

文章编号:1006-9941(2019)01-0001-08

# 旋转条件下 AP/HTPB 二维火焰结构的数值分析

叶振威,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:** 为了研究底排推进剂高氯酸铵/端羟基聚丁二烯(AP/HTPB)旋转条件下微尺度燃烧特性,建立了 AP/HTPB 二维周期性三明治定常旋转燃烧模型,气相采用两步总包反应,耦合气固热边界层,拟合旋转动量,并对燃烧压力为 0.1~5 MPa,转速 0~10800 r·min<sup>-1</sup> 条件下的二维火焰结构进行了数值模拟。结果表明,转速在 10200 r·min<sup>-1</sup> 的工况下,当燃烧压力为 0.1~0.5 MPa 时,火焰呈预混燃烧特性;当燃烧压力为 0.5~3.5 MPa 时,火焰呈现扩散、预混燃烧双重特性;当燃烧压力大于 3.5 MPa 时,形成狭长的扩散化学反应带。分别针对不同燃烧压力和不同转速下的稳态燃烧过程进行了数值分析,得知气相火焰偏转角与压力呈线性正相关;转速在 0~10200 r·min<sup>-1</sup> 之间时气相火焰偏转角与转速呈线性增长,但是当转速在 10200~10800 r·min<sup>-1</sup> 时,气相火焰偏转角与转速近似呈指数增长。燃面平均雷诺数的变化趋势与气相火焰偏转角度基本一致,因此可以通过燃面平均雷诺数来描述旋转与压力对气相火焰偏转角度的影响。

**关键词:** 高氯酸铵/端羟基聚丁二烯(AP/HTPB);复合固体推进剂;数值模拟;旋转;火焰结构

中图分类号: TJ55; V512

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018052

## 1 引言

底部排气增程是近年来大口径榴弹实现增程的一种有效技术途径,通过底排装置向弹丸底部低压区排入质量和能量,进而提高弹底压力来实现弹丸减阻增程。底排装置的减阻性能不仅与弹丸参数、推进剂参数等有关,同时也受弹丸旋转效应的影响。现有的底排装置主要使用高氯酸铵/端羟基聚丁二烯(AP/HTPB)复合推进剂,因此研究旋转条件下 AP/HTPB 的燃烧特性对底排弹研究尤为重要。

国内许多学者对旋转条件下底排装药的燃烧进行了试验研究。张炎清<sup>[1]</sup>通过底排装置地面旋转试验研究,建立了包含旋转在内的底排药柱新的燃烧公式。商国云<sup>[2]</sup>等分析了多种底排装药的燃速受高速旋转影响的试验结果,提出了火焰压迫模型,并建立了模型的

数学表达式和计算程序。陆春义<sup>[3]</sup>等通过半密闭爆发器模拟炮口工况,进行了高降压速率下底排推进剂瞬变燃烧特性试验研究,试验表面,在火炮发射条件下,底排推进剂处于永久熄灭/熄灭后复燃的临界状态。

由于 AP/HTPB 复合推进剂燃烧化学反应过程非常复杂,采用详细化学反应动力学机理的数值模拟计算其微观火焰结构还存在较大困难。对此,许多学者进行了大量的理论研究。Beckstead<sup>[4]</sup>等提出了现在常用的 BDP 火焰结构模型。基于 BDP 模型,Yang<sup>[5]</sup>给出稳态条件下基于 BDP 模型的 AP/HTPB 燃烧数值模拟,分析了燃烧工况对火焰结构和燃面形状的影响,验证了模型的有效性。Hegab<sup>[6]</sup>通过基于两步反应的 AP/HTPB 燃烧计算模型,验证了不同工况下的火焰结构、燃面几何型面、燃烧速率的影响以及模型的有效性。Insert<sup>[7]</sup>通过平面激光诱导技术(PLIF)分别观察 AP/HTPB 在低压和高压工况下火焰结构,并观察到了在点火具作用下的二次扩散火焰形态。马龙泽<sup>[8]</sup>等通过微观数值模拟,分析了 AP 含量对 AP/HTPB 燃烧特性的影响。

以上微观 AP/HTPB 燃烧的研究均在非旋转条件下进行,为模拟 AP/HTPB 在底排弹中旋转燃烧的实际工况,基于气相火焰与固相推进剂耦合,本研究利用计算流体力学方法,从流动燃烧角度,采用两步总包反

收稿日期:2018-03-06;修回日期:2018-05-16

网络出版日期:2018-07-05

基金项目:国家自然科学基金资助(51176076)

作者简介:叶振威(1992-),男,博士研究生,主要从事含能材料高压瞬态燃烧机理研究。e-mail:yzwflame@163.com

通信联系人:余永刚(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事含能材料燃烧、推进技术等相关内容研究。e-mail:yygnjust801@163.com

引用本文: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 (Han-neng Cailiao), 2019, 27(1):1-8.

