

含铝炸药爆轰驱动的非线性特征线模型

段继¹, 智小琦¹

(1. 中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室, 山西太原, 030051)

摘要: 针对含铝炸药爆轰的非理想特性, 提出了含铝炸药爆轰产物膨胀的局部等熵假设, 建立含铝炸药爆轰驱动的非线性特征线模型, 为研究含铝炸药爆轰产物的非等熵流动和膨胀做功提供一种新的理论分析方法。设计了 5 μm 、50 μm 含铝炸药和含 LiF 炸药驱动 0.5mm 和 1mm 后金属板实验, 通过激光位移干涉仪测试金属板运动的速度历程, 再通过实验结果计算得到铝粉在爆轰产物中的反应度变化规律, 结合含铝炸药爆轰产物的非线性特征线模型, 理论计算了含铝炸药驱动金属板的速度历程。对比理论与实验结果, 理论方法能够很好的描述铝粉二次反应对炸药做功能力的贡献, 同时验证了含铝炸药爆轰驱动的非线性特征线模型的正确性。

关键字: 含铝炸药; 局部等熵; 非线性; 特征线

1. 引言

含铝炸药在军事领域的广泛应用以及其典型的非理想特性, 吸引了大量国内外学者对含铝炸药的爆轰驱动特性和铝粉在爆轰产物中的反应过程开展研究。Philip J. Miller^{[2][3][4][5]}提出了针对高非理想炸药和推进剂的反应流模型, 该模型将含铝炸药爆轰分为两阶段: 理想组分快速爆轰阶段和金属粉末缓慢燃烧阶段, 并将该反应流模型应用于二维有限元 Lagrangian 流体力学代码计算。许多学者 (Frost et al. ^{[5][6]}, Zhang et al. ^[7], Ripley et al. ^[8], Milne et al. ^[9], Cooper et al. ^[10], Massoni et al. ^[11], Kim et al. ^[12], etc.) 应用多相流体动力学模型 (CFD) 数值计算铝粉在炸药中反应条件。Bohoon Kim^[14]等对含铝炸药反应流进行了实验研究, 在 JWLL++ 状态方程的基础上, 研究了 RDX/Al/HTPB (50%/35%/15%) 尺寸效应、爆轰特性。

目前, 含铝炸药的研究以实验为主要手段, 对于含铝炸药的爆轰驱动过程一直缺乏理论指导。本文针对含铝炸药爆轰产物的非理想膨胀过程, 提出了局部等熵假设, 并建立含铝炸药爆轰产物流动的非线性特征线理论模型, 为分析含铝炸药的驱动做功能力以及爆轰产物的非等熵流动规律提供了一种全新的方法, 为深入理解含铝炸药爆轰产物的膨胀过程提供了理论指导。

2. 含铝炸药爆轰产物非线性特征线模型的必要假设

2.1 含铝炸药爆轰反应机理假设

根据文献调研分析以及二次反应理论对含铝炸药爆轰机理的论述, 假设铝粉在炸药爆轰反应区完全不发生化学反应, 即铝粉在炸药爆轰反应区表现为惰性。

2.2 铝粉在炸药爆轰产物中的状态假设

1) 含铝炸药爆轰波阵面后的铝粉与爆轰产物以相同的速度运动

Zhang 等^[16]人假设在冲击波通过铝粒子的过程中, 炸药不发生反应, 并采用 Murnaghan 状态方程描述炸药受到冲击的状态, 计算结果发现铝粉与爆轰产物的相对速度与炸药密度有关, 对于常用的 RDX 基和 HMX 基含铝炸药而言, 可近似认为铝粉与爆轰产物一起运动。

2) 对于爆轰波阵面后的微米级铝粉, 可认为铝粉以气相形式燃烧^[17]

2.3 含铝炸药爆轰产物流动的局部等熵假设

本文提出了分析含铝炸药爆轰产物流动的局部等熵假设，其主要假设包括以下内容：

- 1) 假设铝粉在爆轰反应区内不发生化学反应，即铝粉在炸药爆轰反应区表现为惰性；
- 2) 将含铝炸药爆轰产物的膨胀过程沿时间轴分割为无数小段，在每个小时间段内，爆轰产物按照各自的规律膨胀；
- 3) 假设铝粉反应对爆轰产物的影响具有一定的弛豫效应，也就是说铝粉反应释放的能量需要一段时间后才会对爆轰产物参数（包括当地声速、压强和产物密度）产生影响；
- 4) 假设在任意微时间域内，铝粉反应释放的能量没有立刻对周围爆轰产物状态参数产生影响，因此，可认为任意微时间域内铝粉的反应度不变，爆轰产物可近似为等熵膨胀；

