

文章编号: 1006-9941(2013)01-0068-07

广义 C-J 条件在计算含铝炸药波头参数中的应用

王庭辉^{1,3}, 段祝平¹, 苏健军², 田清政²

(1. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023; 2. 中国近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 3. LNM, 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 含铝炸药的爆轰过程属于典型的非理想爆轰过程, 其波头反应区处于多相反应流动状态, 因此其波头处爆轰参数的计算一直是一个难点。在假定铝颗粒于波头处不参与化学反应且爆轰产物和铝颗粒压力、速度一致条件下, 应用连续介质模型描述了爆轰产物和铝颗粒两相之间的平衡关系, 采用广义 C-J 条件给出了计算波头处爆压、物质速度和爆热的一组简单完备方程组。由实测得到的爆速, 可以求得相应的爆压、物质点速度和波头处释放的热量。对三组不同含铝量(10%, 20%, 30%)的 TNT 含铝炸药和 HMX 含铝炸药的计算结果表明随着爆速的降低, 对应的爆压、波头处物质速度和热量都会降低, 不同含铝量的同一炸药在同一爆速条件下, 含铝量越高对应的爆压值、波头处爆热值越大。同时, 对计算假定和采用模型进行了一定的讨论。

关键词: 爆炸力学; 含铝炸药; 两相爆轰; 热传导; C-J 条件**中图分类号:** TJ55; O381**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.016

1 引言

随着含铝温压炸药战斗部在实战中的应用, 科学工作者对含铝温压炸药的研究已越来越深入。其中美国劳伦斯利弗莫尔国家实验实验室(LLNL)的 Kuhl 等人^[1-5]对此进行了长达二十多年的不懈研究, 从小尺度爆轰弹实验开始, 一直进行到含铝炸药爆轰产物和环境气体之间复杂的湍流混合与湍流燃烧等理论研究, 实验与计算不断深化, 取得了一些重要的研究成果。由于后燃烧过程持续时间一般为毫秒量级, 远大于微秒量级时间尺度的爆轰过程, 跨时间尺度内, 从爆轰到燃烧整个演化过程变得十分复杂, 涉及到固体力学、流体力学和化学反应动力学等多个学科的交叉耦合。其计算过程一般以化学反应动力学为基础, 在每一个时间步内, 由最小吉布斯自由能计算得到相应的化学反应, 然后结合固体、流体方程组求解。显然以上过程需要知道所有可能发生的化学反应以及每种反应所释放或吸收的能量、各种组分的状态方程等热力学参数, 计算量庞大且复杂, 与之对应的是一些简化模型和经验公式的研究与应用。在爆轰与后燃烧机理研究

方面, Gonor 等人^[6]提出了一个金属粒子参与反应的一维稳定爆轰模型, 对 RDX 加铝粉混合炸药进行了计算研究。Keshavarz 等人^[7]对含铝非理想炸药的爆轰性能进行了研究, 给出了反映 $C_aH_bN_cO_dAl_e$ 混合炸药在一定装填密度下计算爆压的经验公式。Ilin 等人^[8]研究了超细铝粉和硼粉混合物在空气中的燃烧规律。Kuhl 等人^[9-12]数值仿真了爆轰产物与空气之间的湍流混合及燃烧过程。Lefrancois 等人^[13]对含铝炸药的爆温和爆压进行了实验测量并给出了相应的实验结果。同时, 国外开发了以 CHEETAH 为代表的热化学程序来模拟爆轰过程的演化规律^[14]。国内对含铝炸药的研究则主要集中在状态方程计算、圆筒膨胀实验确定状态方程参数以及做功能力实验及数值仿真、爆压爆温实验及相关经验公式的研究^[15-20]。基底炸药完全反应后金属粒子与爆轰产物的反应机理、金属粒子和爆轰产物混合物与空气之间的混合再燃烧过程以及金属粒子和爆轰产物混合物遇到刚性壁面引起的二次点火燃烧机理及演化过程未见相关报道。

温压炸药的综合破坏效应比常规凝聚炸药大得多, 这与其独特的能量释放规律分不开, 在较长的时间范围内其能量释放规律具有阶段性和环境效应^[21-22]。结合量热弹实验我们把能量的释放过程分为三个阶段: 波头处的反应放热为第一阶段; 爆轰产物与金属颗粒在高温高压下发生化学反应放热为第二阶段; 混合产物与环境中的氧气混合之后再次发生化

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-05-16

作者简介: 王庭辉(1982-), 男, 博士, 从事含铝炸药爆轰机理研究。
e-mail: wangtinghui425@163.com通讯联系人: 段祝平(1936-), 男, 研究员, 从事含铝炸药爆轰机理研究。
e-mail: duanzp@imech.ac.cn

