

# 爆炸量热计与凝聚炸药爆轰参数

## ——DQ法及其应用

曾雄飞

(1982年1月19日收到)

本文提出爆炸量热计模型，导出了凝聚炸药的爆轰参数与爆炸转化热之间的相互关系，并提供了一个由爆速和爆热确定爆压的新方法（DQ法）。

### 引 言

爆轰参数与爆炸反应热究竟有怎样的联系，早已受到人们的注目。Kamlet等人研究了爆速D和爆压p同爆炸反应热的经验式（Kamlet的爆炸反应带有一定的任意性）<sup>[1][6]</sup>。Пенекин等人注意到了爆轰参数与重外壳爆热（气态水）的关系（通过经验状态方程）<sup>[7]</sup>。本文提出爆炸量热计模型，导出了凝聚炸药的爆轰参数与爆炸转化热 $Q_c$ （液态水）之间的近似相互关系，并提供了一个由爆速和爆热确定爆压的新方法（DQ法）。

### 一、爆轰参数与爆炸转化热 $Q_c$

我们对爆轰波作以下基本假定：它是受爆炸反应热支持的冲击波，存在着稳定爆轰区；爆轰反应产物从C—J面沿绝热线膨胀，在此过程不发生化学反应。

#### （甲）爆炸量热计

为了寻找爆炸反应热与爆轰参数之间的关系，提出如下的理想化模型。设有一个理想的爆炸活塞，它的壁是绝对刚体和绝热体，活塞没有质量。其中炸药被引爆后，稳定区的爆轰产物处于C—J态，随后作绝热膨胀至终态（见图1）。活塞通过一个无耗损的机械能传动器与一个足够大的量热计相连，将机械能转变为热能。

设爆轰产物在C—J态的内能为 $U_c$ ，绝热膨胀至终态的内能为 $U_e$ 。量热计实验上测得的热能为 $Q_c$ 。下

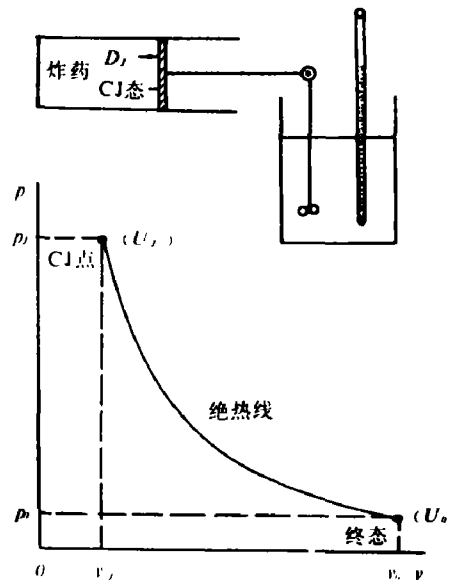


图1 爆炸量热计和爆轰产物的绝热膨胀

面将证明应当有  $U_J - U_0 = Q_e$ 。

(I) 按照热力学第一定律,  $dU = \delta q - p dv$ , 当爆轰产物从 C—J 态 (高温高压) 沿绝热线膨胀时, 只做膨胀功,  $\delta q = 0$ , 故有

$$U_J - U_0 = \int_{U_0}^{U_J} dU = - \int_{p_0}^{p_J} p dv = W_p \quad (1)$$

由于爆轰产物的膨胀是不可逆的, 因此这个关系是近似的。

(II) 膨胀功  $W_p$ , 作为机械能的一种形式, 通过无耗损传动器, 而对量热计做功。量热计足够大, 因此其体积和压力的变化可忽略不计, 与环境也无热交换。故此功仅用以改变量热计的内能  $\Delta U_m$ , 即有

$$\Delta U_m = W_p = - \int_{p_0}^p p dv \quad (2)$$

(III) 量热计内能的增加  $\Delta U_m$ , 引起其温升, 通过实验测量, 相应于这一温升的热能为  $Q_e$ 。由于量热计不做其它功 (压力、体积也不变), 所以有

$$\Delta U_m = - \int_{p_0}^p p dv = Q_e \quad (3)$$

(IV) 比较式 (1) 与式 (3) 得

$$U_J - U_0 = Q_e \quad (4)$$

这就是 C—J 产物的内能与爆炸转化热  $Q_e$  之间的关系。由于式 (4) 左端的  $U_0$  和右端的  $Q_e$ , 其基准态近似相等, 因此可得:

