

凝聚炸药爆轰波剖面的实验测定

刘家骥

(1983年8月3日收到)

提出了一种利用爆轰波垂直入射时水中冲击波的衰减曲线计算凝聚炸药爆轰波剖面的特征线方法。以TNT为例进行了计算,给出了其爆轰波内压力、密度、流速和声速等参数的分布。

符号:

P ——压力;	D ——爆速;
ρ ——密度;	k ——多方指数;
u ——流速;	x ——距离;
U ——冲击度速度;	t ——时间。
c ——声速;	

脚标:

e ——指炸药和爆轰产物;
 w ——指水;
 o ——指炸药初态;
CJ——指CJ态;
 s ——指爆轰产物的峰值。

一、前 言

爆轰波剖面 是指在一定时刻下爆轰波内参数的空间分布。

对于了解爆轰区内的状态,研究凝聚炸药爆轰的机制(包括爆轰化学反应),以及深入研究爆轰波的近距离作用,发展更精确的分析和计算等,爆轰波剖面的知识是很重要的。然而,由于爆轰过程的高温、高压和短历时,加之化学反应区非常狭窄,给测试工作带来许多困难,故迄今为止,关于凝聚炸药爆轰波剖面的知识还是很不够的。

本文提出了利用爆轰波垂直入射时惰性介质中冲击波衰减的实测曲线以计算凝聚炸药爆轰波剖面的特征线方法。

二、原 理

所选用的惰性介质是水。水是一种理想的透明介质：水到处皆有且易于控制其成分；同凝聚炸药相互作用时，其动力阻抗不算太低。水的冲击压缩规律和状态方程已得到充分的研究^(1,2)。“水箱法”测定爆压的数据可直接加以利用。

按照关于凝聚炸药爆轰波的ZND模型，它以一无反应冲击波为前导，其后紧跟着化学反应区，化学反应终止于CJ面，然后是爆轰产物飞散区域。在反应区内，状态参数急剧下降；在爆轰产物飞散区域，状态参数下降较缓慢；在CJ面两侧，下降斜率将有突变。这个情况见图1左侧部分，这也就是设想的爆轰波剖面示意图。

当这样一个爆轰波垂直入射于水时，有强冲击波传入水中，同时有稀疏波反射入爆轰产物中。水中冲击波的衰减曲线同爆轰波剖面有一一对应关系。特别，图中*点将对应于CJ点；利用水中冲击波在*点的参数可以计算爆轰波的CJ参数。

利用转镜扫描照相机，测出水中冲击波的衰减曲线；在实测曲线上确定*点；求出凝聚炸药的CJ参数。——这些是我们的基本数据(CJ点是所选择的参考点)。

爆轰波同惰性介质(水)相互作用的过程见图2。水中冲击波的衰减，是由于波阵面后稀

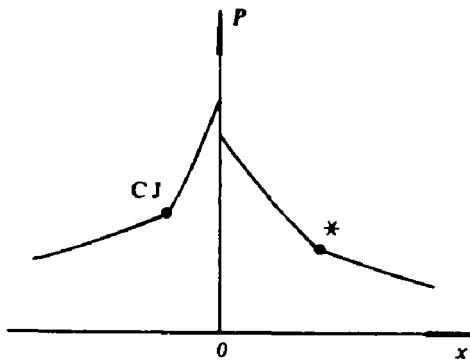


图1 爆轰波的压力剖面和惰性介质(水)中冲击波的衰减曲线

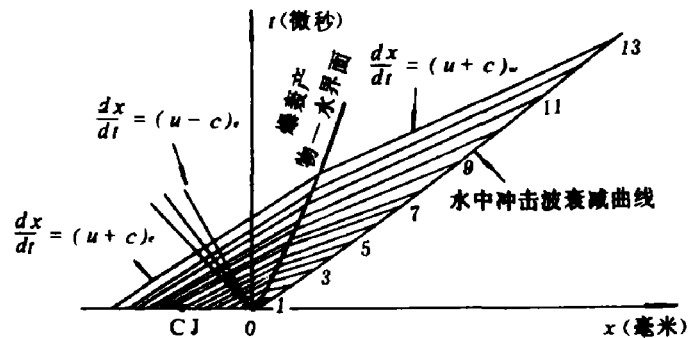


图2 爆轰波同惰性介质(水)相互作用的 $x-t$ 图

疏波作用的结果。在一维的情况下，水中的稀疏波是爆轰波阵面后的稀疏波跨过爆轰产物—水界面传入的。按图2所示，第一，我们未考虑爆轰产物中稀疏波在界面上的反射；第二，我们未考虑水中稀疏波在水中冲击波阵面上的反射。在本文末尾，我们将说明，这样的简化所引入的误差是可以忽略的。

