第 24 卷 第 1 期 高 压 物 理 学 报 Vol. 24, No. 1
2010 年 2 月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Feb., 2010

文章编号：1000-5773(2010)01-0076-05

超压爆轰产物冲击绝热线的实验研究*

曾代朋[1]，陈 军[2]，谭多望[1]

(1. 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
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900；
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900)

摘要：炸药驱动高速飞片撞击基板和炸药，从而在炸药中产生超压爆轰状态。利用高速扫描相机测试了冲击波在炸药试样和铝标准试样中的传播速度，采用对比法得到了炸药爆轰产物的雨贡纽曲线。通过分析发现，通常的冲击波-粒子速度(D-u)关系式的线性拟合不适合 CJ 点附近的雨贡纽数据，对于炸药爆轰产物的冲击波-粒子速度关系式最好采用非线性关系式。利用冲击波前后物理量守恒关系式，将 D-u 数据转化为 p-V 数据，拟合得到了炸药爆轰产物的雨贡纽 p-V 关系。

关键词：雨贡纽；超压爆轰；JB-9014 炸药
中图分类号：O521.2；O382 **文献标识码**：A

1 引 言

按 CJ 理论，爆轰产物从 CJ 态沿等熵路径单调膨胀。在大多数工程系统中，由于边界条件和结构的强反射效应的存在，流体动力学状态会偏离主等熵线，压力将高于 CJ 压力。在某些实验条件下(如高速飞片撞击炸药、球形会聚爆轰波、爆轰波相互作用等)，在炸药中会产生一个强度高于 CJ 爆轰的爆轰波，称之为超压爆轰(强爆轰)波。通常的 CJ 爆轰实验只能得到通过爆轰产物雨贡纽曲线上 CJ 点以下的等熵膨胀线，而通过超压爆轰产物冲击绝热线的实验研究，可以得到 CJ 点以上的爆轰产物雨贡纽曲线和数据。通过爆轰产物状态方程的理论分析，进一步拟合雨贡纽数据，还可以给出能很好描述超压爆轰现象的爆轰产物状态方程。

关于固体炸药的超压爆轰研究，在 20 世纪 60 年代中期到 70 年代初就有报道。其中 J. H. Kineke 等[1]用飞片增压技术获得了 PBX-9404 等 7 种炸药的超压爆轰实验结果。他们发现，γ 状态方程不能同时正确描述 CJ 爆轰和超压爆轰的定量特征，认为超压爆轰和 CJ 爆轰时，炸药所释放的化学能可能有差别，对于 PBX-9404 等高能炸药，这种差别比较明显。L. Green 等[2]用二级轻气炮驱动飞片装置，获得了 PBX-9404 等 4 种高能炸药的超压爆轰雨贡纽实验数据，这些实验数据比以前的更为全面和精确。Fritz[3]等测量了 PBX-9501 炸药的超压爆轰雨贡纽和声速数据，P. K. Tang[4]通过分析拟合这些数据，得到了修正的 JWL 超压爆轰产物状态方程及其参数，得到的状态方程能够很好地符合实验结果。M. van. Thiel 等[5]根据超压爆轰实验确定的爆轰产物雨贡纽曲线，推导出了所谓实验等熵线，并求出 $\Gamma=(\ln p/\ln V)_S$ 在 CJ 点附近的变化规律。据此，他们将 JWL 状态方程的格林乃逊系数 ω 用 $\Gamma=\Gamma(\overline{V})$ 代替($\overline{V}=V/V_0$)，这种改进保持了 JWL 状态方程形式上的完整，使 JWL 状态方程从物理原理角度讲更合理。邓全农[6]建立了 DG01A 炸药的超压爆轰产物状态方程，利用此超压爆轰状态方程形式计算的

* **收稿日期**：2009-05-29；**修回日期**：2009-08-26
基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金；国防基础科研项目(A1520070075)
作者简介：曾代朋(1977—)，男，硕士，助理研究员，主要从事爆炸力学研究. E-mail：zengdaipeng@163.com

