文章编号：1000-5773(2008)03-0323-06

柱形装药水中爆炸近场径向压力测试初探*

赵继波，谭多望，李金河，张光升，曾华龙

（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：针对端面起爆柱形装药水中爆炸近场冲击波阵面呈现非球形传播的特点，采用分幅相机记录了炸药起爆 36 μs 内近场冲击波的传播情况，分析了冲击波在不同时间和不同位置的形状；采用两台高速扫描相机测量了侧边任意一点的冲击波速度，结合 Rankine-Hugoniot 关系，得到了冲击波阵面的压力；同时用 LS-DYNA 方法对侧边任意一点的压力进行了数值模拟，两者得到的结果基本一致。

关键词：爆炸力学；水中爆炸；柱形装药；高速相机

中图分类号：TJ55；O382.3 **文献标识码**：A

1 引 言

对高效毁伤舰艇目标，水中爆炸近场冲击波特性的研究尤为重要。目前的水中冲击波理论大部分是在球形装药水中爆炸实验的基础上建立起来的，但是对于多数水中兵器战斗部装药来说，并不采用球形装药，一般也不采用中心起爆，其爆炸场的几何特点很复杂。Hammond[1]描述了柱形装药水中爆炸的近场压力分布情况，对装药的几何形状在一定距离上对冲击波特性的影响进行了理论分析。Cole[2]证实了柱形装药侧边各点的压力-时间曲线与球形装药的情形相似，在初始压力突跃后产生平滑的、按指数规律衰减的曲线。但对于轴上各点，压力曲线很不一样，不仅峰值压力变化无规律，曲线本身也以二次突跃的形式出现和较不规则的衰减为特征，就曲线形状来看，衰减更接近于直线规律变化而不是指数规律。近年来，Sternberg[3]采用带人工粘性项的轴对称拉格朗日计算模型，研究了彭托利特(Pentolite)柱形装药在不同长径比条件下的水中爆炸压力分布情况。结果表明：在柱形装药的近距离范围内，冲击波参数由装药形状(主要指长径比)和偏离装药轴线的方向控制。这样导致了侧边的冲击波压力峰值比两个端面的压力峰值更高，侧边的时间常数比两端面更小。随着装药圆柱长径比的不同，形状对峰值压力变化的影响显得更加突出。本工作采用交叉狭缝扫描技术，记录药柱侧边一点两个垂直方向上的冲击波扫描迹线，为柱形 TNT 炸药的侧边压力研究提供一种光学测试手段。

2 实验状态及测试项目

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、传爆药、主装药柱、支撑架组成。所用主装药为 TNT 药柱，尺寸为∅60 mm×67 mm，密度为 1.580 g/cm^3，由 PETN 传爆药起爆；在雷管套的一侧放置有机玻璃标识板，以便取得放大比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。实验装置示意图见图 1。

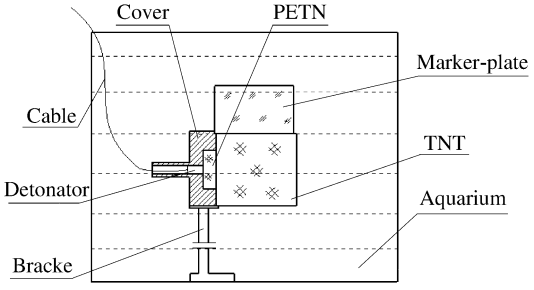


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental setting

* **收稿日期**：2007-09-09；**修回日期**：2008-01-17

基金项目：国家安全重大基础研究项目(51335010201)

作者简介：赵继波(1977—)，男，助理研究员，主要从事爆炸力学和冲击动力学研究. E-mail：abcdef_z@163.com

对近场冲击波采用两种光学测试。第 1 种主要采用分幅摄影技术拍摄水中冲击波随时间的传播过程，进行定量的分析，确定冲击波阵面在起爆后不同时刻的形状，观察阵面在传播过程中的变化；第 2 种采用两台高速扫描相机交叉狭缝扫描方法，对炸药柱侧边某一特定点的冲击波轨迹进行研究，探索侧边近场点的压力情况。

