

文章编号: 1001-1455(2008)06-0539-05

TNT 药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律^{*}

赵继波, 谭多望, 李金河, 曾华龙, 张远平

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 通过 TNT 药柱水中爆炸实验, 建立了利用高速相机测量水中爆炸近场冲击波的实验方法, 得到了药柱轴向的扫描图像, 并对图像进行了数字化分析; 利用 Rankine-Hugoniot 关系从冲击波的扫描轨迹求得冲击波阵面压力, 并外推至冲击波的初始压力; 用 LS-DYNA 计算了柱形装药近场压力沿轴向的衰减曲线; 用锰铜压力传感器测量了冲击波的初始压力。研究表明, 测试结果与计算结果比较符合, TNT 药柱的近场轴向压力遵循指数衰减规律。

关键词: 爆炸力学; 近场冲击波; 水中爆炸; 衰减规律

中图分类号: O389

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

对舰艇目标的精确打击基本上都是利用水中爆炸的近场作用, 水中兵器战斗部通常采用柱形装药, 端面起爆时其输出压力、能量在轴线方向上有所加强。利用水中爆炸近场特性, 为水中武器的设计、威力评估和舰艇的抗爆设计提供依据是非常必要的, 但是这个问题一度难以解决, 这是因为近场压力一般在吉帕量级以上, 而通常较敏感的压力传感器的量程都小于 1 GPa; 另外, 爆炸近场冲击波阵面与波后流场并未完全分离, 测试受干扰的可能性较大。目前, 国外研究者在水中爆炸近场中采用的测试技术主要是用分幅或扫描摄影技术获得不同时刻冲击波头数据, 从而推导出峰压衰减规律。如 H. Dorsett 等^[1]进行了含铝炸药的水箱实验, 他们利用分幅相机和扫描相机得到了非常清晰的炸药水中爆炸冲击波的阵面和轨迹; A. Kira 等^[2]利用纹影相机、分幅相机观测了 SEP 安全炸药 (PENT/石蜡 = 65/35) 和 PBX 塑基炸药在水箱中爆炸产生的冲击波轨迹; S. Itoh 等^[3]提出将扫描相机在柱形装药径向得到的冲击波轨迹数字化后结合爆轰波传播距离, 即可得到水中爆炸冲击波的实验波形。国内研究者在水中爆炸近场测试方面做的工作较少, 池家春等^[4]利用在高压范围内能有效工作的锰铜压阻压力计和 PVDF 压电压力计两种测试系统进行了 TNT/RDX(40/60) 炸药球水中爆炸冲击波研究, 对近场压力的电子学测量进行了探索, 而水中爆炸的光学测试方法在国内却鲜见报道。本文将光学高速摄影和近场压力测试结合在一起, 研究柱形 TNT 装药近场的轴向压力衰减规律。

2 实验装置及布局

实验在 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m 的水箱中进行, 爆炸装置主要由雷管、雷管套、传爆药、主装药柱、支撑架组成。雷管套、支撑架均由有机玻璃制成, 具有与水介质相近的声阻抗, 能尽量减少装置对水中冲击波的影响。所用主装药为 TNT, 由 PETN 传爆药起爆; 在雷管套的头部粘接有支撑架, 用胶将支撑架固定在水箱底部以便使装药能在水箱中部处于悬空的状态, 悬空高度为水箱高度的一半; 在雷管套的另外一侧放置有机玻璃标识板, 以便取得放大倍数和标识扫描冲击波的轨迹; 用胶将雷管及其引脚与起爆电缆的结合部密封在雷管导管内, 入水电缆具有良好的水密性。实验所用的照明设备均为氙灯。为消除炸药爆轰发光对光学测试的影响, 将炸药表面涂成黑色。炸药的物理参数及测试方法见表 1, 表中

* 收稿日期: 2007-05-11; 修回日期: 2008-01-28

基金项目: 国家安全重大基础研究基金项目(51335010201)

