

装药位置对冰凌爆破效果影响的数值模拟^{*}

冯 彬 方 向 毛益明 郭 涛 李德林
解放军理工大学工程兵工程学院(江苏南京,210007)

[摘 要] 目前对冰凌的定点爆破方式主要有水下药包爆破、冰中钻孔爆破及冰上裸露药包爆破,使用大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了 3 种爆破方式冰层中压碎区及裂隙区的生成过程,对冰层的破坏半径、碎冰的飞散特点和水中冲击波强度进行了定量比较分析,分析结果显示水下药包爆破破坏半径是其他爆破方式的 1.2 至 2.0 倍,生成水中冲击波强度是其他爆破方式的近 14 倍。数值模拟结果与以往工程实践相互印证,对爆破法防凌具有一定参考意义。

[关键词] 淡水冰体 损伤断裂模型 水中冲击波 数值模拟

[分类号] TV542

引言

凌汛是河道封冻后冰盖对水流约束增强产生阻力而引起的江河水位明显上涨的水文现象。冰凌聚集成冰塞或冰坝,造成水位大幅抬高,最终漫滩或决堤,形成凌洪。在冬季的封河期和春季的开河期,都有可能形成凌汛。黄河防凌工作是我国冬春季防汛工作的头等大事,我国政府多年来均对此非常重视,为破冰防凌投入了规模巨大的人力物力^[1-4]。

目前采用的爆破法破凌的手段主要有飞机投弹轰炸、火炮射击、气垫船载人定点爆破等方法。综合起来,目前对冰凌实施定点爆破分解的方式可归结为 3 种:1) 冰层中钻孔,将装药布设在冰层内爆破(即冰层内钻孔爆破);2) 冰面上裸露药包爆破法;3) 将装药布设在冰层下方的水介质中实施爆破(水下药包爆破)。

本文以 ANSYS/LS-DYNA 为工具,建立了 3 种不同爆破方式的数值模型,量化分析了 3 种爆破方式的爆破效果及爆破次生危害效应等。

1 有限元模型及材料参数

1.1 几何模型

炸药、水、空气、冰层均采用实体单元(Solid 164)建立单层实体网格模型,这种方法在充分利用实体单元算法的同时,又可较好地简化模型。模型尺寸如图 1,取模型左下角为原点,其中炸药模型尺寸为 12cm × 12cm × 2cm,水体尺寸为 1500cm × 150cm × 2cm,空气尺寸 1500cm × 50cm × 2cm,冰层尺寸 1500cm × 40cm × 2cm。炸药位置随爆破方式不同而变化:水下药包爆破方法中炸药上表面距冰

层 50cm;冰内钻孔爆破时炸药上表面距冰层上表面 14cm;冰上裸露药包爆破时炸药紧贴冰层上表面放置。炸药、水体和空气 3 种材料采用欧拉网格建模,单元采用多物质欧拉(ALE)算法,冰层采用拉格朗日网格建模,冰层与水体和空气材料间采用耦合算法。在中心起爆条件下,可将模型简化为平面对称模型,建立 1/2 模型,并在对称面 yz 上施加对称约束。考虑到爆破区域与整个冰层区域相比较小,在炸药爆破远端的水体、空气和冰层上建立透射边界,即冲击波在模型边界处不会反射,近似为无限域。

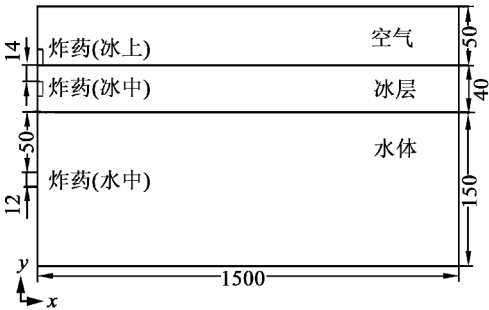


图 1 冰层爆破几何模型(单位:cm)

1.2 炸药本构模型及参数

对 TNT 炸药采用 JWL 状态方程^[5],JWL 状态方程定义压力 p 为相对体积 V 和单位初始能量 E 的函数,即

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中: p 为爆轰产物的压力; V 为相对体积; E 为单位

^{*} 收稿日期:2012-03-22
作者简介:冯彬(1988~),男,硕士,主要从事爆炸力学研究。E-mail:sd1837030@163.com
通讯作者:方向(1965~),男,博导,教授,主要从事爆炸力学研究。E-mial:fx26134@yahoo.com

体积炸药内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为材料参数。

TNT 炸药的 JWL 状态方程参数如表 1 所示。 ρ_0 为炸药密度,其余参数同方程(1)。

表 1 TNT 炸药参数^[6-10]

参数	A_1 / GPa	B_1 / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa	ρ_0 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
TNT	132	0.439	5.3	1.2	0.21	0.32	900

