

文章编号:1006-9941(2021)09-0833-07

DNP 炸药冲击 Hugoniot 关系实验研究

周霖¹,王昭元¹,张向荣¹,倪磊¹,苗飞超¹,江涛²,朱英中²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究二所, 重庆 402760)

摘要: 新型高能熔铸基体炸药 3,4-二硝基吡唑(DNP)的冲击 Hugoniot 关系,是探讨其冲击起爆特性的基础,采用压力对比法,经平面波发生器加载,用锰铜压阻计测量了压力为 3.7~14.4 GPa 范围内九组不同冲击波压力下 DNP 炸药和 LY12 铝样品的冲击波波后压力,计算得到不同压力下的冲击波波速 D 和粒子速度 u ,拟合得到了压力为 3.7~14.4 GPa 范围内 DNP 炸药的 $D-u$ 关系。结果表明,DNP 炸药压力为 3.7~14.4 GPa 范围内的冲击 Hugoniot 关系可近似为一条在 $D-u$ 平面内的直线,确定了 DNP 炸药冲击波作用下的波后状态。分析了用聚四氟乙烯封装锰铜压阻计对实验测试结果的影响,通过对测试信号的理论分析和合理判读有效消除了封装带来的系统误差。

关键词: 3,4-二硝基吡唑(DNP);冲击 Hugoniot 关系;压力对比法;铅

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020303

1 引言

3,4-二硝基吡唑(DNP)是一种新型熔铸基体炸药,熔点 86.5 °C,爆速 8104 m·s⁻¹,爆压 29.4 GPa^[1],爆轰性能较传统熔铸炸药基体 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)大幅提高,分解放热峰两阶段分别为 319.8 °C 和 407.2 °C,热安定性优于 TNT,机械感度与 TNT 相当^[2],与常用的高能固相组分环四亚甲基四硝胺(HMX)、六硝基六氮杂异戊兹烷(CL-20)具有良好的相容性^[3],DNP 炸药熔融状态下与 TNT 一样呈现牛顿流体特性,粘度较 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)和 TNT 稍大^[4],是一种极具工程应用前景的新型高能熔铸基体炸药,正因如此,目前国内外都在大力研究 DNP 炸药及相关配方的各项性能参数。

炸药的冲击 Hugoniot 关系是表征炸药在高压冲击波作用下的基本性能参数^[5],由该关系可得到未反

应炸药在冲击波作用下的波速、波后粒子速度、比体积和比内能等状态参数;未反应炸药的 JWL 状态方程和 Mie-Grüneisen 状态方程也可通过其冲击 Hugoniot 关系拟合得到^[6-8],DNP 炸药的冲击 Hugoniot 关系是进一步研究 DNP 炸药冲击起爆特性的基础,目前有关 DNP 炸药的研究主要侧重于性能与制备^[9-10],其冲击 Hugoniot 关系鲜有报道。

物质的冲击 Hugoniot 关系通常采用实验进行测定,常用方法包括楔形试验法、压力对比法、电磁速度计法、速度对比法、组合式电磁速度计法等^[11]。根据实验加载方式不同通常可分为轻气炮、火药或炸药透镜方式进行加载,轻气炮和火药驱动飞片的加载方式平面度较好,炸药透镜的加载方式则要求炸药透镜直径大于样品尺寸以保证平面度,例如王延飞等^[12]采用火炮驱动飞片加载技术测量了 JOB-9003 的冲击 Hugoniot 线,鲁峰等^[13]采用轻气炮驱动飞片加载方式测量了 3~7 GPa 压力范围内钽铁硼的冲击 Hugoniot 关系,杨洋等^[14]采用透镜加载方式获得了 RMOE-2 的冲击 Hugoniot 关系。根据实验测试方法不同分为 PVDF 压力计、锰铜压阻计、电磁粒子速度计和 VISAR, PVDF 和 PVDF 测试成本低,使用简便,但 PVDF 会受到测试温度影响,在高压下测试结果会有偏差,例如 Millett 等^[15]采用 PVDF 压力计研究了高聚物粘结炸药

收稿日期:2020-11-23;修回日期:2020-12-23

网络出版日期:2021-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(11772060)

作者简介:周霖(1962-),男,教授,主要从事火炸药研究。

e-mail:zhoulin@bit.edu.cn

通信联系人:张向荣(1975-),男,副教授,主要从事火炸药研究。

e-mail:zhangxr@bit.edu.cn

引用本文:周霖,王昭元,张向荣,等. DNP 炸药冲击 Hugoniot 关系实验研究[J]. 含能材料,2021,29(9):833-839.