3. 含铝炸药爆轰驱动的非线性特征线模型

3.1 含铝炸药爆轰产物状态方程

假设含铝炸药处于无限长刚性圆管中，炸药两侧为真空，因此爆轰产物流动可视为一维流动。上一节必要假设中提到在 C-J 面后铝粉与爆轰产物以相同的速度运动，忽略了铝粉与理想组分的相互作用，因此，含铝炸药爆轰产物中的理想组分的状态方程可以表示为：

$$P_{explosive} = b\rho RT \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (1)}$$

其中， b 为含铝炸药中炸药组分的初始质量分数。

铝粉的燃烧状态近似表现为气相燃烧，且铝粉均匀分布于爆轰产物中，因此，铝粉燃烧对压力的贡献可表示为^[4]：

$$P_{Al} = \frac{a\lambda_{Al}\rho RT}{1 - nA_n} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (2)}$$

其中， R 为气体常数， λ_{Al} 为已经反应了的铝粉质量分数， ρ 为含铝炸药爆轰产物密度， a 为含铝炸药中铝粉的初始质量分数， n 为单位体积的摩尔数， A_n 为经验系数且是一个常数。

应用标准混合准则，含铝炸药爆轰产物的状态方程可表示为：

$$P_{total} = P_{explosive} + P_{Al} = \left(b + a \frac{\lambda_{Al}}{1 - nA_n}\right) \cdot \rho RT = A(\lambda_{Al}) \cdot \rho RT$$

$$\backslash * \text{MERGEFORMAT (3)}$$

其中， $A(\lambda_{Al}) = \left(b + a \frac{\lambda_{Al}}{1 - nA_n}\right)$ 。

通过热力学变换，可以得到微时间域 i 内含铝炸药爆轰产物的等熵方程：

$$\frac{P_{total}}{\rho^{\gamma_i}} = \left[\left(b + a \frac{\lambda_{Ali}}{1 - nA_n}\right) \cdot C_i R \right]^{\gamma_i} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (4)}$$

其中， C_i 为常数， λ_{Al_i} 为时间域 i 内的铝粉反应度，下标 i 表示第 i 时间域。

4.2 含铝炸药爆轰产物的非线性特征线模型

忽略爆轰产物流动过程中的热传递，因此，爆轰产物平面绝热运动的流体动力学方程组为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (5)}$$

对流场状态参数全微分得到

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_S d\rho + \left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_\rho dS \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (6)}$$

经变换联立方程组第一式得到

$$\frac{dp}{dt} - \left(\frac{\partial p}{\partial E}\right)_\rho \left(\frac{TdS}{dt}\right) + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (7)}$$

引入系数 λ ，联立方程组第二式和式得到

$$\lambda \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u + \frac{\rho c^2}{\lambda}\right) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \left(u + \frac{\lambda}{\rho}\right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] - \left(\frac{\partial p}{\partial E}\right)_\rho \left(\frac{TdS}{dt}\right) = 0 \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (8)}$$

令 $\lambda = \pm \rho c$ ，得到

$$\pm \rho c \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \pm c) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial p}{\partial t} + (u \pm c) \frac{\partial p}{\partial x} \right] - \left(\frac{\partial p}{\partial E}\right)_\rho \left(\frac{TdS}{dt}\right) = 0 \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (9)}$$

当 $\frac{dx}{dt} = u \pm c$ 时，方程可变为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u \pm c \\ \frac{dp}{dt} \pm \rho c \left(\frac{du}{dt}\right) - \left(\frac{\partial p}{\partial E}\right)_\rho \left(\frac{TdS}{dt}\right) = 0 \end{cases} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (10)}$$

根据含铝炸药爆轰产物的局部等熵假设，在每个小时间域内，爆轰产物的流动规律可近似认为是等熵流动，因此对于微时间域 i ，方程组可表示为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u_i \pm c_i \\ du_i \pm \frac{1}{\rho_i c_i} dp_i = 0 \end{cases} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (11)}$$

对方程组第二式求积分，得到

$$u_i \pm \int \frac{dp}{\rho c} = u_i \pm \int \frac{cd\rho}{\rho} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (12)}$$

根据爆轰产物的等熵方程，声速为 $c_i^2 = \gamma_i \left[(b + a \frac{\lambda_{Ali}}{1 - nA_n}) \cdot C_i R \right]^{\gamma_i} \rho_i^{\gamma_i - 1}$ ，于是可以得到

$$\int \frac{c_i d\rho_i}{\rho_i} = \int \frac{2}{\gamma_i - 1} dc_i = \frac{2}{\gamma_i - 1} c_i \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (13)}$$

