DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0089-05

水中钢板爆破水介质对装药量的影响*

姜 涛,詹发民,周方毅,马贵义
(海军潜艇学院,山东 青岛 267011)

摘要:为分析水介质对水中钢板爆破装药量的影响,理论推导了钢板背衬水介质条件下,钢板爆破最小装药量与空气中钢板爆破最小装药量的倍数关系:最小倍数关系为 3.76。数值计算了钢板背衬空气介质和背衬水介质情形下钢板爆破的最小装药量,其倍数关系在 3.5 左右,与理论结果相近,表明钢板背衬水介质或空气介质是决定装药量大小的关键因素。数值计算了装药在空气介质中及水介质中钢板爆破爆轰产物对钢板的冲量大小,结果接近,表明水介质对炸药爆轰产物的约束作用是影响水中钢板装药量的次要因素。

关键词:爆炸力学;水介质;水下爆破;装药量;接触爆破
中图分类号:O382.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

水中接触爆破与空气中接触爆破有许多共同之处,例如,爆破对目标的作用主要是爆轰产物的作用,对目标的破坏属于局部破坏等。水中接触爆破与空气中接触爆破的不同之处在于空气的密度小,对爆破的影响可以忽略不计,而水的密度比空气大得多,水的密度与装药的密度和破坏目标的密度属于同一个数量级,对爆破影响较大,不能忽略。一般认为,水介质对爆破的影响是双重的。一方面,水介质阻碍爆轰产物飞散,延长了爆轰产物对目标的作用时间,增大了对目标的作用;另一方面,也阻碍目标被破坏部分发生位移,增强了目标对爆轰产物的抵抗力[1-3]。在实际工程应用中,水中爆破钢板有时钢板全在水中,有时钢板一面在水中,一面在空气中;装药也会根据需要布设在水中,或是布设在空气介质中。那么根据钢板和炸药所在介质的不同,可以将钢板爆破分为以下 4 种情形:

(1)炸药与钢板均在空气中(记为:空气/空气);

(2)炸药与钢板均在水中(记为:水/水);

(3)钢板一侧在水中,一侧在空气中,炸药在空气中(记为:水/空气);

(4)钢板一侧在水中,一侧在空气中,炸药在水中(记为:空气/水)。

由于水介质对爆轰产物的约束作用以及水介质对钢板运动的阻碍作用,4 种情形钢板爆破需要的最小装药量应该有所不同。已经有相关研究理论上推导了上述 4 种情形钢板爆破最小装药量之间的关系。随着数值计算方法的发展和计算机性能的提升,有限元数值计算方法已经成为研究水下爆破技术的重要手段。本文中应用 AutoDyn 有限元数值计算软件,主要计算钢板背衬空气介质和水介质条件下,爆破炸穿钢板所需的最小装药量之间的关系。对钢板背衬水介质阻碍钢板运动对钢板爆破最小装药量的影响进行数值计算结果与理论推导结果的比较。

1 理论推导

钢板背衬水介质时,在爆炸造成对钢板穿孔的过程中,与钢板接触的一定范围内的水一同与破坏部分参与了运动,这就是与钢板背衬空气介质爆破不一样地方。

接触爆破背衬水介质时,钢板后获得运动速度的水的范围,约为钢板爆破震落漏斗在水中扩大到距离为 h_c 的范围,如图 1 所示,根据实验得出[1,4],$h_c=20h$ (h 为钢板厚度)。也就是说,装药爆破钢板不但要使钢板震落漏斗获得速度,还要使钢板震落漏斗后范围为 h_c 的水介质同样获得速度。那么接触爆

* **收稿日期**:2013-06-28;**修回日期**:2013-11-27
第一作者:姜 涛(1979—),男,博士,讲师,374375340@qq.com。

