

AP/HTPB复合推进剂低压燃烧特性数值研究^{*}

金钰晨, 魏志军, 王小宁

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 为研究AP/HTPB复合推进剂低压燃烧特性, 使用二维三明治模型进行了数值仿真研究。该模型使用简化的四步总包反应机理, 考虑燃烧过程中的燃面退移, 计算时大粒径AP取平均粒径, 小粒径AP采用“均质黏合剂假设”, 认为其与HTPB组成“均质黏合剂”。在0.02~0.08MPa的压强下进行了仿真, 并与高压(5MPa)下的燃烧仿真进行对比。结果表明, 低压下固相AP对黏合剂的传热导致了交界面处燃面的下陷, 下陷程度随压强减小而增大; 随着燃烧的进行, 燃面各点燃速趋于一致, 燃面形状不再改变。低压下气相反应表现为预混燃烧, 初焰为主导反应。低压下燃速仿真与实验值基本一致, 压强指数小于高压下的压强指数。

关键词: 复合推进剂; 低压燃烧特性; 数值仿真; 燃面退移; 三明治模型

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210319-12

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210319

Numerical Study on Combustion Characteristics of AP/HTPB Composite Propellant at Low Pressure

JIN Yu-chen, WEI Zhi-jun, WANG Xiao-ning

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the combustion characteristics of AP/HTPB composite propellant at low pressure, a two-dimensional sandwich model was used for numerical simulation. A four-step kinetic mechanism was implemented into this model. This model assumed a homogeneous binder to represent the fine AP and HTPB, and took the average size of coarse AP as the size of pure AP. The unsteady non-planar regressing surface is considered. The simulation was carried out under the pressure of 0.02~0.08MPa, and compared with the simulation under high pressure (5MPa). The results show that under low pressure, the heat transfer from AP to binder leads to the subsidence of the burning surface at AP/Binder interface, with the decrease of pressure, the subsidence degree increase. As the combustion progresses, the burning rates at various location of the burning surface tend to be the same and the shape of the burning surface does not change. The gas phase reaction under low pressure is premixed combustion, and the primary flame is the dominant reaction. The simulation results of burning rate at low pressure are similar to the experimental data, the pressure index is smaller than that at high pressure.

Key words: Composite propellant; Low pressure combustion characteristics; Numerical simulation; Surface regression; Sandwich model

^{*} 收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-07-06。

作者简介: 金钰晨, 硕士生, 研究领域为固体推进剂燃烧理论与技术。

通讯作者: 魏志军, 博士, 教授, 研究领域为固体火箭发动机机理理论与应用。

引用格式: 金钰晨, 魏志军, 王小宁. AP/HTPB复合推进剂低压燃烧特性数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210319.
(JIN Yu-chen, WEI Zhi-jun, WANG Xiao-ning. Numerical Study on Combustion Characteristics of AP/HTPB Composite Propellant at Low Pressure[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210319.)

1 引言

AP/HTPB(高氯酸铵/端羟基聚丁二烯)复合推进剂作为一种广泛使用的固体推进剂,其燃烧特性一直以来都是研究人员关注的重点。推进剂通常在发动机的高压环境中燃烧,对其中高压燃烧特性的研究也相对较多。然而推进剂有时也需要在低压下燃烧,例如高空中残药的燃烧^[1],用于微小卫星的激光固体微推力器的燃烧^[2-3],底排弹装药燃烧^[4]等,因此了解AP/HTPB复合推进剂的低压燃烧特性是非常重要的。

AP/HTPB复合推进剂在微观上可以简化为周期性三明治结构^[5-6],对AP/HTPB复合推进剂微观燃烧的数值研究多采用三明治模型。Buckmaster等^[7]建立了二维无量纲气相模型,气相使用两步总包反应,对复合推进剂燃烧进行了仿真。通过调整 Pe 数(Peclet number,表示对流速率与扩散速率之比)和 Da 数(Damkohler number,表征无量纲化学反应速率大小),观察了火焰形状和燃烧速率的变化。Chorpening等^[8]对该模型进行了扩展,将其用于三明治模型的仿真,并与实验结果进行了比较。Jackson等^[9]使用类似的模型研究了刘易斯数(Le)的影响,以此来模拟二维火焰的不稳定燃烧。Gross等^[10-11]采用一种新的四步反应机理进行了仿真,发现火焰结构与采用详细化学反应机理的结果一致性较好,燃速值与试验值差值在10%以内。叶锐等^[12-13]采用简化的两步反应机理,对0.1~5MPa下火焰结构以及温度进行了研究,分析了 Pe 和 Da 对扩散火焰的影响。曹永杰等^[14]使用二维三明治结构的稳态燃烧模型,获得了燃速与微尺度燃烧场各物理量的分布特性。陈王琦等^[15]研究了不同压力工况(0.3~7.2MPa)对燃烧的影响。

在AP/HTPB复合推进剂燃烧过程中,由于不同组分燃速的不同,其燃面退移过程是非均匀的,使得燃面形状发生变化,因此一些研究者在三明治模型的基础上考虑了燃面退移。Hegab等^[16-17]使用三明治模型进行了仿真,气相使用两步总包反应,燃面退移使用level-set方法处理,获得了气相的燃烧场和固相的温度场,发现不均匀的燃面形状对气相火焰结构和表面传热有较大影响。Ramakrishna等^[18-19]进行了含燃面退移的仿真,在气相反应参数的选择上,同时考虑了初焰的低压特性和终焰的高压特性,结果与试验结果具有较好的一致性。上述研究表明,为得到AP/HTPB复合推进剂更为准确的燃烧特性,有

必要在仿真中考虑非均匀燃面退移。

目前对AP/HTPB复合推进剂低压燃烧的研究多为实验研究,数值研究较少。Kuwahara等^[20]在0.02~0.1MPa下对不同质量比的AP/HTPB推进剂进行了燃烧实验,通过显微照片观察了火焰结构,使用微型热电偶研究了气相到固相的传热过程。Yano等^[21]对富氧复合推进剂开展了燃烧实验,得到了临界压强和0.02~3MPa下的燃速曲线,并对亚大气压下的火焰温度场进行了研究。Miller等^[22]测量了添加氧化铁的推进剂在0.02~0.1MPa下的燃速,研究了实验药条直径对推进剂临界压强的影响。Krishnan等^[23]研究了亚大气压下添加氧化铁和亚铬酸铜对复合推进剂燃烧的影响。Tanaka等^[24]进行了双基推进剂和复合推进剂的低压燃烧实验,测量了各压强下的燃速并对临界压强进行了研究。赵健锋等^[25]对亚大气压下的复合推进剂燃烧进行了模拟,并比较了与高压下燃烧特性的差异。

上述针对AP/HTPB复合推进剂燃烧的研究中,低压燃烧数值仿真较少、机理分析不够深入,已有研究未考虑退移引起的燃面非均匀性影响。基于此,本文使用四步总包反应机理,考虑非均匀燃面退移过程,进行AP/HTPB复合推进剂的燃烧流动传热仿真,分析其低压下的燃烧特性。

2 数值计算方法

2.1 物理模型

图1为AP/HTPB复合推进剂燃烧示意图,可以发现,AP分布具有周期性的特点,结构上可近似简化为三明治结构。同时,从图中可以看出,由于AP/HTPB复合推进剂含有不同粒径的AP颗粒,在推进剂燃烧过程中,大粒径AP与小粒径AP的燃烧有所不同,具体表现为大粒径AP主要为扩散火焰,小粒径AP混合在HTPB中形成预混火焰^[26]。通常使用的三明治模型计算时选取的是所有粒径的平均值,只能反映较大粒径的燃烧特性,而忽略了小粒径AP的燃烧。本文使用的微观燃烧模型如图2所示,该模型主要分为气相和固相两个部分。对于固相,为综合考虑大小粒径AP的燃烧,使用文献[10]中的“均质黏合剂假设”(homogenized binder assumption),模型中AP计算域表示大粒径AP, Binder表示小粒径AP与HTPB均匀混合组成的“均质黏合剂”。

