DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0409-07

燃烧轻气炮多级渐扩型燃烧室流场特性数值研究*

邓 飞,张相炎,刘 宁
(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了分析多级渐扩型燃烧室结构对燃烧轻气炮氢氧燃烧特性的影响,通过计算流体力学方法,分别对采用传统圆柱型燃烧室和多级渐扩型燃烧室的燃烧轻气炮氢氧燃烧发射过程进行数值模拟。对比结果表明,多级渐扩型燃烧室结构能够明显地减小燃烧室压力波动幅度,提高氢氧燃烧稳定性;多级渐扩型燃烧室内形成回流区,可以减小气流轴向运动速度;火焰扩展形态与渐扩型结构相吻合,燃烧反应区表面变化平稳;多级渐扩型燃烧室结构对氢氧火焰传播过程和压力波动现象有着重要影响。

关键词: 爆炸力学;压力波动;火焰扩展;多级渐扩型燃烧室;燃烧轻气炮
中图分类号: O381;TJ302 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

燃烧轻气炮(combustion light gas gun, CLGG)是一种利用低分子量可燃气体燃烧产生的高温、高压气体推动弹丸运动的新型发射系统[1]。D. Kruczynski 等[2]进行的 45 mm 口径燃烧轻气炮实验,燃料气体初始装填压力通常在 30 MPa 以上,点火燃烧后高压高温气体膨胀推动弹丸运动,在燃烧室内会产生巨大的压力波动。Liu Ning 等[3]采用氢氧层流燃烧速度拟合公式数值模拟了燃烧轻气炮氢氧气体燃烧过程,提出通过合理控制氢氧气体的装填条件,能够对氢氧预混燃烧过程进行稳定控制。针对整装式液体发射药火炮液体燃料的燃烧不稳定,膛内易发生压力波动和膛炸等问题,R. Talley 等[4]提出采用多级渐扩型药室结构来控制液体燃料的燃烧稳定性。J. Despirito[5]则采用 CFD 方法对多级渐扩型药室结构和圆筒结构的整装式液体发射药火炮内弹道过程进行数值计算研究。薛晓春等[6-7]在 5 级渐扩型观察室内开展了双束燃气射流在液体药模拟工质中扩展的实验研究和数值模拟,观察了双股燃气射流在充液室中的扩展过程,讨论了渐扩型结构对 Taylor 空腔与 Kelvin-Helmholtz 不稳定性效应正反馈机制的抑制作用。莽姗姗等[8]在 4 级渐扩型圆柱观察室中测量了高压燃气射流在液体模拟工质中扩展速度等特征,对比研究了内壁形状对射流扩展过程的影响。

针对燃烧轻气炮氢氧气体燃烧稳定性问题,本文中提出在燃烧轻气炮中采用多级渐扩型燃烧室结构,基于计算流体力学方法在 CFX 软件中模拟计算分析多级渐扩型燃烧室氢氧燃烧流动与稳定特性。结果表明,采用多级渐扩型燃烧室结构能够减小燃烧轻气炮氢氧气体燃烧压力波动现象。同时分析了多级渐扩型燃烧室气流运动速度、火焰扩展的变化规律,为下一步实验研究提供依据。

1 多级渐扩型燃烧室物理模型

燃烧轻气炮多级渐扩型燃烧室结构如图 1 所示,轻质可燃发射药气体分别通过燃烧室底端的输送管注入燃烧室,轴线上的点火管可沿轴线多点同时点火,点火过程通过在点火点输入点火能量代替。并根据燃烧轻气炮装填条件和混合气体点火燃烧特点,提出如下假设:(1)发射药气体在点火前已经完全混合,点火后混合气体进行预混燃烧;(2)采用一步化学反应式,不考虑中间产物;(3)膛内气体满足 Peng-Robinson 实际气体状态方程;(4)不考虑高温已燃气体与固体壁面之间的热力学过程;(5)发射过程中燃烧室无气体泄露。

