

文章编号: 1006-9941(2015)06-0516-06

一种 CL-20 基压装混合炸药 JWL 状态方程参数研究

南宇翔¹, 蒋建伟¹, 王树有¹, 陈东萍², 孙占峰³, 刘欣³

(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. 山西江阳化工有限公司, 山西 太原 030041; 3. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 对六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 基压装混合炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数进行了研究。采用直径 25 mm 标准圆筒试验研究了 CL-20 基压装炸药 (C-1, CL-20/钝感粘结剂 (质量比)=94.5/5.5) 的驱动做功能力, 获得了圆筒壁膨胀速度、位移与时间的关系; 应用考虑与爆轰参数封闭的炸药 JWL 状态方程参数数据处理方法得到该炸药的 JWL 状态方程参数, 应用参数进行圆筒模型数值模拟, 与试验结果对比, 发现速度误差低于 2%, 位移误差低于 1%; 对比了本研究参数与国外类似炸药参数在做功能力上的差异, 结果表明, LX-19 和 PBXC-19 的格尼速度比 C-1 炸药分别高 2.02% 和 2.20%。

关键词: 六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 基炸药; JWL 状态方程; 圆筒试验; 数值模拟

中图分类号: Tj45; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.002

1 引言

六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 是目前世界上已应用含有最高能量密度的单质炸药, 以 CL-20 为主体的混合炸药具有高爆速、高爆压等特性, 具有良好的应用前景^[1]。CL-20 单质炸药自 1987 年合成以来^[2], 国外相继研制出多种浇注固化型和压装型混合炸药 (如 LX-19、PAX-11、PAX-12、PAX-29、PBXC-19、PBXW-16 等), 部分已经应用于多种战斗部^[3-4], 同时还获得了包括 LX-19^[5]、PBXC-19^[6] 等炸药的 JWL 状态方程参数, 用于炸药爆轰及驱动能力的数值模拟研究。国内自 20 世纪 90 年代合成出 CL-20 单质炸药以来^[7], 也先后研制了多个具有高能、高安全性的 CL-20 基混合炸药^[8-9], 但尚缺少可供数值模拟计算的炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数, 只能借助国外公布的相近炸药的 JWL 状态方程参数, 这可能导致结果部分失真。随着近年来我国对 CL-20 基炸药应用的深入研究, 借助数值模拟研究其爆轰驱动能力的需求越来越迫切, 因此开展我国自主的 CL-20 基炸药爆轰产

物 JWL 状态方程参数的研究十分必要。

炸药爆轰产物 JWL 状态方程作为描述其爆轰产物做功能力的常见形式, 由 LLNL 的 Kury^[10] 等人首先提出与应用的圆筒试验是确定炸药 JWL 状态方程参数的标准化试验。对于 JWL 状态方程参数的确定方法, 国外除借助圆筒试验结果外, 还需其他试验及 CHEETCH、CHEQ 等专用处理软件^[11], 但是软件方法未见公开。国内现公布的炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数主要是在圆筒试验基础上通过“试错法”靠经验获得, 拟合过程复杂, 不考虑与炸药爆轰参数的封闭^[12-13]。

基于以上原因, 本研究针对国内研制的一种高密度 CL-20 基压装混合炸药 (代号为 C-1, 组分质量比 CL-20/钝感粘结剂=94.5/5.5), 采用高速扫描照相和激光速度干涉仪 (VISAR) 联合测试的改进标准圆筒试验技术^[14], 开展了直径 25 mm 的标准圆筒试验, 获得了圆筒壁膨胀的速度、位移与时间关系; 采用考虑与爆轰参数封闭的炸药 JWL 状态方程参数数据处理方法得到了该炸药的 JWL 状态方程参数; 同时对国外同类炸药的圆筒驱动过程进行了数值模拟, 对比了驱动金属的做功能力。本研究首次获得了我国 CL-20 基压装混合炸药 JWL 状态方程参数, 可为用数值模拟方法开展 C-1 炸药在爆轰或爆炸驱动应用研究提供参数依据。

2 圆筒试验与测试结果

2.1 圆筒试验

参照国军标 (GJB772A-1997) 进行直径 25 mm 的标

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11032002); 国家重点基础研究发展计划 (2010CB832706)