对模型做出如下假设:

(1)固相分解反应发生在表面,不考虑其内部存在的反应。

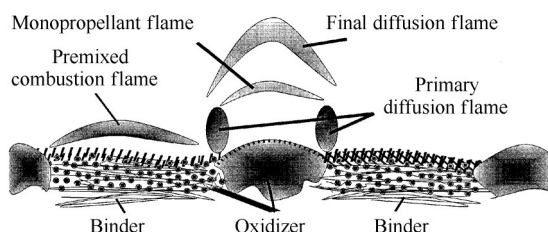


Fig. 1 Conceptual picture of composite propellant combustion^[26]

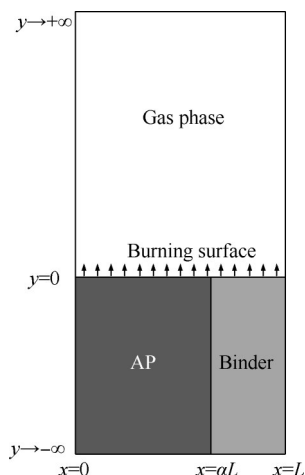


Fig. 2 Micro combustion model of AP/HTPB

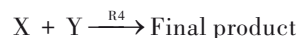
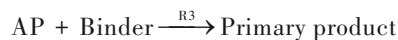
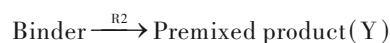
(2)模型中AP区域的宽度 αL 由大粒径AP尺寸决定,认为小粒径AP均匀混合在HTPB中,二者组成“均质黏合剂”,黏合剂物性参数使用文献[10]中的方法计算。

(3)燃气为理想气体, Le 数为1,不考虑辐射作用。

(4)使用Arrhenius定律描述固相分解和气相反应。

2.2 化学反应动力学模型

AP/HTPB复合推进剂燃烧过程的气相详细反应十分复杂,计算量非常大。文献[10]根据一种127反应37组分的详细反应机理计算所得火焰的特点,将其简化为四步反应6种组分的机理,由于使用了均质黏合剂假设,这种机理在通常使用的三步反应机理的基础上增加了黏合剂燃烧反应,这四步反应分别为:代表AP分解产物燃烧形成AP单组分分解焰的第一步反应R1,代表黏合剂分解产物燃烧形成黏合剂预混火焰的第二步反应R2,代表AP分解产物与黏合剂分解产物燃烧形成初焰的第三步反应R3,代表AP单组分分解焰产物与黏合剂预混火焰产物燃烧形成终焰的第四步反应R4,如下所示



式中AP代表固相AP分解产生的气相产物,Binder代表黏合剂分解产生的气相产物。X,Y,Primary product,Final product分别代表四步反应的产物。

气相化学反应速率使用与压强相关的Arrhenius公式和质量作用定律来计算

$$\dot{\omega} = Ap^n \exp\left(-\frac{E_A}{R_u T_g}\right) \prod_{i=1}^{\text{reactants}} Y_i \quad (1)$$

式中 A 为指前因子, p 为压强, E_A 为活化能, R_u 为通用气体常数, T_g 为气体温度, Y_i 为反应物 i 的质量分数。

对于AP和黏合剂的分解速率分别使用下式计算

$$r_{b_AP} = A_{AP} \exp\left(-\frac{E_{AP}}{R_u T_s}\right) \quad (2)$$

$$r_{b_Binder} = A_{Binder} \exp\left(-\frac{E_{Binder}}{R_u T_s}\right) \quad (3)$$

2.3 黏合剂反应参数

由于采用了均质黏合剂假设,黏合剂固相分解反应的指前因子 A_{Binder} 和黏合剂预混火焰的指前因子 A_2 取值随黏合剂中AP含量的变化而改变。文献[10]给出了计算上述两个参数的方法:

黏合剂的燃速与绝热燃烧温度 T_{flame} 和压力之间的关系式为

$$r_{b_Binder} = 0.537 \exp\left(-\frac{4056}{T_{\text{flame}}}\right) p^{0.833} \quad (4)$$

黏合剂表面温度与绝热燃烧温度的关系式为

$$T_s = 976.4827 \exp\left(-\frac{105.0361}{T_{\text{flame}}}\right) \quad (5)$$

对黏合剂燃烧进行热力计算可得某压强下的绝热燃烧温度,再结合式(3)~(5)即可求得黏合剂分解反应指前因子。

黏合剂预混火焰指前因子与绝热燃烧温度的关系为

$$A_2 = 917.97 \exp\left(-\frac{3714.5}{T_{\text{flame}}}\right) \quad (6)$$

根据绝热燃烧温度同样可以得到黏合剂预混火焰指前因子。

2.4 控制方程

对于气相,有

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g v_1) + \nabla \cdot (\rho_g v_1 \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{4}{3} \mu_g \frac{\partial v_1}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu_g \frac{\partial v_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial v_1}{\partial y} + \mu_g \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g v_2) + \nabla \cdot (\rho_g v_2 \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{4}{3} \mu_g \frac{\partial v_2}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu_g \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_g \frac{\partial v_1}{\partial y} + \mu_g \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \quad (9)$$

$$\rho_g c_p \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T_g \right) = \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T_g) + \dot{Q} \quad (10)$$

$$\rho_g \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla Y_i \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_g}{c_p} \nabla Y_i \right) - \dot{\omega}_i \quad (11)$$

补充理想气体状态方程

$$p = \frac{\rho_g R_u T_g}{M_\omega} \quad (12)$$

式中 ρ_g 是气体密度, $\mathbf{v} = (v_1, v_2)$ 为速度矢量, v_1, v_2 分别为 x, y 方向的速度分量, p 为压强, T_g 为气体温度, Y_i 为组分 i 质量分数, $\dot{\omega}_i$ 为组分 i 生成率, $\dot{Q}$ 是总反应热释放。 μ_g 为气体粘性系数, λ_g 为气体导热系数。

对于固相只求解导热方程,有

$$\rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_c \nabla T_c) \quad (13)$$

式中 $\rho_c, c_c, T_c, \lambda_c$ 分别为固相密度, 比热容, 温度和导热系数。

2.5 燃面退移

文献[16-17]使用 level-set 方法进行了高压下 AP/HTPB 复合推进剂的燃烧仿真。本文使用该方法进行低压下的燃面及燃速的动态追踪。

使用 level-set 函数定义燃面

$$\eta(x, y, t) = 0 \quad (14)$$

由动力学关系可得

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \mathbf{v}_s \cdot \nabla \eta = 0 \quad (15)$$

式中 $\mathbf{v}_s$ 为燃面移动速度矢量, 引入固相分解速率 r_b , 则 $\mathbf{v}_s$ 可以表示为

$$\mathbf{v}_s = -r_b \mathbf{n}, \quad |\mathbf{v}_s| = r_b \quad (16)$$

式中 $\mathbf{n}$ 为燃面指向气相区域的单位法向量

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \eta}{|\nabla \eta|} \quad (17)$$

由此动力学方程(15)可以写为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - r_b |\nabla \eta| = 0 \quad (18)$$