根据实测的水中冲击波衰减曲线，求出波阵面后稀疏波的传波速度，利用特征线方法，循着波传播迹线反算回去，就能得到爆轰波内与水中冲击波迹线上各点相对应的位置；利用特征线上的关系式，就能算出相应各点的参数。这样，我们就求出了爆轰波的剖面，包括压力、密度、流速和声速的分布。在爆轰波内，同*点相应的位置，就是CJ面，由此就得到化学反应区的宽度。

三、基本关系式

1. 水

在压力为 2.5 到 25 GPa 范围内, 水的冲击绝热关系为^[2]

$$U_w - 1.483 = 25.306 \log_{10} \left(1 + \frac{u_w}{5.190} \right) \quad (1)$$

右行稀疏波的传播速度

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_w = (u + c)_w \quad (2)$$

其中, u_w 由实验测定, c_w 可直接从 [2] 查到。

2. 爆轰产物

设爆轰产物遵循常 k 值多方规律

$$P_e = \text{常数} \cdot \rho_e^k, \quad k = \text{常数} \quad (3)$$

则, 对于平面稳态爆轰波, 我们有

1) CJ 参数的计算式^[3]

$$\begin{cases} P_{CJ} = \frac{a \cdot \rho_0 D \cdot u_w}{1 + a - (P_w/P_{CJ})^a} \\ a = \frac{k-1}{2k} \\ k = \frac{\rho_0 D^2}{P_{CJ}} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{CJ} = \frac{P_{CJ}}{\rho_0 D} \\ c_{CJ} = D - u_{CJ} \\ \rho_{CJ} = \frac{\rho_0 D}{D - u_{CJ}} \end{cases} \quad (5)$$

2) 特征关系式^[4]

在第 I 族特征线上 (右行波)

$$\begin{cases} \left(\frac{dx}{dt} \right)_e = (u_e + c_e) \\ u_e + \frac{2}{k-1} c_e = \text{常数} \end{cases} \quad (6)$$

在第 II 族特征线上 (左行波)

$$\begin{cases} (dx/dt)_e = (u_e - c_e) \\ u_e - \{ 2/(k-1) \} c_e = \text{常数} \end{cases} \quad (7)$$

3) 爆轰波内各点参数间的关系⁽⁴⁾

$$\begin{cases} \frac{P_e}{P_{CJ}} = \left(\frac{c_e}{c_{CJ}} \right)^{2k/(k-1)} \\ \frac{\rho_e}{\rho_{CJ}} = \left(\frac{c_e}{c_{CJ}} \right)^{2/(k-1)} \end{cases} \quad (8)$$

四、计算结果

以 $\rho_0 = 1.583$ 克/厘米³ 的 TNT 为例进行了计算。水中冲击波衰减曲线的实验测定是我们在1965年完成的, 数据点见表1和图3。

表1 实测水中冲击波速度衰减曲线上若干点的数据

x (毫米)	0.90	1.12	1.57	2.24	3.36	4.49	5.60	6.73
U_w (毫米/微秒)	5.846	5.670	5.490	5.353	5.098	4.897	4.706	4.583

将之拟合为多项式

$$U_w = A_0 + A_1 x + A_2 x^2$$

相应于反应区的分段为

$$A_0 = 6.675, A_1 = -1.166, A_2 = 0.2578;$$

相应于产物飞散区域的分段为

$$A_0 = 5.699, A_1 = -0.1720, A_2 = 0.$$

相应于CJ面的*点数据, 经圆整化后取为: $x = 2$ 毫米, $U_w = 5.367$ 毫米/微秒, $u_w = 2.200$ 毫米/微秒。由此算得的CJ参数见表2。

表2 TNT炸药的CJ参数

ρ_0 (克/厘米 ³)	药柱直径 (毫米)	药柱长度 (毫米)	D (毫米/微秒)	P_{CJ} (GPa)	k	ρ_{CJ} (克/厘米 ³)	u_{CJ} (毫米/微秒)	c_{CJ} (毫米/微秒)
1.583	20	80	6.820	17.40	3.232	2.073	1.621	5.208