作者简介: 南宇翔 (1988-), 男, 博士生, 主要从事战斗部设计研究。

e-mail: nyxbaboon@126.com

通信联系人: 蒋建伟 (1962-), 男, 教授, 主要从事战斗部设计及仿真技术研究。e-mail: bitjw@bit.edu.cn

准圆筒试验。其中压装 C-1 炸药密度 $\rho_0 = 1.932 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 药柱总尺寸 $\Phi 25 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (实测药柱直径 $24.96 \sim 24.97 \text{ mm}$); 无氧铜圆筒实测平均内外径分别为 25.02 mm 和 30.03 mm 。图 1 为药柱、圆筒试验装置及试验现场布置图。采用 SJZ-15 型狭缝高速摄影记录距圆筒起爆端 200 mm 处圆筒壁位移-时间关系, 采用 JSG-1 型 VISAR 同时测取距起爆端 200 mm 处 (VISAR 光路与狭缝扫描光路以及圆筒轴线垂直) 圆筒壁速度-时间关系, 在药柱首尾放置电探针监测炸药爆速。试验在中国工程物理研究院流体物理研究所进行。

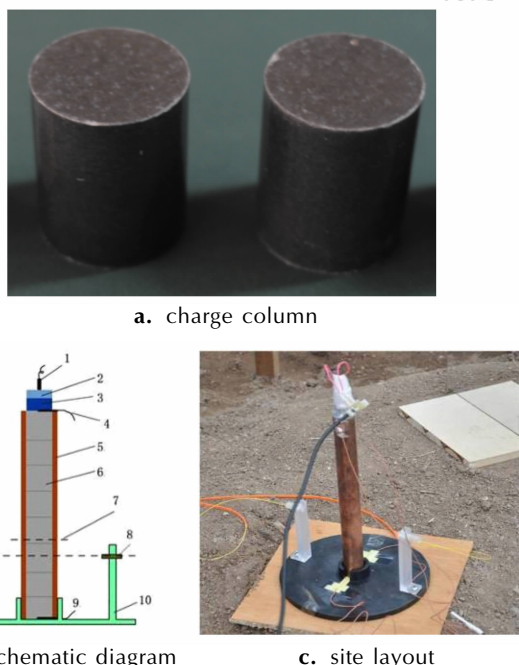


图 1 圆筒试验装置及现场布置

1—雷管, 2—传爆药柱, 3—过渡药柱, 4, 9—探针, 5—无氧铜, 6—主装药, 7—光学扫描位置, 8—VISAR 探头, 10—底座

Fig. 1 Diagrams of cylinder test

1—detonator, 2—booster, 3—transition grain, 4, 9—electric pin, 5—oxygen free copper, 6—main charge, 7—scanning position of camera, 8—VISAR pin, 10—pedestal

2.2 测试结果及数据处理

对 C-1 炸药进行圆筒试验。实测炸药的爆速 $D = 9061 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\rho_0 = 1.932 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。图 2 为狭缝摄影相机记录的圆筒试验扫描底片及处理后的扫描迹线。

采用文献[10]的数据处理方法: 根据实验图像获取圆筒外壁驱动速度-时间 ($v-t$)、位移-时间 ($R-R_0$)- t 曲线; 按式(1) [10] 进行非线性最小平方拟合, 计算出圆筒质量中心面处的径向位移-时间 r_m-r_{m0} 表达式, 表 1

为参数拟合结果。

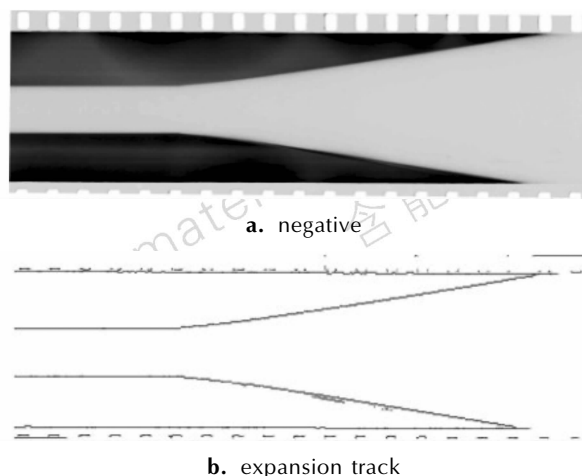


图 2 圆筒膨胀过程扫描结果

Fig. 2 Scanning results of cylinder expansion

$$r_m - r_{m0} = \sum_{j=1, n} a_j \{ b_j t_i - [1 - \exp(-b_j t_i)] \} \quad (1)$$