学反应放热为第三阶段。这样装填充足氧气的量热弹实验能够确定总的释放热量 Q_0 ，装填了惰性气体的量热弹实验就可以确定第一和第二阶段释放的热量 $Q_1 + Q_2$ ，只要计算得到第一阶段波头处释放的热量 Q_1 ，就可得到三个阶段分别释放的热量值。本文在一系列假定基础上，应用连续介质模型描述了爆轰产物和铝颗粒两相之间的平衡关系，采用广义 C-J 条件给出了计算波头处释放热量的一组简单完备方程组。由实验实测得到的爆速 D ，可以求得相应的爆压 p 、物质速度 u 和波头处释放的热量 Q 。

2 一维爆轰波阵面控制方程

一维爆轰波阵面模型及过 C-J 面后的物质状态如图 1 所示。在计算波头爆热 Q 时，做以下假定：① 波头处压力连续（认为金属颗粒尺寸无限小，和基底炸药形成连续介质），这里特指爆轰产物和金属颗粒处于相同压力条件下；② 波头处金属颗粒与爆轰产物不发生化学反应（如果有发生化学反应，将在以后进一步计算）；③ 爆轰产物和金属颗粒满足各自的状态方程；④ 波头处爆轰产物和金属粒子物质点速度一致。

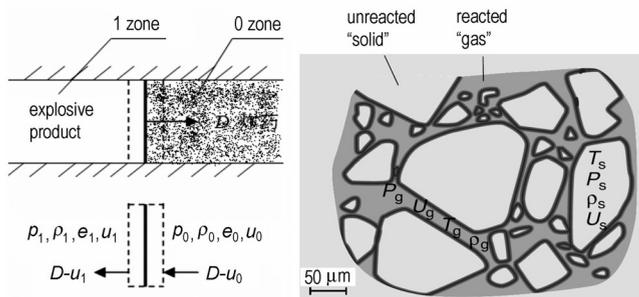


图 1 爆轰波阵面结构和 C-J 面后的物质状态
Fig. 1 The structure of detonation front and materials state behind C-J plane

基于以上假定建立了一维两相（爆轰产物和金属粒子）爆轰波阵面上质量、动量和能量守恒方程为：

$$\rho_1 \eta_1 (D - u_1) = \rho_{10} \eta_{10} (D - u_0) \quad (1)$$

$$\rho_2 \eta_2 (D - u_2) = \rho_{20} \eta_{20} (D - u_0) \quad (2)$$

波阵面上压力的冲量等于产物动量的增量，动量和能量守恒关系可以分别表述为：

$$p - p_0 = \rho_{10} \eta_{10} (D - u_0) (u_1 - u_0) + \rho_{20} \eta_{20} (D - u_0) (u_2 - u_0) = (D - u_0) (\rho_{10} \eta_{10} u_1 + \rho_{20} \eta_{20} u_2 - \rho_0 u_0) \quad (3)$$

$$m_{10} e_1^m + m_{20} e_2 + 0.5 m_{10} (D - u_1)^2 + 0.5 m_{20} (D - u_2)^2 + m_{10} p v_1 + m_{20} p v_2 = m_{10} e_{10} + m_{20} e_{20} + 0.5 (D - u_0)^2 + m_{10} p_0 v_{10} + m_{20} p_0 v_{20} + Q \quad (4)$$

式中， D 、 p 和 u_0 分别为波头处的爆速、爆压和物质初始速度； ρ_{10} 、 ρ_{20} 和 ρ_1 、 ρ_2 分别为波前波后炸药和金属颗粒密度（波后炸药密度为爆轰产物密度）； u_1 和 u_2 分别为波后爆轰产物和金属颗粒的物质点速度，且认为 $u_1 = u_2$ ； m_{10} 和 m_{20} 分别为初始单位质量混合物内炸药和金属颗粒的质量； v_1 和 v_2 分别为波后爆轰产物和金属颗粒的比容（密度倒数）； η_1 和 η_2 分别为波后爆轰产物和金属颗粒的体积百分含量， $\eta_1 + \eta_2 = 1.0$ ，对应波前的值分别为 η_{10} 和 η_{20} ； e_{10} 、 e_{20} 和 e_1^m 、 e_2 分别为炸药和金属颗粒在波前和波后单位质量的内能，爆轰产物单位质量的内能和单位体积内能 e_1 关系为 $e_1^m = e_1 / \rho_1$ ； p_0 为空气大气压（远小于爆压，可忽略）； Q 为单位质量混合炸药在波头处释放的热量。

对于混合炸药的初始平均密度 ρ_0 及 m_{10} 和 m_{20} ，关系式(5)和式(6)成立：

$$\rho_0 = \eta_{10} \rho_{10} + (1 - \eta_{10}) \rho_{20} \quad (5)$$

$$m_{10} + m_{20} = \frac{1}{\rho_0} \eta_{10} \rho_{10} + \frac{1}{\rho_0} \eta_{20} \rho_{20} = 1.0 \quad (6)$$

