

# 喷管高效膛口制退器对机枪射击性能的影响\*

咸东鹏<sup>1</sup>, 廖振强<sup>2</sup>, 肖俊波<sup>2</sup>, 宋杰<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院机械工程学院 南京, 211167) (2. 南京理工大学机械工程学院 南京, 210094)

**摘要** 在半开膛膛口制退器基础上进行改进, 提出喷管高效膛口制退器的概念, 在半开膛膛口制退器两侧引出可水平向后的拉瓦尔喷管, 利用火药燃气通过喷管气流的反推作用达到减后坐效果, 通过编程进行内弹道计算。运用刚柔耦合动力学理论, 对安装喷管高效膛口制退器车载转管机枪系统建立动力学模型, 进行动力学仿真计算。计算结果表明, 安装喷管高效膛口制退器后, 机枪后坐力、后坐位移、膛口角位移和弹丸出膛口时角位移均得到减小, 提高了机枪的射击性能。

**关键词** 兵器科学与技术; 动力学仿真; 膛口制退器; 喷管; 高效; 射击性能

**中图分类号** TH113; TJ25

## 引言

炮口制退器的雏形是在靠近炮口处开一组斜向后的孔, 在炮弹飞过开孔后, 膛内火药燃气通过斜向后的孔向外喷出, 利用反推力来达到减后坐的目的。在高新技术迅猛发展的今天, 枪炮技术也在蕴育着新的突破。在要求枪炮有更大威力的同时, 还要求其具有更好的机动性, 这些都是通过改进反后坐装置以减小后坐力来实现的<sup>[1-2]</sup>。普通膛口制退器是利用膛口喷出的火药气体使制退器产生向前的力, 此力与后坐力的方向恰好相反, 使枪炮受到向后的合力得到减小, 从而达到减后坐目的<sup>[3-5]</sup>。但是由于在制退器产生减后坐效果时, 弹丸已经飞离膛口, 因此普通膛口制退器的减后坐效率比较低<sup>[6-8]</sup>。笔者在半开膛式膛口制退器基础上进行改进, 提出喷管高效膛口制退器这一结构, 在制退器两侧引出拉瓦尔喷管, 利用拉瓦尔喷管反推气流提高减后坐效率。利用动力学仿真软件车载转管机枪系统进行刚柔耦合动力学建模和仿真, 通过是否安装喷管高效膛口制退器来研究其对机枪射击性能的影响<sup>[9-10]</sup>。

## 1 结构设计

安全性、效率、结构强度等是影响制退器结构设计时的重要因素。向后喷出的火药燃气的冲量越

大, 减后坐效率将越高, 但是膛口的冲击波和噪声等危害也将增大, 因此在制退器的设计中平衡制退器的高效率和低危害是重点研究内容。设计膛口制退器时应遵循以下原则: a. 选择制退器时要综合考虑射击要求和弹药情况; b. 制退效率应满足设计要求; c. 噪声和冲击波等危害要控制在一定范围内; d. 制退器的尺寸以及质量不能过大, 应控制在合适范围内; e. 制退器的结构强度要满足设计要求。

在本研究中, 半开膛式膛口制退器的结构示意图如图 1 所示。对其进行改进, 在制退器两侧加拉瓦尔喷管, 其结构示意图如图 2 所示, 利用拉瓦尔喷管反推气流提高减后坐效率。在满足上述制退器设计原则的情况下, 加工制退器和导气装置时, 做了如下设计和处理: a. 此喷管高效膛口制退器包含膛口、膛口盖和导气装置三部分, 加工时分别加工, 并且在设计导气装置时应使得其与枪管的导气装置的相同; b. 要保证膛口和膛口盖的同轴度。

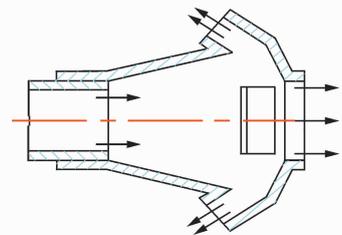


图 1 半开膛式膛口制退器结构示意图  
Fig. 1 Semi open muzzle brake

\* 国家自然科学基金资助项目(51376090)  
收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-03-03

