

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.012

# 高能破冰弹水下破冰过程数值模拟\*

史兴隆<sup>①②</sup> 王呼和<sup>①②</sup> 佟 铮<sup>①②</sup>

①内蒙古工业大学材料科学与工程学院(内蒙古呼和浩特,010051)

②内蒙古工业大学爆破工程研究所(内蒙古呼和浩特,010051)

[摘 要] 以黄河凌汛期采用爆破法破冰防凌为背景,利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了高能破冰弹水下破冰动态响应模型,对高能破冰弹在侵彻冰盖瞬间弹体各部位的应力分布、弹体引信延期时间以及弹体在水下爆炸破碎冰盖过程等主要破冰参数进行了数值模拟,并在黄河破冰防凌现场进行了相同当量药包的模拟破冰试验。模拟试验显示药包放置在水下 4.5 m 左右对冰盖破碎范围最大。研究结果可为高能破冰弹弹体的优化设计与利用迫击炮发射高能破冰弹进行黄河爆破法破冰排凌作业提供理论支持。

[关键词] 高能破冰弹;水下破冰;弹体;侵彻冰盖;模拟试验

[分类号] TV875

## 引言

利用 82 型迫击炮发射破冰弹进行破冰作业是目前黄河凌汛期人工破冰采用的主要手段。该破冰方式具有机动灵活、适用范围广、成本低等优点,在历次排凌抢险中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。但目前使用的军事迫击炮弹,具有弹体质量小、装药比低、飞片多、无法侵彻冰盖、破冰能力差等不足,不适用于黄河破冰。佟铮等<sup>[2]</sup>结合黄河凌汛期破冰抢险的实际情况,重新设计了破冰弹的结构。该弹体凸显“大头弹”体的结构特征,弹体装药为 18 kg,最大发射距离可达 1 500 m,弹体有质量大、装药比高、飞片少、侵彻冰盖能力强,水下破冰效果好等优点。

本文在水下破冰机理研究的基础上<sup>[3-6]</sup>,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元数值分析软件对高能破冰弹体侵彻冰盖时的应力状态、穿透冰盖时间以及水下破冰过程进行了数值模拟。并利用当量药包在水下不同深度起爆时破碎冰盖的范围进行了现场模拟试验。

## 1 数值模拟

### 1.1 有限元模型

图 1 为高能破冰弹破冰过程数值计算模型,由弹丸、冰盖、空气和水组成。弹体模型如图 2 所示。弹体和冰盖采用八节点六面体实体单元,弹体使用拉格朗日算法的映射单元网格划分;冰盖、空气与水介质网格划分成正六面体欧拉单元,单元算法使用

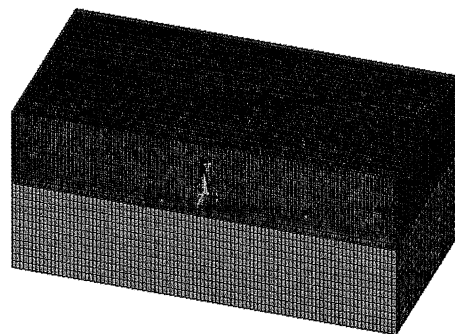


图 1 总体模型  
Fig. 1 Global model

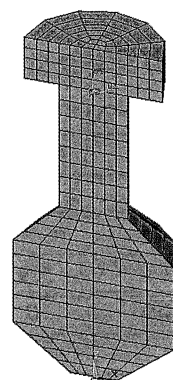


图 2 弹体模型  
Fig. 2 Bomb model

多物质 ALE 算法。弹体、冰盖与空气和水介质之间使用流固耦合算法,弹体与冰盖之间使用 Eroding Surface to Surface(面-面侵蚀)算法。由于总体模型

\* 收稿日期:2014-01-09

基金项目:水利部公益性专项资助项目(201201080)

