



炸药爆轰参数的测量

吴国栋

一、前言

爆轰学的发展是随着实验测量技术的不断发展而发展的。从实验观察结果与理论假设之间的偏差中,促进了爆轰学研究的不断创新。

自 Berthlot 等人发现爆轰现象已有一百多年的历史。一个多世纪以来,测量技术有了很大的提高。当初,人们只能用简单的电探针技术测量爆轰波阵面的传播速度,而现在已发展到用 Lagrange 量计测量压力剖面和粒子速度剖面。在光测技术方面,最初只能用高速转镜相机观察爆轰波阵面的传播,以后又发展到用纹影技术观察气体爆轰波结构。目前又发展到用激光干涉仪等技术观察凝聚炸药内反应区特性。

炸药的爆轰现象是一个复杂的化学反应动力学过程。无论是 CJ 模型,还是 ZND 模型,都是基于一维平面定常运动的假设。对炸药爆轰参数的许多测量都是在这一假设的基础上建立起来的。目前,除了在气体爆轰中观察到三维胞格结构外,还在凝聚炸药中观察到类似的现象。近年来已清晰地观察到固体炸药中的非稳态爆轰现象,因此实测的某些爆轰参数仅是一种宏观平均参数。尽管如此,这些参数的确定在工程使用中又是十分重要的。通过这些参数,能使工程设计人员清楚地了解炸药的性能和作功能力等信息。本文将简要地介绍炸药常用的爆轰参数的测量技术及最新进展。

二、炸药稳态爆轰波参数测量

爆压 p , 爆速 D , 爆轰波阵面后粒子速度 u 等参数,都是基于 ZND 模型的假设下测定的。ZND 模型认为:化学反应在 CJ 面处结束,并达到平衡态。

1. 爆压的测量

在工程使用和理论计算中,爆压是很重要的一个参量,以下将较详细地介绍有关对它的测量方法。测量方法大致可以分成两大类。

(1) 间接法

所谓间接法,就是通过测量与炸药相邻介质内的冲击波参数来反推炸药的爆轰波参数。这类方法是基于把炸药爆轰过程视为符合 ZND 模型,即把爆轰波阵面看成是由前沿冲击波和紧跟其后的化学反应区所组成(见图 1 纵坐标的左侧所示)。如果紧贴着炸药表面放置一块惰性物质,则当爆轰波垂直入射于惰性物质时,如

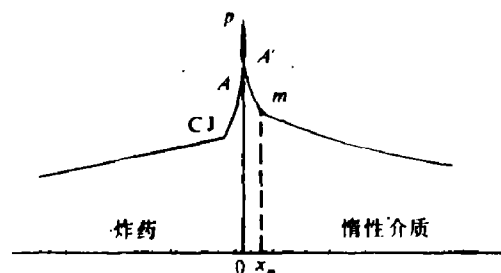


图 1 ZND 模型的压力剖面在相邻惰性介质内冲击波阵面幅度衰减曲线

惰性介质的冲击阻抗低于爆轰产物的阻抗, 这时有一稀疏波反射到爆轰产物中; 反之, 有一个冲击波反射到爆轰产物内。惰性介质内的击波幅度衰减曲线和炸药内爆轰波剖面之间有对应关系 (见图 1 纵坐标的右侧所示)。图中 m 点参数与炸药 CJ 点参数有对应关系, 可以采用以下关系式进行计算^[1]。

在反射冲击波时, 有

$$u_m = \frac{D}{k+1} \left[1 - \sqrt{2k} \frac{\pi-1}{\sqrt{(k+1)\pi+(k-1)}} \right] \quad (1)$$

$$p_m = c_0 + \lambda u_m, \quad p_m = \rho_{0m} u_m^2, \quad \pi = \frac{p_m}{p_{CJ}} \quad (2)$$

式中 D 为爆速, u_m , p_m , ρ_m 分别为 m 点处的粒子速度、冲击波速度和压力, c_0 , λ 为惰性介质的线性 Hugoniot 关系的常数, k 为爆轰产物状态方程中的多方指数, ρ_{0m} 为惰性介质初始密度。

