

# 水箱法——一种可用于小药量测定 炸药爆轰压力的方法

徐 康 于德洋 许云祥 曾雄飞

在测定炸药爆压的许多方法中，水箱法，由于其简便、比较可靠，并且有可能用小药量测定爆压，是一种很实用的研究新炸药性能的方法。本文作者描述了实验装置和数据处理的方法，又用其研究测定了圆柱炸药的直径效应，列出了实验结果并作了比较。

## 一、引 言

在测定炸药爆压的多种方法中，我们认为水箱法<sup>[1,2]</sup>是一种比较好的方法。它的主要优点是：方法简单，方便，结果比较可靠，并且有可能用小药量测定爆压。这个方法中不存在其它方法中存在的一些比较严重的问题，例如自由面速度法中的飞片层裂问题，薄片测定中的二次加速问题；电磁法中传感器对爆轰波的影响问题，传感器与爆轰产物速度是否完全相同等问题，同时在一发实验中，就可以测出冲击波速度的衰减过程，这是其他方法难于做到的。

本文是对测定爆压的水箱法进行比较系统研究的一部份，主要目的是试图寻求一种小药量精确测定猛炸药爆压的方法。对新炸药的研究，对爆轰理论的发展均有一定的意义。

## 二、实 验 方 法

(1) 我们所用的实验装置基本上与〔2〕相同（见图1）。现简介如下：

水箱是用木板或有机玻璃片制成，前后留有两个窗口。前窗口上装有一块厚约1.5 mm的优质平板玻璃，后窗口上贴有一块直径约为80 mm的玻璃凸透镜。照相用的光源一般用 $\phi 25$  mm，长100 mm左右的RDX/石蜡=95/5药柱，前面加一个前端开口的纸筒。光源与水箱之间安放一块带有3-4 mm直径圆孔的木板。将圆孔放在凸透镜的焦点上，这样可以得到基本上为平行光的光源。采用了这种光源后，扫描照相底片的质量有明显改善，其清晰度有较大的提高。