由此可以得到爆轰产物的特征线方程

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u_i \pm c_i \\ u_i \pm \frac{2}{\gamma_i - 1} c_i = \text{常数} \end{cases} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (14)}$$

其中， u_i 和 c_i 分别表示微时间域 i 内爆轰产物的粒子速度和当地声速，由于在微时间域 i 内产物流动是局部等熵的，因此，沿特征线 u_i 和 c_i 的值保持不变。

3.2 含铝炸药爆轰驱动金属板的非线性特征线计算

假设长为 L 的含铝炸药和质量为 M 金属平板置于无限长刚性圆管中，炸药两侧为真空环境。采用一侧端面引爆炸药，炸药对金属平板驱动的特征线图如下所示：

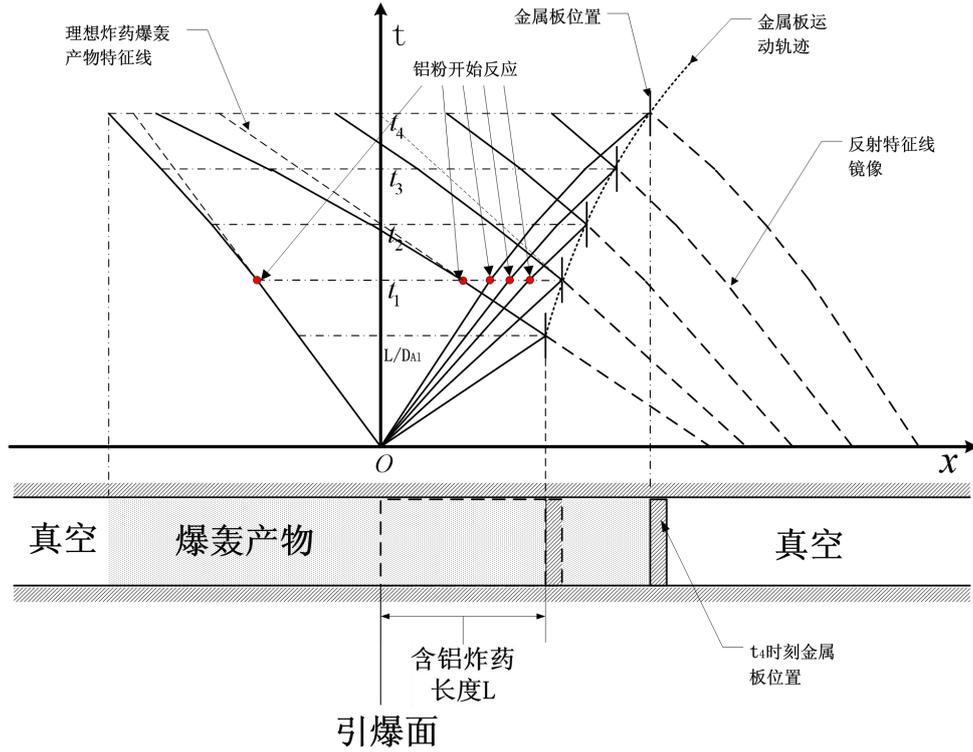


图 1 含铝炸药爆轰产物驱动金属板的特征线示意图

Fig. 1. Schematic diagram of characteristic line of aluminized explosive

设含铝炸药引爆时刻为 0 时刻，金属板后爆轰产物的流动方程可表示为：

$$\begin{cases} x = (u_i + c_i)t + F_i \\ x = (u_i - c_i)t + F'_i \end{cases} \quad \backslash * \text{ MERGEFORMAT (15)}$$

其中， u 为爆轰产物的粒子速度， c 为爆轰产物的当地声速， i 为产物状态参数所处的微时间域， F_i 为与铝粉反应度相关的特征线参数， F'_i 为与铝粉反应度和金属板运动相关的特征线参数。

根据经典力学牛顿第二定理可知：

$$M \frac{dV}{dt} = A_r p_m \quad \backslash * \text{ MERGEFORMAT (16)}$$

其中， M 为金属板的质量， V 为金属板的速度， A_r 为金属板横截面面积， p_m 为金属板内表面处爆轰产物的压强。基于局部等熵假设，在微时间域 i 内，可以得到如下关系：

$$\frac{p_m}{p_i} = \left(\frac{c_m}{c_i} \right)^\gamma \quad \backslash * \text{ MERGEFORMAT (17)}$$