式中, a_j, b_j 为待定系数, 单位分别为 $\text{mm}, \mu\text{s}^{-1}$; $t_i = t + t_0, \mu\text{s}$; $n = 2$; $r_m - r_{m0}$ 为 t_i 时刻圆筒质量中心面位移, mm 。

表 1 圆筒膨胀曲线拟合参数

Table 1 Curve-fitting parameters of the cylinder expansion

a_1 / mm	a_2 / mm	$b_1 / \mu\text{s}^{-1}$	$b_2 / \mu\text{s}^{-1}$	$t_0 / \mu\text{s}$
3.517	0.035	0.387	15.772	0.452

3 JWL 状态方程参数的确定

3.1 输入参数的确定

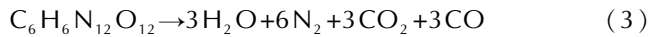
式(2) [15] 为常见压力形式的 JWL 状态方程。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E}{\bar{V}} \quad (2)$$

式中, p , 爆轰产物压力, GPa ; \bar{V} , 相对比容; A, B , 线性系数, GPa ; R_1, R_2, ω , 非线性系数; E_0 , 隐含在方程中的炸药初始体积能量密度, $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。

JWL 状态方程参数确定需炸药 ρ_0, D 、爆热 Q 、等熵指数 γ 等作初始输入值, 其中 Q, γ 采用计算值代替。

采用盖斯定理 [16] 结合炸药组分计算 Q , C-1 炸药各组分质量比为 CL-20/钝感粘结剂 = 94.5/5.5。式(3)为 CL-20 化学反应方程式, 其计算爆热 $Q_{\text{CL-20}} = 6166 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 再依据 C-1 炸药组分得 $Q_c = 5952 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。



利用表 1 圆筒质量中心面位移-时间表式拟合参数, 依据质量、动量守恒等可计算出爆轰产物的压力-相对比容 ($p-\bar{V}$) 关系^[12], 根据 $p-\bar{V}$ 应用最小二乘法可拟合出式(4)^[16]中等熵指数 γ 和常量系数 a , 将拟合出的 γ 值作为 CJ 状态时的 γ 值, 可得到式(5)^[16]的 p_{CJ} 。

$$p = a \bar{V}^{-\gamma} (\gamma \text{ 律方程}) \quad (4)$$

式中, p 为压力, GPa; a 为待定系数, GPa。

$$p_{\text{CJ}} = \frac{1}{\gamma+1} \rho_0 D^2 \quad (5)$$

图 3 为根据圆筒试验结果计算出 $p-\bar{V}$ 曲线与拟合的 γ 律方程曲线, 最终拟合结果: $a=10.8 \text{ GPa}$, $\gamma=3.066$, 爆压 $p_{\text{CJ}}=39 \text{ GPa}$ 。

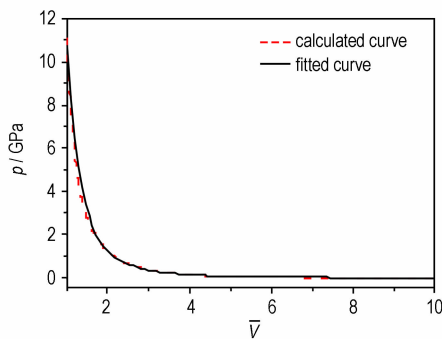


图 3 实验值计算所得 $p-\bar{V}$ 与根据 γ 律拟合曲线

Fig. 3 $p-\bar{V}$ curve calculated from experimental data and fitted curve obtained by γ law

