



用 PVDF 压力计研究未反应 JB-9014 钝感炸药的 Grüneisen 参数

刘俊明, 张旭, 赵康, 覃双, 裴红波, 张蓉

引用本文:

刘俊明, 张旭, 赵康, 等. 用 PVDF 压力计研究未反应 JB-9014 钝感炸药的 Grüneisen 参数 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 051301.

LIU Junming, ZHANG Xu, ZHAO Kang, et al. Using PVDF Gauge to Study Grüneisen Parameter of Unreacted JB-9014 Insensitive Explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 051301.

[当期更多内容>>](#)

您可能感兴趣的其他文章:

[JB-9014 钝感炸药冲击 Hugoniot 关系测量](#)

刘俊明, 张旭, 裴红波, 舒俊翔, 覃双, 钟斌, 张蓉

DOI: 10.11858/gywlxb.20170669

[未反应炸药 JOB-9003 的 JWL 状态方程](#)

王延飞, 刘杰, 张旭, 张蓉, 钟斌

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.05.007

[冲击加载下 NaCl 单晶高压声速与温度的同步测量](#)

金柯, 吴强, 李加波, 周显明, 叶素华, 李俊

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.06.005

[未反应 JOB-9003 炸药冲击 Hugoniot 关系测试](#)

傅华, 谭多望, 李金河, 李涛

DOI: 10.11858/gywlxb.2009.06.005

[固体炸药的磁驱动准等熵压缩实验研究](#)

蔡进涛, 王桂吉, 赵剑衡, 莫建军, 翁继东, 吴刚, 赵锋

DOI: 10.11858/gywlxb.2010.06.009

[飞片温升对 Hugoniot 参数测量的影响](#)

王青松, 蓝强, 戴诚达

DOI: 10.11858/gywlxb.2007.04.018

用 PVDF 压力计研究未反应 JB-9014 钝感炸药的 Grüneisen 参数^{*}

刘俊明¹, 张旭², 赵康¹, 覃双¹, 裴红波², 张蓉²

(1. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了获得未反应 JB-9014 炸药的 Grüneisen 参数 Γ , 在火炮加载平台上对 JB-9014 炸药进行一维平面冲击实验。实验中, 将炸药样品安装于两个铜板之间, 两个 PVDF 压力计分别安装在炸药样品前表面和中部, 记录两个位置处的压力随时间的变化历程; 将圆形铜板作为飞片安装于弹托前表面, 利用火炮加速弹托, 使飞片以一定速度撞击样品装置前铜板, 前铜板中产生右行冲击波对炸药样品形成一次压缩; 随后冲击波在炸药样品/后铜板交界面发生反射, 产生左行冲击波对炸药样品形成二次压缩。假设炸药样品的 Grüneisen 参数 Γ 为常数, 计算不同 Γ 值下炸药样品前表面和中部压力随时间的变化历程, 将不同 Γ 下的计算值与实验值进行对比, 获得了 JB-9014 钝感炸药 Grüneisen 参数的最优值, 为 1.7。

关键词: JB-9014 炸药; PVDF 压力计; Grüneisen 参数; 最优值

中图分类号: O521.3

文献标识码: A

状态方程(Equation of State, EOS)是描述平衡态系统中物质各热力学状态量之间关系的函数表达式, 是材料微观作用势的宏观表现。经典状态方程有: 基于体弹模量与压力线性相关的 Murnaghan 状态方程^[1]、Birch 状态方程^[2]、Vinet 状态方程^[3]、托马斯-费米状态方程^[4]、Grüneisen 状态方程^[5]等。这些状态方程基于不同的简化模型和理论假设, 因而表达式各不相同, 适用于不同的材料和压力范围。

Grüneisen 状态方程是描述晶格热振动贡献的一种特性方程, 广泛应用于压缩曲线的数据处理中——基于 Grüneisen 状态方程, 从实测压缩曲线导出被测材料的状态方程, 或者进行等温压缩线与冲击压缩线之间的变换^[6]。Mie-Grüneisen 形式的状态方程为

$$p = p_c(v) + \frac{\Gamma(v)}{v}(e - e_c(v)) \quad (1)$$

式中: p 为压力, v 为比容, e 为内能, Γ 为 Grüneisen 系数, 下标“c”表示零温(绝对零度)状态。到目前为止, 人们已经对 Grüneisen 状态方程进行了大量研究, 取得了很多有价值的成果, 主要包括: 通过各种静高压和动高压实验测量状态方程参数^[7-9], 根据各种热力学关系式、原子或分子势能形式推演冷压和冷能表达式以及 Grüneisen 系数^[10-13], 提出经验函数形式以确定冷压、冷能和 Grüneisen 系数^[14-15], 利用分子动力学方法直接对状态方程参数进行数值计算分析^[16-17]。以往的研究结果显示, 直接测量 Grüneisen 系数的实验难度较大, 而通过理论分析获得的数据存在很高的分散性。一个可行的方法是将实验测量与数值计算相结合开展研究。Winter 等^[18]就在假设 Grüneisen 系数 Γ 为常数的基础上, 成功获得了有机硅弹性体的 Grüneisen 参数 Γ 的最优值。

