

文章编号:1006-9941(2026)02-0154-11

# 含超细铝粉 AP/HTPB 复合固体推进剂燃烧特性的数值研究

白中元,余永刚

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 固体火箭推进剂的燃烧性能优化对发动机性能提升具有重要意义,其中铝颗粒因其高反应活性和高能量密度被广泛用作金属添加剂。基于气相五步反应机理构建了 AP/HTPB/Al 二维周期性三明治均质化稳态燃烧模型,并通过数值模拟与实验数据对比验证了模型的可靠性。研究发现,随着压力从 0.2 MPa 增至 6.5 MPa,火焰结构呈现从预混燃烧向扩散燃烧转变的变化规律,同时热释放核心逐渐向燃烧表面靠近。在恒定压力条件下,推进剂的燃烧速率随超细铝粉(UFAI)含量的增加显著提高,而其压力指数则随 UFAI 含量的增加呈现先降后升的变化趋势,这意味着在提升燃速的同时需兼顾燃烧稳定性,两者之间存在一定的平衡区间。

**关键词:** 复合固体推进剂;超细铝粉;火焰结构;燃烧速率;压力指数

中图分类号: TJ55;V512

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025173

## 0 引言

以高氯酸铵(Ammonium Perchlorate, AP)、端羟基聚丁二烯(Hydroxyl-terminated Polybutadiene, HTPB)和铝粉(Aluminum, Al)为主要成分的 AP/HTPB/Al 复合固体推进剂,因其高比冲、良好的燃烧稳定性以及较高的能量密度,已成为当前固体火箭发动机中应用最广泛的重要推进剂体系。其燃烧过程涉及复杂的多相反应与传热传质现象。在燃烧理论研究方面,Beckstead 等<sup>[1]</sup>通过系统的实验观测,提出了具有重要影响的 BDP 多火焰模型,该模型为后续复合推进剂燃烧特性研究奠定了理论基础。Price 等<sup>[2-3]</sup>采用扫描电镜(SEM)表征技术,将推进剂的宏观燃烧过程简化为微观三明治单元燃烧,并通过三明治结构实验,定量分析了黏结剂宽度对燃烧速率的影响,验证了三明治结构模型的适用性;叶锐等<sup>[4]</sup>基于无量纲 Pe 数研究了 AP 含量变化对燃烧行为的影响;叶振威、陈王琦和赵健锋等<sup>[5-7]</sup>则在旋转、亚大气及不同压力工况下应用该模

型,均获得与实验高度一致的结果,充分证明了三明治结构模型在推进剂燃烧模拟中的可靠性和适用性。

推进剂组分含量的微小变化可能会显著影响其燃烧特性。Price 与 Isert 等<sup>[8-9]</sup>的实验研究表明,减小 AP 颗粒的粗细比(即增加细颗粒的比例)将显著提高推进剂的燃烧速率;Kohga 等<sup>[10]</sup>进一步指出,AP 颗粒的粒径减小同样有助于提升燃速。除此之外,铝颗粒的大小也对燃烧效率产生关键影响。Dokhan 等<sup>[11]</sup>研究发现,与粒径大于 15  $\mu\text{m}$  的粗铝颗粒相比,添加粒径小于 3  $\mu\text{m}$  的超细铝颗粒(本研究统称为 UFAI)可使燃烧速率提高数倍。这一现象源于黏结剂与粗 AP 颗粒交界处的前缘火焰为近表面铝颗粒提供了点火热源,而 UFAI 颗粒因其更大的比表面积和更高的反应活性,使燃烧区域更靠近推进剂表面,从而显著提升了整体燃烧效率。Stephens 等<sup>[12]</sup>的研究发现,在粒径达到超细尺度范围(即粒径小于 3  $\mu\text{m}$ )时,其尺寸的变化对燃烧速率的影响趋于平缓,因此在数值模拟时可以不区分超细尺度范围内的铝颗粒大小。为准确模拟小颗粒的燃烧行为,Jackson 等<sup>[13]</sup>提出黏结剂与小颗粒均匀混合的假设,并基于 Dothan 等<sup>[14]</sup>的实验配方建立了数值模型,计算结果与实验数据较为吻合。在此基础上,Liu 等<sup>[15-16]</sup>构建了详细的化学反应动力学模型,研究了 AP/HTPB/Al 复合推进剂表面的共轭传热传质机理,并深入分析了压力对瞬态燃烧特性的影响规律。Chen 等<sup>[17]</sup>进一

收稿日期:2025-08-04;修回日期:2025-10-24

网络出版日期:2025-12-17

作者简介:白中元(1999-),男,硕士研究生,主要从事含能材料燃烧推进理论与技术研究。e-mail:baizhongyuan1226@163.com

通信联系人:余永刚(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事含能材料瞬态燃烧机理与相关技术研究。e-mail:yygnjust801@163.com

引用本文:白中元,余永刚.含超细铝粉 AP/HTPB 复合固体推进剂燃烧特性的数值研究[J].含能材料,2026,34(2):154-164.

BAI Zhong-yuan, YU Yong-gang. Numerical Study on the Combustion Characteristics of Aluminized AP/HTPB[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2026, 34(2):154-164.

步提出半全局反应动力学模型,分析了 UFAl 对推进剂燃烧速率和温度敏感性的影响,为推进剂燃烧机理研究提供了新的理论框架。

为了进一步研究 AP/HTPB/Al 复合固体推进剂的燃烧特性及火焰结构,本研究基于 BDP 多火焰理论框架,构建了包含气固两相耦合效应的二维三明治均质化稳态燃烧模型,采用气相五步化学反应动力学机制描述燃烧过程。通过编写用户自定义函数(UDF)并将其集成至 Fluent,数值分析了 0.2~6.5 MPa 压力范围内 AP/HTPB/Al 燃烧特性演化规律,重点探究了不同 UFAl 含量对燃烧性能的影响,这项工作可为优化含铝推进剂的配方设计提供一定的理论参考。

## 1 物理模型

图 1 为本研究 AP/HTPB/Al 二维三明治均质化稳态燃烧模型,其中 Blend 为 HTPB、小粒径 AP 颗粒和 UFAl 组成的黏结剂混合物。针对该模型,现作出如下简化假设:

(1) 鉴于气相产物流动满足马赫数低于 0.3 的条件,将气相各组分假设为不可压缩理想气体。导热系数是随温度变化的函数,  $Le=1$ ;

(2) 固相各组分作为独立的单元,相互之间不发生化学反应,认为固相转化为气相的相变过程仅发生在靠近燃烧表面的一个薄层内,通过质量、能量通量平衡以及温度连续性关系耦合气固两相;

(3) 不考虑气相反应生成的固相产物,忽略高温气体和铝颗粒的辐射作用,同时认为铝粉不存在异常的裹挟溅射行为;

(4) 采用 Arrhenius 定律描述固相热分解;

(5) 将超细铝颗粒视为在 HTPB 中均匀分布;

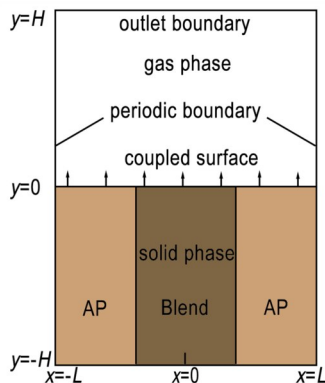


图 1 AP/HTPB/Al 推进剂三明治燃烧模型

Fig.1 Combustion model of a sandwiched AP/HTPB/Al propellant

(6) 采用源项法描述固相热分解和气相扩散燃烧过程。

## 2 数学模型

### 2.1 气相控制方程

根据文献[18],气相控制方程采用质量、动量、能量和组分守恒方程。由于本研究针对稳态燃烧过程,因此方程中舍去了非稳态项,且压力  $p$  为常数。

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho_g \mathbf{U}) = S_m \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho_g \mathbf{U} \mathbf{U}) = \frac{1}{3} \nabla \cdot (\mu_g \nabla \mathbf{U}) - \nabla p + \mu_g \Delta \mathbf{U} + S_i \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho_g T_g \mathbf{U}) - \nabla \cdot \left( \frac{\lambda_g}{c_p} \nabla T_g \right) = S_T \quad (3)$$

