

文章编号:1006-9941(2022)01-0043-07

BP-GA算法确定未反应炸药的JWL状态方程参数

崔浩¹,郭锐¹,宋浦²,顾晓辉¹,周昊³,杨永亮¹,江琳¹,俞晞¹

(1. 南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094; 2. 西安近代化学研究所 燃烧与爆炸技术重点实验室,陕西 西安 710065; 3. 南京理工大学 国家特种超细粉体工程技术研究中心,江苏 南京 210094)

摘要: 为了确定未反应炸药的JWL状态方程参数,提出了一种利用BP神经网络-遗传算法(BP-GA算法)和冲击Hugoniot关系确定JWL参数的方法。此方法首先训练BP神经网络,使其可以拟合由不同的JWL参数组合组成的非线性系统,随后采用遗传算法搜寻适应度值最大的一组JWL参数。结果表明:已知某种炸药的初始密度、爆速、Hugoniot系数 C_0 和 S ,便可利用BP-GA算法确定其JWL参数;BP-GA算法确定的8种未反应炸药的 p - v 曲线和由试验数据确定的 p - v 曲线相吻合,且8条 p - v 曲线的 R^2 均不低于0.9995,证明了BP-GA算法的高精度。

关键词: BP-GA算法;未反应炸药;JWL状态方程;冲击Hugoniot

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2021133

1 引言

炸药稳定爆轰时,前导冲击波压缩炸药从初始状态沿着C-J爆轰Rayleigh线线跃到未反应Hugoniot线的冯诺依曼峰值(Von Neuman Spike, VNS),随后化学反应使炸药的状态沿C-J爆轰Rayleigh线回到爆轰Hugoniot曲线上的C-J状态,C-J爆轰Rayleigh线和爆轰Hugoniot曲线相切是爆轰波稳定传播的条件^[1]。当冲击波强度较低时,从初始点出发的Rayleigh线的斜率低于C-J爆轰Rayleigh线的斜率,导致炸药无法稳定爆轰,内部存在未反应的部分。未反应炸药的状态方程即描述前导冲击波阵面过后未反应炸药的的压力、比容和内能等物理量之间关系的函数,在数值仿真软件中未反应炸药的状态方程通常采用Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程^[2-3]形式。未反应炸药JWL状态方程参数的确定是进行反应度流场计算、点火增长模型拟合和炸药装药冲击起爆仿真等工作的基础。

收稿日期:2021-05-26;修回日期:2021-09-23

网络出版日期:2021-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助(11972197,21875109)

作者简介:崔浩(1993-),男,博士研究生,主要从事爆炸力学与弹药安全性的研究。e-mail:cuihao_93@126.com

通信联系人:宋浦(1973-),男,博士,研究员,主要从事爆炸力学及毁伤技术研究。e-mail:songpu73@163.com

引用本文:崔浩,郭锐,宋浦,等. BP-GA算法确定未反应炸药的JWL状态方程参数[J]. 含能材料,2022,30(1):43-49.

CUI Hao, GUO Rui, SONG Pu, et al. Determination of Parameters of JWL Equation of State for Unreacted Explosives Based on BP-GA Algorithm[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(1):43-49.

基于JWL或Grüneisen状态方程以及波阵面上的守恒关系可推导得到未反应炸药JWL形式的Hugoniot曲线表达式,据此可拟合出JWL状态方程中的未知参数,因此炸药冲击Hugoniot曲线的测量是确定未反应炸药状态方程的前提^[4-5]。关于炸药冲击Hugoniot关系的测量国内外学者进行了大量的研究,主要通过平面准一维冲击试验测量炸药内部的冲击波速度和粒子速度关系而获得,包括采用激光干涉测速仪或电磁速度计直接测量粒子速度^[6-9]和采用锰铜压力计测量炸药内部压力并结合压力对比法间接计算得到粒子速度^[10-11]等方式。通过试验数据获得粒子速度后再根据动量守恒关系或冲击波速度拟合法推导得到冲击波速度,基于多组粒子速度-冲击波速度试验数据即可拟合出未反应炸药的Hugoniot关系。此外,众多学者也开展了基于Grüneisen状态方程和Hugoniot关系标定未反应炸药JWL状态方程的研究。其中,王延飞等^[12]根据试验获得的冲击Hugoniot关系对三项式状态方程进行了标定,确定了JOB-9003炸药的JWL状态方程参数;黄奎邦等^[13]基于Grüneisen状态方程推导得到了JWL形式的Hugoniot曲线表达式,并提出了用最小二乘法拟合JWL参数的方法。上述研究给出了未反应炸药JWL参数的推导过程和参数拟合流程,但目前尚未出现利用智能算法计算未反应炸药JWL参数的研