* 收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-03-23

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(JSZL2016212C001); 科学挑战专题(TZ2018001)

作者简介: 刘俊明(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药状态方程研究. E-mail: 13521934162@163.com

通信作者: 张旭(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事流体动力学研究. E-mail: caepzx@sohu.com

在炸药加载技术方面,近年来国际上主要采用气体炮加载,而我国多采用炸药透镜加载。相比于炸药透镜加载,火炮或气体炮加载的平面性更好,更易控制,也更易测量输入压力。在压力测试技术方面,常采用电磁速度计^[19-21]、锰铜压力计^[22-25]等。由于炸药不导电,因此常用于测量金属材料压力的电探针技术在测量炸药冲击 Hugoniot 关系中应用较少。聚偏二氟乙烯(PVDF)是由 $\text{CH}_2\text{-CF}_2$ 单体形成的链状高分子聚合物,PVDF 薄膜为半结晶高分子聚合物。1969 年 Kawai^[26] 首先发现 PVDF 薄膜经过机械拉伸和高电场极化后具有较强的压电性,自此人们开始关注 PVDF 薄膜的压电和热释电性能。拉伸和极化后的 PVDF 薄膜具有冲击阻抗低、机械弹性好、冲击电荷输出高、微米级厚度等特点,是最有前途的测量冲击压力的材料。

JB-9014 炸药是我国研制的以 TATB 为基的塑性黏结炸药,具有良好的安全性能,在武器工业中广泛应用。JB-9014 炸药由质量分数为 95% 的 TATB 和 5% 的黏结剂组成,典型装药密度为 1.895 g/cm^3 ,对应的爆速为 7.66 km/s 。本研究拟在火炮加载平台上利用冲击波反射技术对 JB-9014 炸药样品进行一维平面冲击实验,利用 PVDF 压力计记录炸药样品前表面和中部压力随时间的变化历程。在假设 JB-9014 炸药样品 Grüneisen 系数 Γ 为常数的基础上,将实验测量与数值计算相结合,以期获得 JB-9014 炸药样品 Grüneisen 参数 Γ 的最优值,为深入开展 JB-9014 炸药的冲击起爆和反应区结构研究以及爆轰数值模拟奠定基础。

1 实验

1.1 实验装置

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的 57 mm 口径火炮上进行。利用火炮对 JB-9014 炸药样品进行一维平面冲击实验,如图 1 所示,主要装置包括:火炮加载装置、飞片、激光测速环、样品装置靶、PVDF 压力计、缓冲板、示波器等。飞片尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,前、后铜板的尺寸分别为 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,两个 JB-9014 炸药样品尺寸均为 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,PVDF 压力计尺寸为 $3.18 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm} \times 0.028 \text{ mm}$ 。样品装置靶通过支架安装在炮管正前方,安装时利用工装确保样品装置靶撞击面与炮管轴线垂直,飞片加载的平面性优于 10 ns。实验前,对爆炸罐抽真空,使爆炸罐内压强小于 200 Pa;激光测速探头通过爆炸罐上的光纤法兰与罐外仪器相连。

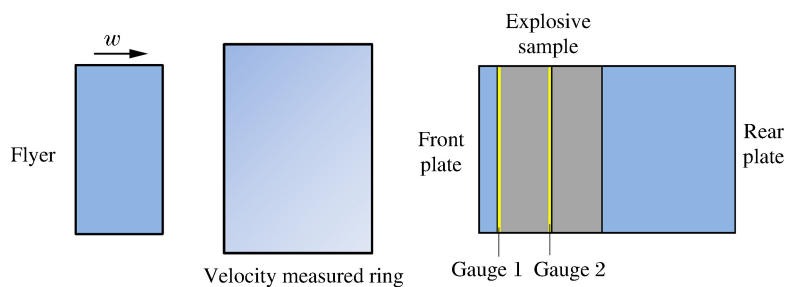


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Illustration of experimental setup