1.3 冰层本构模型及参数

对冰层使用 JOHNSON_HOLMQUIST 损伤模型^[11],利用其损伤断裂准则,可以较好地模拟其 在高应变速率下的裂纹扩展现象。完整材料的单轴失 效强度表示为:

$$\sigma^* = A(p^* + T^*)^n \left[1 + C \ln \left(\frac{d \varepsilon_p}{dt} \right) \right] \tag{2}$$

式中: A 、 C 、 n 为材料常数; t 为时间; ε_p 为塑性应变; σ^* 为标准化应力; p^* 为标准化压力; T^* 为标准化拉 力。 σ^* 、 p^* 和 T^* 分别定义为:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{HEL}}}; p^* = \frac{p}{p_{\text{HEL}}}; T^* = \frac{T}{\sigma_{\text{HEL}}} \tag{3}$$

式中: σ_{HEL} 为弹性极限应力; p_{HEL} 为弹性极限压力。

冰层材料参数如表 2 所示。其中 A 、 B 、 C 、 M 、 N 为材料系数; D_1 、 D_2 为损伤系数。

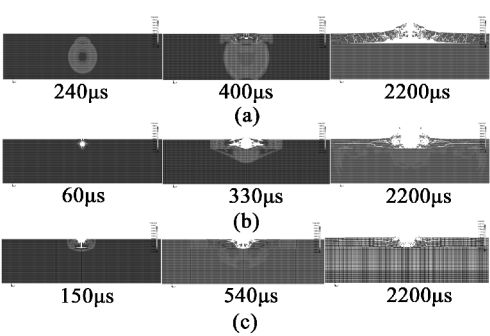
2 数值模拟结果及分析

2.1 主要结果数据

图2中显示了使用ANSYS/LS-DYNA对3种爆破 破冰方式的数值模拟结果,可以清楚地看到,炸药 爆轰产生的冲击波在介质中的传播过程及冰中压碎 区与裂隙区的形成过程。在 2200 μs 时,水中及冰 层中冲击波已退化为弱波,裂纹停止扩展。

2.2 模型可信度验证

表 3 为模型各主要参数计算结果。将水下药包 爆破模拟结果与文献中的破冰实验相比较:段元胜 等人采用一级岩石乳化炸药,单孔药量 2 kg,装药沉



(a) 水下药包爆破;(b) 冰中钻孔爆破;
(c) 冰上裸露药包爆破

图 2 不同爆破方式下冰层破坏方式

深 0.5 m,冰厚 0.7 m,爆破半径 3 m^[12];王璐采用 TNT 炸药,单孔药量 5 kg,装药沉深 1.7 m,冰厚 0.6 m,爆破半径 3.75 m^[13];本模型采用 TNT 炸药,单孔 药量 2.8 kg,装药沉深 0.5 m,冰厚 0.4 m,爆破半径 4.45 m。经比较,模型结果与实际爆破结果基本相 符,在此模型基础上,不改变基本几何模型,对 3 种 装药位置爆破的效果进行相互比较是具有一定实际 价值的。

2.3 爆破效果

从爆破破坏半径来看,若定义爆破产生空腔边 界距冰层对称中心最远点的 x 坐标为压碎区半径 r , 爆破产生裂隙距冰层对称中心最远点的 x 坐标为裂 隙区半径 R ,水下药包爆破方式、冰中钻孔装药爆 破方式和冰上裸露药包爆破方式压碎区及裂隙区半径 分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 及 R_1 、 R_2 、 R_3 ,则根据数据有:

$$r_1 > r_2 > r_3$$
$$R_1 > R_2 > R_3$$

水下药包爆破破坏半径是其他爆破方式的 1.2 ~2.0 倍。水下药包爆破效果优于冰上裸露药包爆 破的结论在工程实践中也得到了验证。如段元胜等 人在文章中提到,药包放置在冰面,其爆破效果远 不如药包放置在冰盖下的爆破效果好^[12]。殷怀堂

表 2 冰材料参数^[6]

参 数	A	B	C	M	N	拉伸强度/ GPa	断裂应力/ GPa	弹性极限/ GPa	弹性极限压力/ GPa	D_1	D_2
冰	0.93	0.88	0.003	0.35	0.77	0.015	0.0003	5.95	2.92	0.053	0.85

表 3 模型各主要参数计算结果

装药位置	压碎区半径 r_i/m	裂隙区半径 R_i/m	y 方向最大速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	y 方向最大位移/ cm	水中冲击波最大压力/ GPa
水下药包	1.19	4.45	250.64	45.68	3.23
冰中钻孔装药	0.98	3.71	1202.90	91.33	0.51
冰上裸露药包	0.61	2.21	93.36	5.33	0.38