组分守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho_g Y_i \mathbf{U}) - \nabla \cdot \left( \frac{\lambda_g}{c_p} \nabla Y_i \right) = S_{Y_i} \quad (4)$$

状态方程:

$$\frac{\rho_g R_u T}{M_u} = p \quad (5)$$

气相导热系数  $\lambda_g$  是一个随温度变化的函数,采用关系式如式(6):

$$\lambda_g = 1.08 \times 10^{-4} T \times 0.0133 \quad (6)$$

式(1)~式(5)中,  $\mathbf{U}$  为速度矢量,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho_g$  为气相密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\mu_g$  为粘性系数,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T$  为气相温度,  $\text{K}$ ;  $c_p$  为气相定压比热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $Y_i$  为气相组分的质量分数,为无量纲;  $M_u$  为摩尔质量,  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R_u$  为通用气体常数,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $S_m$  是气相质量源项,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ ;  $S_i$  是气相动量源项,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $S_T$  是气相能量源项,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $S_{Y_i}$  是气相组分源项,为无量纲;  $\lambda_g$  是气相导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

### 2.2 固相控制方程

为描述固相区域的能量传递过程,本研究采用固相能量守恒方程<sup>[18]</sup>。该方程通过导热项与固相材料的热物性参数建立能量变化关系,其形式可表示为:

$$\frac{\lambda_s}{c_s \rho_s} \cdot \Delta T = S_C \quad (7)$$

式中,  $\lambda_s$  为固相导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $c_s$  为固相比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\rho_s$  为固相密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $S_C$  为固相能量源项,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中,  $\lambda_s$ 、 $c_s$  和  $\rho_s$  的取值采用分段常数的形式,如式(8)所示:

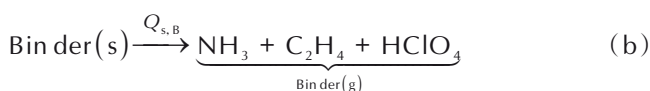
$$\lambda_s = \begin{cases} \lambda_{AP} \\ \lambda_B \end{cases}, c_s = \begin{cases} c_{AP} \\ c_B \end{cases}, \rho_s = \begin{cases} \rho_{AP} (x \subseteq AP) \\ \rho_B (x \subseteq Blend) \end{cases} \quad (8)$$

式中,下标 AP 和 B 分别表示氧化剂 AP 和 Blend。

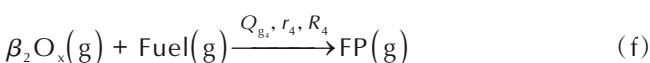
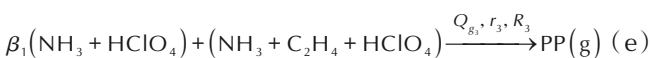
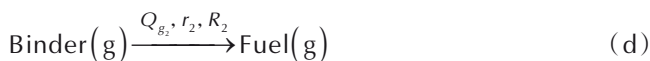
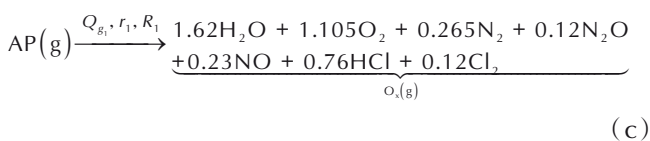
### 2.3 化学反应动力学机理

化学反应主要分为固相热解过程和气相反应过程。本研究采用的固相热解模型和气相五步反应动力学模型引自 Chen 等<sup>[17]</sup>的研究。由于固相各组分之间不发生相互化学反应,而是各自独立进行热分解,因此固相热解过程采用了简化的两步反应模型。气相模型在均质化黏结剂假设下,基于 Gross 等<sup>[19]</sup>提出的四步反应机理(在传统三步反应基础上引入黏结剂自反应),进一步加入了铝颗粒与氧化性气体的反应  $R_5$ , 使其适用于含铝推进剂体系。这一改进使得模型能够更全面地描述推进剂的复杂燃烧过程。具体形式如下:

固相热解过程:



气相反应过程:



式中,  $Q_{s,AP}$  与  $Q_{s,B}$  分别是 AP 和 Blend 的分解热,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $Q_{g1} \sim Q_{g5}$  是气相的化学反应热,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $\beta_1 \sim \beta_3$  是相应反应的化学计量系数;  $R_1 \sim R_5$  是对应的化学反应步骤;  $r_1 \sim r_5$  是气相化学反应速率,  $cm \cdot s^{-1}$ , 它遵循压力相关的 Arrhenius 定律<sup>[18]</sup>:

$$r_g = Dp^n \exp\left(-\frac{E_A}{R_u T_g}\right) \prod_{i=1}^n [Y_i] \quad (9)$$

式中,  $i$  的取值范围为 1~5;  $n$  为压力指数,  $n_1, n_2, n_3, n_4$  和  $n_5$  的取值<sup>[17,19]</sup> 分别为 1.6、1.7、1.7、1.7 和 1.8;  $D$  表示化学反应速率常数,  $g \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1} \cdot bar^{-n}$ ;  $p$  表示压力工况, bar;  $E_A$  表示反应活化能,  $J \cdot mol^{-1}$ ;  $Y_i$  表示参与化学反应相应组分的质量分数, 为无量纲。

$Q_{s,AP}$  与  $Q_{s,B}$  的取值同样采用分段常数的形式, 如式(10)所示:

$$Q_s = \begin{cases} Q_{s,AP} (x \subseteq AP) \\ Q_{s,B} (x \subseteq Blend) \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_{s,B} = \omega_{AP} Q_{s,AP} + \omega_{HTPB} Q_{s,HTPB} \quad (11)$$

式中,  $\omega_{AP}$  和  $\omega_{HTPB}$  分别是 Blend 中 AP 和 HTPB 的质量分数。

### 2.4 黏结剂混合物的特性

为合理地考虑 Blend 中小颗粒的燃烧效应, 本研究采用了 Jackson 等<sup>[13]</sup>对黏结剂混合物的均质化处理办法。Blend 的燃烧速率  $r_b$  如式(12):

$$r_b = A_B \exp\left(-\frac{E_B}{R_u T}\right) \quad (12)$$

$$A_B = (A_{AP})^{t_{AP}} (A_{HTPB})^{t_{HTPB}}, E_B = t_{AP} E_{AP} + t_{HTPB} E_{HTPB} \quad (13)$$

关于二维模型 Blend 的导热系数  $\lambda_B$  采用式(14)计算:

$$1 = (1 - t_{AP})^2 \left(\frac{1-x}{f-x}\right)^2 f \quad (14)$$

式(12)~式(14)中,  $r_b$  是 Blend 的燃烧速率,  $cm \cdot s^{-1}$ ;  $A_B, A_{AP}$  和  $A_{HTPB}$  分别是 Blend、AP 和 HTPB 的热解速率常数,  $cm \cdot s^{-1}$ ;  $E_B, E_{AP}$  和  $E_{HTPB}$  分别是 Blend、AP 和 HTPB 的热解活化能,  $J \cdot mol^{-1}$ ;  $t_{AP}$  和  $t_{HTPB}$  是 Blend 中 AP 和 HTPB 的体积分数,  $t_{AP} = 1 - t_{HTPB} - t_{Al}$ ;  $f$  是 Blend 与 HTPB 的导热系数之比,  $x$  是 AP 与 HTPB 的导热系数之比。

### 2.5 气固耦合关系

燃面质量通量平衡方程:

$$\rho_g(\mathbf{Un} + r_s) = \rho_s r_s \quad (15)$$

燃面能量通量平衡方程:

$$\lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0^+} = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0^-} - \rho_s r_s Q_s \quad (16)$$

