

文章编号: 1001-1455(2010)06-0583-05

JB-9014 炸药超压爆轰产物的状态方程*

陈 军¹, 曾代朋¹, 孙承纬¹, 张震宇², 谭多望¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 国防科学技术大学理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 根据 P. K. Tang 等提出的对炸药爆轰产物超压状态方程建模时只对 JWL 状态方程 CJ 等熵线中高压指数项做修正的研究思路, 首先给定超压状态下内能等熵线的修正项, 再根据热力学定律对内能等熵线求微分而得到沿压力等熵线的修正项。对 JB-9014 炸药超压爆轰冲击 Hugoniot 实验数据和声速实验数据同时进行拟合, 得到了 3 个 JWL 状态方程在超压爆轰状态下的修正项, 并进行了分析与比较。得到超压修正项的方法简单, 3 组超压修正项与 P. K. Tang 的修正项一样, 都能很好地拟合超压 Hugoniot 数据。在实验数据范围外, 对超压状态下的声速-压力实验数据的拟合精度有所差别。

关键词: 爆炸力学; 状态方程; 超压爆轰; 炸药

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引言

在高速飞片撞击炸药、球形会聚爆轰等情况下, 炸药中会产生高于 CJ 爆轰的超压爆轰状态。由于标准的 JWL 方程不能很好地描述超压爆轰状态下的产物行为, 很多学者都在寻找能够描述爆轰产物在超压状态下特征的状态方程^[1-3]。P. K. Tang^[3]建立了 PBX-9501 和 PBX-9502 炸药超压爆轰产物状态方程模型。他们假设爆轰产物的标准 JWL 状态方程在低压部分是可以接受的, 而对超压爆轰区中的状态进行描述时有所欠缺。为此他们建议增加 Hugoniot 曲线在 CJ 点以上的斜率, 以更好地匹配超压爆轰 Hugoniot 实验数据, 同时也希望增加超压爆轰产物的声速。建模的思路类似于可压缩理想气体在高压区的概念, 只对 JWL 状态方程中的高压指数项做修正, 首先给定超压状态下的压力等熵线的修正项, 而沿内能等熵线的修正项则根据热力学定律对压力等熵线进行积分求得。这样做虽然使沿压力等熵线和沿内能等熵线的修正项具有相同的修正系数, 但是不能取较复杂的沿压力等熵线的修正项, 因为很难根据热力学定律对压力等熵线积分求得沿内能等熵线的修正项。

本文中, 根据 P. K. Tang 对炸药超压爆轰产物状态方程研究的建模思路, 首先给定 3 个超压状态下内能等熵线高压项的修正项, 而沿压力等熵线的修正项可以根据热力学定律对内能等熵线微分求得。通过对 JB-9014 炸药超压爆轰冲击 Hugoniot 实验数据和声速实验数据同时进行拟合, 得到 3 个可以描述 JB-9014 炸药超压爆轰状态的 JWL 状态方程, 并对这 3 个 JWL 状态方程在超压爆轰状态下的修正项进行比较。

2 超压状态下对标准 JWL 爆轰产物状态方程的修正方法

根据 Grüneisen 状态方程, 及其在 Hugoniot 曲线上的应用, 有

$$p = p_s + \frac{\Gamma}{V}(e - e_s) \quad (1)$$

$$p_H = p_s + \frac{\Gamma}{V}(e_H - e_s) \quad (2)$$

* 收稿日期: 2009-11-19; 修回日期: 2010-03-29

基金项目: 国防科工局基础科研项目(B1520110002)

作者简介: 陈 军(1973—), 男, 博士, 副研究员。

$$e_H - e_0 = \frac{1}{2} p_H (1 - V) \quad (3)$$

$$e_{CJ} - e_0 = \frac{1}{2} p_{CJ} (1 - V_{CJ}) \quad (4)$$

将式(3)代入式(2),解得炸药爆轰产物的 Hugoniot 曲线

$$p_H = \frac{p_S + \frac{\Gamma}{V}(e_0 - e_S)}{1 - \frac{\Gamma}{2V}(1 - V)} \quad (5)$$