分幅照相采用 FJZ-250 型相机，其幅频设置为 75 万幅/秒，每幅图像的时间间隔设置为 1.33 μs，相机视场观察范围为装药半径的 8.5 倍，以便能更好地捕捉近场冲击波在不同时间和位置的波形以及波阵面的传播过程，利用氙灯面光源对视场进行照明；扫描照相采用 SJZ-15 型相机，扫速设定为 60 000 r/min(3 km/s)，采用交叉氙灯线光源照明，与狭缝平齐。

3 实验结果及分析

3.1 分幅照相结果

柱形炸药在水中一点起爆后其爆炸近场冲击波的发展可以分为两个阶段：(1) 当爆轰未完成时，在药柱长度范围内，水中冲击波与爆轰波一起沿药柱表面母线移动，由化学反应区不断提供能量来补充冲击波对水的压缩而产生的损耗，它们在药柱表面交点处的移动速度相同；(2) 爆轰完成后，水中冲击波开始以自己的速度在水中传播，通过能量的不断重新分配、流场相互作用，以达到波阵面球形化的结果，此时可视冲击波传播从近场向远场过渡。图 2 显示了水中爆炸后 36 μs 内冲击波传播的分幅图像，从中可以看出水中冲击波的传播和爆轰产物的膨胀过程。