在金属颗粒不参与化学反应条件下，波后爆轰产物的平均密度可以表述为：

$$\rho = \eta_1 \rho_1 + (1 - \eta_1) \rho_2 \quad (7)$$

1940 年 Urizar^[23] 提出了计算复合炸药爆速的体积加和经验算法，即 $D = \sum_{i=1}^n \eta_i D_i$ ， η_i 为组分 i 的体积分数，因此含金属颗粒炸药的爆速可以写为：

$$D = \eta_1 D_1 + \eta_2 D_2 \quad (8)$$

式中， D_1 和 D_2 分别为爆轰产物的爆速和金属颗粒的特征爆速。如果金属颗粒的特征爆速选择为冲击波波速，有式(9)：

$$D_2 = C_{20} + \lambda u_2 \quad (9)$$

式中， C_{20} 为材料声速； λ 为材料常数。以铝为例，其冲击波波速要大于 $6600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，这样得到的复合炸药爆速比实验值高很多。对于温压炸药而言，其爆速和爆压相对高能炸药都要偏低一些，一般认为金属颗粒在波头处起到了热稀释的效果，即不发生化学反应而又吸收了一部分爆轰能量，且稀释了反应物浓度。文献[23]建议对于铝颗粒其特征爆速选择为 $5400 \sim 5545 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，本文选取 $5400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于基底高能炸药组分，认为它仍满足爆轰稳定传播的 C-J 条件为式(10)：

$$D_1 = C_1 + u_1 \quad (10)$$

式中， C_1 为爆轰产物状态决定的声速，其表达式为：

$$V_1 = \sqrt{\left. \frac{p}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial e_1} \right|_{\rho_1} + \left. \frac{\partial p}{\partial \rho_1} \right|_{e_1}} \quad (11)$$

3 产物与金属颗粒的状态方程

仅有三个守恒方程是不能求解多个状态参数的, 还需要建立产物状态参数 p - $T(e)$ 之间的关系方程。基于假定③爆轰产物和金属颗粒满足各自的状态方程, 对爆轰产物和金属颗粒分别选取 JWL 状态方程和 Mie-Grüneisen 状态方程^[24]来描述:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp^{-R_2 V} + \frac{\omega e_1}{V} \quad (12)$$

式中, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为炸药物性常数, 由圆筒实验标定得到; 比体积 $V = v_1 / v_{10}$; v_1 为爆轰产物的比容; v_{10} 为高能炸药初始比容; e_1 为单位体积的爆轰产物内能。

金属颗粒采用如下形式 Grüneisen 状态方程描述:

$$p = p_H + \frac{\Gamma(v_2)}{v_2} (e_2 - e_H) \quad (13)$$

式中, e_2 、 e_H 代表的是单位质量的内能; $\Gamma(v)$ 为 Grüneisen 系数; 下标 H 代表由 Hugoniot 关系决定的 Hugoniot 状态, 分别为:

$$p_H = \frac{c_{20}^2 \rho_{20}^2 (v_{20} - v_2)}{[1 + \lambda \rho_{20} (v_2 - v_{20})]^2} = \frac{\rho_{20} c_{20}^2 \varphi}{(1 - \lambda \varphi)^2} \quad (14)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \rho_H (v_2 - v_{20}) = \frac{1}{2} \frac{c_{20}^2 \varphi^2}{(1 - \lambda \varphi)^2} \quad (15)$$

其中, $\varphi = 1 - v_2 / v_{20}$, v_{20} 为金属材料初始比容。一般金属的 $\Gamma(v)$ 在数十吉帕压力下近似满足以下线性关系:

$$\Gamma(v_2) / v_2 = \Gamma_0 / v_{20} \quad (16)$$

爆轰过程中, 反应区内两相之间由于存在较大的温度差, 存在热交换、热对流和热辐射问题, 这里仅仅考虑热交换, 认为金属颗粒温度由 Hugoniot 温度 T_H 上升到 T_2 , 则式(13)可写为:

$$p = p_H + \frac{\Gamma}{v_2} C_{v2} (T_2 - T_H) \quad (17)$$

$$e_2 = e_H + C_{v2} (T_2 - T_H) \quad (18)$$

式中, C_{v2} 为金属材料的定容比热, 在室温以上近似为一常数, 量纲为 $J \cdot (g \cdot K)^{-1}$ 。金属颗粒在波头处的冲击 Hugoniot 温度为:

$$T_H = \exp \left(- \int_{v_0}^v \frac{\Gamma}{V} dV \right) \left\{ \int_{v_0}^v \frac{1}{2C_{v2}} \left[p_H + (V_0 - V) \frac{dp_H}{dV} \right] \exp \left(\int_{v_0}^V \frac{\Gamma}{V} dV \right) dV + T_0 \right\} \quad (19)$$