计算用作图法进行。图2为 $x-t$ 物理平面, 图4为 $u-c$ 状态平面。

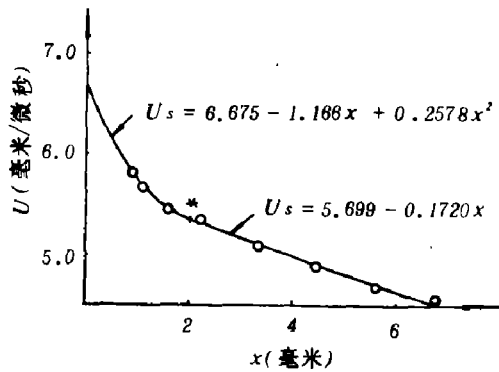


图3 TNT爆轰波作用下，水中冲击波速度衰减的实测曲线

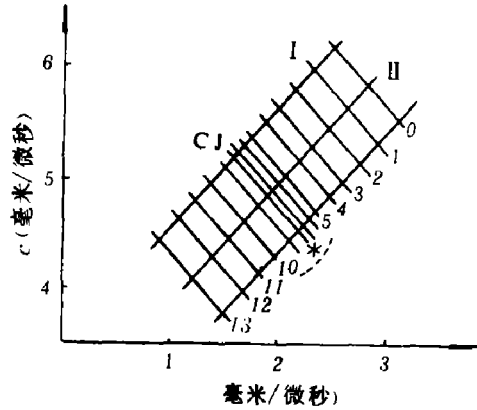


图4 爆轰产物的u—c状态平面图

计算结果见表3和图5。可以看到，根据实测数据算得的爆轰波轮廓是同ZND模型的预言相一致的。一般感兴趣的有如下几个参数：反应区宽度0.51毫米；CJ压力 $P_{CJ} = 17.40 GPa$ ，峰压力 $P_s = 29.58 GPa$ ， $P_s/P_{CJ} = 1.7$ 。

由于实测的水中冲击波衰减曲线并无明显的转折点，故在确定*点时有一定的任意性。靠外推求得的峰压力 P_s 也有一定的任意性。

所求的化学反应区宽度同文献值的对比见表4。可以看到，文献数据是相当混乱的，这表明需对问题作更广泛深入的研究。附带说明：在表4中所提到的Duff公式见〔5〕。该文在推导反应区宽度的计算式时，对问题作了很大简化：把反应区内一系列稀疏波简化为集中在反应区末端的一道波，计算所需的界面速度，惰性介质中冲击波传播速度等，都只取某个平均值，故它只能求得反应区宽度一个量，得不到参数的分布，而且误差较大，据该文作者自己估计，误差在20%以上。我们在利用Duff公式计算时发现，有关平均值的取法对计算结果相当敏感；表4中所给的反应区宽度0.47毫米，是我们认为是合理的一种平均值求得的。

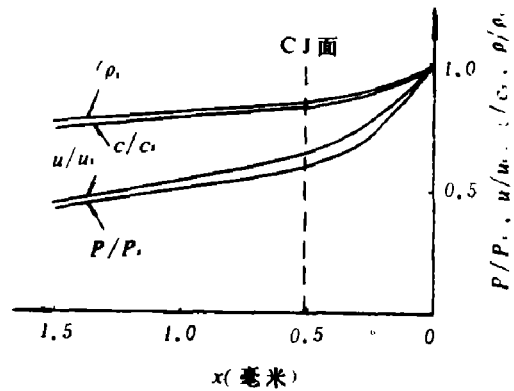


图5 TNT炸药爆轰波的剖面

五、讨论和结论

1. 本文建立了利用惰性介质（水）中冲击波衰减的实测曲线计算凝聚炸药爆轰波剖面的方法，并以TNT炸药为例进行了计算，给出了爆轰波内压力、密度、流速和声速等参数的分布。此计算方法，是假定爆轰产物遵循常k值多方规律，根据气体动力学特征线理论建立的。