燃面温度连续性方程:

$$T \Big|_{y=0^+} = T \Big|_{y=0^-} \quad (17)$$

燃面组分通量平衡方程:

$$\rho_g(\mathbf{Un} + r_s) Y_{i,0^+} - \frac{\lambda_g}{c_p} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \Big|_{y=0^+} = \rho_s r_s Y_{i,0^-} \quad (18)$$

式(15)~式(18)中, 下标“0<sup>+</sup>”和“0<sup>-</sup>”分别表示气相侧和固相侧;  $\mathbf{n}$  是燃面的单位法向量;  $r_s$  是固相燃烧速率,  $cm \cdot s^{-1}$ , AP 和 Blend 的燃烧速率分别为:

$$r_s = \begin{cases} A_{AP} \exp(-E_{AP}/R_u T) (x \subseteq AP) \\ A_B \exp(-E_B/R_u T) (x \subseteq Blend) \end{cases} \quad (19)$$

## 2.6 边界条件

针对图 1 所示的计算模型,计算域宽度为半周期长度  $L=50\ \mu\text{m}$ ,高度为  $2H=1000\ \mu\text{m}$ ;燃面位于  $Y=0$  处,  $Y>0$  和  $Y<0$  处分别为气相区域和固相区域;  $X=0\ \mu\text{m}$  及  $X=50\ \mu\text{m}$  的左右边界为对称边界,各物理量沿  $x$  方向的梯度为零;  $Y=500\ \mu\text{m}$  处是气相远场边界,温度和组分沿  $y$  方向的梯度为零;  $Y=-500\ \mu\text{m}$  处为固相远场边界,温度为  $300\ \text{K}$ 。

## 3 模型验证

### 3.1 计算方法和参数

采用基于有限体积法的计算流体力学(CFD)软件 Fluent,选用压力基求解器,通过用户自定义标量(UDS)引入组分方程,通过用户自定义函数(UDF)引入各方程的源项。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,密度、动量、能量和组分方程的离散采用二阶迎风格式,梯度采用 Least Squares Cell Based 的格式。计算所需参数如表 1 所示,其可靠性已在相应研究<sup>[17-19]</sup>中得到验证。

表 1 AP/HTPB/Al 复合固体推进剂的相关计算参数<sup>[17-19]</sup>

Table 1 Calculated parameters for the AP/HTPB/Al composite solid propellant

parameter	value	parameter	value
$A_{\text{AP}} / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.45 \times 10^5$	$\rho_{\text{Al}} / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2700
$A_{\text{HTPB}} / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.036 \times 10^3$	$D_1 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-n_1}$	$2.7 \times 10^4$
$E_{\text{AP}} / R_u / \text{K}$	11000	$D_2 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-n_2}$	$2.53 \times 10^4$
$E_{\text{HTPB}} / R_u / \text{K}$	7500	$D_3 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-n_3}$	$5 \times 10^3$
$Q_{\text{s,AP}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$-4.186 \times 10^5$	$D_4 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-n_4}$	400
$Q_{\text{s,HTPB}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$-1.967 \times 10^5$	$D_5 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-n_5}$	$1 \times 10^4$
$Q_{\text{B1}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$1.8 \times 10^6$	$E_{\text{A,1}} / R_u / \text{K}$	8000
$Q_{\text{B2}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$1.87 \times 10^6$	$E_{\text{A,2}} / R_u / \text{K}$	7300
$Q_{\text{B3}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3.5 \times 10^7$	$E_{\text{A,3}} / R_u / \text{K}$	5689
$Q_{\text{B4}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$8.9 \times 10^6$	$E_{\text{A,4}} / R_u / \text{K}$	7300
$Q_{\text{B5}} / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3 \times 10^6$	$E_{\text{A,5}} / R_u / \text{K}$	10901
$\lambda_{\text{AP}} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.405	$\beta_1$	3.88
$\lambda_{\text{HTPB}} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.276	$\beta_2$	3.88
$\lambda_{\text{Al}} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	204.1	$\beta_3$	1
$\rho_{\text{AP}} / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1950	$M_u / \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	32
$\rho_{\text{HTPB}} / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	920	$R_u / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8.314

Note:  $A_{\text{AP}}$  and  $A_{\text{HTPB}}$  are the reaction rate constant,  $E_{\text{AP}}$  and  $E_{\text{HTPB}}$  are the decomposition activation energies,  $Q_{\text{s,AP}}$  and  $Q_{\text{s,HTPB}}$  are the heat of decomposition of AP and HTPB, respectively.  $\lambda_{\text{AP}}$ ,  $\lambda_{\text{HTPB}}$  and  $\lambda_{\text{Al}}$  are the thermal conductivities,  $\rho_{\text{AP}}$ ,  $\rho_{\text{HTPB}}$  and  $\rho_{\text{Al}}$  are the densities of AP, HTPB and Al.  $D$  is the gas phase reaction rate constant.  $Q_g$  is the heat of chemical reaction in the gas phase.  $E_A$  is the activation energies of gas phase reaction.  $R_u$  is the universal gas constant.  $\beta$  is the stoichiometric coefficient of the corresponding reactions.  $M_u$  is the molar mass of the gas.

### 3.2 网格无关性验证

本研究采用四边形结构化网格,并通过设置网格总数为 2.5 万、6 万和 7.2 万对模型进行网格无关性验证。计算了在压力为 6.5 MPa 时 3 种网格总数下推进剂的平均燃烧速率和温度最大值,计算结果如表 2 所示。分析表明,这两项监测值的误差均在 4% 以内,说明计算结果对网格疏密程度不敏感,验证了网格的独立性。

表 2 3 种网格总数下推进剂平均燃烧速率和温度最大值

Table 2 The average burn rate and maximum temperature of the propellant under three different grid resolutions

grid resolutions	$r_b / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$T / \text{K}$
25000	1.9832	3578.518
60000	2.0405	3589.101
72000	2.0562	3589.323

Note:  $r_b$  is the burn rate of the propellant and  $T$  is the maximum temperature of the gas phase.

考虑计算效率、经济性及求解精度等因素,最终选用总网格数为 6 万的模型开展数值模拟,并确定了优化的网格划分方法。其中,  $x$  方向采用均匀划分,网格间隔为  $0.5\ \mu\text{m}$ ;  $y$  方向则在气相区和固相区采用渐变网格,最小网格尺寸为  $0.5\ \mu\text{m}$ ,最大网格尺寸为  $3.5\ \mu\text{m}$ 。

### 3.3 模型有效性验证

在开展数值计算之前,首先验证 AP/HTPB/Al 复合固体推进剂燃烧模型的有效性。Dokhan 等<sup>[14]</sup>制备了一系列包含不同比例细 AP 颗粒和 UFAl 颗粒的黏结剂混合体系,并分别在 1.38~6.90 MPa 的压力范围内进行了推进剂燃烧试验,以评估火焰前沿对铝颗粒点火的热源作用。本研究选用总组分为 87.5% AP 与 12.5% 黏结剂的体系,黏结剂选用 M29 配方,具体组成为 70.9% 细 AP 颗粒、21.9% HTPB 和 7.2% UFAl,其中,将粒径  $400\ \mu\text{m}$  的 AP 视为主要氧化剂,占总质量的 87.5%;粒径  $10\ \mu\text{m}$  的 AP 则作为黏结剂中的细颗粒成分。计算所得平均燃速与实验结果对比,如图 2 所示。由图可见,模拟值与实验值吻合良好;同时,计算得到的压力指数为 0.3611,与 Galfetti 等<sup>[20]</sup>报道的 0.35~0.44 范围一致,进一步证明了所用燃烧模型的可靠性。

## 4 数值模拟结果与分析

### 4.1 火焰结构特性

不同压力工况下 AP/HTPB/Al 复合推进剂  $R_4$  和  $R_5$  的容积热释放速率 ( $Q=Q_{g_4}r_4+Q_{g_5}r_5$ ) 分布云图如图 3 所