ZHOU Lin, WANG Zhao-yuan, ZHANG Xiang-rong, et al. Experimental Measurement on Hugoniot Relationship of DNP Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(9):833-839.

的冲击 Hugoniot 线,曹同堂等人^[19]采用锰铜压阻计测量了 DNAN 基炸药的冲击 Hugoniot,电磁粒子速度计和 VISAR 的测试结果更为精确,但成本较高,例如:杨舒棋^[16]、裴红波^[17]、訾攀登^[18]等采用电磁法测量了多种高能钝感炸药的冲击 Hugoniot 关系,Marshall 等^[20]采用 VISAR 测量 TATB 基炸药在超高压下的冲击 Hugoniot 关系。上述方法中压力对比法是通过透镜进行加载,进行多发实验,采用锰铜压阻计测量不同加载压力下待测样品的波后压力和粒子速度,再通过最小二乘法进行拟合得到样品的冲击 Hugoniot 线,对于炸药样品,这种方法能够避免炸药反应对实验结果的影响,Miao 等^[21]用此方法测定了 DNAN 熔铸样品的冲击 Hugoniot,拟合效果较好,DNP 炸药样品性质与 DNAN 相近,故本研究采用压力对比法测定 DNP 炸药未反应状态下的冲击波波后压力和粒子速度,通过对实验结果的合理判断和实验数据的线性拟合得到 DNP 炸药未反应状态的冲击 Hugoniot 关系。

2 冲击 Hugoniot 关系测定方法

2.1 样品制备

DNP 炸药,湖北东方化工有限公司,工业级 DNP,熔点为 85 °C,理论密度为 1.87 g·cm⁻³,采用熔铸加工而成,实际密度(体积法)为 1.710 g·cm⁻³。对比样品为 LY12 铝,重庆红宇精密工业集团有限公司,密度为 2.785 g·cm⁻³。铝样品和 DNP 炸药样品尺寸都为 $\Phi 20\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,如图 1 所示。

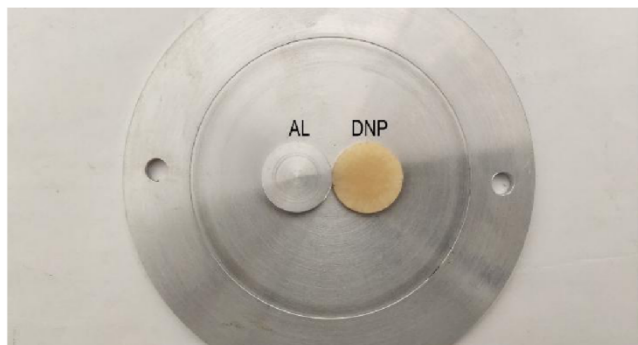


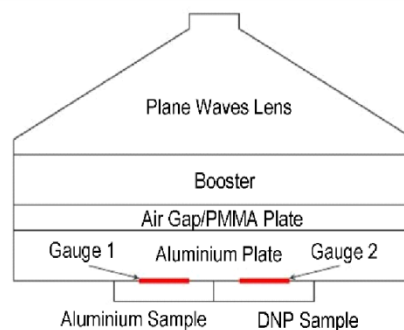
图1 铝样品和 DNP 样品图

Fig.1 Samples of Al and DNP

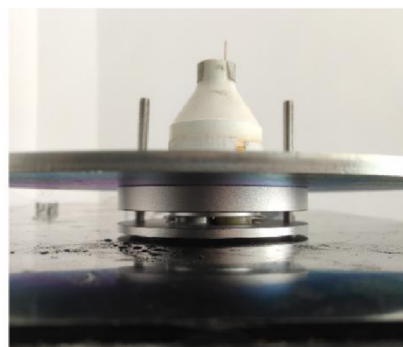
2.2 实验装置

压力对比法的实验装置如图 2 所示,装置主要由平面波发生器、加载炸药、空气环(或有机玻璃板)、铝隔板、传感器、铝样品及待测 DNP 炸药样品组成,各部

分自上而下依次装配,其中铝样品和 DNP 炸药样品,对称放置于铝隔板下方。平面波发生器、加载炸药、空气环(或有机玻璃板)直径均为 80 mm,加载炸药和铝隔板厚度分别为 20 mm 和 13 mm。为防止各部分之间的空气间隙对实验结果产生影响,采用螺栓进行紧固。



