

doi: 10.7690/bgzdh.2023.03.002

带有不同膛口装置的流场仿真分析

王仲军, 刘子龙, 王茂森, 戴劲松
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对火炮射击时膛口压力大而导致的振动问题, 设计 4 种不同结构的膛口装置。通过将火药燃气引入装置内进行膨胀再排出的方式降低装置周围的压力, 结合动网格技术对安装不同装置的膛口流场进行数值模拟, 通过对比无装置时膛口周围压力的下降程度来判定各装置的效果, 并根据数值仿真结果对不同装置的降压效果进行分析。计算结果表明: 与无装置时相比, 安装膛口装置后膛口周围压力明显降低, 对该装置结构的进一步设计具有一定的参考价值。

关键词: 膛口装置; 流场仿真; 动网格

中图分类号: TJ303⁺.2 **文献标志码:** A

Simulation Analysis of Flow Field with Different Muzzle Device

Wang Zhongjun, Liu Zilong, Wang Maosen, Dai Jinsong
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: 4 kinds of muzzle devices with different structures were designed to solve the problem of vibration caused by high muzzle pressure during gun firing. The pressure around the device was reduced by introducing the propellant gas into the device to expand and then exhaust, and the numerical simulation of the muzzle flow field with different devices was carried out by combining with the dynamic mesh technology, and the effect of each device was determined by comparing the pressure drop around the muzzle without the device, and the pressure reduction effect of different devices was analyzed according to the numerical simulation results. The calculation results show that the pressure around the muzzle decreases obviously after installing the muzzle device, which has certain reference value for the further design of the device structure.

Keywords: muzzle device; flow field simulation; dynamic mesh

0 引言

火炮的发射过程具有高温、高压、瞬态的特征^[1]。火炮在射击时, 随着弹丸从身管内飞出, 高温高压的火药燃气以极高的速度从膛内喷出, 使得炮口处的压力骤增, 从而产生炮口焰以及振动问题。王登等^[2]基于虚拟样机技术, 对加装了炮口制退器的转管炮进行仿真分析, 发现在初始射击阶段加炮口制退器的转管炮炮口扰动比不加炮口制退器的炮口扰动更剧烈, 但是并没有对该阶段的膛口流场进行分析。李佳圣等^[3]提出了利用部分膛内火药气体经过喷管外流反推实现抑制射击振动的稳定方案, 通过刚柔耦合发射动力学建模和仿真, 验证了该方案抑制振动的可行性。刘康等^[4]对带有斜切角膛口装置的膛口流场进行了数值模拟, 并对身管前段上下两侧压力进行监测, 发现两侧具有明显的压力差, 对提高射击稳定性有着积极的意义。戴劲松等^[5-7]在现有炮口制退器研究的基础上, 为了缓解炮口装置带来的影响, 创新设计了定向反射膨胀装置, 根

据选定的模型参数进行了数值模拟, 并进行试验, 验证了该装置作用特性的正确性, 且该装置安装在身管中段而非炮口处, 因此也可降低膛口压力。Chaturvedi^[8]设计了一种可调式膛口制退器, 通过数值仿真得到该装置的制退力等参数, 体现了该装置的可行性和创新性。刘欣宁等^[9-11]对带有膛口装置的流场进行了研究, 得到了其变化规律及其与弹丸相互作用机理。

为减小火炮在射击时膛口处压力过大的状况, 笔者设计了 4 种不同结构的膛口装置。通过将火药燃气在身管后坐过程中不断引入装置进行膨胀后再排出的方式减小炮口周围压力。计算结果表明, 所设计的装置对减小炮口周围压力具有明显作用。

1 数值模拟方法及计算模型

1.1 基本假设

火炮发射过程, 具有高初速、高炮口压力特点, 炮口气流的组分、相态、化学反应非常复杂, 很难建立一个全面的数学模型来描述整个过程; 因此,

收稿日期: 2022-11-12; 修回日期: 2022-12-28

作者简介: 王仲军(1995—), 男, 安徽人, 硕士, 从事炮口流场分析研究。E-mail: 18205098623@136.com。

需结合实际情况采用简化假设: 1) 忽略火药气体组分与化学反应的影响, 视为均质气体; 2) 计算域中的流动为绝热流动; 3) 不考虑弹丸转动带来的影响; 4) 密封效果良好, 没有气体泄露。

