爆成功后,测量了单个装药单元爆炸形成的冰洞直径和两装药单元爆炸形成的通道宽度,试验测量结果如表1所示。

表1 冰层爆破测量结果

序号	水深/ m	冰层 厚度/ m	冰下药 包位置/ m	冰洞爆 破长度/ m	冰洞最 大直径/ m	有效破 冰通道 宽度/m
1	5.10	0.49	0.5	12.50	6.10	5.00
2	5.01	0.50	1.0	12.62	6.24	6.31
3	5.17	0.51	1.5	13.27	6.84	6.81
4	4.95	0.53	2.0	10.51	7.40	6.09
5	5.30	0.47	2.5	8.78	5.80	2.20
6	5.05	0.50	3.0	7.92	3.36	0.74

从表中可以看出,在冰层厚度相近的情况下,随着两组4

kg TNT炸药入水深度增加,有效破冰通道宽度先增大再减小,当炸药位于水下1.5 m处时,破冰效果最好,形成的冰洞直径为6.84 m,破冰通道有效宽度达到6.81 m,其次是1.0 m和2 m处,破冰通道有效宽度分别为6.31 m和6.09 m,相比于1.5 m水深处,有效宽度分别降低了7.34%和10.57%。可以看出炸药入水位置对破冰效果的影响显著。

3 仿真模型的建立

3.1 计算模型及网格划分

采用非线性动力学有限元软件 LS-DYNA3D 对炸药量4 kg的双药包进行水下冰凌爆破数值模拟,构建了药包位于冰下水中0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m和3.0 m的7种模型,研究破冰宽度与炸药位置间的关系。仿真模型主要由空气、水、TNT药包和冰层构成。由于模型的对称性,建立了1/2模型,图5为整体有限元模型,整体模型尺寸为14 m × 5 m × 7.5 m,水体尺寸为14 m × 5 m × 5 m,空气域14 m × 5 m × 1.75 m,冰层14 m × 5 m × 0.75 m,砂层14 m × 5 m × 0.75 m,药包0.014 m × 0.013 6 m × 0.007 m,药包间距5.5 m,空气、水和TNT药包空气采用欧拉法,冰层为拉格朗日算法。在空气和水体的边界处施加无反射边界条件,以模拟环境无限区域。为避免炸药尺寸过小,网格差异过大引起较大误差,对炸药区域的网格进行了区域加密处理。

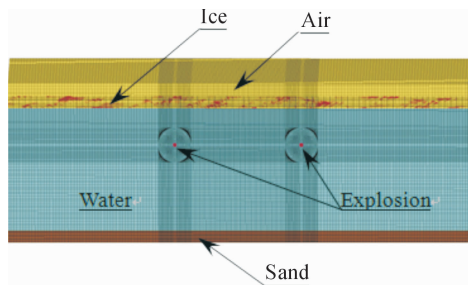


图5 数值模拟有限元模型

3.2 材料模型及参数

计算中,成型 TNT 药包材料模型为高能炸药 (High-Explosive-Burn) 模型,状态方程为JWL方程。冰的力学性能受分子中氢键的脆弱程度和晶格几何特性的影响^[9],在压力作用下呈现弹性、塑性或脆性状态,其弹性、脆性的力学性能随温度降低而增强,而塑性性能则相对减弱。根据相关资料在-5℃条件下,冰体极限抗压强度为3.5~4.5 MPa,温度越低,抗拉强度越大,采用混凝土劈裂抗拉强度试验方法,测得的劈裂抗拉强度为0.82~1.18 MPa,极限抗拉强度为1.2~1.5 MPa。对于爆炸破冰时,其爆炸载荷迅速加载,冰体以脆断性破坏形式为主。本模型中冰体采用 ISOTROPIC_ELASTIC_FAILURE 强度模型进行描述,以抗拉强度和抗压强度为损伤标准,抗拉应力取值 9.13×10^{-6} MPa,抗压应力为 9.15×10^{-5} MPa。水体材料采用 NULL 模型表示,空气和泥沙采用空物质料模型^[10]。具体材料设置如下:

1) 主装药。主装药为注装 TNT,采用高能燃烧材料模型和 JWL 状态方程来描述。其主要参数为: $\rho = 1.630 \text{ g/cm}^3$, $p_{\text{CJ}} = 27.08 \text{ GPa}$, $D = 6930 \text{ m/s}$, $A = 371.2 \text{ GPa}$, $B = 32.1 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.31$ 。

2) 水。水介质四周为无反射扰动的透射传播边界,空物质材料本构模型水受冲击压缩采用 Gruneisen 状态方程表示,密度为 $\rho = 0.99821 \text{ g/cm}^3$ 。

3) 空气。空气采用空物质料模型和线性多项式 Liner Polynomial 状态方程描述。密度为 $\rho = 0.00125 \text{ g/cm}^3$ 。

4) 泥沙。泥沙采用空物质料模型和线性多项式 Liner Polynomial 状态方程描述。密度为 $\rho = 1.80 \text{ g/cm}^3$ 。

5) 冰。冰材料选用 ELASTIC 模型描述。密度为 $\rho = 0.897 \text{ g/cm}^3$,杨氏模量 $E = 0.0931 \text{ MPa}$,泊松比 $\sigma = 0.33$ 。

4 数值计算结果及分析

4.1 不同爆炸位置下水压力变化及冰层毁伤分析

炸药在水中爆炸后,冲击波超压会通过水介质作用于冰层。图 6(a)为炸药位于水下 1.5 m 时 $87 \mu\text{s}$ 时刻冰层和水体压力云图,从图中可以看出炸药爆轰在水中产生冲击波,并向周围扩散。图 6(b)为 $100 \mu\text{s}$ 时刻的冰层和水体压力云图,冲击波开始作用于冰层下缘,炸药上方发生少量的冰体破坏。图 6(c)为 $180 \mu\text{s}$ 时刻的冰层和水体压力云图,冰层稀疏波的作用下,冰体迅速发生拉伸脆性破坏。随着稀疏波在冰层内的传播,冰洞半径继续扩大,在已经被破坏的冰洞内,冲击波能量消散,压力强度降低,此时在水体中间位置,两相冲击波叠加,产生新的冲击高压区。图 6(d)为 $235 \mu\text{s}$ 时刻冰层和水体压力云图,冲击波强度降低,冰体为断裂脆性破坏,冰层间裂隙继续扩大。水中两相叠加后的冲击波仍然具有较高的压力,并持续作用于上沿冰层,导致冰层中间位置的破坏范围已经大于单一冰洞直径。

以左侧爆源为基准,从左到右在 0 m、1.5 m、2.5 m、2.75 m、3.5 m、4.5 m、5.5 m 处取观测点,得出了成组药包之间不同位置处水中冲击波作用于冰盖下缘最大压力,如图 7 所示。从图中可以看出,位于爆炸点正上方的冲击波压力,最大值 8.517 MPa ,随着距离的增大,冲击波压力逐渐减小。在 2.5 m 到 2.75 m 时范围内,冲击波最大压力值又逐渐升高,这是成组药包爆炸两相冲击波叠加的结果。冲击波的叠加最终导致压力呈现直线升高,对冰层的切割作用增强,破冰效果提升。图 8 为炸药位于不同深度时水下爆炸破冰数值模拟结果。表 6 为破冰直径和有效通道统计测量结果。从图中和表中统计结果可以看出破冰效果与与药包爆破位置存在直接联系,随着药包入水深度的增加,破冰半径先增大再减小。通过观察爆炸载荷传递过程中发现,随着深度的增加,炸药爆炸产生的水中冲击波作用于冰体的有效超压范围增大,破冰半径增大,随后冲击波压力持续衰减,直至低于冰层的剪切强度,导致冲击波超压对冰层的作用和影响越来越弱,冰层破碎半径减小。