* **收稿日期**: 2013-09-24; **修回日期**: 2013-12-23
第一作者: 邓 飞(1988—),男,博士研究生,artillery1009@163.com。

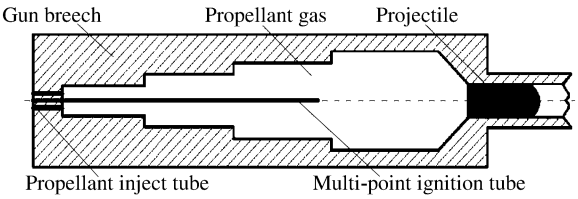

图 1 燃烧轻气炮多级渐扩型燃烧室结构

Fig. 1 Multistage divergent chamber structure of combustion light gas gun

2 数学模型

2.1 气体控制方程

燃烧轻气炮氢氧混合气体燃烧过程为三维非定常可压缩黏性湍流反应流，控制体内的气体组分都满足质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及组分输运方程[9]：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u_i \boldsymbol{u})=\dfrac{\partial}{\partial x_i}(\mu_{\mathrm{eff}}u_i)-\dfrac{\partial p}{\partial x_i}+S_i\\ \dfrac{\partial(\rho u_j)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u_j \boldsymbol{u})=\dfrac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{\mathrm{eff}}u_j)-\dfrac{\partial p}{\partial x_j}+S_j\\ \dfrac{\partial(\rho u_k)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u_k \boldsymbol{u})=\dfrac{\partial}{\partial x_k}(\mu_{\mathrm{eff}}u_k)-\dfrac{\partial p}{\partial x_k}+S_k\end{cases} \tag{1}$$

式中：ρ 为流体密度，t 为时间，$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，p 为压强，x_i、x_j、x_k 为坐标分量，S_i、S_j、S_k 分别为守恒方程的源项，μ_{eff}为有效黏性系数。

2.2 湍流模型

燃烧室气体湍流流动控制方程采用 RNG k-ε 双方程模型[10]，该模型在标准的 k-ε 双方程模型上进行了改进，其中湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 控制方程如下所示：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-\rho\varepsilon \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+\frac{C_{1\varepsilon}^{*}\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3}$$

式中：G_k 为湍动能 k 的产生项，μ_{eff}为有效黏性系数，$\mu_{\mathrm{eff}}=\mu+\mu_{\mathrm{t}}$，$\mu$ 为分子黏性系数，$\mu_{\mathrm{t}}=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}$为湍动黏度，其中 C_μ 为计算常数；$C_{1\varepsilon}^{*}=C_{1\varepsilon}-\dfrac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$，$\eta=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}\dfrac{k}{\varepsilon}$，$S_{ij}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$；各常数取值 $C_{1\varepsilon}=1.42$，$C_{2\varepsilon}=1.68$，$C_\mu=0.0845$，$\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39$，$\eta_0=4.377$，$\beta=0.012$。

3 结果讨论与对比分析

在 CFX 软件中采用 EDM 涡耗散燃烧模型对文献[1]中的 45 mm 燃烧轻气炮实验进行数值模拟计算，初始条件根据实验数据获得，燃烧室为传统圆柱型结构，容积为 5 L，弹丸质量为 0.52 kg，发射药气体由氢气、氧气和氦气组成，物质的量的比为 2∶1∶2，身管长为 100 倍口径，当弹底压力达到 172 MPa时弹丸开始向前运动。整个模拟计算从点火燃烧开始，直到弹丸飞离炮口，采用沿轴线 5 点同时点火方式，同时在燃烧室相应位置依次设置压力记录点。图 2 所示为压力记录点 3 的数值计算压力曲线与实验结果的对比图。图中可以看出，数值计算压力曲线与实验结果能够在较大程度上相吻合，并且比较准确地计算出了最大压力值。在前期 0.5～1.5 ms 内，数值计算的压力上升速度稍大于实验值。弹丸炮口初速实验值为1 700 m/s，数值模拟结果为 1 762 m/s，说明该模型能够较好的模拟出燃烧轻气炮氢氧燃烧内弹道过程，具有一定的合理性和适用性。

