

TNT 装药水中爆炸的数值模拟

庞 军

(海军驻西安导弹设备军事代表室, 陕西 西安 710068)

摘 要:采用 AUTODYN 软件对不同起爆方式下 TNT 装药水中爆炸模型进行了数值计算, 并对计算结果进行了实验验证。根据计算结果分析了中心起爆、端面中心起爆和端面起爆情况下, 在装药不同方位的水中冲击波压力峰值随距离的变化趋势。计算结果表明, 端面起爆状态下, 装药径向的冲击波压力峰值均大于端部; 中心起爆状态下, 一定距离处, 装药端面的压力峰值大于径向。改变起爆方式, 可以实现水中爆炸冲击波能量的定向增益, 提高特定方位爆炸能量利用率。

关键词:爆炸力学; 起爆方式; TNT 装药; 水中爆炸; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O383

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2009)05-0037-04

Numerical Simulation of TNT Charge Underwater Explosion

PANG Jun

(Military Representative Office of Missile Device, Xi'an 710068, China)

Abstract: TNT charges underwater explosion models by different initiating mode were simulated by AUTODYN software, and numerical results were verified by experiments. In the charge centre initiation, end center-point initiation and end surface initiating circumstances, the change trends of the underwater shock wave pressure peak at different charge azimuths with the distance were analyzed by numerical results. The results showed that in end initiation state, the shock wave pressure peak at the charge radial azimuth are greater than the end azimuths, and in centre initiation state, the shock wave pressure peak at the charge end azimuths is greater than the radial azimuth in a certain distance. Changing the initiation mode made the underwater directed destruction of explosion shock wave actualize, and the energy efficiency of a particular azimuth improve.

Key words: explosion mechanics; initiation mode; TNT charge; underwater explosion; numerical simulation

引 言

目前, 国内水中兵器多数采用中心起爆的爆破型战斗部, 其爆炸产生的冲击波能量在水中的分布基本为各向均布, 仅有极小部分作用在目标方向, 造成有效载荷的极大浪费^[1]。肖川等^[1-2]人提出了水中装药爆炸载荷的能量输出规律研究是水中爆炸的热点研究方向之一, 指出该研究对提高战斗部作用于目标的毁伤效果具有很高的军事意义和经济效益。由于水中爆炸能量输出规律研究受到水域条件和测试手段的限制, 开展公斤级以上装药的实验研究困难较大, 因此数值模拟研究是一种非常重要的研究手段之一。

AUTODYN 软件是一个显式非线性动力学分析通用有限元程序, 其包含了高精度 EULER 求解器, 对于水介质中爆炸领域有较高的计算精度, 可以精确模拟水中爆炸的冲击波作用和气泡的膨胀、压缩、溃灭等过程^[3-4]。为进一步揭示水中爆炸的能量输出规律, 深入研究起爆方式对水中装药特定方向能量的增益影响, 本研究采用 AUTODYN 软件对不同起爆方式下 TNT 装药水中爆炸产生的冲击波压力峰值进行了模拟计算, 并对计算结果进行了实验验证。

1 数值计算

1.1 计算方案

将圆柱形 TNT 装药设计了 3 种起爆方式, 分别

收稿日期: 2009-03-28; 修回日期: 2009-06-23

作者简介: 庞军(1963—), 男, 高级工程师, 从事火炸药质量监督工作。

为端面中心起爆、端面面起爆(在二维情况中设置为线起爆)和中心起爆。以 TNT 装药中心为原点,分别计算距离原点 0.5、1.0 和 1.5 m 处的压力-时间历程。方向分别为与 Y 轴 0°、45°、90°、135°和 180°夹角。计算模型见图 1。

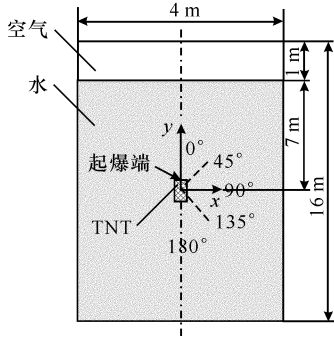


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

1.2 计算参数

1.2.1 TNT 装药

TNT 装药尺寸为 $\Phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 密度 ρ_0 为 1.56 g/cm^3 。装药中心位于水深 7 m 处。

用 JWL 状态方程^[4]描述爆轰产物:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{r}} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{r}} + \omega\eta\rho_0 E \quad (1)$$