式中:带下标 S 的量为等熵线上的变量,带下标 H 的量为 Hugoniot 曲线上的变量,带下标 CJ 的量为 CJ 状态参量;V 是相对比容。标准 JWL 状态方程的 CJ 等熵线方程为

$$p_S = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-(1+\omega)} \quad (6)$$

$$e_S = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega} V^{-\omega} \quad (7)$$

假设标准的 JWL 爆轰产物状态方程可以很好地描述爆轰产物在 CJ 状态以下的等熵膨胀过程,而对超压爆轰区中的状态进行描述时有所欠缺。因此,需要对标准 JWL 状态方程的高压指数项做修正。首先,对标准 JWL 状态方程的 CJ 内能等熵线方程高压指数项做如下修正

$$e_S = [1 + F_e(V)] \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega} V^{-\omega} \quad (8)$$

式中: $F_e(V)$ 为沿内能等熵线的修正项。

根据热力学第 1 定律, $p_S = -\frac{de_S}{dV}$, 得到如下修正后的压力等熵线

$$p_S = [1 + F_p(V)] Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-(1+\omega)} \quad (9)$$

其中沿压力等熵线的修正项 $F_p(V)$ 可由内能等熵线的修正项 $F_e(V)$ 求得

$$F_p(V) = F_e(V) - \frac{1}{R_1} \dot{F}_e(V) \quad (10)$$

沿超压等熵线可得修正后的声速表达式为

$$c_S^2 = -\frac{V^2}{\rho_0} \frac{dp_S}{dV} = \frac{V^2}{\rho_0} \{ [R_1(1 + F_p(V)) - \dot{F}_p(V)] Ae^{-R_1 V} + BR_2 e^{-R_2 V} + C(1 + \omega)V^{-(2+\omega)} \} \quad (11)$$

Hugoniot 声速的表达式为

$$c_H^2 = c_S^2 + \frac{V}{\rho_0} (p_H - p_S) \left(\Gamma + 1 - \frac{V}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{dV} \right) \quad (12)$$

方程(9)、(10)和(12)对 CJ 等熵线方程和声速的修正只在 CJ 状态点以上成立,在 CJ 点和 CJ 点以下仍用标准的 CJ 等熵线方程和声速方程。因此,为保证在 CJ 点上的连续性,沿内能等熵线修正项 $F_e(V)$ 表达式的基本选取原则是,在 CJ 状态点上, $F_e(V)$ 及其 1、2 阶导数为 0。

3 JB-9014 炸药超压爆轰产物状态方程的拟合

为了对比,给出如下 3 种沿内能等熵线修正项 $F_e(V)$ 的解析式

$$\text{模型 1} \quad F_e(V) = A_0 (V_{CJ} - V)^2 + B_0 (V_{CJ} - V)^3 \quad (13)$$

$$\text{模型 2} \quad F_e(V) = A_0 (V_{CJ} - V)^3 + B_0 (V_{CJ} - V)^4 \quad (14)$$

$$\text{模型 3} \quad F_e(V) = A_0 (V_{CJ} - V)^3 + B_0 (V_{CJ} - V)^4 + C_0 (V_{CJ} - V)^5 \quad (15)$$

分别对以上 3 种 $F_e(V)$ 进行求导,由式(10)得出与之相匹配的 $F_p(V)$ 的表达式分别为

$$\text{模型 1} \quad F_p(V) = \frac{2A_0}{R_1} (V_{CJ} - V) + \left(A_0 + \frac{3B_0}{R_1} \right) (V_{CJ} - V)^2 + B_0 (V_{CJ} - V)^3 \quad (16)$$

$$\text{模型 2} \quad F_p(V) = \frac{3A_0}{R_1} (V_{CJ} - V)^2 + \left(A_0 + \frac{4B_0}{R_1} \right) (V_{CJ} - V)^3 + B_0 (V_{CJ} - V)^4 \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 \text{模型 3} \quad F_p(V) = & \frac{3A_0}{R_1}(V_{CJ} - V)^2 + \left(A_0 + \frac{4B_0}{R_1}\right)(V_{CJ} - V)^3 + \\
 & \left(B_0 + \frac{5C_0}{R_1}\right)(V_{CJ} - V)^4 + C_0(V_{CJ} - V)^5
 \end{aligned} \tag{18}$$