在反射稀疏波时, 有

$$u_m = \frac{D}{k+1} \left[1 + \frac{2k}{k-1} (1-\pi)^{1/(k-1)} \right] \quad (3)$$

因此, 只要测得 m 点处的冲击波速度或粒子速度, 就能确定这种炸药的 CJ 爆压。图 2 绘出了测量爆压的装置图^[2]。这种装置可利用多根电探针或光导索一次测出几个厚度的惰性材料自由面速度 u_f , u_f 随板厚的变化关系绘于图 3。用最小二乘法分段线性拟合这些实验点, 确定出 m 点的诸参数, 再近似认为, 交点 m 处的 u_f 值的一半等于 (1) 式中 u_m 。利用测得的爆速 D 和 m 点处的 u_m , 代入 (1) 和 (2) 式 (反射稀疏波时代入 (2)、(3) 式), 经过几次迭代, 即能确定爆压 p_{CJ} 和多方指数 k 。

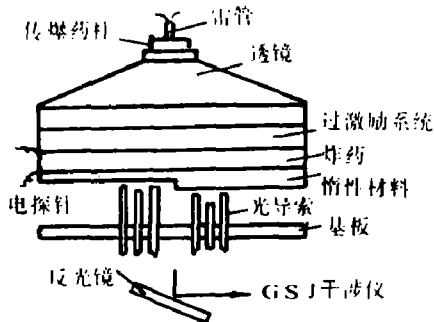


图2 自由面速度法测爆压装置

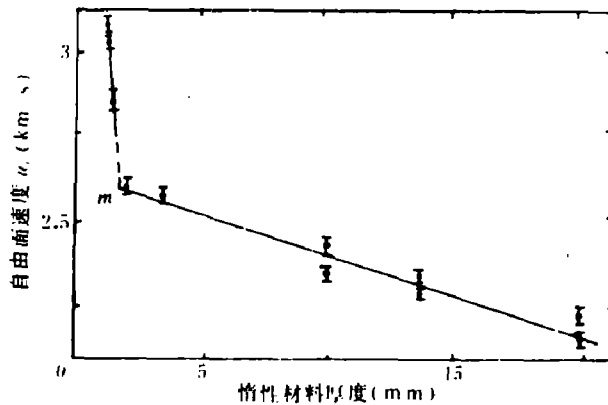


图3 硬铝(Ly-12)的自由面速度随板厚的变化关系

在1945年, Goranson^[3]首先提出了利用测量不同厚度惰性金属板自由面速度来确定拐点 m 处的粒子速度。以后 Duff^[4]改进了这种方法。Rigdon^[5]提出了用水箱法测定爆轰波在水中衰减过程来确定爆压, 徐康等人^[6]在水箱法上做了许多工作, Веретенников 等人^[7]利用空气作为惰性介质, 其原理都是利用了介质的透明性, 用高速相机直接观察冲击波的衰减过程。另一种较简便的、古老的方法是板痕法^[8], 这种方法早在一百多年前就提出来了, 其原理是测量炸药在标准钢板上的爆轰凹痕, 然后由预先标定的曲线来推算爆压。董海山等人^[9]用台阶式有机玻璃块测量图 2 中惰性材料的自由速度, 确定了多种炸药的爆轰参数。Deal 法是测量炸药与各种冲击阻抗惰性材料的界面压力与粒子速度, 在 $p-u$ 图上画出二次冲击(稀疏)线, 它与以斜率为 $\rho_0 D$ 并通过原点的直线的交点坐标即是该炸药的 CJ 爆轰压力与 CJ 粒子速度。Deal 法的结果精度较高, 但是确定一种炸药的爆压需进行多次实验。Held^[10]和本作者^[11]各自独立地提出了用楔形有机玻璃法确定炸药

的爆轰性能。他们利用楔形有机玻璃块作惰性材料,用外光源照相的方法确定冲击波在有机玻璃内传播轨迹。这种方法的优点是仅需一发实验就能确定炸药爆轰参数。这种方法能较清晰地观察反应区内的特性,并能较清楚地确定出 m 点的位置。