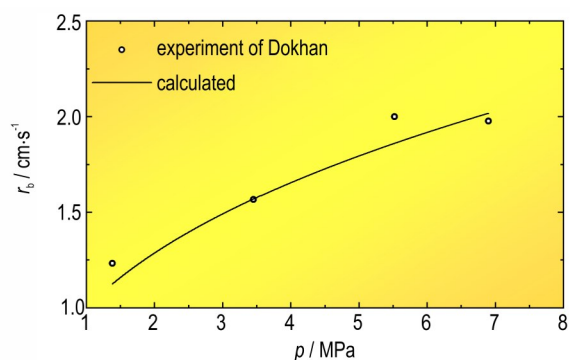


图2 平均燃速计算值与试验结果<sup>[14]</sup>对比

Fig.2 Calculated results and experimental results<sup>[14]</sup> comparison of the burn rates

示。研究表明,火焰结构特性随压力变化呈现明显的阶段性特征:在0.2~0.4 MPa 低压条件下,由于扩

散预混速率显著高于化学反应速率,燃料和铝颗粒能够在燃烧前与氧化剂充分混合,形成相互连接的火焰区域,表现为典型的预混火焰特征。此时,燃烧热释放核心区域呈现单一整体结构(图 3a~b)。随着压力升高至 0.4~1.3 MPa 中压范围时,化学反应速率逐渐增大,而物质的扩散系数相应降低,导致燃烧过程由化学动力学和扩散混合共同主导。这种转变使得火焰结构从预混火焰逐渐向预混扩散火焰过渡,同时燃烧热释放核心区域也由单一整体结构演变为双核心结构(图 3c)。当压力进一步升高至 2.2~6.5 MPa 高压范围时,物质的扩散作用主导整个燃烧过程,此时的火焰结构已完全转变为扩散火焰,且随着压力的不断升高,扩散反应区域呈现明显的“细长化”特征,燃烧热释放核心更加靠近推进剂表面(图 3d~f)。

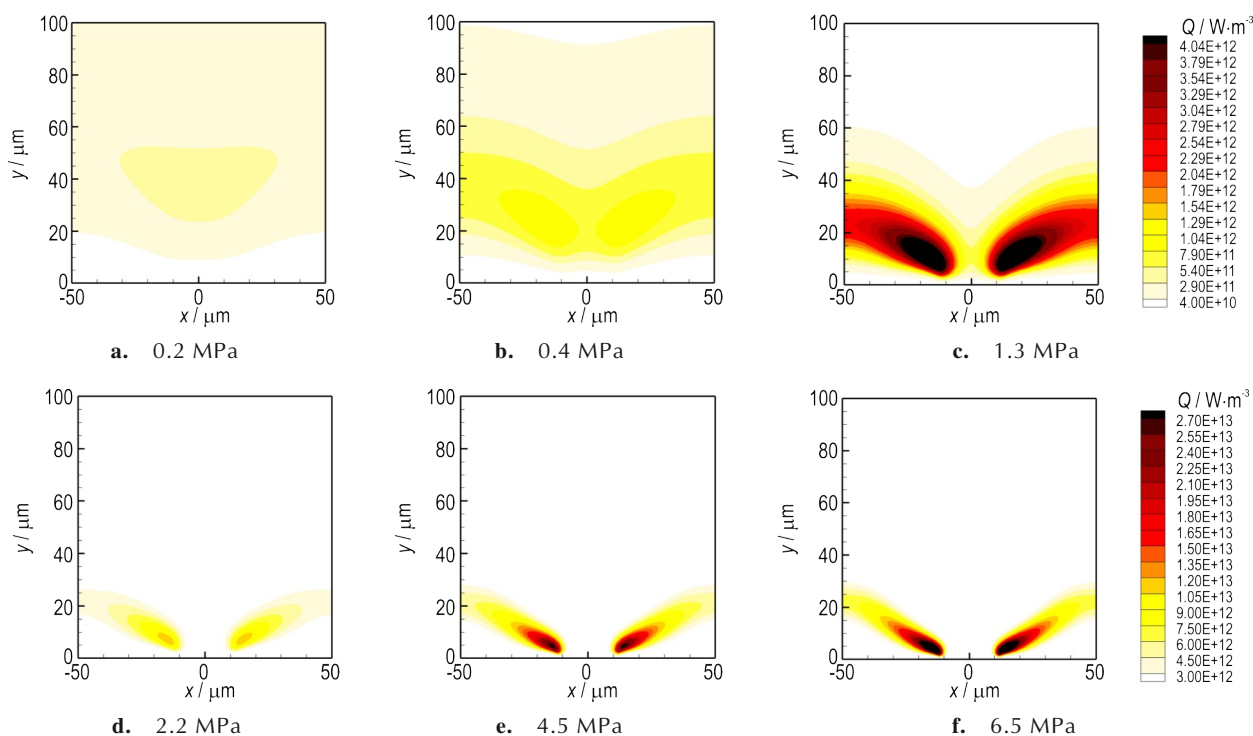


图3 不同压力下  $R_4$  和  $R_5$  容积热释放速率分布

Fig.3 Volume heat release rate distributions of  $R_4$  and  $R_5$  at different pressures

氧化性气体( $O_x$ )是推进剂燃烧过程中重要的活性组分,既是  $R_1$  反应的生成物,也是  $R_4$  和  $R_5$  反应的反应物。研究  $O_x$  的分布特征对于理解化学反应与扩散过程对燃烧行为的影响具有重要意义。本研究中,将组分分布定义为某组分在特定位置处的质量占该位置气相总质量的比例,即质量分数。图 4 给出了不同压力下  $O_x$  的分布情况。在 0.2 MPa 时,  $O_x$  在气相中分布均匀,最大质量分数仅为 0.46(图 4a),这说明此时  $O_x$  已

在燃烧前与燃料和 UFAl 充分混合,支持预混火焰的形成。随着压力增高,  $O_x$  在气相中的分布不均匀性变大,其分布逐渐向 AP 表面富集,最大值上升至 6.5 MPa 时的 0.82(图 4b~f)。根据 Arrhenius 定律,反应速率公式中压力作为指数函数的底数,压力的升高会使  $R_1$  的反应速率急剧升高,但扩散速率并未得到大的提升,这使得  $O_x$  在 AP 表面累积,火焰结构逐渐由化学反应主导的预混火焰结构向扩散混合主导的扩散火焰结构转变。

不同压力下 UFAl 的空间分布和气相火焰温度分布如图 5~6 所示。从图 5 可见,随着压力升高,AP 上方的浅色区域逐渐扩大,而 Blend 表面的深色区域则

逐渐收缩直至消失。AP 上方区域的扩大是因为压力增加使  $O_x$  在气相中的分布由均匀逐渐向 AP 上方集中,更多 UFAl 在该区域参与反应; Blend 表面深色区