1.2 实验原理

以冲击波到达炸药样品前表面时刻作为时间零点,样品中冲击波到达位置 x 随时间 t 的变化关系如图 2 所示。冲击波后炸药样品中的压力 p 随粒子速度 u 的变化关系如图 3 所示。飞片经火炮加速后以一定速度撞击样品装置前铜板,前铜板中产生右行冲击波传入炸药样品中,对样品形成一次压缩,波后炸药样品内的压力、比容、粒子速度、内能由初态值 p_0, v_0, u_0, e_0 变为 p_A, v_A, u_A, e_A ,即图 2(图 3)中 A 区域(A 点)状态;随后冲击波在炸药样品/后铜板交界面发生反射,样品内形成左行冲击波,对样品形成二次压缩,波后炸药样品中的压力、比容、粒子速度、内能由 p_A, v_A, u_A, e_A 变为 p_B, v_B, u_B, e_B ,即图 2(图 3)中 B 区域(B 点)状态;同理,可获得炸药样品处于图 2(图 3)中 C 区域(C 点)状态。

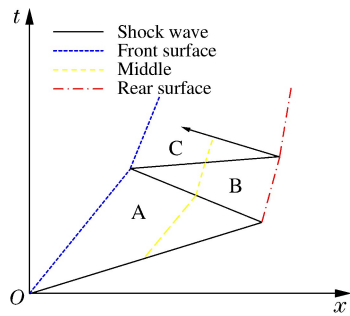


图 2 位置-时间关系
Fig. 2 $x-t$ relation

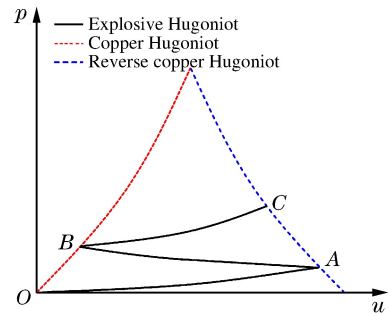


图 3 压力-粒子速度关系
Fig. 3 $p-u$ relation

1.3 实验结果与讨论

共进行 4 发实验,测量了飞片撞靶速度 w 在 0.6~1.1 km/s 范围内时炸药样品前表面和中部压力随时间变化历程。示波器采集的第 1 发实验的 PVDF 压力计测量结果如图 4 所示,实验数据处理结果如图 5 所示。可以看出,飞片经火炮加速后以一定速度撞击样品装置前铜板,前铜板产生的右行冲击波传入炸药样品中,对炸药样品形成一次压缩。压力计 1 和压力计 2 记录的信号先后迅速上升,紧接着都形成平坦的平台,对应的平台压力分别为右行冲击波后炸药样品前表面和中部截面压力(p_0 和 p_A),记冲击波到达炸药样品前表面和中部截面的时刻分别为 t_0 和 t_A ,其中 $t_0=0$ 。随后,冲击波在炸药样品/后铜板交界面发生反射,炸药样品中形成左行冲击波,对样品形成二次压缩,样品中部截面压力迅速上升,又形成一个平坦的平台,此平台压力即为左行冲击波后炸药样品中部截面压力(p_B),记左行冲击波到达样品中部截面的时刻为 t_B 。 t_A 、 p_A 、 t_B 、 p_B 的实验测量结果如表 1 所示,平台压力 p_A 、 p_B 为一段测量时间间隔内的压力平均值,在所选取的时间间隔内,压力幅值变化小于 5%。

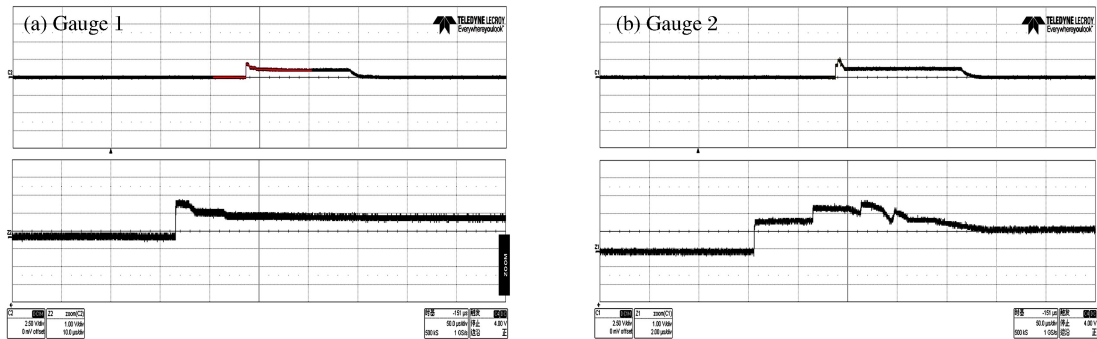


图 4 第 1 发实验中示波器记录的结果
Fig. 4 Results recorded by oscilloscope in the first experiment