喷管高效膛口制退器采用铝材料进行加工,制退器中每个零件均很轻,远小于实验体的总质量,因此,在更换零件时,实验体总质量近似看做不变。

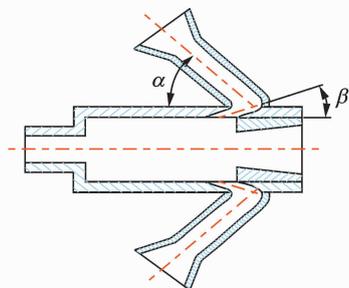


图2 喷管高效膛口制退器结构示意图

Fig. 2 Nozzle high efficiency muzzle brake

## 2 数值计算结果

在喷管高效膛口制退器低后坐仿真和实验中,发射性能是其研究的重点,因此测量和分析的主要对象是枪身后坐动量以及弹丸初速,而选取二者的目的是研究武器的主要性能——弹丸初速损失比例和减后坐效率。仿真计算通过 Matlab 编程计算得出。实验中,弹丸初速通过光幕靶和测时仪测得;后坐体的后坐动量先通过光电位移跟踪器测量其后坐速度,再将其数值微分得到。弹丸初速和后坐速度测量的原理与方法见文献[9]。

由于制退器只在后效期时期起作用,因此,安装喷管高效膛口制退器后机枪内弹道时期膛内压力曲线与未安装喷管高效膛口制退器时的内弹道相同,如图3所示。

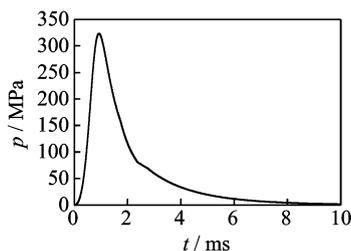


图3 膛内压力曲线

Fig. 3 Bore pressure curve

减后坐效率的计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{m_{HZ} v_{HZm}}{m_H v_{HZ}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

其中: $m_H v_{HZ}$ 为自由后坐时后坐体的动量; $m_{HZ} v_{HZm}$ 为安装制退器时后坐体的动量。

3种方案的减后坐效率见表1。其中:方案1为安装半开腔式膛口制退器;方案2为制退器两侧各

引出一个 $10^\circ$ 喷管;方案3为制退器两侧各引出一个 $20^\circ$ 喷管。

表1 减后坐效率

Tab. 1 Table1 the efficiency of recoil reduction

方案	$\theta_1$	$\eta_1$	$\theta_2$	$\eta_2$
1	1.20	16.8	1.21	16.0
2	1.22	25.1	1.18	24.7
3	3.38	27.8	3.29	27.5

表1中: $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 分别为实验减后坐效率和仿真减后坐效率; $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为实验初速下降比率和数值计算初速下降比率。

对比方案1和方案2可知,在同等条件下,喷管高效膛口制退器的减后坐效率比半开腔式膛口制退器效率高。这是因为通过拉瓦尔喷管使得从喷管喷出的气体速度增加,增大了的冲量,更大地抵消了武器的后坐冲量,所以喷管高效膛口制退器是一种可行的减后坐技术。对比方案2和方案3可知,两侧引出 $20^\circ$ 喷管的膛口制退器的减后坐效率比两侧引出 $10^\circ$ 喷管的膛口制退器减后坐效率高。

### 2.1 $\alpha$ 角对发射性能的影响

由图4和图5可以看出, $\alpha$ 角越大,制退效率越小。因为 $\alpha$ 角越大,喷管反推力在轴向上的分力就越小,所以 $\alpha$ 角与制退效率成反比,但 $\alpha$ 角对弹丸初速没有影响。