究。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是目前最常用的寻优算法之一,单一的GA算法通常用于求解非线性系统的最优解,但有些非线性系统无法建立精确的数学模型,而BP神经网络-遗传算法(BP-GA算法)不仅可以寻求到这些非线性系统的最优解^[14],还可直接预测染色体的适应度值,提高求解效率^[15]。

为此,本研究提出了一种利用BP-GA算法计算未反应炸药JWL状态方程参数的方法。此方法基于JWL状态方程和波阵面上的守恒方程推导得到的JWL形式的Hugoniot曲线表达式,利用3个约束方程并选取未反应炸药冲击Hugoniot曲线上的5个特定点对试验数据确定的Hugoniot曲线进行拟合,最终可确定未反应炸药的JWL参数。文中采用这种方法确定了8种炸药的JWL参数,结果表明通过该方法获得的曲线和试验数据相吻合,能够满足工程应用的需要。

2 冲击 Hugoniot 关系和 JWL 状态方程

2.1 冲击 Hugoniot 关系

在冲击试验中,炸药初始态的粒子速度和压力通常为0,因此波阵面上的质量、动量和能量守恒方程分别为^[16]:

$$\rho_0 U_s = \rho_H (U_s - U_p) \quad (1)$$

$$\rho_H = \rho_0 U_s U_p \quad (2)$$

$$e_H = e_0 + \frac{\rho_H (V_{H0} - V_H)}{2} \quad (3)$$

式中, ρ_0 和 ρ_H 分别为炸药初始和波后密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; U_s 为波阵面速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; U_p 为波后粒子速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; ρ_H 为波后炸药内部压力, GPa; e_0 和 e_H 分别为炸药初始和波后比内能, $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$; V_{H0} 和 V_H 分别为炸药初始和波后比容, $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 。

通常情况下,材料内的冲击波速度 U_s 和粒子速度 U_p 呈线性关系,即:

$$U_s = C_0 + S U_p \quad (4)$$

式中, C_0 和 S 为Hugoniot系数。将式(4)代入式(1)中,可得 U_p-V_H 和 U_s-V_H 型的Hugoniot关系分别为:

$$U_p = \frac{(V_{H0} - V_H) C_0}{V_{H0} - (V_{H0} - V_H) S} \quad (5)$$

$$\rho_{\text{HJWL}} = \frac{A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) \exp(-R_2 v) + \frac{\omega}{v} \left(\frac{A}{R_1} \exp(-R_1) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2) + C_v T_0\right)}{1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2v}} \quad (13)$$

$$U_s = \frac{C_0 V_{H0}}{V_{H0} - (V_{H0} - V_H) S} \quad (6)$$

将式(4)分别代入式(2)和式(1)并将冲击波速度外推到爆速,可得VNS压力和相对比容分别为:

$$\rho_{\text{VNS}} = \rho_0 D \left(\frac{D - C_0}{S}\right) \quad (7)$$

$$v_{\text{VNS}} = \frac{DS - (D - C_0)}{DS} \quad (8)$$

式中, D 为炸药爆速, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。将式(5)、式(6)代入式(2),可得波后压力与相对比容的关系为:

$$\rho_H = \frac{\rho_0 C_0^2 (1 - v)}{[1 - (1 - v) S]^2} \quad (9)$$

式中, $v = V_H / V_{H0}$,为相对比容。由于Hugoniot系数 C_0 和 S 根据试验数据确定,因此式(9)即为试验数据确定的未反应炸药 $p-v$ 形式的冲击Hugoniot曲线。

2.2 JWL 状态方程

JWL状态方程定义的压力为^[2-3]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) \exp(-R_2 v) + \frac{wE}{v} \quad (10)$$

式中, E 为单位体积内能, $E = \rho_0 e$, GPa; A 、 B 、 ω 、 R_1 、 R_2 为常数。 A 、 B 的单位为GPa, ω 、 R_1 、 R_2 为无量纲参数,对于未反应炸药的JWL状态方程参数规定 $R_1 > R_2 > 0$,且 $A > -B > 0$ ^[17]。

为了获得JWL形式Hugoniot曲线表达式,首先将Hugoniot曲线上的点写成JWL状态方程形式:

$$\rho_H = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) \exp(-R_2 v) + \frac{wE_H}{v} \quad (11)$$

随后将式(11)与式(3)联立得JWL形式的Hugoniot曲线表达式为:

$$\rho_H = \frac{A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) \exp(-R_2 v) + \frac{\omega}{v} (E_0)}{1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2v}} \quad (12)$$