表3 TNT炸药爆轰波剖面的数据

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8 (CJ面)	9	10	11	12	13	14
x (毫米)	0	0.09	0.162	0.230	0.280	0.340	0.390	0.450	0.510	0.630	0.760	0.990	1.180	1.340	1.490
u_r (毫米/微秒)	2.553	2.343	2.163	2.014	1.886	1.795	1.722	1.660	1.612	1.553	1.494	1.376	1.265	1.155	1.047
c_r (毫米/微秒)	6.255	6.017	5.819	5.650	5.510	5.411	5.325	5.260	5.208	5.137	5.072	4.942	4.817	4.695	4.574
P_r (克/厘米 ²)	2.443	2.359	2.290	2.230	2.180	2.145	2.115	2.092	2.073	2.048	2.024	1.978	1.937	1.893	1.845
P_r (GPa)	29.58	26.43	23.99	22.03	20.48	19.44	18.56	17.91	17.40	16.72	16.12	14.95	13.88	12.89	11.95

表4 所求得的TNT炸药化学反应区宽度同文献值的对比

出处	本文	见〔注〕	〔6〕	〔6〕	〔7〕	〔8〕	〔9〕
方法	水箱法— 特征线法	水箱法 Duff公式	电磁法	自由表面速度法 (铝, 组合板) Duff公式	由自由表面速度法 (铝, 整体板) Duff公式	测定惰性介质中 冲击波或自由表 面速度	测定惰性介质中 冲击波速度 Duff公式
ρ_0 (克/厘米 ³)	1.583	1.583	1.59	1.59	1.55	1.63	1.63
药柱直径 (毫米)	20	20	60	60	40	90	100
药柱长度/药柱直径	4	4	2.5—2.75	2.5	药柱连同透镜 长 85	药柱长 20, 40, 60	药柱长 25 用透镜引爆
反应区宽度 (毫米)	0.51	0.47	0.70	0.97	0.18	0.30	0.6±0.1

注: 本栏数据系用本文所援引的我们在1965年测得的水中冲击波数据及Duff公式求得。Duff公式见〔5〕。

关于常 k 值多方规律的可靠性,作者曾详细地讨论过,在第一次全国爆轰学术讨论会上作过介绍。结论是:当爆轰产物同水作用时,常 k 值多方规律可以比较准确地描述爆轰产物的行为。故以多方规律为基础建立的基本关系式(4) — (8)是足够好的。当然,也需注意常 k 值多方规律的适用范围:应把计算限制在距离CJ面不是太远的区域内。幸而,反应区和CJ面附近正是我们所感兴趣的区域。

2. 在计算中,忽略了波的反射。我们认为,对于本问题,这是可以允许的,其理由如下:

(1) 在爆轰产物中,忽略了稀疏波在产物—水界面上的反射。我们知道,当 $k = 3$ 时,从式(6)和(7)知:

对于右行波,其传播速度

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_e = (u_e + c_e) = \text{常数}$$

对于左行波,其传播速度

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_e = (u_e - c_e) = \text{常数}$$

即入射波和反射波是互不干扰的。

对于我们所计算的具体问题, $k = 3.232 \approx 3$ (对于凝聚炸药,一般都有 $k \approx 3$)。计算表明,受到图2所示中心稀疏波的干扰,入射波的传播速度只变化1%左右;受到界面上反射稀疏波的干扰,低压点影响略大一些,但在我们所考虑的范围内,也不超过1%。这说明,稀疏波的反射,是可以忽略的。

(2) 在水中,忽略了稀疏波在冲击波阵面上的反射。为了考察这个简化假设所引入的误差,我们计算了反射稀疏波的影响,即按图6(a)进行计算。为了求解界面和冲击波迹线之间的区域,必须假设水的压缩规律为 $P_w = \text{常数} \cdot \rho_w^n$, $n = \text{常数}$ 。通过计算,我们发现反射波

