Vol. 13, No. 3 June, 2005

文章编号:1006-9941(2005)03-0144-04

两种含铝炸药作功能力与 JWL 状态方程研究

卢校军,王 蓉,黄毅民,何 碧,韩敦信,陈红霞,鲁

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:采用圆筒试验方法研究了 ROTL-905、TRAL 含铝炸药的作功能力,并将试验结果与 JOB-9003、TATB 炸药进行了比较。利用圆筒试验数据计算了含铝炸药 JWL 状态方程参数。研究结果表明:与 JOB-9003、以 TATB 为基的 PBX 炸药相比,ROTL-905、TRAL 含铝炸药由于含有铝粉等慢反应成分,初始加速度小、衰减慢、后续作功能力强,圆筒膨胀到距离为 6.5 mm 和 9.9 mm 时,其加速能力已超过 JOB-9003 炸药。

关键词:应用物理学;含铝炸药;爆轰;圆筒试验;JWL 状态方程 中图分类号:TJ55;059 文献标识码:A

### 1 引 言

含铝炸药是一类高密度、高爆热和高威力的混合 炸药,其非理想爆轰特性明显,即"临界直径大、化学 反应区长、能量释放所需时间较长"。目前,含铝炸药 已广泛用于水中兵器、对空武器,含铝炸药加速金属的 能力及其爆轰产物状态方程成为武器设计中所关心的 重要问题。试验和理论研究表明,在评价炸药作功能 力的许多方法中,圆筒试验是一种评价炸药作功能力 的标准方法之一。国内已相继建立了标准(*Φ*25 mm) 圆筒试验和*Φ*50 mm 圆筒试验方法<sup>[1]</sup>。圆筒试验是 一种二维流体力学试验,结果不仅可以评价炸药加速 金属的相对能力,而且还可确定爆轰产物 JWL 状态方 程参数。本文采用圆筒试验研究了含铝炸药 ROTL-905 的作功能力,并将试验结果与 JOB-9003<sup>[2]</sup>、以 TATB 为基的 PBX 炸药进行了比较分析;并采用圆筒 试验数据拟合了一种含铝炸药的 JWL 状态方程。

#### 2 试 验

试验采用 50 mm 圆筒试验,所研究炸药为 ROTL-905 和 TRAL,其中 ROTL-905 是以 HMX 为基的含铝 炸药,铝粉含量为 13%; TRAL 是以 RDX 为基的含铝 炸药,铝粉含量为 22%。试验装置由高压电雷管、传 爆药柱、电探针、圆筒管、支架和爆炸光源等组成,试验 装置示意图见图 1。圆筒试验中铜管膨胀曲线见图 2。 扫描方向为 X 轴,狭缝为 Y 轴,AB 和 A'B'是圆筒膨胀 时的扫描线,BC 和 B'C'是圆筒膨胀过程的扫描线。



斌

图 1 圆筒试验装置示意图 1,5-高压电雷管,2,6--传爆药柱,3,9-测试药柱, 4,10-电探针,7-光源弹,8--圆筒,11--高速相机

Fig. 1 Cylinder test setup 1,5—high-tention electric detonator, 2,6—booster grain, 3,9—test item, 4,10—electric pin, 7—lamp-house bomb, 8—cylinder, 11—high-speed video camera





#### 3 结果与讨论

试验按照 GJB 772.308-93 执行,从一端起爆装填 在圆筒内的炸药试样,炸药爆轰后圆筒壁在爆轰产物 作用下沿圆筒的径向和轴向作二维运动,根据最小二 乘法原理,利用时间、膨胀距离数据和公式(1) 拟合可

收稿日期:2004-12-17;修回日期:2005-03-18

作者简介:卢校军(1972-),男,助研,主要从事炸药爆轰性能研究。

获得系数A、B、C、D的值。

$$t = A + B(R - R_0) + C e^{D(R - R_0)}$$
(1)

