

doi: 10.7690/bgzd.2013.01.002

基于 CFD 的炮口制退器结构特征量特性研究

陈明亮¹, 李志刚¹, 鲍密²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学动力工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了减少火炮的后座动能提高炮口制退器的作用, 提出一种利用计算流体力学的方法计算炮口制退器流场来研究炮口制退器结构特征量的方法。通过推导结构特征量在定常流和非定常流条件下结构特征量的计算算式, 计算 3 种不同类型炮口制退器在定常流条件下的结构特征量; 并选取一种炮口制退器, 在线性和非线性入口非定常流条件下, 计算它的结构特征量。计算结果证明: 炮口制退器的结构特征量与入口总压、总温大小, 以及流动是定常流或者非定常流都没有关系, 是一个不变的常量, 与火炮试验结果一致。

关键词: 炮口制退器; 结构特征量; 定常流; 非定常流

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

A Study of Muzzle Brake Structure Characteristics Based on CFD

Chen Mingliang¹, Li Zhigang¹, Bao Mi²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Power & Energy, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to reduce the recoil kinetic energy of cannon barrel and advance impact of muzzle brake, a method studying the structure characteristics of muzzle brake using computational fluid dynamics (CFD) method is proposed, and the formulas of the structure characteristics under steady and unsteady flow are derived respectively. Then, the structure characteristics of three different muzzle brakes are calculated under steady flow condition, but they have different inlet total pressure or total temperature. For one of the three kinds of muzzle brake, the structure characteristics under linear and nonlinear unsteady flow inlet conditions are calculated separately. Calculation results indicate that the inlet total pressure or the total temperature or whether it's steady flow or unsteady flow has no influence on the structure characteristics, the structure characteristics of a muzzle brake is a constant. It is consistent with the text results of muzzle brake test.

Key words: muzzle brake; structure characteristics; steady flow; unsteady flow

0 引言

炮口制退器是安装在炮口的一个部件, 由腔室、挡板和侧孔组成。其作用是通过改变后效期气流流向, 减少火炮的后座动能, 以减小后坐长度和作用在炮架上的作用力^[1], 这样就可以在相同炮架上安装不同威力的火炮或者减轻炮架重量以提高机动性。其效率能降低后坐动能的 25%~65%^[2]。炮口制退器分为反作用式、冲击式和冲击反作用式 3 类, 现在大部分火炮还装有炮口制退器。

目前研究炮口制退器的方法分理论方法^[3]、试验方法^[4]和数值计算方法^[5]3 类。火炮后效期炮口流场十分复杂, 理论方法研究炮口流场十分困难, 现在的理论研究方法都是在大量假设和简化条件下推导而得, 适用范围和精度有一定的局限性; 试验方法研究炮口制退器精确而且可靠, 但是研究成本会比较高; 随着计算机技术的发展和基础学科的研究积累, 数值仿真计算成为研究炮口制退器特性的重

要手段, 其计算精度和适用范围都要优于理论计算方法。所以笔者用计算体力学的方法, 通过计算炮口制退器流场^[6-8], 研究炮口制退器结构特征量。

1 炮口制退器结构特征量计算算式的推导

1.1 炮口制退器结构特征量的定义

$$\alpha = \frac{F_T}{F^*} \quad (1)$$

其中: F_T 为炮口制退器各出口截面的气流总反力的轴向合力; F^* 为炮口制退器入口截面的轴向气流总反力。

因为 F_T 不容易获得, 而炮口制退器壁面轴向受力比较容易获得, 所以笔者推导了在定常流和非定常流条件下, 用炮口壁面所受轴向力 F_N 来表达炮口制退器的结构特征量 α 。