3.2 JWL 状态方程参数的确定

式(6)^[11]为 JWL 状态方程中的 E_0 计算方法, 可得 C-1 炸药的 $E_0=11.5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。

$$E_0 = \rho_0 Q_c \quad (6)$$

设定初始计算值 $\omega=0.3$, $R_1=4.5$, $R_2=1.5$ 。在已知 ρ_0 、 D 、 γ 、 R_1 、 R_2 、 ω 、 E_0 条件下, 由爆轰产物 CJ 状态守恒方程组式(7)^[11]计算出 A 、 B 、 C 值, JWL 状态方程的六个参数与炸药爆轰参数间可实现严格封闭。

$$\begin{aligned} \rho_0 D^2 &= AR_1 e^{-R_1 \bar{V}_{\text{CJ}}} + BR_2 e^{-R_2 \bar{V}_{\text{CJ}}} + C(1+\omega) \bar{V}_{\text{CJ}}^{-(2+\omega)} \\ p_{\text{CJ}} &= Ae^{-R_1 \bar{V}_{\text{CJ}}} + Be^{-R_2 \bar{V}_{\text{CJ}}} + C \bar{V}_{\text{CJ}}^{-(1+\omega)} \\ E_0 + \frac{1}{2} p_{\text{CJ}} (1 - \bar{V}_{\text{CJ}}) &= \frac{A}{R_1} e^{-R_1 \bar{V}_{\text{CJ}}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 \bar{V}_{\text{CJ}}} + \frac{C}{\omega} \bar{V}_{\text{CJ}}^{-\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\bar{V}_{\text{CJ}} = \frac{V_{\text{CJ}}}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{CJ}}} = \frac{\gamma}{1+\gamma}$, $E_0 = \rho_0 Q_c$, $p_{\text{CJ}} = \frac{1}{\gamma+1} \rho_0 D^2$, 均

采用国际单位制计算。

应用 LS-DYNA^[17] 软件根据圆筒试验实际测量尺寸建立二维圆筒模型(图 4)。待测炸药及圆筒均采用 Lagrange 计算方法^[17], 待测炸药采用上述计算获得的 JWL 状态方程初始参数, 圆筒采用弹塑性模型, 参数见文献[12]。对爆炸驱动过程进行数值模拟, 获得与试验相同观测位置处(观测点 1)圆筒壁的 $v-t$ 和 $(R-R_0)-t$ 曲线。



图 4 圆筒模型及测量点位置

Fig. 4 The cylinder model and location of observation point

对比数值模拟与试验结果, 若速度或位移误差较大, 调整 R_1 、 R_2 , 据式(7)即可重新获得一组 A 、 B 、 C 值, 重复数值模拟, 直到数值模拟与试验结果较吻合为止。调整的方法是增大 R_1 或减小 R_2 均可增大炸爆轰产物的做功能力, R_1 主要影响膨胀高压段 ($\bar{V} \sim 2\bar{V}$)、 R_2 主要影响中压段 ($2\bar{V} \sim 5\bar{V}$); ω 值主要影响膨胀低压段, ω 越大, $v-t$ 曲线末期会越陡峭。经对 ω 、 R_1 、 R_2 参数调整, 表 2 为最终获得的 C-1 炸药 JWL 状态方程参数。

表 2 C-1 炸药 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters of JWL equation of state for C-1 explosive

ρ_0 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$
1.932	1827.6	61.35	5.88	1.8	0.3	11.5

应用表 2 参数, 采用 MATLAB^[18] 软件求解方程组(7)即可反推得到计算爆速 $D_{\text{cal}}=9061 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 计算爆压 $p_{\text{cal}}=39 \text{ GPa}$, 计算爆热 $Q_{\text{cal}}=5952 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\gamma_{\text{cal}}=3.066$ 。 D_{cal} 与实测爆速 D 一致, 验证了 C-1 炸药的 JWL 状态方程参数与爆轰参数具有封闭性。

图 5 为数值模拟与试验的圆筒壁 $v-t$ 、 $(R-R_0)-t$ 曲线对比, 表 3 为关键点数值模拟结果与试验误差分析。圆筒壁比动能 E_{cu} 计算公式如式(8)^[11]。

$$E_{\text{cu}} = \frac{1}{2} v_r^2 \quad (8)$$

式中, v_r , 圆筒壁速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; E_{cu} , 圆筒壁比动能, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

