

文章编号: 1006-9941(2013)04-0464-05

# 底排推进剂瞬态泄压工况下燃烧流场特性的数值模拟

曹永杰<sup>1</sup>, 余永刚<sup>1</sup>, 叶锐<sup>1</sup>, 周彦煌<sup>1</sup>, 姚远<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国兵器工业集团第 051 基地, 陕西 华阴 714200)

**摘要:** 针对底排弹出炮口泄压瞬间燃烧失稳问题, 建立了 AP/HTPB 底排推进剂燃烧流场的二维轴对称非稳态模型, 通过数值模拟获取了底排模拟装置在瞬态泄压工况下的流场特性。结果表明: 在泄压过程中, 燃烧室内压力、密度和温度沿轴向迅速下降, 速度沿轴线迅速升高, 且各流动参数的变化梯度逐渐减小; 底排推进剂燃气的加入导致燃烧室内密度沿径向降低, 而温度沿径向升高; 燃烧室内压力随时间变化的计算值与实测值吻合较好。

**关键词:** 兵器发射理论与技术; 底排推进剂; 瞬态泄压; 非稳态流动; 底排燃烧室; 内流场

**中图分类号:** TJ413.5

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.012

## 1 引言

高氯酸铵/端羟基聚丁二烯(ammonium perchlorate/hydroxyl-terminated polybutadiene, AP/HTPB) 是一种综合性能优良的复合固体推进剂, 被应用于榴弹的底排增程技术。AP/HTPB 底排药柱首先在火炮膛内被高温高压燃气点燃, 弹丸出炮口后, 药剂的燃烧环境由炮口压力迅速下降到大气压, 将经历燃烧失稳、熄灭、复燃(在点火具作用下)的强非稳态燃烧, 二次点火不一致将导致底排弹射程散布较普通榴弹偏大<sup>[1]</sup>。陆春义等人<sup>[2-3]</sup>采用内腔尺寸与底排装置相同的半密闭爆发器进行了大量模拟实验, 研究了 AP/HTPB 底排推进剂在高压速率条件下的瞬变燃烧特性。张领科等人<sup>[4-5]</sup>曾对底排装置在膛内的燃烧特性以及飞行工作期间的内流场进行了分析。本工作研究底排模拟装置燃烧室在瞬态泄压工况下内流场的变化特性。通过建立底排燃烧室内流场的二维轴对称非稳态模型, 数值模拟获得底排燃烧室内各流动参数在瞬态泄压过程中的分布特性。

## 2 物理模型

某底排燃烧室结构示意图如图 1 所示, 根据底排

弹装药结构及瞬态过程的特点, 提出如下基本假设: (1) 一般 AP/HTPB 底排药柱为单孔三侧缝结构, 为便于建立二维轴对称模型, 将内孔表面积乘以一个系数对药柱燃烧面积进行修正; (2) 底排药柱燃烧遵循几何燃烧定律, 且考虑快速降压对燃速的影响; (3) 燃烧过程在燃烧表面极薄层内迅速完成, 向燃烧室内添加具有某种热力学性质与输运性质的燃气; (4) 将燃气视为理想气体, 忽略其体积力、浮力等次要因素的影响; (5) 泄压前底排药柱已达稳定燃烧状态, 燃烧室内为高温高压环境; (6) 由于瞬态泄压过程非常短暂, 可忽略热散失。

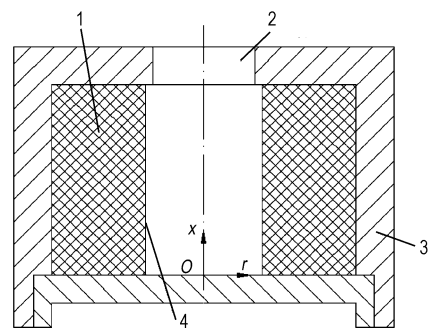


图 1 底排燃烧室结构示意图

1—复合底排药柱, 2—排气孔, 3—燃烧室壳体, 4—燃烧表面

**Fig. 1** Structural sketch of base bleed combustion chamber  
1—composite base bleed propellant grain, 2—exhaust nozzle, 3—combustion chamber shell, 4—burning surface

## 3 数学模型

根据上述物理模型, 建立二维轴对称非稳态数学模型。

收稿日期: 2012-08-14; 修回日期: 2012-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51176076); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12\_0215)

作者简介: 曹永杰(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料瞬态燃烧理论与技术研究。e-mail: caoyj801@163.com

