文章编号:1000-5773(2010)03-0201-05

超压爆轰产物声速以及热力学 CJ 点的实验研究*

陈 军[1],曾代朋[2],谭多望[2],王荣波[1]

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621900;
2. 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:超压爆轰产物声速是建立超压爆轰产物状态方程的基础性实验数据,而 CJ 点数据是反映炸药爆轰性能的重要参数。利用稀疏波追赶技术,通过光纤探针监测三氯甲烷中稀疏波追赶向前冲击波的过程,测量了不同压力点下 JB-9014 炸药超压爆轰产物的声速,得到了拉格朗日声速随粒子速度的变化曲线,由 L_c 线与稳定爆速 D 的交点确定了热力学 CJ 点,对 JB-9014炸药所得到的 CJ 压力为 28.8 GPa,与通常测量值 28.5 GPa 仅相差 0.3 GPa。介绍了应用光纤探针测量爆轰驱动飞片的速度和平面性的方法,应用该方法得到了飞片的击靶速度和形状,此方法具有较高的测量精度。

关键词:声速;强爆轰;热力学 CJ 态;光纤探针
中图分类号:O521.2 **文献标识码**:A

1 引 言

Fritz[1]等提出了通过测量声速和超压爆轰雨贡纽数据的组合确定 CJ 压力的新方法,通过声速流体动力学条件,即在 CJ 点,爆速等于声速与粒子速度之和($D=c+u$)。在冲击波速度-粒子速度平面上,$c+u$ 曲线和超压爆轰雨贡纽线相交处即为热力学 CJ 点。以等 γ_S 物态方程为例,绝热系数 γ_S 为常数,冲击波速度-粒子速度平面上 $c+u$ 曲线、$u_s=u+c$(故亦称等声速线)、超压爆轰雨贡纽(S 线)、弱爆轰雨贡纽(W 线)以及拉格朗日声速 L_c 示于图 1。还可以通过测试拉格朗日声速 L_c 与稳定爆速 D 的交点来确定热力学 CJ 点。

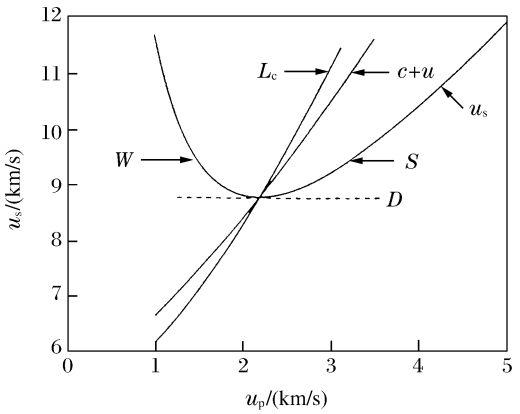


图 1 等 γ_s EOS 模型爆轰雨贡纽和声速曲线

Fig. 1 Detonation Hugoniot and sound-speed curves for the constant-γ_s model

超压爆轰声速也是非常有用的数据,Tang[2]通过拟合超压爆轰雨贡纽和声速数据,得到了修正的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。国内未见相关声速测量数据的研究。本研究利用稀疏波追赶技术测量了不同压力点下 JB-9014 炸药超压爆轰产物的声速,并

* **收稿日期**:2009-02-16;**修回日期**:2009-09-26
基金项目:国防科技工业基础科研项目(A1520070075)
作者简介:陈 军(1973—),男,博研究生,副研究员,主要从事爆炸力学研究. E-mail:chenjun@caep.ac.cn