a. Schematic diagram



b. Photo of experimental apparatus

图2 压力对比法示意图和实验装置

Fig.2 Schematic diagram and experimental apparatus of pressure-comparing method

实验时,雷管引爆平面波发生器和加载炸药产生平面冲击波,冲击波经空气环(或有机玻璃板)和铝隔板衰减后同时传入铝样品和 DNP 炸药样品。通过调节空气环或有机玻璃隔板的厚度可以改变入射冲击波压力大小,传入样品中的冲击波压力由嵌入在样品与铝隔板之间的双 π 型锰铜压阻传感器测出^[22]。传感器敏感元件^[19]材质为锰铜合金,压力的改变会引起其电阻的变化,压力 p 与锰铜压阻传感器电阻相对变化量 $\Delta R/R$ 的关系为:

$$p = 0.62248 + 35.20079 \frac{\Delta R}{R} + 7.68603 \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 \quad (1)$$

式中, p 为传感器压力,GPa; ΔR 为传感器电阻变化量, Ω ; R 为传感器初始电阻, Ω 。

为防止传感器过早失效,采用厚 0.2 mm 的聚四

氟乙烯薄膜对传感器上下两面进行封装,封装后的传感器如图 3 所示。

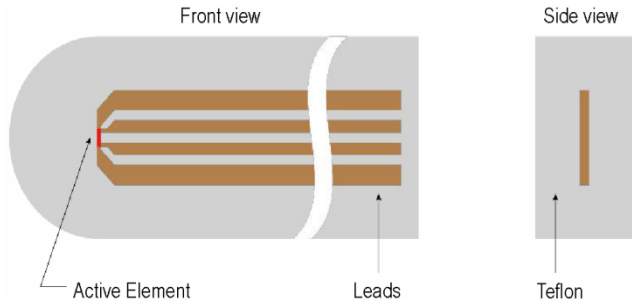


图 3 聚四氟乙烯薄膜封装的锰铜压阻传感器
Fig.3 Teflon-encapsulated manganin gauge

2.3 冲击 Hugoniot 关系确定方法

由于平面冲击波从铝隔板传入待测 DNP 炸药样品和对比样品中时,冲击波波阵面前后的关系遵循质量、动量、能量守恒定律,使冲击波波阵面前后的物理量满足 Rankine-Hugoniot 关系^[5]:

$$\rho_0(D - u_0) = \rho(D - u) \quad (2)$$

$$p - p_0 = \rho_0(D - u_0)(u - u_0)p \quad (3)$$

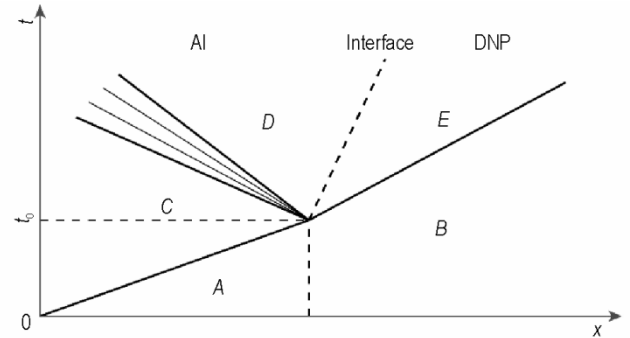
$$e - e_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right) \quad (4)$$

式中, p 为压力, GPa; ρ 为密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; e 为比内能, $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$; u 为粒子速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; D 为冲击波速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 下标 0 表示初始状态, 无下标表示波后状态。波后状态共有 5 个物理量, 但关系式只有 3 个, 因此需要通过实验测定其中 2 个物理量, 才能确定冲击波波后状态。实验上通常选择 p 、 D 和 u 这 3 个物理量中的任意 2 个, 其中冲击波压力 p 可以通过锰铜压阻计直接测得, 冲击波速度 D 需要精确测量冲击波传播的时间和样品厚度, 由于样品厚度的测量存在误差会导致冲击波速度的测量不准, 而冲击波波后粒子速度 u 可以通过添加对比 Al 样品的冲击波波后压力进行换算, 得到较为准确的 DNP 炸药样品的波后粒子速度, 故选取测量冲击波压力 p 和波后粒子速度 u 两个物理量。