分析表 3 数据, 数值模拟观测点处圆筒壁位移

($R-R_0$) = 6, 12.5, 19, 25 mm 时的 E_{cu} 与试验结果相对误差均小于 2%, $v-t$ 曲线首跳峰值 (Jump-off velocity, 圆筒膨胀不稳定期) 与试验误差小于 15%, 图 5b

($R-R_0$)- t 数值模拟曲线和实验曲线基本重合, 最大误差不超过 1%, 表明表 3 的 C-1 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数合理可靠。

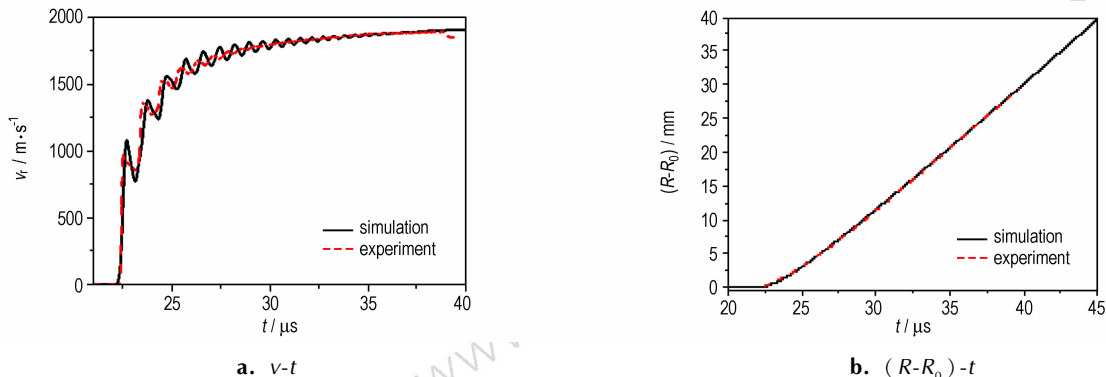


图 5 圆筒试验与数值模拟曲线对比

Fig. 5 Comparison between simulation and experiment for cylinder test

表 3 圆筒数值模拟与试验误差分析

Table 3 Error analysis of cylinder simulation and experiment

$(R-R_0)$ / mm	\bar{V}	$v_r / m \cdot s^{-1}$		relative error / %	$E_{cu} / MJ \cdot kg^{-1}$		relative error / %
		experiment	simulation		experiment	simulation	
Jump-off		1074	968	10.95	0.577	0.469	23.03
6	2.2	1733	1762	-1.65	1.502	1.552	-3.22
12.5	4.1	1808	1807	0.06	1.634	1.633	0.06
19	6.5	1851	1858	-0.38	1.713	1.726	-0.75
25	9.0	1890	1886	0.21	1.786	1.778	0.45

Note: v_r , velocity of cylinder wall; E_{cu} , specific kinetic energy of cylinder wall.

4 同类炸药驱动能力的仿真对比

选取与 C-1 炸药爆炸性能相近的国外 LX-19 (密度选取 $1.920 g \cdot cm^{-3}$)、PBXC-19 炸药, 其 JWL 状态方程参数见表 4, 分别进行直径 25 mm 标准圆筒驱动过程的数值模拟, 对比同类 CL-20 基炸药的 JWL 状态方程参数影响驱动能力的差异。

图 6 为 C-1、LX-19 和 PBXC-19 三种炸药驱动圆筒壁的 $v-t$ 历程曲线。表 5 为三种炸药爆轰参数及驱动性能的对比。

对比表 5 数据可知, 三种炸药均具有较高的爆轰性能及做功能力, 其中 PBXC-19 炸药在较低爆速、低

爆压条件下做功能力最强, 格尼速度比 C-1 高 2.20%, 这与使用的粘结剂及其他组分有关系。LX-19 中

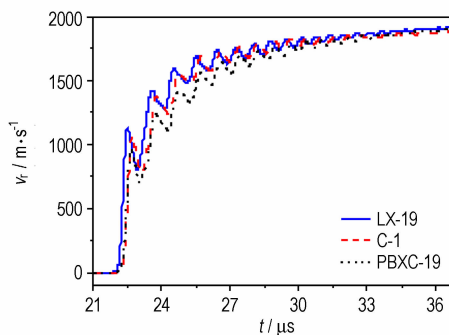


图 6 不同炸药圆筒模拟速度-时间曲线

Fig. 6 Velocity-time curves of cylinder test with different explosives

表 4 国外公布的 CL-20 基炸药 JWL 状态方程参数^[5-6]