其中， p_m 和 c_m 分别为紧挨金属板内表面处爆轰产物的压强和当地声速， p_i 和 c_i 分别为微时间域 i 内右传波到达金属板内表面前爆轰产物的初始压强和当地声速。将式代入式，得到：

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A_r p_i}{M c_i^\gamma} c_m^\gamma \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (18)}$$

爆轰产物中的每一道右传波都以各自的 $u + c$ 速度传播，并且在微时间域内沿特征线传播速度保持不变。当右传波追赶上运动的金属板时，右传波将发生反射，在此瞬间，爆轰产物的粒子速度立即由 u_i 降低为金属板壁面的速度 u_m ，声速也立即由 c_i 变为金属板后产物的声速 c_m ，从而得到：

$$u_i + c_i = u_m + c_m \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (19)}$$

对方程组中的第一式对时间 t 求导得到：

$$\frac{dx}{dt} = (u_m + c_m) + \left(\frac{du_m}{dt} + \frac{dc_m}{dt} \right) t \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (20)}$$

由于金属板内表面处的产物速度 u_m 与金属板运动的速度 V 相等，并且 $\frac{dx}{dt} = V = u_m$ ，

因此将式代入式，得到：

$$\frac{dc_m}{dt} + \frac{c_m}{t} + \psi c_m^\gamma = 0 \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (21)}$$

其中 $\psi = \frac{A_r p_i}{M c_i^\gamma}$ 。考虑到炸药处于无限长刚性圆管中，可认为爆轰产物在短时间内始终

处于高压状态，因此有 $\gamma \approx 3$ 。应用第二章中提到的参数变换法求解微分方程，得到：

$$\frac{1 + 2\psi c_m^2 t}{c_m^2 t^2} = \mathcal{G}_1 = \text{constant} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (22)}$$

在微时间域 1，即 $0 \sim t_1$ 时间段内，金属板后的爆轰产物的初始状态参数为：

$$\begin{cases} p_1 = p_H = \frac{1}{4} \rho_0 D_{Al}^2 \\ c_1 = c_H = \frac{3}{4} D_{Al} \end{cases} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (23)}$$

其边界条件为：

$$\begin{cases} t = \frac{L}{D_{Al}} \\ u_m = 0 \\ c_m = D_{Al} \end{cases} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (24)}$$

其中 ρ_0 为含铝炸药的初始密度， p_H 和 c_H 为爆轰波阵面上产物的压力和声速， L 为炸药的长度， D_{Al} 为含铝炸药的爆速。将边界条件代入式，得到：

$$g_1 = \frac{1+\eta}{L^2} = \text{constant} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (25)}$$

其中 $\eta = \frac{32}{27} \frac{m}{M}$ ， m 为炸药质量， $m = A_r L \rho_0$ 。

将式代入式，得到

$$c_m = \frac{L}{t} \xi_1 \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (26)}$$

其中 $\xi_1 = \left[1 + \eta \left(1 - \frac{L}{D_{Al} t} \right) \right]^{-0.5}$ 。

将式代入式，并积分得到

$$V = D_{Al} \left(1 + \frac{2(\xi_1 - 1)}{\eta \xi_1} - \frac{L \xi_1}{Dt} \right) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (27)}$$

此式表示在微时间域 1 内含铝炸药对质量为 M 的金属板的驱动规律。

基于局部等熵假设，结合以上方法，可以得到任意微时间域 i 内，爆轰产物对金属板的驱动速度如下：

$$\begin{cases} V - V(t_{i-1}) = \left(\frac{L \xi_i(t_{i-1})}{t_{i-1}} + \frac{2D_{Al}}{\eta} \frac{1}{\xi_i(t_{i-1})} - \frac{L \xi_i}{t} - \frac{2D_{Al}}{\eta \xi_i} \right) \\ \xi_i = \left(L^2 g_i - \frac{\eta L}{D_{Al} t} \right)^{-0.5} \\ g_i = \frac{1 + \frac{\eta c_m^2(t_{i-1}) t_{i-1}}{LD_{Al}}}{c_m^2(t_{i-1}) t_{i-1}^2} = \text{constant}_i \end{cases}$$

* MERGEFORMAT (28)