将式(16)代入式(19)得到

$$T_H = T_0 \exp(\Gamma_0 \eta) +$$

$$\frac{c_{20}^2}{C_{v2}} \exp(\Gamma_0 \eta) \int_0^\eta \frac{\lambda x^2}{(1 - \lambda x)^3} \exp(-\Gamma_0 x) dx \quad (20)$$

式中, $\eta = 1 - v_2 / v_{20}$, c_{20} 和 λ 为材料常数; T_0 为室温。

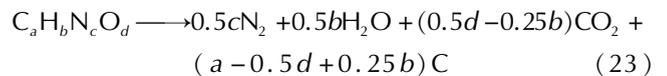
爆温的精确测量在实验技术上存在一定困难, 对于含有金属颗粒的爆轰产物温度测量则更为困难。对于组分为 CHNO 的含能材料, Mohammad 等^[25-26]给出了计算爆温的简单经验公式, 可采用经验公式计算得到基底炸药爆轰产物温度 T_1 。忽略初始内能, 在波阵面上认为内能是温度的线性函数

$$e_1 = \bar{C}_{v1} T_1 \quad (21)$$

式中, T_1 为爆轰产物的温度, K; \bar{C}_{v1} 爆轰产物的混合比热 $J \cdot (v \cdot K)^{-1}$, \bar{C}_{v1} 可由爆轰产物各组分的比热按照摩尔百分体积含量加权求和得到

$$\bar{C}_{v1} = \sum n_i C_{v_i} \quad (22)$$

实验和理论计算表明爆轰产物中 NH_3 、 NO 、 CO 、 H_2 等的含量都很低, 可忽略不计, 主要产物可采用 1967 年 Kamlet 和 Jacobs 提出的爆轰产物生成模型^[27]:



假定单位质量混合物内交换的热量 q 和两相之间的温度差成正比

$$q = \alpha (T_1 - T_H) \quad (24)$$

式中, α 是和比热量纲一致的热交换系数, 与金属粒子的颗粒尺寸大小、体积百分含量、两相之间的热传导系数、气态产物雷诺数等因素有关。爆轰产物和金属粒子温度平衡为 T_b 时, 式(25)关系成立:

$$q = q_{out} = m_{10} C_{v1} (T_1 - T_b) = q_{in} = m_{20} C_{v2} (T_b - T_H) \quad (25)$$

式中, 比热的量纲统一为 $J \cdot (g \cdot K)^{-1}$, 联立方程(24)和(25)得到温度平衡时对应的 α_b 和平衡温度 T_b

$$\alpha_b = m_{10} m_{20} C_{v1} C_{v2} / (m_{10} C_{v1} + m_{20} C_{v2}) \quad (26)$$

$$T_b = (m_{10} C_{v1} T_1 + m_{20} C_{v2} T_H) / (m_{10} C_{v1} + m_{20} C_{v2}) \quad (27)$$

显然如果温度没有达到平衡状态, 则 α 值处在 $(0, \alpha_b)$ 之间。单位质量混合物内交换的热量可以表达为:

$$q = m_{10} C_{v2} (T_2 - T_H) \quad (28)$$

联立方程(28)和方程(24)得到

$$T_2 = T_H + \alpha (T_1 - T_H) / m_{20} C_{v2} \quad (29)$$

4 数值计算结果

上述计算模型需要给定一个状态参数值才能得到所有参数结果。爆轰实验中爆速的测量技术比较成熟, 而爆压和爆温的测量可靠性比较差, 基于此, 本文的计算以实验所得爆速 D 作为计算常量, 忽略初始内能和

势能,通过上述计算模型计算波后的爆压 p 、物质点速度 u 及释放的热量 Q 等参量。求解顺序为首先给出一个 p_2 值,由方程(1)、(2)、(3)和(7)联立求得对应的 ρ_1 、 u 和 η_1 ,同时满足方程(8)至方程(12)条件下得到一组 ρ_1 、 u 、 η_1 、 ρ_2 、 e_1 和 p ; 由方程(20)、(21)得到温度 T_H 和 T_1 ; 由方程(29)、(24)得到温度 T_2 和交换热量 q ; 由方程(21)得到内能 e_2 ,由方程(17)得到此时金属

压力,如果该压力和爆轰产物压力一致,则认为整个方程组协调。最后通过方程(4)得到热量 Q 。

以常用炸药 TNT 和 HMX 加金属铝粉为例来验证计算,其 JWL 状态方程参数见表 1,金属铝特征爆速和冲击波参数见表 2。爆轰产物各组分的比热取值见表 3。表 4 给出了 70% TNT + 30% Al 爆轰产物在波头处的计算结果。

