文章编号:1000-5773(2009)06-0427-06

未反应 JOB-9003 炸药冲击 Hugoniot 关系测试*

傅 华,谭多望,李金河,李 涛

(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)

摘要:利用"粒子速度对比法"实验技术,通过电磁粒子速度计测量了 PMMA 飞片同时撞击 PMMA 样品与待测炸药样品界面的粒子速度 u_1 和 u_2,获得了未反应 JOB-9003 炸药的冲击 Hugoniot 关系;利用叠加原理和疏松材料冲击绝热线的计算方法,对未反应炸药的冲击绝热线进行了计算。计算结果与实验数据符合较好。

关键词:粒子速度对比法;JOB-9003 炸药;冲击 Hugoniot 关系
中图分类号:O414.12 **文献标识码**:A

1 引 言

炸药的冲击 Hugoniot 参数是炸药性能的基本参数,它对研究炸药的冲击引爆、确定化学反应速率函数、炸药的状态方程,以及进行爆轰数值模拟是不可缺少的,对理解爆轰反应区结构具有重要意义。原则上,冲击波后的任意两个状态量之间的关系都可以称为冲击绝热线关系。由于冲击波后的压力、比容、比内能等物理量均可表示为冲击波速度与波后粒子速度的函数,最常用也是最简单的冲击绝热线就是冲击波速度 u_s 与波后粒子速度 u_p 之间的关系,冲击绝热线的实验测量通常就是指 u_s-u_p 关系的实验测量[1]。

对于同一种材料,冲击波速度 u_s 与波后粒子速度 u_p 之间的关系 $u_s=f(u)$ 是唯一的。实验研究发现对于许多材料,尤其在中等压力区,冲击波速度与粒子速度呈线性关系,即

$$u_s-u_0=C_0+\lambda(u_p-u_0) \tag{1}$$

式中:u_0 为波前初始粒子速度,C_0 和 λ 为炸药冲击 Hugoniot 关系的待定系数。

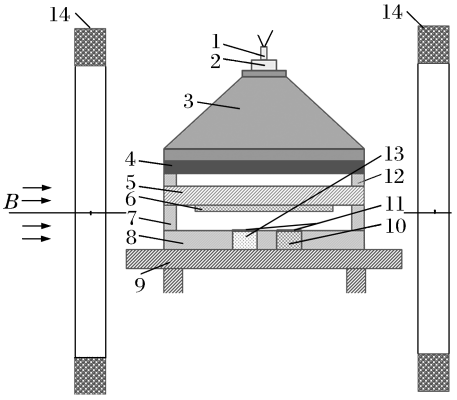
国外在开展未反应炸药冲击绝热线研究中,气炮加载技术应用极为广泛,测试技术方面主要采用电探针、VISAR、PVDF、电磁粒子速度计等手段。Grady[2] 等采用气炮对 PBX-128 炸药进行了压力范围为 0.3~3.0 GPa 内的冲击绝热线测量,气炮发射速度由电探针测量,标准板中心处的自由面速度由 VISAR 测量。Sheffield 等[3] 用气炮作为加载手段,采用电磁粒子速度计和 VISAR 对 TNAZ 炸药的冲击绝热线进行了测量,获得了压力范围为 0.6~2.4 GPa 内的 TNAZ 炸药的线性 Hugoniot 关系。Millett 等[4] 用一级气炮研究了 PBX 炸药的未反应冲击绝热线,压力由 PVDF 测量。国内主要是利用平面波透镜进行加载,由于运行费用等因素,利用气炮加载技术开展未反应炸药冲击绝热线的极少。测试技术方面也仅限于 PVDF 测量,VISAR、电磁粒子速度计等测试技术应用较少。于川[5] 等利用"压力对比法"实验技术,通过锰铜压力计测试待测炸药样品和铝样品在铝飞片同时撞击下的界面压力,获得了 JB-9001 炸药的冲击 Hugoniot 关系。

* **收稿日期**:2008-12-02;**修回日期**:2009-03-22
作者简介:傅 华(1979—),男,硕士,助理研究员,主要从事爆轰理论及其应用研究. E-mail:fmyfuhua@163.com