1.2 控制方程

采用守恒型 2 维 Euler 方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho uv \\ \rho u^2 + p \\ \rho uE + pu \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vE + pv \end{bmatrix}。$$

式中: ρ 为气体密度; u, v 为速度分量。

高温高压的火药气体状态方程:

$$p(v - \alpha) = RT \quad (2)$$

式中: v 为气体的比容; α 为余容; R 为与气体组份有关的气体常数; T 为气体温度。

火药气体单位质量总能:

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} + \rho \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (3)$$

式中 γ 为气体比热比, 火药气体一般取 1.25。由于气体高温高压且可压缩, 故采用密度基求解^[7]。

1.3 计算模型及动网格方法

无膛口装置时某小口径火炮计算模型及边界条件如图 1 所示, P1, P2, P3, P4 为炮口周围的 4 个压力监测点。弹丸初始位置位于炮口处, 由于弹丸、身管及膛口装置均是回转轴对称结构, 所以采用 2 维回转轴(Axisymmetric) 计算模型。这样在划分网格时可以最大程度上减少网格数量, 提高计算效率。

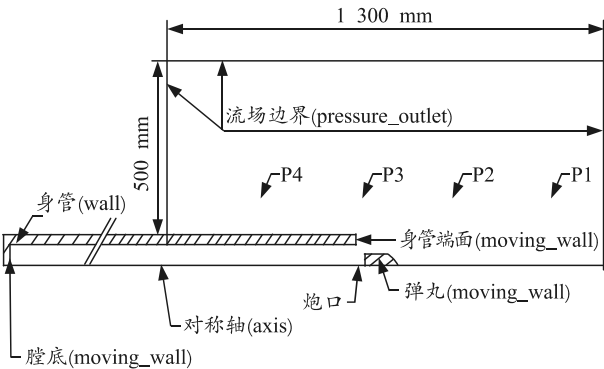


图 1 无膛口装置的计算模型

划分网格是对计算区域的一种离散过程, 划分

过程需要综合考虑网格对计算精度、时间耗费、计算机性能等因素的影响, 并要求与边界条件以及所采用的网格处理方法相适应。

由于运动弹丸边界的复杂结构, 笔者采用一种基于分块网格划分但区域整体运动的处理方法。将膛口流场计算区域划分为运动变形区域、运动非变形区域和静止区域 3 部分, 如图 2 所示。其中: 1 和 2 为运动变形区域, 内部布置四边形结构网格; 3 和 4 为运动非变形区域, 5 为静止区域, 内部均布置四边形结构网格。区域 1 和 2 中采用动态层铺的动网格处理方法, 这些区域在弹丸运动的同时, 网格层不断在边界处增加或消亡, 其中 1 为网格层增加区域, 2 为网格层消亡区域; 3 和 4 中网格只运动不发生变形, 其内部可以布置细密的高质量网格, 另外为了使网格适应较大的弹丸运动速度, 区域 1 和 2 中的网格宽度可以适当加大而不会对计算精度产生明显影响。

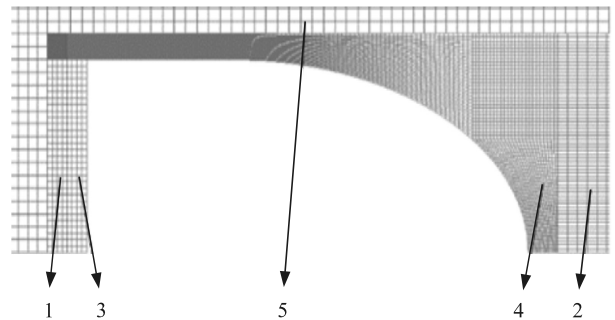


图 2 弹丸边界处的网格划分

上述网格划分方法将边界和流动均复杂的运动变形区域转化为非变形和静止区域, 而将变形运动转移到边界和流动较为简单且距离复杂流动区域较远的网格区域, 再通过动态层铺法实现对网格变形的处理。该方法最大的优点就是运算速度快, 生成的网格质量高。