DG01A、PBX-9404 炸药超压爆轰状态与实验符合很好。本工作采用高速扫描相机测量冲击波在样品中的走时,通过对比法研究炸药超压爆轰产物的冲击绝热线。

2　实验方法

超压爆轰产物雨贡纽曲线的测量技术与一般材料的雨贡纽曲线测量技术相类似。如图 1 所示,用直径 100 mm 的平面波透镜起爆 JO-9159 炸药,驱动铜飞片,经一定空腔加速后撞击铝基板。在铝基板下面分别安装直径 20 mm、厚度 5 mm 的炸药试样和铝标准试样,用有机玻璃闪光隙技术,通过高速相机测量冲击波在炸药试样中的传播时间,从而得到超压爆轰波的传播速度,同样可以得到铝的冲击波速度。每发实验在垂直于光测线的直径方向,对称安装 6 对光纤探针,以监测飞片的击靶速度。利用以上实验获得的数据和铝的雨贡纽参数,可以计算出炸药的冲击状态参数(粒子速度和压力)。改变铜飞片速度,可以得到不同的冲击状态,从而得到不同压力下一组炸药超压爆轰冲击状态数据,进而得到冲击波速度(u_s)随粒子速度(u_p)变化的雨贡纽关系或雨贡纽曲线。实验中铜飞片的厚度分别为 1.0 mm 和 1.5 mm,JO-9159 炸药的厚度分别为 30 mm、40 mm、50 mm 和 60 mm,通过采用飞片厚度和 JO-9159 炸药厚度的不同组合,分别使入射到 JB-9014 试样中的冲击压力在 40 GPa 至 60 GPa 区间分布。

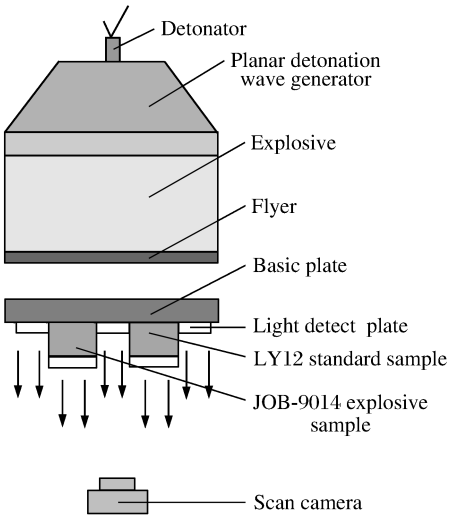


图 1　超压爆轰雨贡纽实验装置示意图

Fig. 1　Experimental configuration for Hugoniot measuring

实验中所用的 JB-9014 炸药试样是一种以超细 TATB 为主要成分的钝感高聚物粘结炸药[7],另外还含有少量的粘接剂,进行雨贡纽测试的样品密度为 1.898 g/cm^3。

雨贡纽实验所采用的试样尺寸为 20 mm×5 mm。侧向尺寸应选得足够大,以确保一维波效应。5 mm厚的样品足够获得所需精度,但不能超过飞板后部入射的稀疏波的追赶厚度。雨贡纽数据由对比方法获得[8]。炸药样品沿铝标准试样固定在 5 mm 厚的铝基板上。压力由炸药驱动的铜飞板碰撞基板产生,入射压力的大小由飞片的撞靶速度决定。入射冲击波经过基板后,激发基板与光探板之间的气隙发光,再经过样品激发样品与光探板之间的气隙发光,由扫描相机记录冲击波到达基板背面和样品后端面的时间,由样品的厚度可以求得冲击波在样品中的传播速度,通过冲击波守恒关系式即可得到超压爆轰产物的冲击绝热线。