表 1 压力计 2 记录的压强-时间关系

Table 1 Pressure-time relation recorded by Gauge 2

Exp. No.	Experimental data				Calculation data with $\Gamma=1.7$				d	
	$t_A/\mu s$	$t_B/\mu s$	p_A/GPa	p_B/GPa	$t_A/\mu s$	$t_B/\mu s$	p_A/GPa	p_B/GPa	Point A	Point B
Shot 1	1.467 0	3.833 0	3.512 7	5.720 0	1.403 0	3.772 8	3.617 5	5.719 9	0.053 9	0.021 9
Shot 2	1.324 0	3.423 6	4.880 0	8.130 0	1.283 0	3.469 3	5.102 8	8.125 0	0.054 1	0.006 6
Shot 3	1.250 0	3.222 0	6.064 0	10.511 0	1.200 0	3.243 7	6.580 0	10.494 5	0.091 5	0.003 1
Shot 4	1.209 0	3.046 0	6.750 0	14.421 3	1.201 0	3.162 9	7.217 0	11.514 3	0.076 9	0.255 2*

Note: Asterisk represents incorrect data which would be ignored.

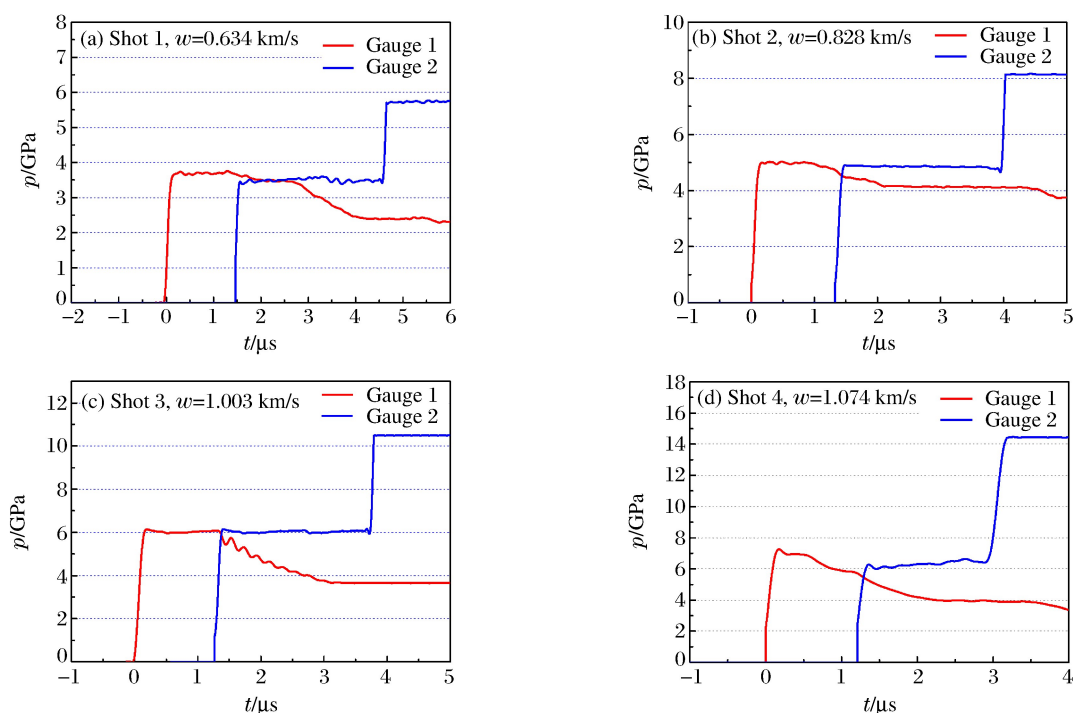


图5 不同撞击速度下炸药的压力-时间曲线

Fig. 5 Pressure-time curves of explosive under different impact velocities

在不考虑炸药样品波阻抗影响的情况下,应有 $p_0 = p_A$; 本实验测量发现 p_0 略大于 p_A , 符合实际情况。理论上, 炸药样品前表面和中部截面压力都会呈台阶式上升。然而, 实际测量发现: 样品前表面形成第一个压力平台后, 压力呈台阶式下降; 样品中部截面形成两个稳定压力平台后, 压力多数也呈台阶式下降。经计算分析, 冲击波在前铜板/炸药样品交界面处发生反射, 在前铜板中形成稀疏波, 由于稀疏波的作用, 使得样品前表面压力呈台阶式下降; 样品中部截面形成两个稳定压力平台后, 压力大多呈台阶式下降的影响因素较多, 应综合考虑前铜板中稀疏波和压力两重效应的影响, 受实验条件限制, 本研究不对此进行深入分析。