$$U_J \approx Q_e \quad (5)$$

当然, 这是一个理想化的模型。量热计中的实际过程要比它复杂得多。因此这只是一个近似关系。后面会看到, 这个近似足够良好。

#### (乙) 爆轰参数与爆炸转化热

由爆炸量热计模型, 依据 (质量、动量和能量) 守恒定律和爆轰波理论, 不难导出爆轰参数与  $Q_e$  的关系。

##### (一) 焓能比与稳定爆轰条件

我们定义  $k = H/U$  (焓能比), 由热力学  $H = U + pv$  于是得

$$U = \frac{pv}{k-1} \quad (6)$$

如 C—J 量均略去下标 “J”, 利用式 (5), 由式 (6) 得

$$p = \frac{(k-1)Q_e}{v} \quad (7)$$

从式 (6) 出发, 利用热力学第一定律和 C—J 条件, 不难得到强爆轰的稳定条件

$$\rho = \frac{k+1}{k} \rho_0 \quad \text{或} \quad v = \frac{k}{k+1} v_0 \quad (8)$$

(二) 爆轰参数与 $Q_e$ 

应用式(7)、(8)和冲击波基本关系式, 便导出

$$\text{爆压} \quad p = \frac{(k^2 - 1)}{k} \rho_0 Q_e \quad (9)$$

$$\text{爆速} \quad D^2 = \frac{(k + 1)(k^2 - 1)}{k} Q_e \quad (10)$$

$$\text{质点速度} \quad u^2 = \frac{(k - 1)}{k} Q_e \quad (11)$$

$$\text{声速} \quad C^2 = (k - 1) k Q_e \quad (12)$$

由式(9)至(12)知, 如果爆速和爆热由实验测定, 便可以引出爆压 $p$ 和其它爆轰参数 $k$ 、 $u$ 、 $C$ 等。故我们称这一方法为爆速爆热法, 简称DQ法。

二、爆轰参数与 $q_e$ 

按照爆轰的流体力学理论, 强爆轰的能量方程为<sup>[3]</sup>

$$U - U_0' = \frac{1}{2} u^2 + q_e'$$

现将 $U_0'$ 合并到 $q_e'$ 中, 能量方程可写作

$$U = \frac{1}{2} u^2 + q_e \quad (13)$$

假定爆轰产物服从 $pv^k$ 方程, 利用C—J条件, 便导出爆轰参数与 $q_e$ 的关系<sup>[3]</sup>

$$p = 2(k - 1) \rho_0 q_e \quad (14)$$

$$D^2 = 2(k^2 - 1) q_e \quad (15)$$

$$u^2 = \frac{2(k - 1)}{k + 1} q_e \quad (16)$$

$$C^2 = \frac{2k^2(k - 1)}{(k + 1)} q_e \quad (17)$$

这套式子, 在国内外已被广泛应用<sup>[4][5]</sup>。这里的 $q_e$ 有的书上称为爆轰热。由式(14)—(17)知, 当爆速和爆压由实验上测定后,  $q_e$ 、 $k$ 、 $u$ 、 $C$ 等便确定了。下面会看到, 这套式子中的 $k$ 与(9)—(12)中的 $k$ 具有共同的物理含义。

三、 $q_e$ 与 $Q_e$ 的关系

按照热力学,  $H = U + pv$ , 利用流体力学理论的结果, 由式(8)、(13)、(14)和(16)不难得到

$$\frac{H}{U} = 1 + \frac{pv}{U} = 1 + \frac{2(k - 1) \rho_0 q_e \cdot \{k / [(k + 1) \rho_0]\}}{1/2 \cdot \{2(k - 1) / (k + 1) \cdot q_e\} + q_e} = k$$

也就是说,流体力学理论下的 $k$ 值与量热计模型中的 $k$ ,具有共同的物理含义:热焓对内能的比值(焓能比)。

如果能量的参考态均放在标准态,由式(5)和(13),便得到

$$Q_c = \frac{1}{2}u'^2 + q_c \quad (18)$$

应用式(18),代入式(14)至(17),便得到式(9) — (12)。

这些事实说明,由爆炸量热计模型导出的爆轰参数与 $Q_c$ 的关系,和由流体力学理论导出的爆轰参数与 $q_c$ 的关系,这两套式子在物理力学上是等价的:

爆炸量热计模型	流体力学理论
$p = \frac{(k^2-1)}{k} \rho_0 Q_c$	$p = 2 \rho_0 (k-1) q_c$
$D^2 = \frac{(k+1)(k^2-1)}{k} Q_c$	$D^2 = 2(k^2-1) q_c$
$u'^2 = \frac{(k-1)}{k} Q_c$	$u'^2 = \frac{2(k-1)}{k+1} q_c$
$C^2 = k(k-1) Q_c$	$C^2 = \frac{2k^2(k-1)}{k+1} q_c$