在标准 JWL 状态方程中的所有修正项, 只当 $V < V_{CJ}$ 时, 即在超压状态下才起作用。

用于拟合其中修正项系数 A_0 、 B_0 和 C_0 的 JB-9014 炸药超压 Hugoniot 实验数据和超压声速实验数据分别取自文献[4-5]。由于文献中所做的超压实验是利用化爆加载, 压力可调范围受到限制, 实验数据不多。考虑到 JB-9014 炸药与 PBX-9502 炸药的主要成分、比例和典型压制密度基本相同, 为提高拟合精度、增加实验数据点, 拟合同时使用了文献[3]中关于 PBX-9502 炸药相应的实验数据(通过读取像素点获得)。图 1 给出了用于拟合超压修正项的 JB-9014 炸药超压爆轰 Hugoniot 曲线和超压 Hugoniot 声速-Hugoniot 压力关系曲线的实验数据点。

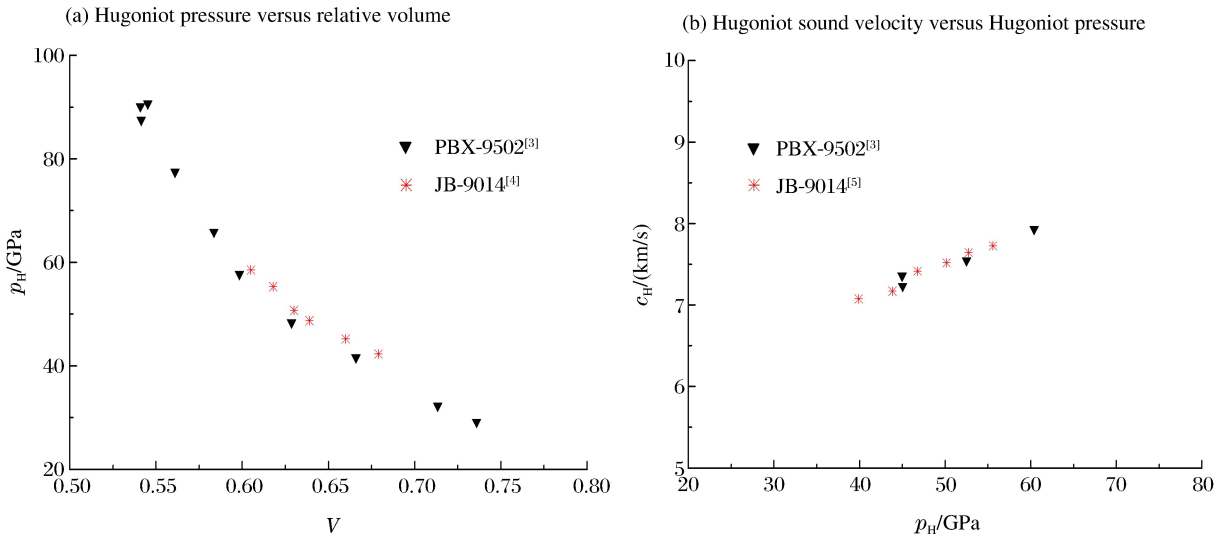


图 1 JB-9014 炸药超压爆轰 Hugoniot 实验数据

Fig. 1 The Hugoniot data for the overdriven-detonation products of JB-9014 explosive