其中， t_{i-1} 表示微时间域 i 的起始时刻， $V(t_{i-1})$ 表示微时间域 i 的起始时刻金属板的速度。

4. 含铝炸药爆轰产物非线性特征线模型的实验验证

4.1 含铝炸药驱动金属板的实验结果

本实验选择 RDX 基含铝炸药作为驱动炸药，炸药中铝粉的平均直径为 5 微米和 50 微米两种，分别驱动厚 0.5mm 和 1mm 的紫铜板。炸药参数如下所示：

表 1 试验炸药参数和铜板尺寸

Table 2. Parameters of explosive and copper plate size

编号	炸药	铝/LiF 含量%	炸药密度/(g/cm ³)	铝粉直径/ μm	金属板尺寸/mm
1	RDX/Al/粘结剂	20	1.82	5	$\phi 50 \times 1$
2	RDX/Al/粘结剂	20	1.82	50	$\phi 50 \times 1$
3	RDX/LiF/粘结剂	20	1.8	--	$\phi 50 \times 1$
4	RDX/Al/粘结剂	20	1.82	5	$\phi 50 \times 0.5$
5	RDX/Al/粘结剂	20	1.82	50	$\phi 50 \times 0.5$
6	RDX/LiF/粘结剂	20	1.8	--	$\phi 50 \times 0.5$

注：炸药尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，粘结剂含量占炸药总量的 5%。

实验布置示意图如图 2 所示：

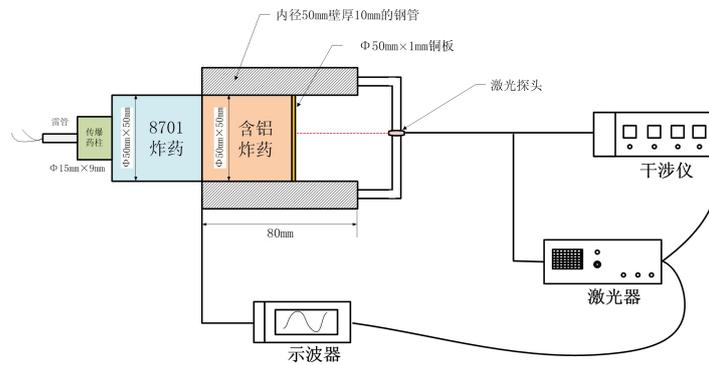
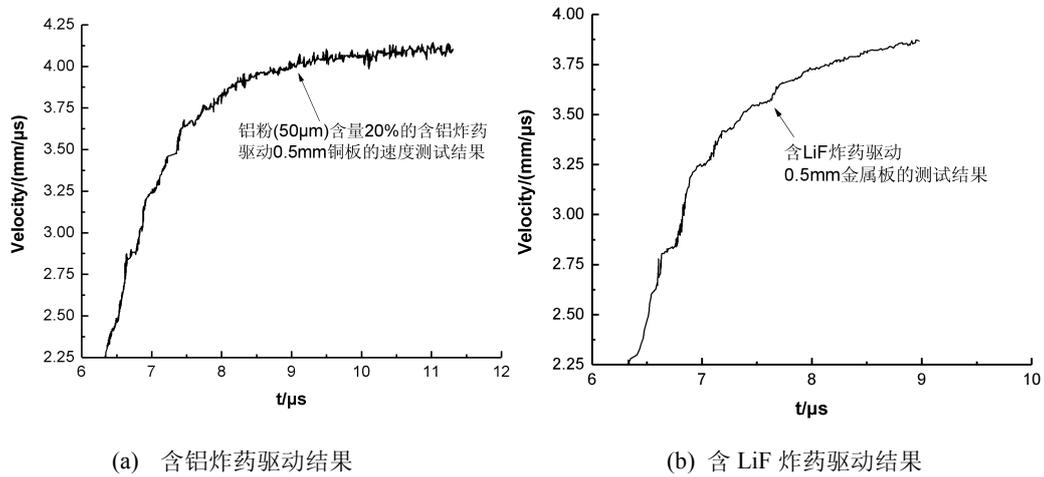


图 2 炸药驱动金属板实验布置示意图

Fig. 2. Schematic diagram of test arrangement of explosive driven metal plate

含铝炸药和含 LiF 炸药驱动金属板实验结果如图 3 和图 4 所示：



(a) 含铝炸药驱动结果

(b) 含 LiF 炸药驱动结果

图 3 含铝炸药和含 LiF 炸药驱动 0.5mm 厚铜板的测试结果

Fig. 3. The velocity of 0.5mm thick copper plate driven by aluminized explosive and LiF explosive