(2) 直接法

所谓直接法,就是通过直接测量炸药内的压力剖面或粒子速度剖面来确定炸药的爆压。目前已成功地用锰铜压力计、电磁粒子速度计、脉冲X射线阴影摄影法和激光干涉仪等方法,测量了多种炸药的爆压。图4绘出了锰铜压力计测量爆压的装置图^[2]。压力计可用某些压力敏感材料(如锰铜、镍、碳)制成^{[2][12]},在高温高压作用下,这些材料的电阻率仅和加载压力有关这种压力计一般用聚四氟乙烯等绝缘材料作为绝缘基板。在恒(电)流激励下,压力计活性区(压力敏感材料)电阻的相对变化 $\Delta R/R_0$ 近似正比于电压相对变化 $\Delta V/V_0$,即 $\Delta R/R_0 \propto \Delta V/V_0$ 。因此由实验测得活性区两端的电压 $V(t)$ 就能由下式换算成压力剖面。

$$p = f\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) \quad (4)$$

$f(\Delta R/R_0)$ 可由实验标定。我们对F-203 A 锰铜压力计标定的结果^[13]为

$$p = 0.60 + 30.86\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) + 21.16\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 - 6.61\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^3 \quad (\text{GPa}) \quad (5)$$

把封装好的锰铜压力计嵌入如图1所示的待测炸药内,即能获得如图5所示的炸药爆轰波的压阻讯号示波图。由图中 V_0 值及拐点(CJ)处的 ΔV 值,代入(5)式即能确定这种炸药的爆压。

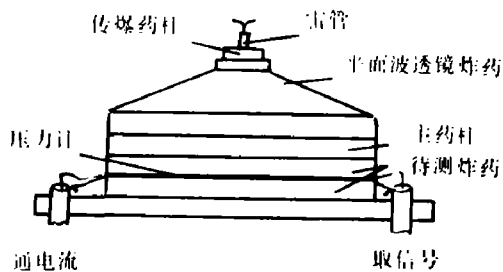


图1 压阻法测量爆压装置图

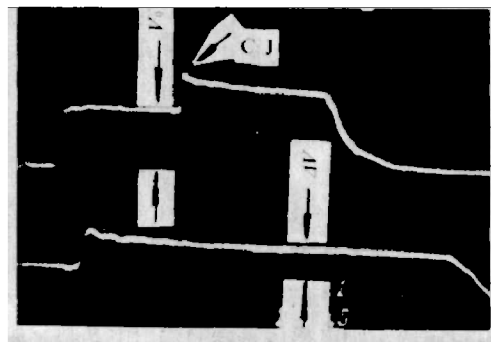


图5 F-203 炸药中的压阻测量示波图

脉冲X射线法^[14]是利用X光照相记录被测炸药爆轰产物拉格朗日质点位置随时间变化的函数。其原理是在被测炸药中平行地嵌入多片薄钽箔,由X光照相测定不同时刻这些钽箔的位置来确定爆轰产物的粒子速度。

自1972年提出了VISAR激光干涉仪以后,Kennedy^[15]利用它研究了固体炸药的爆轰特性。他在炸药表面加一个溶凝的石英窗口,并在石英窗口和炸药之间加一极薄层反射镜面。然后再利用VISAR激光干涉仪测量炸药与石英之间的界面运动。用实测结果,并通过换算后即能确定炸药爆轰的粒子速度剖面。因此只要窗口材料选择合适,就能真实地测量炸药爆轰的粒子速度剖面。我国田清政等人对此也有较多的研究。

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室,利弗摩尔国家实验室,苏联 Дремин 等人对许多炸药的爆压进行了测量。表1仅列出了我国爆轰研究人员测得的部分炸药的爆压数据。