表 1 TNT 和 HMX 的 JWL 状态方程参数^[25,28]

Table 1 The parameters of JWL equation of state

explosive	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$D/cm \cdot \mu s^{-1}$	p_{C-J}/GPa	e_0/GPa	T_1/K	A/GPa	B/GPa	C/GPa	R_1	R_2	ω
TNT	1.630	0.693	21	7.0	3511	371.2	3.231	1.045	4.15	0.95	0.30
HMX	1.891	0.911	42	10.5	4162	778.3	7.100	0.643	4.2	1.00	0.30

表 2 铝粉计算参数^[29]

Table 2 The parameters of aluminum

ρ $/g \cdot cm^{-3}$	$D/cm \cdot \mu s^{-1}$ characteristic detonation velocity	C_0 this paper $/cm \cdot \mu s^{-1}$	λ	Γ_0	C_V $/J \cdot (g \cdot K)^{-1}$	
2.69	0.5400-0.5545 ^[23]	0.5400	0.52	1.4	2.18	0.9245

表 3 爆轰产物比热^[30]

Table 3 The specific heat of detonation product

detonation product	C	N ₂	CO ₂	H ₂ O
$C_V/J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	12.481	20.808	29.065	25.138

表 4 70% TNT + 30% Al 的混合物计算结果

Table 4 The calculate results of 70% TNT + 30% Al

$D/cm \cdot \mu s^{-1}$	p/GPa	$\rho_1/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_2/g \cdot cm^{-3}$	$e_1/MJ \cdot cm^{-3}$	$e_2/MJ \cdot g^{-1}$	$u/m \cdot s^{-1}$	$Q/kJ \cdot g^{-1}$	$Q/0.7$
0.625	17.37	2.189	3.16	1.02	0.48	1523.966	0.35	0.49
0.630	17.84	2.197	3.17	1.75	0.5	1552.649	1.05	1.5
0.635	18.31	2.205	3.18	2.49	0.53	1581.106	1.76	2.52
0.640	18.79	2.212	3.19	3.23	0.55	1609.687	2.49	3.55
0.645	19.27	2.22	3.2	3.99	0.57	1638.294	3.22	4.61
0.650	19.76	2.227	3.21	4.76	0.6	1666.865	3.97	5.67
0.655	20.25	2.234	3.22	5.54	0.62	1695.282	4.73	6.75
0.660	20.75	2.242	3.23	6.34	0.65	1723.643	5.5	7.85

对于单质 TNT 和 HMX 炸药而言,其爆热值分别为 4.552, 6.038 $kJ \cdot g^{-1}$ ^[31],本文计算是建立在金属颗粒在波头处不发生化学反应基础上的^[32],从表 4 可以看出,混合炸药要达到单质炸药释放的爆热值,其对应爆速在 6450 $m \cdot s^{-1}$ 附近。假定铝粉在波头处不参与化学反应情况下计算得到的爆压值相对基底单质炸药的 C-J 爆压相差不大,同时在低爆速下计算得到的 Q 值都很小,对应的爆轰产物内能值也非常小。相对于高压和高密度,在波阵面处较小的内能值说明其能量大部分有可能被金属颗粒吸收了,另外一种解释就是基底炸药没有完全参与化学反应,或者化学反应的形式有所改变。

计算模型中基底炸药仍然满足 $D = C + u$ 形式的 C-J 条件,结合金属颗粒的特征爆速来描述爆速和物质点速度之间的关系,文献[33]中作者指出含铝炸药非理性爆轰中 $D > C + u$,但没有给出一个具体的关系式。求解过程中发现在同样爆速条件下,不同的 $D-u$ 关系对最终爆热计算结果影响很大,采用 $D > C + u$ 形式计算能够得到较大的爆热值,且允许有更低的爆速选择。对于基底炸药,本文采用理想爆轰 $D = C + u$ 形式的 C-J 条件在较低的爆速情况下(TNT 含铝炸药低于 6000 $m \cdot s^{-1}$,HMX 含铝炸药低于 8000 $m \cdot s^{-1}$),给出的方程组没有数值解,说明,含铝混合炸药在低爆速情况下,其波头处的化学反应过程和状态参量演化

十分复杂,其非理想 C-J 爆轰特性十分明显。

图 2 ~ 图 5 给出了不同含铝量条件下,两种炸药的爆压、爆热随爆速的变化曲线。为便于比较金属含量对基底炸药释放能量的影响,将计算得到的单位质量混合炸药释放能量除以基底炸药质量百分含量,换算为对应单位质量单质炸药释放能量,如图 6 和图 7 所示。