#### 四、应 用

上述方法可以在下列几个方面获得应用。

##### (一) 爆压的估计

目前测爆压的方法主要是自由表面速度法、电磁法和水箱法等。本文提出的DQ法是以不同的原理为基础,确定爆压的一种新方法。

稳定爆轰对应于足够大的装药,而爆热测试药量较小(10—50克)。为了使爆热的测试接近于稳定爆轰条件,这里的 $Q_c$ ,应是重外壳下测定的爆热(液态水)。如4mm以上的黄铜外壳、金壳或足够厚的陶瓷外壳等。

对于九种典型炸药,用D—Q法和用其它方法引出的爆压的对比见图2—5。从中看出,虽然它们之间在原理和实验手段上有较大的差别,但结果在实验误差范围内基本符合。由此可见,量热计模型虽是理想化的近似模型,但仍不失为较好的近似。

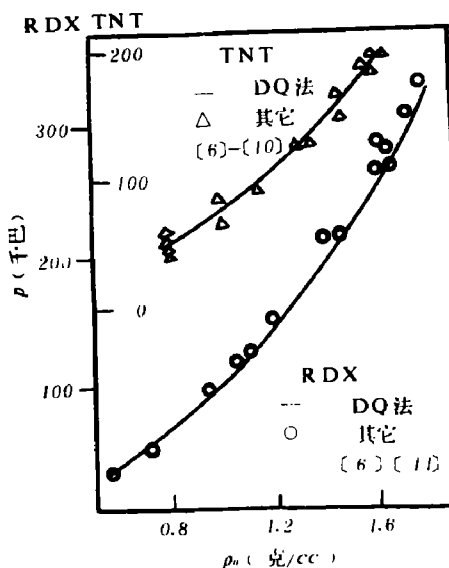


图2 RDX和TNT  $p-\rho_0$ 关系

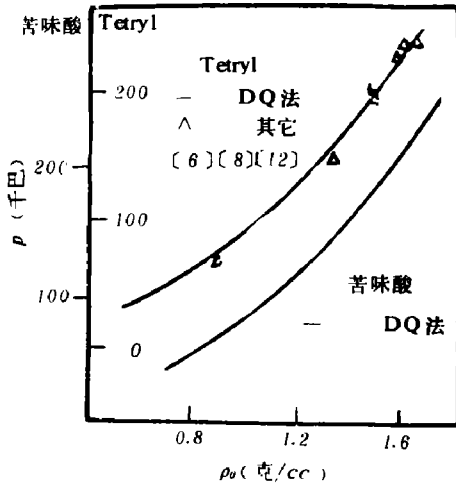


图3 Tetryl 和苦味酸  $p-\rho_0$  关系

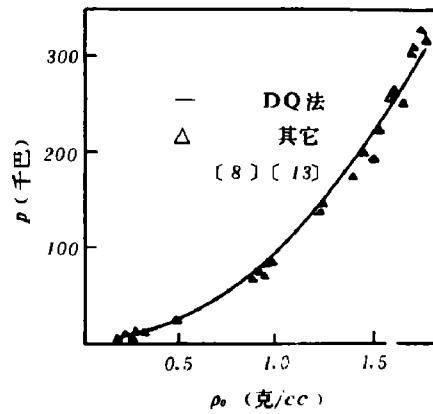


图4 泰安  $p-\rho_0$  关系

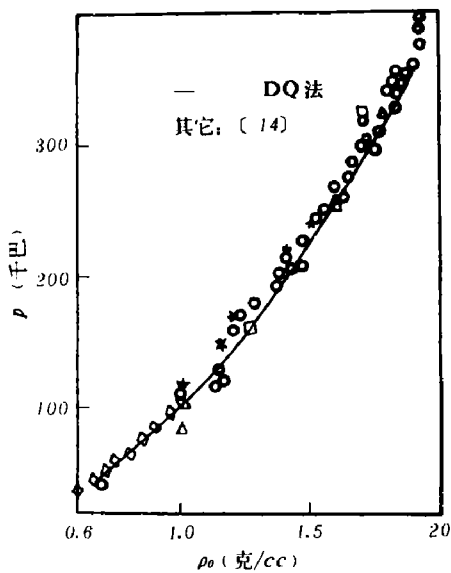


图5 HMX  $p-\rho_0$  关系

(二) 爆热比  $\eta$

上面的研究给出爆热比为:

$$\eta = \frac{q_c}{Q_c} = \frac{(k+1)}{2k} \quad (19)$$

于是当  $k = 3$ ,  $\eta \approx 0.67$ , 这与文献(15)用爆压和爆热的实验材料, 得出  $\eta \approx 0.70$  的结果一致。表(1)中给出的典型炸药的实验爆轰参数和  $\eta$  值。表中还给出  $U$  与  $Q_c$ , 它们也确实在实验误差内一致。