然而,从已发表的国内外大量数据来看,即使对同一种炸药,用不同方法测定的爆压值均有比

较大的差别,其原因目前尚未得到比较满意的解释。

表1 部分炸药爆压数据

炸药	[11] TNT	[35] $\frac{TNT}{RDX}$	[7] RDX	[7] $\frac{RDX}{\text{石蜡}} = \frac{40}{5}$	[9] PBX-9404	[9] B _{0.750} 泡沫	[9] $\frac{TNT}{Ba(NO_2)_2}$	[17] TNT	[31] $\frac{TNT}{RDX} = \frac{36}{64}$	[37] TI	[18] Tetryl
密度 ($\frac{g}{cm^3}$)	1.615	1.70	1.700	1.655	1.840	0.7	2.660	1.60	1.712	1.597	1.699
爆速 ($\frac{km}{s}$)	6.95	7.76	8.415	8.358	8.812	3.20	4.776	—	7.965	7.320	7.574
爆压 (GPa)	20.99	24.0	28.95	26.19	36.3	2.1	10.8	18.4	28.72	22.5	26.06
K 值	2.70	—	—	—	2.94	—	4.624	—	2.782	—	2.74

2. 粒子速度、爆速的测量

爆速值的测定,一般都用电探针技术,用于测量它在某一厚度内的平均值。但是,在爆轰波平面度比较好的情况下,也可以用楔形炸药的光测技术进行测量。用这样光测技术可确定爆速的瞬时值。

目前,炸药爆轰的粒子速度剖面除了可用上一节谈过的激光干涉仪法、脉冲X射线法测量外,还可以采用电磁法进行测量^{[16][17]}。其原理见图6。该法把门形传感器埋入炸药内,由于爆轰产物的粒子运动驱动门形传感器在磁场中切割磁力线,如果该磁场为恒定磁场,则电磁传感器的输出电动势 ϵ 为

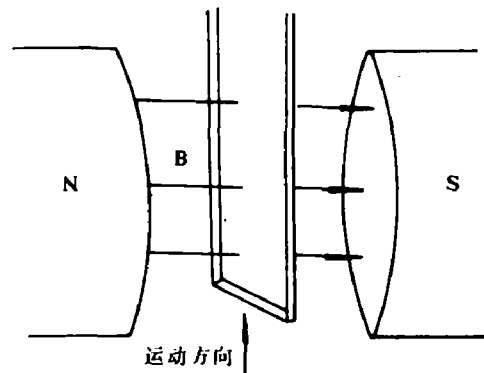


图6 电磁法原理图

$$\epsilon = BLu \quad (6)$$

式中 L —门形传感器的框底长度, B 磁感应强度,测出 ϵ 就能由(6)式算得粒子速度 u 。

最近,曹世勤^[18]研制的二维粒子速度计既能用于大直径药柱的测量,也能用于二维系统的粒子速度的测量。该方法具有装置简单、适用性强的优点。

三、炸药 Hugoniot 关系测量

在研究炸药冲击引爆机理及对爆轰波数值模拟时,炸药的 Hugoniot 曲线是必不可少的。目前在国外主要用楔形炸药样品法^{[19][21]}、隔板法^[22]、电磁法^[20]等方法进行测量。图7所示的楔形法是把炸药样品制成楔形状并和衰减层紧贴。楔形炸药表面贴上镀铝的塑料薄膜作为镜面,此

