

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.016

DNTF/HMX 炸药金属加速做功能力及其 JWL 状态方程

王浩, 高杰, 罗一鸣, 王红星
(西安近代化学研究所二部, 西安 710065)

摘要:针对现有研究未对以 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)为基的炸药金属加速做功能力及状态方程进行研究和表征的问题,对 DNTF/HMX 炸药金属加速做功能力及其 JWL 状态方程进行研究。采用圆筒试验得到 DNTF/HMX 炸药的比动能和格尼系数的变化规律,并与 Octol(HMX/TNT75:25)炸药进行了对比,同时采用解析法和 Autodyn 仿真获得了 DNTF/HMX 炸药的 JWL 状态方程。试验和仿真结果表明: DNTF 可较大幅度地提高炸药的金属加速能力,格尼系数与 Octol 炸药提高了约 5.5%,并获得其 JWL 状态方程参数。

关键词:爆炸力学; DNTF; 圆筒试验; 金属加速做功能力; JWL

中图分类号: TJ410.2 **文献标志码:** A

Metal Accelerating Ability and JWL EOS of DNTF/HMX Explosive

Wang Hao, Gao Jie, Luo Yiming, Wang Hongxing
(No. 2 Department, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem of 3,4-dinitrofurazanfuroxan(DNTF) base explosive's metal accelerating ability and JWL equation of state (EOS) has not researched and characterized, the DNTF/HMX explosive metal accelerating ability and JWL EOS was studied. The change rules of DNTF/HMX explosive's cylinder expansion velocity, ratio energy and Gurney coefficient was researched by cylinder test, and the metal accelerating ability was compared with Octol. The JWL EOS of DNTF/HMX explosive was achieved. The results show that: DNTF could obviously improve the metal accelerating ability of composite explosive, and DNTF/HMX explosive's Gurney coefficient was increased 5.5% than Octol. The JWL EOS constant of DNTF/HMX explosive was achieved.

Keywords: explosion mechanics; DNTF; cylinder test; metal accelerating ability; JWL

0 引言

3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)能量密度比 HMX 高,尤其在金属加速上作用显著。由于其可替代 TNT 作为熔铸载体,能提高熔铸炸药的金属加速能力,具有广阔的应用前景。DNTF 的能量性能和安全性获得了广泛的关注和研究^[1-3]。王亲会等^[4]研制了一种新型熔铸炸药,并对其性能进行了研究,但未直接对该类型炸药的金属加速做功能力进行研究和表征。

圆筒试验是由 1965 年由美国人 Kury 等人^[5]提出的,用于评价炸药的金属加速做功能力,试验中可得到比动能、格尼系数等参数,并通过拟合可以得到 JWL 状态方程等参数,其中格尼系数是用来表征炸药金属加速做功能力的一个重要指标,而 JWL 则可以在仿真设计中获得应用。笔者通过圆筒试验研究了 DNTF/HMX 炸药的比动能以及格尼系数的变化规律,对该炸药的金属加速做功能力进行了评估,并获得了其 JWL 状态方程,可为其在杀伤类战

斗部中应用提供参考。

1 实验

1.1 材料

DNTF 由西安近代化学研究所生产,纯度 99.2%,HMX 熔点大于 273.0 °C,酸度(以醋酸计)小于 0.2%。

1.2 试样制备

DNTF/HMX 炸药配方见表 1。首先将 DNTF、钝感剂熔化,然后加入 HMX,混合均匀后进行真空处理,将真空处理好的药浆注入直径为 50 mm 的圆筒试验用的铜管内。

表 1 圆筒试验炸药配方

炸药	W/%		
	DNTF	HMX	钝感剂
DO-1	30	60	10

1.3 试验

按照 GJB772A—97 方法 705.3 圆筒试验方法进

收稿日期: 2014-03-08; 修回日期: 2014-04-15

基金项目: 国防科技工业基础产品创新计划火炸药科研专项资助

作者简介: 王浩(1978—),男,湖北人,硕士,副研究员,从事熔铸炸药配方及工艺研究。

行试验, 圆筒试件内径为 50 mm。

2 结果与讨论

2.1 筒壁膨胀速度和比动能

圆筒试验的扫描图像如图 1 所示。

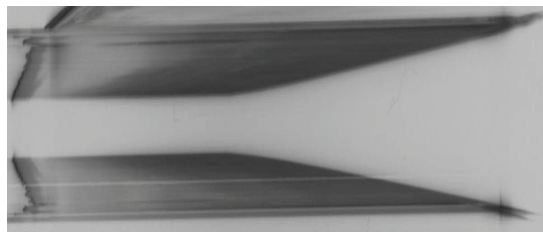


图 1 DO-1 圆筒试验扫描图像

根据 GJB772A—97 方法 705.3 计算获得膨胀距离为 5、19 和 38 mm 3 个特征距离的筒壁膨胀速度 v 和比动能 E 来表征炸药的做功能力, 试验结果如表 2 所示。