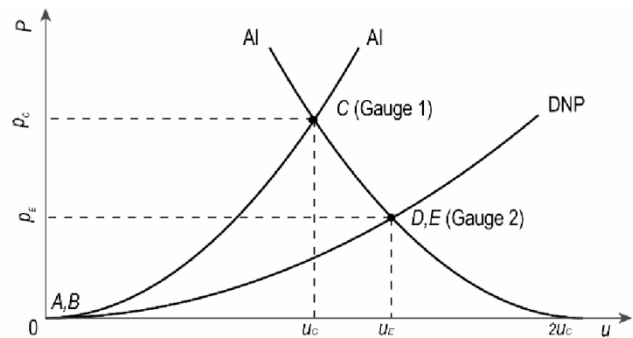
本研究采用压力对比法首先测量待测样品和对比样品中的冲击波压力, 进一步通过阻抗匹配原理^[19]计算得到待测样品的粒子速度。压力对比法中冲击波的传播过程如图 4 所示, 由图 4 可以看出, 冲击波传入铝隔板后, 铝隔板状态由 A 区进入 C 区。A 区为铝隔板初始状态, 其对应的粒子速度和力分别是 $u_A=0$ 、 $p_A=0$ 。将铝的冲击波速度与粒子速度的 D - u 关系: $D = c + \lambda u$, 代入式(2)可得 C 区的压力和粒子速度关系见式(5):

$$p_C = \rho_{Al}(c_{Al} + \lambda_{Al}u_C)u_C \quad (5)$$

式中, 铝样品的参数已知^[20]: $\rho_{Al}=2.785 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $c_{Al}=5.328 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, $\lambda_{Al}=1.338$ 。



a. x - t curve



b. p - u curve

图 4 冲击波在铝隔板/DNP 炸药界面上的传播

Fig.4 Shock wave incident on the Al plate/DNP interface

由于 DNP 炸药的阻抗小于铝的阻抗, 在 t_0 时刻, 冲击波传播到铝隔板/炸药和铝隔板/铝样品界面后, 会向炸药样品和铝样品中入射冲击波, 炸药由 B 区进入 E 区, 压力变为 p_E , 铝样品的状态同样发生改变, 压力变为 p_C 。B 区为炸药初始状态, $u_B=0$ 、 $p_B=0$ 。如图 4b 所示, 在 p - u 平面 E 区状态位于铝的镜像线上^[5], 即:

$$p_E = \rho_{Al}(c_{Al} + \lambda_{Al}(2u_C - u_E))(2u_C - u_E) \quad (6)$$

联立(5)、(6)两式可得

$$u_E = \frac{2\sqrt{c_{Al}^2\rho_{Al}^2 + 4\lambda_{Al}\rho_{Al}p_C} - \sqrt{c_{Al}^2\rho_{Al}^2 + 4\lambda_{Al}\rho_{Al}p_E} - c_{Al}\rho_{Al}}{2\lambda_{Al}\rho_{Al}} \quad (7)$$

将冲击波波后的压力 p_E 和粒子速度 u_E 代入 Rankine-Hugoniot 关系式(式(2)-式(4)), 就可求出样品完整的波后状态。为改变每组实验施加到 DNP 样品和铝样品上的冲击波加载压力, 本研究通过调整用于衰减的空气隙大小和有机玻璃板 (PMMA) 厚度, 得

到不同的冲击波加载压力,共设计了9组实验,具体实验工况如表1所示。

表1 实验工况设计表

Table 1 Details of designed experimental conditions

No	attenuation-material	thickness / mm
1	Air gap	14
2	Air Gap	11
3	Air Gap	9
4	Air Gap	6
5	Air Gap	4
6	PMMA Plate	20
7	PMMA Plate	9
8	PMMA Plate	4
9	No Gap	0

3 测试结果及分析

3.1 测试数据处理

将压力对比法实验数据进行处理后,每次试验结果为两条压力时间曲线,即铝隔板/铝样品界面和铝隔板/DNP炸药样品界面的压力-时间曲线,典型结果如图5所示。由图5可以看出,两个界面处传感器测得的压力开始时先同时上升,维持0.1 μs后,压力信号继续上升并趋于稳定,其中铝隔板/DNP炸药样品界面的压力上升并不明显,铝隔板/铝样品界面的压力会再次出现明显跃升并趋于稳定,这是封装传感器采用的聚四氟乙烯与炸药(铝样品)阻抗不匹配导致的。