式中, R- $R_0$  圆筒壁膨胀距离; t 为圆筒壁膨胀到某距 离对应的时间;  $A \ B \ C \ D$  为拟合系数。利用  $A \ B \ C \ D$ D 值, 根据公式(2)和(3)可计算圆筒壁膨胀到某一距 离( $R - R_0$ )的壁速 U 及比动能  $E_o$ 

$$U = \frac{1}{B + CDe^{D(R-R_0)}}$$
(2)

$$E = \frac{1}{2}U^2 \tag{3}$$

式中, U 为圆筒壁速度; E 为比动能。 试验选取膨胀距离为5 mm 和19 mm 的 U 和 E 来 表征炸药的作功能力。几种炸药的试验结果见表1。 由表1 可以得出, 在膨胀到特征距离(5 mm 和 19 mm)处,圆筒壁速和比动能呈现 JOB-9003 > ROTL-

905 > TRAL > TATB 的情况。

D T	
	0,00
表 1	ROTL-905、TRAL、以 TATB 为基 PBX 炸药及 JOB-9003 炸药试验结果
Table 1	Cylinder test results of ROTL-905, TRAL, PBX and JOB-9003 explosive

1:	density∕g•cm <sup>-3</sup> —	$R - R_0 = 5 \text{ mm}$		$R - R_0 = 19  \text{mm}$	
explosive		$V/\mathrm{mm} \cdot \mu \mathrm{s}^{-1}$	$E/kJ \cdot g^{-1}$	$V/\text{mm} \cdot \mu \text{s}^{-1}$	$E/kJ \cdot g^{-1}$
JOB-9003	1.859	1.516	1.149	1.769	1.558
PBX	1.889	1.222	0.747	1.475	1.088
ROTL-905	1.878	1.397	0.976	1.741	1.516
TRAL	1.850	1.318	0.869	1.599	1.278

为比较几种炸药圆筒壁速和比动能及其变化趋势,利用公式(2)及(4)关系式作出了圆筒壁速、加速度与膨胀距离的关系曲线,图3为壁速~膨胀距离关系图,图4为加速度~膨胀距离关系图。

$$\alpha = -\frac{CD^2 e^{D(R-R_0)}}{\left[B + CD^2 e^{D(R-R_0)}\right]^3}$$
(4)

式中,α为加速度。



图 3 给出了 ROTL-905、TRAL、TATB 为基的 PBX 炸药及 JOB-9003 炸药圆筒膨胀距离与壁速的关系,从 图中可以看出: JOB-9003 炸药作功能力较强,但另外 3 种炸药具有较强的非理想性,后期速度增长较快,尤其

是 ROTL-905 含铝炸药,后期壁速已接近高能炸药 JOB-9003 炸药,显示了其高威力、高作功能力的特性; 由于 TRAL 含铝炸药中主成分为 RDX (ROTL-905 为 HMX),因此其作功能力相对低一些。



图 4 给出了 ROTL-905、TRAL、TATB 为基的 PBX 炸药和 JOB-9003 炸药圆筒膨胀距离与加速度的关系, 在反应初期,ROTL-905 和 TRAL 两种含铝炸药对铜壁 的加速能力远远不及 JOB-9003 炸药,但优于以 TATB 为基的 PBX 炸药。随着膨胀距离的增加,JOB-9003 炸药的加速能力迅速下降,在  $R - R_0 = 6.5$  mm 左右,其 铜管壁的加速度小于 ROTL-905 含铝炸药,在  $R - R_0 =$ 

料

9.9 mm 左右,加速度小于 TRAL 含铝炸药,其加速度 在 R- $R_0$  = 25 mm 附近就趋于零,即此时炸药已不再做 有效功。相反,ROTL-905 和 TRAL 炸药驱动铜壁的加 速度下降十分缓慢,后期加速能力强,在 $R - R_0$  = 25 mm处,还有 0.017 mm ·  $\mu$ s<sup>-1</sup>和 0.008 mm ·  $\mu$ s<sup>-1</sup>的 加速度。TATB 为基的 PBX 炸药虽然加速度下降也较 缓慢,膨胀的后期也有加速度,但由于初期加速度太 低,因此其作功能力并不高。