式中: η 为相对密度; p 为压力; 其余参数为与炸药相关的常数, 其取值见表 1。

表 1 炸药的状态方程参数^[4]

Table 1 Parameters^[4] of equation of state of explosive

参数	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
数值	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	4.19

根据文献^[5], 将 TNT 的爆压设为 18 GPa。

1.2.2 水域

水域宽 4 m, 深 16 m。水采用 AUTODYN 材料库提供的 Shock 状态方程。其方程表达式^[4]为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (S - 1)\mu]^2} \quad (2)$$

式中: p 为压力; C 为 $u_s - u_p$ 曲线上的截距; S 为 $u_s - u_p$ 曲线斜率系数 (u_s 和 u_p 为物质冲击速度与粒子速度); $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$, ρ_0 为水的初始密度; ρ 为水压缩后的密度。

表 2 水的状态方程参数^[4]

Table 2 Parameters^[4] of equation of state of water

参数	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S
数值	0.998×10^3	2.2×10^3	1.921

1.2.3 空气

为了更好地描述水面的边界效应, 在水面以上建立空气域, 空气采用理想气体状态方程描述。描述参数取自 AUTODYN 软件材料库。

1.2.4 设置参数

空气边界为欧拉物质 Flow-out 流出条件边界, 水域的边界为 Transmit 无反射边界^[4]。

空气、水和炸药均采用 EULER 求解器计算。

1.3 计算结果

图 2 是装药采用端面面起爆方式起爆后 $t = 1.7\text{ ms}$ 时刻的数值计算压力云图, 图 3 是端面面起爆方式模型 90° 方向上典型距离的 $p-t$ 曲线。

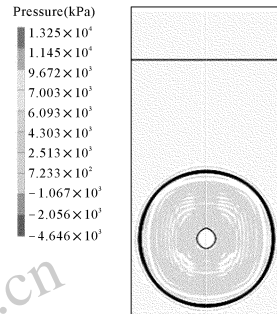


图 2 $t = 1.7\text{ ms}$ 时刻数值计算的压力云图

Fig. 2 The pressure nephogram at $t = 1.7\text{ ms}$ by numerical calculation

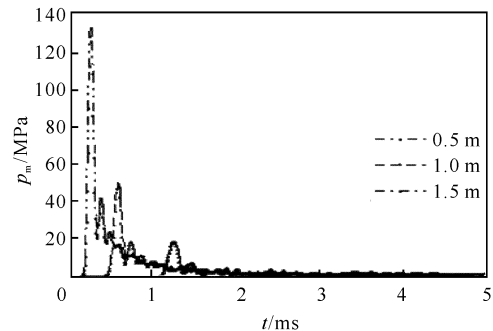


图 3 90° 方向上典型距离的 $p-t$ 曲线

Fig. 3 The $p-t$ curves at the special distances at 90 degree azimuth

2 结果与讨论

2.1 装药端面中心起爆状态下的计算结果

图 4 是装药端面中心起爆后典型距离处的计算压力峰值随方位角 (θ) 的变化曲线图。

由图 4 可以看出, 在不同距离处, 端面中心起爆情况下, 装药径向的压力峰值最大。距离装药 0.5 m 处, 装药非起爆端的压力峰值比起爆端大, 但随着距

离的增加,压力峰值下降很快,到 1.5 m 处后,压力峰值小于起爆端。随着距离的增加,各个方向的最大压力峰值具有均匀化的趋势^[1,6]。

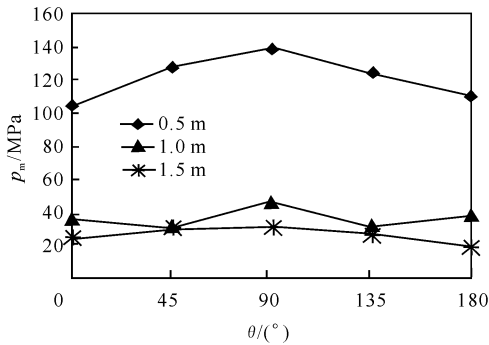


图 4 端面中心起爆后典型距离处计算的 $p_m - \theta$ 曲线

Fig. 4 The $p_m - \theta$ curves at special distances after end center-point initiation

