

文章编号: 1001-4888(2010)03-0299-06

水下成组药包爆炸作用下冰盖动态响应数值模拟^{*}

邢永明, 佟铮, 王呼和

(内蒙古工业大学, 呼和浩特 010051)

摘要: 利用大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了成组药包水下爆炸冰盖动态响应模型, 通过数值计算, 得到了冲击波峰值压力变化规律, 峰值压力与理论计算结果基本吻合。本文分析了冰盖在成组药包水下爆炸冲击载荷下的应力分布及垂直位移响应特征。结果表明, 冰盖迎爆面为压缩破坏, 背爆面为拉伸破坏, 两者数值均十分接近, 其中迎爆面最大压力值可达 18.12MPa, 冰盖近爆炸点最大垂直位移为 1.211cm, 两药包连线中点最小位移为 0.15cm, 达到脆性冰盖形成贯通裂隙的基本条件, 从而确定了冰盖在水下成组药包大间距布设条件下, 其动态破坏形式是以产生裂隙为主要特征。

关键词: 冰盖; 成组药包; 水下爆炸; 数值模拟

中图分类号: TB41

文献标识码: A

0 引言

成组药包水下爆炸, 是黄河冰盖网格切割爆破的重要作业方式。利用水作为传压介质进行冰盖水下成组间隔布药爆炸破冰, 是防凌爆破工程基础理论研究的重要内容, 但这方面的研究工作开始得很晚。早期根据实验数据得到了一些半经验半理论公式, 但难以揭示水下爆炸切割冰盖作业的本质^[1]。由于冰盖不同于其他固体介质, 它具有非均匀性、各向异性、应变速率及温度敏感性等特点, 所以要准确描述冰盖水下爆炸冲击载荷下的动态响应特征是一个极其复杂的过程。而且, 由于试验设备、测试手段的局限性, 还不能对水下爆炸切割破冰盖作用过程进行全场测量。因而, 成组药包水下爆炸切割冰盖过程的数值模拟就显得尤为重要。近年来, 随着计算机硬件及计算方法的逐步完善, 数值计算取得了长足的进步, 已成为分析爆炸作用过程的三个基本手段之一^[2]。本文以黄河凌汛期爆炸破冰减灾作业为背景, 通过成组药包水下爆炸形成冰盖贯通裂隙的作用效果, 实现冰盖网格状切割分离目的。在实际作业中, 这种爆破作业方法可使完整冰盖有序分割成一定尺寸的块状冰凌, 并使其在上游水流动力作用下向下游运动, 以实现疏通河道, 达到防凌减灾的目的。本文利用大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行了成组药包水下爆炸破冰数值模拟, 计算了水下冲击波峰值压力以及冰盖垂直位移分布特征。通过与试验数据进行比较, 综合评定了成组药包水下爆炸对冰盖冲击载荷的响应特征。

1 水下爆炸破冰数值模型

图 1 是根据试验数据建立的成组药包水下爆炸切割冰盖的数值模型, 其模型介质由炸药、水、空气和冰盖组成。图 1(a) 为总体模型、图 1(b) 为包含炸药的垂直截面模型。总体模型尺寸为 3000cm×1500cm×1000cm, 水域尺寸为 3000cm×1500cm×800cm、空气域 3000cm×1500cm×200cm(含冰盖厚

^{*} 收稿日期: 2009-09-09; 修订日期: 2009-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 50869004); 内蒙古自治区社会发展领域资金项目 2008