图6分析了冲击波在铝隔板/聚四氟乙烯/DNP炸药样品(铝样品)中的传播过程。冲击波由铝隔板传

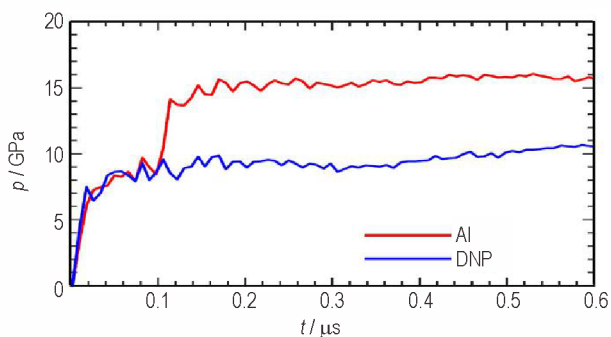
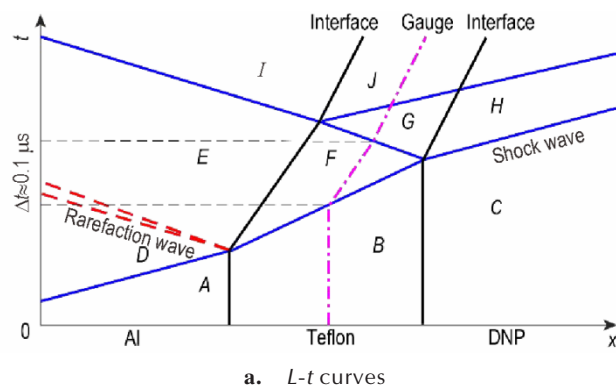
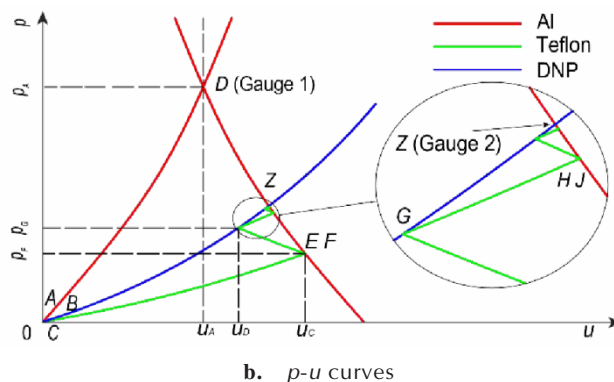


图5 铝样品和DNP炸药样品上表面压力-时间曲线
Fig.5 Pressure history curves of the top surfaces of the Al and DNP samples

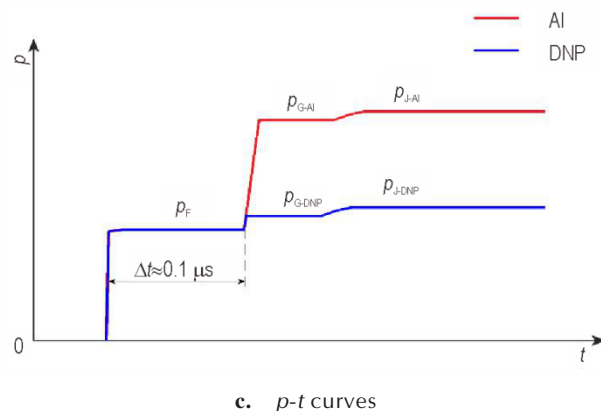
入聚四氟乙烯后,如图6a中所示,聚四氟乙烯状态由B区进入F区,铝隔板状态由D区进入E区,对应图6b中的点E,此时,如图6c中所示传感器压力由0突跃至 p_F ;由于DNP炸药样品和铝样品的阻抗均高于聚四氟乙烯,当冲击波传播到聚四氟乙烯/DNP炸药样品(铝样品)界面时,向聚四氟乙烯中反射冲击波,如图6a所示DNP炸药样品(铝样品)状态由C区进行H区,聚四氟乙烯由F区进入G区,对应图



a. L-t curves



b. p-u curves



c. p-t curves

图6 冲击波在铝隔板/聚四氟乙烯薄膜/DNP炸药(铝样品)系统中的传播

Fig.6 Shock wave propagation in Al plate/Teflon/DNP (Al) samples and their interfaces