将初始相对比容 $v=1$ 和初始温度 $T_0=298.15$ K代入JWL形式的内能表达式可得未反应炸药的初始内能 E_0 ,将 E_0 代入式(12)可得完整的JWL形式的Hugoniot曲线表达式为^[13, 17]:

式中, C_V 为比定容热容, $\text{GPa}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

为了减少未反应炸药JWL状态方程中未知参数的个数以及获得一组封闭的JWL状态方程参数^[18]。根据未反应炸药的冲击Hugoniot关系, JWL参数之间

$$A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v_{\text{VNS}}}\right) \exp(-R_1 v_{\text{VNS}}) + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v_{\text{VNS}}}\right) \exp(-R_2 v_{\text{VNS}}) + \frac{\omega}{v_{\text{VNS}}}\left(\frac{A}{R_1} \exp(-R_1) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2) + C_V T_0\right) = p_{\text{VNS}} \quad (15)$$

$$1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2v_{\text{VNS}}}$$

(3) 此外, 为了模拟炸药延迟爆轰时内部真实张力水平, 通常设置 R_1 和 R_2 有如下简单的线性关系^[19]:

$$R_2 = 0.1R_1 \quad (16)$$

上述3个约束方程使得JWL状态方程中的6个参数只有3个是独立的, 只需确定其中任意3个参数便可确定剩余参数。对于一组JWL参数, 当式(9)与式(13)的误差值在 $[v_{\text{VNS}}, 1]$ 区间上均等于或接近0时, 可认为此组JWL参数符合炸药真实的JWL参数, 为了提高拟合精度, 选取多个特定点进行计算。考虑到不同炸药的 $[v_{\text{VNS}}, 1]$ 区间相差较多, 不方便选取具体相对比容值, 因而提出以 v_{VNS} 为参考点, 均匀选取 $v_{\text{VNS}}+0.05$ 、 $v_{\text{VNS}}+0.10$ 、 $v_{\text{VNS}}+0.15$ 、 $v_{\text{VNS}}+0.20$ 和 $v_{\text{VNS}}+0.25$ 这5个点为特定点的方法。为了定量评价一组JWL参数的适用性, 基于选取的5个特定点定义两条曲线的相似度函数为:

$$F = \exp\left[-0.1 \cdot \sum_{i=1}^5 \left[p_{\text{H}}(v_i) - p_{\text{HJWL}}(v_i)\right]^2\right] \quad (17)$$

观察式(17)可发现, 函数值 F 取值区间为 $[0, 1]$, 当函数值越接近1时, 可认为两条曲线越相似, 吻合程度越高。

3 BP-GA算法和计算结果

BP(Back Propagation)神经网络是一种按误差反向传播训练的多层前馈网络, 其基本思想是梯度下降法, 利用梯度搜索技术, 以期使网络的实际输出值和期望输出值的误差均方误差为最小。BP算法主要包括信息的正向传播和误差的反向传播两个过程。网络正向传播时, 输入信号通过隐含层作用于输出节点, 若实际输出与期望输出相差较大, 则转入反向传播, 并将输出误差通过隐含层向输入层逐层反传, 通过调整各层的神经元阈值, 使误差沿梯度方向下降, 经过反复学习训练可确定与最小误差相对应的网络参数。

为了寻求非线性系统(不同的JWL参数组合代表的 F 值组成的非线性系统)中的最优解, 通常需要借助

需满足如下3个约束方程:

(1) 初始态时, $v=1$ 时, $p_{\text{HJWL}}=0$, 可得^[13]:

$$A \exp(-R_1) + B \exp(-R_2) + \omega C_V T_0 = 0 \quad (14)$$

(2) 当 $v=v_{\text{VNS}}$ 时, $p_{\text{HJWL}}=p_{\text{VNS}}$, 即:

$$A \exp(-R_1 v_{\text{VNS}}) + B \exp(-R_2 v_{\text{VNS}}) + \frac{\omega}{v_{\text{VNS}}}\left(\frac{A}{R_1} \exp(-R_1) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2) + C_V T_0\right) = p_{\text{VNS}} \quad (15)$$

GA优秀的搜寻能力, 然而由于JWL参数的取值范围较大, 这要求GA的种群规模要足够大, 且需要求解3个约束方程才可计算染色体的适应度值(本研究染色体适应度值为式(17)的 F)。种群规模的扩大、种群进化次数的延长使得染色体适应度值的计算次数大大增多, 直接降低了求解过程的计算效率。为了提高计算效率, 本研究对BP神经网络进行训练, 使其可以拟合非线性系统, 从而直接预测每条染色体的适应度值。