假设燃面坐标 y 为 x 的单值函数, 则 y 可以表示为

$$y = f(x, t) \quad (19)$$

此时燃面可以表示为

$$y - f(x, t) = 0 \quad (20)$$

上述方程左边即为 level-set 函数, 即

$$\eta(x, y, t) = y - f(x, t) \quad (21)$$

式(18)可改写为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + r_b \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2} = 0 \quad (22)$$

固相分解速率取值由前述公式给出, 求解 $f(x, t)$

即可求得燃面的 y 坐标, 从而实现燃面的动态追踪。根据燃面 y 坐标的差值即可求得 y 方向燃速, 实现燃速的动态追踪。

2.6 燃面耦合条件

推进剂燃面是气相与固相的交界面, 其边界条件需要将气相和固相耦合起来。在燃面处, 温度、质量流量连续, 因此有

$$T_g = T_s \quad (23)$$

$$\rho_c r_b = \rho_g v \quad (24)$$

界面处能量守恒和组分质量守恒为

$$\lambda_g \mathbf{n} \cdot \nabla T_g - \lambda_c \mathbf{n} \cdot \nabla T_c = -Q_s \rho_c r_b \quad (25)$$

$$\frac{\lambda_g}{c_p} \mathbf{n} \cdot \nabla Y_{i,g} = \rho_c r_b (Y_{i,g} - Y_{i,c}) \quad (26)$$

式中 $\mathbf{n}$ 为燃面法向量, 指向气相, c_p 为气体比热容, Q_s 为固相分解反应热。

2.7 边界条件

在 $x=0, x=L$ 处使用对称边界

$$\left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=0,L} = 0, \quad F = v_1, v_2, T, Y_i \quad (27)$$

气相外边界使用远场边界, 气相远场各物理量沿 y 方向梯度为零

$$\left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{y \rightarrow +\infty} = 0, \quad F = v_1, v_2, T, Y_i \quad (28)$$

固相底部设为恒温壁面

$$T|_{y \rightarrow -\infty} = 300K \quad (29)$$

3 结果与讨论

为了便于对比, 本文选用文献[24]中开展低压燃烧实验的推进剂 C 进行研究, 其 AP/HTPB 质量比为 80:20, 不同尺寸 AP 的质量比为 $M_{200\mu m} : M_{50\mu m} : M_{15\mu m} = 4:3:3$ 。认为粒径为 $50\mu m$ 和 $15\mu m$ 的 AP 与 HTPB 组成“均质黏合剂”, 因此计算时取 $\alpha L = 100\mu m$, 气相与

固相计算域高度取为 $1200\mu\text{m}$ 。计算所使用的主要参数如表 1 所示,除黏合剂分解和黏合剂预混火焰反应指前因子 A_2, A_{Binder} 外,其他参数来自于文献[10]。采用 TVD 格式离散对流项,用中心差分格式离散扩散项,使用二阶龙格库塔法进行时间积分。使用结构化网格,网格数为 1.5×10^4 ,时间步长为 $10\mu\text{s}$ 。进行了网格及时间步长无关性的验证。本文所计算的各算例条件如表 2 所示,其中算例 1~算例 4 (0.02~0.08MPa) 为低压算例,在此基础上增加算例 5 与试验进行对比,算例 6,算例 7 (2~5MPa) 为与低压对比的高压算例。

Table 1 Reaction kinetic parameters

Parameter	Value
$A_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{bar}^{-n})$	2.7×10^4
$E_{A1}/(\text{kJ/mol})$	66.56
n_1	1.60
$A_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{bar}^{-n})$	1.25×10^5
$E_{A2}/(\text{kJ/mol})$	60.69
n_2	1.70
$A_3/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{bar}^{-n})$	5000
$E_{A3}/(\text{kJ/mol})$	47.30
n_3	1.70
$A_4/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{bar}^{-n})$	400
$E_{A4}/(\text{kJ/mol})$	60.69
n_4	1.70
$A_{\text{AP}}/(\text{cm/s})$	227724.46
$E_{\text{AP}}/(\text{kJ/mol})$	87.30
$Q_{\text{AP}}/(\text{J/kg})$	418.59
$A_{\text{Binder}}/(\text{cm/s})$	563.26
$E_{\text{Binder}}/(\text{kJ/mol})$	48.22
$Q_{\text{Binder}}/(\text{J/kg})$	664.81

3.1 低压下推进剂燃面退移的特点

根据仿真所得燃面坐标,给出了 0.02MPa 和 0.08MPa 下不同时刻的燃面形状如图 3(a),(b)所示,作为对比,2MPa 和 5MPa 下的燃面形状如图 3(c),(d)所示。可以看到,随着燃烧的进行,燃面不断退移,燃面形状也在改变,不同压强下燃面形状的变化不同。由燃面各点燃速数值得到 0.02MPa 下燃烧过程中燃面不同位置的 y 方向燃速曲线如图 4 所示,各点 y 方向燃速呈现出先下降后上升的趋势,在 0.5s 之

前,AP/黏合剂交界面处($x=100\mu\text{m}$) y 方向燃速明显高于其他各点,AP 燃面上($x=0\mu\text{m}, x=50\mu\text{m}$) y 方向燃速最低,在 0.5s 之后,各点 y 方向燃速差值不断减小,最终趋于一致。

低压下燃面形状及退移过程有如下特点:

(1)燃面不平整,如图 3(a),(b)所示,AP 燃面高于黏合剂燃面。在 0.02MPa 下 10ms 时,AP 燃面最高点与黏合剂最高点高度相差约 $2\mu\text{m}$,而在 900ms 时,差值达到了 $40\mu\text{m}$,这说明随着燃烧的进行,AP 突出程度明显增大。

(2)AP 与黏合剂交界面处燃面下陷。从图 3(a),(b)可以看出,10ms 时交界面附近燃面已经略低于其他部分,50ms 时可以明显看出该处燃面下陷,随着燃烧进行,下陷程度增大,在 0.02MPa 下 900ms 时交界面处与燃面最高点高度相差达到了 $70\mu\text{m}$ 。

(3)压强对燃面不均匀性有影响。对比图 3(a),(b)可以发现,10ms 时 0.02MPa 和 0.08MPa 下的燃面形状相差不大,随着时间的推移,两个压强下燃面形状差别变大,具体表现为压强越低交界面处燃面下陷和 AP 突出程度更大。而在高压下,对比图 3(c),(d)发现燃面不均匀性随着压强的增大而增大。

(4)随着燃烧的进行,燃面形状具有趋稳性。如图 4 所示,在燃烧初期,燃面各点 y 方向燃速相差较大,这导致了燃面形状的非均匀性,但一段时间后各点 y 方向燃速趋于一致,这表明燃烧进行到一定程度之后,燃面形状将不再改变,燃烧进入稳定状态。本文在计算中认为燃面各点 y 方向燃速差值小于 0.01mm/s 时,燃烧达到稳定状态,燃面形状不再改变。

3.2 低压下气相燃烧特性

3.2.1 温度及组分分布

根据仿真所得气相温度场数据处理得到燃烧稳定时低压下气相温度分布云图如图 5 所示,从图中可以看出,在低压下,AP/HTPB 复合推进剂燃烧火焰温度相对较低,随着压强的增大,气相温度有所升高,高温区也更加贴向燃面。AP 上方气相近燃面处温度高于黏合剂上方,燃面下陷区域附近气相温度最低,近燃面处温度表现出一定的非均匀性。