2 数值模拟

笔者以某中小口径火炮为例, 弹丸运动规律由经典内弹道计算得到, 利用 CG_MOTION 宏可编写弹丸的运动, 再将该 UDF 赋予模型中的弹丸边界以及随弹丸一起运动的区域, 运用动网格层铺法, 以此模拟弹丸的运动。在开始计算之前使用 INIT 宏对计算区域进行初始化。根据火炮经典内弹道计算, 身管内平均压强为 60 MPa; 弹底气体速度为此时弹丸的运动速度, 膛底气体速度为 0, 气体速度在膛内从弹底到膛底沿身管轴向线性分布; 膛内温度按

此时膛内平均温度赋予。其余区域由于与外界连通，因此近似认为是大气条件。

2.1 无装置时的膛口流场数值模拟

对不带装置的膛口流场进行数值模拟，速度云图如图 3 所示。

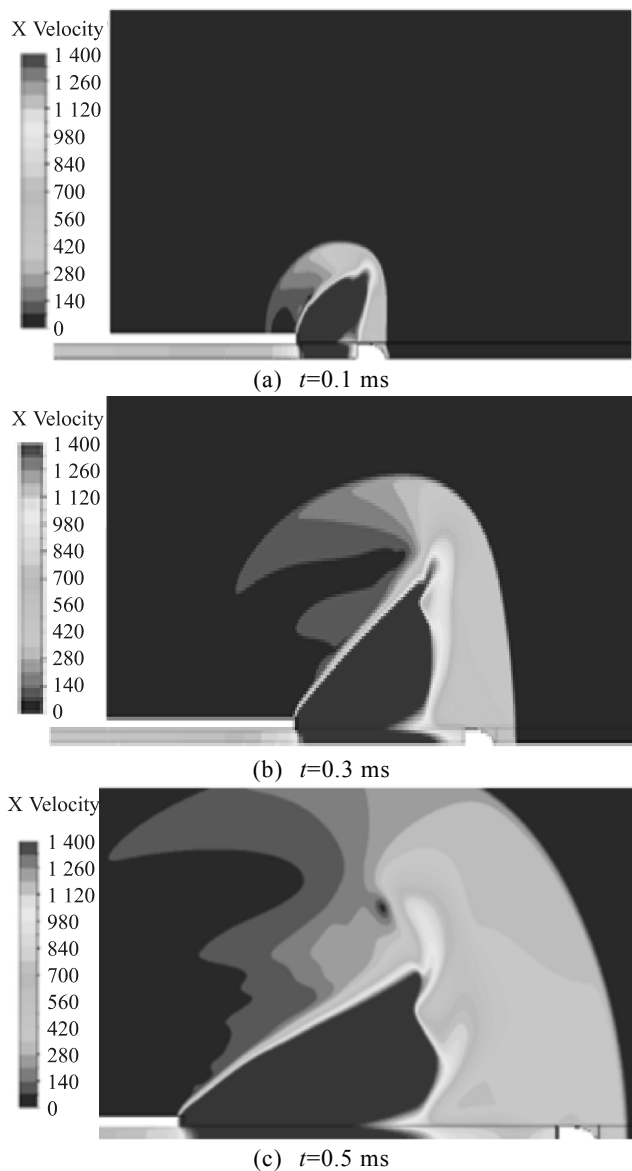


图 3 无膛口装置的流场速度云图(单位: m/s)

该组仿真结果主要用作后 4 组的对照组，从图中可以看到，无膛口装置时膛口流场的发展非常迅速，火焰燃气出膛后影响范围较大。

2.2 带有装置 1 的膛口流场数值模拟

装置 1 整体外观结构为圆柱形，其内部为空心，内壁上留有进气孔，其结构如图 4 所示，其中 P1, P2, P3, P4 位于高于装置外壁面 5 mm 处的同一水平面。