3　实验结果处理与分析

以 0511-02 实验为例,说明对实验结果的处理过程。相机设置的扫描速度为 7.5 km/s,对装置底部的扫描波形如图 2 所示,对其进行计算机读数处理,处理结果见图 3。样品的边缘由于边侧稀疏的作用,冲击波速度降低,曲线两侧翘起,因此去掉这部分,并把冲击波到达炸药试样和铝标准试样背面的扫描线与冲击波到达基板背面的扫描线位置进行对比,得到冲击波经过 JB-9014 炸药样品的时间为 577 μs,经过 LY12 铝标准样品的时间为 597 μs,如图 3 所示。根据样品厚度,得到炸药试样中的冲击波速度 D_1 为 8.375 km/s,铝标准试样中的冲击波速度 D_2 为 8.665 km/s。再由 LY12 铝标准试样的雨贡纽关系,按以下方法计算出炸药试样中冲击波后的粒子速度。

当冲击波到达基板与炸药试样的界面时,在炸药中入射一个冲击波,并产生反射波,反射波是冲击波还是稀疏波则根据炸药反应后产物的波阻抗所决定。图 4 是图解过程,OB 线的斜率为 $\rho_{01}D_1$,OA 线的斜率为 $\rho_{02}D_2$,$p(u)$ line 是 LY12 铝标准试样在 p-u 平面上的雨贡纽线,$2S$-$2R$ 线为其反演线。OB 与

2*S*-2*R* 线的交点，即为炸药试样中冲击波后的状态，对应的速度为炸药试样中冲击波后的粒子速度，为 2.850 km/s，并由图 4 可以看出，反射波是稀疏波。通过多次实验，可得到一组 *D*-*u* 数据。

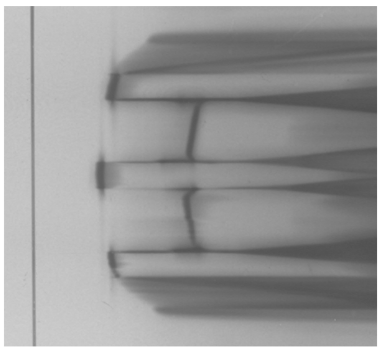


图 2 底部扫描相机记录的波形

Fig. 2 Film of scanning camera on the end

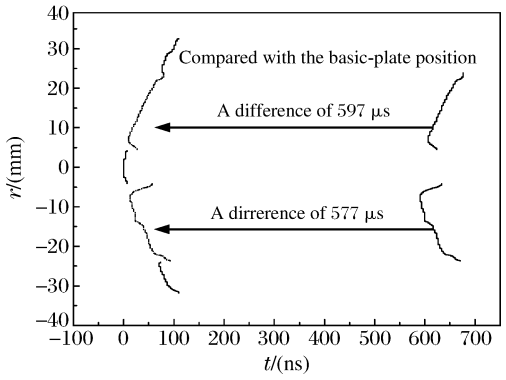


图 3 扫描底片读数处理

Fig. 3 Reading and processing film

改变主炸药的厚度可以得到不同的飞片速度，从而得到不同压力下的实验数据。表 1 是对 JB-9014炸药的实验结果。由表 1 中的实验数据可得出 JB-9014 炸药超压爆轰产物的 *D*-*u* 关系(图 5 中的方实点)。由冲击波动量守恒关系

$$p=\frac{Du_{\mathrm{p}}}{v_0} \tag{1}$$

和质量守恒关系

$$\frac{D}{v_0}=\frac{u_{\mathrm{p}}}{v_0-v} \tag{2}$$

即可换算成 *p*-*v* 关系。式中：$v_0=1/\rho_0$，$v=1/\rho$，分别是样品的初始比容和冲击压缩后的比容，单位为 $\mathrm{cm^3/g}$；*p* 是波后压力，*D* 是爆轰波速度。