作者简介:史兴隆(1976~),男,硕士,讲师,主要从事工程爆破方面研究。E-mail:416769538@qq.com

通信作者:佟铮(1955~),男,教授,主要从事工程爆破及爆炸加工方面研究。E-mail:13009509192@163.com

的对称性,建立了 1/2 模型,并加对称约束,将冰盖及水面自由面施加无反射约束,水底定义为无反射边界。

## 1.2 材料本构

由于弹体材料为普碳钢,故选用随动强化模型。其本构关系可由 Cowper-Symonds 模型来考虑<sup>[7]</sup>:

$$\sigma = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + BE_p \varepsilon_p). \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为屈服应力; $\sigma_0$  为初始屈服应力; $\dot{\varepsilon}$  为应变率; $C$  和  $p$  为材料应变率参数; $\varepsilon_p$  为有效塑性应变; $E_p$  为塑性硬化模量; $B$  为材料的硬化参数。钢的性能参数见表 1。

表 1 钢的性能参数

Tab. 1 Property parameters of steel

$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\rho_s/(\text{g} \cdot \mu\text{m}^{-3})$	$\sigma_s/\text{GPa}$
210	0.27	7980	235
$G/\text{GPa}$	$C$	$p$	$B$
81	100	10	0.26

注: $E$ -弹性模量; $\mu$ -泊松比; $\rho_s$ -密度; $G$ -切变模量。

现场模拟试验选择在黄河的开河阶段,此时的冰体平均温度约为  $-6^\circ\text{C}$ ,冰盖的力学性能与低温冰体存在一定差异,表现出明显的韧性特征<sup>[8]</sup>。鉴于目前 LS-DYNA 材料库中无冰体损伤模型,本文在陶瓷模型的基础上建立了与冰体损伤特征相似的本构模型,模型的参数数值选取尽可能与模拟试验时  $-6^\circ\text{C}$  的冰盖力学性能参数接近一致,具体如表 2 所示。

表 2 冰体材料模型参数<sup>[9]</sup>

Tab. 2 Material parameters of ice body model

$A$	$B$	$C$	$M$	$N$	$\dot{\varepsilon}$
0.93	0.088	0.003	0.35	0.77	1.0
$\sigma_b/\text{GPa}$	$\sigma_1/\text{GPa}$	$\sigma_e/\text{GPa}$	$p/\text{GPa}$		
0.15	0.3	5.95	2.92		
$\varepsilon$	$\sigma_2/\text{GPa}$	$D_1$	$D_2$		
0.02	4.5	0.053	0.85		

注: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $M$ 、 $N$  均为材料常数; $\dot{\varepsilon}$  为参考应变率; $\sigma_b$  为拉伸强度; $\sigma_1$  为断裂应力; $\sigma_e$  为 HEL 弹性极限; $p$  为 HEL 压力; $\varepsilon$  为 HEL 体积应变; $\sigma_2$  为 HEL 强度; $D_1$ 、 $D_2$  为损伤系数。

在实际计算过程中规定,如果冰体的抗拉强度达到 3 MPa 时,冰体材料失效<sup>[10]</sup>。从理论上讲,其等效应力应表达为:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*). \quad (2)$$

式中: $\sigma_i^*$  为材料无损伤时的强度; $\sigma_f^*$  为材料完全损伤断裂时的强度; $D$  为总体损伤。

$$\sigma_i^* = A(p^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\varepsilon}). \quad (3)$$

式中: $p^*$  和  $T^*$  为标准化压力和抗拉强度,其余参数意义同上。

$$\sigma_f^* = B(p^*)^M(1 + C \ln \dot{\varepsilon}). \quad (4)$$

由于损伤量  $D$  是由压力和时间的增量而积累的量,即

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f}. \quad (5)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$  为体积应变增量; $\varepsilon_f$  为断裂应变,其余参数意义同上。所以

$$\varepsilon_f = D_1(p^* + T^*)^{D_2}. \quad (6)$$

## 1.3 侵彻瞬间弹体应力分布数值模拟

数值模拟所采用的弹体质量 25 kg,弹体与冰盖接触时的初速度 62.60 m/s,图 3 所示为弹体刚刚接触冰盖时,冰盖和弹体所受的压应力分布图。从图 3 中可看出,冰盖中的应力波以球面波的形式传播,压应力在弹体与冰盖接触点最高(图中红色区域),达到了 12.6 MPa 左右,并随着应力波半径的增加而衰减,这符合应力波的衰减规律。同时可看到弹体中的应力在与冰盖接触处最大。在模拟过程中,只要能够确定弹体初始速度就可以计算出弹丸作用冰盖时的应力波范围、数值以及弹体中的应力分布,进而确定弹体各部位的强度。