破背衬水介质条件的钢板，要获得与背衬空气介质同样大小的冲量，需要使钢板连同水介质一起获得的冲量应为钢板背衬空气介质条件下的

$$1+\frac{\rho_c h_c}{\rho h}=3.56\text{ 倍} \tag{1}$$

式中：ρ 为钢板密度，ρ_c 为水的密度。这表明：钢板背衬水介质时，爆破所需要的装药量是钢板背衬空气介质爆破所需装药量的 3.56 倍。

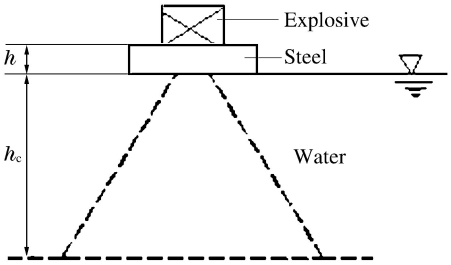

图 1 水获得运动速度的范围

Fig. 1 Range of water movement

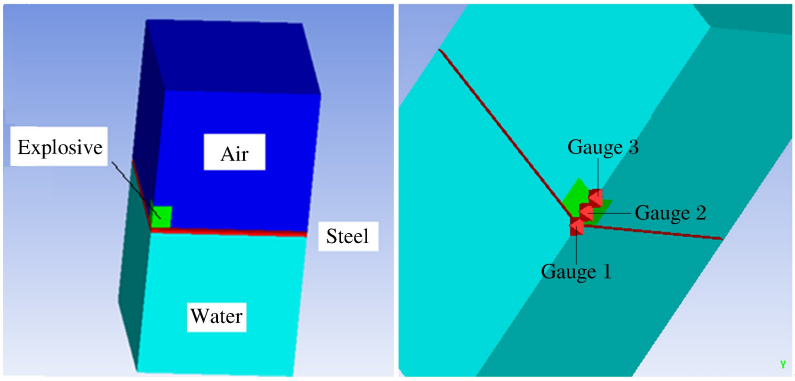

图 2 有限元模型及测试点设置

Fig. 2 FEM model and gauge position

2 数值计算

2.1 有限元模型

有限元模型包括水、空气、TNT 炸药以及钢板，如图 2 所示。根据钢板背衬水介质及空气介质的不同，分别建立钢板背衬水介质和空气介质的有限元模型。炸药布设于空气介质中。基于模型的对称性，建立 1/4 模型。模型中的水、空气、炸药采用欧拉网格划分，钢板为 shell 单元网格。单元网格划分大小为：欧拉网格大小为边长 1 cm 的六面体，shell 网格大小为边长 2 cm 的四边形，shell 单元的厚度为 1 cm。模型中的水、空气、炸药、钢板(S4340 钢)的材料模型和状态方程参数均采用 AutoDyn 软件自带材料模型参数[5-7]。



图 3 空气介质中爆破钢板实验及爆破效果

Fig. 3 Setup and result of demolish steel plate experiment

为了检验有限元模型，首先应用 200 g TNT 药块爆破背衬空气介质条件下的钢板，并与数值计算结果进行了比较，以验证模型中的材料参数。实验结果与数值计算结果较为吻合。图 3 为 200 g TNT 药块在空气介质中爆破时钢板实验设置及爆破效果图，图 4 为应用 AutoDyn 软件的数值计算结果。

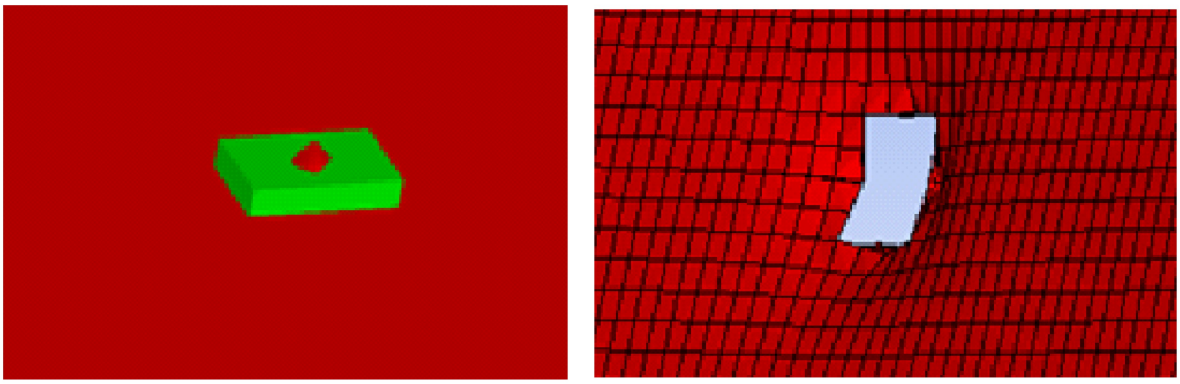

图 4　空气介质中钢板爆破数值模拟结果

Fig. 4　Numerical simulation result of demolish steel plate

2.2　数值模拟结果

主要分析钢板背衬水介质对钢板爆破装药量的影响。为便于比较，炸药的横截面为正方形，边长为 12 cm。钢板背衬水介质和背衬空气介质 2 种情形中，炸药高度均从 2 cm 开始逐渐增加，直至钢板炸穿。得到炸穿背衬水介质和背衬空气介质钢板所需的最小装药量。钢板背衬空气介质钢板爆破所需最小装药量的数值模拟结果如图 5(a)所示，钢板背衬水介质钢板爆破所需最小装药量的数值模拟结果如图 5(b)所示。