### 3.1 燃烧室内流场控制方程

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho uv)}{\partial r} = \frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rP_{xr})}{\partial r} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho vv)}{\partial r} = \frac{\partial P_{rx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rP_{rr})}{\partial r} \quad (2b)$$

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Eu)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho Ev)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( uP_{xx} + vP_{rx} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot \left( uP_{rx} + vP_{rr} + \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (3)$$

(4) 状态方程

$$\rho = \rho R_g T \quad (4)$$

其中, 应力张量的各分量分别为:

$$P_{xx} = -p + 2\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \quad (5a)$$

$$P_{rr} = -p + 2\mu \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \quad (5b)$$

$$P_{xr} = P_{rx} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (5c)$$

式中,  $x$  和  $r$  分别为轴向和径向坐标,  $m$ ;  $u$  和  $v$  分别为轴向速度和径向速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\rho$  为燃气密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $E$  为总能,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $T$  为温度,  $K$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ;  $p$  为压力,  $Pa$ ;  $R_g$  为气体常数,  $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ ;  $\mu$  为粘性系数,  $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$ ; 柱坐标系下的速度散度为:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial rv}{\partial r} \quad (6)$$

### 3.2 湍流模型

采用  $k-\varepsilon$  两方程模型描述湍流运动, 其二维轴对称形式<sup>[6]</sup>为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho vk)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t \partial k}{\sigma_k \partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_t \partial k}{\sigma_k \partial r} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v \varepsilon)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_t \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial r} \right) + c_1 G \frac{\varepsilon}{k} - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

其中,  $G$  表示由于平均速度引起的湍动能生成项

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

式中,  $k$  为湍动能,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $\varepsilon$  为湍流耗散率,  $J \cdot (kg \cdot s)^{-1}$ ; 湍流粘性系数  $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ ,  $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$ ; 常数  $c_\mu = 0.09$ ,  $c_1 = 1.44$ ,  $c_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 3.3 燃速模型

考虑降压速率对底排推进剂燃速的影响, 采用线燃速修正公式<sup>[7]</sup>如下:

$$\dot{r} = \dot{r}_0 \left( 1 + \frac{\psi n \alpha}{\dot{r}_0^2 P} \cdot \frac{dp}{dt} \right) \quad (10)$$

底排推进剂单位燃烧面积上的质量流量为:

$$\dot{m}/(\beta A) = \rho_c \cdot \dot{r} \quad (11)$$

式中,  $\dot{r}_0 = b p^2$ ,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $b$  为燃速系数,  $m \cdot (Pa^n \cdot s)^{-1}$ ;  $n$  为压力指数;  $\psi$  为燃速修正系数; 底排推进剂热扩散系数  $\alpha = \lambda_c / (\rho_c \cdot C_c)$ ,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $\lambda_c$  为底排推进剂的导热系数,  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ;  $\rho_c$  为底排推进剂的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $C_c$  为比热容,  $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ ;  $A$  为理想圆柱形燃烧内表面面积,  $m^2$ ;  $\beta$  为实际燃烧面积修正系数。

### 3.4 边界条件与初始条件

由于是轴对称问题, 取图 1 中燃烧室与排气孔的一半流动通道及底排燃烧室外适当的大气空间作为计算域, 模型的边界条件有燃烧表面、对称轴、壁面和压力出口。根据燃面质量通量平衡可得:

$$\rho_g \cdot v_g = \rho_c \cdot \dot{r} \quad (12)$$

式中,  $\rho_g$  为燃气密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $v_g$  为燃气流动速度,  $m \cdot s^{-1}$ ; 方向垂直于燃烧表面。

压力出口边界条件为

$$p = p(t) \quad (13)$$

初始条件为

$$p = p_0, \rho = \rho_0, T = T_0, u = u_0, v = v_0 \quad (14)$$

## 4 结果与讨论

根据所建立的物理模型和数学模型, 利用 FLUENT 软件, 对底排燃烧室在瞬态泄压工况下的燃烧流场特性进行数值计算, 其中, 燃烧模块根据本研究的数理模型编制, 嵌入到 FLUENT 软件中。针对文献[3]的实验条件, 即泄压前底排燃烧室内初始压力  $p_0 = 56$  MPa, 温度  $T_0 = 1812$  K, 进行数值模拟。计算所需的相关参数<sup>[8]</sup>如表 1 所示。