通讯作者: 王呼和(1983-), 男, 硕士, 助教, 主要研究领域: 爆炸力学。E-mail: youxia825@163.com

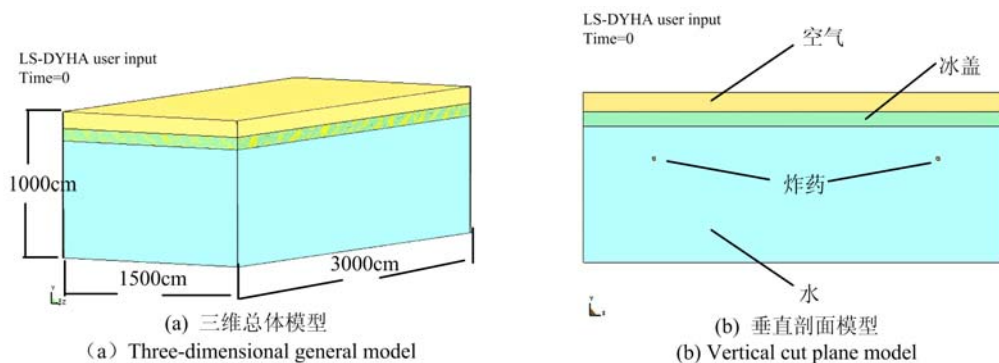


图 1 水下爆炸数值模型

Fig. 1 Numerical model of under water explosion

度 85cm)、炸药包 15cm×15cm×15cm, 质量为 4000gTNT, 药包间距 2000cm、药包距冰层底面 200cm, 水、空气、炸药均采用正六面体欧拉单元划分网格, 单元使用多物质 ALE 算法, 冰盖长度尺寸为 3000cm×1500cm×85cm, 采用正六面体拉格朗日网格和算法, 冰体与空气和水材料间采用流固耦合算法。

在实际建模过程中, 一般以相对沉深 H' (即装药沉没深度 H 与装药半径 r 之比) 和相对水深 d' (水深 d 与装药半径 r 之比) 来判断自由面对水下爆炸的影响, 即 H' 和 $d' \geq 5 \sim 10$ 时, 可以认为自由面对水中传播压力值没有影响^[3]。本次模拟中, 模型中自由面相对沉深 $H' = 20.2$, 相对水深 $d' = 53.3$, 水下冲击波值基本上不受自由面反射的稀疏波的影响, 冲击波仍保持球对称峰面。因此, 为了避免模型过于庞大, 可以忽略水介质自由面对爆炸冲击的影响, 流场边界定义为无反射边界。

试验冰盖温度为 -6°C , 冰体力学特征为脆性介质, 这与相同温度下陶瓷材料性能相近^[4]。因此, 文中选用 LS-DYNA 中陶瓷材料模型近似冰盖材料模型, 其参数值如表 1 所示。其等效应力表达式为:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$

其中, σ_i 为完整材料强度 (无损伤时); σ_f 为材料断裂强度 (完全损伤); D 为总体损伤。

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

其中, A 、 N 、 C 为材料常数; P^* 和 T^* 为标准化压力和抗拉强度; $\dot{\epsilon}$ 为应变率。

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (3)$$

式中, B 、 M 、 C 为材料常数, 其余如上所述。

值得注意的是, 损伤量 D 是由压力 and 时间的增量而积累的量, 即:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_P}{\epsilon_f}, \quad \Delta D = \frac{\Delta \epsilon_P}{\epsilon_f} \quad (4)$$

式中, $\Delta \epsilon_P$ 为体积应变增量; ϵ_f 为断裂应变。

$$\epsilon_f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad (5)$$

式中, D_1 、 D_2 为损伤系数。

表 1 冰盖材料模型参数^[5]

Tab. 1 Parameters of ice model

参数	A	B	C	M	N	参考应 变率 (EPSI)	拉伸 强度 GPa	断裂 应力 GPa	弹性 极限 (HEL) GPa	HEL 压力 GPa	HEL 体积 应变	HEL 强度 GPa	D_1	D_2
冰盖	0.93	0.088	0.003	0.35	0.77	1.0	0.15	0.3	5.95	2.92	0.02	4.5	0.053	0.85

2 数值模拟结果

2.1 水中冲击波超压值

在数值模拟中, 水下爆炸冲击波的计算与药包炸药量、网格的密度、人工体积粘性等参数的选择有

密切的关系。在参阅了大量文献和试验数据后,本文数值计算参数选取如下:4000g TNT 炸药、5cm 网格、粘性系数 $Q_1=1.5$, $Q_2=0.01^{[6]}$ 。模拟过程中,选取了起爆点到模型底面 6 等分的点,输出其每一点的压力峰值与时间曲线。计算结果如图 2 所示。

为了验证数值模拟结果,采用了较为经典的库尔水下爆炸冲击波和比冲量 I 的经验计算公式^[7],其具体形式如下:

$$p_m = k \left(\frac{m_e^{1/3}}{R} \right)^\alpha, \quad I = m_e^{1/3} \left(\frac{m_e^{1/3}}{R} \right)^\beta \quad (6)$$

式中, p_m 为冲击波峰值压力; m_e 为装药量; R 为离爆心距离; α, β, k 为经验系数,对于 TNT 炸药 $\alpha=1.3$, $\beta=0.89$, $k=52.27\text{MPa}$ 。