应,通过BDP火焰结构模型,建立了二维周期性三明治定常燃烧模型,计算模拟了不同燃烧压力下和不同转速下的燃烧特性。

## 2 物理模型

底部排气弹是在弹丸底部有一个底排装置的特殊炮弹,底排装置内装有AP/HTPB推进剂和点火具。弹丸在发射过程与高空飞行过程中会高速旋转,为了研究底排推进剂在旋转过程中的燃烧特性,建立了AP/HTPB二维周期性三明治定常燃烧模型,其结构如图1所示。

针对AP/HTPB二维周期性三明治定常旋转燃烧模型,提出以下基本假设:

(1)采用Arrhenius定律描述固相分解反应;采用BDP多火焰模型的两步总包反应描述气相反应;

(2)燃气为不可压缩理想气体,气相中所有组分的 $Le=1$ , $c_p$ 为常数, $\lambda_g$ 随温度变化;

(3)固相中的粘结剂HTPB和氧化剂AP当做两种相互独立的组元,且具有不同的热物理参数;

(4)仅考虑气相对燃烧表面的热传导作用,忽略气相的热辐射作用;

(5)以源项法描述固相分解反应和气相预混扩散燃烧;

(6)将旋转对微尺度模型的影响假设为气固区域的平动和气固耦合面的滑移,在气固耦合面加入切向动量来描述气固区之间的滑移。

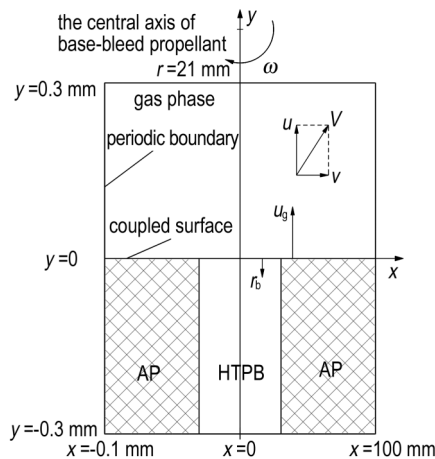


图1 AP/HTPB周期边界微观三明治结构

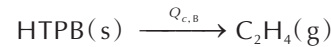
Fig. 1 Micro-scale sandwich structure of AP/HTPB periodic boundary

## 3 数学模型

### 3.1 化学动力学方程

采用Arrhenius定律<sup>[6]</sup>描述固相分解反应,AP和

HTPB单独进行各自的分解反应:



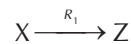
热解速率为:

$$\dot{m}_{AP} = \rho_{AP} A_{AP} \exp(-E_{AP}/R_u T_{AP,s}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_B = \rho_B A_B \exp(-E_B/R_u T_{B,s}) \quad (2)$$

式中, $Q_{c,AP}$ 、 $Q_{c,B}$ 分别为AP和HTPB的分解热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\rho_{AP}$ 、 $\rho_B$ 分别为AP和HTPB的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $A_{AP}$ 、 $A_B$ 为热解速率常数, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $E_{AP}$ 、 $E_B$ 为热解活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $T_{AP,s}$ 、 $T_{B,s}$ 分别为AP和HTPB燃面温度,K;  $R_u$ 为通用气体常数, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

采用文献[9]提供的两步总包反应机理,分别描述AP分解火焰和AP分解产物和HTPB分解气体反应形成的扩散火焰。基于质量的反应动力学<sup>[10]</sup>的两步总包反应式为:



式中,X组分为AP(g),Y组分为 $\text{C}_2\text{H}_4$ ,Z组分为 $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{HCl} + \text{N}_2$ , $\beta$ 为AP和HTPB的质量当量比,由HTPB体积分数 $\alpha$ 计算得知:

$$\beta = \frac{\rho_{AP}(1-\alpha)}{\rho_B\alpha} \quad (3)$$

化学反应速率为:

$$R_1 = K_1 p^{n_1} [X] \exp(-E_1/R_u T_g) \quad (4)$$

$$R_2 = K_2 p^{n_2} [Y][Z] \exp(-E_2/R_u T_g) \quad (5)$$

式中, $K_1$ 、 $K_2$ 为化学反应速率常数; $p$ 为燃烧压力,Pa;  $n_1$ 、 $n_2$ 为压力指数; $E_1$ 、 $E_2$ 为反应活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;下标1、2分别对应第一步和第二步反应;[X]、[Y]、[Z]分别为物质X、Y、Z的质量分数。

### 3.2 固相控制方程

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_c c_c r_b \frac{\partial T}{\partial y} = \nabla \cdot (\lambda_c \nabla T) \quad (6)$$

式中, $\rho_c$ 为固相密度; $c_c$ 为固相比热容; $r_b$ 为燃速; $\lambda_c$ 为固相导热系数,其中:

$$\lambda_c = \begin{cases} \lambda_{AP} & \rho_c = \begin{cases} \rho_{AP} & | \alpha L | < x < L \\ \rho_B & x < | \alpha L | \end{cases} \\ \lambda_B & \end{cases} \quad (7)$$

燃速表达式:

$$r_b = \begin{cases} r_{b,AP} = \dot{m}_{AP}/\rho_{AP} = A_{AP} \exp(-E_{AP}/R_u T_s) \\ r_{b,B} = \dot{m}_B/\rho_B = A_B \exp(-E_B/R_u T_s) \end{cases} \quad (8)$$

### 3.3 气相控制方程

连续性方程:

$$\operatorname{div}(\rho_g \bar{V}) = S_m \quad (9)$$

动量方程<sup>[11-12]</sup>:

$$\operatorname{div}(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{S_u}{\operatorname{Re}} - \rho \frac{\omega^2}{r} + S_m \frac{\rho_c r_b}{\rho_g} \quad (10)$$

$$\operatorname{div}(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{S_v}{\operatorname{Re}} - S_m \omega r \quad (11)$$

其中:

$$S_m = \frac{\dot{m} A_{\text{cell}}}{V_{\text{cell}}} = \frac{\rho_c r_b A_{\text{cell}}}{V_{\text{cell}}} \quad (12)$$

$$S_u = -\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \operatorname{div} V \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (13)$$

$$S_v = -\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \operatorname{div} V \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (14)$$