作者简介: 赵继波(1977—), 男, 硕士, 助理研究员。

D 为直径, l 为长度, ρ 为密度。

表 1 炸药物理参数及测试方法

Table 1 Parameters of charge and methods of test

实验编号	D/mm	l/mm	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	光测	压力测试
SX-01	60.06	66.90	1.580	轴向扫描	
SX-02	60.06	66.90	1.580	轴向扫描	
SX-03	60.16	67.00	1.580		锰铜计
SX-04	60.06	66.70	1.580		锰铜计

采用 SJZ-15 型扫描相机, 扫描速度设定为 60 kr/min (3 km/s)。药柱的轴线与高速相机光轴垂直, 并与高速相机的狭缝重合。相机狭缝位置起于药柱端面, 视场长度为 6 倍装药半径。采用氙灯线光源照明, 与狭缝平齐, 相机在炸药起爆后延迟 13 μs 开始记录。测试布局及光源如图 1 所示。

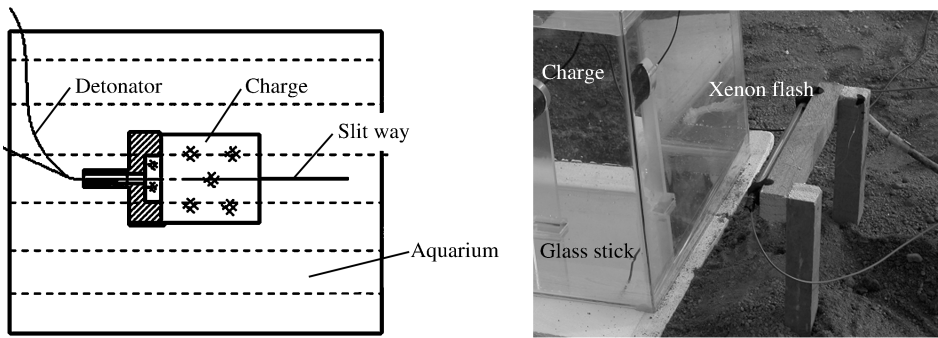


图 1 光学测试布局

Fig. 1 Layout of photic test

为了直观地得到冲击波出炸药端面时的初始压力值, 在炸药柱端面的中心位置预先粘贴一个 0.1 Ω 的锰铜计, 能测量 2 GPa 以上的压力。用聚四氟乙烯薄膜和 PS203A 胶盖住传感器及其引线, 达到防水密封绝缘的目的, 锰铜计接到低噪声高频电缆上, 采用脉冲恒流源测试系统测量。

3 实验结果

3.1 光测结果

图 2 显示了 SX-01、SX-02 两发重复性实验的扫描结果, 由图像可看出, 在相同实验状态下, 两条扫描迹线比较吻合, 实验结果的可靠性较高。图 3 显示了根据放大倍数求得的 2 发实验扫描图像的平均数字化曲线, 记录了轴向参考坐标下冲击波阵面位置随时间变化的轨迹。其中 t 表示时间, x 表示在装药轴向上冲击波偏离药柱端面的距离。

选择尽可能逼近冲击波速度随到药柱端面距离的变化关系的解析表达式, 这里采用非线性拟合曲线作为 x 方向的距离-时间函数, 其形式如下^[3]

$$\frac{x}{D} = \sum_{i=1}^n A_i [1 - \exp(-B_i t)] + \frac{c_0}{D} t \quad (1)$$

式中: A_i 、 B_i 均为拟合系数, A_i 反映冲击波强度大小, B_i 反映冲击波衰减时间长短; c_0 表示水中声速, 为 1.46 km/s; D 为炸药的爆速; 已知 TNT 密度为 1.58 g/cm^3 , 根据爆速-密度关系曲线, $D = 6.844 \text{ km/s}$ 。

(1) 式具有如下优点: 一是它的导数单调, 不会产生不合理的波动; 二是它能很好地表现冲击波在水中传播的规律。当 $t \rightarrow 0$ 时, 其导函数迅速增加, 符合爆轰产物撞击水时产生冲击波并迅速达到最大速度的物理规律, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 其导函数趋于一定值, 符合冲击波传到无穷远处后衰减为水中声速的物理规律。