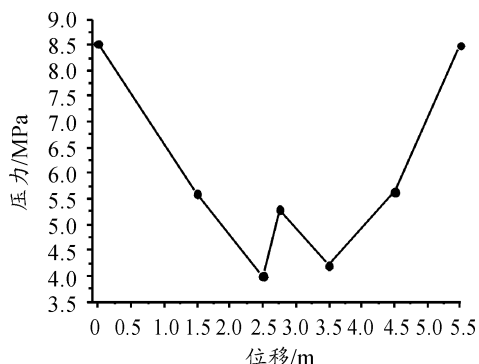


图 7 水中冲击波最大压力曲线

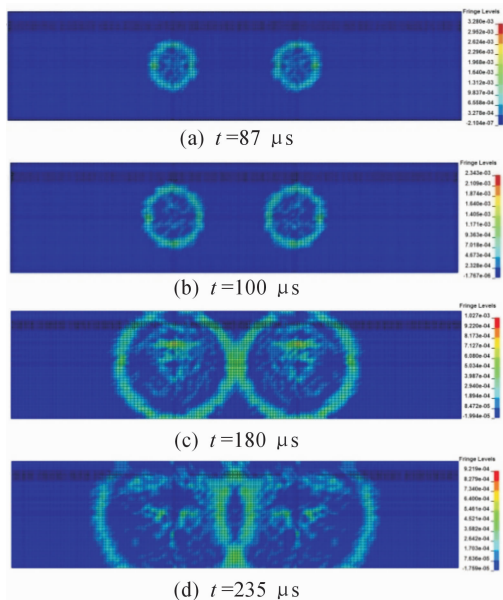


图 6 不同时刻冰层和水压力变化云图

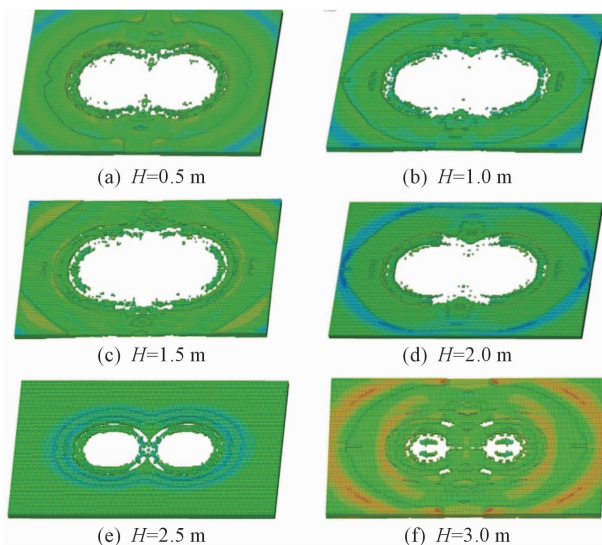


图 8 入水深度与破冰效果数值模拟结果

表6 冰层爆破模拟结果

序号	水深/ m	冰层厚度/ m	冰下药包位置/ m	冰洞爆破长度/ m	冰洞最大直径/ m	有效破冰通道宽度/m
1	5	0.50	0.5	11.50	5.64	5.59
2	5	0.50	1	12.50	5.90	6.30
3	5	0.50	1.5	13.10	6.71	6.68
4	5	0.50	2	9.40	6.40	6.07
5	5	0.50	2.5	7.40	5.50	1.90
6	5	0.50	3	8.00	1.76	0.61

图9为水深为分别为0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m和3.0 m时的有效破冰通道宽度曲线,从图中可以清楚地看到,随着炸药深度增加,有效破冰通道宽度先增大再减小,当炸药位于水下1.5 m的位置时,破冰通道宽度达到最大值为6.68 m,当炸药入水深度超过2 m后,破冰有效宽度降低。