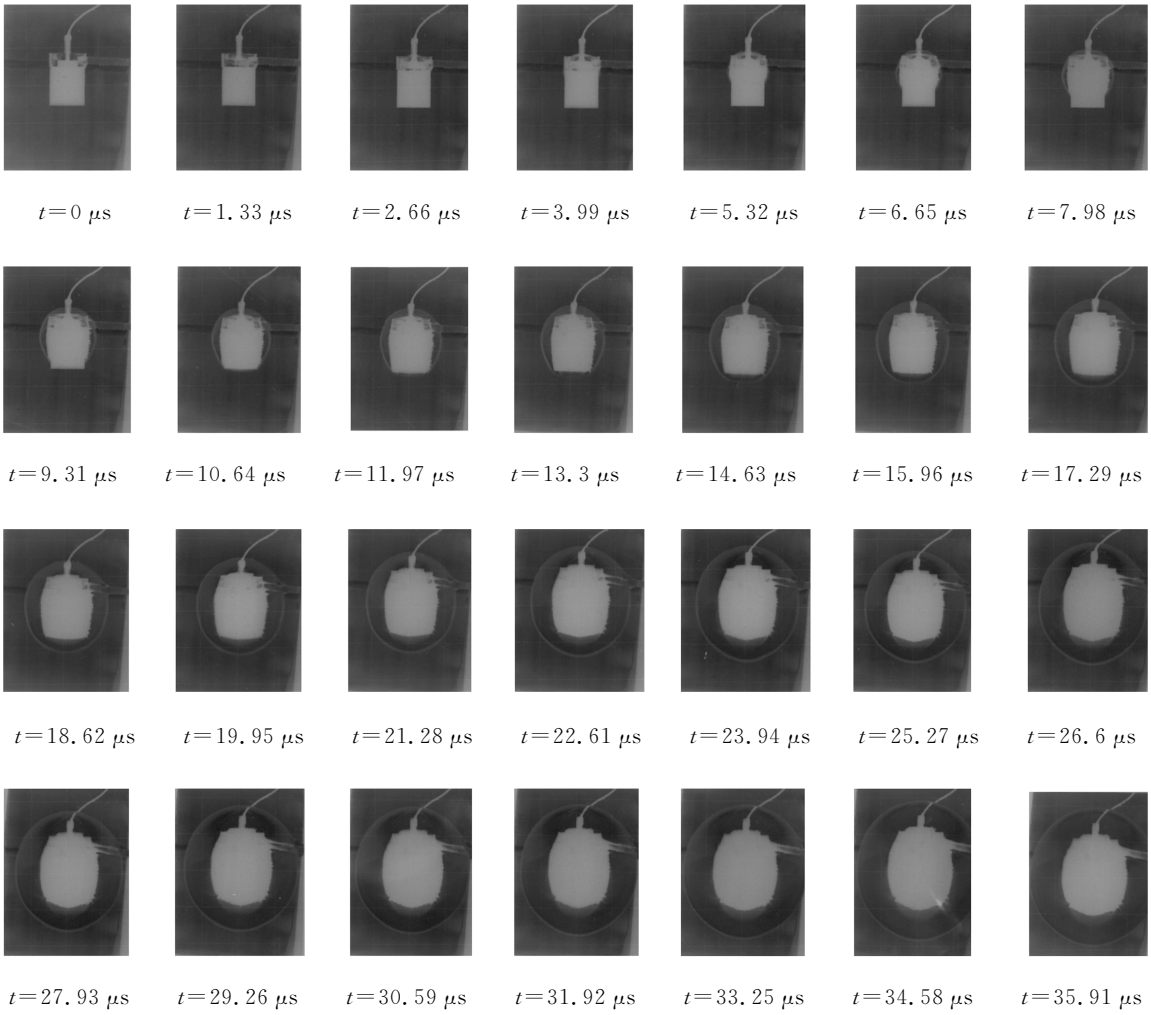


图 2 水中爆炸近场冲击波传播分幅结果

Fig. 2 Sequential framing photographs of underwater shock propagation

根据分幅照片显示的结果,假定炸药的起爆时间发生在 0 μs 时刻,炸药爆轰完成时间应在 14 μs 之前,因为在 13.3 μs 时水中冲击波阵面已离开药柱非起爆端端面一段距离,进入了水中冲击波发展的第二个阶段。在 0～30 μs 之间,水中冲击波阵面的形状呈椭球形且形状不规则,说明在此时间段内,波后不规则流场的各个部分之间仍在发生相互作用,也说明了药柱一端点起爆的起爆方式在爆炸近场的各个方向上具有不同的能量分布,即具有各向异性的特征。

3.2　交叉狭缝扫描测试原理

在冲击波拟定常传播时,扫描相机可以对波阵面上特定点的运动轨迹进行记录,进而求得该点在不同传播位置和不同时刻的物理量,在测试技术上视为采用了拉格朗日(Lagrange)方法;而冲击波非定常传播时,扫描相机不能记录波阵面上特定点的运动轨迹,但可以得到曲面冲击波通过流场空间中固定点时对应于波阵面上点的物理量,在测试技术上视为采用欧拉(Euler)方法。

从分幅照相结果可以看出,在冲击波传播的第一阶段,冲击波阵面与沿药柱传播的爆轰波相连,药柱侧边的冲击波阵面呈类似于抛物面的形状,而且在未完全球形化之前,波阵面上各点的法向速度随着时间的推延在不断变化。因此,单凭一台扫描相机来决定药柱侧边近场某一方向在任意时刻冲击波阵面上的法向速度几乎是不可能的。但如果采用两台高速扫描相机记录相互垂直的两个方向上的冲击波扫描迹线,可扩大其观测范围,综合分析它们得到的冲击波信息,则可以对药柱侧边特定点上的冲击波压力及其方向进行确定。即采用 Euler 方法,固定爆炸近场水域中的一点 O,通过扫描测试得到冲击波经过 O 点时对应于波阵面上点的压力状态。

(a) 对应于空间固定点 O 的波阵面上点的法向速度求解。

考察水中冲击波的传播过程。图 3 表示(x,y)平面上两个相邻时刻水中冲击波传播示意图,其中 x 表示药柱的轴向、y 表示药柱的径向。

在冲击波从 t 时刻传播到 $t+\Delta t$ 时刻的过程中,如在沿 x 轴方向运动的参考系中观察,冲击波的传播速度为 v_x;如在沿 y 轴方向运动的参考系中观察,冲击波的传播速度应为 v_y。由图 4 中的几何关系可知,对应于爆炸近场固定点 O 的波阵面上的某一点(该点在波阵面上的位置由冲击波达到 O 点的时间决定)的法向速度 u_s 应满足