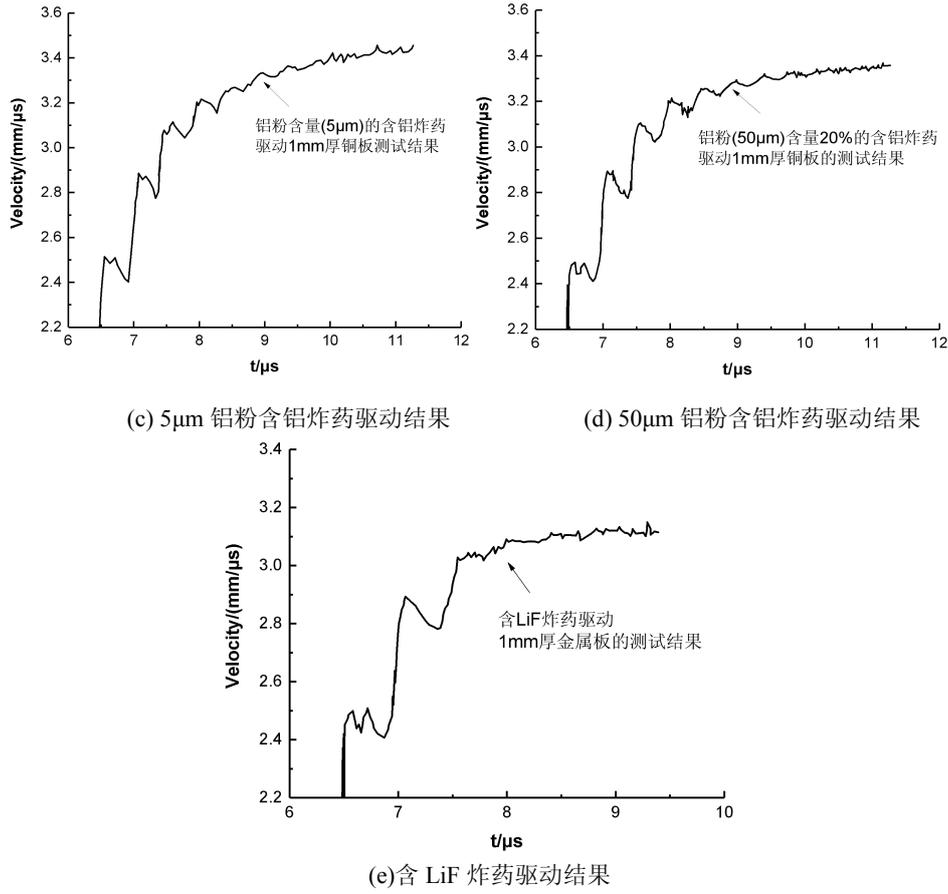


图 4 含铝炸药和含 LiF 炸药驱动 1mm 厚铜板的测试结果

Fig. 4. The velocity of 1mm thick copper plate driven by aluminized explosive and LiF explosive

4.2 实验条件下的铝粉反应度变化规律

在同等实验条件下，以含铝炸药驱动金属板的动能减去含 LiF 炸药驱动金属板的动能，就得到了铝粉反应释放能量对金属板所做的有用功：

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} M (V_{Al}^2(t) - V_{LiF}^2(t)) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (29)}$$

式中 M 为金属板的质量， V_{Al} 和 V_{LiF} 分别表示含铝炸药和含 LiF 炸药驱动金属板的运动速度。

设平板驱动实验的效率为 ϖ ，铝粉的氧化反应热为 Q_{Al} ，铝粉的反应度为 $\lambda(t)$ ，据此可得到：

$$\Delta E(t) = \varpi Q_{Al} m a \lambda(t) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (30)}$$

式中 m 表示含铝炸药的质量， a 表示含铝炸药中铝粉的百分含量。

将式代入式得到

$$\varpi Q_{Al} m a \lambda(t) = \frac{1}{2} M (V_{Al}^2(t) - V_{LiF}^2(t)) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (31)}$$

通过计算化学生成焓得到 $Q_{Al}=20.126\text{kJ/g}$ ，炸药驱动金属板的实验效率 ω 取 0.18，据此可计算出铝粉的反应度变化，计算得到的反应度变化规律如下：

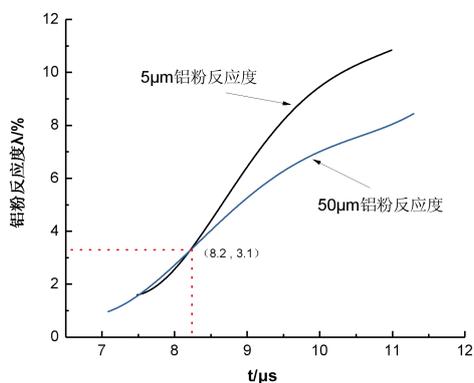


图 5 含铝炸药驱动 1mm 厚金属的铝粉反应度

Fig. 5. Reaction degree of aluminium powder of detonation products behind the 1mm thick copper plate