1.4 冲击 Hugoniot 线拟合

在炸药样品厚度 H 已知的情况下, 结合冲击波到达样品中部截面的时刻 t_A , 可求得炸药样品中冲击波速度 D_A

$$D_A = H/t_A \quad (2)$$

由凝聚介质冲击波关系式可知, 波后炸药样品中的粒子速度 u_A 可表示为

$$u_A = p_A/(\rho_0 D_A) \quad (3)$$

联立(2)式和(3)式可得

$$u_A = p_A t_A / (\rho_0 H) \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可知, 只要测得炸药样品厚度 H 、时刻 t_A 以及波后炸药样品内压力 p_A , 即可求得冲击波速度 D_A 和波后粒子速度 u_A , 即炸药样品的 Hugoniot 数据。

大量实验表明, 在凝聚介质中冲击波速度 D 与其波后质点速度 u 之间在相当宽的速度(或压力)范围内存在线性关系^[5]

$$D = c_0 + \lambda u \quad (5)$$

式中: c_0 和 λ 为待定系数。

根据(2)式和(4)式计算得到 JB-9014 炸药样品中冲击波速度和波后粒子速度, 结果见表 2 中的 Shot 1~Shot 4; 相同工况下, 在同一火炮上利用正向和反向碰撞法^[27] 获得 JB-9014 炸药的冲击 Hugoniot

niot 数据(Shot 5~Shot 12^[28])。

表 2 冲击波速度-粒子速度关系

Table 2 Shock-wave velocity vs. particle velocity

Exp. No.	$u/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	Exp. No.	$u/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	Exp. No.	$u/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
Shot 1	0.574 0	3.647 4	Shot 5 ^[28]	0.480 0	3.433 0	Shot 9 ^[28]	0.481 0	3.408 3
Shot 2	0.735 0	3.990 2	Shot 6 ^[28]	0.618 0	3.788 0	Shot 10 ^[28]	0.604 0	3.776 5
Shot 3	0.913 0	4.369 3	Shot 7 ^[28]	0.779 0	4.028 0	Shot 11 ^[28]	0.639 0	4.000 0
Shot 4	1.084 0	4.740 0	Shot 8 ^[28]	0.963 0	4.501 0	Shot 12 ^[28]	0.813 0	4.135 7

对 3 种方法获得的 JB-9014 炸药样品内的冲击波速度 D 和波后粒子速度 u , 采用正交回归直线拟合, 得到炸药在 3.2~9.7 GPa 压力范围内的冲击 Hugoniot 关系, 即 $D = (2.418\,77 \pm 0.044\,58) + (2.139\,61 \pm 0.059\,00)u$, 拟合结果如图 6 所示。

2 数值计算

由(1)式可知, 需要知道 $p_c(v)$ 和 $e_c(v)$ 才能使用 Grüneisen 状态方程。在实际应用中, 一种做法是利用冲击波的 Hugoniot 关系取代它们^[5]。设冲击波波阵面上的压力和内能分别为 p_h 和 e_h , 并满足 Hugoniot 关系式, 同时也满足状态方程(1)式, 即

$$p_h = p_c(v) + \frac{\Gamma(v)}{v}(e_h - e_c(v)) \quad (6)$$

(1)式与(6)式相减, 则 Grüneisen 状态方程转换为

$$p = p_h(v) + \frac{\Gamma(v)}{v}(e - e_h(v)) \quad (7)$$

其中, $p_h(v)$ 和 $e_h(v)$ 为

$$p_h(v) = c_0^2(v_0 - v)/[v_0 - \lambda(v_0 - v)]^2 \quad (8)$$

$$e_h(v) = p_h(v_0 - v)/2 \quad (9)$$

式中: 炸药样品的 Hugoniot 参数 c_0 和 λ 可通过实验测定, $c_0 = 2.418\,77 \text{ km/s}$, $\lambda = 2.139\,61$; v_0 为样品的初始比容。将(7)式与 Rankine-Hugoniot 关系联立, 可以获得任何初始状态下 p - v 形式的状态方程

$$p = \frac{p_h(v) + \frac{\Gamma}{v} \left[\frac{p_0}{2}(v_0 - v) + e_0 - e_h(v) \right]}{1 - \frac{\Gamma}{2}(v_0 - v)} \quad (10)$$