冲击波压力—时间的函数关系为:

$$P = p_m e^{-t/\theta} \quad (7)$$

式中,时间衰减常数 $\theta = \frac{l}{k} m_e^{1/3} \left(\frac{m_e^{1/3}}{R} \right)^{\beta-\alpha}$; 经验系数 $l=5768\text{Ns/m}^2$ 。

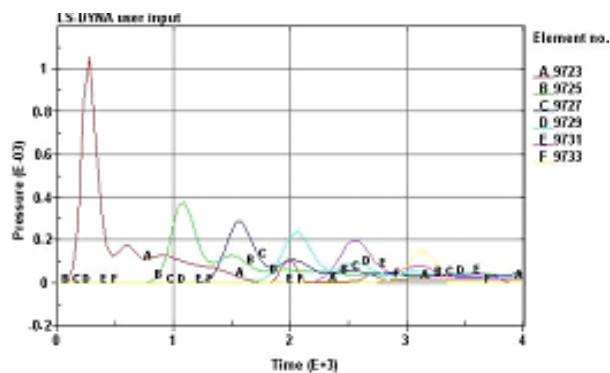


图2 压力时间曲线

Fig.2 Pressure of history

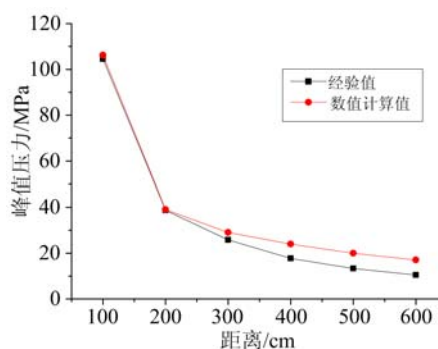


图3 数值计算与计算值比较

Fig.3 Comparison of numerical value and computational value

利用公式(6)和(7)计算了起爆点到模型底面依次相距 100cm 的 6 个等分点的冲击波峰值压力,并与图 2 模拟值进行比较,结果如图 3 所示。从图 3 可看出,在距爆炸点 $\leq 200\text{cm}$ 处,公式(6)、(7)计算值与数值计算值十分接近;远离爆炸点 $\geq 300\text{cm}$ 区域,数值计算值比公式(6)、(7)计算值要高。两者对比结果显示,数值模拟过程能够较准确的反映冰盖所受的爆炸冲击载荷,这对分析冰盖在爆炸冲击载荷下的动态响应特征提供了理论研究依据。

2.2 冰盖动态响应分析

数值计算中,由于分析冰盖近爆点破碎过程对冰盖切割爆破作业的指导意义不大,并且前期建模及运算过程十分复杂,故本文数值计算中不涉及单元破碎过程。

图 4 和图 5 为 $4000\mu\text{s}$ 时刻,冰盖迎爆面(冰盖下表面)与冰盖背爆面(冰盖上表面)的应力分布。从图中可看出,由于水下药包产生的爆炸冲击载荷以球面波传播,故冰盖应力分布以垂直于爆心位置为圆心,由内向外逐渐减小。冰盖迎爆面为压缩破坏,背爆面为拉伸破坏,两者数值均较为接近,其中迎爆面压力值可达 18.12MPa ,这个数值大大超过了冰体强度极限^[1]。因此,从两图中可以准确计算出冰盖迎爆面压应力和冰盖背爆面的拉应力分布,并结合冰体抗压强度与抗拉强度,对冰盖破坏形式进行了有效判定。

图 6 显示了 $4000\mu\text{s}$ 时刻冰盖垂直方向位移云图,由于受到高压爆炸生成气团膨胀对水的压缩和球面冲击波的共同作用,冰盖下爆炸点处位移最大,并随着距爆炸点距离的增大而逐渐减小,明确显示出能量以二次方的规律进行衰减的特征^[1]。冰盖近爆炸点处冰盖最大垂直方向位移处为 1.211cm ,两药包连线中点最小处为 0.15cm 。图 7 为 $4000\mu\text{s}$ 时刻,利用 lsprepostd 后处理器进行切割处理的药包连线位置处垂直剖面图。从图中可清晰看出炸药爆炸在水中形成的爆生气团大小和水介质对冰盖推动作

用而形成冰盖的垂直位移,并可定量的获得水介质在总体模型中的体积百分比。与图 6 进行对比可获得冰盖垂直运动范围及垂直位移大小,此时所产生的局部冰盖垂直方向位移,足以使脆性冰盖产生裂隙破坏^[1]。图 8 为成组药包爆炸破冰试验现场。图 9 显示出药包连线中点位置,由于冰盖垂直位移而产生贯通裂隙的现场试验结果照片。