组分方程:

$$L(X, Y, Z) = (-R_1, -R_2, R_1 - \beta R_2) \quad (15)$$

能量方程:

$$L(T) = (Q_{g1} R_1 + Q_{g2} R_2) / c_p \quad (16)$$

算子  $L$  定义为:

$$L(\phi) \equiv \partial(\rho_g \phi) / \partial t \quad (17)$$

状态方程:

$$\rho_g R_u T = p M_u \quad (18)$$

式中,  $\bar{V} = (v_1, v_2) = (u, v)$ ,  $u$  和  $v$  分别为气体在  $x$  方向和  $y$  方向的速度分量,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho_g$  为气体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\mu$  为粘性系数,  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\omega$  为角速度,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 方向为顺时针;  $c_p$  为定压比热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\lambda_g$  为气相导热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $M$  为摩尔质量,  $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R_1, R_2$  为两步反应的化学反应速率,  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{g1}, Q_{g2}$  为两步反应的反应热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 3.4 边界条件

燃面处的温度连续、热流密度和组分通量平衡关系:

$$T_{0^+} = T_{0^-} \quad (19)$$

$$\lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0^+} + \rho_c i Q_c = \lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0^-} \quad (20)$$

$$\dot{m} Y_{i,0^+} = \dot{m} Y_{i,0^-} - \frac{\lambda_g}{c_p} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \Big|_{0^+} \quad (21)$$

式中,  $Q_c$  为相变热, 下标“0”表示燃面, “0<sup>+</sup>”和“0<sup>-</sup>”分别表示燃面的气相侧和固相侧。

对于图 1 所示的计算模型, 计算域为宽度的一半区域, 左右边界为周期性边界, 各物理量沿  $x$  方向的梯度为零; 下边界为远场边界, 温度为 300 K; 上边界为压力出口边界, 温度和组分沿  $y$  方向梯度为零, 数学表达式如下:

$$\partial F / \partial y \Big|_{y \rightarrow \infty} = 0, F = T, X, Y, Z \quad (22)$$

$$\partial F / \partial y \Big|_{x=0, \pm l} = 0, F = T, X, Y, Z \quad (23)$$

气相反应方程的组分源项, 质量源项, 能量源项, 动量源项, 熄火温度判定由 UDF 导入。

### 3.5 网格划分和求解参数设置

模型中的 AP、HTPB 以及相关燃气参数<sup>[13]</sup>如表 1 所示。

表 1 AP/HTPB 的相关燃烧参数<sup>[13]</sup>

Table 1 The related combustion parameters of AP/HTPB <sup>[13]</sup>			
parameter	value	parameter	value
$\rho_{AP} / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1950	$c_p / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	1255.2
$\rho_B / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	920	$E_{AP} / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$9.145 \times 10^4$
$\lambda_{s,AP} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.405	$E_B / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$6.236 \times 10^4$
$\lambda_{s,B} / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.276	$E_{B1} / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$6.651 \times 10^4$
$M_u / \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	34	$E_{B2} / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$9.145 \times 10^4$
$E_{AP} / R_u / \text{K}$	11000	$A_{AP} / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.45 \times 10^5$
$E_B / R_u / \text{K}$	7500	$A_B / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.036 \times 10^3$
$E_1 / R_u / \text{K}$	8000	$K_1$	$1.372 \times 10^4$
$E_2 / R_u / \text{K}$	1100	$K_2$	$1.55 \times 10^4$
$Pr$	0.79	$\beta$	8.478

采用基于有限体积方法的计算流体力学(CFD)软件 FLUENT 计算, 选用压力基求解器, 通过用户自定义标量(UDS)引入化学反应组分方程, 通过用户自定义函数(UDF)引入方程的源项。压力-速度耦合采用 SIMPLE 格式, 密度、动量、能量和组分方程的离散采用二阶迎风格式, 梯度的离散采用 Least Squares Cell Based 格式。

## 4 计算结果及分析

在计算前, 首先验证 AP/HTPB 推进剂燃烧模型的有效性。AP/HTPB 推进剂中 AP 颗粒直径为 110  $\mu\text{m}$ , AP 质量分数为 0.8 时, 对此 AP/HTPB 在不同燃烧压力下的稳态燃烧进行数值模拟, 得到平均燃速与 Kohga<sup>[14]</sup> 试验结果的对比图, 如图 2 所示。由图 2 可见, 两者数据与趋势基本保持一致。图 3 为不同转速下的平均燃速增大率与文献<sup>[15]</sup> 试验结果的对比图, 由图 3 可知, 两者吻合较好。稳态燃烧计算所得的燃速-压力指数为 0.453, 与 Knott<sup>[9]</sup> 给出的燃速-压力指数在 0.4~0.6 范围相吻合。

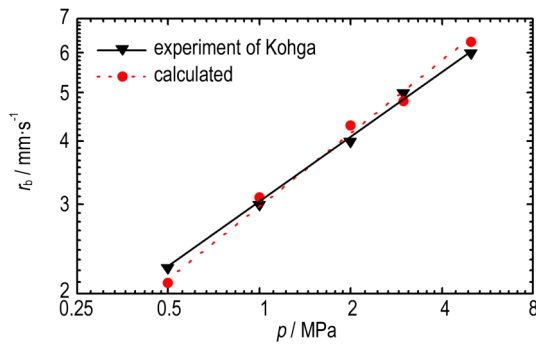


图2 平均燃速计算值与Kohga试验结果对比图

Fig.2 Comparison between the calculated average burning rates and the Kohga's experimental results