$$u_s = v_x \sin\theta, \quad \text{或 } u_s = v_y \cos\theta \tag{1}$$

式中:θ 为冲击波波阵面上某一点切线与装药轴线方向的夹角。在两种参考坐标系中,波阵面上某一点的法向速度应为一固定值。故有

$$\theta = \arctan(v_y / v_x) \tag{2}$$

从而求得波阵面上特定点的法向速度的大小和方向。

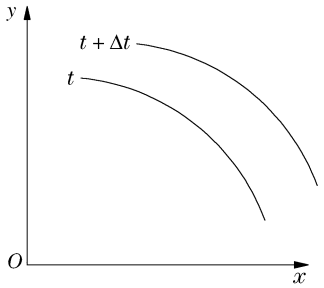


图 3　冲击波传播示意图

Fig. 3　Sketch of shock propagation

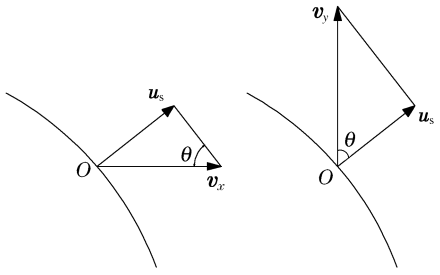


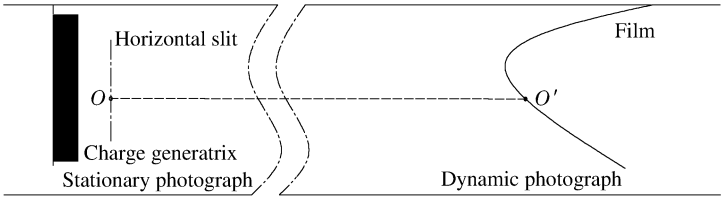
图 4　冲击波某一点上的法向速度

Fig. 4　Normal velocity of some point on shock

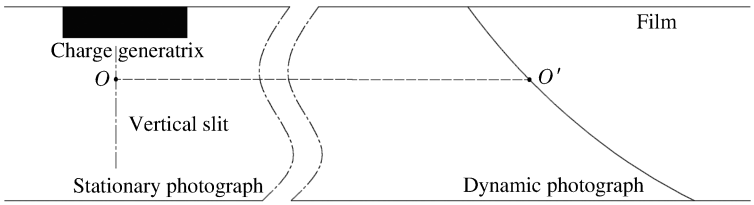
(b) 药柱侧边一点 O 在相机动态像上的标定。

在两台相机的静止像上准确地定出 O 点位置,即各从两幅扫描底片上的 O 点静止像作水平线,使其与动态迹线相交于 O' 点,数字化动态迹线后,O' 点的横向坐标表示冲击波达到 O 点的时间,纵向坐标即为冲击波偏离零点时刻的位置。图 5 表示了由水平狭缝和竖直狭缝得到的冲击波迹线在 O 点上的

标定示意图。这里需要指出的是,尽管两台相机同时开始记录,但由于数字化底片零点时刻不一致,故两幅底片上冲击波达到 O 点的时间取值可能不同。再根据前面的分析进而求得 O 点的法向速度。



(a) Horizontal slit



(b) Vertical slit

图 5 O 点位置标定示意图

Fig. 5 Sketch of demarcating point's location

3.3 交叉狭缝扫描测试结果

以有机玻璃标识板为载体,各刻画一条水平、竖直线,使待测点 O 距离药柱起爆端端面和母线各 30 mm。标识板在起爆前平放在药柱母线上,起爆时移走。相机 1 的狭缝平行于水平线,相机 2 的狭缝平行于竖直线,两条狭缝相交于 O 点,实验状态示意图见图 6。狭缝后由交叉线光源进行照明。交叉狭缝扫描后的实验结果见图 7。