### 4.1 底排燃烧室内压力分布

在泄压过程中底排燃烧室内的压力分布云图如图 2 所示。可以看出, 在泄压过程中, 压力在轴向上的变

化非常明显,而在径向上分布比较均匀,燃面附近的压力与轴线上的压力差别很小。在靠近排气孔处,由于流动通道突然收缩,在台阶前后产生了两处明显的高压区和低压区,在台阶下方的一段燃烧室内,压力在轴线处最低,沿径向升高;而在台阶上方的喷孔内,压力在轴线处最高,沿径向降低。

表 1 计算参数<sup>[8]</sup>

Table 1 Calculation parameters<sup>[8]</sup>

parameter		parameter	
$\rho_c / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1370	$n$	0.572
$\lambda_c / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.46	$T_g / \text{K}$	1812
$C_c / \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1450	$R_g / \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	397
$b / \text{m} \cdot (\text{Pan} \cdot \text{s})^{-1}$	$8.51 \times 10^{-7}$	$\gamma$	1.283

Note:  $\rho_c$  is density of base bleed charge,  $\lambda_c$  is thermal conductivity;  $C_c$  is specific heat,  $b$  is burning rate coefficient,  $n$  is pressure exponent,  $T_g$  is combustion gas temperature,  $R_g$  is gas constant,  $\gamma$  is specific heat ratio.

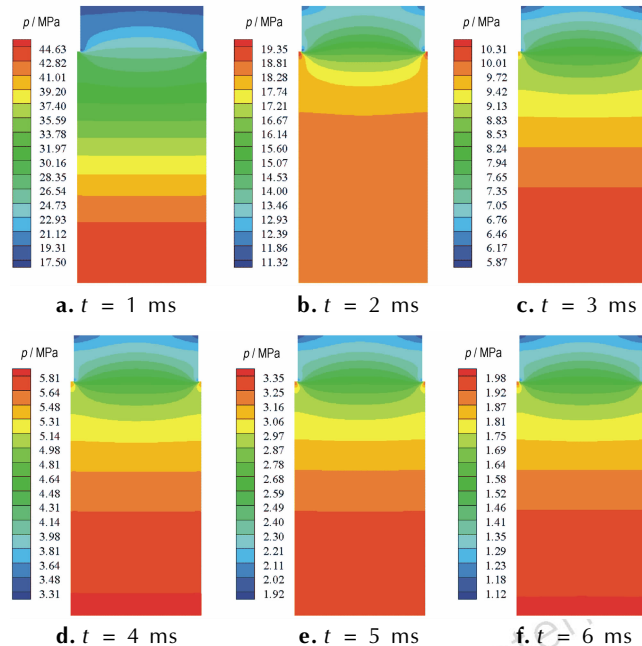


图 2 不同时刻底排燃烧室内压力分布

Fig.2 Pressure distribution in base bleed combustion chamber at different instants

为便于分析泄压过程中压力分布的详细变化规律,图 3 给出了不同时刻底排燃烧室轴线上的压力分布。在瞬态泄压前期,燃烧室轴线上最大压力与最小压力相差较大,燃烧室内燃气流动迅速发展,降压速率非常高。随着时间推移,轴线上各点的压力逐渐下降,但前端的降压速率高于后端的降压速率。随着压力下降,轴线上各点的压力分布趋于均匀,燃气流动变得平稳,由于排气孔内外压差减小,降压速率大幅降低。

瞬态泄压过程中底排模拟装置轴线上  $x = 0.04 \text{ m}$  处  $p$ - $t$  曲线的计算值与文献[3]实测值的对比如图 4 所示,可见两者吻合较好。

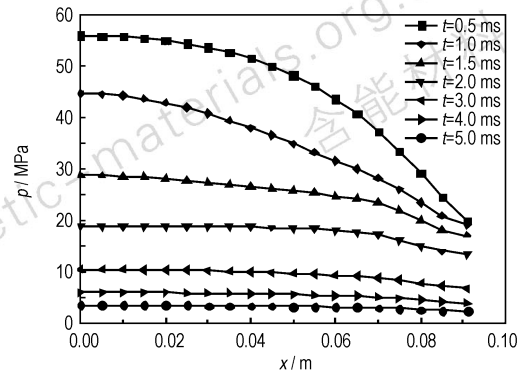


图 3 不同时刻底排燃烧室轴线上压力分布

Fig.3 Pressure profile on the axis of base bleed combustion chamber at different instants