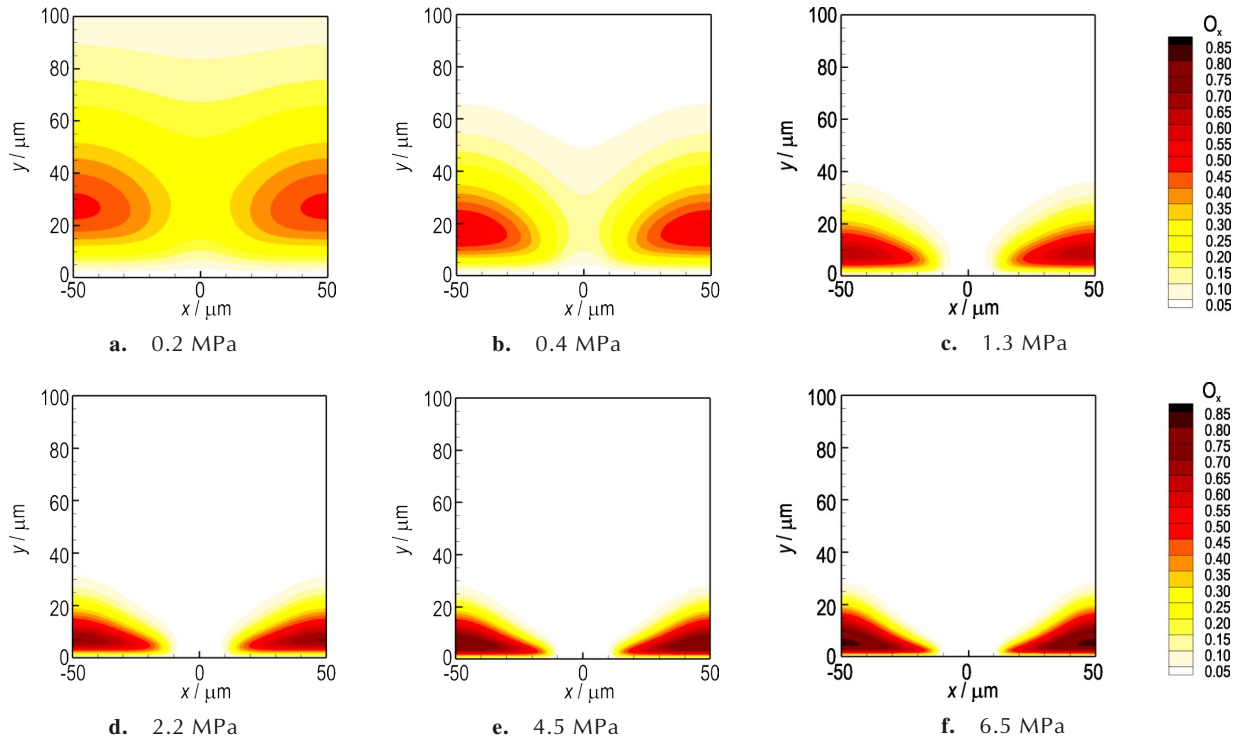


图 4 不同压力下  $O_x$  组分分布

Fig.4  $O_x$  concentration distributions at different pressures

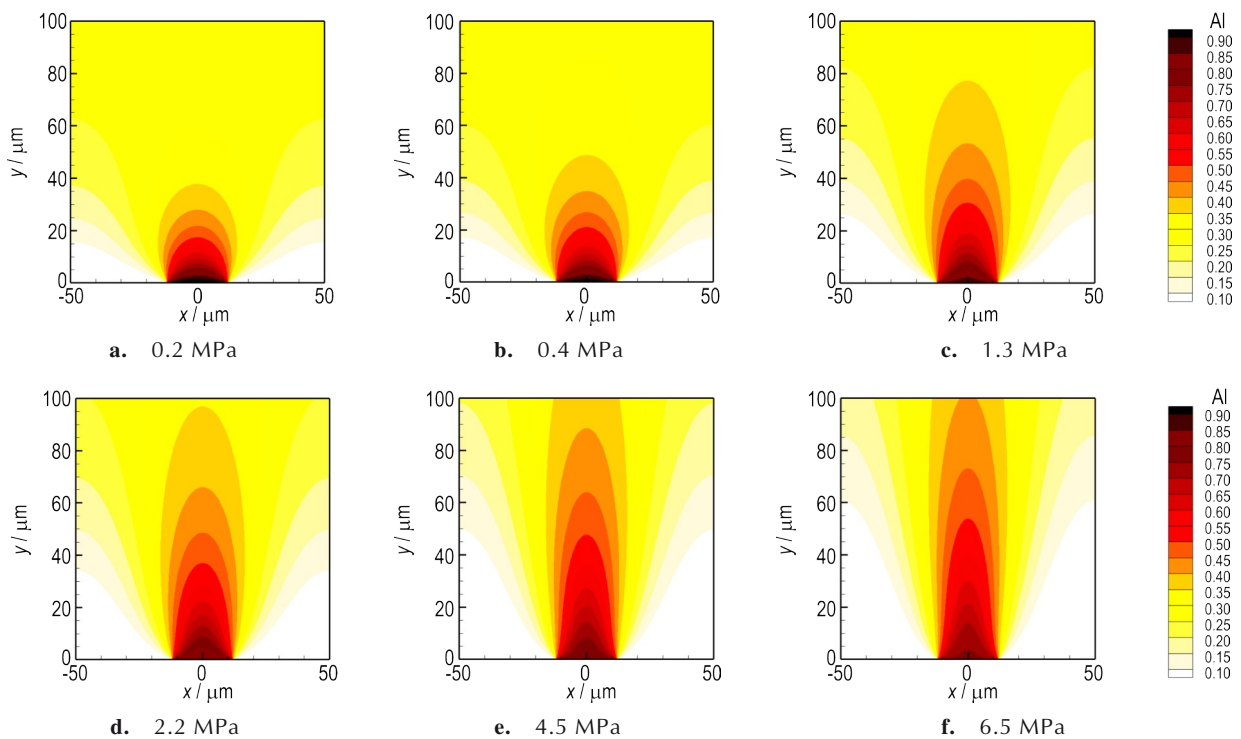


图 5 不同压力下 UFAl 组分分布

Fig.5 UFAl concentration distributions at different pressures

域的消失则是由于 Blend 中虽含少量 AP, 但生成的  $O_x$  有限, 其表面的 UFAI 消耗了这些氧化性气体。剩余未反应的 UFAI 由于对流输运效果被吹离表面, 从而使 UFAI 的空间分布随压力增大逐渐呈现“纵伸横窄”的特征。从图 6 可见, 低压下 (图 6a~b), 化学反应速率较慢, 燃料与氧化性气体在反应前能够充分混合, 形成连续的预混火焰。随着压力升高 (图 6c), 化学反应速率显著增强, 而扩散混合受到抑制, 燃烧过程同时受反

应速率与扩散过程控制, 预混火焰与扩散火焰并存, 扩散火焰逐渐向 AP 上方偏移, AP 上方高温区分裂为两部分并靠近表面。进一步升压后 (图 6d~f), AP 上方生成的  $O_x$  显著增多, 扩散火焰集中于靠近 AP 表面的区域; 而 Blend 上方虽也能生成少量  $O_x$ , 但不足以完全氧化其中的 UFAI 与燃气, 剩余的燃气和 UFAI 在对流输运作用下被带离表面, 使 Blend 上方的火焰被拉伸, 最终形成“中间高、两侧低”的火焰形态。