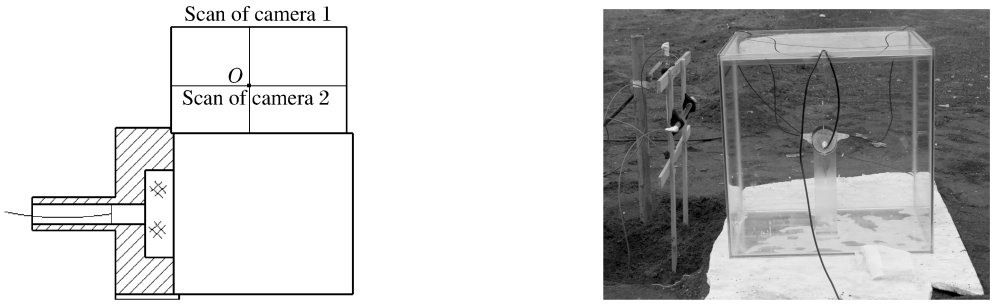
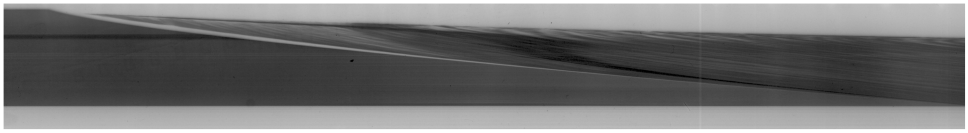


图 6 交叉狭缝扫描时的实验状态

Fig. 6 Experiment state of acrossing slit scan



(a) Photograph from camera 1

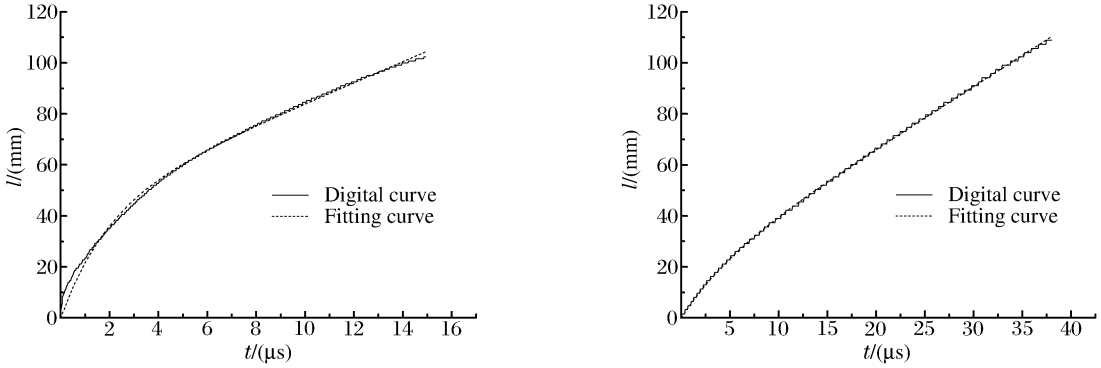


(b) Photograph from camera 2

图 7 交叉狭缝扫描测试结果

Fig. 7 Testing result of acrossing slit scan

从水平方向(即相机 1 的狭缝方向)扫描的静止像上进行分析,O 点位于其下分支,故仅对图中下分支进行拟合。交叉狭缝扫描的数字化曲线及其拟合曲线见图 8。图 8 中,横坐标 t 表示冲击波到炸药端面的传播时间,纵坐标 l 表示冲击波到炸药端面的距离。



(a) Horizontal curve　　(b) Vertical curve

图 8　数字化结果及拟合结果

Fig. 8　Digital and fitting result of streak film

选择尽可能逼近冲击波速度与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 l 方向的距离-时间函数,其形式如下[4]

$$\frac{l}{D}=\sum_{i=1}^{n}A_i[1-\exp(-B_it)]+\frac{c_0}{D}t \tag{3}$$

(3)式能很好地表现冲击波在水中的传播规律。当 $t\to 0$ 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其最大速度值的物理规律,当 $t\to\infty$ 时,其导函数趋于一恒定值,符合冲击波传到无穷远处后衰减为水中声速的物理规律。其中 A_i 控制冲击波强度;B_i 控制冲击波衰减时间;c_0 表示水中声速,取 1.46 km/s;D 为炸药的爆速,已知 TNT 的密度为 1.58 g/cm^3,根据爆速-密度关系曲线,D=6.844 km/s。一般说来,(3)式取前两项就能非常好地拟合扫描波形的数字化曲线,进而得到水平方向和竖直方向扫描的非线性拟合曲线系数,见表 1。