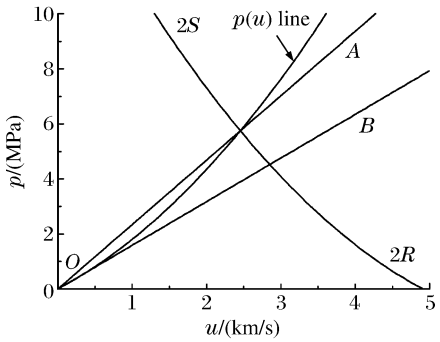


图 4 对比法测雨贡纽线图解

Fig. 4 Graphic solution of Hugoniot curve with antitheses method

表 1 JB-9014 炸药雨贡纽数据

Table 1 JB-9014 Hugoniot data

Exp. No.	v_{flyer}/(km/s)	D_1/(km/s)	D_2/(km/s)	u_{p}/(km/s)	*p*/(GPa)
0511-02	3.692	8.375	8.665	2.850	45.227
0512-01	3.450	8.333	8.475	2.676	42.247
0512-02	3.978	8.432	8.881	3.048	48.704
0512-03	4.204	8.503	8.993	3.146	50.693
0512-04	4.385	8.741	9.225	3.338	55.285
0512-05	4.455	8.834	9.398	3.492	58.450

由图 5 中的数据可以看到，在冲击波速度-粒子速度平面上，*D*-*u* 曲线成高次函数性态。根据 CJ 理论，在 CJ 点处，*D*-*u* 曲线的斜率为零，随粒子速度的增加，斜率也逐渐增加，这是高次曲线的性质。因此采用 *D*-*u* 关系的二次关系式更加合适，与 CJ 点相比只有在压力较高的情况下，用 *D*-*u* 的线性关系式才不会引起较大的误差。通过二次拟合图 6 中的数据点，可得到 *D*-u_{p} 关系式为

$$D=13.217\,37-3.720\,87u_{\mathrm{p}}+0.708\,14u_{\mathrm{p}}^2 \tag{3}$$

(3)式即是关于粒子速度的二次多项式,求解(3)式二元一次方程得到的 p-v 关系(4)式变得相当复杂,以至于无法使用。

$$p=\frac{\left[\left(B-\frac{v_0}{v_0-v}\right)+\sqrt{\left(B-\frac{v_0}{v_0-v}\right)^2-4AC}\right]^2}{v_0-v} \tag{4}$$

式中:$A=0.70814$,$B=-3.72087$,$C=13.21737$。

如果只考虑爆压超过 CJ 点较高的超压爆轰部分,由于前两点接近 CJ 点,则仅取后 4 点作直线拟合,得到的 D-u_p 关系式为

$$D=5.5203+0.95429u_p \tag{5}$$

换算出的 p-v 关系式为

$$p=\frac{30.4737}{\left(\frac{0.9543}{0.5277-v}-1.7257\right)^2(0.5277-v)} \tag{6}$$

虽然这种 p-v 关系形式较为简单,但仅适合爆压较高的超压爆轰部分。为此,我们将每点的 D-u 数据转化为 p-V 数据,得到图 6 中的数据点,通过二次拟合这些数据点,得到了如图 6 中实线所示的冲击绝热线,并可得到雨贡纽 p-V 关系式