作为对比,图 6 给出了 5MPa 下气相温度分布云图,高压下整体火焰结构呈现为明显的“V”形,AP 与

Table 2 Pressure conditions

Parameter	Low pressure				Middle	High pressure			
Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pressure/MPa	0.02	0.04	0.06	0.08	0.185	2.0	3.0	4.0	5.0

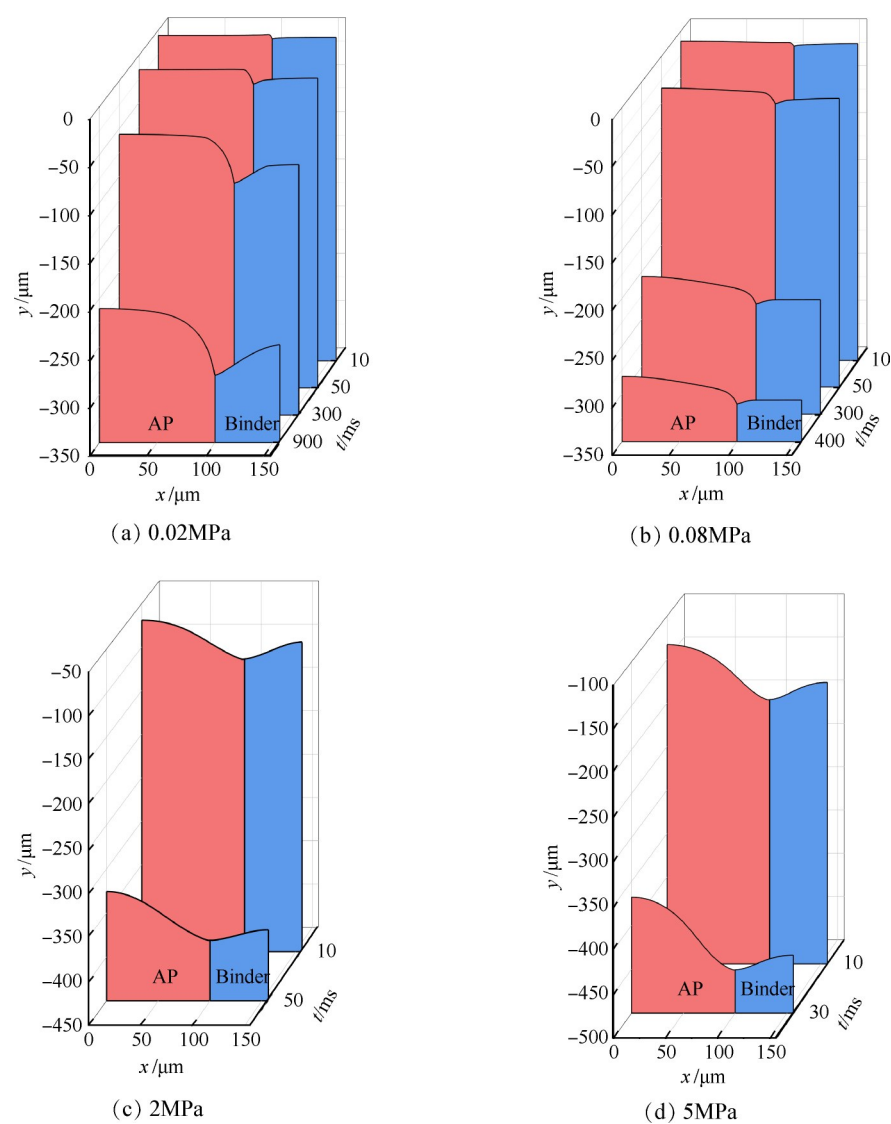


Fig. 3 Surface profiles at different moments under various pressures

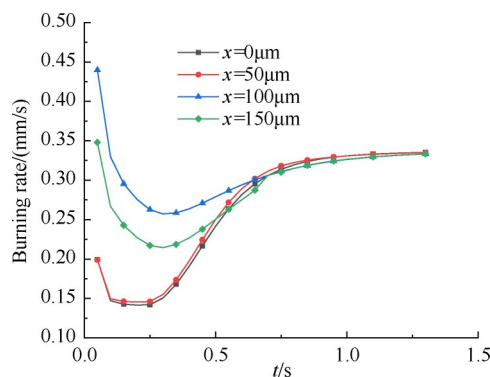


Fig. 4 Burning rate curve at different points on the burning surface at 0.02MPa

黏合剂上方温度较低,高温区位于交界面上方,与低压下较为均匀的温度分布差别很大。图 7 给出了 0.02MPa 下和 5MPa 下气相距燃面最高点不同高度处的温度曲线。由图 7(a)可以看出低压下温度不均匀区域集中在距燃面最高点 100 μm 以内,主要是由于

燃面形状不均匀而造成的。而图 7(b)中高压下气相温度的不均匀性则更为明显。

根据仿真所得气相组分质量分数数据处理得到 0.02MPa 下和 5MPa 下燃烧稳定时各反应的反应物组分分布云图(图 8,图 9)。在低压下,AP 和黏合剂的直接分解产物主要分布在燃面附近,而组分 X 和组分 Y 分布在距燃面稍远处,高压下推进剂直接分解产物位于贴近燃面的薄层,组分 X 分布在 AP 上方,组分 Y 分布在黏合剂上方。高低压下组分分布的差异表明不同压强下扩散速率与化学反应速率不同,高压下化学反应速率较快,组分在充分扩散之前就已经完全反应,而低压下化学反应速率较慢,扩散速度相对较快,组分能够充分扩散,形成预混火焰。

3.2.2 气相反应分步释热特性分析

处理仿真所得气相反应体积放热率数据得到 0.02MPa 下燃烧稳定时各步反应体积放热率云图(图

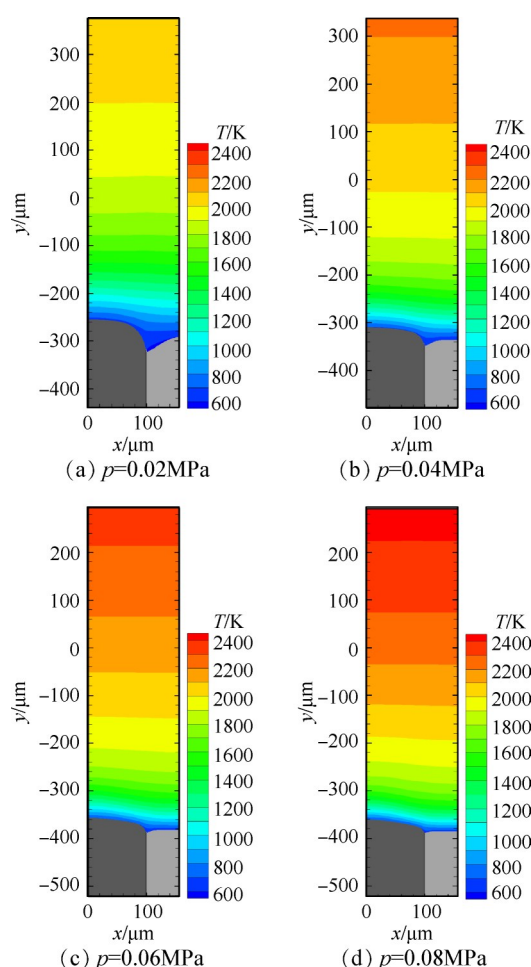


Fig. 5 Gas phase temperature contours under low pressure

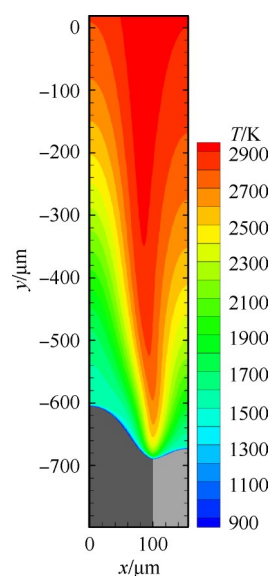


Fig. 6 Gas phase temperature contours at 5 MPa

10), 可以看到, 低压下 AP 单组元分解焰主要集中在 AP 上方, 黏合剂预混焰集中在黏合剂上方, 初焰集中在 AP/黏合剂交界上方附近区域, 终焰距离燃面较远。第三步反应的体积放热率远大于其他各步反