3.1 BP神经网络结构及训练过程

由前述可知, 只需确定JWL参数中的任意3个便可通过求解3个约束方程得到剩余参数, 从而可确定 F 值。考虑到JWL参数中的 R_1 、 R_2 、 ω 和 C_V 取值范围相对较小, 且 R_1 和 R_2 有固定的线性关系, 选取 R_1 、 ω 和 C_V 为自变量。国内外众多研究表明大多数炸药的 R_1 、 ω 和 C_V 的取值范围分别集中在 $6.2\sim 14.1$ 、 $0.8\sim 1.251$ 和 $1.68\times 10^{-3}\sim 2.78\times 10^{-3} \text{GPa}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[20-24]。为了寻求JWL参数组合的多样性和最优解, 本研究将 R_1 、 ω 和 C_V 的取值范围分别放大为 $5\sim 16$ 、 $0.6\sim 2.6$ 和 $1\times 10^{-3}\sim 3\times 10^{-3} \text{GPa}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

文献[25]研究发现双隐含层BP神经网络的训练误差低于单隐含层, 但随着隐含层数的增加, 网络会更加复杂, 网络权值和阈值的训练时间也会增加。为了达到较高的训练精度以及缩短训练时间, 本研究采用双隐含层的网络结构, 如图1所示, 包括输入层、双隐含层和输出层, 输入层节点数为3(自变量 R_1 、 ω 、 C_V)、输出层节点数为1(染色体适应度 F)。由于自变量的取值范围较大, 在自变量取值范围内随机生成10000个样本进行训练, 通过最佳隐含层计算公式^[26]确定第一隐含层节点数为40, 并采用试凑法^[27]确定第二隐含层的节点数为30。

为了获得高精度的神经网络, 设置当网络训练集的均方误差(Mean Square Error, MSE)低于 1×10^{-10} 时停止训练, 训练步骤具体如下^[15]:

(1) 网络初始化, 网络的权值和阈值随机赋初值。

(2) 信息正向传播, 计算各层的输入和输出。

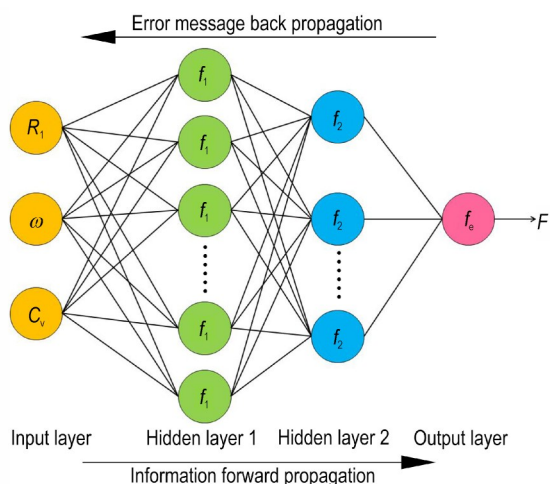


图1 BP神经网络示意图

Fig.1 Schematic diagram of BP neural network

设神经网络有 P 个训练样本, 对任意训练样本 X_k $[x_{k1}, x_{k2}, x_{k3}]$, 期望输出为 $T[t_k]$ 。计算各层神经元节点输入、输出分别为:

$$u_j = \sum_{i=1}^n W_{ij}v_i + b_j \quad (18)$$

$$v_j = f(u_j) \quad (19)$$

式中, W_{ij} 为节点 i 与节点 j 间的权值, j 为与 i 节点的下一层的节点; b_j 为节点 j 的阈值; f 为传递函数, 其中 f_1 和 f_2 为 Log-Sigmoid 函数, f_3 为 purnlin 线性函数。

(3) 计算期望输出与目标输出之间的平方误差为:

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P e_k^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^P (t_k - y_k)^2 \quad (20)$$

式中, e_k 为实际输出与期望输出的差值; y_k 为实际输出; n 为训练次数。

(4) 误差反向传播, 计算节点 i 与节点 j 之间的权值修正量为:

$$\Delta W_{ij} = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial W_{ij}} \quad (21)$$

由此可得到下一次迭代时的修正权值为:

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) + \Delta W_{ij}(n) \quad (22)$$

式中, η 为学习步长。

(5) 记忆训练

重复步骤(2)~(4), 正向传播和反向传播交替进行, 不断逐层修正权值和阈值直至训练集的均方误差 (Mean Square Error, MSE) 低于 1×10^{-10} 。

本研究训练集、验证集和测试集的比例 (依次为 0.7:0.15:0.15) 采用 Matlab 软件默认比例, 其各自的均方误差随训练次数的变化曲线如图 2 所示, 图中纵坐标为了观察方便采用对数形式。观察图 2 可发现,