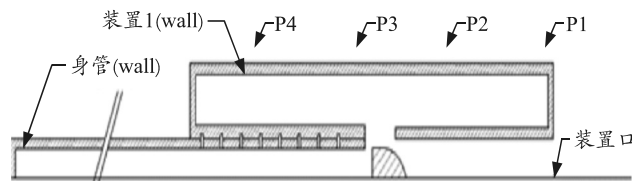


图 4 带有装置 1 的计算模型

对带有装置 1 的膛口流场进行数值模拟，速度云图如图 5 所示。

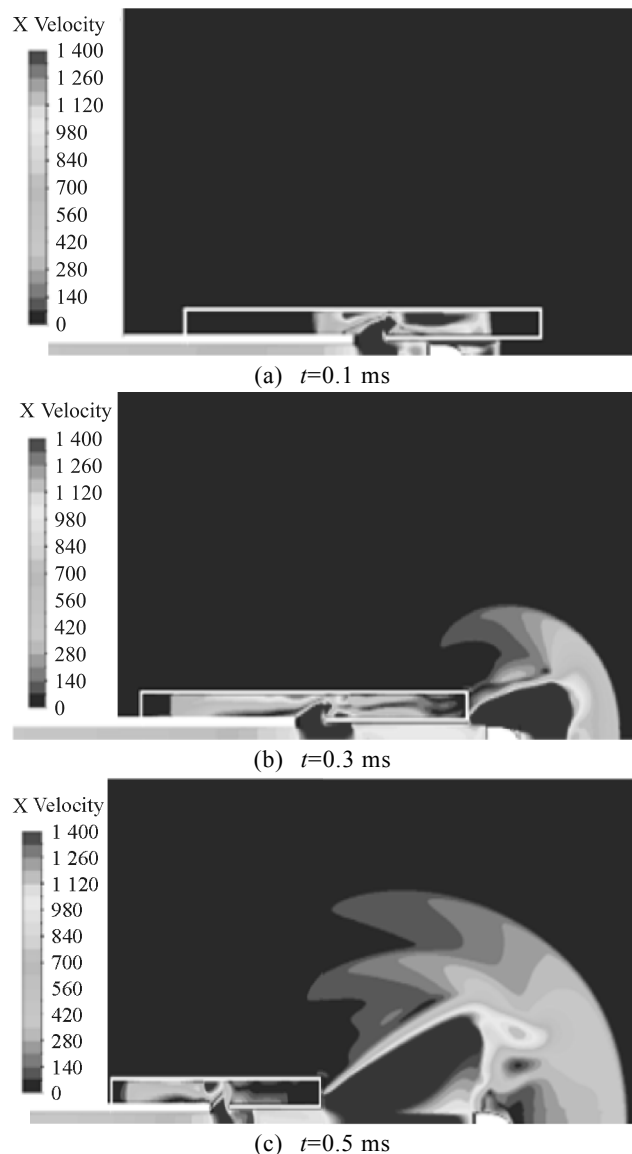


图 5 带有装置 1 的膛口流场速度云图(单位: m/s)

由上图可知，由于添加了膛口装置，弹丸在飞离炮口后，在向前运动的同时推动并压缩弹前的空气柱，以及少量的从弹后溢出的火药燃气。约 0.3 ms 时弹丸飞离装置，此时可看到清晰的膛口流场结构，与第一组相比，此次的流场结构更小；这是由于部分火药燃气进入装置内而非随着弹丸的运动直接排出，且进入装置的气体经膨胀后速度下降，压力减