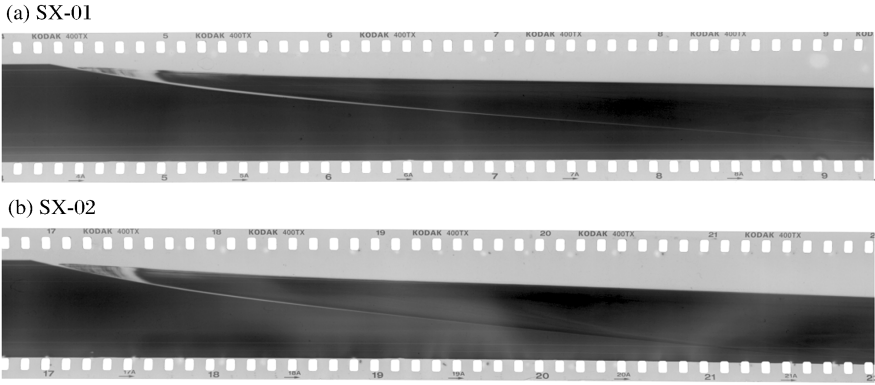


图 2 实验扫描原始图像
Fig. 2 Scanning photos

一般来说, (1)式取前两项就能非常好地拟合扫描波形的数字化曲线, 得到的系数为 $A_1 = 7.174$ 、 $B_1 = 7.521 \times 10^{-2}$ 、 $A_2 = 4.892 \times 10^{10}$ 、 $B_2 = 7.793 \times 10^{-13}$, 拟合曲线如图 3 所示。

由于相机狭缝与药柱轴线重合, 所以得到的冲击波速度可认为是波阵面上轴对称处的法向速度。通过法向速度和 Rankine-Hugoniot 关系^[5], 可以得到冲击波阵面压力

$$\begin{cases} p_s = \rho_0 u_s u_p \\ u_s = 1.483 + 25.306 \lg(1 + u_p/5.19) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_0 为水的密度, g/cm^3 ; u_s 为冲击波速度, km/s ; u_p 为冲击波后流场粒子速度, km/s 。结合 (1)式和(2)式, 可求得爆炸近场冲击波在沿药柱轴向上传播时, 冲击波速度和压力峰值随传播距离的变化规律, 如图 4(a)、(b)所示。特别地, 当 $x=0$ 时, 初始压力 $p_0 = 12.08 \text{ GPa}$ 。利用 LS-DYNA 程序计算水中爆炸近场轴线方向上的冲击波阵面压力峰值大小情况。采用 Euler 算法, 对 TNT 装药采用 JWL 状态方程, 对水介质采用 Grüneisen 方程, 端面一点起爆。得到冲击波出药柱端面的压力为 12.25 GPa , 与光测结果较为接近。轴向压力计算曲线如图 4(b)所示。

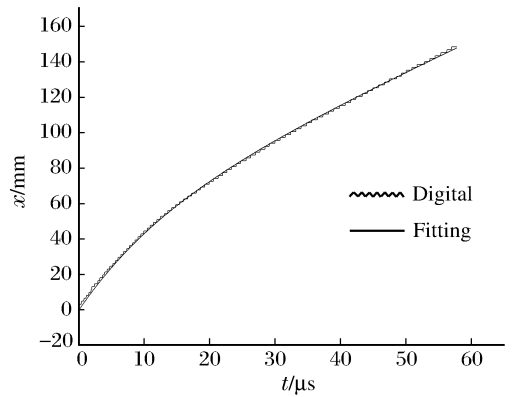


图 3 扫描波形
Fig. 3 Scanning wave front

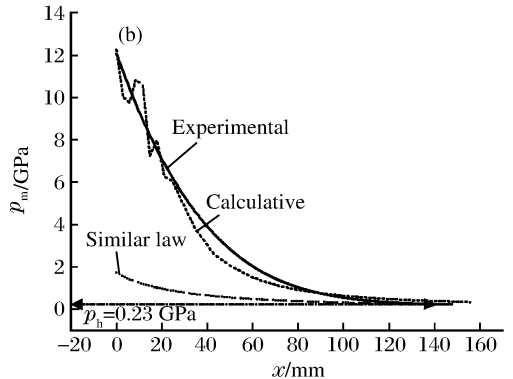
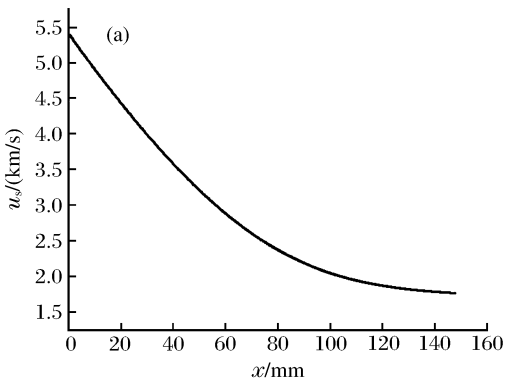