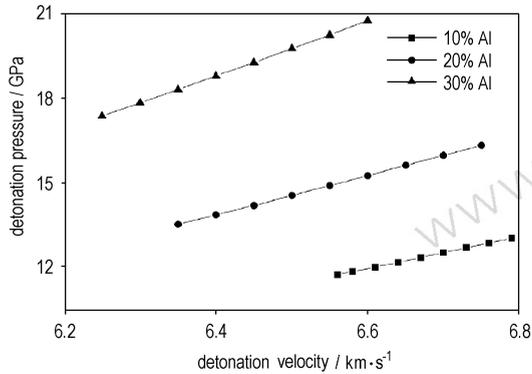


图 2 TNT 含铝炸药波头处 p - D 曲线

Fig. 2 The relationship of detonation pressure and detonation velocity

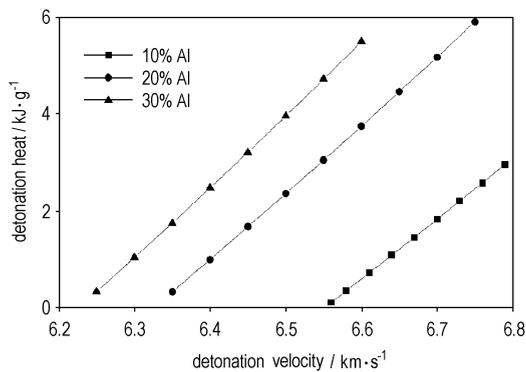


图 3 TNT 含铝炸药波头处 Q - D 曲线

Fig. 3 The relationship of detonation heat and detonation velocity

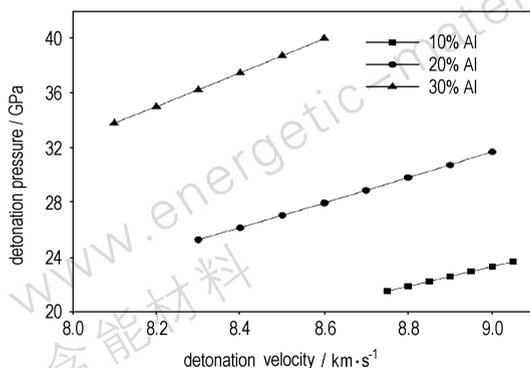


图 4 HMX 含铝炸药波头处 p - D 曲线

Fig. 4 The relationship of detonation pressure and detonation velocity

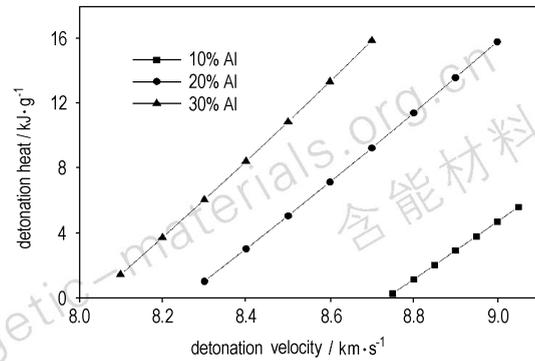


图 5 HMX 含铝炸药波头处 Q - D 曲线

Fig. 5 The relationship of detonation heat and detonation velocity

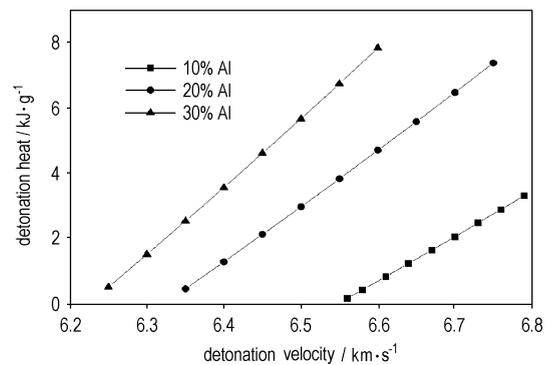


图 6 TNT 含铝炸药在波头处的等效单位质量爆热

Fig. 6 The equivalent detonation heat of TNT

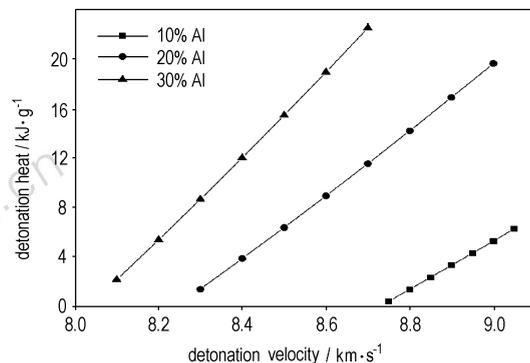


图 7 HMX 含铝炸药在波头处的等效单位质量爆热

Fig. 7 The equivalent detonation heat of HMX

5 结论与讨论

本研究在一系列假定的基础上,采用广义 C-J 条件粗略地计算得到了含铝炸药在波头处爆压、爆热、物质点速度等参数与爆速之间的对应数值关系。但由于模型简单和一些假定的合理性有待进一步研究,同时缺少与之对应的实验研究与验证,因此在以下几个方面有待进一步研究和改进。