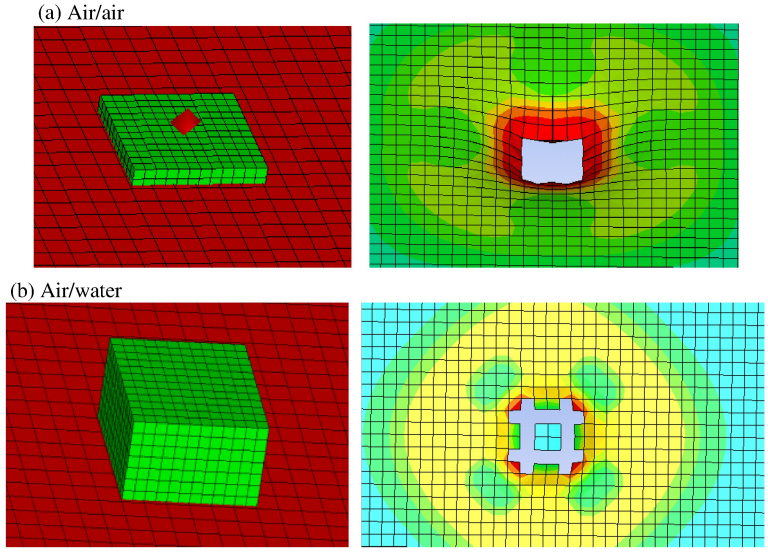

图 5　钢板背衬水介质和背衬空气介质最小装药量及钢板爆破结果

Fig. 5　Results from FEM simulation for two models with steals backing water and air respectively

2.3　数值模拟结果分析

数值模拟结果表明，钢板背衬水介质与钢板背衬空气介质炸穿钢板所需最小装药量的倍数关系为 3.5 倍(7∶2)，与理论分析的结果 3.76 倍接近。钢板背衬介质为水时，水介质对钢板的阻碍作用对装药量的影响，理论分析的结果与数值模拟结果一致。为进一步说明水介质对钢板运动的阻碍作用，分析同等装药量(装药高度 14 cm)炸穿钢板后，钢板破片在水介质中和空气水介质中的初始飞行速度。钢

板背衬水介质，钢板破片的运动速度为 200 m/s，如图 6 所示；而钢板背衬空气介质，钢板破片的运动速度为 600 m/s，如图 7 所示。可见，水介质对钢板运动起到的阻碍作用是不容忽视的。

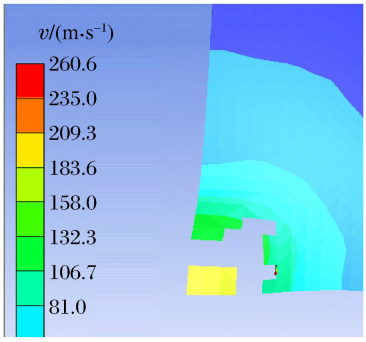

图 6 背衬水介质钢板破片速度

Fig. 6 Velocities of steel fragment backing on water

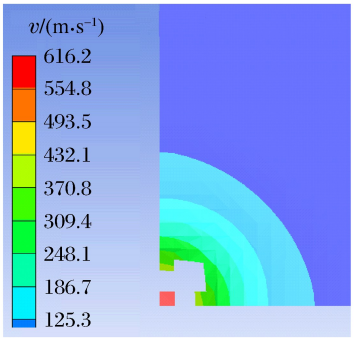

图 7 背衬空气介质钢板破片速度

Fig. 7 Velocities of steel fragment backing on air

水介质除阻碍钢板运动外，还对爆轰产物具有约束作用。水介质的存在限制了径向稀疏波向装药内部的扩展，使装药端面单位面积冲量增加。冲量的增加体现在哪个表面受到约束，哪个表面的单位面积冲量就增加，而对其他表面冲量的增加影响不大。所以，水对爆轰产物的约束作用对于作用于钢板上的冲量影响不大。而对作用于钢板上冲量的影响主要是钢板自身的约束，所以装药在水中和空气中爆炸，对作用于钢板上的冲量影响很小。这一结论通过炸药分别在水中和空气介质中爆炸时测点 1～3（图 2）的冲量时间历程曲线可以验证。炸药在空气中爆炸（见图 8(a)）与炸药在水中爆炸（见图 8(b)）时测点 1（贴近钢板的测点）的冲量大小基本相等；炸药在水介质中爆炸时测点 2～3 的冲量大于炸药在空气介质中爆炸时测点 2～3 的冲量。可见，水介质对爆轰产物的约束作用对钢板爆破装药量计算影响不大。