Table 4 Parameters of JWL equation of state for foreign reported CL-20-based explosive^[5-6]

explosive	$\rho_0 / g \cdot cm^{-3}$	$D / m \cdot s^{-1}$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	$E_0 / J \cdot mm^{-3}$
PBXC-19	1.896	9083	2644.40	26.793	6.13	1.5	0.50	11.50
LX-19	1.920	9104	1596.65	177.410	6.50	2.7	0.55	11.33

表5 不同 CL-20 基炸药驱动能力数值模拟对比

Table 5 Performance comparison of different CL-20-based explosive

explosive	CL-20 content/%	$\rho_0 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$p_{\text{Cl}} / \text{GPa}$	$v_f / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\sqrt{2E_g}$	
						result/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	increment/%
C-1	94.5	1.931	9061	39.0	1886	3006	0
PBXC-19	95.0	1.896	9083	34.5	1913	3072	+2.20
LX-19	95.8	1.920	9104	41.5	1921	3069	+2.02

Note: $\sqrt{2E_g}$, gurney velocity.

CL-20 含量最高, 因此爆速、爆压及做功能力均较强, 格尼速度较 C-1 提高 2.02%。C-1 炸药爆炸驱动做功能力略小于 LX-19 和 PBXC-19, 其原因除 CL-20 含量较低外, 与选择的压药密度也有关系。由此可见, 国内外 CL-20 基炸药驱动做功能力有一定的差异, 本研究获得的 C-1 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数可以较准确地描述其做功能力。

5 结论

(1) 采用直径 25 mm 标准圆筒试验方法对压装 CL-20 基 C-1 炸药进行了圆筒试验, 获得了圆筒壁速度、位移与时间的关系。

(2) 采用考虑与爆轰参数封闭的炸药 JWL 状态方程参数数据处理方法确定了 C-1 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数, 应用获得的 JWL 状态方程参数进行圆筒试验数值模拟, 与试验对比, 速度结果相对误差低于 2%, 位移相对误差低于 1%。

(3) 对比了国内外相类似的 CL-20 基炸药驱动做功能力, LX-19 和 PBXC-19 的格尼速度比 C-1 炸药分别高 2.02% 和 2.20%, 确认了本研究获得的 JWL 状态方程参数适用于 C-1 炸药。

参考文献:

- [1] 王昕, 彭翠枝. 国外六硝基六氮杂异伍兹烷的发展现状[J]. 火炸药学报, 2007, 30(5): 45-48.
WANG Xin, PENG Cui-zhi. Development of hexanitrohexaazaisowurtaitane at abroad[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2007, 30(5): 45-48.
- [2] Nielsen A T. Polyazapolycyclics by condensation of aldehydes with aminds 2[J]. *Journal of Organic Chemistry*, 1990, 55: 1459-1466.
- [3] Donald A, Geiss J. Additional characterization of high performance CL-20 formulation insensitive munitions and energetic materials technology symposium[C]//San Diego: NDIA, 1999: 129-140.
- [4] Samudre S S, Nair U R, Gore G M. Studies on an improved plastic bonded explosive (PBX) for shaped charges[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2009, 34: 145-150
- [5] Murphy M J, Baum D W, Simpson R L. Demonstration of enhanced warhead performance with more powerful explosives[C]//17th International symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998: 23-27.
- [6] Simpson R L, Urtiew P A, Moddy D L, et al. CL-20 performance exceeds that of HMX and its sensitivity is moderate[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1997, 22: 249-255.
- [7] 欧育湘, 陈博仁, 贾会平, 等. 六硝基六氮杂异伍兹烷的结构鉴定[J]. 含能材料, 1995, 3(3): 1-8.
OU Yu-xiang, CHEN Bo-ren, JIA Hui-ping, et al. Structural identification of hexanitrohexaazaisowurtaitane[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1995, 3(3): 1-8.
- [8] 金韶华, 于昭兴, 欧育湘, 等. 六硝基六氮杂异伍兹烷包覆钝感的探索[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 147-150.
JIN Shao-hua, YU Shao-xing, OU Yu-xiang, et al. Investigation of coating-desensitization of hexanitrohexaazaisowurtaitane[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 147-150.
- [9] 陈鲁英, 赵省向, 杨培进, 等. CL-20 炸药的包覆钝感研究[J]. 含能材料, 2006, 14(3): 171-173.
CHEN Lu-ying, ZHAO Sheng-xiang, YANG Pei-jin, et al. The coating and desensitization of CL-20[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(3): 171-173.
- [10] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by chemical explosives[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Detonation. White Oak, Maryland, 1966: 3-13.
- [11] Souers P C, Wu Ben and Haselman LC. Detonation equation of state at LLNL[R]. CA, UCRL-ID119262, 1996.
- [12] 孙占峰, 徐辉, 李庆忠, 等. 钝感高能炸药爆轰产物 JWL 状态方程再研究[J]. 高压物理学报, 2010, 2(1): 55-60.
SUN Zhan-feng, XU Hui, LI Qing-zhong. Further Study on JWL Equation of State of Detonation Product for Insensitive High Explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(1): 55-60.
- [13] 陈清畴, 蒋小华, 李敏, 等. RDX 基高聚物粘结炸药 JWL 状态方程[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 213-216.
CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min, et al. JWL equation of state for RDX-based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 213-216.
- [14] 孙占峰, 李庆忠, 孙学林, 等. 标准圆筒试验技术与数据处理方法研究[J]. 高压物理学报, 2008, 22(2): 160-166.
SUN Zhan-feng, LI Qing-zhong, SUN Xue-lin, et al. Study on standar dcyliinder test technology and data pr ocessing method [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22(2): 160-166.
- [15] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. CA, UCRL-50422, 1968.
- [16] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬. 北京: 科学出版社, 2011: 118-151.

Opjehko L P. Explosion physics[M]. SUN Cheng-wei, Beijing: Science Press, 2011:118-151.
[17] Hallquist J O. LS-DYNA theoretical manual[M]. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 1988.

[18] Optimization toolbox user's guide[M]. Mathworks Inc, Natick, 2009.

JWL Equation of State of Detonation Product for CL-20 Based Pressed Composite Explosive

NAN Yu-xiang¹, JIANG Jian-wei¹, WANG Shu-you¹, CHEN Dong-ping², SUN Zhan-feng³, LIU Xin³

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shanxi Jiangyang Chemical Industry Corporation, Taiyuan 030041, China; 3. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

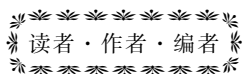
Abstract: The JWL equation of state of detonation product for pressed composite explosive based on CL-20 was studied. The driving ability for C-1 explosive (mass ratio: CL-20/insensitive binder=94.5/5.5) was evaluated by 25mm standard cylinder test, and the relationships between expansion velocity/displacement of the cylinder wall and time were analyzed. Under the consideration of the equation close, the JWL equation parameters were obtained by the data processing method. And using these parameters, the cylinder tests for reference explosives LX-19, PBXC-19 were simulated, and the driving ability of the C-1 and LX-19, PBXC-19 were also analyzed. Results show that the relative error of velocity and displacement between the simulation and experiment are less than 2% and 1%, respectively. Compared with LX-19 and PBXC-19, gurney velocity of C-1 increases 2.02%, 2.20%, respectively.

Key words: CL-20 based explosive; JWL equation of state; cylinder test; simulation.

CLC number: TJ45; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.002



《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》固体推进剂专栏征稿

高能量、低特征信号、低易损、低成本、低污染、灵活能量管理和高可靠性成为当前固体推进剂面临的紧迫课题,为促进其研究,本刊将于2015年开设推进剂研究专栏,以专题报道固体推进剂研究的最新研究进展。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部