通过拉格朗日声速 L_c 与稳定爆速 D 的交点确定了热力学 CJ 点。

2 实验方法

实验装置如图 2 所示。在超压爆轰的声速测量实验中，用∅100 mm 炸药驱动 1 mm 厚、∅100 mm 的铜飞片直接冲击 40 mm×30 mm的不等厚度炸药试样，在炸药试样受冲击一端布置两列光纤探针测试飞片的速度以及飞片的平面性，两列光纤探针垂直落差为 1.5 mm，探针布置如图 3 所示。在炸药试样的另一端放置三氯甲烷。当爆轰波到达炸药-三氯甲烷界面时，发出强光，并且冲击波在三氯甲烷中传播时，冲击波阵面仍会发出强光，当背面入射的稀疏波赶上冲击波时，冲击波阵面压力下降，光强度减弱。用光纤探针和光电倍增管测量三氯甲烷中稀疏波追赶上冲击波时的冲击波传播时间，所记录的光脉冲前沿很陡（对应冲击波到达界面时刻），顶部是一个平台（宽度为 Δt），稀疏波赶上冲击波后，光脉冲后沿迅速下降。稀疏波追赶冲击波的图像如图 4 所示。炸药试样作成台阶形，从而得到通过不同厚度炸药的追赶时间 Δt，炸药越厚，Δt 越小。当炸药厚度大到一定程度后，稀疏波在炸药中赶上冲击波，测得的光脉冲没有平顶部分，而呈尖脉冲波形。将 Δt 随炸药厚度的变化连成一条直线，外推到 $\Delta t=0$，得到稀疏波刚好在界面追赶上冲击波的炸药厚度 X_0。这时，有如下关系

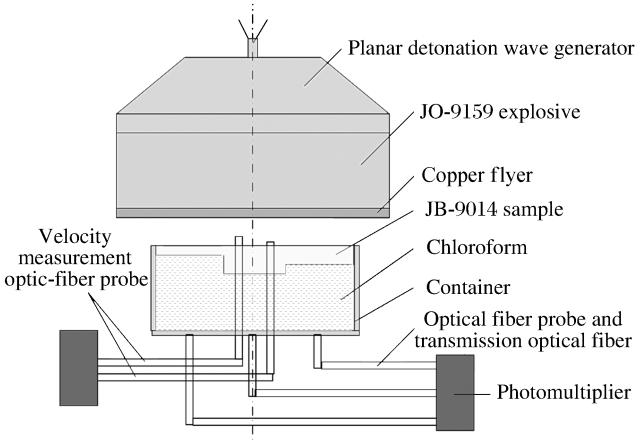


图 2 超压爆轰声速测量装置示意图

Fig. 2 Experimental configuration for overdriven-detonation sound-speed measurement

$$X_d/u_{sd}+X_d/L_{cd}+X_0/L_{ct}=X_0/u_{st} \tag{1}$$

式中：X_d 是飞片厚度，u_{sd}是飞片中的冲击波速度，L_{cd}是飞片中拉格朗日声速，L_{ct}是炸药爆轰产物中拉格朗日声速，u_{st}是炸药中冲击波速度（即超压爆速）。由于铜的雨贡纽关系是已知的，炸药的超压爆轰雨贡纽数据已在另一组实验中给出，可以计算出 u_{sd}、L_{cd}和 u_{st}，因而通过(1)式可得到炸药超压爆轰的拉格朗日声速 L_{ct}。

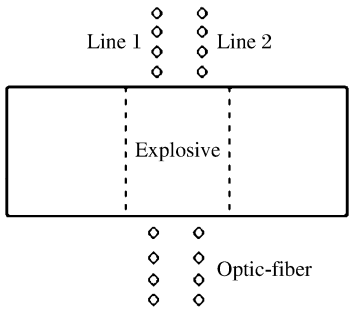


图 3 测速光纤探针布置图

Fig. 3 Arrangement of optic-fiber probe for velocity measurement

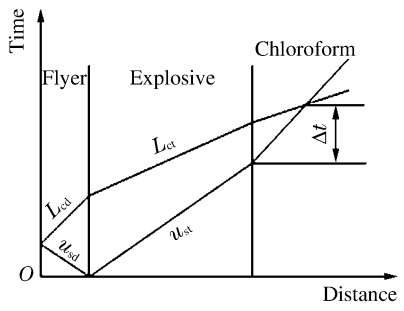


图 4 稀疏波追赶冲击波图像

Fig. 4 Schematic of rarefaction wave chasing shock wave

3 实验结果及分析

飞片在平面波透镜和炸药柱驱动下冲击炸药试样和测速光纤探针，光纤芯受冲击后产生光脉冲信号，经过传输光纤由光电倍增管捕获，光电倍增管输出的电信号通过高频电缆由示波器记录。图 5 是示波器记录的信号。信号质量与光纤探针镀膜好坏有关，第一个信号出现漂移，主要是镀膜层没有挡住杂光的原故。