式中: p_0 和 e_0 为样品的初始压力和内能。

给定一个 Γ 值, 假设炸药样品处于图 3 中 A 点, 比容为 v_A , 则由(8)式可求得此时炸药样品中的压力 p_{A1} 为

$$p_{A1} = c_0^2(v_0 - v_A)/[v_0 - \lambda(v_0 - v_A)]^2 \quad (11)$$

炸药样品中的粒子速度 u_A 可表示为

$$u_A = u_0 + \sqrt{(p_{A1} - p_0)(v_0 - v_A)} \quad (12)$$

炸药样品处于 A 点状态的压力也可由前铜板的 Hugoniot 关系的镜像表示, 即

$$p_{A2} = [c_0^{\text{Cu}} + \lambda_{\text{Cu}}(w - u_A)](w - u_A)/v_0^{\text{Cu}} \quad (13)$$

式中: 铜的 Hugoniot 参数 $c_0^{\text{Cu}} = 3.94 \text{ km/s}$, $\lambda_{\text{Cu}} = 1.498$; 铜的初始比容 $v_0^{\text{Cu}} = 0.112 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

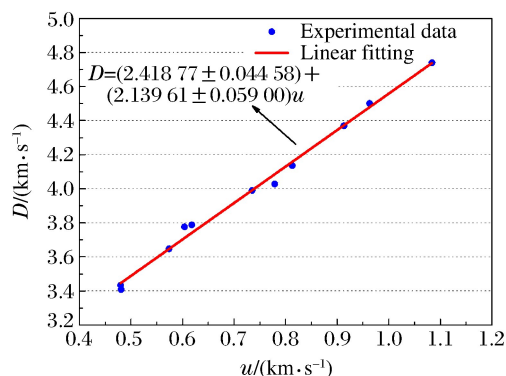


图 6 未反应 JB-9014 炸药的 D - u 关系

Fig. 6 D - u relation of unreacted JB-9014 explosive

联立(11)式、(12)式和(13)式,利用迭代计算,求得 $p_{A1}=p_{A2}$ 时的 v_A 。由(11)式和(12)式求得炸药样品处于 A 点状态的压力 p_A 和粒子速度 u_A ,由(2)式和(3)式可分别求得冲击波速度 D_A 和右行冲击波到达样品中部截面的时刻 t_A 。

假设炸药样品处于图 3 中 B 点状态,比容为 v_B ,以炸药样品处于 A 点状态作为初始状态,由(10)式可求得炸药处于 B 点状态的压力 p_{B1} 为

$$p_{B1} = \frac{p_h(v_B) + \frac{\Gamma}{v_B} \left[\frac{p_A}{2} (v_A - v_B) + e_A - e_h(v_B) \right]}{1 - \frac{\Gamma}{2} (v_A - v_B)} \quad (14)$$

炸药样品中的粒子速度 u_B 可表示为

$$u_B = u_A - \sqrt{(p_{B1} - p_A)(v_A - v_B)} \quad (15)$$

炸药样品处于 B 区域(B 点)状态下的压力也可由后铜板的 Hugoniot 关系表示,即

$$p_{B2} = (c_0^{\text{Cu}} + \lambda u_B) u_B / v_0^{\text{Cu}} \quad (16)$$

联立(14)式、(15)式和(16)式,利用迭代计算,求得 $p_{B1}=p_{B2}$ 时的 v_B 。由(14)式和(15)式求得炸药样品处于 B 状态的压力 p_B 和粒子速度 u_B 。

由冲击波在固壁上的反射原理,可得左行冲击波速度 D_B

$$D_B = \frac{(p_B - p_A)v_B}{u_B - u_A} + u_B \quad (17)$$

进而求得左行冲击波到达炸药样品中部截面的时刻 t_B 。

给定不同 Γ 值,可获得多组 t_A 、 p_A 、 t_B 、 p_B 的计算结果。 $\Gamma=1.7$ 时 t_A 、 p_A 、 t_B 、 p_B 的计算结果如表 1 所示。以单一量表征实验测量值与计算值之间的差异,定义 d

$$d = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p_{\text{calc}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t_{\text{calc}}}\right)^2} \quad (18)$$