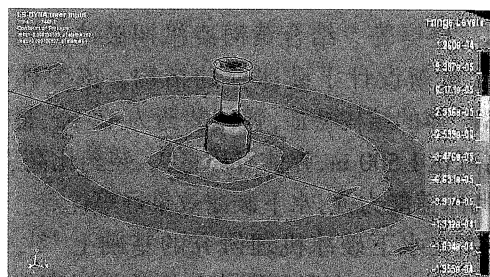


图 3 弹体侵彻冰盖瞬间应力分布云图

Fig. 3 Stress distribution of bomb subject to ice sheet penetration

## 1.4 穿透冰盖时间数值模拟

图 4 为弹体穿过冰盖侵入水介质时模拟结果。从图中可以看出,弹体进入水介质,并使其与冰盖产生相互作用,使冰盖中弹丸穿过的部分与母体分离。

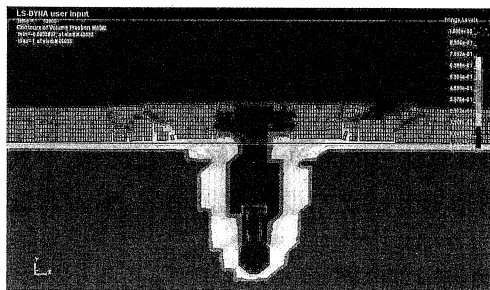


图 4 弹体侵彻水介质最终状态

Fig. 4 Final state of bomb penetrating water medium

随着弹体的深入,这种分离程度将不断增大,并使冰盖表面产生贯穿裂纹发育,其破坏范围继续扩大。

图 5 为弹体速度与时间曲线,从曲线中的速度波动可知,8 ms 以前基本以 62.60 m/s 的速度垂直向下在空气中运行,大约在 8 ms 时刻与冰体相撞,使其速度有所波动,并在 23 ms 左右进入水介质中。从曲线中可看出,在 100 ms 计算结束时刻弹体速度已接近 1 m/s。通过弹体速度波动和模拟结果,可确定在弹体进入水介质 77 ms 后将到达水下 3 m 左右的位置。这对确定破冰弹水下爆炸引信的延期时间给予理论支持。

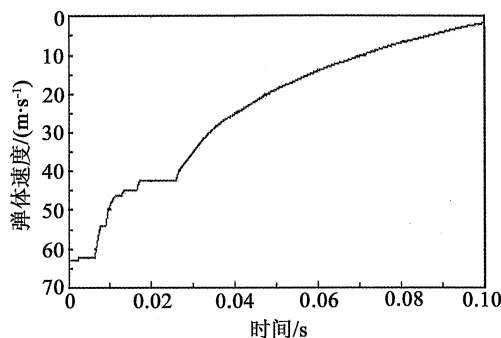


图 5 弹体的速度与时间曲线

Fig. 5 Velocity verse time curve of bomb

### 1.5 破碎冰盖过程有限元数值模拟

理论上弹体距水面越深,爆炸后对冰盖的作用范围越大。但弹体爆炸后爆轰波在水中的传播能量随距离呈几何级数下降,深度太大,则破碎冰盖能力反而降低。因此,弹体应在水下一定的深度范围内起爆。图 6 为 18 kg 装药弹体置于水下 3 m 处爆炸过程数值模拟,其中图 6(a)为弹体起爆 760  $\mu\text{s}$  时刻水中应力波的传播截图。从图中可看出,以起爆点为中心,应力波以球面波的形式传播,其最大应力总是在应力波前端。图 6(b)为 2 038  $\mu\text{s}$  时刻,应力波传播到冰盖底面并与冰盖碰撞发生反射时的应力分布。反射回的应力波衰减幅度较大,这是由于冰盖底面吸收了一定的冲击波能量。与此同时,冰盖表面由于受到拉应力的作用而产生破裂效果。图 6(c)为 3 239  $\mu\text{s}$  时刻,应力波传播后期,应力波衰减较严重,由于定义无反射边界,一部分应力波已经传播出水域。同时,应力波的传播以及水的不可压缩性,使冰盖裂纹进一步发育,失效单元增多,最终达到一定的冰盖破碎范围。