本研究利用“粒子速度对比法”实验技术，通过电磁粒子速度计测量了 PMMA 飞片同时撞击 PMMA样品与待测炸药界面的粒子速度 u_1 和 u_2，获得了以 HMX 为基的 JOB-9003 塑料粘结炸药的冲击 Hugoniot 关系；综合考虑了炸药作为一类多组分和疏松材料的特点，在已知炸药各组分冲击绝热参数的条件下，利用叠加原理和疏松材料冲击绝热线的计算方法，对未反应 JOB-9003 炸药的冲击绝热线进行了计算。

2 实验装置及原理

“粒子速度对比法”实验装置如图 1 所示。实验时，由雷管、传爆药柱、平面波透镜和主炸药构成的爆轰加载系统经过空腔、衰减层驱动紧贴于衰减层下表面的有机玻璃飞片，飞片撞击待测样品与标准样品，样品表面均安装有电磁粒子速度计。当冲击波到达速度计所在界面时，将在示波器上得到速度计的电压信号。实验中待测样品为 JOB-9003 炸药，标准样品为有机玻璃。其中 B 为磁场强度。



1. Detonator; 2. Booster; 3. Plane wave generator; 4. Charge explosive; 5. Attenuating plate; 6. PMMA flyer; 7. Plank; 8. Fixed plate; 9. Foundation; 10. PMMA sample; 11. Magnetic gauge; 12. Air attenuating ring; 13. JOB-9003 sample; 14. Magnetic field loops

图 1 “粒子速度对比法”实验装置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement of particle velocity matching method

当飞片撞击样品时，样品表面的速度计在波的作用下经过几次反射后很快达到平衡，其运动速度就是该位置的波后粒子速度。样品与电磁粒子速度计布局如图 2 所示，速度计的 ab 段沿直径方向粘于圆柱形样品表面，ab 段运动方向与磁场方向垂直，ad 与 bc 段与示波器相连。由示波器测得速度计 ab 段的电压 ε，已知磁场强度 B、ab 段长度 l，可得该碰撞面的粒子速度，见(2)式

$$u=\varepsilon/Bl \tag{2}$$

通过 PMMA 标准样品和 JOB-9003 待测炸药样品表面的电磁粒子速度计，测得 PMMA 飞片与 PMMA 样品碰撞时的界面粒子速度 u_1 以及与 JOB-9003 炸药样品碰撞时的界面粒子速度 u_2。用粒子速度对比法确定 Hugoniot 参数示意图如图 3 所示。

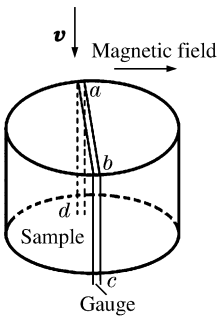


图 2 样品与电磁粒子速度计布局图

Fig. 2 Scheme of sample and magnetic gauge

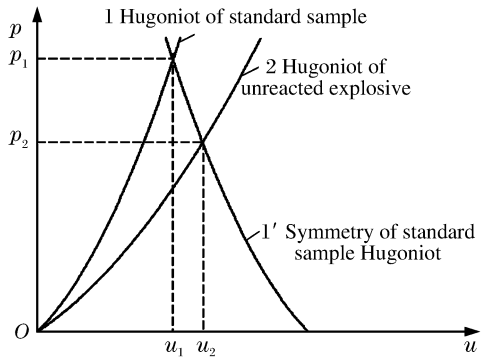


图 3 “粒子速度对比法”确定 Hugoniot 参数示意图

Fig. 3 Scheme of particle velocity matching method determing Hugoniot parameters

由 PMMA 样品冲击 Hugoniot 关系及动量守恒关系有

$$p_1=\rho_1(C_1+\lambda_1 u_1)u_1 \tag{3}$$

式中:ρ_1、C_1、λ_1 分别是 PMMA 的密度与冲击 Hugoniot 参数。

PMMA 样品冲击绝热线的镜像对称线可表示为

$$p=\rho_1[C_1+\lambda_1(2u_1-u)](2u_1-u) \tag{4}$$

由(4)式可得待测 JOB-9003 炸药的入射压力

$$p_2=\rho_1[C_1+\lambda_1(2u_1-u_2)](2u_1-u_2) \tag{5}$$

其中 PMMA 的冲击 Hugoniot 参数[6]有:$\rho_1=1.186\ \mathrm{g/cm^3}$;$C_1=2.598\ \mathrm{km/s}$;$\lambda_1=1.516$。