式中: Δt 和 Δp 分别表示冲击波到达炸药样品中部的时刻和波后压力的实验测量值与计算值之间的差异。给定一个 Γ 值可以求得一组 d (见表 1),从而得到其平均值 d_{av} ,如表 3 所示。由 $d_{\text{av}}-\Gamma$ 曲线(见图 7)可知,当 $\Gamma=1.7$ 时, d_{av} 取最小值,表明 $\Gamma=1.7$ 时数值计算得到的压力随时间变化历程与实验结果最接近,即 1.7 最接近 JB-9014 炸药的实验 Γ 值。

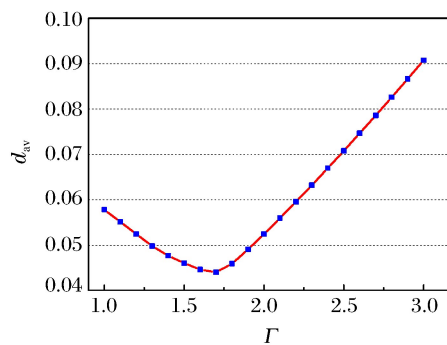


图 7 $d_{\text{av}}-\Gamma$ 关系

Fig. 7 $d_{\text{av}}-\Gamma$ relation

表 3 Γ 和 d_{av} 数据

Table 3 Γ and d_{av}

Γ	d_{av}	Γ	d_{av}	Γ	d_{av}	Γ	d_{av}	Γ	d_{av}
1.0	0.05781	1.4	0.04765	1.8	0.04592	2.2	0.05955	2.6	0.07467
1.1	0.05514	1.5	0.04603	1.9	0.04905	2.3	0.06322	2.7	0.07861
1.2	0.05244	1.6	0.04460	2.0	0.05244	2.4	0.06697	2.8	0.08261
1.3	0.04982	1.7	0.04401	2.1	0.05595	2.5	0.07079	2.9	0.08666

3 结 论

(1) 采用 PVDF 压力计测压法成功获得 JB-9014 炸药样品在 3.2~9.7 GPa 压力范围内的冲击 Hugoniot 数据,采用线性回归直线拟合,得到炸药样品的冲击 Hugoniot 关系式。更高压力下未反应

JB-9014 钝感炸药的 Hugoniot 关系有待进一步研究。

(2) 假设 JB-9014 炸药样品的 Grüneisen 参数 Γ 为常数,将实验测量与数值计算相结合,成功获得未反应 JB-9014 钝感炸药 Grüneisen 参数 Γ 的最优值 1.7。该方法为研究未反应钝感炸药 Grüneisen 参数 Γ 开辟了一种新的研究途径。

(3) 由于是第一次利用该方法研究 JB-9014 炸药样品的 Grüneisen 参数 Γ ,在实验方案设计方面仍存在些许欠缺,如未考虑前铜板中稀疏波的影响,致使炸药样品中最多只能形成两次稳定压缩。在今后的研究中,将从飞片设计、前铜板厚度、炸药样品厚度、测压技术等方面做进一步完善。

参考文献:

- [1] MURNAGHAN F D. Finite deformations of an elastic solid [J]. American Journal of Mathematics, 1937, 59(2): 235-260.
- [2] BIRCH F. Finite elastic strain of cubic crystals [J]. Physical Review, 1947, 71(11): 809-824.
- [3] VINET P, FERRANTE J, SMITH J R, et al. An universal equation of state for solids [J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1986, 19(20): 467-473.
- [4] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] 李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 36-43, 212-213.
- [6] 王延飞. JOB-9003 炸药未反应状态方程研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2016: 6-7.
- [7] BOEHLER R. Melting temperature, adiabats, and Grüneisen parameter of lithium, sodium and potassium versus pressure [J]. Physical Review B, 1983, 27(11): 6754-6762.
- [8] 王继海. 多项式形式 Mie-Grüneisen 物态方程及其等熵线 [J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 1-9.
WANG J H. Polynomial form of Mie-Grüneisen equation of state and its isentropes [J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(1): 1-9.
- [9] 张婷, 毕延, 赵敏光. 静高压加载下 LY12 铝的超声测量与等温状态方程 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(1): 35-40.
ZHANG T, BI Y, ZHAO M G. Ultrasonic measurement and isothermal equation of state for LY12Al under static pressures [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 35-40.
- [10] DUGDALE J S, MACDONALD D K C. The thermal expansion of solids [J]. Physical Review, 1953, 89(4): 832-834.
- [11] 吴强. 金属材料高压物态方程及 Grüneisen [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
- [12] NAGAYAMA K. Cold potential energy function for solids based on the theoretical models for Grüneisen parameter [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1997, 58(2): 271-279.
- [13] KRIVTSOV A M, KUZ'KIN V A. Derivation of equations of state for ideal crystals of simple structure [J]. Mechanics of Solids, 2011, 46(3): 387-399.
- [14] STACEY F D, DAVIS P M. High pressure equations of state with applications to the lower mantle and core [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2004, 142(3/4): 137-184.
- [15] PENG X, XING L, FANG Z. Comparing research on the pressure or volume dependence of Grüneisen parameter [J]. Physica B: Condensed Matter, 2007, 394(1): 111-114.
- [16] 崔守鑫, 蔡灵仓, 胡海泉, 等. 氯化钠晶体在高温高压下热物理参数的分子动力学计算 [J]. 物理学报, 2005, 54(6): 2826-2831.
CUI S X, CAI L C, HU H Q, et al. Molecular dynamics simulation for thermophysical parameters of sodium chloride solids at high temperature and high pressure [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2826-2831.
- [17] COHEN R E, GULSEREN O. Thermal equation of state of tantalum [J]. Physical Review B, 2001, 63(22): 224101.
- [18] WINTER R E, WHITEMAN G, HAINING G S, et al. Measurement of equation of state of silicone elastomer [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 706(1): 679-684.
- [19] DICK J J, FOREST C A, RAMSAY J B, et al. The Hugoniot and shock sensitivity of a plastic-bonded TATB explosive PBX 9502 [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(10): 4881-4888.