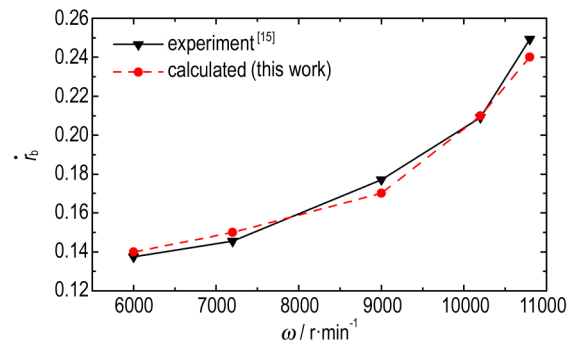


图3 平均燃速增大率计算值与试验结果对比

Fig.3 Comparison between the calculated average increase rate of burning rate and the experimental ones

#### 4.1 火焰结构特性

容积放热速率等于反应速率与反应热的乘积,将两步气相化学反应总的热释放速率定义为容积热释放速率,即  $Q = Q_1 + Q_2 = Q_{g1}\dot{\omega}_{g1} + Q_{g2}\dot{\omega}_{g2}$ ,容积放热速率分布反映了火焰结构特性,对应的AP/HTPB火焰结构

如图4所示。由图4可见,AP预混火焰主要集中在AP表面上方几乎不受旋转影响,而扩散火焰受旋转影响较大。因此可知旋转条件下,主要是扩散火焰发生偏转从而影响了AP/HTPB推进剂的燃烧。

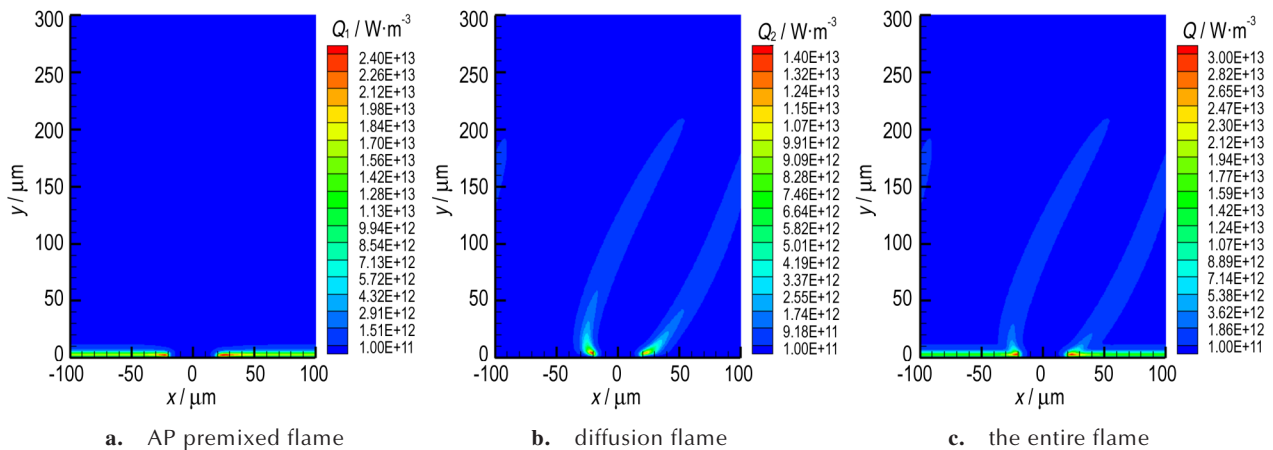


图4 AP/HTPB推进剂容积放热速率分布( $p=3.5$  MPa,  $\omega=10200$  r·min<sup>-1</sup>, 顺时针转动)

Fig.4 Volume heat release rate distributions of AP / HTPB propellant ( $p=3.5$  MPa,  $\omega=10200$  r·min<sup>-1</sup>, the rotation direction is clockwise)

图5给出了不同压力和不同转速( $\omega_1, \omega_2$ 为角速度, r·min<sup>-1</sup>)条件下,气相容积放热速率分布。低压与高压下燃烧有明显不同的结构特征,其本质在于化学反应过程与扩散过程相互竞争,速率较慢的一方为燃烧的主要因素。当压力小于0.5 MPa时,气相化学反应速率较小,相对而言扩散混合过程进行得较快,AP/HTPB分解产物有足够的时间扩散混合,火焰区域连在一起,形成预混占优化学反应带,化学动力学成为影响气相区化学反应的主导因素。随着压力从0.5 MPa升高到1.5 MPa,化学反应速率逐渐增大,扩散混合过程受到抑制,燃烧过程受化学动力学和扩散双重影响,合并的扩散火焰前沿开始分离。当压力大于1.5 MPa

时,化学反应速率较快,扩散混合过程进行得较慢,使得火焰放热核心处于AP/HTPB交界面上方偏向AP一侧,并在表面上方形成两条狭长的扩散占优化学反应带。

图6为不同压力条件下,AP/HTPB的气相火焰温度分布。由图6可以看出,随着压力的升高,燃烧火焰由预混结构逐渐发展为扩散结构。为了便于分析预混和扩散对火焰结构的影响,图7给出了不同压力下AP分解产物Z( $O_2+H_2O+HCl+N_2$ )的组分分布,Z组分分布能够体现扩散过程对燃烧的影响。从图7a可以看出在0.1 MPa时AP分解产物Z的含量较低,说明此时AP的分解速率较慢,扩散速率较快,因此Z组分消耗较快。