由待测 JOB-9003 炸药的动量守恒关系可得冲击波速度 u_s

$$u_s=p_2/\rho_2 u_2 \tag{6}$$

式中:ρ_2 是待测 JOB-9003 炸药的密度。获得一组 u_s、u_2 数据点后,通过最小二乘法拟合得到未反应炸药的冲击 Hugoniot 关系。

实验中利用炸药材料自身阻抗的特点获得标准样品与待测炸药撞击面的粒子速度,无需考虑后续的反应,所获得的实验结果是真实意义上的未反应炸药冲击绝热关系。为保证数据的可靠性,实验中标准样品与待测炸药样品的位置尽量布置在平面波透镜的中心区域,以减小飞片碰撞时由于平面度差异对实验结果的影响。实验时待测样品表面布置两个速度计,测量结果取两个数据点的平均值。

3　理论计算

3.1　叠加原理

未反应炸药作为一类多组分非均匀介质,组分材料的性能直接影响炸药的冲击绝热线。一般认为混合物的物态方程服从叠加原理:在冲击压缩下,混合物内各组分之间的初始压力差,在压力扰动的快速传播中(以声速)很快达到压力平衡状态,使各组分最终处于同一压力下。由两种或两种以上组分组成,并且在压缩过程中不发生化学反应的材料,如岩石、各种塑料粘结固体、钨铜合金、未反应炸药等,均属于此类材料。

在多组分混合物的情况下,叠加原理的基本表达式为

$$v(p)=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i v_i(p) \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\alpha_i=1 \tag{8}$$

式中:α_i 为第 i 种组分的质量分数,v_i 为第 i 种组分的比容,$v_i(p)$为第 i 种组分的冲击绝热线关系式。由(7)式、(8)式可知,已知各组分材料的冲击绝热参数,即可获得混合物的冲击绝热线。

根据冲击波的质量、动量守恒关系可以获得混合物的冲击波速度 u_s 以及粒子速度 u_p 的关系式

$$\frac{v_0^2}{u_s^2}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\alpha_i v_{i0}^2}{u_{si}^2} \tag{9}$$

$$u_p^2=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i u_{pi}^2 \tag{10}$$

式中:v_0 是混合物的初始比容,u_{si}、v_{i0}、u_{pi}分别是第 i 种组分的冲击波速度、比容、粒子速度。

3.2　疏松材料冲击绝热线的计算

已知炸药各组分的冲击绝热参数,通过(9)式、(10)式可初步计算未反应炸药的冲击绝热线,但由于炸药在压制或浇铸过程中孔洞、微裂纹的存在,炸药是典型的疏松材料,炸药内部的孔穴对冲击绝热线关系的影响不可忽略。

20 世纪 90 年代初,俄罗斯的 Batsanov 等提出了计算疏松材料冲击绝热线的方法[7-8],假定疏松材料中的孔穴为空气,在单位质量疏松材料中,密实材料占有的体积为 v_0,而孔穴的体积为为 v_v。则单位质量疏松材料的总体积(比容)为 $v_{00}=v_0+v_v$。其次,假定冲击压缩疏松材料时的总内能可以表达为密实材料的冲击压缩能和孔穴塌缩能之和。若冲击压缩时孔穴中的空气(初始体积为 v_v)被绝热压缩达

到极限压缩度 h(终态体积为 v_v/h),利用多方体积的压缩特性有

$$h=(k+1)/(k-1) \tag{11}$$

式中:k 为空气的多方指数(对于空气 $k=1.4$)。由此得到孔穴塌缩需要做功关系式

$$p_H(v_v-v_v/h)=2p_H v_v/(k+1) \tag{12}$$

式中:p_H 为冲击波压力。把疏松材料看作密实材料与空气的混合物,疏松材料的总动能应等于两者动能之和。利用冲击波压缩总功均匀分配于内能和动能的特点,单位质量疏松材料的总能量等于

$$u^2=u_p^2+2p_H v_v/(k+1) \tag{13}$$

式中:u 和 u_p 分别为疏松材料和密实材料的粒子速度。等号左方表示冲击波压缩疏松材料时所做的总功,包括内能和动能两部分,等于动能的两倍;右方第一项表示密实材料被压缩时冲击波做的总功,等于密实材料动能的两倍。第二项为孔穴被压缩时冲击波做的功。由疏松度的定义 $m=v_{00}/v_0$,于是(13)式简化为

$$u^2=u_p^2+2p_H v_0(m-1)/(k+1) \tag{14}$$

(14)式给出了疏松材料的粒子速度 u 随着疏松度 m 的变化关系。已知密实材料的粒子速度 u_p,由密实材料的冲击绝热线获得 p_H 后,即可由(14)式计算疏松材料的粒子速度 u。