训练集的 MSE 在 335 代时低于预期设置的 1×10^{-10} , 网络训练结束, 而验证集和测试集的 MSE 也接近 1×10^{-10} , 表明训练后的 BP 神经网络误差较小、预测精度较高。此外, 训练结束后的训练集、验证集和测试集的决定系数 R^2 均为 1。

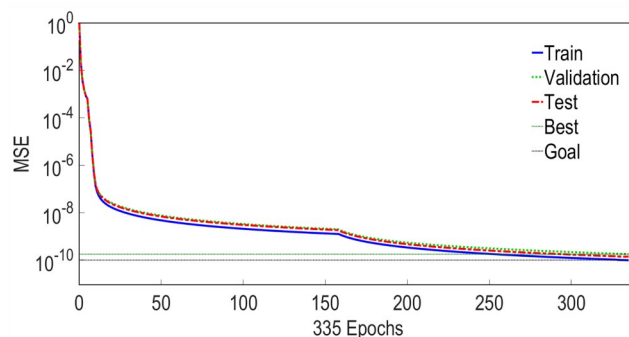


图2 均方误差随训练次数的变化曲线

Fig.2 The change of MSE versus training times

3.2 GA 流程及参数设置

GA 的染色体编码方式、选择机制、交叉方式和变异算子等均同文献[28], 具体步骤如下:

- (1) 选择, 从种群中选择一定数量的染色体;
- (2) 交叉, 选择出的染色体两两交叉产生下一代;
- (3) 变异, 交叉生成的染色体以一定概率发生变异;
- (4) 精英保存, 用上一代种群中适应性最好的染色体替换掉本代适应性最差的个体。
- (5) 种群替换, 经过步骤(1)~(4)后种群进化了一代, 重复此步骤直到种群进化成熟。

由于自变量取值范围较大, 设置种群中染色体的数量为 200 个, 同时为了寻求到全局最优解, 设置种群连续 50 代无进化为种群进化成熟标准。在种群进化过程中, 选择机制、交叉方式、变异算子和精英保存等基因操作均需要计算染色体的适应度值, 这些适应度值采用训练好的 BP 神经网络进行直接预测。

3.3 BP-GA 算法流程

图 3 为 BP-GA 算法确定未反应炸药 JWL 状态方程参数的计算流程, BP-GA 算法主要包括 BP 神经的训练过程以及随后的 GA 寻优过程, 具体流程为: (1) BP 神经网络的训练过程, 输入炸药的初始密度、爆速、Hugoniot 系数 C_0 和 S 后随机生成 10000 个样本进行神经网络的训练, 当训练样本的 MSE 小于设定的 1×10^{-10} 时停止训练, 此时训练好的 BP 神经网络即可预测任意一组 JWL 参数对应的 F 值; (2) GA 的寻优过程, 初始化种群, 设置种群数量 200 个, 经过选择、交

叉、变异和精英保存等基因操作后种群进化一代,循环多次直到种群进化成熟,进化成熟后种群中适应度值最大的染色体携带的遗传信息即为JWL参数。

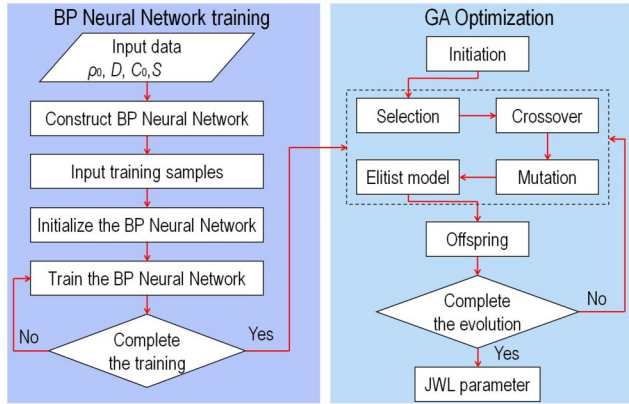


图3 BP-GA算法计算未反应炸药JWL参数流程图

Fig.3 Flow chart of calculating JWL parameters of unreacted explosive by BP-GA algorithm