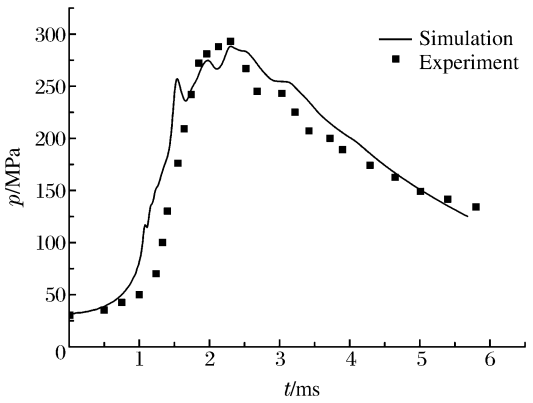

图 2 弹底压力数值模拟与实验结果对比图

Fig. 2 Comparison of the projectile base pressure between simulation and experiment

3.1 多级渐扩型燃烧室结构对压力波动的影响

3.1.1 单点点火时对压力波动的影响

为了分析多级渐扩型燃烧室结构对压力波动的影响，采用膛底单点点火方式对燃烧轻气炮氢氧燃烧过程进行模拟计算。计算所用的燃烧室为图 1 所示的四级渐扩型结构，燃烧室共有 4 个渐扩室，3 个渐扩台阶，各渐扩室的长度相同，各级的直径以等差数列依次递增，总容积为 5 L。发射药装填参数与 45 mm 燃烧轻气炮实验数据保持一致。

图 3(a)为单点点火时多级渐扩型与传统圆柱型燃烧室中膛底压力 p_1 的对比曲线。当弹丸开始运动后，传统圆柱型燃烧室膛底压力直线上升至 350 MPa，形成第 1 个压力峰值，之后在 3.4 ms 时出现第 2 个压力峰值；而在多级渐扩型燃烧室内，燃烧室膛底压力在弹丸启动后出现第 1 个压力峰值，约为310 MPa，比传统圆柱型结构小，之后按照一定的规律上下波动，波动幅度随着弹丸向前运动逐渐减小，燃烧室的压力波动维持在一定的幅度和频率之内。图 3(b)所示为弹底压力 p_b 对比曲线，由图中可知弹丸底部的压力波动现象更严重，传统圆柱型燃烧室的第 1 个压力波动峰值达到了 430 MPa，第 2 个峰值达到了 575 MPa，弹底压力波动幅度极大，严重影响了燃烧轻气炮的内弹道性能；而在多级渐扩型燃烧室内，弹底最大压力峰值仅为 350 MPa，明显低于传统圆柱形燃烧室。这说明多级渐扩型燃烧室结构能够有效控制燃烧轻气炮燃烧室压力波动幅度和波动规律，有效地减小弹底压力波动现象，提高燃烧室氢氧燃烧稳定性。