表 1　拟合系数

Table 1　Fitting parameters

Parameters	Horizontal	Vertical	Parameters	Horizontal	Vertical
A_1	6.256	2.559	A_2	2.171×10^{11}	9.648×10^{10}
B_1	5.251×10^{-1}	1.991×10^{-1}	B_2	1.790×10^{-12}	1.488×10^{-12}

因为 O 点在静止像上有明确位置,根据两幅底片的放大比,可求出其对应在两幅底片上的时间,即水平方向为 4.81 μs,竖直方向为 6.98 μs。根据(3)式,可求得 O 点在两个参考坐标系下的速度 v_x=5.93 km/s,v_y=3.31 km/s。由(1)式和(2)式得法向与装药轴线的夹角为 60.83°,该点处的法向速度 u_s 为2.89 km/s。

已知 O 点的法向速度,根据 Rankine-Hugoniot 关系[5],可以得到冲击波阵面的压力 p_s

$$\begin{cases}p_s=\rho_0 v_s u_p\\ v_s=1.483+25.306\cdot\lg(1+u_p/5.19)\end{cases} \tag{4}$$

式中:ρ_0 为水的密度,v_s 为冲击波速度(在本文中即为 u_s),u_p 为冲击波后流场粒子速度。由(4)式可计算出 O 点的冲击波阵面的峰值压力为 2.05 GPa。

采用 LS-DYNA 方法对水中爆炸进行了数值模拟,炸药和水采用 ALE 算法。柱形 TNT 炸药的直

径为 60 mm,长为 67 mm,模拟水域设置为无限水域。对 TNT 装药采用 JWL 状态方程,对水介质采用格临爱森(Grüneisen)方程,端面一点起爆方式。计算得到冲击波到达 O 点时的峰值压力约为 1.84 GPa,可用来对实验结果进行辅助说明。

4 结 论

建立了药柱侧边任意一点压力求解的初步实验模型,通过实验技术解决了该点在扫描动态像上的定位问题,发展了侧边交叉狭缝扫描方法,结合其实验模型,在理论上可以求出侧边任意一点冲击波压力的方向及大小,实验得到的结果可用数值计算作辅助验证。不足之处是一次实验只能确定某一个点的压力情况,无疑会使实验成本增加,研究效率降低。总体说来,本工作建立了一种较为可行的复杂流场压力的测试方法,可为今后的工作提供一种测试思路,在下一步的研究中,拟采用多狭缝交叉技术、待求点贴丝法、改进测试精度等技术和手段来获取更多的柱形装药侧边近场压力信息。

References:

[1] Hammond L. Underwater Shock Wave Characteristics of Cylindrical Charges [R]. [s. l.]: Defence Science Technology Organisation, AMRL, 1995.

[2] Cole R H. Underwater Explosions [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1948.

[3] Sternberg H M. Underwater Detonation of Pentolite Cylinders [J]. Phys Fluids, 1987, 30(3): 761-769.

[4] 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.

[5] Yun S R, Zhao H Y. Explosion Mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)
恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京:国防工业出版社,2005.

Primary Research on Side Pressure of Cylindrical TNT at Underwater Explosive Close-Field

ZHAO Ji-Bo, TAN Duo-Wang, LI Jin-He, ZHANG Guang-Sheng, ZENG Hua-Long

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: According to the non-sphericity characteristic of shock wave surface at close-field after cylindrical charge with end boost exploring under water, the propagation of shock near-field is recorded by frame camera within 36 μs after blasting, and the shape of shock on diverse time and situation is analyzed. The shock pressure of arbitrary point on the side of charge is measured through two streak cameras. Combined with the Rankine-Hugoniot relation, the pressure on shock front is gained, and the resolution is compared with LS-DYNA numerical value. It demonstrated that they are consistent relatively.

Key words: mechanics of explosion; underwater explosion; cylindrical charge; high-speed camera