小，因此使得装置口的压力降低，膛口流场的范围减小。

2.3 带有装置 2 的膛口流场数值模拟

为了避免在连续射击状况下，装置内压力的积攒，故装置内的气体需在一定时间内排出；因此，装置 2 去掉了前端面以及侧壁面，其结构则类似于圆柱消焰器，如图 6 所示。

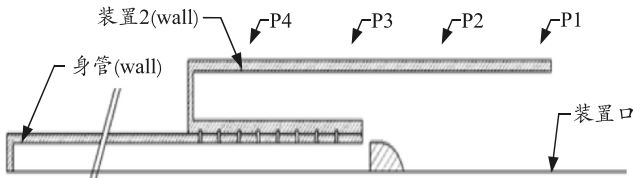


图 6 带有装置 2 的计算模型

对带有装置 2 的膛口流场进行数值模拟，速度云图如图 7 所示。

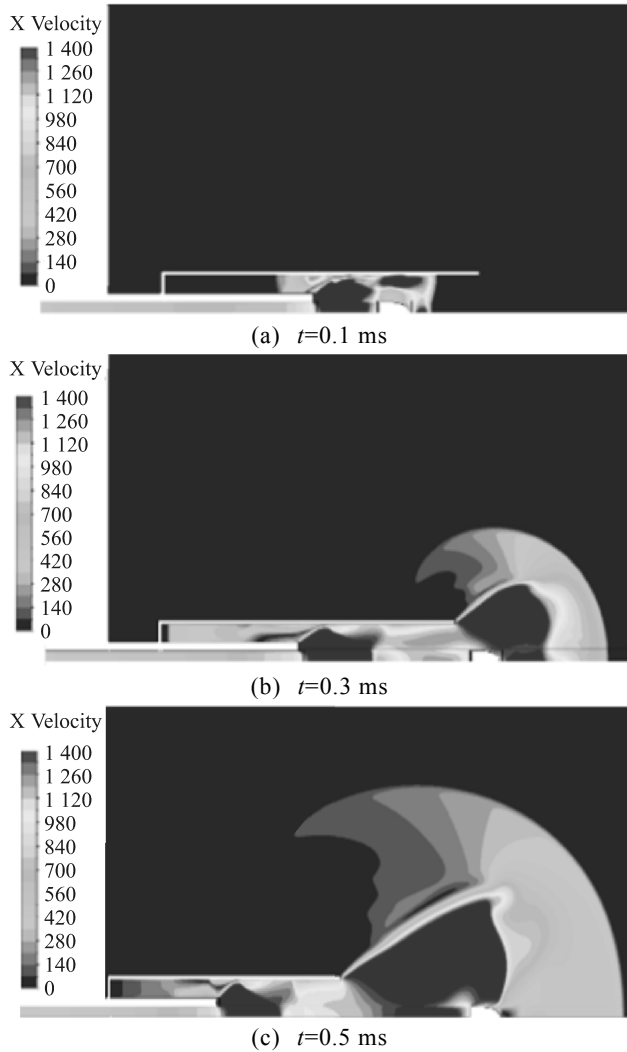


图 7 带有装置 2 的膛口流场速度云图(单位: m/s)