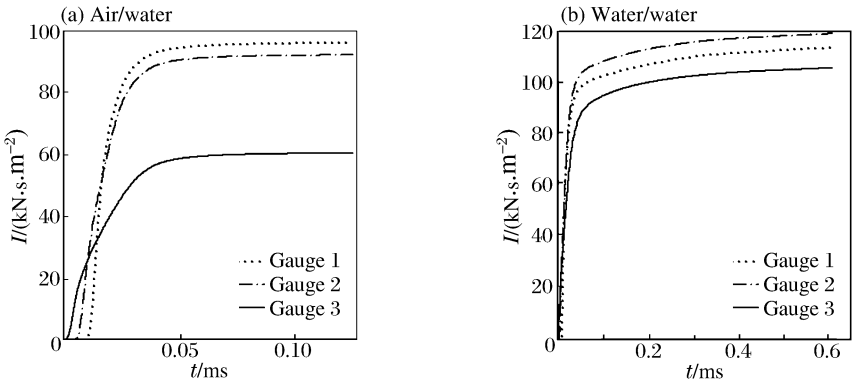

图 8 测试点冲量时间历程曲线

Fig. 8 Impulse curves at different measuring points

3 结 论

理论分析得到钢板背衬水介质和背衬空气介质条件下，爆破钢板最小装药量的倍数关系为3.76倍。应用有限元数值计算方法，计算得到钢板背衬水介质和背衬空气介质条件下爆破钢板最小装药量的倍数关系为 3.5 倍，理论分析与数值计算结论较为接近，验证了水介质的存在对钢板爆破最小装药量的影响。在水下钢板爆破装药量计算时，应充分考虑钢板背衬介质的影响，钢板背衬水介质时，装药量应为钢板背衬空气介质的 3.5 倍左右。钢板背衬水介质对钢板运动的阻碍作用是影响钢板爆破装药量计算的首要因素。同时数值计算了水介质对爆轰产物约束作用对钢板获得冲量大小的影响，结果表明，水介质对爆轰产物的约束作用对钢板获得冲量大小影响不大。

参考文献：

[1] 齐世福. 炸药及爆炸作用[M]. 南京：解放军理工大学出版社，2004.
[2] 叶序双. 爆炸作用基础[M]. 南京：解放军理工大学出版社，2001.
[3] 陈刊，齐世福，冯伟涛. 沉船清障中矩形截面直列装药作用研究[J]. 中国水运，2011，11(2)：133-134.
[4] Wood S L. Cavitation effects on a ship-like box structure subjected to an underwater explosion[D]. USA：Naval Postgraduate School，1998.
[5] 姜涛，由文立，张可玉，等. 水中爆炸表面空穴的理论研究[J]. 爆炸与冲击，2011，31(1)：19-24.
Jiang Tao，You Wen-li，Zhang Ke-yu，et al. Study on the thoery of bulk cavitation from underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves，2011，31(1)：19-24.
[6] Autodyn Theory Manual Version4. 3[Z]. Century Dynamic Corporation. USA，2005.
[7] Ansys AutoDyn help Manual[Z]. Century Dynamic Corporation. USA，2005.

Effects of water medium on charge mass for demolishing steel plate underwater explosion

Jiang Tao，Zhan Fa-min，Zhou Fang-yi，Ma Gui-yi
（*Navy Submarine Academy*，*Qingdao* 267011，*Shandong*，*China*）

Abstract：To study the effect of water on charge mass for demolishing steel plate，the relationship of charge mass between steel plate backing on air and backing on water is analyzed. The results show that the charge mass for backing on water is 3.68 times the charge mass for backing on air. The charge mass is calculated with FEM method for explosions with steel plate backing on air and water. The results show that the charge mass for steel plate backing on air is 3.5 times the charge mass for steel plate backing on water，which is accordant with theoretical analysis. So the medium that steel plate backs on is the key factor for determing charge mass of cutting steel plate. The impulses on steel plate are almost equal for backing on air and backing on water，which indicates that the water constraining force on the detonation products can not afeect the charge mass much.

Key words：mechanics of explosion；water medium；underwater explosion；charge mass；contact explosion

（责任编辑　曾月蓉）