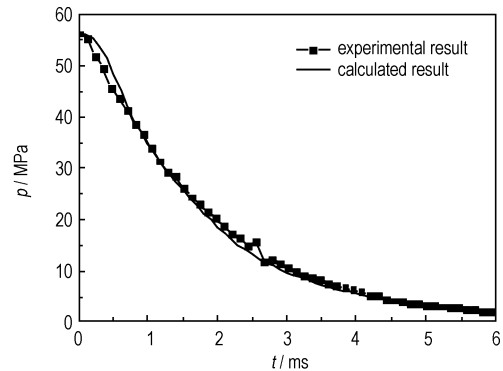


图 4 底排燃烧室内压力的计算值与实测值的比较

Fig.4 Comparison of calculated and experimental pressures in base bleed combustion chamber

#### 4.2 底排燃烧室内密度和温度的分布

为了考查燃面附近底排推进剂燃气的加入对底排燃烧室燃烧流场特性的影响,图 5 和图 6 分别给出了瞬态泄压过程中燃烧室内的密度和温度分布。可以看出,由于底排推进剂燃烧表面向燃烧室内喷入高温燃气,燃烧室内密度和温度均呈现明显的二维分布。随着燃烧室内压力下降,密度和温度沿轴向不断降低,其下降速率也随之降低。密度由泄压前期在径向截面大部分区域的均匀分布,逐步发展为轴线处最高、沿径向逐渐降低的单峰分布;而泄压过程中温度在同一径向截面上则沿径向升高。形成这种分布的原因是底排推进剂燃气的“添质加能”作用:底排推进剂燃烧向燃烧室内喷入高温燃气,使得燃面附近温度高于轴线处温度,而高温燃气的“添质”作用相对于“加能”较弱,且随泄压向外排出,因此燃面附近密度较低。

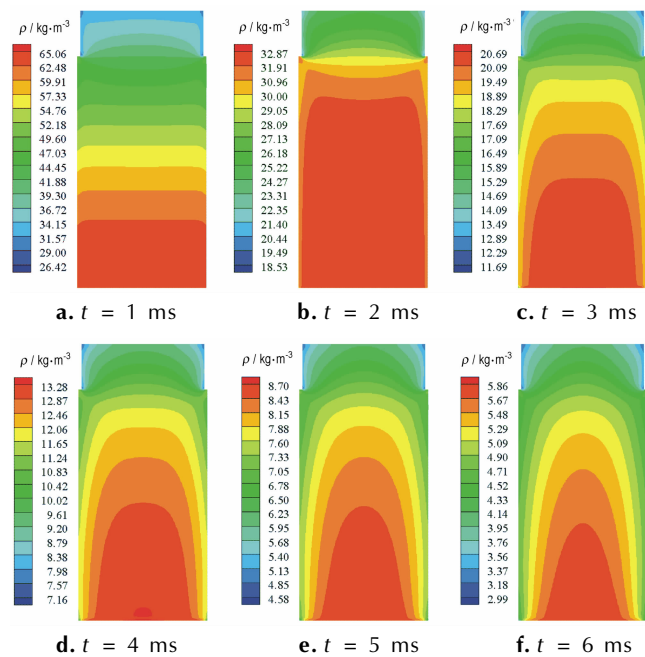


图5 不同时刻底排燃烧室内密度分布  
Fig.5 Density distribution in base bleed combustion chamber at different instants

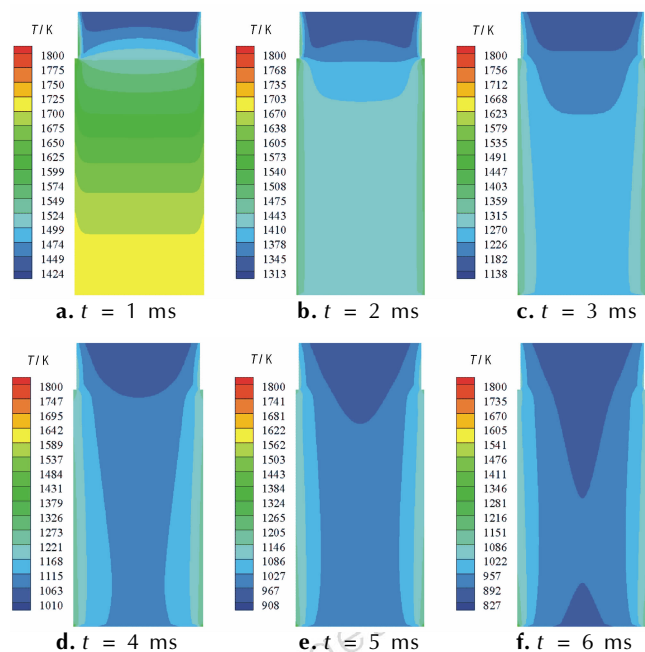


图6 不同时刻底排燃烧室内温度分布  
Fig.6 Temperature distribution in base bleed combustion chamber at different instants