(1) 爆速与粒子速度之间的关系。一些文献指出此时的爆速应该大于此时声速与物质点速度之和,但没有具体的描述方程,本计算中也表明,在较低的爆速条件下,采用 $D = u + C$ 模型没有数值解。因此对于爆速较低的含铝炸药,其波头处爆速与物质点速度之间的关系有待进一步研究。

(2) 状态方程的应用。本文采用爆轰产物和金属粒子各自独立的状态方程进行计算,事实上默认了金属粒子和爆轰产物作为连续介质模型进行处理,这种处理方法是否恰当,特别是在金属颗粒具有较大尺度时是否合适也有待深入研究。国内外的相关文献在处理该问题时基本上以 JWL 状态方程为基础,一种方法是直接拟合混合物的 JWL 状态方程参数^[34-35],另外一种方法是把相关参数和金属颗粒的百分含量联系起来,与热化学编程程序计算结果比较得到相关参数值^[36]。

(3) 爆轰产物与金属粒子之间的动量和能量交换。本文计算采用连续介质模型,且认为两者物质速度一致,因此不考虑两相之间的动量交换。对于两相之间的能量交换,文中采用热量交换和温度差成线性关系假定,从而确定单位质量内的热量交换值。事实上能量的交换受多种因素的影响如波头处压力、两种颗粒之间的温度差、热传导系数、金属颗粒的特征尺度、波头宽度等,这也是以后的研究重点。

参考文献:

[1] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Gas dynamic model of turbulent combustion in TNT explosions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2177-2185.

[2] Kuhl A L, Reichenbach H. Combustion effects in confined explosions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2291-2298.

[3] Oppenheim A K, Kuhl A L. Dynamic features of closed combustion systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4-6): 533-564.

[4] Oppenheim A K, Kuhl A L. Energy loss from closed combustion systems [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 1257-1263.

[5] Kuhl A L. Thermodynamics of combustion of TNT products in a chamber [C] // 5th International Seminar on Flame Structure, 2005.

[6] Gonor A, Hooton J, Narayan S. Steady-state model of heterogeneous detonation with reactive metallic particles [C] // 12th International Detonation Symposium, San Diego, CA, 2002.

[7] Keshavarz M H, Mofrad R T, Poor K E, et al. Determination of performance of non-ideal aluminized explosives [J]. *Journal Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 83-87.

[8] Ilin A P, Yablunovskii G V, Gromov A A, et al. Combustion of mixtures of ultrafine powders of aluminum and boron in air [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Wave*, 1999, 35(6): 656-659.

[9] Kuhl A L, Ferguson R E. Spherical combustion layer in a TNT explosion [C] // 8th International Workshop of Physics of Compressible Turbulent Mixing, 2001: 9-14.

[10] Kuhl A L, Ferguson R E, Oppenheim A K, et al. Turbulent mixing and combustion in TNT explosions [C] // *Extreme States of Matter, Detonation and Shock Waves*, Nizhni Novgorod Oblast, Russia, 2001.

[11] Kuhl A L, Khasainov B, Bell J. Two-phase model of combustion in explosions [R]. UCRL-PROC-222284, 2006.

[12] Ritzel D V, Ripley R C, Murray S B, et al. Near-field blast phenomenology of thermo baric explosions [C] // 26th International Symposium on Shock Waves, Germany, 2007: 305-310.

[13] Lefrancois A, Grouffal J Y, Bouinot P. Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion [C] // 12th Detonation Symposium, 2002.

[14] Lu Jing-ping. Evaluation of the thermo chemical code-CHEETAH 2.0 for modeling explosives performance [R]. Weapons Systems Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO-TR-1199, 2001.

[15] 丁刚毅, 徐更光. 含铝炸药二维冲击起爆的爆轰数值模拟 [J]. *兵工学报*, 1994, 15(4): 25-29.
DING Gang-yi, XUE Geng-guang. 2-Dimensional modeling of detonation in explosives containing aluminium [J]. *Acta Armamentarii*, 1994, 15(4): 25-29.

[16] 胡栋, 孙珠妹. 5种含铝炸药粉快速反应特性的比较 [J]. *兵工学报*, 1996, 17(4): 316-319.
HU Dong, SUN Zhu-mei. Compression of high speed reaction behaviors for five explosives containing aluminum powder [J]. *Acta Armamentarii*, 1996, 17(4): 316-319.