对比现场试验结果,模拟结果略小。将炸药入水深度作为横坐标,有效破冰宽度作为纵坐标画出试验结果与模拟结果相对误差曲线(图10),模拟结果最大误差为17.5%,最小误差为1.32%,炸药入水深度在0.5~2.0 m,模拟结果与试验结果比较接近,最大误差为8.3%,当炸药入水深度大于2.5 m后,数值计算结果与试验结果存在较大误差。

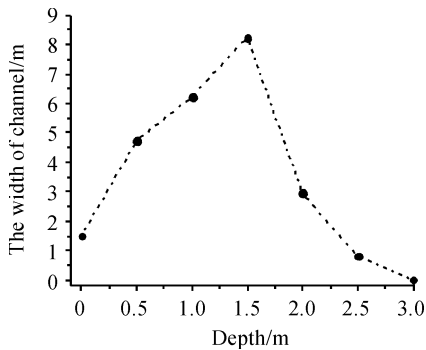


图9 有效破冰通道宽度随装药水深变化曲线

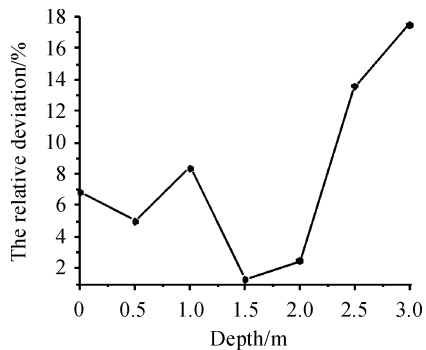


图10 模拟与试验结果相对误差

4.2 破冰通道与爆破单元位置和水深的关系

保持爆破单元装药中心距5.5 m不变,并结合上文误差

结果分析,构建了4 kg装药成组爆破单元位于水深3 m、4 m和6 m环境中下的有限元模型,研究破冰通道宽度与炸药位置和水深的关系,模拟结果如表7所示。

表7 破冰通道与爆破单元位置和水深的模拟结果

序号	水深/ m	冰层厚度/ m	冰下药包位置/m	有效破冰通道宽度/m
1	3	0.5	0.5	9.31
2	3	0.5	1.0	9.50
3	3	0.5	1.5	9.78
4	3	0.5	2.0	10.12
5	4	0.5	0.5	6.98
6	4	0.5	1.0	7.87
7	4	0.5	1.5	8.10
8	4	0.5	2.0	8.59
9	5	0.5	0.5	5.59
10	5	0.5	1.0	6.30
11	5	0.5	1.5	6.68
12	5	0.5	2.0	6.07
13	6	0.5	0.5	4.65
14	6	0.5	1.0	5.85
15	6	0.5	1.5	5.00
16	6	0.5	2.0	4.76

从表7中可以看出,在水深一定的情况下,随爆破单元入水深度越大,破冰有效宽度先增大再减小。处于同等入水位置的爆破单元,则随着所处环境水深的增加,其有效破冰宽度越来越小。水深为3.0 m时,爆破单元位于水下2.0 m时,破冰效果最好,破冰有效宽度为10.12 m;水深为4.0 m时,爆破单元位于水下2.0 m时,破冰效果最好,破冰有效宽度为8.59 m;水深为5.0 m时,爆破单元位于水下深度为1.5 m时,破冰半径达到最大为6.48 m,水深达到6.0 m时,炸药的最佳位置为水下1.5 m,破冰半径为5.85 m。通过数据对比发现,爆破单元的最佳入水深度随所处水域深度的增大而减小,这是因为水域深度越小,炸药爆炸后通过水介质反射到冰层的冲击波超压强度越大,水域深度越大,反射波超压越小此时,破冰主要的效能来源于初始爆炸冲击波。