2.2 装药端面起爆状态下的计算结果

图 5 是端面起爆后典型距离处的计算压力峰值随方位角度的变化曲线。

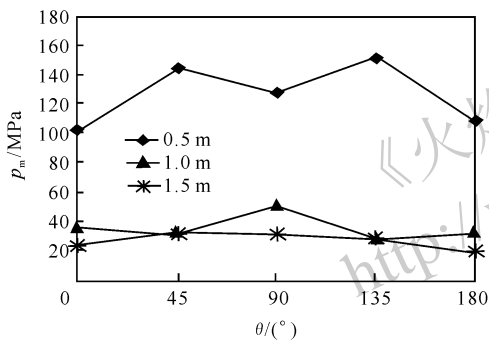


图 5 端面起爆后典型距离处计算的 $p_m - \theta$ 曲线

Fig. 5 The $p_m - \theta$ curves at special distances after end surface initiation

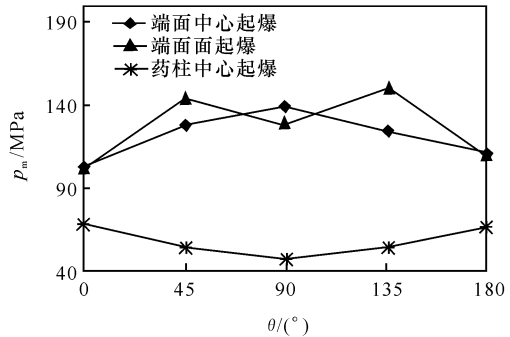
由图 5 可以看出,在不同距离处,端面起爆情况下,最大压力峰值出现在装药径向 90° 的夹角内。在装药赤道面两边各 45° 处,最大压力峰值波动很大。距离装药 0.5 m 处,装药非起爆端的压力峰值比起爆端稍大,但随着距离的增加,最大压力峰值下降很快,到 1.5 m 处后,峰值压力比起爆端低 26%。与端面中心起爆的变化趋势一致。随着距离的增加,各个方向的最大压力峰值具有均匀化的趋势。

2.3 装药端面起爆与中心起爆结果的对比

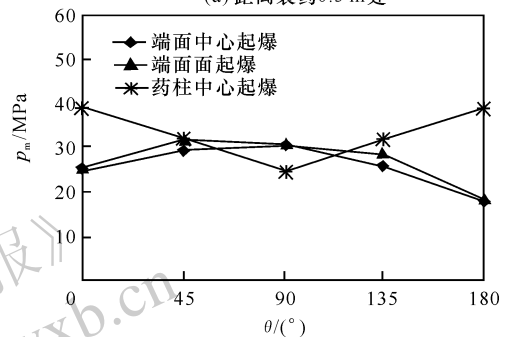
在距离装药 0.5 和 1.5 m 处,不同起爆方式下计算的峰值随角度的变化曲线见图 6。

图 6(a)是在距离装药 0.5 m 处冲击波压力峰值曲线,明显反映了装药爆轰后稀疏波的作用。根据冲击波传播机理分析,由于端面中心起爆和端面起爆均为端面起爆,其两端部均会受到稀疏波的强烈

影响,导致冲击波压力峰值低于径向;而药柱中心起爆时,在药柱中形成两束相反方向传播的爆轰波,由于爆轰从药柱中心开始,径向方向的稀疏也先明显显现,导致其径向的冲击波压力峰值相对较低。



(a) 距离装药 0.5 m 处



(b) 距离装药 1.5 m 处

图 6 不同起爆方式下计算的 $p_m - \theta$ 曲线

Fig. 6 The $p_m - \theta$ curves under different initiation way

根据图 6,装药端面中心起爆和端面起爆时相同距离处各个方向的冲击波压力峰值差别不大,装药径向的压力峰值均大于两端部,随距离的变化趋势也较一致。从爆炸冲击波压力峰值看,距离越近,径向的冲击波压力峰值较端部越大。说明端面起爆有利于提高装药径向的冲击波作用,但径向能量增益效果随距离的增大而逐渐减弱。

中心起爆方式与两种端面起爆方式相比,相同距离处各个方向的压力峰值以及其随距离的变化趋势差别均很大。在距离装药 0.5 m 距离处,装药中心起爆时各个方向的压力峰值都比端面起爆时小很多,径向的压力峰值是端面起爆时的一半。当爆炸冲击波到达距离装药 1.5 m 距离处,装药中心起爆状态的径向压力峰值明显小于端面起爆状态,而装药两端的压力峰值比端面起爆大 60%。