装置 2 类似于圆柱形消焰器，不同的是部分装置延伸至身管后方，从膛内喷出的火药燃气经过在

该装置的膨胀后再向外排出，与装置 1 相比由于缺少了前端面，高温高压气体迅速排出；因此，膛口流场的形成并未受到限制。图 7(b)中，可以看到清晰的球状流场结构。

2.4 带有装置 3 的膛口流场数值模拟

装置 3 与 1 相比，去掉了装置的前端壁面，其结构如图 8 所示。

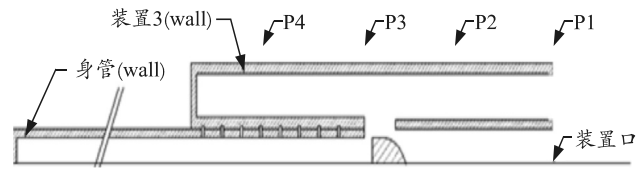


图 8 带有装置 3 的计算模型

对带有装置 3 的膛口流场进行数值模拟，速度云图如图 9 所示。

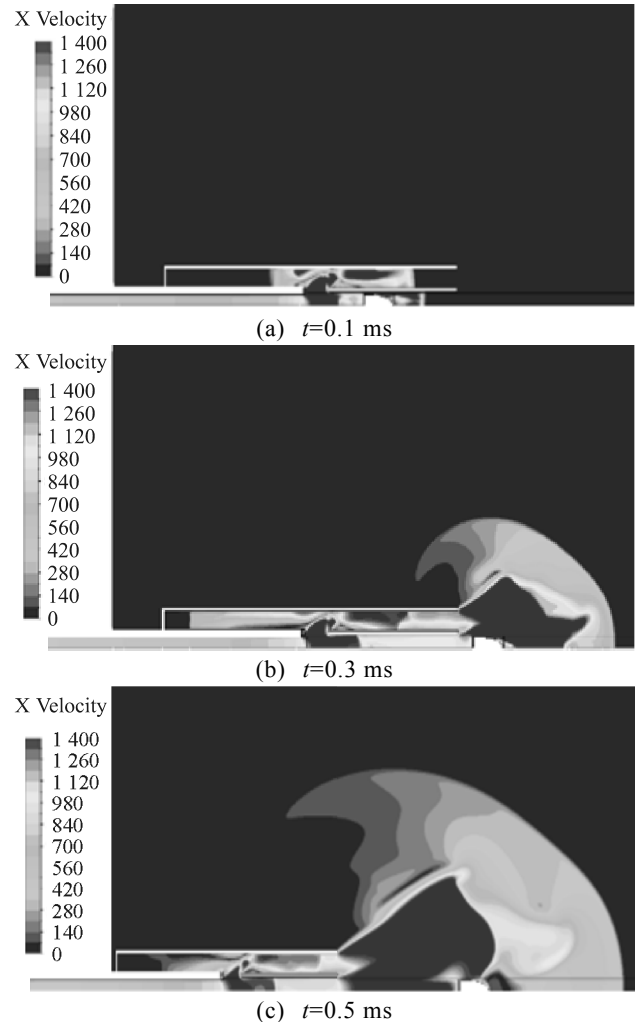


图 9 带有装置 3 的膛口流场速度云图(单位: m/s)

该组装置与装置 2 相比，增加了侧板，其目的是为了减小弹丸在装置内运动时火药燃气对弹丸的影响。与装置 2 相比，受到侧板的影响，膛口处的

流场不再呈规则的球形。

2.5 带有装置 4 的膛口流场数值模拟

装置 4 与 1 相比，将进气孔改为斜孔，其结构如图 10 所示。

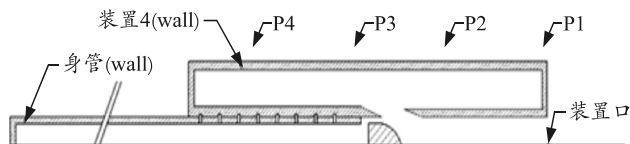
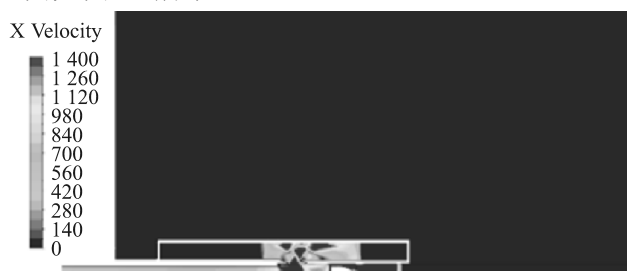
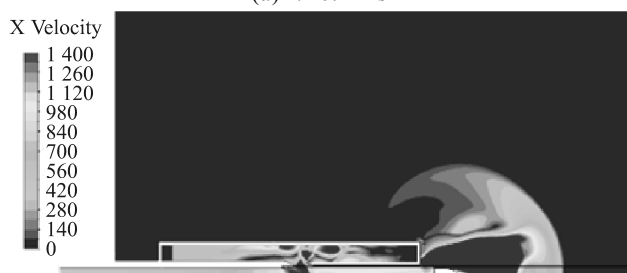


图 10 带有装置 4 的计算模型

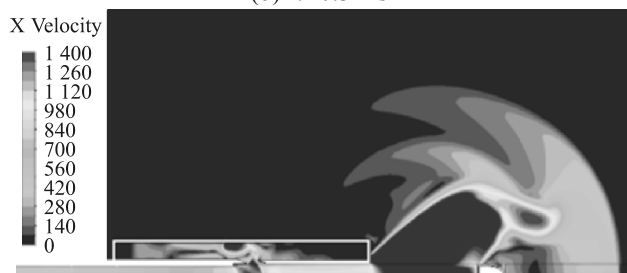
对带有装置 4 的膛口流场进行数值模拟，速度云图如图 11 所示。



(a) $t=0.1$ ms



(b) $t=0.3$ ms



(c) $t=0.5$ ms

图 11 带有装置 4 的膛口流场速度云图(单位: m/s)

与装置 1 相比，该装置将进气孔改为斜孔，且倾斜方向与弹丸运动的方向相反；因此，进入装置内部的气体将减少，能更快地完成泄压，但这将使得更多的气体从装置口直接排出，从而使得装置口的压力升高。而进入装置内膨胀后的气体再流出装置时，经过斜孔后会减少出现倒灌身管的情况。