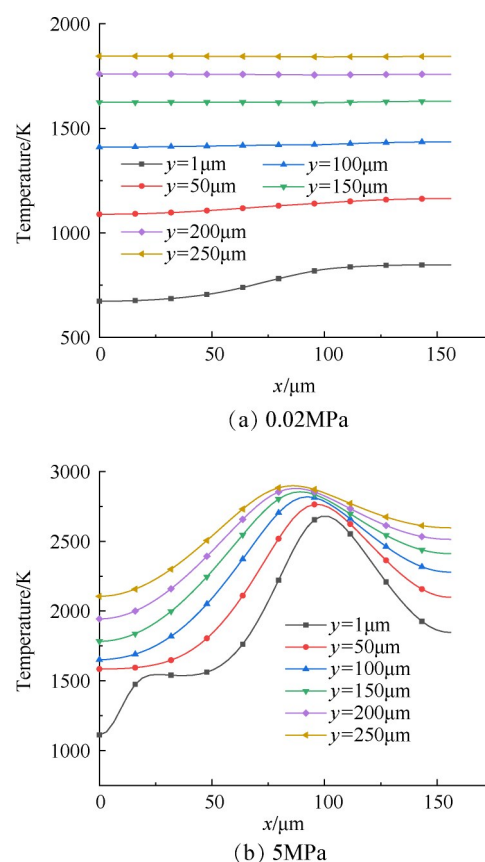


Fig. 7 Temperature curve of gas phase at different location

应, 且其反应区较其他反应更贴近燃面。根据表 1 中的反应参数, 从各步反应的活化能来看, 第三步反应活化能最低, 是四步反应中最易发生的反应, 同时, 其反应物为固相 AP 和黏合剂的直接分解产物, 而不是其他气相反应的产物, 低压下 AP 和黏合剂直接分解产物分布面积较大, 能更多地参与第三步反应, 所以其反应区最接近燃面。第四步反应虽然活化能数值与第二步相同, 但是其反应物 X 和 Y 是第一步反应和第二步反应的反应产物, 反应取决于这两步反应的进行, 因此反应区距燃面最远。

作为对比, 图 11 为 5 MPa 下燃烧稳定时各步反应体积放热率云图。各火焰的位置与形状同低压相比差别很大: 反应放热区均缩小, AP 单组元分解焰和黏合剂预混焰为紧贴燃面的薄层, 初焰位于 AP/黏合剂交界面上方的极小的区域, 终焰分布在 AP/黏合剂交界面上方狭长区域内。如前所述, 高压下化学反应速率较快, 组分的扩散速度小于反应速度。由图 9 (a), (b) 可以看出 AP 与黏合剂直接分解产物在扩散之前就已经较多地参与了第一步与第二步反应, 因此第三步反应仅位于交界面附近较小的区域内。组分 X 和组分 Y 占比的增加, 促进了第四步反应, 组分混合后快速反应, 形成了狭长的反应区, 使得组分分布

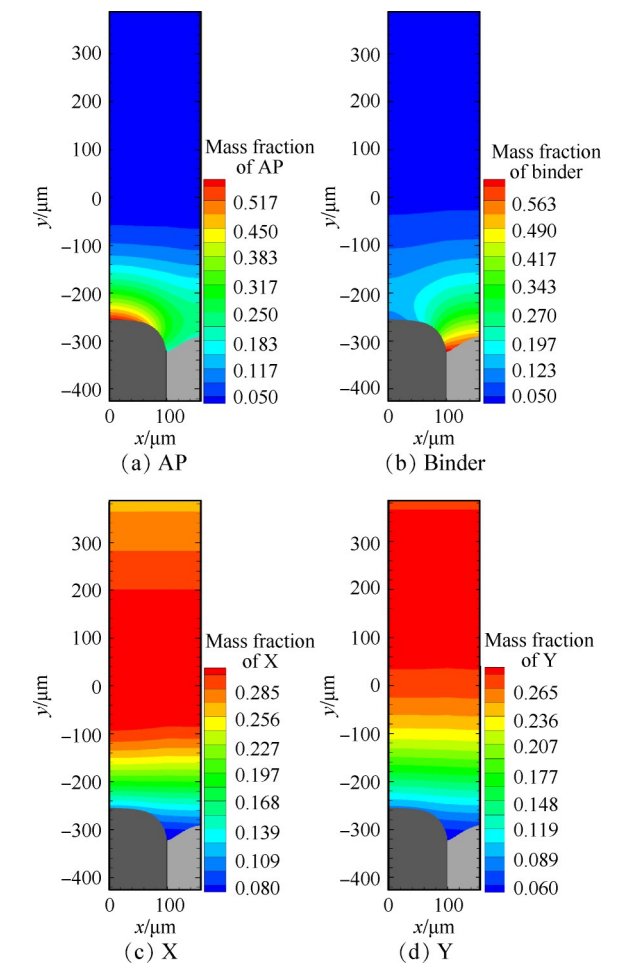


Fig. 8 Component mass fraction distribution at 0.02MPa

区域相互独立,与低压下组分充分扩散的分布不同。

对各步反应体积放热率积分得到反应热释放,如图 12 所示。可以看出,在 0.02~0.08MPa 下,第三步反应热释放占比最高,是低压下的主导反应,第四步反应热释放虽然较第三步少,但是随着压强的上升,其占比不断提升,由 0.02MPa 时的 6.88% 提高到了 0.08MPa 时的 20.02%。而在 5MPa 时,第四步反应热释放占比最高,达到了 76.65%,成为高压下的主导反应。如前所述,由于 AP 和黏合剂的直接分解产物既是前两步反应的反应物也是第三步反应的反应物,高压下固相直接分解产物较多地参与了前两步反应,使得第三步反应所需的反应物减少,而第四步反应的反应物占比增加,因此第四步反应成为主导反应。尽管第三步反应体积放热率仍然高于其他反应,但是其热释放占比却低于其他反应,仅为 5.81%。在 5MPa 时第三步反应的热释放甚至低于 0.08MPa 时的热释放,其原因在于高压下参与第三步反应的反应物较少。