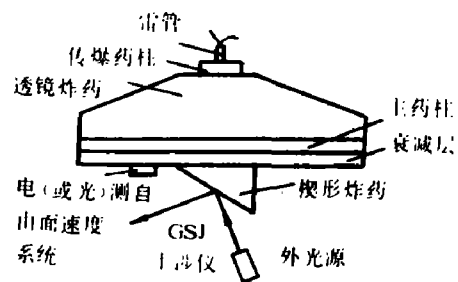


图7 楔形法装置图

镜面在冲击波的作用下其反射特性受到破坏。利用高速转镜相机能得到截止光的轨迹, 此轨迹即可描绘出由冲击波增长为爆轰波的过程。用最小二乘法分段拟合这一轨迹线就能确定进入炸药的初始冲击波速度。测量衰减层的自由面速度并利用阻抗匹配法就能确定界面上的压力及粒子速度。调节不同的入射压力(衰减层中压力), 就可得到炸药中不同的 Hugoniot 点参数, 这些参数点的集合, 就是炸药的 Hugoniot 线。国内用锰铜压力计法^[23]、压力对比法^[24]等方法测量过多种炸药的 Hugoniot 关系。作者^[23]曾用高速转镜相机测量炸药薄片内的冲击波速度 v , 和撞击飞片的速度 v_f , 同时还用锰铜压力计测量飞片撞击炸药界面处的压力 p , 用 v_f, p 三个量中的任意两个量组合, 都可以求出炸药的 Hugoniot 线, 这样又便于对所得结果进行互相比较。压力对比法^[24]是同锰铜压力计同时测量飞片撞击标准材料及待测炸药表面的压力, 从而确定炸药的 Hugoniot 关系, 这种方法的精度与楔形法相近。表 2 给出几种典型炸药的 Hugoniot 数据, 表中的 c_0, λ 为冲击波 Hugoniot 关系 $v = c_0 + \lambda u$ 中的两个系数(式中 v 为炸药中冲击波速度, u 为粒子速度)。

表 2 炸药冲击 Hugoniot 关系: $v = c_0 + \lambda u$

炸 药	密度(g/cm ³)	c_0 (km/s)	λ	注
铸 装 TNT ^[23]	1.60	2.26	1.82	$v < 4.08$
		2.70	1.38	$v > 4.08$
PBX-HMX-A ^[24]	1.84	2.786	2.125	
PBX-HMX ^[25]	1.84	2.893	1.938	
TNT/RDX = 35/65 ^[26]	1.70	1.672	2.880	

四、爆轰产物状态方程

爆轰产物状态方程研究一直比较活跃, 因为它在爆轰波的数值模拟中起着重要作用。 γ 律状态方程的测量经常是和爆压测量一起进行(此处 γ 即是方程(1)中的 k 值)的, 即在测定爆压的同时也确定了 k 值。

图 8 列出了确定 JWL 状态方程的圆筒试验示意图。对于理想炸药, 一般都采用内径为 2.54 厘米的标准圆筒试验。筒壁由含铜量 99.99% 以上的无氧铜管精加工而成, 其长为 30.48 厘米, 壁厚 0.26 厘米, 内装炸药样品。试验时一端用平面波透镜装药起爆, 用氩气弹作外光源, 然后用狭缝相机记录圆筒壁的膨胀过程。图中的电探针用于测量壁膨胀到该点的时间。利用以上试验测得的铜套膨胀轨迹, 再通过二维计算程序, 就可以确定下述 JWL 状态方程中的六个系数:

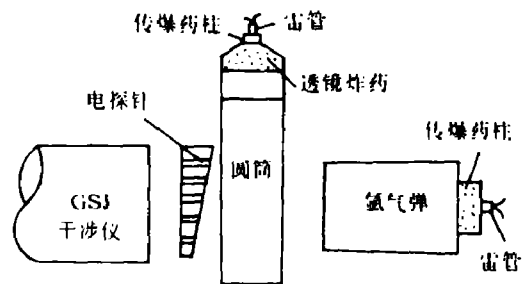


图 8 圆筒试验装置示意图

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-(W+1)} \quad (7)$$

式中 p —爆轰产物压力, V —产物比容与初始比容之比, A, B, C, R_1, R_2 和 W 为六个待定系数。殷致远等^[27]用二维 HELP 程序计算得到了部分炸药的 JWL 参数, 计算结果与实测结果符合得较好。花平环^[28]则利用实测的 $p_{cJ}, k, E_{cJ}, v_{cJ}$ 等参数, 并通过以下关系

$$k = \frac{V}{\rho_0} [AR_1 e^{-R_1 V} + BR_2 e^{-R_2 V} + C(W+1)e^{-(W+2)}] \quad (8)$$

$$E = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{W} V^{-W} \quad (9)$$

式中 k —多方指数, E —爆轰产物内能, 联立 (7)、(8)、(9) 式, 就得到了含有六个未知数的三个方程。解题时, 首先用 R_1, R_2, W 的经验值 ($R_1 \approx 4, R_2 \approx 1, 0.2 < W < 0.4$) 解出 A, B, C 三个数值, 然后再调节 R_1, R_2, W 的值, 使其结果与圆筒试验的测量结果符合为止。这种方法比较简便, 精度也基本满足要求, 而且只需要小型计算机即能完成上述计算。他求得了六种炸药的 JWL 方程的系数值列于表 3。