通过对表中模拟数据分析,得出了4 kg TNT 破冰有效宽度 L 与成组爆破单元入水深度 h 和水域深度 H 拟合关系如下:

$$L=7.64314+4.82143h-3.86571h^2+1.04h^3(H=3\text{ m})$$

$$L=5.70271+3.53214h-1.88857h^2+0.42h^3(H=4\text{ m})$$

$$L=4.38762+3.8677h-1.7281h^2-0.00889h^3(H=5\text{ m})$$

$$L = 3.73757 + 3.21405h - 1.70286h^2 + 0.167h^3 (H=6\text{ m})$$

5 结论

1) 利用有限元软件 ANSYS LS-DYNA 建立了成组爆破单元水下破冰数值模型,数值模拟结果与计算结果基本吻合,能够为冰下爆破带疏通排凌通道技术及装备研究及开发提供技术支依据。

2) 数值计算和现场试验结果均表明,当水深为 5 m,冰层厚度为 0.5 m 左右时,对于主装药为 4 kg TNT 的成组爆破单元,当爆破单元位于水下 1~2 m 处时,爆破形成的通路宽度均达到 6.0 m 以上,其中 1.5 m 处破冰效果最佳,形成的冰洞半径为超过 3.0 m,破冰通道有效宽度达到 6.6 m。

3) 水下爆破破冰中,距离爆源愈远,冲击波压力峰值愈小。初始冲击波的效能是冰层毁伤的主导因素。

4) 在水深一定的情况下,随爆破单元入水深度越大,破冰有效宽度均呈现先增大再减小的趋势。处于同等入水位置的爆破单元,则随着所处环境水深的增加,其有效破冰宽度越来越小。

参考文献:

[1] 陈云玲,唐遵平,郭本忠. 山东黄河凌汛成因及处理措施[J]. 科技信息, 2010(9):780-781.

[2] 夏长富. 水下人工爆破冰凌技术研究[J]. 爆破, 2014, 31(2):126-130.

[3] MALCOLM M. Breaking Ice with Explosives [R]. USA: Cold Regions Research & Engineering Laboratory, US Army Corps of Engineers, 1982.

[4] United States Army Corps of Engineers. Ice Engineering: Engineering and Design [M]. Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 2002.

[5] 梁向前,熊峰,陆遐龄. 黄河爆破破冰的水中冲击波特性试验研究[J]. 爆破, 2014, 31(4):1-10.

[6] 张明芳,张富贵,梁向前等. 集中药包爆破破冰的试验研究[J]. 工程爆破. 2015, 21(5):43-46.

[7] SHIN Y S. Ship Shock Modeling and Simulation for Far Field Underwater Explosion [J]. Computer and Structures. 2004(82):2211-2219.

[8] 王莹,肖巍,姚熊亮,等. 水下爆炸冲击波载荷作用下冰层破碎特性及其影响因素[J]. 爆炸与冲击. 2018, 38(6):1211-1216.

[9] 于江,熊炎飞,王从银,等. 冰介质内与冰层下爆炸破坏范围理论计算 [C]//第七届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 中国力学学会、中国土木工程学会, 宁波:2009.

[10] 薛伟,李如江,王建波. 偏心起爆对爆炸成型弹丸的模拟与试验研究[J]. 兵器材料科学与工程. 2016(2):83-87.

(责任编辑 周江川)

(上接第 32 页)

[10] ARALE S, PAWAR C, DESHMUKH A, et al. Design and Manufacture of Bio-mimic Robotic Fish. Measurement and Instrumentation [C]//IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation. IEEE, 2016: 445-448.

[11] SHIN B H, LEE K M, LEE S Y. A Miniaturized Tadpole Robot Using an Electromagnetic Oscillatory Actuator [J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(1):29-36.

[12] CHEN Xingyu, WU Zhengxing, ZHOU Chao, et al. Design and Implementation of a Magnetically Actuated Miniature

Robotic Fish [J]. FAC Papers Online. 2017, 50(1):6851-6856.

[13] 赵博,张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

[14] ZOU G, JIAN X, WU C. Evaluation of factors that affect rutting resistance of asphalt mixes by orthogonal experiment design. [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2017, 10(3):S1996681416300785.

(责任编辑 周江川)