从图 6a 温度分布可以看出气相温度分布较平缓,说明此时 AP 分解产物 Z 和 Y(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)能更好地混合反应,总体上呈现预混火焰特征。当压力在 0.5~1.5 MPa 时(见图 6b~图 6d),气相化学反应速率加快,与扩散速率相

当,此时燃烧过程受化学动力学和扩散双重影响。当压力大于 1.5 MPa 时,扩散速率相对于化学反应速率较慢,AP 上方区域存在大量的 Z 组分(图 7e、图 7f),此时为扩散火焰,且压力越高扩散火焰越明显。

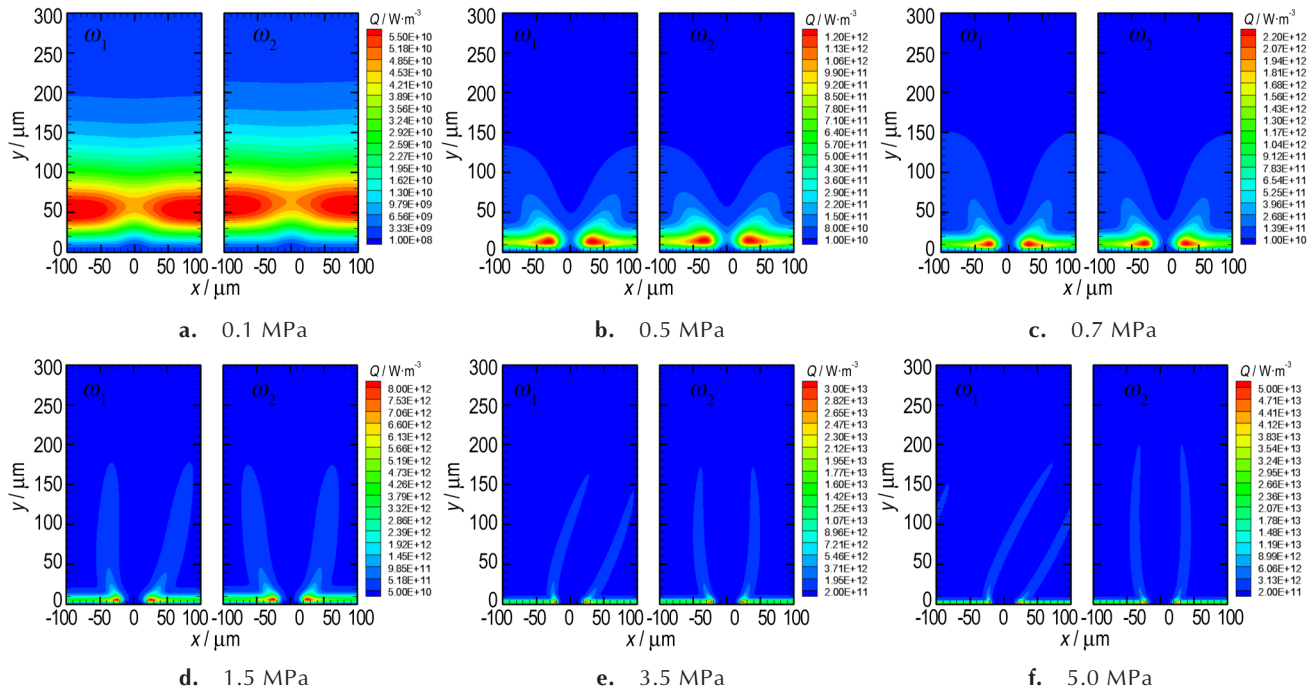


图 5 不同压力下 AP/HTPB 的容积放热速率分布( $\omega_1=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 顺时针转动;  $\omega_2=0$ )

Fig. 5 Volume heat release rate distributions at different pressure for AP/HTPB ( $\omega_1=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ . The rotation direction is clockwise.  $\omega_2=0$ )