图 4 近场轴向参数随距离的变化规律

Fig. 4 Variation axial parameters in the near field

从图 4(b)中可以看出,在轴线上偏离端面 50 mm 内,冲击波压力下降非常快;在 50~120 mm 间压力下降趋于缓慢;在 120 mm 之后压力下降幅度已经非常慢了。为了说明压力在近场和远场衰减规律的异同,利用相似律公式近似估算 $x \leq 160$ mm 范围内的压力并与近场衰减进行比较。根据 TNT 水中爆炸冲击波峰值的相似律定理^[6],可得

$$p_m = K \left(\frac{W^{1/3}}{x + l/2} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中: $K=52.4$, $\alpha=1.13$,为拟合系数; p_m 为在 x 位置处的压力峰值,GPa,也是波阵面上的法向压力; W 为装药质量,kg; l 为装药长度,mm;在将短圆柱近似为球形装药的条件下, $x+l/2$ 表示到装药中心的距离,mm。从图 4(b)中的相似律曲线可看出,在 $x \leq 100$ mm 范围内,两种方式计算的结果有较大的差异,由(3)式计算的峰值非常低,显然不适用于作近场压力的计算;在 $x > 140$ mm 范围内,两条曲线才逐渐趋于一致,并无限接近于水平渐近线 $p_h=0.23$ GPa。曲线(1)的整个趋势符合指数衰减规律,故可拟合得到柱形 TNT 装药轴向近场压力的衰减规律

$$p_m = p_h + 12.02 \exp(-0.031x) \quad x < 140 \text{ mm} \quad (4)$$

需要指出的是,相对于近场压力在短距离内的迅速衰减,可以近似地将远场压力看作一个定值,即图中的水平渐近线 p_h 。但实际上,远场压力随着距离的增大仍在衰减,它的衰减规律应符合(3)式,此时(4)式不再适用。

3.2 初始压力测试结果

在恒流源供电条件下,从锰铜计电压波形记录得到与冲击波对应的相对电阻改变量为 $\Delta R'/\Delta R_0' = \Delta U/U_0$,根据锰铜计标定方程^[7]得到相对应的峰值压力

$$p_m = 0.56 + 33.04(\Delta U/U_0) + 7.56(\Delta U/U_0)^2 - 2.17(\Delta U/U_0)^3 \quad (5)$$

图 5 为示波器显示的第 SX-03、SX-04 发实验的药柱端面初始冲击波压力信号,图中横坐标 t 表示时间;纵坐标 U 表示电压。分析图形可知,AB 段为恒流源,是压力传感器的供电阶段;BC 段为冲击波脉冲阶跃;C 点为峰值压力对应的电压信号;D 点为传感器被损坏的时间,说明锰铜计的寿命有限。从该压力计的记录只能获得冲击波峰压数值,不能得到冲击波的衰减历程,另外,两发实验的压力所测的相对电压峰值很吻合,压力测量值具有较高的可靠性。根据图 5 中的数据和(5)式,可以求得本实验所用 TNT 药柱的端部/水界面压力初始峰值,见表 2。两发实验的平均初始压力为 12.21 GPa,标准差为 0.064。表明实验的精度较高,锰铜计压力测量平均值可信度较高。