用国产GSJ型高速照相机进行扫描照相。扫描速度为3.0 mm/ $\mu$ s。得到的扫描照片如图2所示。照相底片的测量是在大型工具显微镜上进行的。

本文于1981年4月1日收到

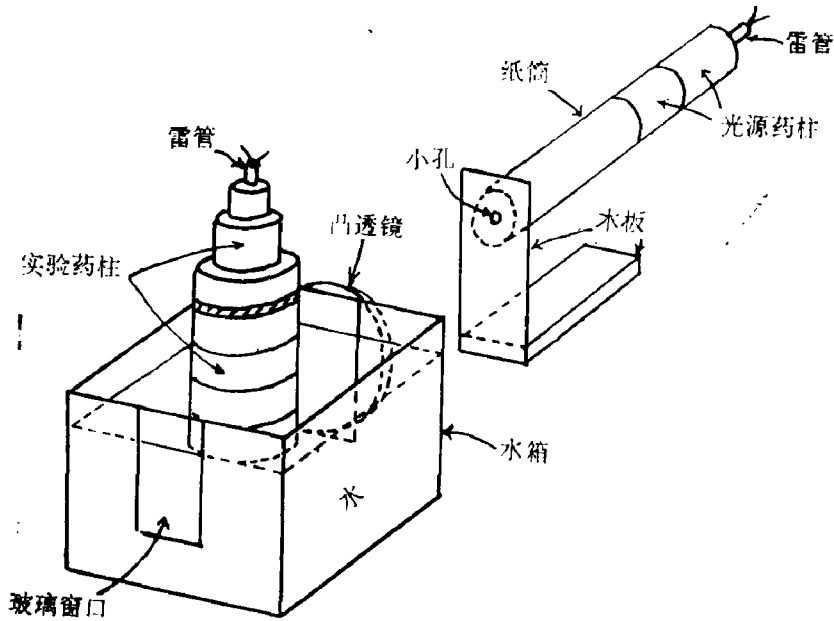


图1 水箱法测定爆压的装置

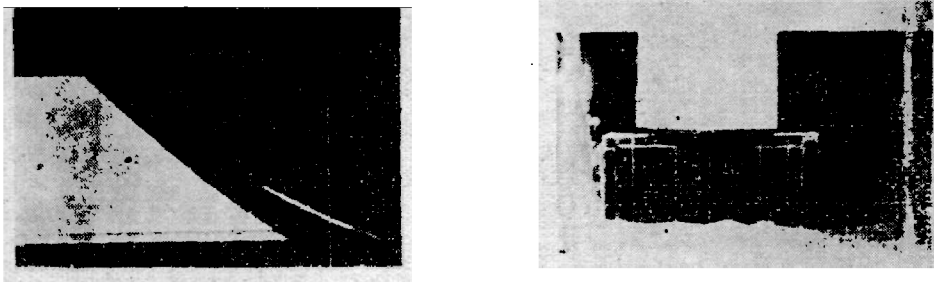


图2 水箱法扫描照片和静止象照片

(2) 药柱和平面波发生器。

实验中所用的药柱的直径，最小为 10 mm，最大为 100 mm。

对于药柱直径为 100 mm 和 80 mm 的实验，我们采用了普通高低爆速平面波发生器<sup>[3]</sup>，在药柱端面中心 60% 直径范围内，其平面度为 0.04 微秒。对于直径为 60 mm 和更小的药柱，我们采用了一种新型的简易小型平面波发生器<sup>[4]</sup>。其平面度在药柱端面中心大约 60% 直径范围内，爆轰波阵面到达时间的差别不大于 25 毫微秒。

实验药柱的长度一般为直径的 1.5—2 倍（详见表 1, 2, 3）。

图 3 为一种典型的实验药柱装配图。

(3) 底片测量方法

底片测量的主要内容是要得到水中冲击波的初始速度。从图 2 可以看出，水中冲击波的扫描线的开始部份有一个不大的高速区（对 RDX, HMX 等炸药，约为 0.5 mm 左右，对 TNT 约为 1.2 mm 左右），这可能是受爆轰反应区影响而造成的。在我们的

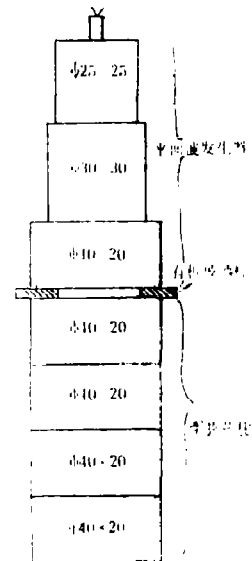


图3 直径为 40mm 的药柱装配示意图（图中尺寸均为 mm）

大部份底片上, 这部份扫描线比较模糊, 无法进行精确测定。因此我们在底片测量中, 一般将这个高速区略去。

在这个高速区之后就是很清晰的扫描线。冲击波在惰性介质中传播时, 速度是逐步衰减的, 因此这条扫描线的斜率应逐渐减小。但是从底片上可以看出: 在冲击波进入水中的最初一段时间内, 扫描线基本上为直线, 即速度基本恒定。我们采用了两种方法测定水中的初始冲击波速度。第一种方法叫“坐标斜率法”, 即用工具显微镜测定扫描线上各点的  $x-y$  坐标, 然后在方格纸上将  $x-y$  坐标放大 100 倍, 画出扫描线。这时就比较容易确定扫描线上基本为直线的部份的长度。得到的结果为: 当药柱直径为 40mm 以上时, 直线部分的实际距离约为 3.1mm; 直径为 25mm 时, 约为 2.6mm; 直径为 10mm 时约为 2.0mm。用这个范围内扫描线上的各点, 以最小二乘法求出最佳拟合直线的斜率, 由此可得到冲击波速度。这个方法比较可靠, 但比较麻烦。因此我们又用了第二种比较简便的方法, 叫“限长角度法”。即根据上面给定的直线段的长度, 用工具显微镜测定这一段直线线段与水平轴线的夹角。由此亦可求出初始冲击波速度。这里限长是十分重要的。如果取的长度过长, 则会得到偏低的结果。角度法比较简便, 但必须有相当熟练的人员进行测量, 否则会引起较大的偏差。我们对许多底片用上述两种方法进行了测定, 都可以得到在实验误差范围内相互符合的结果。对于清晰度不够好的底片, 一般很难读准扫描线上各点的坐标, 因此只能用“限长角度法”进行测量。