2.6 结果分析

数值仿真过程中对炮口处及装置口处进行压力监控，得出弹丸在不同膛口装置下飞离膛口过程中

炮口处及装置口处的压力曲线，如图 12 所示。

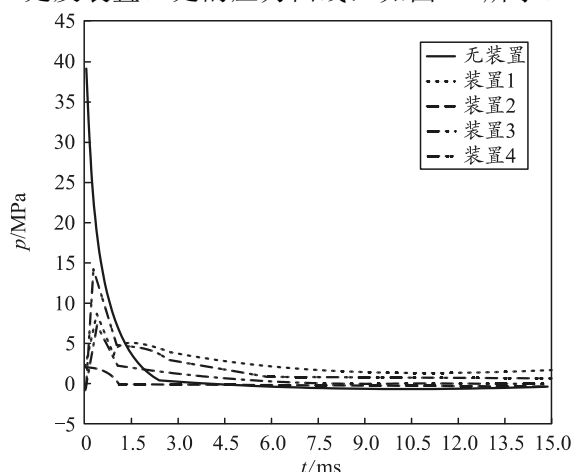
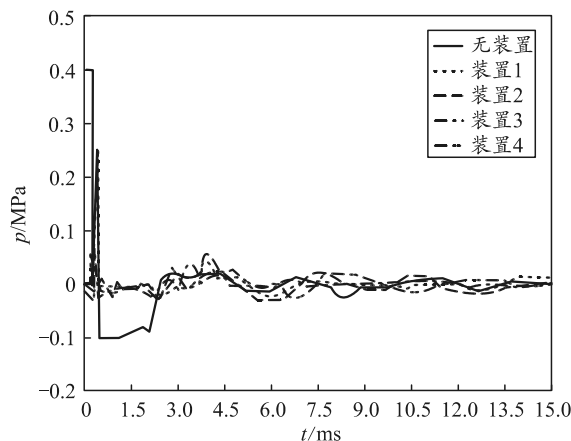


图 12 带有不同装置时炮口处压力曲线

由上图可知，与无膛口装置时的炮口处压力相比，带有装置后的装置口处压力均有明显的降低。对于装置 2 和 3，由于缺少前端面，从膛内喷出的火药燃气在装置处膨胀后压力降低并直接从装置口排出，因此装置口处的压力相较于装置 1 和 4 更低；而装置 3 由于增加了侧板，使得位于弹后及侧板间的火药燃气不能充分膨胀，因此装置口处的压力比装置 2 更高。对于装置 1 和 4，只有通过进气孔进入装置的气体得到了膨胀，压力降低，其余气体则随着弹丸的运动从装置口喷出，因此压力会更高。且由于装置 4 采用了与弹丸运动方向相反的斜孔，进入装置内部的气体会更少，直接排出的气体更多，因此该装置口处的压力较于装置 1 更高；同样得益于斜孔的使用，装置内的气体更容易排出，因此在 1.5 ms 之后，该装置口处的压力较于装置 1 更低。

数值仿真过程中对 P1, P2, P3, P4 点进行压力监控，其位置如图 1 所示，得到了安装不同膛口装置时各点处的压力曲线，并与无膛口装置下的情况进行了对比。各监测点压力曲线如图 13 所示。