- [20] FU H, LI T, TAN D W, et al. Shock Hugoniot relation of unreacted heterogeneous explosives [J]. International Journal of Modern Physics B, 2011, 25(21): 2905-2913.
- [21] SHEFFIELD S A, GUSTAVSEN R L, ALCON R R, et al. High pressure Hugoniot and reaction rate measurements in PBX9501 [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 706(1): 1033-1036.
- [22] 于川, 池家春, 刘文翰, 等. 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.
YU C, CHI J C, LIU W H, et al. Shock Hugoniot relation of JB-9001 insensitive high explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1998, 12(1): 72-77.
- [23] 张旭, 池家春, 冯民贤. JB9014 钝感炸药冲击绝热线测量 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 304-308.
ZHANG X, CHI J C, FENG M X. Hugoniot relation of JB9014 insensitive high explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 304-308.
- [24] MILLETT J C F, BOURNE N K. The shock Hugoniot of a plastic bonded explosive and inert simulants [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(18): 2613-2617.
- [25] MILNE A, LONGBOTTOM A, BOURNE N, et al. On the unreacted Hugoniots of three plastic bonded explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2007, 32(1): 68-72.
- [26] KAWAI H. The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride) [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1969, 8(7): 975-976.
- [27] 谭叶, 俞宇颖, 戴诚达, 等. 反向碰撞法测量 Bi 的低压 Hugoniot 数据 [J]. 物理学报, 2011, 60(10): 106401.
TAN Y, YU Y Y, DAI C D, et al. Measurement of low-pressure Hugoniot data for bismuth with reverse-impact geometry [J]. Acta Physics Sinica, 2011, 60(10): 106401.
- [28] 刘俊明, 张旭, 裴红波, 等. JB-9014 钝感炸药冲击 Hugoniot 关系测量 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 033202.
LIU J M, ZHANG X, PEI H B, et al. Measurement of Hugoniot relation for JB-9014 insensitive explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3): 033202.

Using PVDF Gauge to Study Grüneisen Parameter of Unreacted JB-9014 Insensitive Explosive

LIU Junming¹, ZHANG Xu², ZHAO Kang¹, QIN Shuang¹,
PEI Hongbo², ZHANG Rong²

(1. The Graduate School of CAEP, Mianyang 621999, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to obtain the Grüneisen parameter Γ of unreacted JB-9014 insensitive explosive, we carried out the one-dimensional plane impact experiment on JB-9014 explosive using a gun. In the experiment, the explosive sample was mounted between two copper plates, and two PVDF gauges were installed at the front and the middle of the explosive sample to record the variations of pressure versus time. The copper flyer was accelerated by a gun and then impacted the front copper plate at a certain speed. The right row shock wave was formed in the front copper plate, resulting in the first compression of the explosive sample and then reflected at the interface of the explosive sample and the rear copper plate, causing the second compression of the explosive sample. Supposing the Grüneisen parameter of the explosive sample was constant, we calculated the variations of pressure versus time at the front and the middle of the explosive sample with different Grüneisen parameters. Comparing these calculated values with the experimentally determined parameters enabled optimum values of the Grüneisen parameter to be identified.

Keywords: JB-9014 explosive; PVDF gauge; Grüneisen parameter; optimum value