6b 中的点 G、H, 此时图 6c 中传感器压力由 p_f 突跃至 p_G 。两次压力突跃的时间间隔 $\Delta t \approx 0.1 \mu\text{s}$, 导致图 5 压力曲线初始阶段出现压力为 p_f 的平台, 并在约 $0.1 \mu\text{s}$ 时压力突跃至 p_G 。炸药阻抗与聚四氟乙烯薄膜接近, 因此图 5 和图 6c 中 DNP 炸药压力-时间曲线(蓝线)在 $0.1 \mu\text{s}$ 时的压力突跃并不明显, 而铝的阻抗显著大于聚乙烯薄膜, 所以在图 5 和图 6c 中铝样品的压力-时间曲线(红线)在 $0.1 \mu\text{s}$ 时再次发生一次明显的突越, 之后冲击波在聚四氟乙烯两界面来回反射, 传感器记录的压力不断增加, 直至聚四氟乙烯进入 Z 区。从图 5 的实验曲线中只能分辨出冲击波在聚四氟乙烯中传播两次的压力, 即 p_f 和 p_G , 图中可以看出第二次突跃过后的压力 p_G 与 p_z 已经比较接近, 可以将 p_G 近似为界面最终压力 p_z 。

3.2 Hugoniot 关系拟合

研究共得到了 9 组压力-时间曲线, 典型的实验曲线如图 5 所示。读出每组压力-时间曲线中的铝隔板/铝样品界面压力 (p_{Al}) 和铝隔板/DNP 炸药样品界面压力 (p_{DNP}), 测试结果如表 2 所示。

表 2 铝隔板/铝样品和铝隔板/DNP 炸药样品界面压力测试结果

Table 2 Experimental interface pressures of Al plate/Al sample and Al plate/DNP samples

No	p_{Al}/GPa	p_{DNP}/GPa
1	7.0	3.7
2	9.6	5.4
3	11.3	6.6
4	15.2	9.3
5	16.6	10.5
6	17.0	11.0
7	17.9	11.3
8	21.2	13.8
9	21.8	14.4

Note: p_{Al} , p_{DNP} are the stable pressure of aluminum sample and DNP sample at $0.1 \mu\text{s}$ respectively on the pressure history curves

根据表 2 实测压力数据, 由式(3)和式(7), 可计算得到波后粒子速度 u 和冲击波速度 D 。将 9 组实验算得的 u 和 D 分别标注在 $D-u$ 平面内, 得到 9 个点, 对其用最小二乘法进行拟合, 拟合结果如图 7 所示。结果表明, 在 $D-u$ 平面内, DNP 炸药压力为 3.7~14.4 GPa 范围内的冲击 Hugoniot 关系可近似为一条直线, 直线方程为:

$$D = (1.975 \pm 0.346) + (2.523 \pm 0.300)u \quad (0.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} < u < 1.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (8)$$

式中的截距 $1.975 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 可以近似理解为本实验 DNP 炸药样品中的声速, 将式(8)与式(2)(3)(4)联立可以求解不同冲击波作用下 DNP 炸药的波后状态。同时, 把 DNP 的爆速^[1]代入式(8)和式(2)(3)可以外推出 DNP 的爆压约等于 33.6 GPa, 与文献[1]中较为符合, 若将 DNP 的格林爱森系数 γ 代入 Hugoniot 方程中还可进一步标定 DNP 炸药的 Grüneisen 方程。

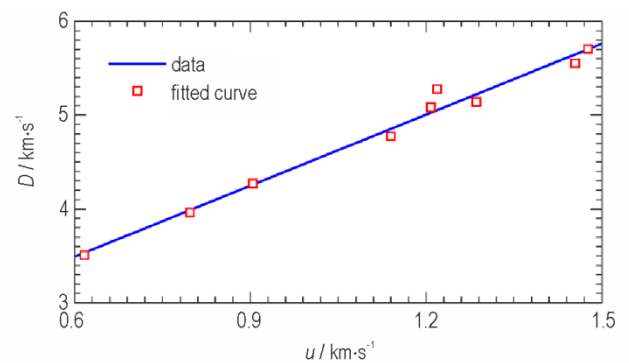


图 7 DNP 炸药冲击波波速 (D) 与粒子速度 (u) 关系

Fig.7 Shock velocity (D) versus particle velocity (u) for DNP

4 结论

(1) 使用压力对比法测量了 3.7~14.4 GPa 冲击波压力下的 DNP 和对比 LY12 铝样品冲击波波后压力, 所用实验方法忽略了炸药反应对测试结果的影响, 实验结果较为理想。