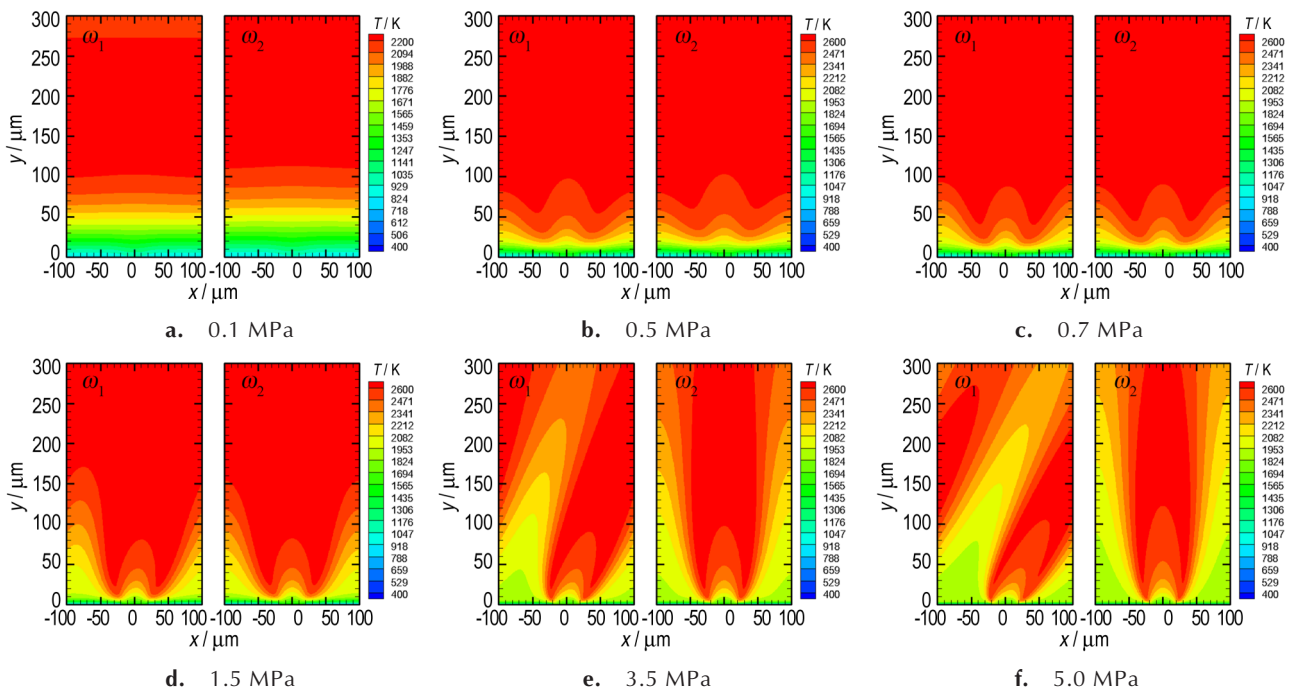


图 6 不同压力下 AP/HTPB 的气相火焰温度分布( $\omega_1=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 顺时针转动;  $\omega_2=0$ )

Fig. 6 Gas phase flame temperature distributions at different pressure for AP/HTPB ( $\omega_1=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ . The rotation direction is clockwise.  $\omega_2=0$ )

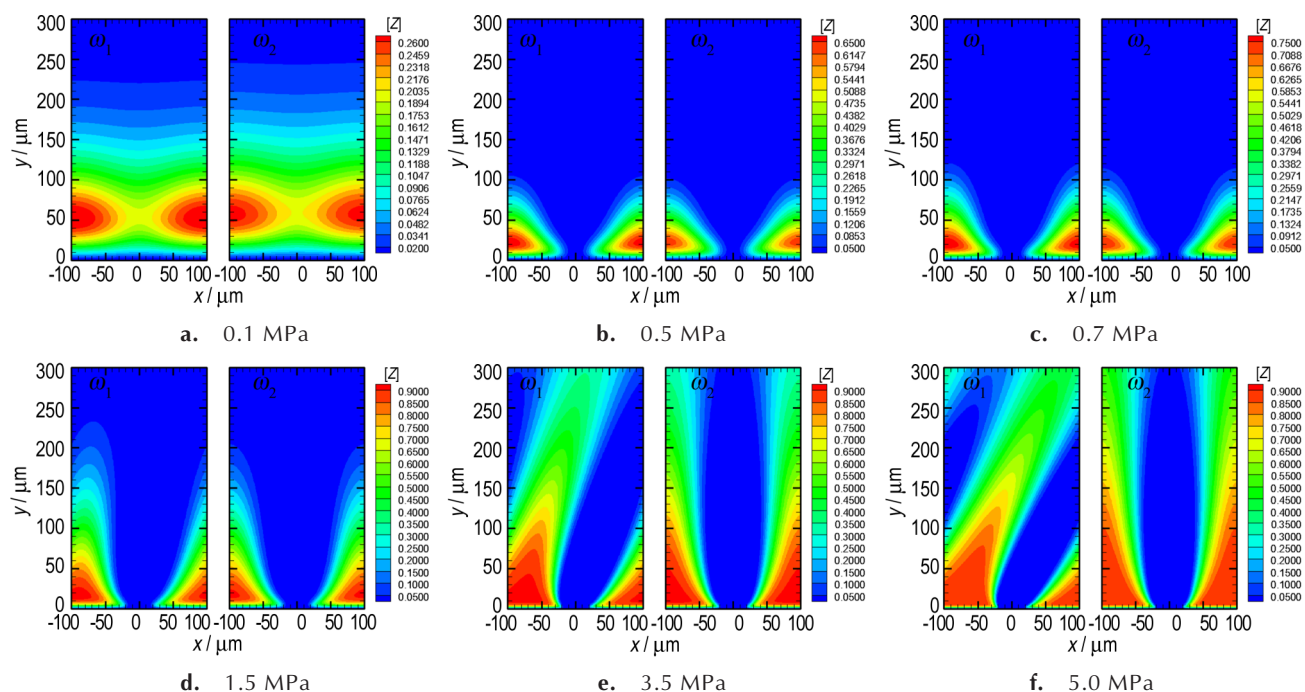


图7 不同压力下AP分解产物Z的组分分布( $\omega_1=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 顺时针转动;  $\omega_2=0$ , Z为 $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{N}_2$ )

Fig. 7 The composition distributions of AP decomposition product Z under different pressure ( $\omega_1=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ . The rotation direction is clockwise.  $\omega_2=0$ . Z is  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{N}_2$ )