### 三、数据处理方法

以水中冲击波速度, 用 Rice - Walsh 提出的水的 Hugoniot 数据<sup>[1]</sup>, 即可求出水中的质点速度和水中冲击波压力。为了计算方便, 我们采用了 Rigdon 提出的计算公式<sup>[2]</sup>计算水中质点速度:

$$U_p = 0.372 U_m + 0.0283 U_m^2 - 0.607 \quad (1)$$

此处  $U_m$  为水中冲击波速度。

由水中冲击波压力计算炸药的爆压是比较困难的。文献上常用的方法有两种, 一种是声学近似法, 即认为爆轰波到达“炸药—水”界面后, 反射波的动力阻抗和爆轰波的动力阻抗近似相等。这样就可以推导出计算爆压的公式:

$$P_i = P_m \frac{(\rho_0 D)_i + (\rho_0 U)_m}{2(\rho_0 U)_m} \quad (2)$$

式中:

$P_i$  为炸药的  $C-1$  爆轰压力。

$P_m$  为水中冲击波压力。

$(\rho_0 D)_i$  为炸药初始密度与爆速的乘积。

$(\rho_0 U)_m$  为水的初始密度与水中冲击波速度的乘积。用这个方法计算比较简单。

声学近似方法会带来较大的误差。

另一种方法是 Deal 在 1958 年提出来的<sup>[3]</sup>。计算公式为:

$$P_1 = \alpha \rho_0 D U \rho \left[ 1 + \alpha - \left( \frac{P_n}{P_1} \right)^n \right] \quad (3)$$

$$\alpha = (k-1)/2k \quad (4)$$

$$k = \frac{\rho_0 D^2}{P_1} - 1 \quad (5)$$

式中  $k$  为多方指数。用公式(3)-(5)进行迭代计算,即可求出炸药的爆压。这里作了爆轰产物膨胀时服从常  $k$  值多方方程的假设,这一点是不严格的,会带来一定的误差,但是,用声学近似法好些, Karmer 等的结果<sup>[7]</sup>也说明了这个看法。

#### 四、实验结果

我们主要研究了水箱法中药柱直径对爆压测定结果的影响。由于纯 RDX 很难制成大直径药柱,所以我们主要用常温压制的 RDX/石蜡=95/5 药柱,研究直径的影响。我们测定了直径为 100, 80, 60, 40 与 25mm 的 RDX/石蜡=95/5 药柱的爆压。结果见表 1。

表 1 RDX/石蜡=95/5 药柱直径对爆压测定结果的影响  
(药柱密度为 1.655g/cc,  $D = 8.358\text{mm}/\mu\text{s}$ )

实 验 直 径 (mm)	药 柱 长 度 (mm)	实 验 发 数	爆 轰 压 力(GPa)	备 注
100	120	5	26.23±0.34	用高低爆速平面波发生器引爆
80	120	4	26.44±0.53	
60	90	9	26.09±0.32	用简易小型平面波发生器引爆[4]
40	80	9	25.95±0.42	
25	70	8	26.38±0.41	
30发总平均:			26.19±0.43	(误差1.6%)