(a) P1 点压力曲线

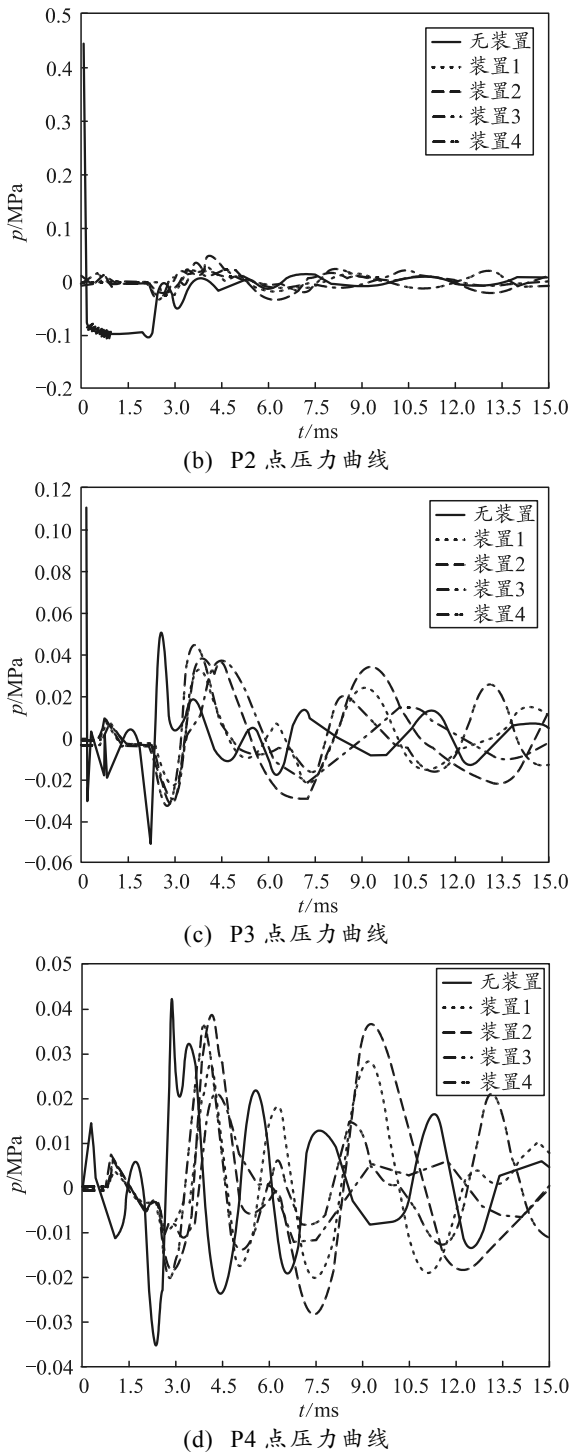


图 13 各监测点压力曲线

由上图可知，无膛口装置时各监测点的初始压力较大，而增加了装置口的初始压力下降明显，尤其是距离装置口较近的监测点 P1 与 P2，其峰值不及无装置时的 1/5，P3 点则不及无装置时的 1/2。由于膛内气体大多向弹丸运动方向喷出，因此距离装

置口较远的 P4 点与无装置时的压力差别不大。4 种装置中由于装置 2 的结构最为简单，气体的排出最为迅速，因此该装置周围的压力较其他装置稍高。装置 1 和 4 中的气体，需要在其内部膨胀后再排出，因此减缓了气体的排出速率，使得装置口周围的压力较低且较为平缓。

3 结论

笔者对光膛口及 4 种带有不同膛口装置的流场进行了数值模拟，得出以下结论：

1) 与无膛口时的炮口处压力相比，4 种膛口装置在不同程度上均可降低装置口处的压力，尤其是无前端的装置，效果更加明显，但因其气体排放较快，使得装置口压力稍高。

2) 对于有前端的装置，将进气孔改为倾斜可有效抑制气体倒灌身管的现象，并方便气体的排出。

参考文献：

- [1] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 132-155.
- [2] 王登, 高跃飞, 王振嵘, 等. 炮口制退器对转管武器炮口扰动的影响[J]. 机械设计, 2019, 36(S1): 84-88.
- [3] 李佳圣, 廖振强, 邱明, 等. 喷管气动力抑制转管武器射击振动的方法研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 167-172.
- [4] 刘康, 管小荣, 徐诚, 等. 斜切角膛口流场的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(4): 1-5.
- [5] 戴劲松, 何福, 苏晓鹏, 等. 定向反射膨胀装置作用特性研究[J]. 弹道学报, 2019, 31(2): 92-96.
- [6] 戴劲松, 何福, 苏晓鹏, 等. 速射火炮定向反射膨胀减后坐力机理研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2407-2415.
- [7] 谭添, 戴劲松, 王茂森, 等. 封闭反射膨胀装置流场仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 1-5.
- [8] CHATURVEDI E, KDWIVEDI R K. Computer aided design and analysis of a tunable muzzle brake[J]. Defence Technology, 2019, 15(1): 89-94.
- [9] 刘欣宁, 岳明凯. 带炮口制退器的火炮膛口流场 3 维数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(7): 56-59.
- [10] 苏晓鹏, 钱林方, 戴劲松. 带炮口装置时某火炮膛口流场数值仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 15-18.
- [11] 张焕好, 陈志华, 姜孝海, 等. 高速弹丸穿越不同制退器时的膛口流场波系结构研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 623-629.