表 2 圆筒试验结果

炸药	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$v/(\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$			$E/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$		
		5 mm	19 mm	38 mm	5 mm	19 mm	38 mm
DO-1	1.77	1.283	1.640	1.781	0.824	1.345	1.586

2.2 格尼系数计算

采用哈德斯蒂和肯尼迪提出格尼系数计算公式^[6]可对其进行估算:

$$\sqrt{2E} = 0.6 + 0.54\sqrt{1.44\phi\rho_0} \quad (1)$$

其中 $\phi = NM^{1/2}Q^{1/2}$ 。

式中: N 为每克炸药所产生的气态爆炸产物的摩尔数, mol/g; M 为爆轰气体产物的平均分子量, g/mol; Q 为爆轰反应的化学能。

根据公式 (1) 可以计算出 DO-1 炸药和 Octol 炸药 (HMX 和 TNT 的质量比为 75:25) 的格尼系数如表 3 所示。

表 3 几种炸药的格尼系数

炸药	格尼系数	
	计算值	试验值
Octol(75/25)	2.82	2.80(文献值)
DO-1	2.84	2.955

根据改进的格尼公式可通过圆筒试验数据对其进行计算:

$$E_g = \frac{1}{2}V^2\left(\frac{M}{m} + \frac{1}{2}\right) \quad (2)$$

式中: E_g 为格尼比能; V 为圆筒壁最大膨胀速度; M 为单位长度铜管的质量; m 为单位长度炸药的质量。格尼系数为 $\sqrt{2E_g}$ 。

通过表 2 数据, 根据式 (2) 可以计算出 DO-1

炸药的格尼系数的试验值见表 3, 其中 Octol 为文献值。由表 3 可以看出, DO-1 炸药格尼系数相对于 Octol 炸药分别提高了 5.5%。

2.3 解析法求解 JWL 状态方程

JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程其形式为:

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

等熵条件下, 其形式为

$$p_S = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (4)$$

式中: p 为混合炸药爆轰产物的压力; V 为爆轰产物膨胀后的相对比容。

该状态方程有 6 个待定参数, 其等熵形式为式 (4) 的 6 个待定参数为 A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 和 ω 。

由热力学关系式可以获得其内能:

$$E_S = -\int p_S dV \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 可得到 JWL 状态方程的等熵内能形式

$$E_S = \frac{A}{R_1}e^{-R_1V} + \frac{B}{R_2}e^{-R_2V} + \frac{C}{\omega V^\omega} \quad (6)$$

式中 E_S 为爆轰产物的等熵内能。

设 $E_{S/V=1}$ 为爆轰产物气体膨胀释放的有效总能。对爆轰产物膨胀驱动过程, 将满足守恒关系

$$E_{S/V=1} = E_S + E_{gp}(V) + E_M(V) \quad (7)$$

式中: $E_{gp}(V)$ 为混合炸药爆轰产物的动能, $E_M(V)$ 为被驱动金属的动能。系统的格尼能量包括 2 部分:

$$E_g(V) = E_{gk}(V) + E_M(V) \quad (8)$$

$E_g(V)$ 为整个系统的格尼能量, 则由式 (7) 和式 (8) 得:

$$E_S = E_{S/V=1} - E_g(V) \quad (9)$$

$E_{S/V=1}$ 可以采用爆热 Q 替代。

推导出 50 mm 圆筒试验相对比容与膨胀距离 ($R-R_0$) 的关系式如式 (10) 所示, 可以计算出不同阶段的相对比容。

$$V = 1 + 0.04(R-R_0) + 0.0004(R-R_0)^2 \quad (10)$$

JWL 状态方程式 (3) 的右边相加的 3 项, 可分别代表爆炸产物膨胀过程中高压、中压和低压 3 个阶段的贡献项。

在低压阶段 ($V > 6$), 可将高压和中压忽略取

$$E_S = C/\omega V^\omega \quad (11)$$

通过对 $V > 6$ 阶段的试验参数进行最小二乘法拟合计算, 可求解得到 C 和 ω 。

在中压阶段 ($2 < V < 5$), 可取

$$E_s = \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^\omega} \quad (12)$$