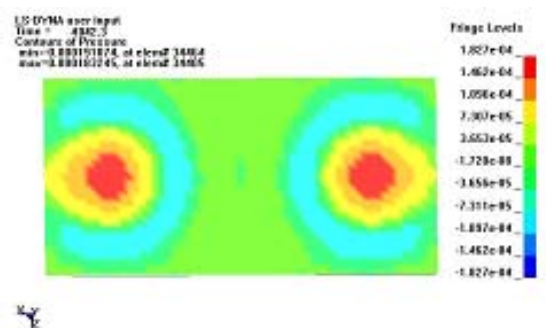


图 4 冰盖迎爆面压力分布

Fig. 4 Distribution of pressure at anti-blast

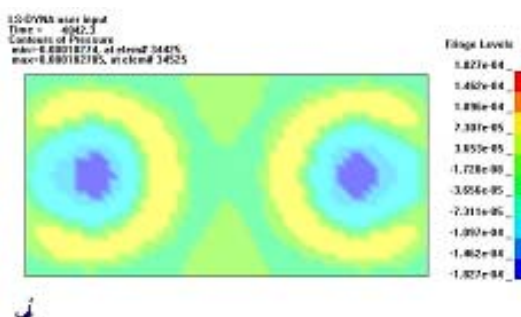


图 5 冰盖背爆面压力分布

Fig. 5 Distribution of pressure at back-blast

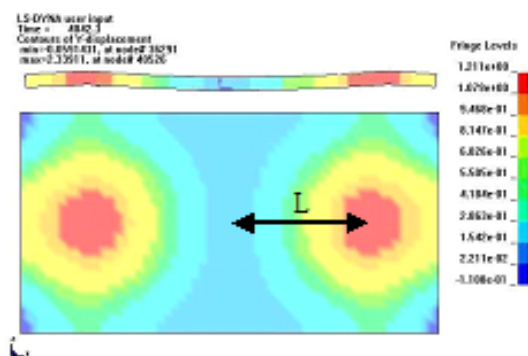


图 6 冰盖表面 y 方向位移分布

Fig. 6 Distribution of y-axis displacement

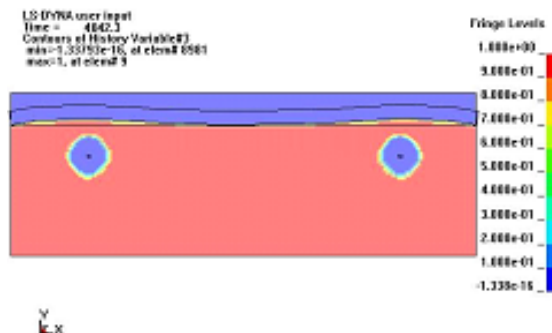


图 7 药包连线处垂直剖面图

Fig. 7 Sectional view on the link of powder chamber



图 8 成组药包水下爆炸试验现场

Fig. 8 Testing site of group charge explosion



图 9 冰盖在两爆炸点中心处产生的贯通裂隙照片

Fig. 9 The through crack photograph of ice cover

将水下药包爆炸点与冰盖中心点距离 L (如图 6 所示) 分成 6 等分, 输出其每一点的时间位移曲线如图 10 所示, 从图中可看出, 冲击波大约在 $1200\mu\text{s}$ 时刻传播到冰盖下表面, 冰盖下爆破点处首先开始产生直线上升位移, 随着距离的增大, 冰盖其它质点垂直位移逐渐减小, 直至运动终止。综上所述, 可较清楚地判断出只要冰盖垂直方向产生位移, 其冰盖局部位移运动的最终破坏形式是冰盖的裂隙形成。

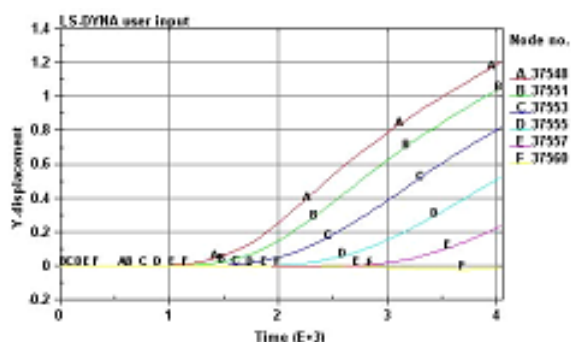


图10 时间位移曲线

Fig. 10 Displacement of history

3 结论

(1) 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立了水下爆炸破冰数值模型,进行了水下爆炸数值计算,峰值压力与计算结果基本吻合,能够较准确的反映冰盖所受的爆炸冲击载荷,并对冰盖动态响应特征给出了初步的理论计算依据。