表 3 JWL 方程系数

炸 药	密度 g/cm^3	A	B	C	R_1	R_2	W
TNT	1.634	6.3108	0.069002	0.0065871	4.95	1	0.35
PBX-RDX	1.754	8.673	0.099125	0.007537	4.65	1	0.32
LSHEA	1.840	9.0102	0.10279	0.0067135	4.55	1	0.39
PBX-9404	1.840	9.2494	0.16991	0.010829	4.65	1.3	0.342
PBX-HMX	1.840	9.3477	0.12723	0.0095153	4.65	1.1	0.37
PBX-2	1.802	7.5443	0.14861	0.017533	4.5	1.3	0.294

最近, Gimenez^[29] 提出了另一种测定 JWL 方程中系数的新技术。他用对称平面结构代替了原来的圆柱形结构, 并用激光干涉仪测量平板速度随时间变化的过程, 测量时间可长达 10 微秒。这种方法的优点是装置简单, 并能由一发实验确定爆轰产物的所有特性参数。

目前常用的爆轰产物状态方程有 p 律方程、BKW 方程、JWL 方程和 JCZ 方程等。 p 律方程具有形式简单、使用方便的优点, 尤其是采用此方程可得到针对某些工程问题的近似解析解。但是用 p 律方程估算爆压及爆轰做功等问题时, 它的精度不如 JWL、JCZ 状态方程的好。BKW 方程、WCA 方程, Ree^[30] 的指数 -6 势方程, 都是从理论上推导得到的。它们可以用于预估炸药的爆轰特性。我国吴雄^[31] 对 BKW 方程有较多的研究。

五、爆温测量

爆轰温度对了解炸药的爆轰特性是一个很重要的参数, 它还能用于检验爆轰产物状态方程选取的形式是否合理的问题。爆温测量比爆速、爆压测量的难度大。Gibson^[32] 首先报导了爆温测量的结果。目前常用的爆温测量方法是辐射测量法。它是基于热辐射原理, 根据黑体 (或灰体) 辐射公式, 通过光、电测量技术测得。

图 9 是何贤储等^[33] 报导的一种爆温测量装置。他把一根光导索直接插入待测炸药中, 光导索的另一端接到一个分光计中, 将

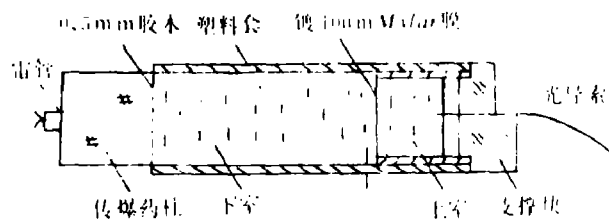


图 9 爆温测量装置

接收到光辐射分成两个不同频率的、窄带宽的光, 并通过光电倍增管和快速示波器记录下来。如果示波器上测得的对应于两频带光的讯号电压分别是 V_i 和 V_j , 则可用下式

$$\ln \frac{V_i}{V_j} = a + b \left(\frac{1}{T} \right) \quad (10)$$

计算爆温 T 。式中 a 、 b 为测量系统的两个常数, 可用通过事先的标定得到。他的测量结果列于表 4。Kato 等^[34]也报导过用四色高温计测量爆轰波阵面温度的技术和结果。

表 4 炸药的爆温 T (K)^[33]

炸 药	NM	TNT			Tetry			HMX	PETN
密度 (g/cm ³)	1.13	1.489	1.560	1.607	1.559	1.631	1.7000	1.763	1.709
爆 温 (K)	3595	2514	2587	2589	2933	3054	3428	3038	816