$$p=8.769-23.605V+16.664V^2 \tag{7}$$

式中:$V=\rho_0/\rho$ 是相对体积。(7)式表示的 p-V 关系形式既简单,又适合所测试的整个超压爆轰范围。

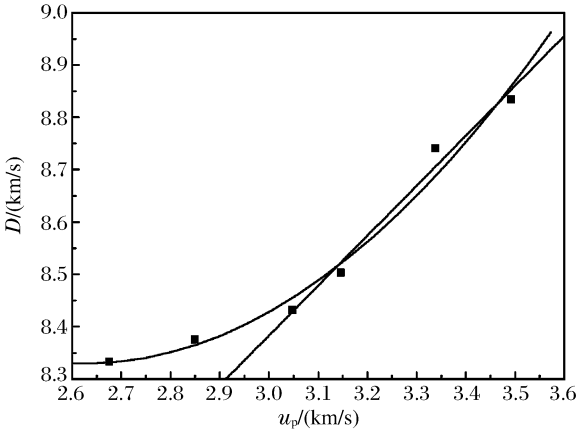


图 5　JB-9014 炸药超压爆轰产物的 D-u 图

Fig. 5　D-u relation of the over-driven detonation product of JB-9014 explosive

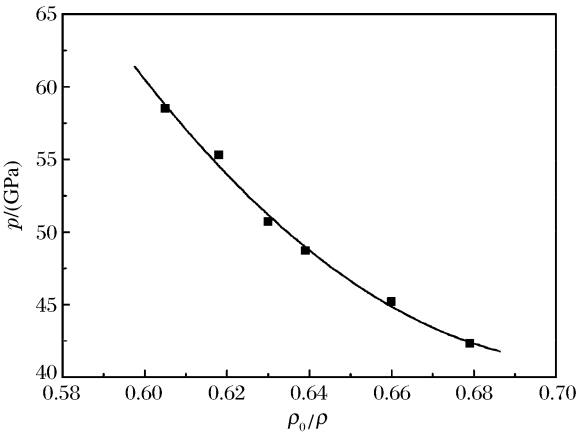


图 6　JB-9014 炸药超压爆轰产物雨贡纽关系

Fig. 6　Hugoniots of the over-driven detonation product of JB-9014 explosive

4　结　论

利用冲击雨贡纽线的对比测量法,采用高速扫描相机测试了冲击波在炸药试样和铝标准试样中的传播速度,从而得到了炸药爆轰产物的雨贡纽曲线。分析发现,通常的 D-u 关系线性拟合不适合 CJ 点附近的雨贡纽数据,对于炸药爆轰产物的 D-u 关系最好采用非线性关系式,可以先将每点 D-u 数据通过冲击波前后物理量守恒关系式转化为 p-V 数据,再拟合得到炸药爆轰产物的冲击压缩雨贡纽关系。

References:

[1]　Kineke J H, West C E. Shocked States of Four Overdriven Explosives [A]//Proc. of the Fifth Symposium on Detonation [C]. Pasadena, 1970: 533-546.

[2] Green L, Lee E, Mitchell A, et al. The Equations of State of PBX9404, Lx-07, RX-26-AF Detonation Products at Pressures above Detonation Pressure [R]. UCRL-89664, 1983.

[3] Fritz J N, Hixson R S, Shaw M S, et al. Overdriven-Detonation and Sound-Speed Measurements in PBX9501 and the "Thermodynamic" Chapman-Jouguet Pressure [J]. J Appl Phys, 1996, 80(11): 6129-6141.

[4] Tang P K. A Study of the Overdriven Behaviors of PBX 9501 and PBX 9502 [R]. LA-UR-98-3365, 1998.

[5] van Thiel M, Lee E L, Cochran S. The Effects of Overdriven Shock States on the Equation of State of 9404 Explosive [R]. UCRL-88634, 1983.

[6] Deng Q N. Experiment Research and High Pressure Detonation Product EOS of Explosive under Oover-Driven [D]. Mianyang: Graduate Student Department, CAEP, 1989. (in Chinese)
邓全农. 过加载下固体炸药的实验研究和爆轰产物的高压状态方程 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院研究生部, 1989.

[7] Dong H S. Highe Energy Expolsive and Relative Physical Properties [M]. Mianyang: CAEP, 2005: 502-504. (in Chinese)
董海山. 高能炸药及相关物理性能 [M]. 绵阳: China Academy of Engineering Physics, 2005: 502-504.

[8] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State(2nd ed) [M]. Beijing: Science Press, 1999: 199-211. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第 2 版) [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 199-211.

Experiment Research on the Hugoniot of JB-9014 Explosive Over-Driven Detonation Product

ZENG Dai-Peng[1], CHEN Jun[2], TAN Duo-Wang[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Over-driven detonation is achieved by high speed flyer impacting, which is driven by explosive. The time when the shock wave passes through the samples is detected. Using "the impedance matching method", the Hugoniot of the product of the JB-9014 explosive can be obtained. It is shown that the simple D-u equation can not fit the Hugoniot data well. With relation to the explosive, it is better to use quadratic in D-u equation. Using conservation relations of physical variable before and after the shock wave, the D-u data can be translated to p-V data. Then the p-v equation can be obtained by fitting the p-V data.

Key words: Hugoniot; over-driven detonation; JB-9014 explosive