导致炸药后期加速能力强的原因主要是因为, ROTL-905和TRAL都含有铝粉,CJ爆轰理论不适合这 类含铝炸药,铝粉主要与其他高能炸药成分的爆轰产 物反应,导致其反应区变宽,反应时间延长,能量在较 长时间内释放,相对能量释放率较低,而含铝炸药都具 有较高的总能量(高爆热),因此有较大部分能量在后 期释放,表现在圆筒试验方面为加速铜壁时间长,后期 加速能力强。这与以TATB为基 PBX 炸药的爆轰驱动 行为是一致的,而 JOB-9003 属理想高能炸药,其爆轰 反应区窄,反应速度快,能量很快释放完毕,所以在初 始阶段加速铜壁能力强,但其持续作功能力差。

含铝炸药中铝粉与爆轰产物反应释放的能量不支 持爆轰波的传播,因此含铝炸药的爆速较低,冲击波能 较小,与 JOB-9003 等高能炸药相比,有更多的能量用 于加速金属,这也是含铝炸药作功能力强的原因之一。

## 4 计算 JWL 状态方程参数

炸药爆轰产物状态方程是描述炸药爆轰产物系统 各物理量(压力、比容、温度和内能等)之间的关系。 JWL状态方程是一种由试验方法确定的半经验状态方 程。本文利用圆筒试验数据计算了含铝炸药的JWL状态方程。

等熵条件下 JWL 状态方程形式为<sup>[3]</sup>

$$p_{s} = A e^{-R_{1}V} + B e^{-R_{2}V} + \frac{C}{V^{\omega+1}}$$
(5)

式中, $p_s$ 为爆轰产物压力;V为爆轰产物的相对比容;  $A \setminus B \setminus C \setminus R_1 \setminus R_2$ 和 $\omega$ 为6个参数。

(5)式经转换可得以等熵内能表示的 JWL 状态方程,其形式为

$$E_{*} = \frac{A}{R_{1}} e^{-R_{1}V} + \frac{B}{R_{2}} e^{-R_{2}V} + \frac{C}{\omega V^{\omega}}$$
(6)

式中,*E*,为爆轰产物的等熵内能。 等熵内能可以通过下式获得

$$E_s = E - E_g = Q - E_g$$
(7)  
对于圆筒试验

$$E_g = \frac{U}{2} \times \left(\frac{M}{m} + \frac{1}{2}\right) \tag{8}$$

式中,E 为爆轰产物气体膨胀释放的有效总能,即爆热  $Q; E_g$  为 Gurney 能; U 为壁速; M 为单位长度铜管的 质量; m 为单位长度炸药的质量。

美国的 Millers 等人给出了圆筒膨胀的相对比容与 膨胀距离的变化关系

$$V = 1.0146 + 0.19174 \times (R - R_0) + 0.006178 \times (R - R_0)^2$$
(9)

本文采用 Millers 等人给出的简便计算方法。

在 V > 6 的低压阶段,(6)式可近似为  $E_s = \frac{C}{\omega V^{\omega}}$ ,这

样利用公式(9)获得一组相对比容数据,利用公式(7) 和(8)可获得一组等熵内能数据,那么通过这两组数据 拟合可获得 *C* 和 ω 的值。

在中压阶段(2 < V < 5)时,(6)式可近似为  $E_s = \frac{B}{R_2}e^{-R_2V} + \frac{C}{\omega V^{\omega}}$ , C 和  $\omega$  为已知,利用公式(7)、(8)和 (9)可求出 B 和  $R_2$ 。当  $C_{\infty} S_{\infty} R_2$ 确定后,通过联立 求解以下 4 个方程,可得到 A 和  $R_1$ 。

$$\rho_{\rm CJ} = A e^{-R_1 V_{\rm CJ}} + B e^{-R_2 V_{\rm CJ}} + \frac{C}{V_{\rm CJ}^{\omega+1}}$$
(10)

$$\rho_0 D^2 = A R_1 e^{-V_{\rm CJ} \times R_1} + B R_2 e^{-V_{\rm CJ} \times R_2} + \frac{C(\omega + 1)}{V_{\rm C1}^{\omega+2}}$$
(11)

$$V_{\rm CJ} = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \tag{12}$$

$$_{\rm CJ} = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1} \tag{13}$$

式中,D为圆筒试验实测爆速; $\gamma$ 值取 2.9; $\rho_0$ 为炸药 密度。

通过以上计算方法可获得 JWL 状态方程的 6 个参数,本文求出的 ROTL-905 含铝炸药的 JWL 状态方程 参数见表 2。

表 2 ROTL-905 含铝炸药的 JWL 状态方程参数 Table 2 JWL equation of state for detonation products of ROTL-905 explosive

detonation velocity /km • s <sup>-1</sup>	A ∕GPa	<i>B</i> ∕GPa	C ∕GPa	$R_1$	<i>R</i> <sub>2</sub>	ω
8.136	638.7	8.636	1.306	4.36	1.324	0.323