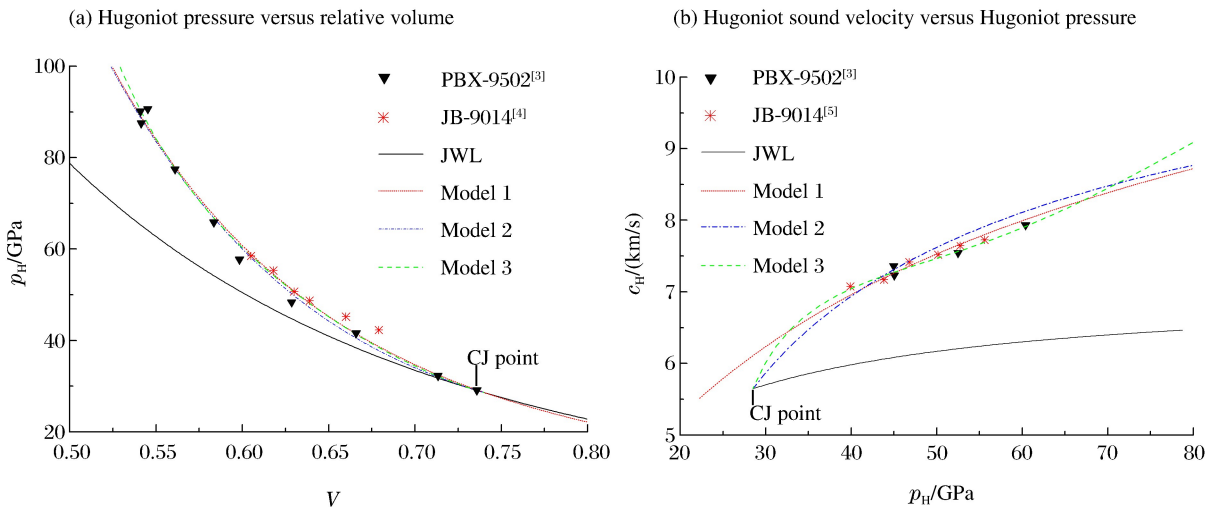


图 2 JB-9014 炸药超压爆轰产物的模型结果比较

Fig. 2 Comparison of the model results for the overdriven-detonation products of JB-9014 explosive

因为 JB-9014 炸药的参数不完全,在以下的计算中,JB-9014 炸药爆轰产物标准 JWL 状态方程参数采用 PBX-9502 炸药的相应参数^[6],其中 $E_0=6.9$ GPa, $w_g=0.5$, $A_g=1\ 361.77$ GPa, $B_g=71.99$ GPa, $r_1=6.2$, $r_2=2.2$, $C_{vg}=1.0$ MPa/K。

对修正的等熵线压力和内能表达式中的修正项系数 A_0 、 B_0 和 C_0 , 利用非线性优化方法,同时拟合 CJ 点之上的超压 Hugoniot 实验数据和超压声速实验数据得到。目标函数取图 1(a)所示实验点与式(5)在相同相对比容处计算结果之差的最小平方和,加上图 1(b)所示实验点与式(12)在相同 Hugoniot 压力处计算结果之差的最小平方和。拟合所得 3 组模型最优化修正项系数的数值分别为

$$\text{模型 1} \quad (A_0, B_0, f) = (1.722\ 39, 3.755\ 62, 6.803\ 25 \times 10^{-3})$$

$$\text{模型 2} \quad (A_0, B_0, f) = (15.606\ 06, -22.609\ 97, 9.259\ 85 \times 10^{-3})$$

$$\text{模型 3} \quad (A_0, B_0, C_0, f) = (34.064\ 52, -194.545\ 50, 419.784\ 90, 6.043\ 74 \times 10^{-3})$$

式中:给出了目标函数 f 的最小值,它代表了 3 组修正模型对实验数据拟合的精度。

3 组模型的拟合超压 Hugoniot 曲线和声速-压力曲线如图 2 所示,图中实线为标准 JWL 爆轰产物状态方程的计算结果。

4 结 论

通过对 JB-9014 炸药标准 JWL 状态方程中的高压指数项做修正,建立了 3 组可以描述 JB-9014 炸药超压爆轰状态和正常爆轰产物等熵膨胀状态的 JWL 状态方程,得出以下结论:

(1)首先给出沿内能等熵线超压修正项 $F_c(V)$ 的表达形式,然后根据热力学第 1 定律得到沿压力等熵线的超压修正项 $F_p(V)$ 的具体表达式。这种方法不仅使沿压力等熵线和沿内能等熵线的超压修正项有相同的修正系数,而且从 $F_c(V)$ 的表达形式推导 $F_p(V)$ 表达式更容易。

(2)对超压爆轰 Hugoniot 曲线与超压爆轰状态下声速-压力曲线同时进行非线性优化拟合,确定修正项系数。此方法不仅精度高,而且方便、快捷。

(3)给出的 3 组超压修正模型与 P. K. Tang 的修正模型一样,都能很好地拟合超压 Hugoniot 数据,而对超压状态下的声速-压力实验数据的拟合,在实验数据范围之外精度有所差别。模型 1 的超压声速-压力拟合曲线不通过 CJ 点,这是因为本文中给出的所有内能等熵线修正项 $F_c(V)$ 都是 $(V_{CJ} - V)$ 的 2 次以上幂函数,修正模型只当相对比容 V 小于 CJ 点相对比容 V_{CJ} 时,即在超压状态下才起作用。按照公式(10),模型 1 对压力等熵线的修正项 $F_p(V)$ 的最低幂次是 1 次,由公式(8)~(9),标准 JWL 压力等熵线和内能等熵线与模型 1 的超压压力等熵线和内能等熵线在 CJ 点上的值相等,但由公式(11)确定的标准 JWL 声速与超压声速在 CJ 点的值不相等。

参考文献:

- [1] van Thiel M, Lee E L, Cochran S. Effects of overdriven shock states on the equation of state of 9404 explosive[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(11):6760-6763.
- [2] 邓全农. 过加载下固体炸药的实验研究和爆轰产物的高压状态方程[D]. 绵阳:中国工程物理研究院研究生部, 1989.
- [3] Tang P K. A study of overdriven behaviors of PBX-9501 and PBX-9502[C]//Proceedings of the 11th International Detonation Symposium. Colorado, USA: Office of the Naval Research, 1998:1058-1064.
- [4] 陈军. 超压爆轰产物状态及相关现象研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院研究生部, 2008.
- [5] 曾代朋, 陈军, 谭多望, 等. JB-9014 超压爆轰雨贡纽实验测量[C]//第 5 届全国计算爆炸力学会议. 青海西宁, 2008.
- [6] Tarver C M, McGuire E M. Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials[C]//Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, California, 2002.

Equations of state for overdriven-detonation products of JB-9014 explosive *

CHEN Jun¹, ZENG Dai-peng¹, SUN Cheng-wei¹,
ZHANG Zhen-yu², TAN Duo-wang¹

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Institute of Technical Physics, College of Science, National University
of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China*)

Abstract: Based on P K Tang's opinion that only the high-pressure term of Jones-Wilkins-Lee equation of state (JWL EOS) needed to be modified when used for overdriven detonation, the modified term of the internal energy isentropic curve was presented and the modified term of the pressure isentropic curve was obtained from the differential form of the internal energy isentropic curve by applying the first law of thermodynamics. And three modified JWL equations of state for overdriven detonation products of JB-9014 explosive were gained by fitting simultaneously the shock Hugoniot pressure and sound velocity data. Results show that, the modified terms gained in this paper can model Hugoniot data for overdriven detonation reasonably as well as P K Tang's, and the precision is a little worse out of the range of experimental data.

Key words: mechanics of explosion; equation of state; overdriven detonation; explosive

* Received 19 November 2009; Revised 29 March 2010

Supported by the Bureau of Science, Technology and Industry for National Defence of China (B1520110002)

Corresponding author: CHEN Jun, chengjun@caep.ac.cn

(责任编辑 张凌云)