(2) 通过计算冰盖迎爆面及背爆面的应力分布可确定出冰盖的基本破坏形式。在 4000gTNT 装药条件下,迎爆面为压应力,背爆面为拉应力,前者最大值达到了 18.12MPa。

(3) 利用模型可计算出冰盖下方爆炸点处呈现最大垂直位移,其值为 1.211cm。两药包连线中点处最小位移为 0.15cm。根据水下爆炸冲击波与爆炸生成气团共同作用原理,确定了冰盖垂直方向运动趋势和位移分布特征。

(4) 试验结果与数值模拟结果基本吻合。在本数值模拟的试验条件下,水下成组药包爆炸产生的冰盖破坏形式,是以冰盖产生贯通裂隙为主要特征的,这对冰盖切割爆破作业提供了重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 佟铮,马万珍,曹玉生. 爆破与爆炸技术[M]. 北京:中国人民公安大学出版社,2001:193-209 (Tong Zheng, Ma Wanzhen, Cao Yusheng. Blast and Explosion Technology[M]. Chinese People's Public Security University Press, 2001:193-209(in Chinese))
- [2] 王伟力,曾亮,朱建方. 水下爆炸的数值模拟研究现状[J]. 海军航空工程学院学报,2006,21(2):209-216 (WANG Weili, ZENG Liang, ZHU Jianfang. Summary of present research situation of numerical simulation on underwater explosion[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21(2): 209-216(in Chinese))
- [3] 余晓菲,刘土光,张涛. 水下爆炸载荷作用下加筋圆柱壳的响应分析[J]. 振动与冲击,2006,25(5):106-115 (Yu Xiaofei, Liu Tuguang, Zhang Tao. Response Analysis of Cylindrical Shell Subjected to Underwater Explosion Shockwaves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(5): 106-115(in Chinese))
- [4] 王金峰. 河冰力学性能及其对桥墩撞击力的研究[D]. 东北林业大学,2007:5-14 (Wang JinFeng. Research on Mechanics Characteristic and It's ImPinge on Pier of River Ice [D]. Northeast Forestry University, 2007:5-14(in Chinese))
- [5] Holmquist T J, Johnson G R. Response of boron carbide subjected to high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(6): 742-752.
- [6] 丁宁,余文力,王涛. LS-DYNA 模拟无限水介质爆炸中参数设置对计算结果的影响[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(2):128-130 (DING Ning, YU Wenli, WANG Tao. Influence of Parameter Setting on Simulation Result for Underwater Explosion by LS-DYNA[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(2): 128-130(in Chinese))
- [7] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987:152-160 (J. Henrych. The Dynamics of Explosion and It's Use[M]. Xiong Jian Guo, Beijing: Science Press, 1987: 152-160(in Chinese))

Numerical Simulation of Ice Cover Dynamic Response Subjected to Group Charge Underwater Explosion

XING Yong-ming, TONG Zheng, WANG Hu-he

(Inner Mongolia University of TechnologyInner Mongolia, Huhhot 010051, China)

Abstract: Group charge underwater explosion model was established, numerical calculation was carried out, and the shock-wave peak pressure in ice medium was obtained based on the large-scale finite element software ANSYS/LS-DYNA. The peak pressure value is consistent with the theoretical calculation value. Response characteristics of ice cover stress distribution and perpendicular displacement were analyzed. Results show that the ice covered surface head on explosion is subjected to compression failure, and the rear surface is subjected to tensile failure. Both values are close to equal and the maximum pressure on the surface head on explosion has reached 18.12MPa. The maximum perpendicular displacement of ice cover nearest the blast point is 1.211cm, and the minimum displacement on the surface where is corresponding the projective point of the midpoint of two charges connecting line is 0.15cm, which reaches the basic condition of the ice cover brittleness. It is confirmed that the main dynamic damage characteristics of ice cover subjected to group charge underwater explosion are the crack generation.

Keywords: ice cover; group charge; underwater explosion; numerical simulation