高低压下气相火焰位置、形状和放热存在明显

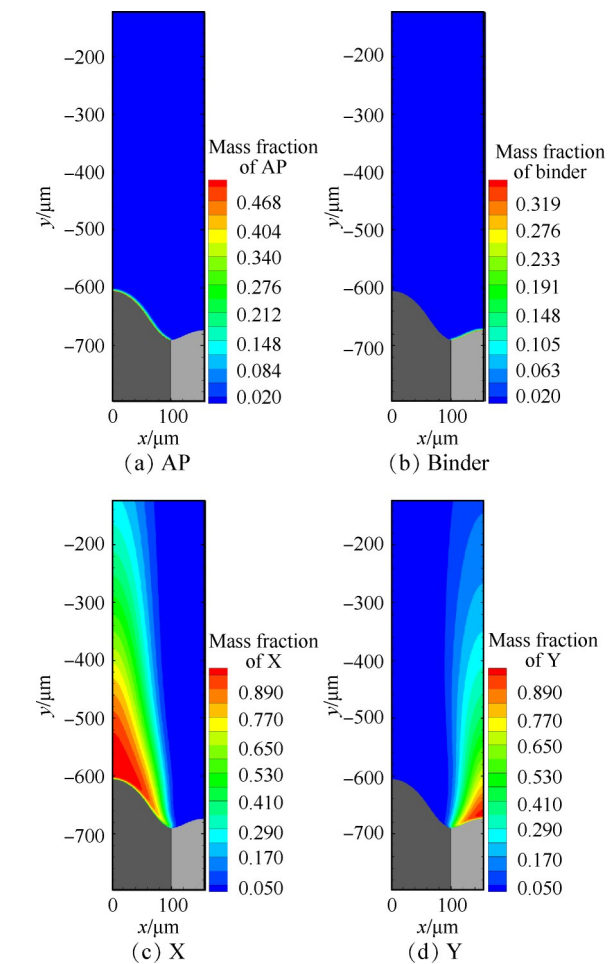


Fig. 9 Component mass fraction distribution at 5MPa

差异,因此导致了前述气相温度分布上的差异。

3.3 固相燃烧机理及燃速特性

3.3.1 固相温度分布

由仿真所得固相温度场数据处理得到低压下燃烧稳定时固相温度分布云图如图 13 所示,可以看出近燃面处 AP 温度高于黏合剂,距离燃面较远处两者温度相差不大,随着压强的升高,近燃面处固相温度也随之升高。

图 14 给出了 $x=0$ 处固相温度曲线,横坐标表示与燃面的距离。可以看出,压强越高,固相深处温度越低,这表明燃面退移速度会影响固相传热,压强高时燃面退移速度快,热量更难向固相深处传递。图中红色虚线为文献[24]中 0.04MPa 下实验所得固相温度曲线,仿真值与实验值基本吻合。低压下燃烧稳定时燃面温度沿 x 方向的变化曲线如图 15 所示,可以看到各压强下 AP 部分燃面温度最高,在界面附近温度变化较大,黏合剂靠近界面附近温度最低,燃面温度分布与前述气相温度相符合。压强越低,燃面整体温度越低,黏合剂的最低温度与最高温度

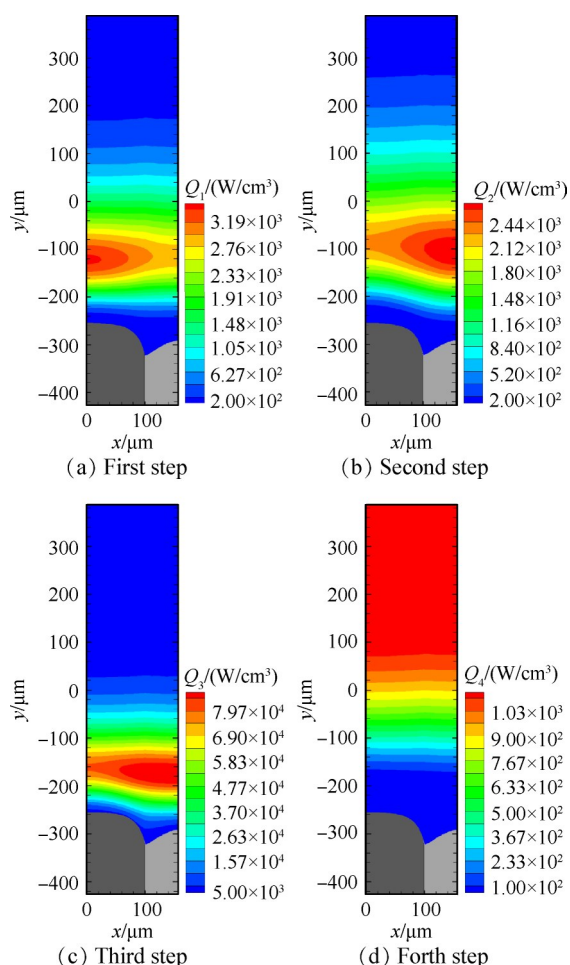


Fig. 10 Reaction heat release rate contours at 0.02MPa

相差越大,温度曲线平直段越短,结合图 13 可以发现燃面形状对于燃面温度分布有较大影响。

3.3.2 固相燃烧机理分析

(1) 燃面不平整机理分析

由式(2),式(3)计算得到 AP 和黏合剂分解速率随温度的变化曲线如图 16 所示,可以看出,由于两者指前因子和活化能的不同,在温度低于 785K 时,相同温度下黏合剂分解速率大于 AP,温度高于 785K 时则相反。由图 15 可知,在本文研究的低压范围内,燃面温度较低,此时黏合剂分解速率高于 AP,造成了 AP 突出于燃面。

(2) 交界处凹陷机理分析

文献[27]中对三明治夹层推进剂高压下的燃烧实验也出现了交界面处燃面下陷的现象,作者认为这种现象是 AP 与黏合剂之间的扩散火焰造成的,由本文高压下仿真结果的图 6 和图 11 可以验证这种解释。但是对于本文研究的低压条件,由于各火焰距燃面较远,对交界面处影响有限,AP 与黏合剂之间的扩散火焰不是造成交界面下陷的主要原因。图 17 给

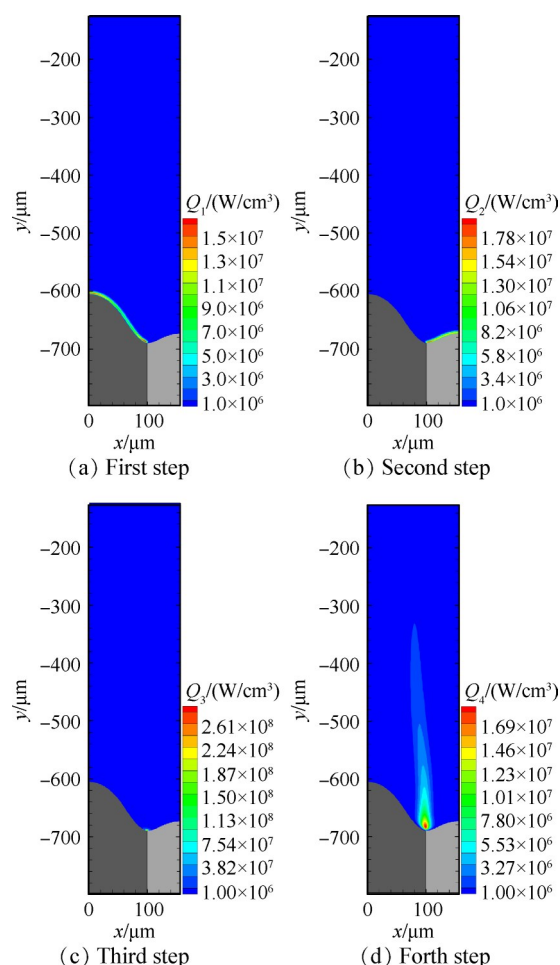


Fig. 11 Reaction heat release rate contours at 5MPa

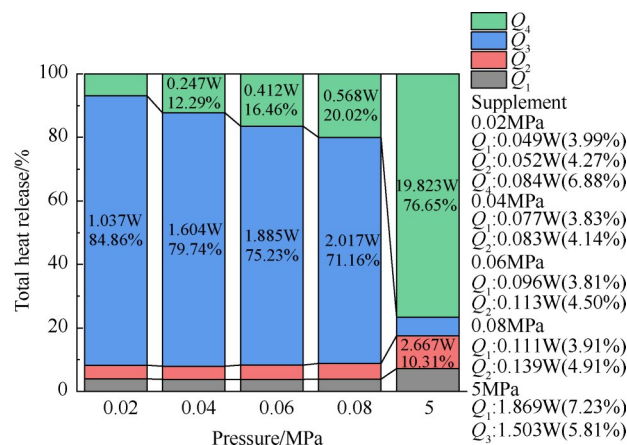


Fig. 12 Heat release of each reaction under various pressure

出了 0.02MPa 下 10ms 时固相温度分布云图,可以看出,在燃烧初期,靠近燃面处 AP 的温度明显高于黏合剂,此时高温的 AP 会向黏合剂传热,这种现象使得靠近交界面处的黏合剂温度升高,燃速较快,造成了该区域燃面的下陷,因此低压下 AP 向黏合剂的传热是交界面下陷的主要原因。