图7为燃烧室内  $x=0.03\text{ m}$  和  $x=0.06\text{ m}$  两截面上径向温度随时间的变化。由图可见,当  $t=1.0\text{ ms}$  时,燃烧室内温度较高,底排推进剂燃气的“加能”作用对燃烧室内温度分布的影响范围较小;当  $t=3.0\text{ ms}$  时,底排推进剂燃气的影响范围已比较明显。随着底排燃烧

室内压力下降,底排推进剂燃气的“加能”作用越来越显著。对比图7a和图7b可以看出,由于燃气向排气孔外流动,在同一时刻,  $x=0.03\text{ m}$  截面上径向温度分布高于  $x=0.06\text{ m}$  截面上的相应值。以  $r=0.01\text{ m}$  处温度为例,当  $t=2.0\text{ ms}$  时,  $x=0.03\text{ m}$  和  $x=0.06\text{ m}$  两个截面上该处温度差  $\Delta T$  大约为  $30\text{ K}$ ,当  $t=3.0\text{ ms}$  时,  $\Delta T=23\text{ K}$ ,当  $t=4.0\text{ ms}$  时,  $\Delta T=19\text{ K}$ ,说明随着压力下降,轴向上不同位置的温度差异逐渐减小。由于燃气在底排燃烧室内的流动过程中自身内能转化为动能,轴向温度差异减小意味着轴向上气体流速之间的差异减小,即轴向上气体流速变化趋于平缓。

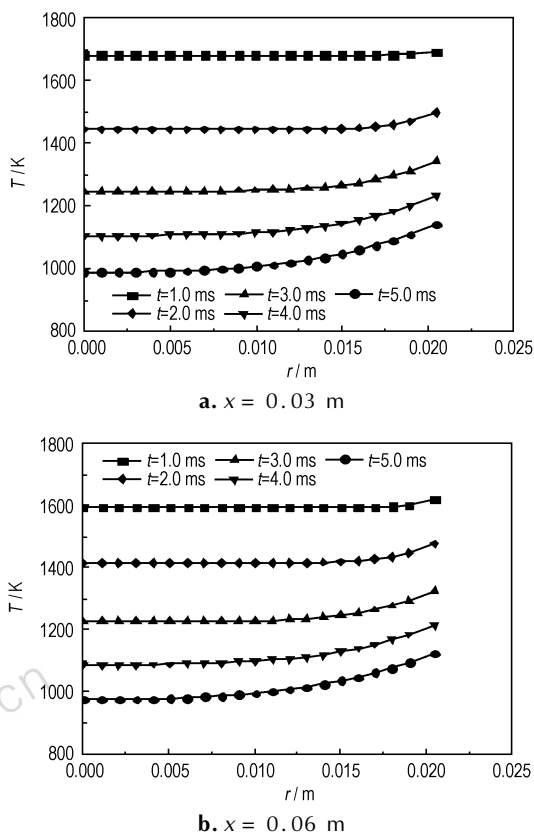


图7 不同轴向位置处径向温度随时间的变化  
Fig.7 Radial temperature vs. time at different axial positions

### 4.3 底排燃烧室内速度分布

模拟得到的瞬态泄压过程中底排燃烧室内的速度分布云图在等值线轮廓上比较接近,仅在数值上变化明显,而且在轴向上的变化非常剧烈,而在径向上变化不大。因此,此处仅给出了不同时刻轴向上的速度分布,如图8所示。可以看出,在轴线上  $x=0.07\text{ m}$  之前燃气流速基本呈线性分布,之后,流动通道由较宽的燃烧室突然收缩为较窄的排气孔,燃气流速加速升高。在降压前期,由于燃烧室内压力非常高,燃气经过膨胀

在排气孔出口截面上的流速接近当地音速(模拟结果显示最大马赫数为 0.98)。随着压力下降,轴线上各点流速逐渐降低,流动趋于平稳。由于排气孔内外压差减小,排气孔出口处燃气流速不断降低,由 1 ms 时的  $816.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  降为 5ms 时的  $594.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