#### 4.2 旋转对燃烧火焰的影响

图8为不同燃烧压力下气相火焰偏转角度分布, 图中以气相火焰等温线图为基础标注出不同转速下气

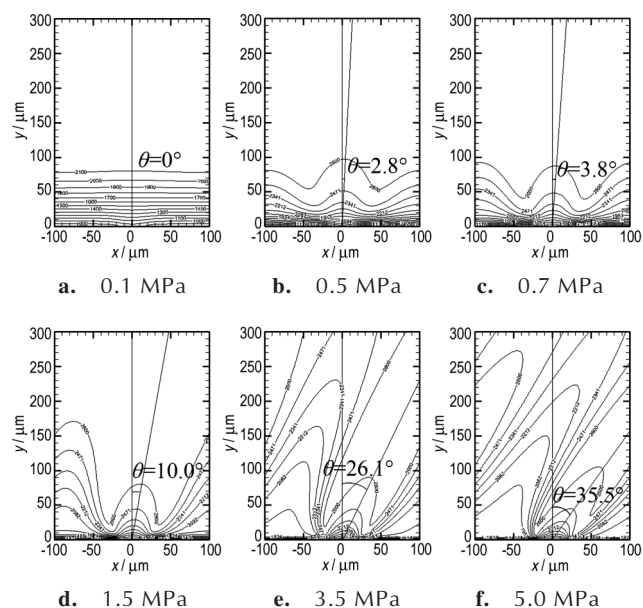


图8 不同压力条件下气相火焰偏转角度示意图(等温线图,  $\omega=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 顺时针转动)

Fig. 8 Schematic diagrams of deflection angle of gas phase flame under different pressure conditions (Isotherm map.  $\omega=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ . The rotation direction is clockwise)

相火焰的偏转角度。由图8可见, 当压力为0.1~5.0 MPa时, 气相火焰偏转角随着燃烧压力的增大而增大。为了更好地说明气相火焰偏转角和燃烧压力的关系, 此处引入燃面平均雷诺数。图9和图10分别为不同压力和不同转速下气相火焰偏转角度及燃面平均雷诺数分布图。由图9可知, 当燃烧压力在0.1~5 MPa时, 气相火焰偏转角与压力呈线性正相关, 且燃面平均雷诺数随压力变化趋势与气相火焰偏转角随压力变化趋势基本一致。

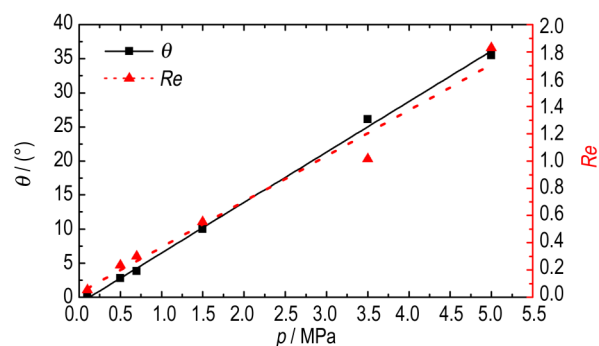


图9 气相火焰偏转角度及燃面平均雷诺数随压力变化( $\omega=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 顺时针转动)

Fig. 9 Change in gas flame deflection angle and average Reynolds number of combustion surface with pressure ( $\omega=10200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ . The rotation direction is clockwise)

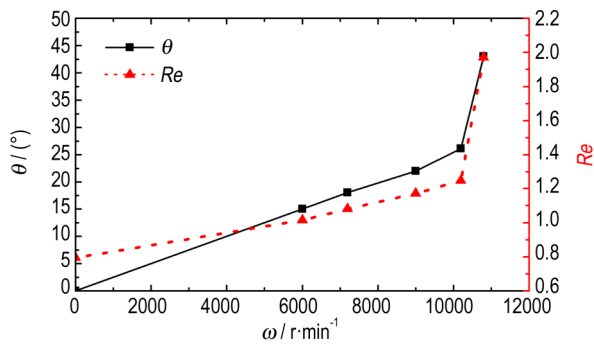


图 10 气相火焰偏转角度及燃面平均雷诺数随转速变化 ( $p=3.5$  MPa, 顺时针转动)

Fig. 10 Change in gas flame deflection angle and average Reynolds number of the combustion surface with the spinning speed ( $p=3.5$  MPa. The rotation direction is clockwise)

由图 10 可见, 转速在  $0\sim 10200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  之间时气相火焰偏转角与转速呈线性增长; 当转速在  $10200\sim 10800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  之间时, 气相火焰偏转角快速增大, 表现近似为指数增长, 且雷诺数变化趋势与气相火焰偏转角度变化趋势基本一致。图 8 中的气相火焰偏转角是估值, 具有一定的误差, 且在数值模拟中不易计算, 因此本研究认为可以用燃面平均雷诺数来描述燃烧压力与转速对气相火焰偏转角度的影响。

## 5 结论

(1) 建立了 AP/HTPB 二维周期性三明治定常旋转燃烧模型, 在不同燃烧压力和转速下, 得到的平均燃速、平均燃速增大率和燃速-压力指数分别与 Kohga<sup>[14]</sup>、郭锡福<sup>[15]</sup>和 Knott<sup>[9]</sup>实验结果相吻合, 验证了 AP/HTPB 旋转三明治燃烧模型的有效性。

(2) 对 AP/HTPB 不同压力下的稳态燃烧过程进行了数值模拟, 得知当压力为  $0.1\sim 0.5$  MPa 时, 火焰呈预混燃烧特性; 随着压力的升高, 当燃烧压力为  $0.5\sim 3.5$  MPa 时, 火焰呈现扩散、预混燃烧双重特性; 燃烧压力大于  $3.5$  MPa 时, 燃烧火焰结构发展为扩散结构。