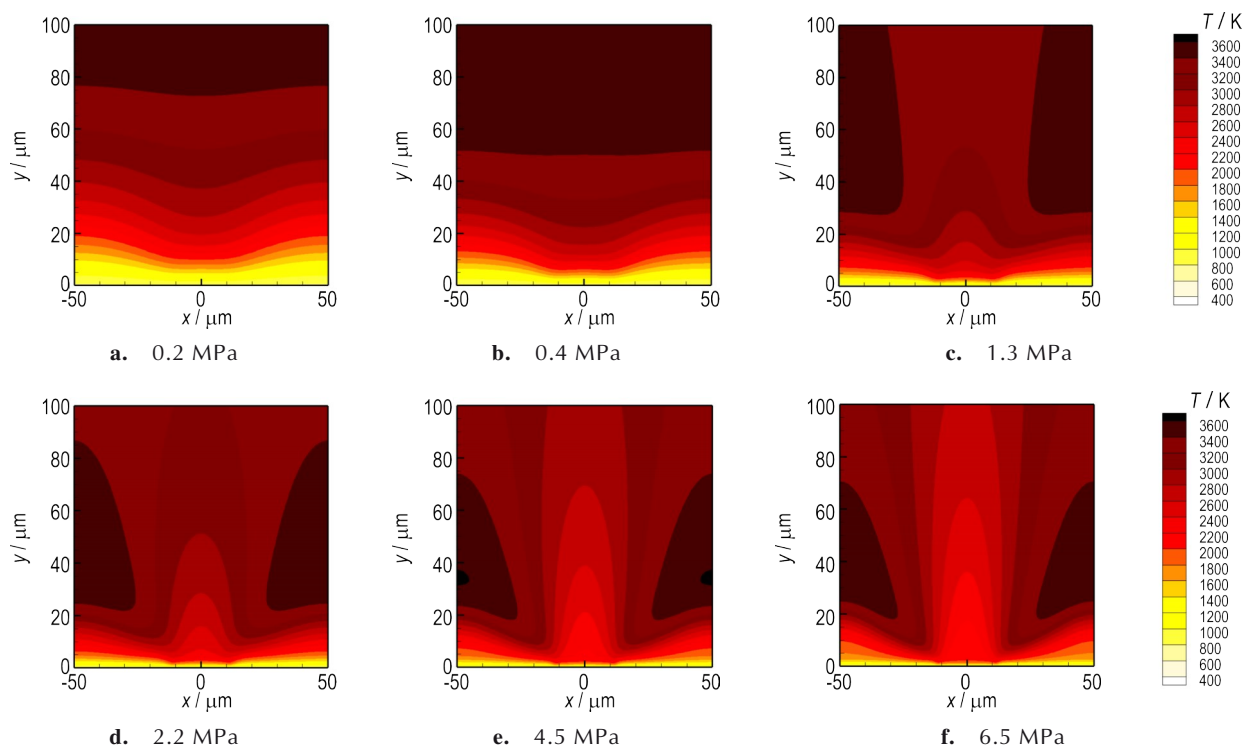


图 6 不同压力下气相火焰温度分布

Fig.6 Gas phase flame temperature distributions at different pressures

图 7 温度曲线显示, 火焰温度在 4 MPa 前达到峰值, 但在进一步升高至 6.5 MPa 时反而回落。该现象可从化学反应与扩散间的关系及热反馈作用予以解

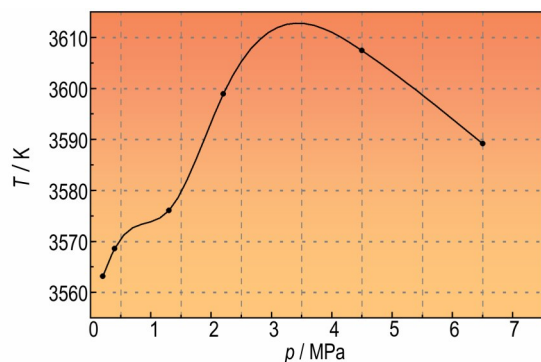


图 7 不同压力下气相火焰温度最大值变化曲线

Fig.7 Maximum flame temperatures of the gas phase at different pressures

释: 在 4 MPa 前, 化学反应速率提升占主导, 热释放增强推动火焰温度持续上升, 此时化学反应与扩散过程之间处于良好平衡状态; 当压力进一步升高至 6.5 MPa 时, 扩散相对受到抑制导致反应物供给受限, 扩散过程逐渐主导燃烧, 造成反应区变“细”与局部不完全燃烧; 同时, 增强的热反馈将更多能量传回燃面以维持固相分解, 导致气相温度峰值出现一定程度回落。

#### 4.2 超细铝粉含量对推进剂燃烧特性的影响

为研究 UFAI 含量对复合固体推进剂燃烧特性的影响, 本研究选取 4 种不同 UFAI 含量的推进剂配方进行对比分析, 分别命名为 B-1、B-2、B-3 和 B-4。在保证 AP 与 Binder 质量不变的前提下, 通过调整 Blend 中 UFAI 的质量来获得不同配方。4 种推进剂 Blend 中各组分的质量分数 (某种组分质量占整体质量的比例) 见表 3。

表 3 4 种推进剂配方中 Blend 各组分的质量分数  
Table 3 Four propellant formulations in the Blend %

type	fine-AP	binder	UFAl
B-1	76.3	23.7	0.0
B-2	74.9	23.2	1.9
B-3	70.9	21.9	7.2
B-4	65.1	20.1	14.8

压力为 4.5 MPa 时不同 UFAl 含量扩散火焰的容积热释放速率 (AP/HTPB 的  $R_4$  和 AP/HTPB/Al 的  $R_4$  与  $R_5$ ) 及气相温度分布如图 8~9 所示。数值结果表明,

随着 UFAl 含量增加, AP 表面上方的放热反应加剧, 发光区增强, 火焰高度缩短至更贴近燃烧表面的位置, B-1、B-2、B-3 和 B-4 对应的最大容积热释放速率分别为  $8.516 \times 10^{12}$ 、 $1.956 \times 10^{13}$ 、 $2.784 \times 10^{13}$   $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $4.171 \times 10^{13}$   $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。温度分布特征同样呈现显著差异, AP/HTPB 体系 (B-1) 的温度分布呈典型的“W”形, 而含 UFAl 推进剂 (B-2~B-4) 则表现出复杂的异质结构, 气相温度峰值则从 3088 K (B-1) 逐步升高至 3886 K (B-4), 且随着 UFAl 含量的增加, 低温区逐渐向气相下游延伸。

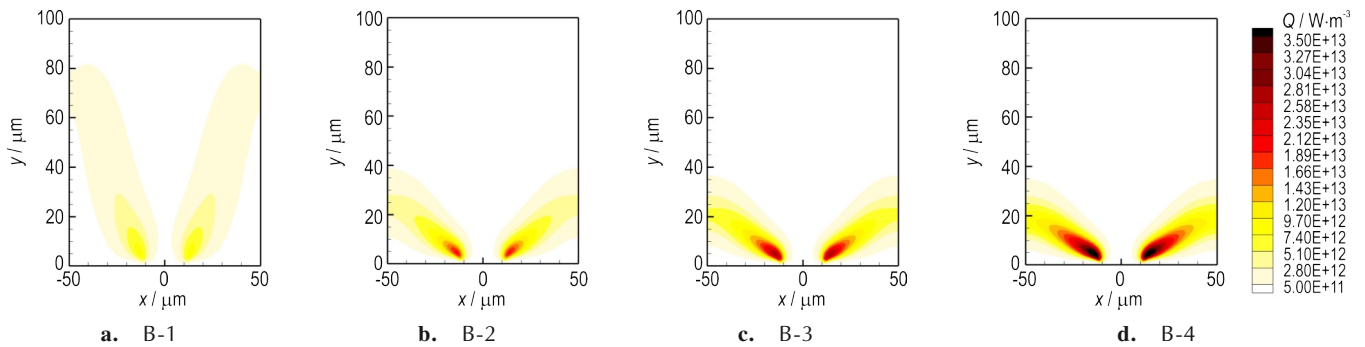


图 8 不同 UFAl 含量下扩散火焰容积热释放速率分布 ( $p=4.5$  MPa)

Fig.8 Volume heat release rate distribution from diffusion flame at different UFAl contents ( $p=4.5$  MPa)

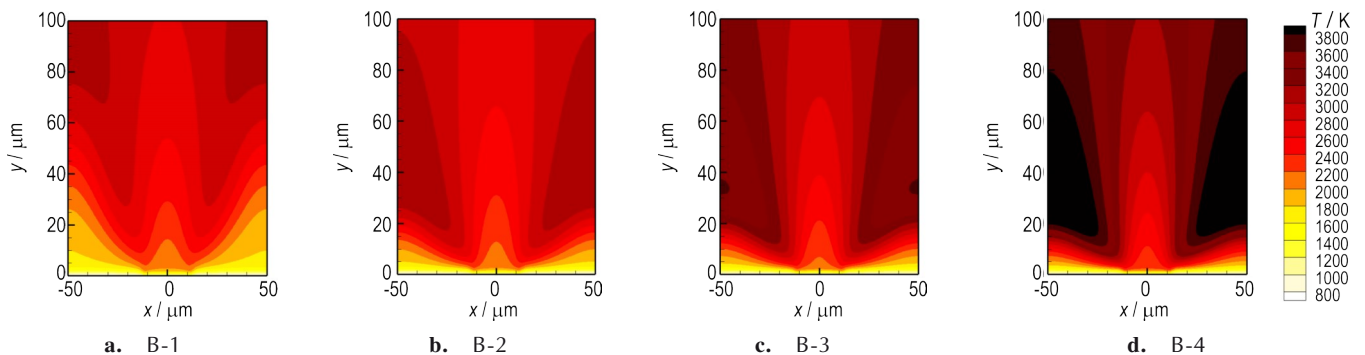


图 9 不同 UFAl 含量下气相火焰温度分布 ( $p=4.5$  MPa)