3.4 计算结果和试验对比

表1为通过冲击试验获得的8种炸药的Hugoniot参数,将表1参数代入BP-GA算法程序中进行计算得到了8种炸药的JWL状态方程参数,如表2所示。表2

表1 炸药材料参数

Table 1 Parameters of explosives

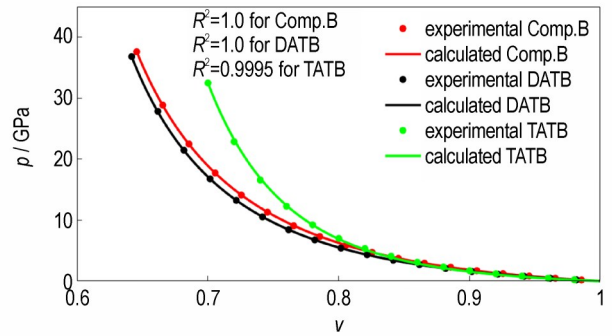
explosive	ρ_0 /g·cm ⁻³	D /m·s ⁻¹	C_0 /m·s ⁻¹	S	P_{VNS} /GPa	V_{VNS}
Comp.B ^[29]	1.68	7950	2710	1.86	37.627	0.6456
DATB ^[29]	1.78	7600	2449	1.892	36.830	0.6418
H-6 ^[29]	1.76	7400	2832	1.695	35.099	0.6358
HBX-3 ^[29]	1.85	7530	3134	1.605	38.155	0.6363
TATB ^[29]	1.847	7660	2340	2.316	32.499	0.7001
TNB ^[29]	1.64	7270	2318	2.025	29.156	0.6636
TNT ^[29]	1.614	6810	2390	2.05	23.698	0.6834
R1 ^[30]	1.88	8064	3323.41	1.74104	41.279	0.6623

表2 炸药未反应JWL状态方程参数

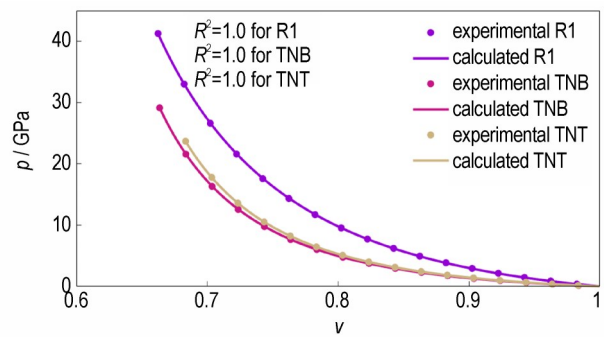
Table 2 Parameters of JWL equation of state for unreacted explosives

Explosive	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	C_v /GPa·K ⁻¹
Comp.B	3.3976×10 ³	-6.142	8.027	0.8027	2.285	2.412×10 ⁻³
DATB	3.9389×10 ³	-5.858	8.481	0.8481	2.300	2.467×10 ⁻³
H-6	2.3364×10 ³	-6.239	7.323	0.7323	1.914	2.553×10 ⁻³
HBX-3	2.1521×10 ³	-6.940	6.795	0.6795	1.734	2.145×10 ⁻³
TATB	17.1073×10 ³	-9.879	13.277	1.3277	2.600	3.000×10 ⁻³
TNB	7.5413×10 ³	-5.650	9.629	0.9629	2.501	2.224×10 ⁻³
TNT	8.3434×10 ³	-6.391	9.801	0.9801	2.599	2.498×10 ⁻³
R1	3.3824×10 ³	-8.570	7.217	0.7217	2.086	2.702×10 ⁻³

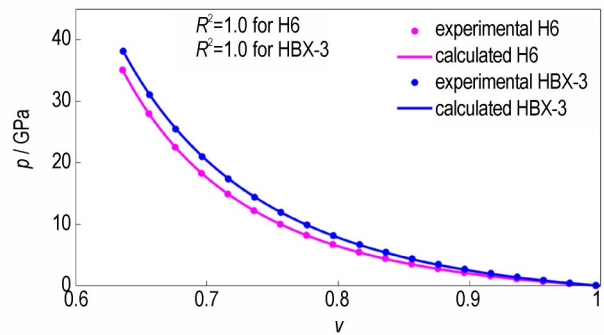
参数所确定 p - v 曲线和试验数据确定的 p - v 曲线的对比如图4所示,并采用决定系数 R^2 定量分析两者的相似性。观察图4可发现,除TATB炸药的 R^2 为0.9995外,其余7种炸药的 R^2 均为1.0,表明吻合程度较好,证明了本研究提出的采用BP-GA算法确定未反应炸药JWL状态方程参数的精度高。



a. p - v curves of Comp.B, DATB and TATB



b. p - v curves of R1, TNB and TNT



c. p - v curves of H6 and HBX-3

图4 试验和BP-GA算法确定未反应炸药冲击的 p - v 形式的Hugoniot曲线对比

Fig.4 Comparison of Hugoniot curves in p - v form of unreacted explosive determined by experiment and BP-GA Algorithm

4 结论

提出了一种基于BP-GA算法和冲击Hugoniot关

系确定未反应炸药的JWL状态方程参数的方法,采用这种方法确定了8种炸药的JWL状态方程参数,主要结论如下:

(1) 基于JWL状态方程和波阵面上的守恒方程可推导得到JWL形式的Hugoniot曲线表达式,利用3个约束方程和Hugoniot曲线上的5个特定点并采用BP-GA算法对试验数据确定的Hugoniot曲线进行拟合,可确定未反应炸药的JWL参数。