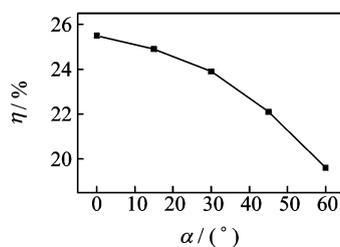


图4  $\alpha$ 角对制退效率的影响

Fig. 4 Effect of angle  $\alpha$  on the efficiency of recoil reduction

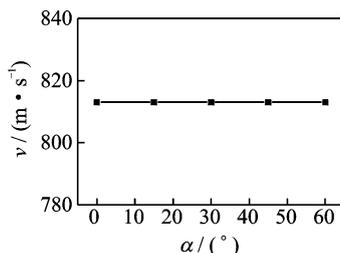


图5  $\alpha$ 角对弹丸初速的影响

Fig. 5 Effect of angle  $\alpha$  on the muzzle velocity of projectile

## 2.2 $\beta$ 角对发射性能的影响

由图6可知,  $\beta$ 角越大, 制退效率越小。因为制退器上的侧边孔道流入喷管内的气流流量系数随着  $\beta$  角的增大而减小, 所以  $\beta$  角与制退效率成反比, 但  $\beta$  角对弹丸初速没有影响。

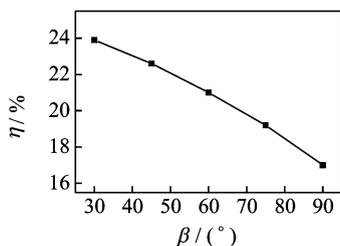


图6  $\beta$ 角对制退效率的影响

Fig. 6 Effect of angle  $\beta$  on the efficiency of recoil reduction

## 3 动力学建模

车载架座发射平台和转管机枪系统构成车载转管机枪武器系统。转管机枪系统由转管机枪、首发启动装置、膛口装置、弹链和弹箱等组成, 是机枪射击时后坐能量的直接载体。车载架座发射平台主要由托架与座圈连接底座、摇架、座圈及其支撑结构托架、立轴及车辆等组成, 主要起连接和支撑转管机枪系统的作用, 通过轮胎与地面连接, 承受机枪射击时机枪的后坐能量。

转管机枪在后坐能量与后坐缓冲装置的作用下, 沿摇架导轨槽作小幅度的前后平移运动。为了增强枪管的刚度, 抑制枪管的振动, 在摇架前端常安装有前支撑结构。枪管组在射击振动时, 在克服与前支撑装置的间隙后发生碰撞接触, 通过前支撑的碰撞阻碍作用实现抑制枪管组的振动和变形。摇架与托架之间通过耳轴与夹紧装置相互连接, 当夹紧装置处于未夹紧状态时, 摇架与托架可相对耳轴中心转动, 从而实现调整机枪射击时的高低射角。架与摇架的相对固定通过夹紧装置来实现, 托架与立轴通过抱箍的作用相对固定, 未夹紧抱箍时托架与动圈之间可绕立轴轴线相对转动, 从而实现对机枪射击时方位角的调整。立轴与底座相对关联固定, 并一起与座圈动圈通过螺栓固定。由于座圈内空间的限制, 机枪射击方位角的调整可由转动动圈来实现。射击中, 动圈通过钢珠轴承连接定圈, 再通过圆柱销与之相固定, 动圈上作用力通过钢珠传递到定圈上, 并依次往

下传递到车辆上<sup>[11-13]</sup>。定圈通过支撑架与车辆固定连接, 其结构示意图如图7所示。

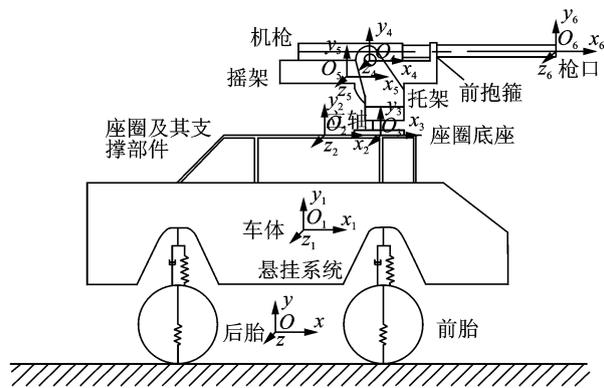


图7 车载机枪系统结构示意图

Fig. 7 Structure of vehicle-mounted gun

射击过程中, 膛内气体压力作用在机枪上, 后坐能量通过缓冲器与导轨的作用传递到车载架座上。在后坐能量及其缓冲器的作用下, 发射平台各零部件将会产生振动变形, 这将导致射击密集度变差。在大口径机枪车载武器连续射击过程中, 需要考虑各零部件的振动变形。因此, 对发生变形较大的零部件, 例如枪管组合支撑架以及摇架等作柔性处理, 其他不易变形的零部件作刚性处理。