3.3 未反应炸药 Hugoniot 关系计算

炸药作为一类多组分的疏松材料,在冲击压力作用下各组分的压力很快到达平衡,各组分的粒子速度也趋于相同[9]。即混合物与组分的粒子速度关系有

$$u_p=u_{pi} \tag{15}$$

由(1)式、(9)式、(10)式和(14)式,最终未反应炸药的粒子速度 u 和冲击波速度 u_s 有

$$\begin{aligned} u^2&=u_p^2+5u_s u_p\left(\frac{\rho_0}{\rho_{00}}-1\right)\Big/6\\ u_s&=p_H/\rho_{00}u \end{aligned} \tag{16}$$

式中:$p_H=\rho_0 u_s u_p$,ρ_0 是把炸药看作密实材料的密度,即最大理论密度,ρ_{00} 是炸药的实测密度。已知各组分冲击绝热参数,采用(16)式可计算炸药的冲击绝热线关系。

4 实验与计算结果

通过改变空气衰减环、板状衰减层厚度以及是否采用主炸药使飞片获得不同速度,可得到待测炸药冲击绝热关系上的一系列状态点。均匀磁场由一对亥姆霍兹线圈(Helmholtz),通过外加电流产生。实验共 6 发,实验状态及结果见表 1。

表 1 实验条件及结果

Table 1 Experimental conditions and results

No.	Explosive and attenuating plate thickness/(mm)	PMMA/PMMA boundary particle velocity u_1/(m/s)	PMMA/JOB-9003 boundary particle velocity u_2/(m/s)	Shock velocity u_s/(m/s)
1	5TNT+3.5Air+10PMMA	992.86	779.76	4 440
2	5TNT+15Air+15PMMA	912.50	712.50	4 340
3	5TNT+10Air+12.5PMMA	993.67	784.81	4 390
4	18.5Air+15PMMA	696.20	543.04	3 940
5	22.5Air+15PMMA	612.66	490.51	3 600
6	3.5Air+12.5PMMA	950.00	753.16	4 280

对表 1 中的 u_2、u_s 数据进行最小二乘法拟合,获得未反应 JOB-9003 炸药的冲击绝热线关系。其中 C_0 与 λ 的标准差 σ_{C_0}、σ_λ 分别是±0.23 km/s、±0.33。

$$u_s=(2.49\pm0.23)+(2.48\pm0.33)u_p,\quad (0.49\ \text{km/s}\leqslant u_p\leqslant 0.78\ \text{km/s}) \tag{7}$$

图 4 与图 5 分别是未反应 JOB-9003 炸药的 u_s-u_p 和 p-u_p 关系。实验中平面波透镜产生的爆轰波经空气、有机玻璃衰减后驱动飞片,飞片平面度影响电磁粒子速度计的测试信号,引起实验数据的分散性。为了获得更准确的实验结果,可采用飞片平面度更好的加载方式。

采用(16)式计算时,由于相关参数的缺乏,将 JOB-9003 炸药组分中的粘结剂和钝感剂部分,用已知冲击参数的 Estane 粘结剂进行了近似替代,炸药组分参数[6]见表 2 所示。从图 4、图 5 可知,计算结果与实验数据符合较好。