图 6 是示波器记录的飞片到达各测速光纤探针的时间,可以看到,飞片呈锅底状,把两列时间求平均,然后进行二次拟合,把拟合的曲线减去该曲线的最低点,再乘以飞片的平均速度,就可以得到飞片的大致形状,如图 7 所示,在半径为 40 mm 处,飞片向上翘了 0.275 mm。对应光纤探针组的垂直落差除以时间差即为飞片的速度。图 8 是测试的速度结果,平均速度约为 4.133 km/s,标准偏差为

$$S_D=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}=0.06579\ \text{km/s} \tag{2}$$

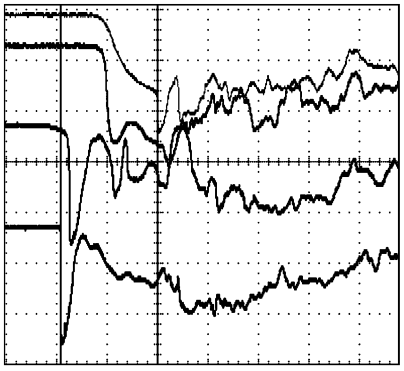


图 5　示波器记录的测速光纤探针信号

Fig. 5　Oscilloscope signals of optic-fiber probe for velocity measurement

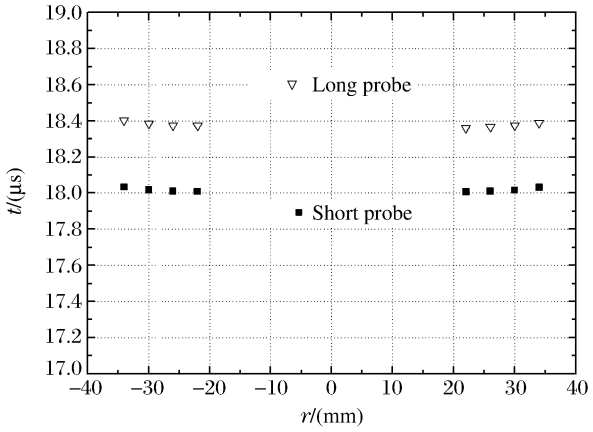


图 6　飞片到达各测速光纤探针的时间

Fig. 6　The arrival time of the flyer at optic-fiber probes

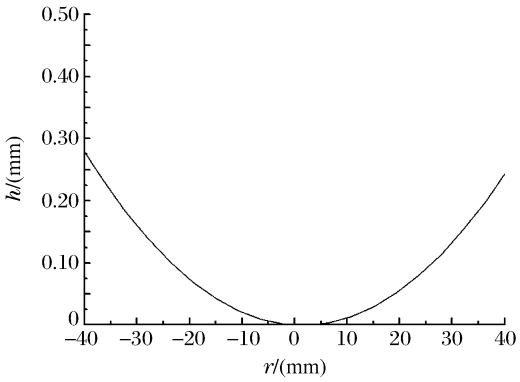


图 7　飞片的击靶形状

Fig. 7　Shape of flyer impacting target

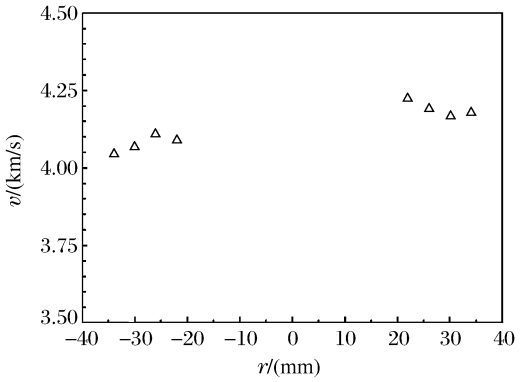


图 8　各组探针测试的速度

Fig. 8　Velocities measured by each group probes

图 9 是示波器记录的三氯甲烷中稀疏波追赶上冲击波过程的信号,正如在第 3 节中分析的那样,当爆轰波到达炸药-三氯甲烷界面时(t_1),发出强光,起跳点斜率较陡,冲击波在三氯甲烷中传播时,冲击波阵面仍会发出强光,由于炸药背面有飞片维持,顶部出现一平台,当背面入射的稀疏波赶上冲击波时(t_2),冲击波阵面压力下降,光强度减弱。平台时间 $\Delta t=t_2-t_1$。图 10 是不同炸药厚度时稀疏波追赶上冲击波的时间 Δt,并一次拟合数据,外推到稀疏波刚好在炸药-三氯甲烷界面追赶上冲击波的炸药厚度 $X_0=10.696$ mm。只要知道飞片靶板雨贡纽和测得的飞片速度 u_d,就可以计算 u_p、p、L_{cd}、u_{st} 和 u_{sd}。已知铜的雨贡纽 $u_{sd}=0.3958+1.497u_{pd}$,在另一组实验中测得炸药的雨贡纽 $u_{st}=1.3217-3.7209u_{pt}+7.0814u_{pt}^2$,注意在这里使用的单位是厘米、微秒。