(2) 实验结果表明, DNP 炸药的冲击波波速和波后粒子速度呈线性关系, 拟合得到的冲击 Hugoniot 关系可近似为一条 $D-u$ 平面内的直线, 直线方程为 $D = (1.975 \pm 0.346) + (2.523 \pm 0.300)u$ ($0.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} < u < 1.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)。

参考文献:

- [1] 杜闪. 3,4-二硝基吡唑合成及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
DU Shan. Synthesis and properties of 3,4-dinitropyrazole[D]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [2] 刘威, 李永祥. 3,4-二硝基吡唑合成工艺研究展望[J]. 江西化工, 2015(5): 8-12.
LIU Wei, LI Yong-xiang. Prospect on studying 3,4-nitropyrazole synthesis [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2015 (5): 8-12.
- [3] 田新. 3,4-二硝基吡唑合成及性能研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2012.
TIAN Xin. Improved synthesis of 3,4-dinitropyrazole[D]. Bei-

- jing: China Academy of Engineering Physic, 2012.
- [4] 周霖, 陈世煜, 张向荣, 等. DNP/HMX 熔铸炸药的流变性能[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1): 30-34+44.
ZHOU Lin, CHEN Shi-yu, ZHANG Xiang-rong, et al. Rheological property of DNP/HMX melt-cast explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(1): 30-34+44.
- [5] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 330-336.
ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei. Detonation Physics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2001: 330-336.
- [6] 江厚满, 张若棋, 张寿齐. 用遗传算法确定材料物态方程参数[J]. 高压物理学报, 1998, 12(1): 47-53.
JIANG Hou-man, ZHANG Ruo-qi, ZHANG Shou-qi. Applying genetic algorithm to determine parameters in equation of state[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1998, 12(1): 47-53.
- [7] 江厚满, 张若棋. 确定JWL物态方程参数的非线性优化方法[J]. 弹道学报, 1998, 10(2): 25-28.
JIANG Hou-man, ZHANG Ruo-qi. Application of nonlinear optimization to parameters in JWL equation of state[J]. *Chinese Journal of Ballistics*, 1998, 10(2): 25-28.
- [8] 江厚满, 张若棋, 张寿齐. 用冲击波应力历史曲线确定材料物态方程参数[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(2): 177-181.
JIANG Hou-man, ZHANG Ruo-qi, ZHANG Shou-qi. Parametrization of material EOS by use of stress VS time profile[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(2): 177-181.
- [9] 蒋秋黎, 王浩, 罗一鸣, 等. 3,4-二硝基吡唑的热行为及其与某些炸药组分的相容性[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 297-300.
JIANG Qiu-li, WANG Hao, LUO Yi-ming, et al. Thermal behaviors of 3, 4-dinitrophenylazole and its compatibility with some explosive component materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 297-300.
- [10] 李永祥, 郭俊玲, 宋磊, 等. 1-甲基-3,4-二硝基吡唑的合成、性能及晶体结构[J]. 火炸药学报, 2015, 38(3): 64-68.
LI Yong-xiang, GUO Jun-ling, SONG Lei, et al. Synthesis, performance and crystal structure of 1-methyl-3, 4-dinitrophenylazole[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(3): 64-68.
- [11] 杨舒棋, 张旭, 彭文杨, 等. 利用电磁法研究HMX与TATB混合钝感炸药的冲击起爆特性[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3): 81-89.
YANG Shu-qi, ZHANG Xu, PENG Wen-yang, et al. Impact initiation characteristics of TATB based insensitive explosives mixed with HMX by electromagnetic velocity gauges[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(3): 81-89.
- [12] 王延飞, 刘杰, 张旭, 等. 未反应炸药JOB-9003的JWL状态方程[J]. 高压物理学报, 2016, 30(5): 387-391.
WANG Yan-fei, LIU Jie, ZHANG Xu, et al. JWL equation of state of unreacted JOB-9003 explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(5): 387-391.
- [13] 鲁峰, 陈朗, 冯长根, 等. 冲击波作用下铁钛硼的动态特性研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 1-7.
LU Feng, CHEN Lan, FENG Chang-gen, et al. The Dynamic mechanical properties of NdFeB ferromagnet under Shock Wave compression[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 19(4): 337-379.
- [14] 杨洋, 段卓平, 李淑睿, 等. 2,4-二硝基苯甲醚基熔注炸药RMOE-2冲击起爆实验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(S1): 72-76.
YANG Yang, DUAN Zhuo-ping, LI Shu-ru, et al. Experimental research on shock initiation for DNAN-based melt-cast RMOE-2 explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(S1): 72-76.
- [15] Millett J, 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.
- [16] 杨舒棋. TATB基钝感炸药冲击起爆反应规律温度效应研究[D]. 中国工程物理研究院, 2020.
Yang Shu-qi. Study on temperature effect of impact initiation reaction law of TATB based insensitive explosive[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physic, 2020.
- [17] 裴红波, 刘俊明, 张旭, 等. 基于反向撞击法的JB-9014炸药Hugoniot关系测量[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 49-54.
PEI Hong-bo, LIU Jun-ming, ZHANG Xu, et al. Measurement of Hugoniot relation for unreacted JB-9014 explosive with reverse-impact method[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 49-54.
- [18] 訾攀登, 陈军, 张蓉, 等. 二次压缩条件下JOB-9003炸药特性研究[J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 155-161.
ZI Pan-Deng, CHEN Jun, ZHANG Rong, et al. Characteristics of JOB-9003 in double shocks experiments[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(2): 155-161.
- [19] 曹同堂. DNAN基熔铸炸药冲击起爆特性和反应速率方程研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
CAO Tong-tang. Researches on shock initiation characteristics and the reaction rate equation of DNAN based melt-cast explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [20] Marshall M C, Fernandez-Paella A, Myers T W, et al. Shock Hugoniot measurements of single-crystal 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene(TATB) compressed to 83 GPa[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(18): 185901.
- [21] Miao F, Zhang X, Zhou L, et al. Hugoniot and Mie-Grüneisen equation of state of unreacted 2, 4-dinitroanisole (DNAN)[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103369.
- [22] 王虹富, 白帆, 刘彦, 等. 爆炸冲击波作用下黑索今基含铝炸药的冲击点火反应速率模型[J]. 兵工学报, 2021, 42(2): 327-339.
WANG Hong-fu, BAI Fan, LIU Yan, et al. Ignition Reaction rate model of RDX-based aluminized explosives under shock waves[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(2): 327-339.