等人也提到,药包设在水下起爆要比冰面起爆的破冰效果更为明显^[14]。而冰中钻孔装药爆破效果与其他方式的比较在各种文献中鲜有提及,但可以通过理论分析对此结果加以解释。

从裂纹的形成方向来看,水下药包爆破方式裂隙区多为沿 y 轴上下贯通的斜向、纵向裂纹,冰中钻孔装药爆破方式裂隙区多为沿 x 轴发展的横向裂纹,而冰上裸露药包爆破方式裂隙区形成裂纹很少且多为横向裂纹。

理论分析不同爆破方式破坏半径及生成裂纹方向不同的原因有:

1) 冰上裸露药包爆破方式,由于与冰层接触面积有限,其爆破能量大部分都以空气冲击波及热耗散的形式消耗,而冰中钻孔装药爆破其能量利用率相比冰上裸露药包爆破高出许多,故 $r_2 > r_3$, $R_2 > R_3$ 。

2) 水下爆破方式具有独特性。水的密度大,可压缩性小,这就使得水中冲击波的初始压力比在空气中大得多,TNT 装药在水中爆破产生的冲击波初始压力能达到空气中初始冲击波压力 100 倍以上。水中音速极高,当压力下降到约为 25 MPa 时,波阵面上的压力虽有相当大的数值,但波阵面的传播速度实际上已经接近音速。水中冲击波在较远区传播的这种压力高、衰减相对缓慢的特性,使得距装药较远处水与冰层接触面上的压力仍然很高,因此水下药包爆破方式中冰层的破坏半径在 3 种爆破方式中最大。

3) 若以冰层正中心为坐标原点,冰上裸露药包爆破及冰中钻孔爆破爆点在 y 轴上均距原点较近,形成的爆轰波及冲击波波阵面基本与 x 轴垂直,因此冰层中最大压应力方向为 x 方向,冰体在 x 方向受压,其切向拉应力的拉断效应使冰层中形成横向裂纹。而水下装药因为距冰层有一定距离,产生的冲击波波阵面与冰层接触面有一定角度,最大压应力方向与 y 轴正方向成较小锐角,其切向拉应力的拉断效应使冰层中易形成上下贯通的斜向、纵向裂纹。

4) 水下爆破过程中,冲击波在水体中由下至上向冰层中传播,冰层上表面与空气接触,近似为自由表面,在自由表面附近更容易形成层落现象,加大冰层的破碎程度。且冰层下水体介质与冰层上方空气介质的压力差,更有利于水下爆破过程冰层中纵向裂纹的形成。

2.4 爆破产物飞散程度

在爆破施工中,除了爆破效果的优劣,爆破过程

中产生次生危害的大小也是决定选择使用何种爆破方式的重要因素。破冰过程中爆炸抛起的碎冰是主要爆破次生危害之一,若处理不当,会对周边人员、交通工具、重要建筑物等造成不可挽回的损失。

以冰层各计算单元在 2000 μs 时, y 轴方向的最大位移和最大速度 2 个指标作为爆破产物飞散程度的判据。在 2000 μs 时,冰层与水体中冲击波已退化为弱波,炸药的爆炸对碎冰不再有推动作用,即碎冰只在重力作用下运动,故此时刻取这 2 个指标判断爆破产物飞散程度是较妥当的。

从表 3 中看到,冰中钻孔装药爆破产物 y 方向最大位移是水下药包爆破产物 y 方向最大位移的 2 倍,是冰上裸露药包爆破产物最大位移的 17.1 倍;冰中钻孔装药爆破产物最大速度是水下药包爆破产物最大速度的 4.8 倍,是冰上裸露药包爆破产物最大速度的 12.9 倍。冰中钻孔装药爆破产物飞散程度最大。

2.5 水中冲击波强度

水中冲击波是另一主要爆破次生危害效应^[15],过强的水中冲击波会伤害到河流中的水生生物,对当地水产养殖业及自然环境造成破坏。

从表 3 中可见,爆炸期间水下药包爆破方式产生水中冲击波峰值压力最大,达到 3.23 GPa,是冰中钻孔装药爆破方式的 6.3 倍,是冰上裸露药包爆破方式的 8.5 倍。初步看来,水下药包爆破方式造成的水中冲击波危害效应大于冰中钻孔爆破方式,更大于冰上裸露药包爆破方式。为印证这一判断,取 x 正方向 3 m,距冰层下表面 0.5 m 的一个水体单元,对比 3 种爆破方式的压力时程曲线,得到结果如图 3。