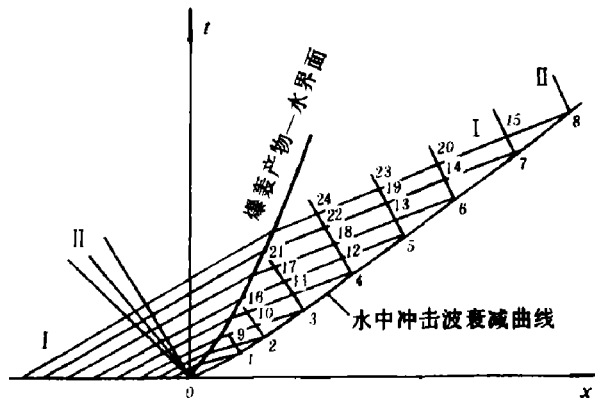


图6(a) 考虑稀疏波在冲击波面上反射的 $x-t$ 图

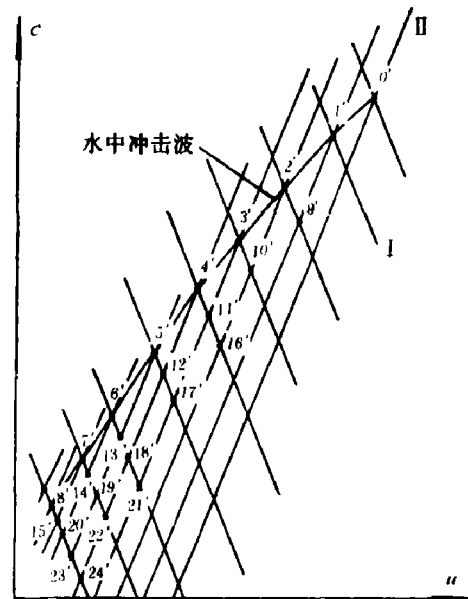


图6(b) 考虑稀疏波在冲击波阵面上反射的 $u-c$ 图

对入射波同样无明显的干扰; 受到干扰后, 入射波的传播速度只变化 $1 \sim 2\%$ 。

考虑反射波的干扰, 增加了计算的复杂性, 对结果又无多大影响, 而关于水的压缩规律的新假设, 还会引进新的误差。故我们决定, 在计算模型中, 略去稀疏波在界面上和冲击波阵面上的反射, 这在计算精度的范围内, 是完全允许的。

3. 计算结果的准确性, 还依赖于实测水中冲击波数据的准确性; 计算的精度则同所取的步长有关。本文所用 TNT 数据是在 1965 年测得的。在有的扫描照相记录上, 冲击波轨迹的初始段不够清晰。近年来, 徐康、于德洋等⁽¹⁰⁾ 在改善底片清晰度上已经做了许多工作, 但初始段清晰度还不很好, 还有待于今后进一步努力。

4. 关于反射波对爆轰化学反应的影响问题。当凝聚炸药爆轰波入射于水时, 有稀疏波反射入爆轰产物中。本文尚未考虑这个反射波对化学反应的影响。这是一个比较复杂的问题, 我们拟在以后研究之。

5. 由于本方法的建立, 使“水箱法”可以不仅得到 CJ 爆压值, 还能得到爆轰波参数的分布和化学反应区宽度等更重要的知识。本计算方法同样可以处理“自由表面速度法”的数据。求得了凝聚炸药爆轰波的剖面, 就能积累比较完整的数据, 这对于深入研究爆轰过程, 是有较大意义的。

本工作是在徐康同志的支持和指导下完成的, 特致谢。

参 考 文 献

- [1] Walsh, J. M., Rice, M. H., *J. Chem. Phys.*, **26** (4) (1957), 815—823.
- [2] Rice, M. H., Walsh, J. M., *J. Chem. Phys.*, **26** (4) (1957), 824—830.
- [3] 鲍姆, Ф. А. 等(众智译), 爆炸物理学, 科学出版社(1936).
- [4] Shapiro, A. H., *the Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, The Ronald Press Company (1954).
- [5] Duff, R. E., Houston, H., *J. Chem. Phys.*, **23**(7) (1955), 1268—1273.
- [6] Веретенников, В. А. и др., *Ф. Г. В.*, **3**(1) (1967), 3—10.
- [7] Дремин, А. Н., Похил, П. Ф., *Ж. Ф. Х.*, **34**(11) (1960), 2561—2570.
- [8] Зубарев, В. Н. и др., *Ф. Г. В.*, **6**(1) (1970), 107—113.
- [9] Jameson, R. L., Hawkins, A., *5th. Symp. on Detonation*, AD-712081 (1970), 17—25.
- [10] 徐康等, 爆炸与冲击, № 2 (1981), 89.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE STRUCTURE OF THE DETONATION WAVE IN CONDENSED EXPLOSIVE

Liu Jiacong

Abstract

This paper presents a method of characteristics to calculate the structure of the detonation wave in condensed explosive by the decay shock curve data obtained in the aquarium test. As an example, the distribution of the detonation pressure, density, particle and sound velocity along the detonation profile are given for TNT.