(三) 其它

由于爆速和爆热可以比较方便地进行计算, DQ法尚可预测新炸药的爆轰参数, 系统研究爆轰产物的状态方程, 预测与炸药接触爆轰的介质(如金属、水等)中的初始冲击波参数等。在这些方面所进行的初步计算表明, 结果也是较好的。这些将在专门的文章中讨论。

表 1

炸 药	$\rho$ (克/厘米 <sup>3</sup> )	$D$ (KM/sec)	$P$ (GPa)	$Q_e$ (实验) (卡/克)	$U$ (式13) (卡/克)	$\eta$	
						式(19) (注1)	由实验 结果求 出(注2)
NM	1.13	6.30	12.7 [2][16]	1227 [17]	1257	0.70	0.71
NG	1.60	7.65	25.3 [16]	1585 [20]	1622	0.69	0.70
II	1.823	8.90	35.4	1703 [19]	1689	0.66	0.66
TNT	1.60	6.91	19.0 [9]	1090 [17][19]	1055	0.67	0.64
Tetryl	1.614	7.58	22.6 [1]	1165 [2][18][19]	1203	0.66	0.68

[注1] 由实验测定的  $D, P$  求出  $K$  值, 再用 (19) 式计算

[注2] 由实验测定的  $D, P$ , 用 (14)、(15) 式求出  $q_e$ , 再由实验测定的  $Q_e$  求  $\eta$

## 结 论

由爆炸量热计模型结合冲击波理论导出了爆轰参数与  $Q_e$  的联系, 在这个基础上提出的  $DQ$  法可以作为一种独立的确定爆压的方法。这样的关系与用爆轰的流体力学理论导出的爆轰参数与  $q_e$  的联系, 在物理力学上是等价的, 由此找出了  $Q_e$  与  $q_e$  的关系式。

本研究得到过徐康、丁傲和于水忠等同志的多方面帮助, 深表谢意。

## 参 考 文 献

- [1] Kamlet, M. J., et al., *J. Chem. Phys.*, **48** (1968), 23.
- [2] Пепекин, В. И., и др., *Д. А. Н.*, **234** (1977), 105, 1391.
- [3] 鲍姆, Ф. А. 等, 爆炸物理学, 科学出版社 (1963), 48.
- [4] 韩教信, 私人通讯 (1979).
- [5] Jameson, R. L., et al., *5-th Symp. on Detonation* (1970), 23.
- [6] Kamlet, M. J. and Dickinson, C., *J. Chem. Phys.*, **48** (1968), 43.
- [7] Евстигнеев, А. А., и др., *ФГВ*, **12** (1976), 758.
- [8] Дремин, А. Н., и др., *ИМТ Ф.* **2** (1964), 154.
- [9] Edwards, D. J. et al., *AD-749330* (1972).
- [10] Веретеников, В. А., и др., *ФГВ*, **3** (1966), 3.
- [11] Кузунцов, Н. М., Шведов, К. К., *ФГВ*, **4** (1965), 85.
- [12] Jacobs, S. J. and Edwards, D. J., *5-th Symp. on Detonation* (1970), 413.

- [13] Hornig, H. C., Lee, E. L., et al., 5—th Symp. on Detonation (1970), 503.  
[14] Finger, M., Lee, E., et al., 6—th Symp. on Detonation (1976), 710.  
[15] 于永忠, 私人通讯 (1980).  
[16] Dremine, A. N., et al., 8—th Symp. on Combustion (1962), 610.  
[17] Ornellas, D. L., *J. Phys. Chem.*, 72 (1968), 2390.  
[18] Sutton, T. C., *Trans. Faraday Soc.* 34 (1938), 992.  
[19] 张良亮, 范时俊等, 私人通信 (1979).  
[20] 装药工作者原材料手册, 国防工业出版社 (1960)

## THE THERMOMETER OF EXPLOSION AND THE DETONATION PARAMETERS FOR CONDENSED EXPLOSIVES

Zeng Xiongfei

### Abstract

The model of explosion thermometer has been suggested, the relation between the detonation parameters and the reaction heat of explosion has been investigated. A new method to determine the parameters  $p, v, u, C$  and  $k$  in C—J state, may be derived from the detonation velocity  $D$  and the explosion heat  $Q_e$ , we call it the DQ—method.