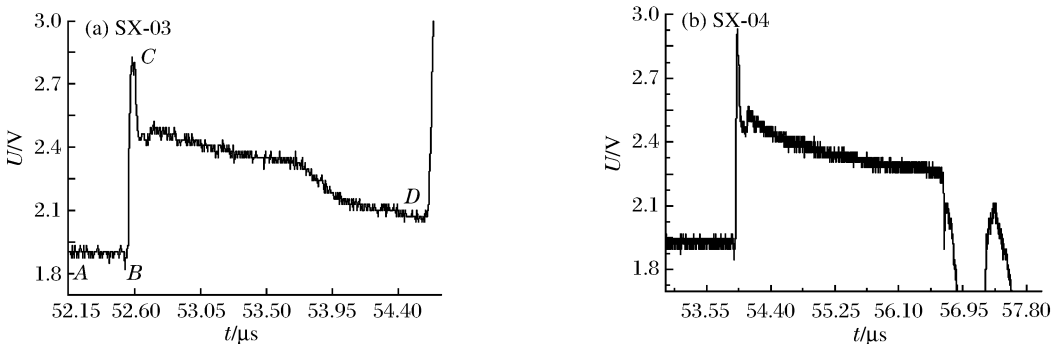


图 5 初始冲击波压力信号
Fig. 5 Signals of initial shock wave

表 2 TNT 药柱端部/水界面压力测量结果

Table 2 Experimental results at the charge-water interface

实验编号	锰铜计相对电压改变量	炸药/水界面压力/GPa	平均压力/GPa	标准差
SX-03	0.328 6	12.16	12.21	0.064
SX-04	0.331 2	12.25		

比较锰铜压力计所测得的平均压力与光测推导压力(12.08 GPa)及计算压力(12.25 GPa),其相对误差均较小。三种方法所得到的近场平均压力峰值为12.18 GPa,在假定相同精度测量的条件下的标准差为0.089,说明测量的TNT药柱近场压力轴向初始值较为准确。

4 结论

建立了切实可行的近场压力的光学测试方法,即利用高速扫描相机能较准确地推断出柱形装药轴向上的初始压力及近场压力的衰减规律,数值模拟结果与实验结果比较符合,可为设计提供依据和参考。但是(3)式是针对特定药柱得出的衰减规律,要得到普适关系,需归纳不同质量装药的轴向近场压力情况并探讨轴向近场压力衰减是否存在相似关系。后续实验需对周向压力衰减规律进行深入研究。

参考文献:

- [1] Dorsett H, Matthew D. Cliff Detonation Front Curvature Measurements and Aquarium Tests of Tritonal Variants [R]. Defence Science Technology Organisation, AMRL, DSTO-TR-1411, 2003.
- [2] Kira A, Fujita M, Itoh S. Visualization of underwater explosion of spherical explosive[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999,85(1):52-55.
- [3] Itoh S, Suzuki O, Nagano S, et al. Investigations on fundamental properties of underwater shock waves by high speed photography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999,85(3):226-230.
- [4] 池家春,马冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究[J]. 高压物理学报,1999,13(3):199-204.
CHI Jia-chun, MA Bing. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B23[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999,13(3):199-204.
- [5] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [6] Swisdak M M. Explosion Effects and Properties: Part II - Explosion Effect in Water[R]. Naval Surface Weapons Center Technical Report, NSWC/NOL TR 76-116, 1996.
- [7] 池家春. 锰铜计测压系统的动态检验报告[D]. 四川绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,1995.

Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater-explosion field

ZHAO Ji-bo^{*}, TAN Duo-wang, LI Jin-he, ZENG Hua-long, ZHANG Yuan-ping
(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: According to an aquarium test, an experimental method was proposed to measure shock waves in the near field of an underwater explosion. The axial scanning photographs were obtained and analyzed digitally. The shock front pressure along the axle of the charge was gained from the scanning trace of shock wave by using the Rankine-Hugoniot relation, and was extrapolated to the initial pressure of shock wave. The axial pressure damping of the cylindrical TNT charges in the near field was computed by the code LS-DYNA, and the initial pressure of shock wave was measured by manganin gauges. The experimental result is consistent with the theoretical calculation, and the near-field axial pressure damping of the cylindrical TNT charges follows an exponential function.

Key words: mechanics of explosion; shock at near-field; underwater explosion; damp law

^{*} Corresponding author: ZHAO Ji-bo
E-mail address: abcdef_z@163.com
Telephone: 86-816-2481143