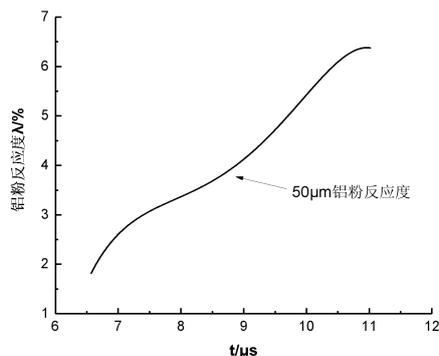


图 6 50 μ m 含铝炸药驱动 0.5mm 金属板的铝粉反应度

Fig. 6. Reaction degree of 50μm aluminium powder of detonation products behind the 0.5mm thick copper plate

4.3 非线性特征线理论计算结果与实验结果对比

含铝炸药和含 LiF 炸药驱动 0.5mm 和 1mm 厚金属板的实验和计算结果对比如图 7 和图 8 所示：

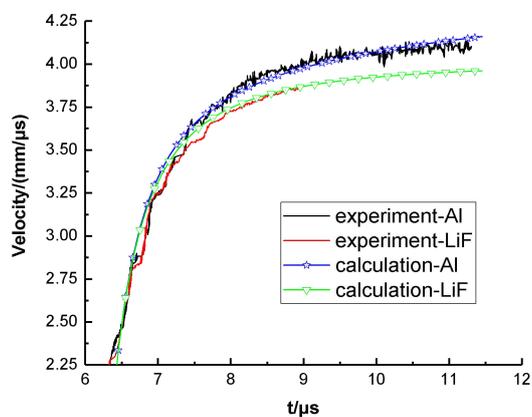


图 7 50 μ m 含铝炸药和含 LiF 炸药驱动 0.5mm 金属的实验和计算结果

Fig. 7. The test and calculated metal plate velocity driven by 50 μ m aluminized explosive and LiF explosive

从图 7 中的对比结果可以看出, 非线性特征线模型的计算结果与实验结果保持了较好的一致性。在 6.3 μ s~8 μ s 的驱动时间段内, 计算结果稍大于实验测试结果, 8 μ s 后计算结果与实验结果一致性较高。

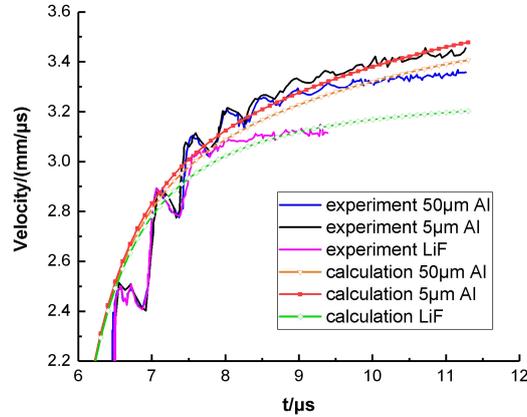


图 8 不同粒度含铝炸药和含 LiF 炸药驱动 1mm 金属板的实验和计算结果

Fig. 8. The test and calculated 1mm metal plate velocity driven by 5 μ m and 50 μ m aluminized explosive and LiF explosive

图 8 对比了 5 μ m 含铝炸药、50 μ m 含铝炸药和含 LiF 炸药对 1mm 厚金属板的实验和计算结果。计算结果较好的体现了铝粉反应对炸药做功能力的贡献以及铝粉粒度不同对炸药做功能力的影响, 但由于受到 1mm 金属板内应力波的影响, 驱动加速段实验测试结果波动较大。但总体而言, 非线性特征线模型能够较好的体现铝粉后期反应对做功能力的贡献, 且前期驱动结果与强约束条件下的驱动金属板实验结果保持较好的一致性。

5. 结论

- 1) 根据含铝炸药的二次反应特性, 提出了含铝炸药爆轰产物的局部等熵假设, 使理论分析含铝炸药爆轰产物的膨胀规律成为可能;
- 2) 结合理想炸药爆轰产物的近似状态方程和铝粉反应对压力的贡献方程, 得到了含铝炸药爆轰产物的状态方程, 能够描述铝粉反应对产物状态参数的贡献;
- 3) 在含铝炸药爆轰产物非等熵流动模型的基础上, 发展了针对含铝炸药爆轰驱动金属板和金属板后产物的非等熵膨胀过程, 得到了金属板运动的运动方程和板后爆轰产物流动的特征线方程;
- 4) 最后设计并实施了含铝炸药驱动金属板实验, 通过对比实验和理论计算结果, 非线性特征线模型可以很好的描述含铝炸药的爆轰驱动问题。