(3) 压强对燃面不均匀性的影响机理分析

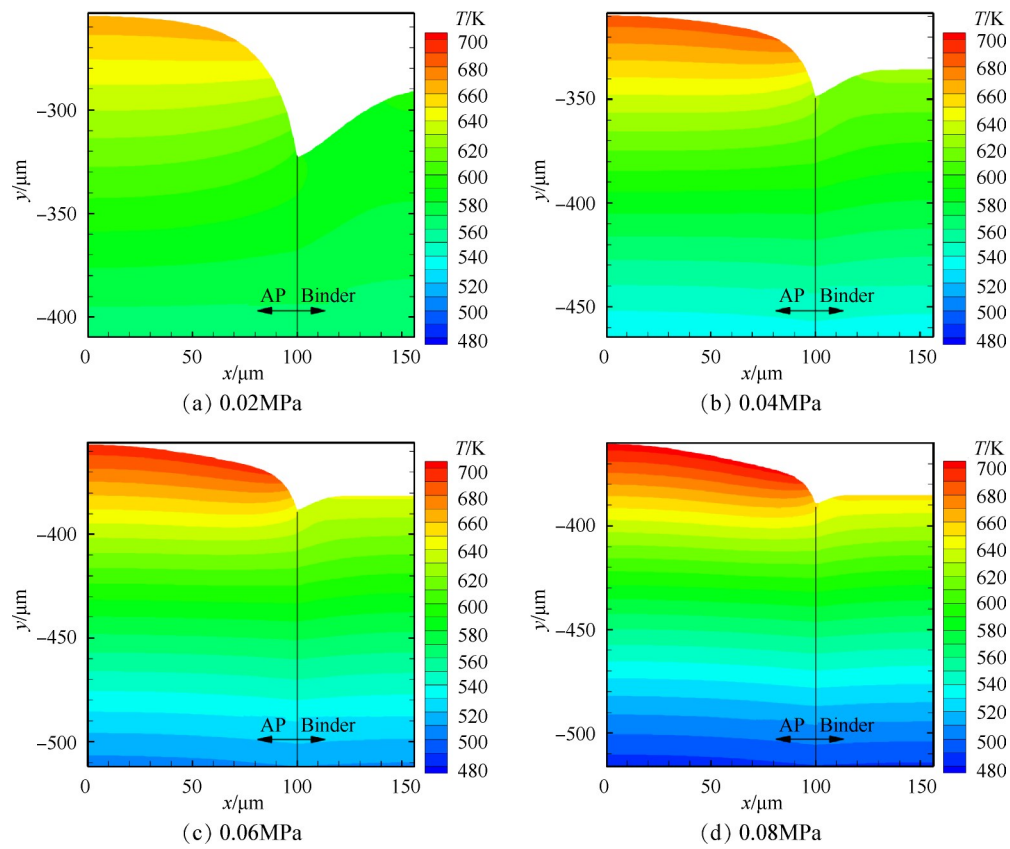


Fig. 13 Solid phase temperature contours under various pressure

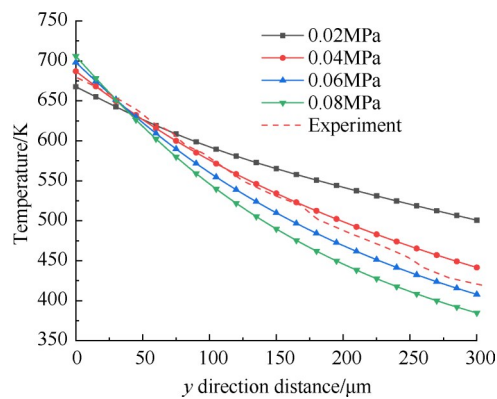


Fig. 14 Temperature curve at $x=0$ under various pressure

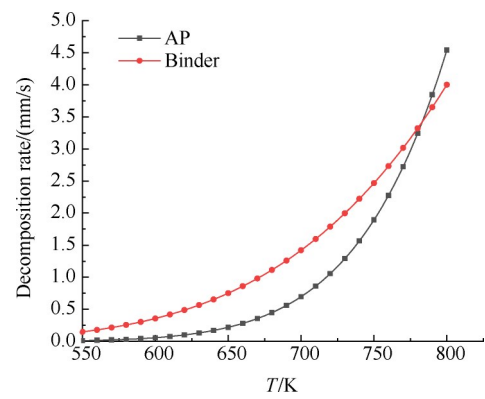


Fig. 16 Decomposition rate of AP and Binder

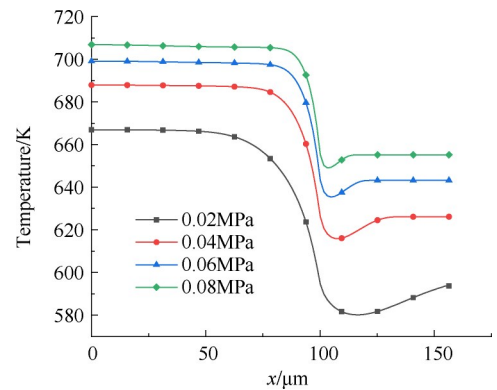


Fig. 15 Temperature curve of burning surface under various pressure

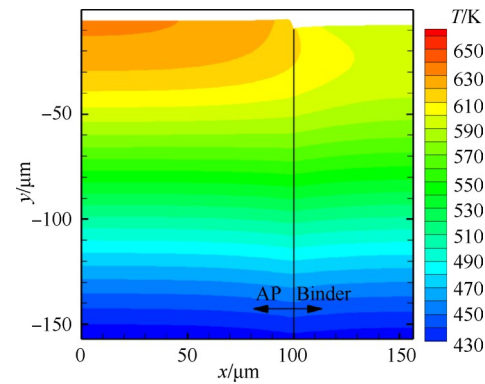


Fig. 17 Solid phase temperature contours at 10ms, 0.02MPa

对于低压下不同压强对燃面不均匀性的影响分析如下:由式(1)可知,气相反应速率与压强有关,压强上升会使气相反应速率升高,火焰更靠近燃面(如图5所示),这使得固相表面温度升高,由图16可知,在低压下,随着燃面温度的升高,AP与黏合剂燃速差值会变小,由此燃面不均匀程度变小,交界面处凹陷程度也随之减小,而在高压下,随着燃面温度的升高,AP与黏合剂燃速差值变大,使得燃面不均匀程度增大。