(2) 已知某种炸药的初始密度、爆速、Hugoniot系数 C_0 和 S ,便可利用BP-GA算法确定其JWL参数,结果显示BP-GA算法确定的8种未反应炸药的 $p-v$ 曲线和试验数据确定的 $p-v$ 曲线相一致,且8条 $p-v$ 曲线的 R^2 均不低于0.9995。

参考文献:

- [1] 高光发. 波动力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 253-255.
GAO Guang-fa. Foundations of wave mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2019: 253-255.
- [2] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by chemical Explosive [C]//Proceeding of 4th Symposium on Detonation. Berlin: Springer, 1965.
- [3] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products [R]. Technical Report LLNL, UCRL-50422, 1968.
- [4] Jiang J W, Wang S Y, Zhang M, et al. Modeling and simulation of JWL equation of state for reactive AL/PTFE mixture[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2012, 21(2): 150-156.
- [5] 陈军, 曾代朋, 孙承纬, 等. JB-9014炸药超压爆轰产物的状态方程[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(6): 583-587.
CHEN Jun, ZENG Dai-peng, SUN Cheng-wei, et al. Equations of state for overdriven-detonation products of JB-9014 explosive[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2010, 30(6): 583-587.
- [6] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R. Measurements of shock initiation in the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502: Wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(11): 114907.
- [7] Burns M J, Chiquete C. Shock initiation of the HMX-based explosive PBX 9012: Experiments, uncertainty analysis, and unreacted equation-of-state [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(21): 215107.
- [8] 赵生伟, 初哲, 李明. 抗侵彻过载战斗部模拟装药Hugoniot特性实验研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(8): 1019-1023.
ZHAO Shen-wei, CHU Zhe, LI Ming. Experimental investigation on Hugoniot characteristic of simulated explosive in warhead of protected overload against penetration [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(8): 1019-1023.
- [9] 裴红波, 刘俊明, 张旭, 等. 基于反向撞击法的JB-9014炸药Hugoniot关系测量[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 052301.
PEI Hong-bo, LIU Jun-ming, ZHANG Xu. Measurement of Hugoniot relation for unreacted JB-9014 explosive with reverse-impact method [J]. *Explosive and Shock Waves*, 2019, 39(5): 052301.
- [10] 于川, 池家春, 刘文翰, 等. 钝感高能炸药JB-9001冲击Hugoniot关系测试[J]. *含能材料*, 1994, 2(1): 25-30.
YU Chuan, CHI Jia-chun, LIU Wen-han, et al. Determination of shock Hugoniot of insensitive high explosive JB-9001 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1994, 2(1): 25-30.
- [11] 杨洋, 段卓平, 李淑睿, 等. 2,4-二硝基苯甲醚基熔注炸药RMOE-2冲击起爆实验研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(增刊1): 72-76.
YANG Yang, DUAN Zhuo-ping, LI Shu-rui, et al. Experimental research on shock initiation for DNAN-based melt-cast RMOE-2 explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(Suppl. 1): 72-76.
- [12] 王延飞, 刘杰, 张旭, 等. 未反应炸药JOB-9003的JWL状态方程[J]. *高压物理学报*, 2016, 30(5): 387-391.
WANG Yan-fei, LIU Jie, ZHANG Xu, et al. JWL equation of state of unreacted JOB-9003 explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(5): 387-391.
- [13] 黄奎邦. PBX炸药冲击起爆及爆轰传播数值模拟研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2020.
HUANG Kui-bang. Numerical study on shock initiation and detonation of PBX explosive [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2020.
- [14] 徐新爱, 谢润根. 基于神经网络遗传算法求非线性系统的最优解[J]. *江西教育学院学报*, 2013, 34(3): 20-23.
XU Xin-ai, XIE Run-gen. Optimal solution to nonlinear system based on the Neural Network Genetic Algorithm [J]. *Journal of Jiangxi Institute of Education*, 2013, 34(3): 20-23.
- [15] 崔浩, 郭锐, 顾晓辉, 等. BP神经网络和圆筒能量模型标定炸药JWL的参数[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(5): 665-673.
CUI Hao, GUO Rui, GU Xiao-hui, et al. Calibration of JWL parameters of explosive by BP neural network and cylinder energy model [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2021, 44(5): 665-673.
- [16] Meyers M A. Dynamic behavior of materials [M]. New York: John Wiley & sons, 1994.
- [17] Menikoff R. JWL equation of state [R]. Los Alamos Nat. Lab LAUR-15-29536, 2015.
- [18] 南宇翔, 蒋建伟, 王树有, 等. 一种与爆轰参数封闭的JWL方程参数确定方法[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 16-22.
NAN Yu-xiang, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. One parameter-obtained method for JW L equation of state considered detonation parameters [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 35(2): 16-22.
- [19] Tarver C M. Jones-Wilkins-Lee unreacted and reaction product equations of state for overdriven detonations in octogen- and triaminotrinitrobenzene-based plastic-bonded explosives [J]. *J Phys Chem A*, 2020, 124(7): 1399-1408.
- [20] Century Dynamics Inc. AUTODYN material library, Version 17.0 [DB]. Los Angeles, California: Century Dynamics Inc, 2016.
- [21] 白志玲, 段卓平, 温丽晶, 等. PBX炸药冲击起爆的改进细观反应速率模型[J]. *含能材料*, 2019, 27(8): 629-635.
BAI Zhi-ling, DUAN Zhuo-ping, WEN Li-jing, et al. A modified mesoscopic reaction rate model for shock initiation of PBXs [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*