在模型中刚体和柔性体在传递力和力矩时方式是不同的, 各柔性体在与其他相关联的零部件传递力和力矩时, 需要在其相关联的部位建立一刚性点, 并让其与接触面上的相关节点关联。因此, 零部件之间作用力与力矩可由接触面上的各点来共同承担。本研究中动力学模型采用有限元软件 Ansys 创建柔性体。

为了便于描述武器系统动力学和运动学特性, 建立了如下坐标系:  $Oxyz$  为固连于地面的空间惯性坐标系;  $O_1x_1y_1z_1$  为车体固连系;  $O_2x_2y_2z_2$  为座圈平面固连系;  $O_3x_3y_3z_3$  为座圈和托架相连接的底座固连系;  $O_4x_4y_4z_4$  为托架耳轴的固连系;  $O_5x_5y_5z_5$  为摇架的固连系;  $O_6x_6y_6z_6$  为枪口固连系。

系统复杂性大, 包括多体动力学、车辆轮胎地面力学、自动武器发射动力学、弹道学及气体动力学等相关理论, 因此, 在模型中需作适当的简化假设:

- 1) 在考虑弹链运动对机枪的扰动时, 将弹链直线排列, 不考虑弹链层状排列引起的拨弹阻力突变对机枪射击性能的影响;
- 2) 地面设定为硬水泥路面, 与轮胎接触时仅考虑轮胎的受力变形, 不考虑地面的变形;
- 3) 连续射击将导致枪管温度升高, 但由此导致

的枪管力学性能的变化和其对枪管振动的影响忽略不计;

4) 在枪管转动的状态下,不考虑枪管与弹丸之间的作用力对枪管的影响;

5) 不考虑动圈与定圈之间的滚珠配合在后坐能量作用下的碰撞变形,动圈与定圈之间通过前后左右四个固定约束连接在一起;

6) 射击开始时车辆不制动,处于停车状态。

影响拨弹阻力因素较多,弹链长度、拨弹速度、弹链摆放及运动方式对拨弹阻力的大小有较大影响,因此弹链模型的初始状态不同对武器系统横向扰动的作用也不相同。模型中弹链由 30 发链节组成,弹链沿拨弹运动方向水平排列,机枪工作射频为 3 kr/min。车辆轮胎胎压为 100 kPa,通过计算径向刚度近似等于 180 N/mm。车载武器系统通过 Adams 建立刚柔耦合动力学模型,采用 GTIFF 积分器进行求解计算。

### 4 仿真计算

图 8~图 12 所示为喷管高效型膛口制退器对 12.7 车载转管机枪射击性能的影响。安装喷管高效膛口制退器后,机枪射击后坐位移的最大值由 8.16 mm 降到 6.51 mm,减小了 20.2%;机枪射击后坐力由 4320N 降到 3660N,减小了 15.3%;机枪