由式 (11) 求解得到的 C 和 ω ，通过对该中压阶段的试验参数采用式 (12) 进行计算，可求解得到 B 和 R_2 。

A 和 R_1 可由 CJ 参数和圆筒膨胀最初的值共同确定。在 CJ 点，可得下式为：

$$p_{CJ} = A e^{-R_1 V_{CJ}} + B e^{-R_2 V_{CJ}} + \frac{C}{V_{CJ}^{\omega+1}} \quad (13)$$

$$V_{CJ} = \frac{\gamma}{\gamma+1} \quad (14)$$

由爆压 p_{CJ} 、多方指数 γ (计算时取 2.9) 和已求解出的 B 、 R_2 、 C 和 ω ，即可求得 A 和 R_1 。

综合以上的计算公式，可以得到 DO-1 炸药的 JWL 状态方程参数见表 4。

表 4 计算得到的 JWL 状态方程参数

炸药	DO-1
密度/(g/cm ³)	1.803
A/GPa	833.6
B/GPa	11.38
C/GPa	0.8
R ₁	4.8
R ₂	1.6
ω	0.345
D/(m/s)	8 594
爆压/GPa	33.29

2.4 仿真模拟求 JWL 方程

首先采用 Autodyn 建立仿真模型，如图 2 所示，其中 DO-1 炸药的 JWL 状态方程采用解析法求出表 5 的参数。



图 2 圆筒试验仿真模型

经过计算得到筒壁速度 v 与膨胀距离 $R-R_0$ 的关系曲线如图 3，从图中可以看出，两者相差较大。

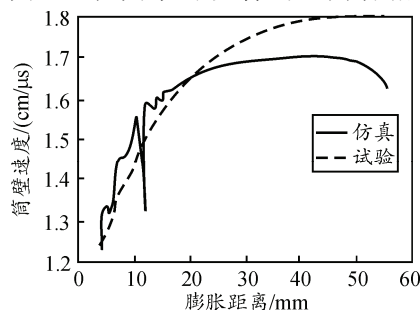


图 3 仿真计算得到的 v 与 $(R-R_0)$ 的关系曲线

根据偏离趋势，适当调整 JWL 状态方程参数，最后得到曲线如图 4 所示，其中采用的状态方程参数见表 5。

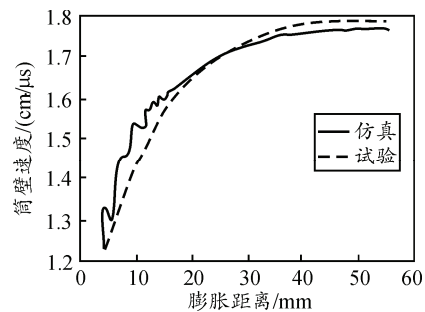


图 4 调整参数后 v 与 $(R-R_0)$ 的关系曲线

表 5 仿真模型得到的 JWL 状态方程参数

炸药	DO-1
密度/(g/cm ³)	1.803
A/GPa	766.48
B/GPa	12.28
R ₁	4.4
R ₂	1.5
ω	0.35
D/(m/s)	0.859 4
爆压/GPa	0.332 9

3 结论

1) DNTF 炸药具有较高的金属加速做功能力，DO-1 炸药的格尼系数比 Octol 提高 5.5%。

2) 采用 Autodyn 仿真与解析法相结合可简化 JWL 状态方程求解过程，状态方程参数为 A : 766.48 GPa, B : 12.28 GPa, R_1 : 4.4, R_2 : 1.5, ω : 0.35。

参考文献:

- [1] 周文静, 刘子如, 张皋, 等. DNTF 的非等温结晶研究 (II) 在 RDX 中的结晶动力学[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 16-18.
- [2] 熊贤锋, 王浩, 高杰, 等. DNTF 基熔铸炸药的金属加速做功能力[J]. 火炸药学报, 2011, 33(3): 38-41.
- [3] 罗一鸣, 王浩, 王晓峰, 等. 精密爆炸网络自动装填装置及工艺技术[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 29-30.
- [4] 王亲会. 一种新型熔铸炸药研究[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 46-47.
- [5] 陈朗, 冯长根, 黄毅民, 等. 含铝炸药圆筒试验及爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(3): 13-15.
- [6] 陈颂汾, 译. 化学炸药及炸药模拟材料性能[M]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 20-25.