Fig.9 Gas phase flame temperature distributions at different UFAl contents ( $p=4.5$  MPa)

$\text{O}_x$  的空间分布在一定程度上能解释火焰结构变化的原因, 图 10 给出了不同 UFAl 含量下  $\text{O}_x$  组分分布。研究表明, 随着 UFAl 含量的增加,  $\text{O}_x$  最大含量由 B-1 的 0.87 降低至 B-4 的 0.76, 且其空间分布呈现向燃面聚集的趋势。结合图 8~9 的分析可知, UFAl 含量的增加促使  $R_5$  反应区向燃烧表面迁移。从化学反应与传质特性的角度看, 火焰结构的变化主要源于以下两个方面: 首先, 在含 UFAl 体系中  $R_5$  对  $\text{O}_x$  的消耗比例增加; 其次,  $R_5$  反应区近燃面燃烧的特性抑制了  $\text{O}_x$  在  $y$  方向上的扩散输运能力。这种氧化剂非平衡分配与反

应区位点分布的协同作用, 压缩火焰高度形成更紧凑的燃烧结构, 增强了燃烧表面的热反馈, 从而显著提升了整体的燃烧性能。

为深入探究 UFAl 含量对燃烧速率的影响规律, 本研究将计算得到的 4 种推进剂燃面燃速分布 (图 11a) 与 Mullen 等<sup>[21]</sup> 实验中获得的燃面形貌 (图 11b) 进行了对照分析。计算结果显示: 1) Blend 区域的燃速始终高于 AP 区域; 2) 最大燃速出现在 AP 与 Blend 的交界处。这两点规律与图 11c 中实验观测到的燃烧表面形貌相一致, 即 Blend 区域燃面退移更快, 形成相对于

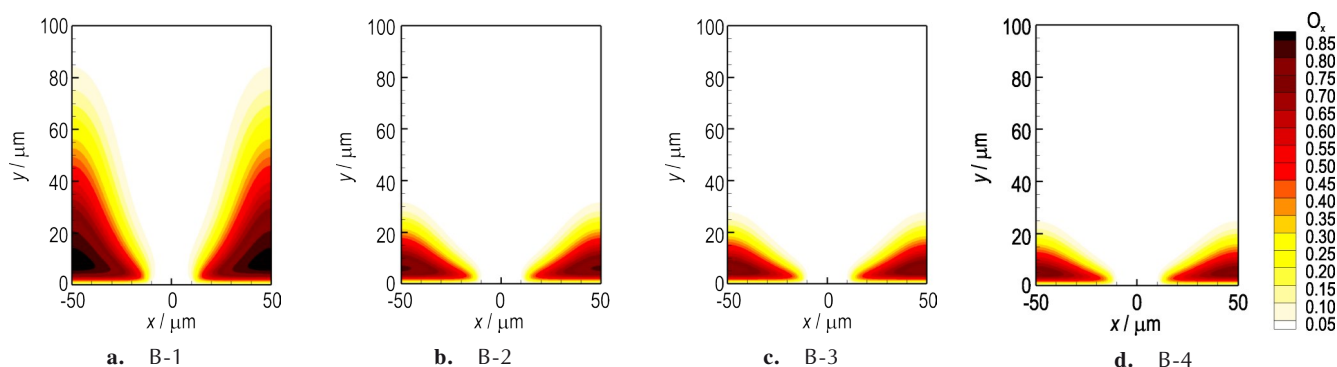


图10 不同UFAl含量下 $O_x$ 组分分布( $p=4.5$  MPa)

Fig.10  $O_x$  concentration distribution at different UFAl contents ( $p=4.5$  MPa)

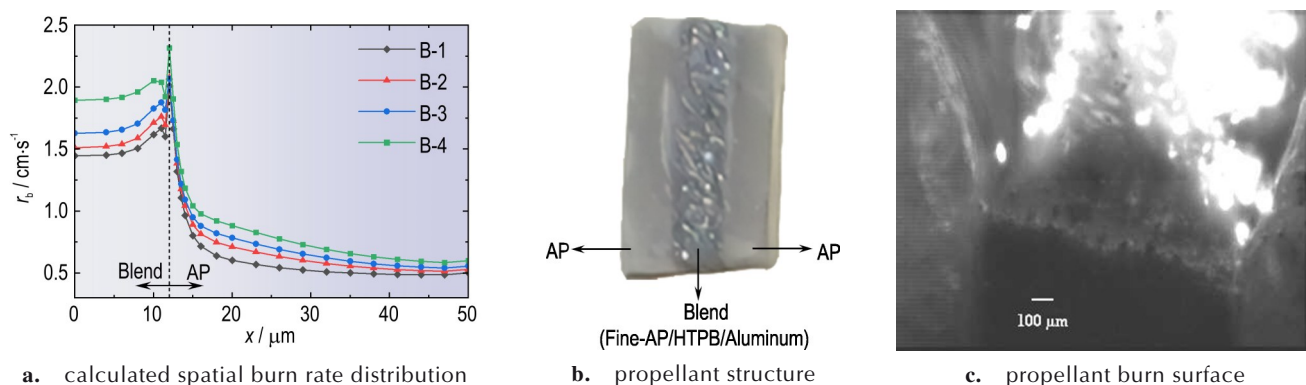


图11 4种推进剂燃面燃速分布计算结果及推进剂实验样品和燃烧表面<sup>[21]</sup>

Fig.11 Calculated spatial burn rate distributions (a) of the four propellants, the propellant structure (b) and burning surface (c)<sup>[21]</sup>

AP凹陷的特征。此外,计算结果还显示,随着UFAl含量增加,各位置的燃速均呈上升趋势,这一趋势与Dokhan等<sup>[11,14,22]</sup>的实验结论相符,说明UFAl含量的增加能够有效提高推进剂的燃烧速率。上述与实验现象的多重一致性进一步验证了本研究燃烧模型的可靠性,同时也表明UFAl含量的增加通过改变局部燃烧特性,显著影响了推进剂整体的燃烧行为。

为探究UFAl含量对推进剂压力敏感性的影响,通过计算4种不同配方推进剂在1.3, 3.4, 5.5 MPa及6.9 MPa压力下的燃烧速率,绘制了燃速-压力拟合曲线,如图12所示。从图12曲线可见,在相同压力下,随着UFAl含量逐步提高,推进剂的燃速明显提升,这是由于UFAl改变了火焰结构,增强了能量释放所致。B-1、B-2、B-3和B-4 4种推进剂对应的压力指数分别为0.3880、0.3727、0.3611和0.3965。在UFAl含量为0~7.2%范围内,压力指数由0.3880下降至0.3611,表明燃速对压力的敏感性减弱,燃烧过程更加稳定;而当UFAl含量继续增加到14.8%时,指数回升至0.3965,虽然此时燃速最高,但对压力扰动的响