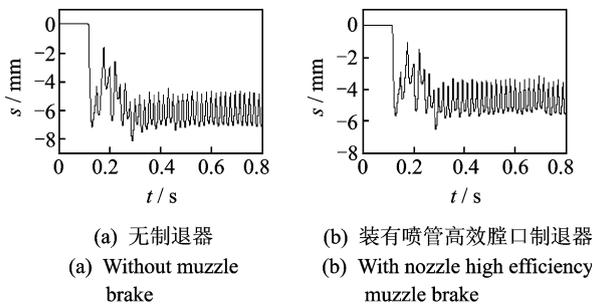


图 8 后坐位移曲线

Fig. 8 Recoil displacement curve

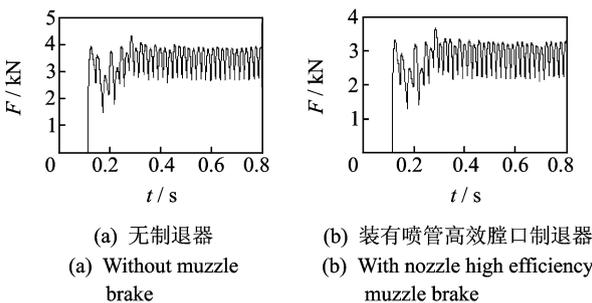


图 9 后坐力曲线

Fig. 9 Recoil force curve

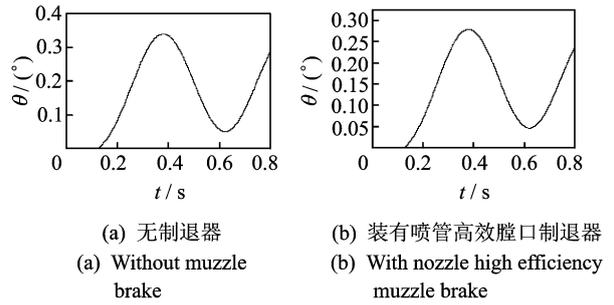


图 10 车辆振动角位移曲线

Fig. 10 Vehicle vibration angular displacement curve

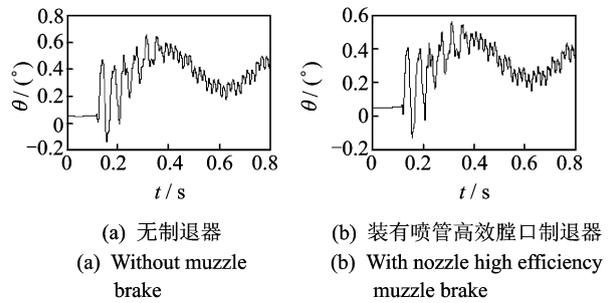


图 11 膛口角位移曲线

Fig. 11 Muzzle angular displacement curve

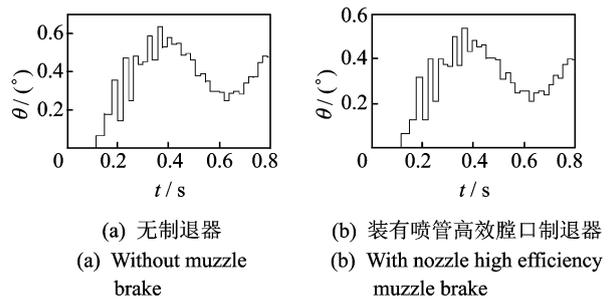


图 12 弹丸出膛口时刻膛口角位移曲线

Fig. 12 Muzzle angular displacement curve at the moment of bullet fly out of muzzle

射击时车辆振动角位移由 0.339° 降到 0.278°, 减小了 18.0%; 机枪射击膛口角位移由 0.651° 降到 0.560°, 减小了 14.0%; 机枪射击弹丸出膛口时膛口角位移由 0.629° 降到 0.534°, 减小了 15.1%。因此,在安装喷管高效膛口制退器后,可提高 12.7 车载转管机枪射击性能。

### 5 结论

1) 提出一种喷管高效膛口制退器,在膛口制退器侧面引出向后的拉瓦尔喷管,膛内燃气通过喷管加速后向后喷出,大大提高了减后坐效率,并分析了  $\alpha$  角和  $\beta$  角对减后坐效率的影响。结果表明:喷管

高效膛口制退器较之半开腔式膛口制退器减后坐效率更高;20°喷管的喷管高效膛口制退器较之10°喷管的喷管高效膛口制退器减后坐效率更高。

2) 安装喷管高效膛口制退器后,枪身所受后坐力明显减小,弹丸出膛口时角位移最大范围和摇架俯仰角最大范围也明显下降,从而使弹丸全散布减小,由摇架变形而引起的枪口跳动得到更好地抑制,显著提高了机枪的射击性能。