#### 5 结 论

JOB-9003 炸药属于典型的理想炸药,作功能力强,

能量释放速率快,因此初始加速度大,但衰减也快; ROTL-905和TRAL含铝炸药由于含有铝粉等慢反应 成分,后续作功能力强,ROTL-905在圆筒膨胀距离为 6.5 mm 左右时,其加速能力已超过JOB-9003炸药; TRAL 在圆筒膨胀距离为9.9 mm 左右时,其加速能力 已超过JOB-9003炸药。

ROTL-905 含铝炸药 JWL 状态方程参数为: A = 638.7 GPa, B = 8.636 GPa, C = 1.306 GPa, R<sub>1</sub> = 4.36, R<sub>2</sub> = 1.324。

致谢:感谢爆轰测试组和常规研究部浇注组的全体同志!

#### 参考文献:

- [1] 花平环,韩敦信,陈启珍,等. GJB 772.308-93[S].北京:国防科工 委军标出版发行部,1997.
- [2] 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京:科学出版 社,1989.
- [3] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

#### Study on Work Ability and JWL Equation of State of Two Aluminized Explosives

LU Xiao-jun, WANG Rong, HUANG Yi-min, HE Bi, HAN Dun-xin, CHEN Hong-xia, LU Bin (Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract**: The cylinder tests on ROTL-905 and TRAL aluminzed explosives were carried out. The results were analyzed and compared with that of JOB-9003 and TATB explosives. The parameters of JWL equation of state for detonation products of ROTL-905 aluminized explosive were calculated. The results show that because of containing slow reaction element Al, at the earlier period of copper wall expansion, the acceleration of ROTL-905 and TRAL aluminized explosives is far smaller than that of JOB-9003 explosive, whereas the former decreases slowly. At about 6.5 mm and 9.9 mm, the acceleration of the two aluminized explosives exceeds that of JOB-9003 explosive. It also shows the aluminized explosives have stronger continuous working ability.

Key words: applied physics; aluminized explosive; detonation; cylinder test; JWL equation of state

\*\*\*\*\* \* 读者·作者·编者 \*

\*\*\*\*\*\*\*

题名	第一作者	出版年卷期页
Study on synthesis of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene	CAI Hua-qiang	(2003)11-01-0001-03
Study on hydrogenolysis of HBIW and crystal structures of the reaction products	LIU Jin-quan	(2003)11-01-0004-04
Experimental study on the impact damage of selected explosives	CHEN Peng-wan	(2003)11-01-0013-05
Estimation of the critical temperature of thermal explosion for energetic materials using non-isothermal analysis method	HU Rong-zu	(2003)11 - 01 - 0018 - 06
Thermal expansion of TATB-filled polymeric material	LI Yu-bin	(2003)11 - 01 - 0024 - 04
Research on gas evolution of silicon cushion materials	ZUO Yu-fen	(2003)11 - 01 - 0028 - 04
Study on the stability of benzotrifuroxan with trace impurities	CHEN Jie	(2003)11 - 01 - 0032 - 05
Effect of nano-TiO <sub>2</sub> on igniting strength of $K_1K$ ignition mixture	QIN Zhi-chun	(2003)11-01-0037-03
Preparation of low-density polyurethane foam explosive by ultrasonic technology	YAN Ji-sheng	(2003)11 - 01 - 0043 - 03
Study and progress of clean nitration technology	REN Yong-li	(2003)11 - 01 - 0050 - 05
Cobaltic tetrazol coordination compounds available for laser initiation	JIN Shao-hua	(2003)11-01-0055-02

# 《含能材料》2003 年第1 期被 CA 收录论文