(3) 对 AP/HTPB 不同转速下的稳态燃烧过程进行了数值模拟, 当燃烧压力在  $0.1\sim 5.0$  MPa 时, 气相火焰偏转角与压力呈线性正相关; 转速在  $0\sim 10200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时气相火焰偏转角与转速呈线性增长; 当转速在  $10200\sim 10800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 气相火焰偏转角与转速近似呈指数增长。燃面平均雷诺数变化趋势与气相火焰偏转角度变化趋势基本一致, 因此, 认为可以用燃面平均雷诺数来描述旋转与压力对气相火焰偏转角度的影响。

## 参考文献:

- [1] 张炎清. 底部排气弹底排装置旋转效应研究[J]. 兵工学报, 1988, (S1):73-77.  
ZHANG Yan-qing. Spinning effect of the base bleed motors in base bleed projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 1988, (S1): 73-77.
- [2] 商国云, 吴玉斌, 李奎武. 底排装药在高速旋转状态下燃速数学模型的探讨[J]. 弹箭与制导学报, 1993(1):52-58.  
SHANG Guo-yun, WU Yu-fu, LI Kui-wu. Discussion on burning rate mathematical model of base bleed peopellant at high speed rotation [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 1993(1):52-58.
- [3] 陆春义, 周彦煌, 余永刚. 高降压速率下复合底排药剂瞬变燃烧特性研究[J]. 含能材料, 2007, 15(6):587-591.  
LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Combustion of composite base bleed charge under rapid depressurization [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 587-591.
- [4] Beckstead M W, Derr R L, Price C F. A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames [J]. *AIAA Journal*, 1970, 8(12):2200-2207.
- [5] 杨月诚, 周志清, 周伟, 等. 基于 BDP 多火焰模型的简化复合固体推进剂燃烧数值分析[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(02): 185-190.  
YANG Yue-cheng, ZHOU Zhi-qing, ZHOU Wei, et al. Numerical analysis on combustion process of simplified composite solid propellant based on BDP multi-flames model [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(02):185-190.
- [6] 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(02):29-37.
- [7] Isert S, Connell T L, Risha G A, et al. Near-surface flame structure characterization of simplified ammonium perchlorate/hydroxyl-terminated polybutadiene compositions [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 164:201-211.
- [8] 马龙泽, 余永刚. AP/HTPB 推进剂微尺度燃烧特性的数值分析 [J]. 含能材料, 2017, 25(3):178-183.  
MA Long-ze, YU Yong-gang. Numerical simulation of micro-scale combustion characteristics of AP/HTPB propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3):178-183.
- [9] Knott G M, Brewster M Q. Modeling the combustion of propellant sandwiches [J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(4):61-90.
- [10] Wang X, Jackson T L, Massa L. Numerical simulation of heterogeneous propellant combustion by a level set method [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2004, 8(2):227-254.
- [11] 王革, 陈亮, 郜冶, 等. 旋转对固体火箭发动机燃烧室燃气流动的影响 [J]. 空气动力学学报, 2008, 26(2):208-211.  
WANG Ge, CHEN Liang, GAO Ye, et al. Spinning effect on the flow of exhaust gas in combustion chamber of a solid rocket motor [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(2): 208-211.
- [12] Surzhikov S, Murphy J, Krier H. 2D model for unsteady burning heterogeneous AP/binder solid propellants [C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2000:16-19.
- [13] Jackson T L, Buckmaster J. Heterogeneous Propellant Combustion [J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(6):1122-1130.

- [14] Kohga M. Burning characteristics and thermochemical behavior of AP/HTPB composite propellant using coarse and fine AP particles [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, 36 (1):57-64.
- [15] 郭锡福. 底部排气弹外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995:46-59.
- GUO Xi-fu. Exterior ballistics of base bleed projectiles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 46-59.

## Numerical Simulation of 2D AP / HTPB Flame Structure Under Spinning Conditions

YE Zhen-wei, YU Yong-gang

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

**Abstract:** To research the micro-scale combustion characteristics of base bleed propellant ammonium perchlorate/hydroxyl terminated polybutadiene (AP/HTPB) under spinning condition, a two-dimensional periodic sandwich steady rotating combustion model of AP/HTPB was established. The gas phase adopts the two-step total reaction, coupled the gas-solid heat boundary layer, fitted the spinning momentum, and the two-dimensional flame structure under the conditions of combustion pressure of 0.1–5.0 MPa and spinning speed of 0–10800  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  were numerically simulated. Results show that under the working condition of spinning speed as 10200  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  when the combustion pressure is 0.1–0.5 MPa, the flame shows premixed combustion characteristics. When the combustion pressure is 0.5–3.5 MPa, the flame presents the dual characteristics of diffusion and premixed combustion. When the pressure is more than 3.5 MPa, a narrow diffusion chemical reaction zone is formed. The numerical analysis is carried out on steady combustion process at different combustion pressures and different spinning speeds. It is found that the deflecting angle of gas flame is linearly positive with the pressure. When the spinning speed is between 0–10200  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , deflecting angle and spinning speed of gas flame show a linear increase. However, when the spinning speed is between 10200–10800  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , the deflection angle of gas flame approximately shows an exponential growth with the spinning speed. The variation trend of the average Reynolds number of the combustion surface is basically the same as deflecting angle of the gas flame. Therefore, the average Reynolds number of the combustion surface can be used to describe the influence of the spinning and pressure on the deflecting angle of the gas phase flame.

**Key words:** ammonium perchlorate / hydroxyl terminated polybutadiene (AP / HTPB); composite solid propellant; numerical simulation; spinning; flame structure

**CLC number:** TJ55; V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018052