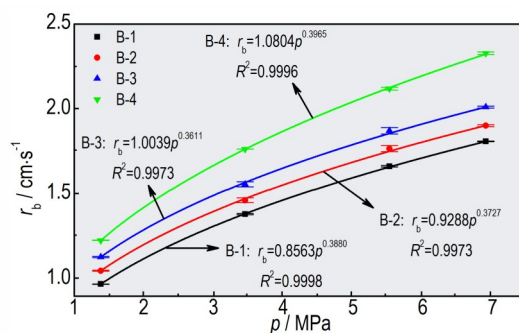


图12 不同UFAl含量下推进剂燃速-压力拟合曲线

Fig.12 Burn rate-pressure fitting curves at different UFAl contents

应也更为敏感,燃烧稳定性有所降低。数值计算结果显示,随着铝含量增加,燃速持续提高,而压力指数呈现先降后升的非单调变化趋势,与Ivanov等<sup>[23]</sup>实验中的规律相符。

## 5 结论

本研究基于气相五步化学反应机理,构建了AP/HTPB/Al复合推进剂的二维周期性三明治均质化

燃烧模型,并通过与实验数据的对比验证了模型的准确性与可靠性。在此基础上,分别探究了压力和 UFAl 含量对推进剂燃烧性能的影响,得出以下主要结论:

(1)压力从 0.2 MPa 升至 6.5 MPa,火焰结构依次经历 3 种形态:0.2~0.4 MPa 时呈预混火焰,0.4~2.2 MPa 时出现预混与扩散共存的过渡结构,而在 2.2~6.5 MPa 时则完全转变为扩散火焰。伴随压力升高,热释放核心不断向推进剂表面靠近,高压下扩散反应区表现出明显的“细长化”特征。

(2)随着超细铝粉含量的增加,燃烧火焰高度显著压缩,火焰结构更加紧凑,单位体积能量释放增强,从而显著提升了推进剂的燃速。UFAl 含量越高,对燃速的促进作用越明显。

(3)在 B-1、B-2、B-3 和 B-4 4 种推进剂中,B-3 在拥有较高燃速的同时具有最低的压力指数,因而展现出最佳的燃烧稳定性;尽管 B-4 的燃速最高,但其较高的压力敏感性也意味着燃烧过程更易受压力扰动影响。因此在实际应用中,应依据任务需求做出合适的选择。

#### 参考文献:

- [1] BECKSTEAD M W, DERR R L, PRICE C F. A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames [J]. *Journal of AIAA*, 1970, 8(12):2200-2207.
- [2] PRICE E W, HANDLEY J C, PAANYANM R R. Combustion of ammonium perchlorate-polymer sandwiches [J]. *Journal of AIAA*, 1986, 19(3):380-386.
- [3] PRICE E W, SAMBAMURTHI J K, SIGMAN R K. Combustion of ammonium perchlorate-polymer sandwiches [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 63(3):381-413.
- [4] 叶锐,余永刚,曹永杰. AP/HTPB 二维火焰结构和燃速数值分析[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(3):576-580.  
YE Rui, YU Yong-gang, CAO Yong-jie. Numerical analysis of flame structure and burning rate of two dimensional AP/HTPB sandwich combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(3):576-580.
- [5] 叶振威,余永刚. 旋转条件下 AP/HTPB 二维火焰结构的数值分析[J]. *含能材料*, 2019, 27(1):1-8.  
YE Zhen-wei, YU Yong-gang. Numerical simulation of 2D AP/HTPB flame structure under spinning conditions [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(1):1-8.
- [6] 赵健锋,余永刚. 亚大气压下 AP/HTPB 微尺度稳态燃烧的数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(1):78-84.  
ZHAO Jian-feng, YU Yong-gang. Numerical simulation of AP/HTPB microscale stable combustion under subatmospheric pressure [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(1):78-84.
- [7] 陈王琦,余永刚. 不同压力工况下 AP/HTPB 推进剂微尺度燃烧的数值模拟[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(3):241-246.  
CHEN Wang-qi, YU Yong-gang. Numerical simulation of micro-scale combustion of AP/HTPB propellant under various pressure conditions [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(3):241-246.
- [8] PRICE E W, CHAKRAVARTHY S R., SAMBAMURTHI J K, et Al. The details of combustion of ammonium perchlorate propellants: leading edge flame detachment [J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, 138(1-6):63-83.
- [9] ISERT S, HEDMAN T D, LUCHT R P, et Al. Oxidizer coarse-to-fine ratio effect on microscale flame structure in a bimodal composite propellant [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 163:406-413.
- [10] KOHGA M. Burning rate characteristics of ammonium perchloarte-based composite propellant using bimodal ammonium perchlorate [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(3):499-506.
- [11] DOKHAN A, PRICE E W, SEITZMAN J M, et Al. The effects of bimodal Aluminum with ultrafine Aluminum on the burning rates of solid propellants [J]. *Proceedings of The Combustion Institute*, 2002, 29(2):2939-2946.
- [12] STEPHENS M, SAMMET T, PETERSEN E. Performance of ammonium-perchlorate-based composite propellant containing nanoscale Aluminum [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(3):461-466.
- [13] JACKSON T L, BUCKMASTER J, WANG X. Modeling of propellants containing ultrafine Aluminum [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(1):158-165.
- [14] DOKHAN A, PRRICE E, SEITZMAN J M, et Al. The Ignition of Ultra-Fine Aluminum in Ammonium Perchlorate Solid Propellant Flames [C]//39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA, 2003-4810.
- [15] LIU S, HAN L, HE P, et Al. Conjugate heat and mass transfer at heterogeneous burning surface of AP/HTPB/Al composite propellant at 2-10 MPa [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 227:120362.
- [16] LIU S, HE P, HAN L, et Al. Numerical study on the effect of pressure on transient micro-combustion and heat release characteristics of AP/HTPB/Al composite propellant fuel [J]. *Fuel*, 2023, 347:128445.
- [17] CHEN K, XUE X C, YU Y G. A model for the combustion behavior of AP/HTPB propellant containing ultrafine Aluminum [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2024, 49(7):e202400049.
- [18] 叶锐. 底排药剂非稳态燃烧特性的实验研究和数值模拟 [D]. 南京:南京理工大学, 2015.  
YE Rui. Experimental research and numerical simulation of the unsteady combustion characteristics of base bleed propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [19] GROSS M L, HEDMAN T D, SON S F, et al. Coupling micro and meso-scale combustion models of AP/HTPB propellants [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(5):982-992.
- [20] GALFETTI L, DELUCA L T, SEVERINI F, et al. Pre and post-burning analysis of nano-aluminized solid rocket propellants [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2007, 11(1):26-32.
- [21] MULLEN J, BREWSTER M. Investigation of Aluminum Agglomeration in AP/HTPB Composite Propellants [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA, 2006-280.

- [22] DOKHAN A, PRICE E, SEIZMAN J, et al. Combustion Mechanisms of Bimodal and Ultra-Fine Al in AP Solid Propellants [C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA, 2002-4173.
- [23] IVANOV Y F, OSMONOLIEV M N, SEDOI V S, et al. Productions of ultra-fine powders and their use in high energetic compositions[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(6): 319-333

## Numerical Study on the Combustion Characteristics of Aluminized AP/HTPB

**BAI Zhong-yuan, YU Yong-gang**

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Solid propellants optimization significantly enhances combustion efficiency of the rocket engine. Aluminum (Al) particles are widely used as metallic additives due to the high reactivity and energy density. A two-dimensional homogenized steady-state combustion model with a sandwich structure was developed for AP/HTPB/Al propellants based on a five-step gas-phase reaction mechanism. The reliability of the model was validated by comparing simulation and experimental data. The results show that as the pressure increases from 0.2 MPa to 6.5 MPa transits flame structures from premixed to diffusion combustion, while the peak area of heat release gradually approaches the burn surface. At constant pressure, the burn rates rise significantly with higher Al content, however, the pressure index first decreases and then increases with the increase of Al content. This indicates that there is a trade-off between high burn rates and flame stability.

**Key words:** composite solid propellant; ultrafine aluminum; flame structure; burning rate; pressure index

**CLC number:** TJ55;V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025173

(责编:姜梅)