可求得 $u_p=3.11$ km/s;$p=50.12$ GPa;由不同炸药厚度爆轰波到达炸药-三氯甲烷界面的时间 t_1 之差,就可以算出 $u_{st}=8.890$ km/s,计算得到的 $u_{sd}=5.49$ km/s。由 Al'tshuler 等[3]测得的铜的纵波声速,再根据纵波声速与拉格朗日声速的关系,可得到 $L_{cd}=7.27$ km/s。由(1)式得到

$$L_{ct}=X_0/[X_0/u_{st}-(X_d/u_{sd}+X_d/L_{cd})] \tag{3}$$

经计算,得到拉格朗日声速为 11.86 km/s。

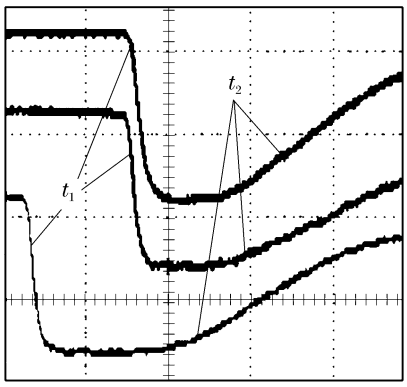


图 9 装置尾部光纤探针的示波器信号

Fig. 9 Oscilloscope signals of optic-fiber probes at the rear of setup

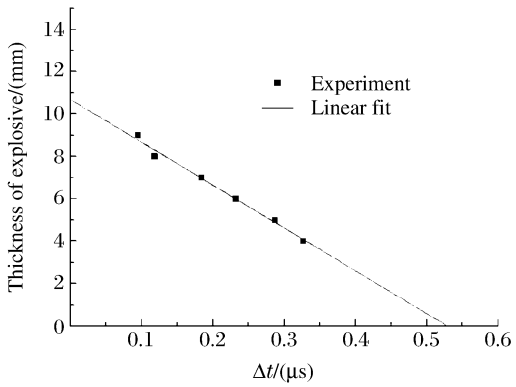


图 10 不同炸药厚度的稀疏波追赶上冲击波的时间 Δt

Fig. 10 Time interval of rarefaction wave chasing shock wave against thickness of explosive

以同样方法处理了其它 5 组实验的拉格朗日声速 L_{ct}。这些实验的压力范围为 39.89～55.60 GPa,实验结果见表 1。图 11 是拉格朗日声速与其对应的粒子速度图,在此范围内拉格朗日声速与粒子速度呈线性变化,根据文献[4]给出的稳定爆速值,$D=7.655$ km/s 与其交点即为 CJ 点的粒子速度(1.70 km/s)。根据炸药 p-u 曲线,即可图解得到 $p_{CJ}=28.8$ GPa,如图 12 所示,所得到的 p_{CJ} 与通常测量值 28.5 GPa 符合。

表 1 超压爆轰产物声速测量实验结果

Table 1 The results of overdriven detonation sound-speed measurements

No.	u_d/(km/s)	p/(GPa)	u_p/(km/s)	L_{ct}/(km/s)
1	3.376	39.89	2.521	10.14
2	3.691	43.83	2.768	10.73
3	3.907	46.77	2.935	11.40
4	4.133	50.15	3.110	11.86
5	4.303	52.75	3.235	12.26
6	4.475	55.60	3.362	12.58