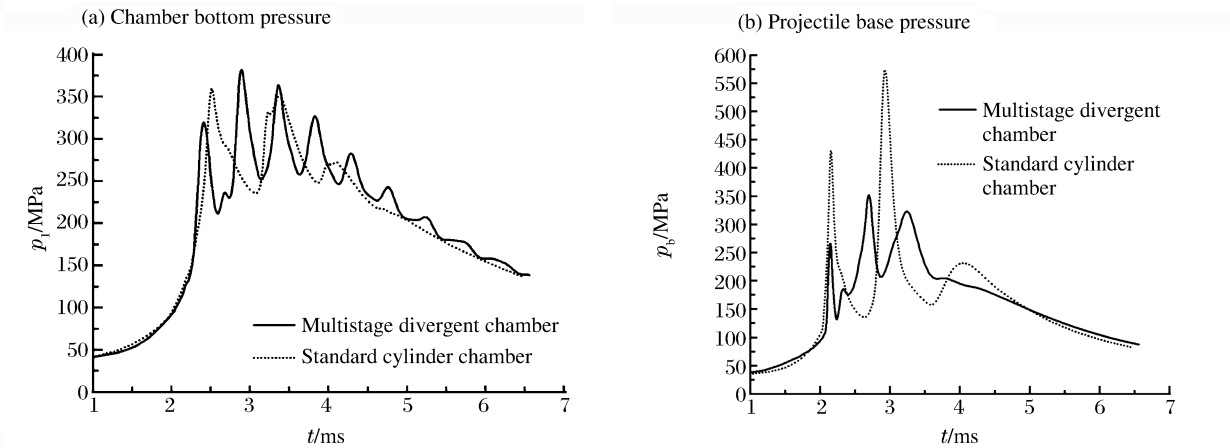

图 3 单点点火时燃烧室结构对膛底压力和弹底压力的影响

Fig. 3 Influences of chamber structure on chamber bottom and projectile base pressures with single-point ignition

3.1.2 多点点火时对压力波动的影响

为了进一步分析多级渐扩型燃烧室的压力波动特性，将单点点火改为沿轴线五点同时点火，研究多级渐扩型结构在多点点火时燃烧室压力波动特性。图 4(a)为采用五点点火时 2 个不同燃烧室结构膛底压力 p_1 变化曲线。

当采用轴线 5 点点火方式后，由于整个燃烧室内温度、组分质量分数、压力分布较为均匀等原因，燃烧室内压力波动现象明显减弱。从图 4(a)可以看出，在传统圆柱型燃烧室内，多点点火方式消除了单点点火时的 2 个压力峰值，燃烧室内压力变化平缓；在多级渐扩型燃烧室内依然出现了呈一定变化规律的小幅度压力波动，波动幅度保持在较小的范围之内，最大仅约为 40 MPa。图 4(b)所示为弹底压力 p_b 随时间变化曲线，在传统圆柱型燃烧室，尽管膛底压力 p_1 变化比较平稳，但是在弹丸底部依然出现 2 个

明显的压力波动，在 2.3 ms 出现的压力波动峰值达到了 370 MPa；多级渐扩型燃烧室的弹丸底部压力上升平缓，变化稳定，没有出现明显的压力波动现象，压力曲线较为理想。

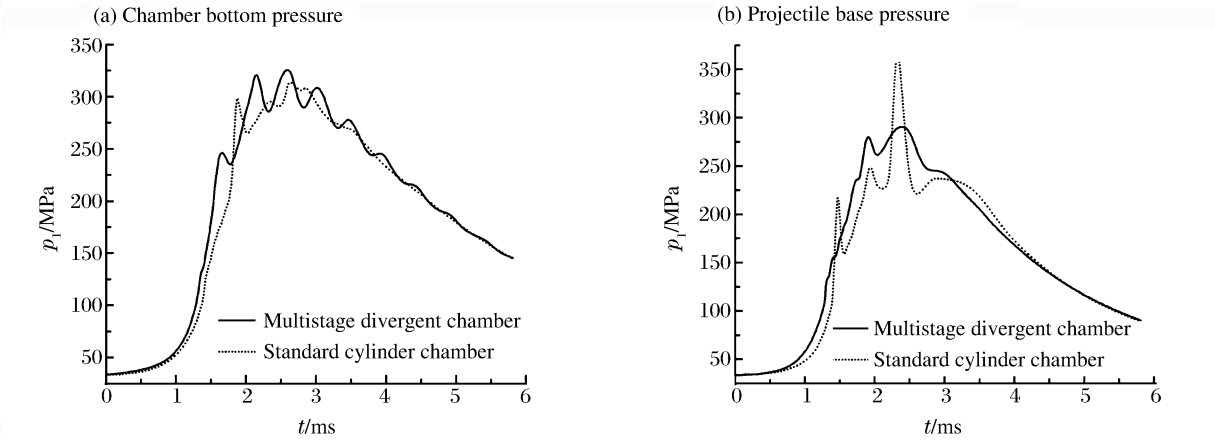

图 4 多点点火时燃烧室结构对膛底压力和弹底压力的影响

Fig. 4 Influences of chamber structure on chamber bottom and projectile base pressures with multi-point ignition