根据以上分析可以看出,在不同的起爆方式下,装药水中爆炸特定方向的冲击波压力峰值明显不同。对于装药中心起爆,较远距离处两端部方位的冲击波能量有明显增益;装药端面起爆状态药柱径向方位的冲击波能量有明显增益。在战斗部结构中采

用不同的起爆方式,根据不同的目标交会条件进行选择,可以达到提高目标方位爆炸能量利用率的作用。

2.4 实验验证

为了验证数值计算结果的正确性,进行了两种起爆方式的压装药柱水下爆炸实验。实验在直径为 85 m,深度约为 15 m 的人工改造水域进行。为了减弱水面和水底的影响,将药柱沉入水深 7 m 处。

TNT 药柱尺寸为 $\Phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,密度为 1.55 g/cm^3 。两发药柱分别采用端面中心起爆和端面面起爆(采用 8 点同时起爆近似为面起爆)的起爆方式。每发药柱均布放 2 组传感器,分别为距药柱中心 1.0 m 和 1.5 m,每组布放 3 枚传感器,分别在药柱 0° 、 90° 和 180° 位置,角度位置关系与图 1 中相同。水中爆炸实验典型冲击波的 p_m-t 曲线见图 7,实验值与模拟计算值见表 3。

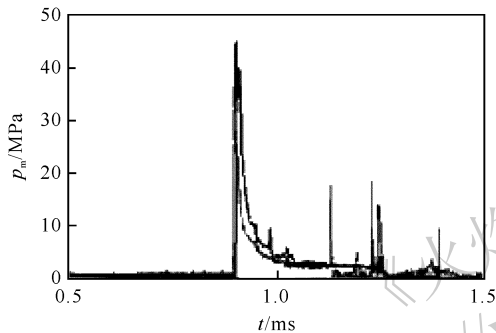


图 7 水中爆炸实验时典型冲击波的 p_m-t 曲线
Fig. 7 The p_m-t curve of typical shock wave by underwater explosive test

表 3 冲击波压力峰值实验值与模拟计算值的对比

Table 3 Comparison of the experimental values and simulated results of shock wave pressure peak

起爆方式	$\theta/(\circ)$	$p_m(1.0)/\text{MPa}$			$p_m(1.5)/\text{MPa}$		
		计算值	实验值	$\epsilon/\%$	计算值	实验值	$\epsilon/\%$
端面中心起爆	0	35.5	32.0	11	24.8	22.8	9
	90	46.4	40.8	14	30.6	28.0	9
	180	38.5	36.6	5	18.4	16.7	10
端面面起爆	0	35.2	34.2	3	25.0	22.6	10
	90	50.0	45.0	11	30.4	28.3	8
	180	32.0	29.4	9	18.4	16.7	10

由表 3 可以看出,相同状态下,模拟计算中各个位置点的数值与实验值相对误差(ϵ)最大不超过 14%,证明数值计算结果可信。

3 结 论

(1) 在端面起爆状态下,装药径向冲击波的压力峰值在不同距离处均比端部大。中心起爆状态在一定距离处,装药两端部冲击波的压力峰值将大于径向,而且比端面起爆状态在相同距离处的径向压力峰值大 60%。

(2) 改变起爆方式可以改变装药特定方位的冲击波压力峰值,对目标产生定向毁伤作用。在战斗部结构中采用多种起爆方式,根据目标交会条件进行选择,可以提高特定方位爆炸能量的利用率。

参考文献:

- [1] 宋浦,肖川,梁安定,等.不同起爆方式对 TNT 水中爆炸作用的影响[J].火炸药学报,2008,32(2):75-77.
SONG Pu, XIAO Chuan, LIANG An-ding, et al. Influence of TNT underwater explosion by different initiating mode[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 32(2): 75-77.
- [2] 肖川,宋浦,梁安定.炸药水中爆炸规律的研究进展[J].火炸药学报,2006,29(6):19-22.
XIAO Chuan, SONG Pu, LIANG An-ding. Research development of underwater explosion mechanism[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(6): 19-22.
- [3] 安世亚太. ANSYS/AUTODYN 在水下爆炸模拟中的应用[EB/OL]. http://www.idnovo.com.cn/article/2005/0802/article_50199.html.
- [4] ANSYS Inc. AUTODYN Theoretical Manual[M]. [s. l.]: ANSYS Inc, 2000.
- [5] 郑孟菊,俞统昌,张银亮.炸药的性能及测试技术[M].北京:兵器工业出版社,1990.
- [6] Cole R. Underwater Explosions[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.