[17] 韩勇, 韩敦信, 卢校军, 等. 含铝炸药爆压及能量释放过程的研究 [J]. *含能材料*, 2003, 11(4): 191-200.
HAN Yong, HAN Dun-xin, LU Xiao-jun, et al. The research of effective pressure and energy-released process of al-containing explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 191-200.

[18] 陈朗, 冯长根, 赵玉华, 等. 含铝炸药爆轰数值模拟研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2001, 21(4): 415-419.
CHEN Lang, FENG Chang-gen, ZHAO Yu-hua, et al. Numerical simulations of the detonation of aluminized explosives [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(4): 415-419.

[19] 吴雄, 龙新平, 何碧, 等. VLW 状态方程的回顾与展望 [J]. *高压物理学报*, 1999, 13(1): 55-58.
WU Xiong, LONG Xin-ping, HE Bi, et al. Review and look forward to the progress of VLW equation of state [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, 13(1): 55-58.

[20] 郑波, 陈力, 丁雁生, 等. 温压炸药爆炸抛洒的运动规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 433-437.
ZHENG Bo, CHEN Li, DING Yan-sheng, et al. Dispersal process of explosion production of thermobaric explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 433-437.

[21] Vadhe P P, Pawar R B, Sinha R K, et al. Cast aluminized explosives (Review) [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(4): 461-477.

[22] Replay R C, Donahue L, Dunbar T E, et al. Ground reflection interaction with height-of-burst metalized explosions [J]. *Shock Waves*, 2009, Part 4: 281-286.

[23] 黄亨建, 黄辉, 李尚斌. 含铝炸药爆速计算中特征爆速的选取 [J]. *含能材料*, 2004(增刊): 444-447.

- HUANG Heng-jian, HUANG Hui, LI Shang-bin. Selection of characteristic detonation velocity in calculation of detonation velocity of aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004(Supplement): 444-447.
- [24] Fan Zhang. Shock Wave Science and Technology Reference Library: Heterogeneous Explosion[M]. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009: 149-151.
- [25] Mohammad H K, Hamid R N. A simple method to assess detonation temperature without using any experimental data and computer code[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 133(1-3): 129-134.
- [26] Mohammad H K. Detonation temperature of high explosives from structural parameters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(3): 1303-1308.
- [27] Kamlet M J, Jacobs S J. The chemistry of detonations 1 A simple method for calculating detonation properties of CHNO explosives [R]. Naval Ordnance Lab White OAK MD, AD0661483, 1967.
- [28] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL Explosives Handbook[M]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [29] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 354-355.
- [30] 李德华. 炸药爆轰参数、生成热及爆热的理论研究[D]. 四川大学博士学位论文, 2005: 100-102.
- [31] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 172-173.
- [32] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 48-53.
- [33] Kuzenetsov N M, Davydova O N. Detonation of explosives containing heavy inert particles[J]. *Plasma Gases*, 2001, 913(3): 519-532.
- [34] 于川, 李良忠, 黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(3): 274-279.
- YU Chuan, LI Liang-zhong, HUANG Yi-min. Studies on JWL equation of state of detonation products for aluminized explosive [J]. *Explosion and Shockwaves*, 1999, 19(3): 274-279.
- [35] 陈朗, 冯长根, 黄毅民. 含铝炸药圆筒实验及爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. *火炸药学报*, 2001, 24(3): 13-15.
- CHEN Lang, FENG Chang-gen, HUANG Yi-min. The cylinder test and JWL equation of state detonation product of aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 24(3): 13-15.
- [36] Baker E L, Capellos C, Stiel L I. Generalized thermodynamic equation of state for reacting aluminized explosives[C] // 13th International Detonation Symp, Norfolk, VA, 2006.

Application of Generalized C-J Condition at Detonation of Aluminized Explosives

WANG Ting-hui^{1,3}, DUAN Zhu-ping¹, SU Jian-jun², TIAN Qing-zheng²

(1. LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 3. The Third Research Institute of Engineers of the General Staff, Luoyang 471023, China)

Abstract: The detonation performances of aluminized explosives are the typical non-ideal detonations. Because of the multiphase flowing and reacting at the front of detonation, it was difficult to obtain the detonation parameters by calculation. Assumed that the metal particles have no reaction at the front of detonation, and have the same pressure and velocity with the detonation products, using the continuum model and the general C-J relation, the full equations were obtained. Given the data of experimental detonation velocity, we can obtain the detonation pressure, particles velocity and the released heat at the front of detonation by solving the full equations. The calculations of two explosives with different aluminium content show that with the decrease of detonation velocity, the detonation pressure, mass velocity and explosion heat also decreased. When the explosives with different aluminium contents have the same detonation velocity, the higher the aluminium content, the larger the detonation pressure and the explosion heat. The calculation assumptions and the calculation model also given discussed.

Key words: explosion mechanics; aluminized explosive; two phase detonation; heat conduction; C-J condition

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.016