说明:(1)实验药柱长度为平面波发生器以下的药柱长度。

(2)为了便于比较,当实验药柱的密度与 1.655 克/cc 有差别时,均将爆速和爆压换算到

$\rho_0 = 1.655$  克/cc。换算方法为: 爆速按  $\Delta D = 0.0045\text{mm}/\mu\text{s}/\text{g}/\text{cc}$  换算。

爆压用  $P_{\rho 1} = P_{\rho 2} (\rho_1/\rho_2)^2$  换算。

我们还用直径为  $\phi 40, 25, 10\text{mm}$  的热压的 RDX/粘结剂=99.5/0.5 药柱进行了爆压测定。对于直径为 10mm 的药柱,我们还测定了带厚外壳时的爆压值(装配情况见图 5)。结果见表 2。

表2 RDX/粘结剂=99.5/0.5炸药的爆压测定结果  
(药柱密度 $\rho_0=1.700\text{g/cc}$ ,  $D=8.415\text{mm}/\mu\text{s}$ )\*

实验直径 (mm)	药柱长度 (mm)	实验发数	爆轰压力(GPa)	备注
40	80	7	$29.39 \pm 0.68$	均用小型平面波发生器引爆
25	75	5	$28.53 \pm 0.72$	
10	55	4	$28.67 \pm 0.71$	
10(带外壳)	55	5	$28.99 \pm 0.52$	外壳为钢制厚15mm

21发总平均为 $28.95 \pm 0.71$  (误差2.4%)

\* 为便于比较,爆速爆压值均换算到 $\rho_0=1.700$ 克/cc。爆速换算方法为 $\Delta D=0.0035\text{mm}/\mu\text{s/g/cc}$ ,爆压换算方法与表1同。

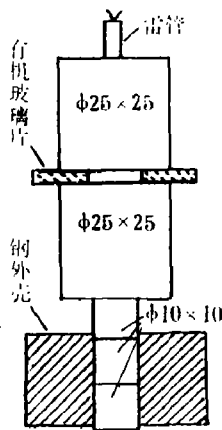


图4 直径为10mm的RDX药柱带厚外壳装配情况



图5 用直径为10mm的RDX药柱时的扫描照片

由表1和表2可见,对于RDX的含量在95%以上的炸药来说,当药柱直径在10mm以上时,药柱直径对爆压测定结果基本上没有影响。然而,当药柱直径为10mm时,由图5可见,扫描线很快变弯,即冲击波速度衰减更快。加厚外壳并不能提高初始冲击波速度,而只能使冲击波的衰减速度稍有减小,这对底片测量是有利的。对于 $\phi 10\text{mm}$ 的药柱,如果用测定扫描线斜率的方法,则最多只能测定底片上最初0.9mm以内的扫描线斜率,才能得到与大直径药柱相同的结果。

我们还用直径为40mm的HMX/粘结剂=99.5/0.5, TNT/RDX=35/65(铸装)和TNT药柱进行了爆压测定,其结果见表3。由表3可见这些结果与文献上的结果基本符合。只有RDX的结果偏低一些,可能是由于所用的药柱不同。

## 五、讨论和结论

水箱法测定爆压的方法经过一些改进之后,可以成为一种比较可靠的方法。其实验精度可在2%左右。计算爆压时,用〔6〕中的方法比较合适〔即公式(3)~(5)〕。但其中应

表3 几种常用炸药的爆压测定结果

炸药	药柱密度 ( $\rho_0$ ) (克/立方厘米)	爆速 (mm/ $\mu$ s)	实验药柱		实验发数	爆压 (GPa)	文献值	
			直径 (mm)	长度 (mm)			方法	来源
HMX/粘剂 99.5/0.5	1.751	8.542	40	60	2	32.46	30.9	[8]
							/	计算
RDX/粘剂 99.5/0.5	1.700	8.415	40	80	7	29.39 $\pm$ 0.68	30.16	[10]
							自由面 速度法	
TNT/RDX 35/65	1.708	7.909	32.5	80	5	28.57 $\pm$ 0.74	29.00	[6]
							交叉法	
TNT(压装)	1.587	6.827	40	80	5	18.86 $\pm$ 0.28	18.86	[9]
							交叉法	