通过以上分析可以得知，采用多级渐扩型燃烧室结构在单点点火时可以使燃烧轻气炮燃烧室压力在较小幅度内按照一定的规律上下波动，且波动幅度随膛压下降而逐步减小；采用轴线五点点火时燃烧室内压力波动幅度减小，氢氧燃烧稳定性提高，尤其是多级渐扩型燃烧室弹底压力波动现象明显减弱，压力变化平稳。

3.2 多级渐扩型燃烧室流场特性分析

3.2.1 多级渐扩型燃烧室流场流动特性

为进一步分析多级渐扩型燃烧室结构影响氢氧燃烧压力波动现象的机理，对四级渐扩型燃烧室气流轴向速度及其径向分布规律、渐扩台阶面和近壁区域气体流动特性等进行分析。图 5 为单点点火方式时四级渐扩型燃烧室在压力波动较明显时燃烧室 yz 平面流场速度矢量和流线局部分布图。燃烧室压力波动从弹丸底部向膛底传播，在第 4 级渐扩（右）台阶处形成明显的湍流涡漩。在第 3 级渐扩室（左）近壁区域内形成柱形回流区，可以看出燃烧室内混合气体湍流运动比传统圆柱形燃烧室结构复杂。

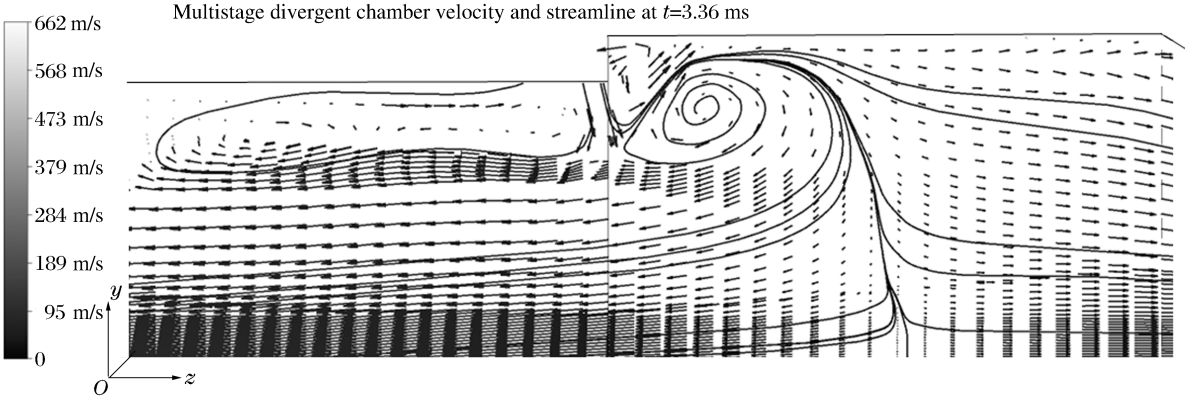

图 5 t = 3.36 ms 时 4 级渐扩型燃烧室流场速度矢量和流线分布图

Fig. 5 Velocity vector and streamline distribution of four-stage divergent chamber flow field at t=3.36 ms

当弹丸沿身管向前运动时，在弹底会形成膨胀波（稀疏波）扰动，膨胀波形成后开始向燃烧室底端运动，到达底端端面发生反射，开始向弹丸底部传播，在弹底又发生反射，形成压力波动现象。图 5 所示的压力波经弹底反射后向燃烧室底端传播，由于渐扩台阶的作用，在渐扩台阶近壁处形成回流区，并在第 4 级渐扩室台阶处形成湍流涡漩。同时第 4 级渐扩室的湍流涡漩区的气流分成 2 个部分，一部分沿流