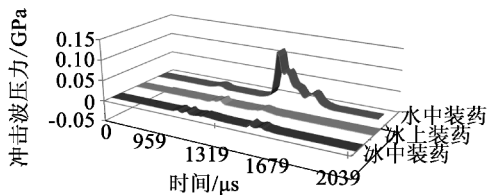


图 3 3 种爆破方式在同一水体单元的压力时程曲线
(距 y 轴 3m, 冰层下表面 0.5m)

可见,水下药包爆破方式在距 y 轴水平距离 3m 处同一点生成水中冲击波,不仅峰值压力是另外两种爆破方式的 14 倍左右,其作用时间也为另外两种爆破方式的 3~5 倍。

3 结论

使用 ANSYS/LS-DYNA 软件可以很好地模拟河面冰层的爆破过程,可以清楚地观察到冰层的破坏

过程、冰层中裂隙的形成过程及各介质中冲击波的传播。

由 3 种不同爆破方式的模拟结果看到,采用不同爆破方式得到的爆破效果及产生的爆破次生危害不尽相同,在不同时机、环境下应灵活选用不同爆破方式^[16],总结如下:

1) 水下药包爆破方式爆破半径及爆破碎度最好,其爆破效率在 3 种方式中最高,但其产生的爆破产物飞散程度较大,且水中冲击波强度是其他爆破方式的数倍,适于在空旷无人的地区和非渔区实施爆破。

2) 冰中钻孔装药爆破方式爆破效果中等,其爆破产物飞散程度最大,不宜在重要建筑物如桥梁、水坝附近实施爆破,但其水中冲击波强度较小,适合于在对水中冲击波强度要求较高而对爆破产物飞散程度要求不高的地区实施。

3) 冰上药包爆破方式的爆破效果在 3 种方式中最差,但其对周边次生危害较小,且操作作业方便,对设备要求较低,适于对小范围冰凌实施快速应急爆破。

参 考 文 献

- [1] 蔡琳. 中国江河冰凌[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008.
- [2] 翟家瑞. 黄河防凌与调度[J]. 中国水利, 2007(3): 34-37.
- [3] 冯国华. 黄河内蒙古段冰凌特征分析及冰情信息模拟预报模型研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [4] Rădoane M., Ciaglic V., Rădoane N. Hydropower Impact on the Ice Jam Formation on the Upper Bistrita River, Romania[J]. Cold Reg. Sci. Technol., 2010, 60(3): 193-204.

- [5] 周向阳. 炸药在土壤内部爆炸作用的数值分析[J]. 爆破器材, 2011, 40(6): 12-14, 18.
- [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.
- [7] 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.
- [8] Hallquist J. O. LS-DYNA theory manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [9] Akba-Mousavia S. A. A., Barrett L. M., Al-Hassani S. T. S. Explosive Welding of Metal Plates[J]. J. Mater. Process. Technol., 2008, 202(1-3): 224-239.
- [10] Holmquist T. J., Johnson G. R. Response of Boron Carbide Subjected to High-velocity Impact[J]. Int. J. Impact Eng., 2008, 35(8): 742-752.
- [11] Cronin D. S., Bui K., Kaufmann C., et al. Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-DYNA[C]. 4th European LS-DYNA Users Conference. Ulm, Germany, 2003.
- [12] 段元胜, 汪向红, 刘书宝, 等. 冰凌爆破技术探讨[J]. 冰川冻土, 2003, 25(增 2): 220-226.
- [13] 王璐. 冰体动力特性及爆炸响应分析[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2011.
- [14] 殷怀堂, 杨学海, 江森, 等. 冰凌下水中延长药包爆破破冰的试验研究[J]. 工程爆破, 2010, 16(3): 12-15, 27.
- [15] 郭涛, 冯彬, 李裕春, 等. 不同起爆方式对水下深孔爆破危害效应影响的数值模拟[J]. 爆破器材, 2012, 41(1): 29-31.
- [16] 胡勇, 韩顺波. 大规模冰水堆积体钻爆施工技术初探[J]. 四川水力发电, 2010, 29(6): 152-153, 155.

Numerical Simulation of Ice Blasting Affected by Different Charge Positions

FENG Bin, FANG Xiang, MAO Yiming, GUO Tao, LI Delin

Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] In the practice of fixed-point ice blasting, charge can generally be placed in three ways: beneath, in the middle and on the top of ice. Each forming process of crush zone and crack zone in ice by the three ways was simulated numerically using large-scale finite element software ANSYS/LS-DYNA. Quantitative analysis about damage radius, distributing degree of crushed ices and strength of shock wave in water were performed among the three methods of blasting. The results show that when charge is placed under water, the destructive radius is 1.2 to 2.0 times larger and the strength of shock wave in water is about 14 times higher than those in other methods. The results of numerical simulation in combination with previous engineering practices can provide a reference for ice blasting.

[KEY WORDS] freshwater ice, model of damage and fracturing, shock wave in water, numerical simulation