### 2 水下破冰模拟试验

依据高能破冰弹体装药当量,在黄河现场进行模拟试验,是评判弹丸可能破碎范围的定量分析依据。试验期间正处于黄河的融冰开河期,冰体平均

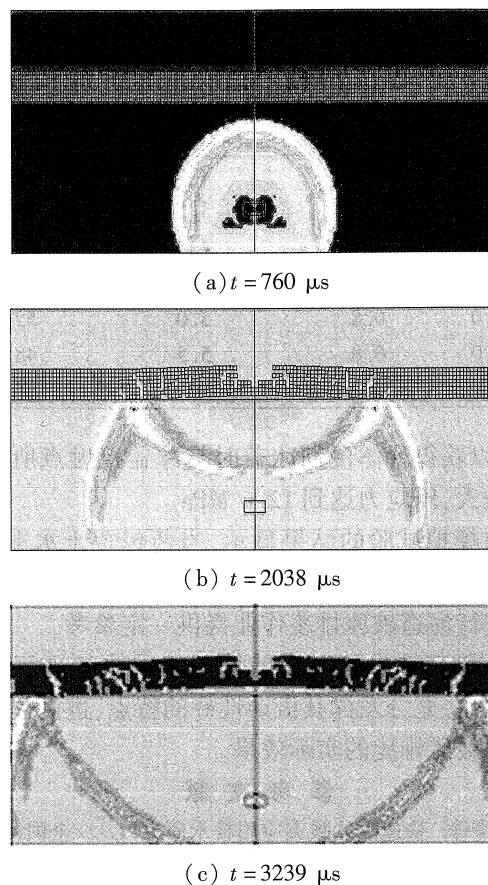


图 6 弹体水下爆炸破碎冰盖过程数值模拟

Fig. 6 Numerical simulation of underwater ice breaking

温度约为  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验首先利用聚能弹预开孔,而后再在水下放置药包,水下药包装药为 18 kg 乳化炸药,药包分别悬于水下不同位置。图 7 为现场模拟破冰试验照片,图 7(a)为药包水下起爆瞬间的照片,图 7(b)为药包起爆后破冰效果的照片,试验数据见表 3。

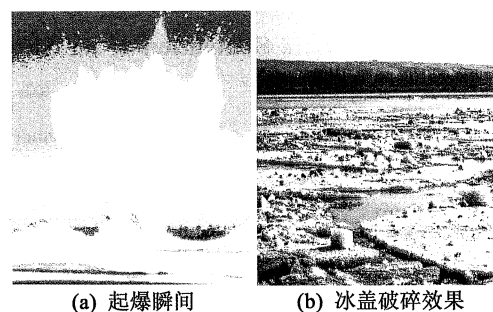


图 7 水下药包破碎冰盖效果照片

Fig. 7 Outcome of ice sheet breaking

从表 3 的试验数据可以看出,当药包的放置深度增加时,冰盖的破坏直径随之增大,并在水下 4.5 m 处达到最大值,而后破坏直径随着深度的增加而减小。

### 3 结论

1) 通过高能破冰弹体侵彻冰盖有限元数值模

表 3 模拟试验数据统计

Tab. 3 Data statistics of simulation test

药包质量/ kg	冰厚/ m	药包离冰底面 距离/m	破坏直径/ m
18.0	0.8	3.0	44.0
18.0	0.8	3.5	47.0
18.0	0.8	4.0	50.0
18.0	0.8	4.5	54.0
18.0	0.8	5.0	52.0
18.0	0.8	5.5	48.0
18.0	0.8	6.0	40.0