线向左端燃烧室底端运动，另一部分则向气体密度、压力因弹丸运动而减小的弹底区域流动填充，降低燃烧室内轴向压力梯度，减小膛底、弹底的压力波动幅度。处于燃烧室中部的第 2、3 级渐扩室近壁区域出现柱形回流区，气体流动速度减小，同时由于底端端盖的封闭作用，气流在第 1 级渐扩室内形成湍流涡漩区。可以看出，多级渐扩型燃烧室结构通过在燃烧室内形成复杂的回流区和湍流涡漩，减小气流轴向速度和轴向压力梯度，对氢氧燃烧压力波动现象有着重要影响。

3.2.2　不同燃烧室结构流场轴向速度分析

考虑到不同燃烧室结构对燃烧室气流轴向运动速度及其径向分布的影响，在轴向距离 $z=0.25$ m 处在 y 正方向上沿径向设置 3 个气流轴向速度记录点。图 6 为采用单点点火时 2 个不同燃烧室内 3 个记录点的轴向速度 v_z 随时间变化曲线（负值表示气流向左端膛底运动）。

图 6(a)所示为多级渐扩型燃烧室 3 个记录点的轴向速度曲线。y 为记录点与轴线的径向垂直距离，中心轴线处（$y=0.0$ mm）的轴向速度在膛底形成第 1 个压力波动时数值最大，约为 500 m/s，此时燃烧室气流由弹底向膛底运动。随着径向距离 y 的增大，各点的速度依次减小，壁面处的轴向速度仅为 110 m/s，径向速度梯度较大。可以看出，回流区对向膛底运动的气流起着阻碍作用，近壁区域（$y=57.5$ mm）的速度 v_z 明显小于轴线位置的速度；同时，由于多级渐扩燃烧室结构的影响，当气流由膛底向弹底运动时，中心轴线和壁面处的速度维持在 110 m/s 以下，渐扩台阶拐点处（$y=47.5$ mm）的最大速度约为 370 m/s，燃烧室气流的轴向速度减小，弹底压力波动现象减弱。图 6(b)所示为传统圆柱型燃烧室 3 个记录点轴向速度随时间变化曲线。在 2.4 ms 时，燃烧室轴线处（$y=0.0$ mm）气流轴向速度达到最大值为约 740 m/s，径向中点（$y=27.75$ mm）处约为 550 m/s，近壁区域（$y=47.5$ mm）的速度最小，为 220 m/s，圆柱型燃烧室内气流最大轴向速度明显大于多级渐扩型燃烧室。当燃烧室气体由膛底向弹底运动时，壁面处的轴向速度达到了 450 m/s，之后速度缓慢下降，在 0.5 ms 的时间内气流以约 310 m/s 的速度持续向弹底运动，在 3 ms 时弹底形成了图 3(b)中所示的 575 MPa 极高压力波动峰值。