3) 本研究主要是针对半开腔式单腔膛口制退器的改进,在后续工作中,将对半开腔式多腔膛口制退器进行改进,减后坐效率将进一步得到提高,并将进行实验验证和仿真计算。

### 参 考 文 献

- [1] 廖振强,王涛,余世海. 武器气体动力学数值计算方法[M]. 北京:国防工业出版社,2015:160-169.
- [2] 张月林. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京:国防工业出版社,1984:4-6.
- [3] 陆野,周克栋,赫雷,等. 膛口制退器效率对某新型全枪浮动原理大口径机枪的影响研究[J]. 兵工学报,2016,37(9):1585-1591.
- Lu Ye, Zhou Kedong, He Lei, et al. Research on influence of muzzle brake efficiency on a new large caliber machine gun based on floating principle[J]. Acta Armamentaria, 2016,37(9):1585-1591. (in Chinese)
- [4] 李佳圣,廖振强,宋杰,等. 膛口制退效能对转管机枪射击密集度影响研究[J]. 兵工学报,2013,34(10):1215-1220.
- Li Jiasheng, Liao Zhenqiang, Song Jie, et al. Research on influence of muzzle brake efficiency on firing density of gatling gun[J]. Acta Armamentaria, 2013,34(10):1215-1220. (in Chinese)
- [5] 翁春生. 计算内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2006:103-110.
- [6] 陈杨,廖振强,刘国鑫,等. 两种拉瓦尔喷管减后坐结构效能对比分析[J]. 弹道学报,2008,20(4):88-91.
- Chen Yang, Liao Zhenqiang, Liu Guoxin, et al. Performance comparison of two recoilless structures with Laval nozzles[J]. Journal of Ballistics, 2008,20(4):88-91. (in Chinese)
- [7] 李佳圣,邱明,廖振强,等. 带膛口助旋制退器的转管机枪动力学建模与仿真[J]. 兵工学报,2014,35(9):1344-1349.
- Li Jiasheng, Qiu Ming, Liao Zhenqiang, et al. Dynamic modeling and simulation of gatling gun with muzzle assistant-rotating and recoil absorber[J]. Acta Armamentaria, 2014,35(9):1344-1349. (in Chinese)
- [8] 张帆,廖振强,刘国鑫,等. 基于两相流理论的膨胀波枪炮内弹道机理[J]. 弹道学报,2007,19(4):9-12.
- Zhang Fan, Liao Zhenqiang, Liu Guoxin, et al. Interior ballistic study on rarefaction wave gun based on theory of two-phase flow[J]. Journal of Ballistics, 2007,19(4):9-12. (in Chinese)
- [9] 戚东鹏,廖振强,李佳圣,等. 自动武器喷管减后坐实验研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2013,37(1):107-111.
- Xian Dongpeng, Liao Zhenqiang, Li Jiasheng, et al. Experimental study of recoil reduction by reverse jet gas for automatic weapon[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature Science, 2013,37(1):107-111. (in Chinese)
- [10] 宋杰,廖振强,李佳圣,等. 导气与枪管浮动混合式自动机自动机动力学特性研究[J]. 兵工学报,2014,35(6):753-761.
- Song Jie, Liao Zhenqiang, Li Jiasheng, et al. Dynamics characteristics of automatic mechanism for gas operated and floating barrel operated automatic action[J]. Acta Armamentaria, 2014,35(6):753-761. (in Chinese)
- [11] 李仲兴,郭子权,王传建. 越野车用两级压力式油气弹簧的建模与仿真[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(3):512-517.
- Li Zhongxing, Guo Ziquan, Wang Chuanjian, et al. Modeling and simulating of a two-stage pressure hydro-pneumatic spring for off-road vehicle[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017,37(3):512-517. (in Chinese)
- [12] 芮筱亭. 多体系统发射动力学进展与应用[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(2):214-220.
- Rui Xiaoting. New developments in launch dynamics of multibody system and its applications[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017,37(2):214-220. (in Chinese)
- [13] 廖爱华,黄旭,方宇. 基于刚柔耦合的轨道车辆转向架构架疲劳分析[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(2):392-397.
- Liao Aihua, Huang Xu, Fang Yu. Fatigue analysis for bogie frame based on rigid-flexible coupling simulation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017,37(2):392-397. (in Chinese)



**第一作者简介:**戚东鹏,男,1984年2月生,博士生。主要研究方向为特种机械仿真与优化。曾发表《自动武器喷管减后坐实验研究》(《南京理工大学学报:自然科学版》2013年第37卷第1期)等论文。

E-mail:xiandongpeng1@163.com