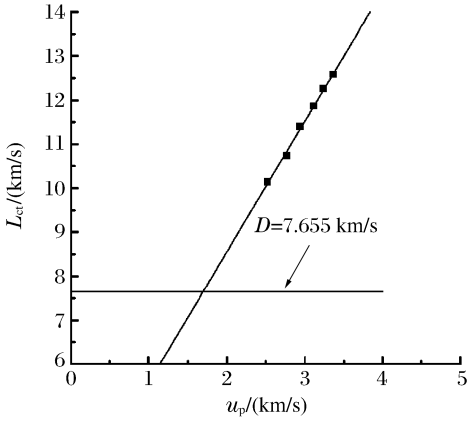


图 11 炸药中拉格朗日声速和粒子速度关系

Fig. 11 Relation of Lagrangian sound-speed and particle velocity

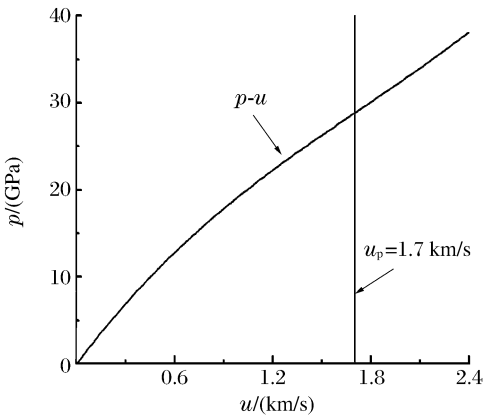


图 12 在 p-u 平面上图解 CJ 压力

Fig. 12 Diagram of CJ pressure on p-u plane

4 结　论

通过对实验结果的处理与分析,可以得到以下结论:

(1) 利用稀疏波追赶技术,通过光纤探针监测在三氯甲烷中稀疏波追赶向前冲击波的过程,测量了不同压力点下 JB-9014 炸药超压爆轰产物的声速,得到了拉格朗日声速随粒子速度的变化曲线;

(2) 由拉格朗日声速 L_c 与稳定爆速 D 的交点得到了 CJ 点的粒子速度,与雨贡纽数据结合给出了热力学 CJ 点,对 JB-9014 炸药所得到的 CJ 压力为 28.8 GPa,与通常测量值 28.5 GPa 仅相差 0.3 GPa;

(3) 使用光纤探针测量爆轰驱动飞片的速度和平面性是可行的,并有较高的测量精度;

(4) 光纤探针能够用于强爆轰产物的拉格朗日声速测量,清晰地记录了在三氯甲烷中稀疏波追赶向前冲击波的过程。

References:

[1] 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.

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

[3] Trunin P Φ. The Properties of Condensed Matter under High Pressure and High Temperature [M]. Translated by Han J W. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1996: 172-192. (in Chinese)
特鲁宁 P Φ. 高温高压下凝聚态物质的性质 [M]. 韩均万, 译. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1996: 172-192.

[4] Dong H S. Property of Explosive and Correlate [M]. Mianyang: CAEP, 2005: 502-504. (in Chinese)
董海山. 炸药及相关物性能 [M]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005: 502-504.

[5] Green E L, van Thiel M, Green L G, et al. Detonation Products EOS: The Region above Chapman Jouguet Pressure [R]. UCRL-88983, 1983.

Experimental Study on Sound-Speed of Overdriven-Detonation Product and the Thermodynamic CJ State

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

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

Abstract: Sound-speed data of overdriven-detonation product are fundamental to model EOS, and CJ data are important to manifest detonation properties of explosive. Using rarefaction wave chasing technique, the sound-speeds in overdriven detonation product at different pressures are measured with optic-fiber probes, which are used to monitor the process of rarefaction wave chasing shock wave in the trichloromethane behind explosive. The thermodynamic CJ state is determined by the intersection point of the steady detonation velocity and the sound-speed line L_c. The thermodynamic CJ pressure is evaluated 28.8 GPa by this method. There is only a slight difference of 0.3 GPa between the thermodynamic CJ pressure and the ordinarily measured value 28.5 GPa. The method to measure velocity and planarity of detonation driving flyer with optic-fiber probes is also introduced. The velocity and planarity of the flyer are obtained using this method, which possesses good precision of measurement.

Key words: sound-speed; over-driven detonation; thermodynamic CJ state; optic-fiber probe