- iao), 2019, 27(8): 629-635.
- [22] 皮铮迪, 陈朗, 刘丹阳, 等. CL-20基混合炸药的冲击起爆特征[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 915-923.
PI Zheng-di, CHEN Lang, LIU Dan-yang, et al. Shock initiation of CL-20 based explosives [J]. *Explosive and Shock Waves*, 2017, 37(6): 915-923.
- [23] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12):2362-2372.
- [24] Murphy M J, Lee E L. Modeling shock initiation in composition B[C]//Short J M. 10th Symp on Detonation. Boston: Plenum Publishing Corporation, 1992: 965-970.
- [25] 吕砚山, 赵琦. BP神经网络的优化及应用研究[J]. 北京化工大学学报, 2001, 28(1): 67-69.
LV Yan-shan, ZHAO Zheng-qi. Optimization and application research of BP neural network[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2001, 28(1): 67-69.
- [26] 沈花玉, 王兆霞, 高成耀, 等. BP神经网络隐含层单元数的确定[J]. 天津理工大学学报, 2008(5):15-17.
SHEN Hua-yu, WANG Zhao-xia, GAO Yao-xia, et al. Determining the number of BP neural network hidden layer units [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2008(5): 15-17.
- [27] 严鸿, 管燕萍. BP神经网络隐层单元数的确定方法及实例[J]. 控制工程, 2009(增刊2):100-102.
YAN Hong, GUAN Yan-ping. Method to determine the quantity of internal nodes of back propagation neural networks and its demonstration [J]. *Control Engineering of China*, 2009, 16 (Suppl.2): 100-102.
- [28] Cui H, Song P, Gu X, et al. Determination of the JWL parameters of detonation products using Adaptive Genetic Algorithm [J] *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45 (12): 1920-1930.
- [29] Coleburn N L, Liddiard T P. Hugoniot equations of state of several unreacted explosives [J]. *J Chem Phys*, 1966, 44 (5): 1929-1936.
- [30] 李淑睿, 段卓平, 高天雨, 等. 2,4-二硝基苯甲醚基钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性[J]. 含能材料, 2021, 29(2): 88-95.
LI Shu-ru, DUAN Zhuo-ping, GAO Tian-yu, et al. Shock initiation characteristic of insensitive DNAN-based aluminized melt-cast explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(2): 88-95.

Determination of Parameters of JWL Equation of State for Unreacted Explosives Based on BP-GA Algorithm

CUI Hao¹, GUO Rui¹, SONG Pu², GU Xiao-hui¹, ZHOU Hao³, YANG Yong-liang¹, JIANG Lin¹, YU Yang-hui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Science and technology on combustion and explosion laboratory, Xi'an modern chemistry research institute, Xi'an 710065, China; 3. National Special Superfine Powder Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to determine the parameters of the JWL equation of state for unreacted explosives, a method to determine the JWL parameters by using the BP neural network-Genetic Algorithm (BP-GA Algorithm) and the shock Hugoniot was proposed. Firstly, BP neural network is trained to fit the nonlinear system composed of different JWL parameters, and then Genetic Algorithm is used to search the set of JWL parameters with the largest fitness value. The results show that the JWL parameters can be determined by the BP-GA Algorithm when the initial density, detonation velocity, Hugoniot parameters C_0 and S are known. The p - v curves of eight kinds of unreacted explosives determined by BP-GA Algorithm are consistent with those determined by test data, and the R^2 of eight p - v curves are not less than 0.9995, which proves the high accuracy of BP-GA algorithm.

Key words: BP-GA Algorithm; unreacted explosives; JWL equation of state; shock Hugoniot

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021133

(责编: 王艳秀)