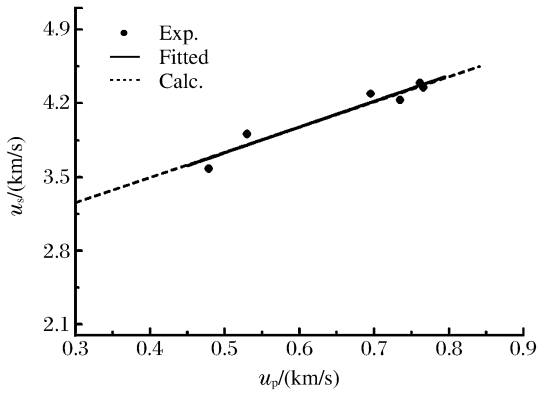


图 4　未反应 JOB-9003 炸药 u_s-u_p 图

Fig. 4　u_s-u_p relation of unreacted JOB-9003

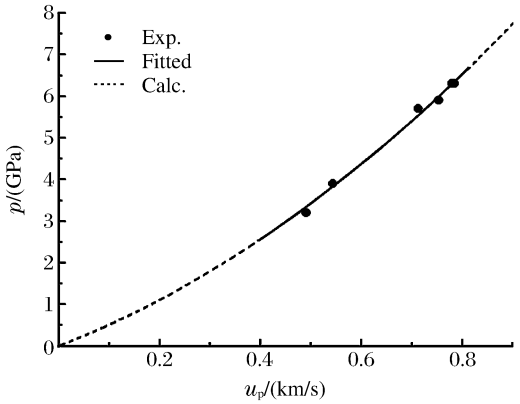


图 5　未反应 JOB-9003 炸药 p-u_p 图

Fig. 5　p-u_p relation of unreacted JOB-9003

表 2　炸药组分冲击绝热参数

Table 2　Hugoniot parameters of components

No.	Component	ρ_{00}/(g/cm^3)	Hugoniot	
			C_0/(km/s)	λ
1	HMX	1.903	2.74	2.60
2	TATB	1.876	1.79	2.71
3	Estane	1.186	2.32	1.70

5　结　论

(1) 利用“粒子速度对比法”实验技术,采用电磁粒子速度计获得了未反应 JOB-9003 炸药的冲击 Hugoniot 关系。

(2) 实验结果表明,采用电磁粒子速度计进行未反应炸药冲击绝热关系研究是可行的,且实验原理简单,数据处理方便。

(3) 利用叠加原理和计算疏松材料冲击绝热线的方法,对未反应炸药的冲击绝热线进行了计算,计算结果与实验数据符合较好,说明该方法可用于未反应炸药冲击参数的计算。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State(2nd ed) [M]. Beijing: Science Press, 1999: 197-198. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京:科学出版社, 1999: 197-198.

[2] Grady D E. Dynamic Equation of State and Strength Properties of Unreacted PBXW-128 Explosive [A]//11th International Detonation Symposium [C]. Snowmass, Colorado, 1998.

[3] Sheffield S A, Gustavsen R L, Alcon R R. Hugoniot and Initiation Measurements on Tnaz Explosive [R]. LA-UR-95-2765, 1995.

[4] Millett J C F, Bourne N K. The Shock Hugoniot of a Plastic Bonded Explosive and Inert Simulants [J]. J Phys D, 2004, 37: 2631-2617.

[5] Yu C. Shock Hugoniot Relation of JB-9001 Insensitive High Explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1998, 12(1): 72-77. (in Chinese)
于 川. JB-9001 钝感炸药冲击 Hugoniot 关系测试 [J]. 高压物理学报, 1998, 12(1): 72-77.

[6] Marsh S P. Lasl Shock Hugoniot Data [Z]. California: University of California Press, 1980.

[7] Batsanov S S. Effects of Explosions on Materials [M]. New York: Springer-Verlag, 1994.

[8] Tan H. Introduction to Experimental Shock Wave Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 33-34. (in Chinese)
谭 华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 33-34.

[9] Milne A M, Bourne N K. On the Unreacted Hugoniots of Three Plastic Bonded Explosives [A]//Furnish M D, Elert M, Russell Th P, et al. Shock Compression of Condensed Matter-2005[C]. New York: AIP, 2006: 175-178.

Hugoniot Relation of Unreacted JOB-9003 Explosive

FU Hua, TAN Duo-Wang, LI Jin-He, LI Tao

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

Abstract: The Hugoniot relation of unreacted JOB-9003 explosive was investigated experimentally by using Particle Velocity Matching Method. The PMMA flyer is driven by detonation wave which is attenuated with a thick plate. Magnetic gauges were used to respectively record the interface particle velocity u_1 between the PMMA flyer and the explosive sample as well as u_2 between the PMMA flyer and PMMA sample. Furthermore, considering unreacted explosives as composite and porous materials, the shock Hugoniot relation of JOB-9003 explosives are calculated by using Hugoniot calculation method for porous material, as the known shock Hugoniot of each component. The calculated results are in good agreement with the experimental data.

Key words: particle velocity comparing method; unreacted JOB-9003 explosives; shock Hugoniot relation