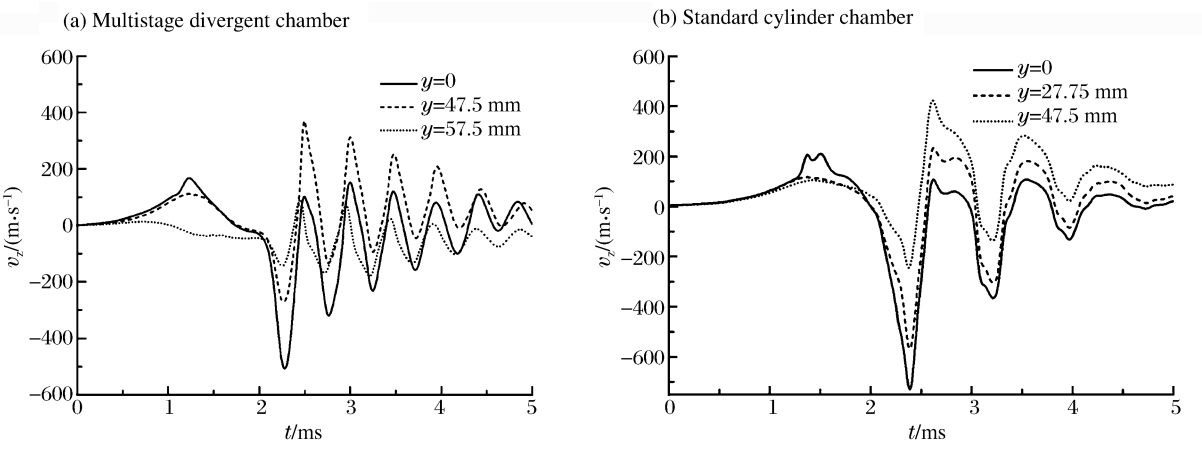

图 6　不同燃烧室结构内 3 个记录点的轴向速度随时间变化曲线

Fig. 6　Velocity curve of the three probe points in different chamber structures

通过上述分析可以看出，多级渐扩型燃烧室气流向膛底运动时，渐扩台阶面减小了近壁区域的气流运动速度，形成较大的柱形回流区；当气流由膛底向弹底运动时，由于各级渐扩室体积的变化，燃烧室气流轴向运动速度水平降低，尤其是中心轴线区域；多级渐扩型燃烧室结构能够减小燃烧室气流轴向速度水平，减小压力波动幅度。

3.2.3　多级渐扩型燃烧室火焰扩展过程分析

为了分析多级渐扩型燃烧室结构对氢氧气体燃烧过程火焰扩散发展的影响，对采用单点点火的四级渐扩型燃烧室氢氧燃烧火焰扩散传播过程进行分析。图 7 为四级渐扩型燃烧室膛底点火位置的火焰扩散发展时序图。

在 0.9 ms 时，火焰沿径向扩散至壁面，充满边界壁面和台阶面死角向第 2 级渐扩室传播。1.1 ms

时,火焰表面紧贴渐扩室壁面向前扩散,反应区变化平缓。在 1.25 ms 时,第 2 级渐扩室已经完全被火焰反应区覆盖,不存在未燃区域。火焰向膛底扩散的速度较为缓慢,在 1.65 ms 时,膛底依然存在小区域的未燃区,这主要是由于膛底气流流动缓慢,湍流掺混过程不强烈,同时,火焰在充满第 2 级渐扩室后继续向第 3 级渐扩室扩散,径向扩散速度较快,火焰表面形状与燃烧室结构壁面相吻合向前传播。由此得知,多级渐扩型燃烧室结构能够使火焰在向前扩展的同时快速充满整个边界,不形成反应死角,已燃火焰区发展平稳,火焰表面形状随机性减少,氢氧燃烧稳定性提高。

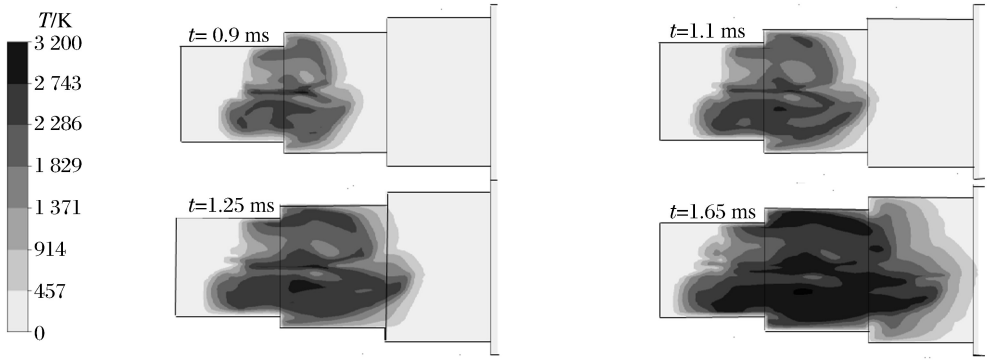

图 7 四级渐扩型燃烧室火焰扩展时序图

Fig. 7 Flame distribution of four-stage divergent chamber at different times

4 结 论

通过计算流体力学方法在 CFX 软件中数值模拟了采用不同燃烧室结构的燃烧轻气炮氢氧燃烧过程,着重分析了多级渐扩型燃烧室结构对膛内压力波动现象的影响,讨论了多级渐扩型燃烧室流场气流运动与火焰扩展传播的特点,结论如下:

(1)与传统圆柱型燃烧室相比,采用多级渐扩型燃烧室结构能够明显地减小燃烧室压力波动现象,提高氢氧燃烧稳定性;当采用多点点火方式时,多级渐扩型燃烧室内出现幅度很小且有规律的压力波动,但其对内弹道性能的影响很小;

(2)多级渐扩型燃烧室在渐扩台阶和近壁区会形成回流区和涡漩区,减小燃烧室气流轴向运动速度和压力波动;

(3)多级渐扩型燃烧室对氢氧燃烧火焰扩展过程有着重要影响。火焰向前传播至渐扩台阶后,其径向扩展速度增大,火焰扩展形态与多级渐扩型燃烧室结构相吻合,已燃反应区火焰表面变化平稳。

参考文献:

[1] Kruczynski D, Massey D. Combustion light gas gun technology demonstration[R]. ADA462130, 2007.

[2] Kruczynski D, Witherspoon F, Massey D, et al. Experimental in a 45-mm combustion light gas gun: An innovative approach to hypervelocity[C]// JANNAF Propulsion Meeting. Cleveland Ohio, 1998.

[3] Liu Ning, Zhang Xiang-yan. Quasi-dimensional interior ballistic model and numerical simulation of combustion light gas gun[C]// Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics. Miami, USA, 2011:625-632.

[4] Tally R L, Bracuti A. Diagnostics of combustion evolution in a bulk-loaded LP gun[R]. A100290, 1990.

[5] Despirito J. CFD analysis of the interior ballistics of the bulk-loaded liquid propellant gun[C]// The 32nd AIAA Joint Propulsion Conference. Alexander, 1996.

[6] 薛晓春,余永刚,张琦. 双股燃气射流在充液室内扩展特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(5):449-455.
Xue Xiao-chun, Yu Yong-gang, Zhang Qi. Experiment study on expansion characteristics of twin combustion-gas jets in liquid-filled chambers[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,33(5):449-455.

[7] 薛晓春,余永刚,张琦. 双束燃气射流与整装式液体装药相互作用的实验和数值模拟[J]. 兵工学报,2013,34(6):

669-677.

Xue Xiao-chun, Yu Yong-gang, Zhang Qi. Experiment and numerical simulation for interaction of twin gas jets and bulk-loaded liquid charge[J]. Acta Armamentarii, 2013,34(6):669-677.

[8] 莽姗姗，余永刚. 高压燃气射流在整装液体中扩展过程的实验和数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2011，31(3)：300-305.
Mang Shan-shan, Yu Yong-gang. Experiment and numerical simulation for high pressure combustible gas jet expansion process in a bulk-loaded liquid[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(3):300-305.

[9] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 大连：大连理工大学出版社，2005：4-5.

[10] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method[M]. 2nd ed. London: Pearson Education Limited, 2007:72-80.

Simulation on the flow characteristics of multi-stage divergent combustion chamber of combustion light gas gun

Deng Fei, Zhang Xiang-yan, Liu Ning

(*School of Mechanical Engineering, NanJing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: In order to analyze influences of multistage divergent chamber structure of combustion light gas gun on the combustion characteristics of hydrogen-oxygen mixed gas, the propellant combustion launching process in the multistage divergent chamber and standard cylinder chamber combustion light gas gun was simulated with the computational fluid dynamics method respectively. Comparative results show that the pressure fluctuations in the chamber of combustion light gas gun are significantly reduced by using the multistage divergent combustion chamber structure, while the stability of hydrogen-oxygen mixed gas combustion is improved. Recirculation zones would be formed in the multistage divergent chamber, which can reduce the flow axial velocity. The flame shape and the divergent chamber structure coincide with each other during its expanding. The surface of combustion zones develops steady. The multistage divergent combustion chamber structure has considerable impact on the flame expansion process and pressure fluctuations in the combustion chamber.

Key words: mechanics of explosion; pressure oscillation; flame expansion; multi-stage divergent chamber; combustion light gas gun

（责任编辑　王易难）