参 考 文 献

- [1] 鲍姆, Ф. А. 等著, 众智译, 爆炸物理学, 科学出版社, (1963), 318.
- [2] 吴国栋, 炸药稳态爆压的确定, 全国炸药爆轰压力专题讨论论文集 (1983).
- [3] Goranson, R. W., LA-157 (1945).
- [4] Duff, R. E. et al., *J. Chem. Phys.*, **23** (7) (1955) 1268-1273.
- [5] Rigdon, J. K. et al., Proc. 5th Symp (Inte.) on Detonation (1970) 59.
- [6] 徐康等, 爆炸与冲击, (2) (1981) 89.
- [7] Веретёнников, В. А., Изв. АН СССР, Физ.-Хим., **3** (1) (1967) 3-10.
- [8] 韩敦信, 估算爆压的板痕实验, 全国炸药爆轰压力专题讨论论文集 (1983).
- [9] 董海山, 爆炸与冲击, (3) (1982), 86.
- [10] Held, M., 4th APS Topical Conference on Shock Wave in Condensed Matter (Abstract) (1985).
- [11] 吴国栋等人在次引爆过程中炸药非稳态爆轰特性的研究, 全国第二届物理力学会议论文集 (1986).
- [12] Weingart, R. C. et al., UCRL-80410, (1978).
- [13] 池家春, 吴国栋, 爆炸与冲击, **4** (3) (1984), 76.
- [14] Jameson, R. L. et al., Proc. 5th Inte. Symp. Detonation, (1970), 23.
- [15] Kennedy, J. E. et al., NM-8711, (1972).
- [16] Dremin, A. H. et al., Proc. 8th Inte. Symp. on Combustion, (1962), 610.
- [17] 赵衡阳等人, 爆炸与冲击, (1) (1981), 67.
- [18] 曹世勤, 爆炸与冲击, **7** (1) (1987), 81.
- [19] Gibbs, T. A. et al., LASL Explosive Property Data, (1980).
- [20] Дремин, А. Н., Изв. АН СССР, Динамика Детонационных Волн в Конденсированных Средах, (1970).
- [21] Dobratz, B. M. et al., UCRL-51419, (1974).
- [22] Roth, J., Proc. 5th Symp. Inte. on Detonation, (1970), 139.
- [23] 吴国栋, 张振宇, 爆炸与冲击, **4** (2) (1984), 62.
- [24] 池家春, 压力对比法测量炸药的 Hugoniot 关系, 第三届全国爆轰会议论文集, (1983).
- [25] 陈启珍等人, PBX-HMX 炸药的平面冲击引爆, 私人通信 (1986).
- [26] 胡栋等人, 爆炸与冲击, **6** (2) (1986), 170.

- [27] 殷致远、封加波等人, PBX-HMX-A炸药的JWL状态方程, 私人通信, (1986).
- [28] 花平环, 用小尺寸圆筒试验测定炸药爆轰性能, 第二届全国爆轰会议论文集 (1983).
- [29] Gimene, Z. et al. 8th Inte. Symp. on Detonation, Preprints, (1985), 340.
- [30] Ree, F.H. 8th Inte. Symp. on Detonation, Preprints, (1985), 275.
- [31] Wu, X. 8th Inte. Symp. on Detonation, Preprints, (1985), 131.
- [32] Gibson, F.C. et al., *J. Appl. Phys.*, **29** (4) (1958), 628.
- [33] He, X. et al. 8th Inte. Symp. on Detonation, Preprints, (1985) 322.
- [34] Kato, Y. et al. 8th Inte. Symp. on Detonation, Preprints, (1985), 314.
- [35] 王圣平等, 电磁法测爆压, 全国炸药爆轰压力专题讨论会议论文集, (1983).
- [36] 王春培, 铸装 TNT/RDX = 36/64炸药爆轰参数的测定, 全国炸药爆轰压力专题讨论会议论文集, (1983).
- [37] 何贤储等人, 光电冲击波速度法测爆压, 全国炸药爆轰压力专题讨论会议论文集, (1983).

MEASUREMENTS OF DETONATION PARAMETERS FOR EXPLOSIVES

Wu Guodong