3.3.3 推进剂燃速特性分析

将算例1~算例5(0.02~0.185MPa)仿真所得稳定状态时的 y 方向的燃速值与实验值进行对比,结果如图18所示。

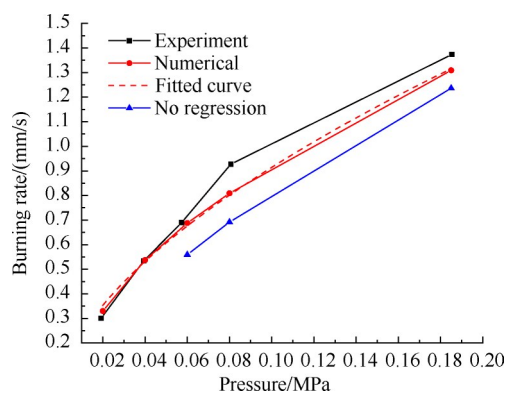


Fig. 18 Burning rate variation with pressure under low pressure

除了压强为0.08MPa时仿真值明显低于实验值(相差13%),在其他压强下仿真值与实验值较为接近,差值均在6%以内。由此处燃速对比以及上文中固相温度对比,可以认为本文模型能够较为准确地反映该推进剂低压下的燃烧特性,数值方法合理。对仿真所得燃速值进行指数拟合,结果如图18中红色虚线所示,发现低压下燃速随压强变化基本符合指数形式,燃速公式为 $r = 3.599p^{0.597}$ 。对算例6~算例9(2~5MPa)仿真所得燃速值进行拟合,得到高压下燃速公式为 $r = 3.527p^{0.752}$,可以发现,高压下的压强指数明显大于低压,而燃速系数相差不大。如前所述,低压下初焰是主导火焰,随着压强的增加,终焰放热占比增加而初焰占比减小,终焰成为主导火焰。压强指数的变化体现了高压和低压下不同主导火焰的影响。图18中蓝线为不考虑燃面退移(燃面均匀)时计算所得燃速值曲线,可以看到在各个压强下,不考虑燃面退移所得燃速与实验存在较大偏差。因此在进行低压下AP/HTPB复合推进剂燃烧的准确模拟

时,有必要考虑燃面退移造成表面不均匀这一重要因素。

4 结 论

本文对AP/HTPB复合推进剂低压燃烧特性进行了数值模拟研究,得到了以下结论:

(1)低压下AP燃面高于黏合剂,AP/黏合剂交界处燃面会下陷,随着压强的降低,AP燃面突出程度和交界面处燃面下陷程度增大,随着燃烧的进行,燃面各点燃速趋于一致,燃面形状不再改变。

(2)低压与高压下气相化学反应速率与扩散速率的不同造成了燃烧特性的不同;高压下为扩散火焰,初焰放热占比最低,而低压下为预混火焰,初焰成为主导反应,放热占比最高。

(3)低压下固相AP对黏合剂的传热导致了交界面处燃面的下陷,压强通过影响燃面温度从而影响AP与黏合剂的燃速,使得燃面不均匀性随压强降低而增大。

(4)仿真所得低压下燃速与实验值相差不大,随压强变化基本符合指数形式,压强指数小于高压下的压强指数,而燃速系数变化不大。

参考文献

- [1] Boraas S, Hyland B, Smart L. Predicted Post Burn Residual Thrust for an Orbital Transfer Motor [C]. Monterey: 21st Joint Propulsion Conference, 1985.
- [2] Kakami A, Hiyamizu R, Shuzenji K et al. Laser-Assisted Combustion of Solid Propellants at Low Pressures [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(6): 1355-1360.
- [3] Kakami A, Hamada T, Shimoda M, et al. Throttleable Solid Propellant Microthruster Using Laser-Assisted Combustion [C]. San Jose: 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013.
- [4] Zhang L, Tian R, Zhang Z. Burning Rate of AP/HTPB Base-Bleed Composite Propellant under Free Ambient Pressure [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 62: 31-35.
- [5] Beckstead M W, Boggs T L, Derr R L. Surface Structure of Ammonium Perchlorate Composite Propellants [J]. *AIAA Journal*, 1970, 8(2).
- [6] Price E W, Sambamurthi J K, Sigman R K, et al. Combustion of Ammonium Perchlorate-Polymer Sandwiches [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 63(3): 381-413.
- [7] Buckmaster J, Jackson T L, Yao J. An Elementary Discussion of Propellant Flame Geometry [J]. *Combustion*

- and Flame*, 1999, 117(3): 541–552.
- [8] Chorpene B T, Knott G M, Brewster M Q. Flame Structure and Burning Rate of Ammonium Perchlorate/Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Propellant Sandwiches[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 847–853.
- [9] Jackson T L, Buckmaster J. Nonpremixed Periodic Flames Supported by Heterogeneous Propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(3): 498–504.
- [10] 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.
- [11] Gross M L, Hedman T D. Towards the Simplified Composite Propellant Burning Rate Model Based on Detailed Chemistry Calculations[J]. *International Journal of Energetic Materials & Chemical Propulsion*, 2015, 14(5): 399–420.
- [12] 叶 锐, 余永刚, 曹永杰. AP/HTPB推进剂扩散火焰结构分析[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(6): 766–770.
- [13] 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.
- [14] 曹永杰, 余永刚, 叶 锐. AP/HTPB复合推进剂微尺度燃烧模型及数值分析[J]. 推进技术, 2013, 34(11): 1567–1574. (CAO Yong-jie, YU Yong-gang, YE Rui. A Microscale Combustion Model and Numerical Analysis of AP/HTPB Composite Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(11): 1567–1574.)
- [15] 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.
- [16] Hegab A, Jackson T L, Buckmaster J, et al. Non-steady Burning of Periodic Sandwich Propellants with Complete Coupling Between the Solid and Gas Phases[J]. *Combustion and Flame*, 2001, 125(1–2): 1055–1070.
- [17] Hegab A M, Sait H H, Hussain A, et al. Numerical Modeling for the Combustion of Simulated Solid Rocket Motor Propellant[J]. *Computers & Fluids*, 2014, 89: 29–37.
- [18] Ramakrishna P A, Paul P J, Mukunda H S. Sandwich Propellant Combustion: Modeling and Experimental Comparison[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 2963–2973.
- [19] Ramakrishna P A, Paul P J, Mukunda H S, et al. Combustion of Sandwich Propellant at Low Pressures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2097–2104.
- [20] Kuwahara T, Kubota N. Low Pressure Burning of Ammonium Perchlorate Composite Propellants[J]. *Combustion Science and Technology*, 1986, 47(1–2): 81–91.
- [21] Yano Y, Miyata K, Kubota N, et al. Combustion Wave Structure of AP Composite Propellants[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1987, 12(4): 137–140.
- [22] Miller M S, Holmes H E. Sub-Atmospheric Burning Rates and Critical Diameters for AP/HTPB Propellant[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1990, 6(5): 671–672.
- [23] Krishnan S, Swami R. Effect of Burning Rate Modifiers on Sub-atmospheric Flame Temperatures of AP/HTPB Composite Solid Propellants[J]. *Defence Science Journal*, 1998, 48(2): 211–217.
- [24] Tanaka M, Nakao C, Hayakawa S. Combustion of Solid Propellants at Low Pressure[C]. *Las Vegas: 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2000.
- [25] 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.
- [26] Jeppson M, Beckstead M, Jing Q. A Kinetic Model for the Premixed Combustion of a Fine AP/HTPB Composite Propellant[C]. *Reno: 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1998.
- [27] Price E W, Handley J C, Panyam R R, et al. Combustion of Ammonium Perchlorate-Polymer Sandwiches[J]. *AIAA Journal*, 1981, 19(3): 380–386.

(编辑:梅 瑛)