拟,可以获得弹体侵彻冰盖时与冰盖接触点所受的应力最大,压应力达到 12.6 MPa。

2)模拟试验的结果显示,当药包置于水下 4.5 m 左右时破冰效果最佳,这些参数将为利用高能破冰弹进行河道破冰排凌作业提供一定参考。

3)研究结果可对目前使用的破冰弹进行弹体参数优化,充分发挥其机动性好的特点,进而提高离岸远程破冰排凌的实际效果。

#### 参 考 文 献

- [1] 佟铮. 快速破冰减灾应用技术研究[C]//全国河道破冰减灾技术研讨会文集. 郑州:水利部黄河水利委员会黄河水利研究院,2010:63-91.
- [2] 佟铮,马万珍,王宁. 黄河凌汛期高能破冰弹的初步设计[J]. 爆破器材,2004,33(4):34-37.  
Tong Zheng, Ma Wanzhen, Wang Ning. The primary design of the high-power ice-breaking bombs on the ice run of Yellow River[J]. Explosive Materials, 2004, 33(4):34-37.
- [3] 闫世春,佟铮,王呼和,等. 冰体标准爆破漏斗试验研究与数值模拟[J]. 工程爆破,2011,17(1):12-14.

- Yan Shichun, Tong Zheng, Wang Huhe, et al. Experimental study and numerical simulation on standard blasting crater of ice[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(1):12-14.
- [4] 佟铮,杨旭升,薛培兴. 黄河冰凌爆破机理研究[C]//中国爆破新技术Ⅲ;第十届全国工程爆破学术会议. 2012:57-66.
- [5] 邢永明,佟铮,王呼和. 水下成组药包爆炸作用下冰盖动态响应数值模拟[J]. 实验力学,2010,25(3):299-304.  
Xing Yongming, Tong Zheng, Wang Huhe. Numerical simulation of ice cover dynamic response subjected to group charge underwater explosion [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(3):299-304.
- [6] 王呼和,佟铮,邢永明,等. 无限冰介质中爆炸裂纹扩展机理与数值模拟[J]. 实验力学,2009,24(5):493-498.  
Wang Huhe, Tong Zheng, Xing Yongming, et al. Expansion mechanism and numerical simulation of the explosion crack in an infinite ice medium [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(5):493-498.
- [7] 尚晓江,苏建宇,王化峰,等. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [8] 王金峰. 河冰力学性能及其对桥墩撞击力的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [9] Holmquist T J, Johnson G R. Response of boron carbide subjected to high-velocity impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8):742-752.
- [10] Petrovic J J. Review Mechanical properties of ice and snow[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(8):1-6.

### Numerical Simulation of Ice Sheet Breaking by Underwater High-energy Bomb

SHI Xinglong<sup>①②</sup>, WANG Huhe<sup>①②</sup>, TONG Zheng<sup>①②</sup>

①College of Material Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology ( Inner Mongolia Huhhot, 010051)

②Blast Engineering Institute, Inner Mongolia University of Technology (Inner Mongolia Huhhot, 010051)

[ABSTRACT] The dynamic response model was established using large-scale finite element software ANSYS/LS-DYNA for the ice breaking process by high-energy icebreaking bomb as the routine approach to ice prevention during the ice flood season of the Yellow River. Numerical simulation were carried out on stress distribution within the bomb at the moment of ice sheet penetrating, the delay time of bomb detonator and the floating ice sheet breaking process by underwater bomb. The on-site trial tests for ice sheet breaking and ice prevention at the Yellow River were conducted using the bomb with same explosive equivalent. It shows the largest ice sheet breaking scale when the bomb is placed 4.5 m underneath the bottom of floating ice sheet. The study can provide theoretical support for the optimized design of high-energy icebreaking bomb and ice breaking operation for ice sheet breaking and ice prevention at the Yellow River.

[KEY WORDS] high-energy icebreaking bomb; underwater ice breaking; projectile body; penetrating ice sheet; simulation test