Experimental Measurement on Hugoniot Relationship of DNP Explosive

ZHOU Lin¹, WANG Zhao-yuan¹, ZHANG Xiang-rong¹, NI Lei¹, MIAO Fei-chao¹, JIANG Tao², ZHU Ying-zhong²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. No. 2 Research Institute for Special Products, Chongqing Hongyu Precision Industry Co., Ltd., Chongqing 402760)

Abstract: 3, 4-dinitropyrazole(DNP), a new type of smelt-cast matrix explosive, is a kind of high energy matrix with great application potential. The impact Hugoniot relationship of explosive is the basis to investigate its impact initiation characteristics. For this reason, the pressure comparison method was adopted in this study. Plane wave generators were selected to act the designed loading. The post-shock pressure of DNP explosive and LY12 aluminum samples under nine shock pressures were measured by manganese-copper piezoresistivity gauges. By calculating the experimental data, the velocity (D) of the shock wave and the velocity u of the particle under different pressures were obtained. The $D-U$ relationship of the DNP explosive in the range of 3.7~14.4 GPa was obtained by fitting. The results showed that the Hugoniot relationship of the DNP explosive in the range of 3.7~14.4 GPa could be approximated as a straight line in the $D-U$ plane. The post-wave state of DNP explosive under the action of shock wave was defined, which provided a reference for further study of impact ignition and initiation of DNP explosives. In addition, the influence of polytetrafluoroethylene packaging of manganese-copper piezoresistance gauges on the experimental test results was analyzed. The systematic error caused by packaging was effectively eliminated through theoretical analysis and reasonable interpretation of test signals.

Key words: DNP explosive; Hugoniot relationship; pressure-comparison method; Aluminium

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020303

(责编:姜梅)