参考文献

- [1] M. A. Cook, A. S. Filler, R. T. Keyes, W. S. Partridge, and W. Ursenbach, *J. Phys. Chem.* 61, 189 (1957).
- [2] Philip J. Miller, A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives, *MRS (Materials Research Society)*, P413—420, (1996)
- [3] P. J. Miller and R. H. Guirguis, "Experimental Study and Model Calculations of Metal Combustion in Al/AP Underwater Explosives in Structure and Properties of Energetic Materials, Edited by J. Gilman, R. Armstrong and D. Liebenberg (*Mater. Res. Soc. Proc.*, MRS publication Vol. 296, page 299, Pittsburgh, PA, 1993.)

- [4] P. J. Miller and R. H. Guirguis, "Effects of Late Chemical Reactions on the Energy Partition in Non-Ideal Underwater Explosions", Proceedings of the Joint AIRAPT/APS Conference on High Pressure Science and Technology, June, 1993, Colorado Springs, CO., page 1417, 1993
- [5] D. L. Frost, S. Goroshin, R. Ripley, and F. Zhang. Effect of scale on the blast wave from a metalized explosive. In 13th International Detonation Symposium, Norfolk, VA, 23-28 July 2006.
- [6] D. L. Frost, S. Goroshin, J. Levine, R. Ripley, and F. Zhang. Critical conditions for ignition of aluminum particles in cylindrical explosive charges. In *AIP Conference Proceedings - Shock Compression of Condensed Matter*, pages 972-975, 2005.
- [7] F. Zhang, A. Yoshinaka, D. Frost, R. Ripley, K. Kim, and W. Wilson. Casing influence on ignition and reaction of aluminum particles in an explosive. In 13th International Detonation Symposium, Norfolk, VA, 23-28 July 2006.
- [8] R. C. Ripley, L. Donahue, T. E. Dumbar, and F. Zhang. Explosion performance of aluminized TNT in a chamber. In 19th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock, Calgary, AB, October 1-6 2006.
- [9] A. M. Milne, S. Cargill, K. Bennett, and A. W. Longbottom. Modelling of enhanced blast and heterogeneous explosives. In 19th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock, Calgary, AB, October 1-6 2006
- [10] M. A. Cooper, M. R. Baer, R. G. Schmitt, M. J. Kaneshige, R. J. Pahl, and P. E. DesJardin. Understanding enhanced blast explosives: A multiscale challenge. In 19th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock, Calgary, AB, October 1-6 2006.
- [11] J. Massoni, R. Saurel, A. Lefrancois, and G. Baudin. Modeling spherical explosions with luminized energetic materials. *Shock Waves*, 16(1):75-92, 2006.
- [12] K. Kim, W. Wilson, S. Peiris, C. Needham, C. Watry, D. J. Ortle, and F. Zhang. Effects of particle damage during detonation of thermobarics on subsequent reactions. In 21st International Colloquium, on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Poitiers, France, July 23-27 2007.
- [13] P. J. Miller, "Reaction Kinetics of Aluminum Particles in Detonation Gases," JANNAF PSHS Proceedings, San Diego, CA, CPIA publication 615, 1994, page 413.
- [14] Kim B, Park J, Lee K, et al. A reactive flow model for heavily aluminized cyclotrimethylene-trinitramine[J]. *Journal of Applied Physics*. 2014, 116(2): 23512.
- [15] Gogulya, M. F., Dolgoborodov, A. Yu., Brazhnikov, M. A. and Baudin, G. "Detonation Waves in HMX/Al Mixtures (Pressure and Temperature Measurements)," "Proceedings of the 13th International Detonation Symposium, Snowmass, Colorado, 30 August to 4 September, 1998.
- [16] Zhang F, Thibault P A and Link R. 2003. Shock Interaction with Solid Particles in Condensed Matter and Related Momentum Transfer. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 459:705-726
- [17] K. Balakrishnan, A. L. Kuhl, J. B. Bell, and V. E. Beckner, Ignition of aluminum particle clouds behind reflected shock waves, in 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS) (2011).
- [18] 陈朗, 龙新平等著. 含铝炸药爆轰[M].北京: 国防工业出版社,2004,6:93