说明：文献值均为与本文中相同药柱密度和组成的爆压值。

用的常k值多方方程的正确性是有问题的，应该进一步研究更好的计算公式。我们正在这方面进行工作。

用水箱法测定爆压时，对于爆速和爆压相当于或高于RDX的猛炸药来说，当药柱直径大于10mm时，直径对测定爆压的结果没有影响。但由于用小直径药柱时，冲击波速度衰减快，对底片测量必须十分仔细，才能测出初始冲击波速度。这些结果说明：水箱法可以成为小药量的爆压测定方法。为了保证得到可靠的结果和便于底片测量，用 $\phi 40$ mm的药柱进行测定比较适当。按每个样品做五发实验计算，有500克样品即可得到精确的爆压结果（这里考虑的装配方法是：最后两个 $\phi 40 \times 20$ mm药柱用被测样品，上面用爆速和爆压与被测药柱相近的其它炸药药柱进行传爆。这样不会影响测定结果）。这对于新炸药研究来说，是一个比较现实的方法。

在特殊情况下，为了进一步减小药量，可以采用更小的药柱。对于RDX或性能更高的炸药，用直径为10mm的药柱，也可以得到基本上可靠的爆压数据。这样就可以使爆压测定所需的药量减小到20克左右。

最后还应指出：水箱法还有一些缺点。主要有：由于照相底片总有一定的模糊度，因此实验精度一般只有2%左右，不如用高精度电子仪器测定的精度高；另外，水的Hugoniot数据还需要进一步精确测定，以求得更为可靠的爆压结果。在计算公式上的问题，上面已经谈到，也需要进一步研究。我们还想到：如果能采用动力阻抗与炸药完全匹配的透明物质代替水来进行爆压测定，那就可以完全没有反射波，就可以直接得到真正的“无扰爆压”，也可以克服计算公式带来的偏差。

这将是炸药爆压测定技术中的一个重大发展。我们正在对这个新的可能性进行研究。

致谢：参加本文的高速照相工作的，还有薛彭寿同志和王春培等同志。

### 参 考 文 献

- [1] M. A. Cook et al, Proc. 3rd ONR Symp. on Detonation (1960) p 357-85.
- [2] J. K. Rigdon, I. B. Akst, Proc. 5th Symp. on Detonation (1970) p 59-65.
- [3] J. H. Cook, Research. 1. 474-6 (1948).
- [4] 于德洋等私人通讯 (1981)。
- [5] M. H. Rice, J. M. Walsh, J. Chem. phys, 26, 824-7 (1957).
- [6] W. E. Deal, Phys. Fluids, 1 (6) 523-7 (1958).
- [7] P. E. Kramer, K. W. Ashcraft, MHSMP-73-6 (1972).
- [8] M. Finger, E. Lee et al, Proc. 6th Symp. on Detonation (1976) p. 710-722.
- [9] А. А. Эвстигнев, физ. Гор. Взр 12(5), 758-63 (1976).
- [10] 董海山等, 私人通讯 (1979)。
- [11] UCRL-51319 (1974)。

## AQUARIUM TEST—A METHOD FOR DETERMINATION OF THE DETONATION PRESSURE WITH SMALL QUANTITY OF EXPLOSIVE

Xu Kang Yu De-yang Xu Yun-xiang Ceng Xiong-fei

Among the various methods for determination of the detonation pressure, the aquarium test, due to its simplicity, comparatively credible and being possibly using less quantity of explosive, is a practical method in investigation the property of new explosives. In this paper, the authors describe the installation of the experiment and the method of data processing. The diameter effect of cylindrical explosives is also investigated. Experimental results and comparison are shown as well.