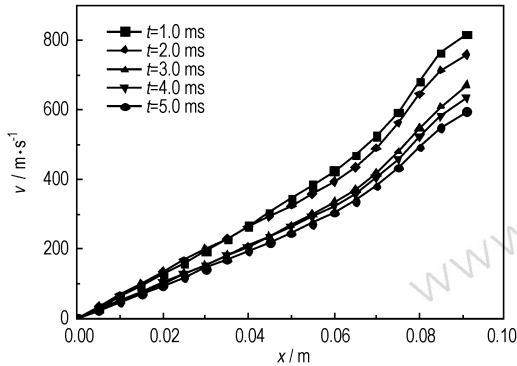


图 8 不同时刻底排燃烧室轴线上速度分布

Fig. 8 Velocity profile on the axis of base bleed combustion chamber at different instants

## 5 结论

(1) 考虑底排推进剂非稳态燃烧,建立了底排模拟装置在瞬态泄压工况下的流动模型,得到的燃烧室内  $p-t$  曲线的计算值与实测值吻合较好。

(2) 在泄压过程中,底排燃烧室内压力、密度和温度沿轴向降低,燃气流速沿轴向升高;各流动参数的变化梯度随泄压而减小。

(3) 底排推进剂燃气的加入导致底排燃烧室内密度沿径向降低,而温度沿径向升高,并且随着压力下降,底排推进剂燃气的加能作用变得明显。

(4) 通过对底排模拟装置在瞬态泄压工况下的燃烧流场建模,获取内流场的瞬态变化规律,有利于研究底排弹出炮口泄压瞬间燃烧失稳,寻求控制底排推进剂燃烧不稳定性方法。

## 参考文献:

- [1] 张炎清, 赵子华. 底排弹射击密集度的试验研究[J]. 弹道学报, 1991(1): 48-54.  
ZHANG Yan-qing, ZHAO Zi-hua. An experimental study on the dispersion of the base bleed projectiles[J]. *Journal of Ballistics*, 1991(1): 48-54.
- [2] 陆春义, 周彦煌, 余永刚. 高降压速率下复合底排推进剂瞬态燃烧特性研究[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.
- [3] 陆春义. 底排装置强非稳态燃烧特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [4] 张领科, 余永刚, 陆欣, 等. 炮膛内底排装置燃烧特性计算分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(5): 526-531.  
ZHANG Ling-ke, YU Yong-gang, LU Xin, et al. Calculation and analysis on the combustion characteristics of a base bleed unit in the gun bore [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(5): 526-531.
- [5] 张领科, 周彦煌, 陆欣, 等. 某底排弹底排装置工作期间内部流场的数值模拟[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 217-221.  
ZHANG Ling-ke, ZHOU Yan-huang, LU Xin, et al. Numerical simulation of interior flow field in a base bleed unit during working [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 217-221.
- [6] 武晓松, 陈军, 王栋, 等. 固体火箭发动机工作过程数值仿真[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
WU Xiao-song, CHEN Jun, WANG Dong, et al. Numerical Simulations of Working Progress of Solid Rocket Engine [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [7] Kuo K K, Summerfield M. Fundamentals of solid propellant combustion[M]. Beijing: China Astronautics Press, 1994.
- [8] 郭锡福. 底部排气弹外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

## Numerical Simulation of Combustion Flow Field Characteristics of Base Bleed Propellant Under Transient Pressure-release

CAO Yong-jie<sup>1</sup>, YU Yong-gang<sup>1</sup>, YE Rui<sup>1</sup>, ZHOU Yan-huang<sup>1</sup>, YAO Yuan<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. China Ordnance Industry No. 051 Base, Huayin 714200, China)

**Abstract:** Aiming at the combustion destabilization during the depressurization of base bleed projectile when propelled out of gun muzzle, a 2D-axisymmetric unsteady model for the combustion flow field of AP/HTPB base bleed propellant was established. The flow field characteristics in base bleed simulator under transient pressure-release were obtained through numerical simulation. Results show that in the pressure-release process, the parameters such as the pressure, the density and the temperature in the combustion chamber decrease quickly along the axial direction, the gas flow rate rises rapidly, and the gradients of various parameters gradually decrease. As a result of the base bleed propellant gas ejecting into the chamber, the density decreases along the radial direction, whereas the temperature increases on the contrary. The calculated pressure varying with time in the combustion chamber agrees well with the experimental data.

**Key words:** weapon launch theory and technology; base bleed propellant; transient pressure-release; unsteady flow; base bleed combustion chamber; internal flow field

CLC number: TJ413.5

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.012