

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,鲁斌

(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;O59

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($\Phi 25$ mm)圆筒试验和 $\Phi 50$ mm圆筒试验方法^[1]。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^[2]、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。

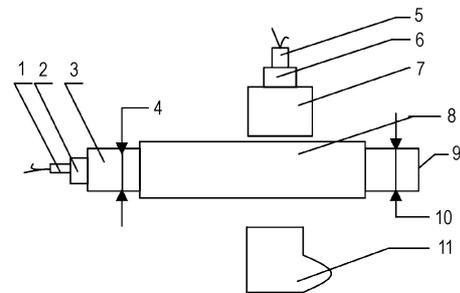


图1 圆筒试验装置示意图

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-tension 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

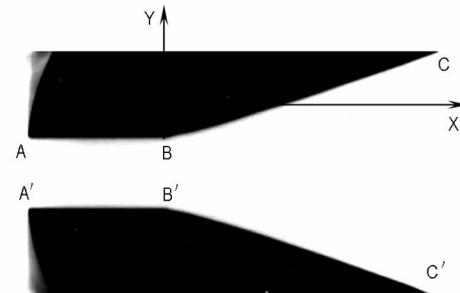


图2 圆筒试验中铜管膨胀曲线

Fig. 2 Expanded curve of cylinder wall in cylinder test

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。

$$t = A + B(R - R_0) + Ce^{D(R-R_0)} \quad (1)$$

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 $A、B、C、D$ 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 。

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

$$E = \frac{1}{2}U^2 \quad (3)$$

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。

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 explosives

explosive	density/g · cm ⁻³	R - R ₀ = 5 mm		R - R ₀ = 19 mm	
		V/mm · μs ⁻¹	E/kJ · g ⁻¹	V/mm · μs ⁻¹	E/kJ · 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。

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

式中, α 为加速度。

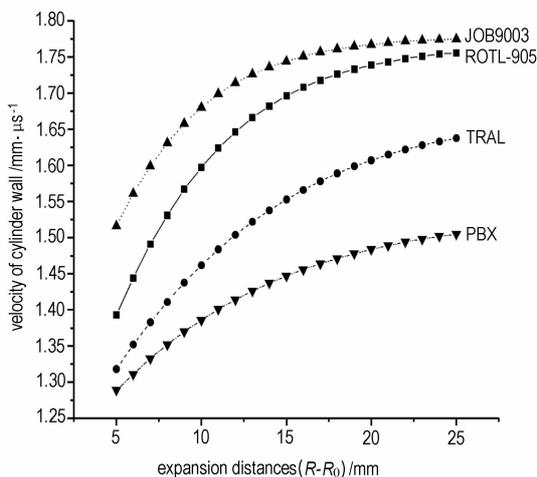


图 3 圆筒膨胀距离与壁速的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between velocity and expanded distance of wall

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。

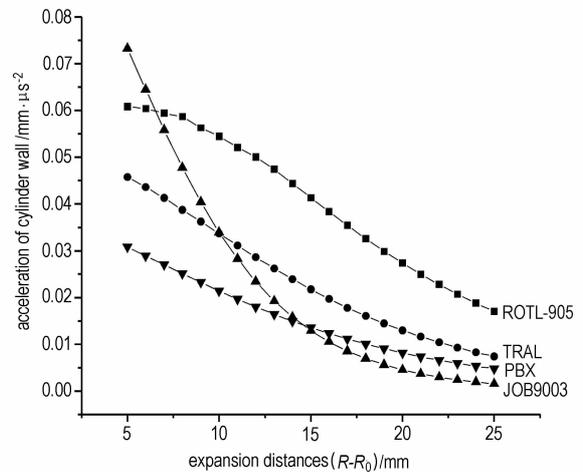


图 4 圆筒膨胀距离与加速度的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between acceleration and expanded distance of wall

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 $R - R_0 =$

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 $0.017 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 和 $0.008 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 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^[3]

$$p_s = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (5)$$

式中, p_s 为爆轰产物压力; V 为爆轰产物的相对比容; A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 和 ω 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

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

式中, E_s 为爆轰产物的等熵内能。

等熵内能可以通过下式获得

$$E_s = E - E_g = Q - E_g \quad (7)$$

对于圆筒试验

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

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

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

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 ω 为已知,利用公式(7)、(8)和(9)可求出 B 和 R_2 。当 C 、 ω 、 B 、 R_2 确定后,通过联立求解以下 4 个方程,可得到 A 和 R_1 。

$$p_{CJ} = Ae^{-R_1V_{CJ}} + Be^{-R_2V_{CJ}} + \frac{C}{V_{CJ}^{\omega+1}} \quad (10)$$

$$\rho_0 D^2 = AR_1 e^{-V_{CJ} \times R_1} + BR_2 e^{-V_{CJ} \times R_2} + \frac{C(\omega + 1)}{V_{CJ}^{\omega+2}} \quad (11)$$

$$V_{CJ} = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \quad (12)$$

$$p_{CJ} = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1} \quad (13)$$

式中, D 为圆筒试验实测爆速; γ 值取 2.9; ρ_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 ⁻¹	A /GPa	B /GPa	C /GPa	R ₁	R ₂	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,