1.2 定常流条件下 α 的推导

取炮口制退器入口和出口截面的以及炮口制退

收稿日期: 2012-07-05; 修回日期: 2012-08-16

作者简介: 陈明亮(1988—), 男, 山东人, 硕士在读, 从事流体力学及液压控制研究。

器壁面之间的流体为控制体, 如图 1。图 1 中, 入口为虚线, 出口为细实线, 制退器壁面为粗实线。

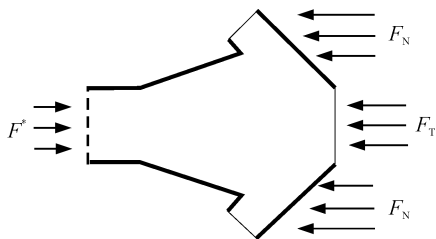


图 1 炮口制退器内控制体受力

当气流为定常流时, 根据动量方程得

$$F^* - F_N = F_T \quad (2)$$

式中: F_N 为控制体受到壁面的作用力; F_T 和 F^* 分别为炮口制退器入口和出口截面气流总反力轴向分量。

$$F^* = p^* A f(\lambda) \quad (3)$$

式中: p^* 为入口截面气流的总压; A 为入口横截面的面积; $f(\lambda)$ 为气动函数中冲量函数, 其中 λ 为速度因数 (又称速度系数), 其冲量函数的值已被编成表格形式, 因此可以查气动函数表获得不同 λ 时 $f(\lambda)$ 的值。

由式 (1) 和式 (2) 得

$$\alpha = \frac{F^* - F_N}{F^*} = 1 - \frac{F_N}{F^*} \quad (4)$$

1.3 非定常流条件下 α 的推导

在非定常流条件下, 对图 1 所示的控制体积应用动量定理得:

$$F^* - F_N - F_T = \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

式 (5) 中 I 为图 1 控制体积中流体具有的动量。

对式 (5) 变换得下式:

$$F^* dt - F_N dt - F_T dt = dI \quad (6)$$

对式 (6) 两边积分得:

$$\int_{t_0}^{t_1} F^* dt - \int_{t_0}^{t_1} F_N dt - \int_{t_0}^{t_1} F_T dt = \int_{t_0}^{t_1} dI \quad (7)$$

式 (7) 两边同时除以 $\int_{t_0}^{t_1} F^* dt$ 得

$$1 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_N dt}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} - \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_T dt}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} dI}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} \quad (8)$$

对式 (8) 变形得:

$$\frac{\int_{t_0}^{t_1} F_T dt}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} = 1 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_N dt}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} - \frac{\int_{t_0}^{t_1} dI}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} \quad (9)$$

因为式 (9) 中 $\frac{\int_{t_0}^{t_1} dI}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt}$ 要远小于 1, 所以可以忽略不计, 因此式 (9) 可以简化为:

$$\alpha = \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_T dt}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} = 1 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} F_N dt}{\int_{t_0}^{t_1} F^* dt} \quad (10)$$

$$\text{令} \quad \int_{t_0}^{t_1} F_T dt = I_N \quad (11)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} F^* dt = I^* \quad (12)$$

则式 (10) 可记为

$$\alpha = 1 - \frac{I_N}{I^*} \quad (13)$$

式 (10) 即为非定常流条件下结构特征量的计算公式。

在准定常流条件下, 也可推导得到算式 (10)。

2 计算模型设置

由于炮口制退器受到的火药燃气粘性力之和与所受压力相比可以忽略不计, 因此本算例采用欧拉无粘模型。计算理论用有限体积法^[9]。笔者采用轴对称几何模型来研究炮口制退器的特性, 用基于有限体积法的有限元软件 **Fluent** 计算炮口流场, 然后获得计算需要的壁面受力。笔者对反作用式、冲击式、冲击反作用式 3 种炮口制退器类型进行计算。

2.1 几何模型及网格划分

炮口制退器的入口半径为 0.5 m, 入口截面积为 0.007 853 98 m²。

图 2~4 是对“轴对称轴”镜像过的几何图形, 并已划分了网格。在划分网格的过程中, 要注意在炮口部要特别加密网格, 可见下图, 以利于正确计算炮口部流场, 为后续计算获得正确的数据基础。

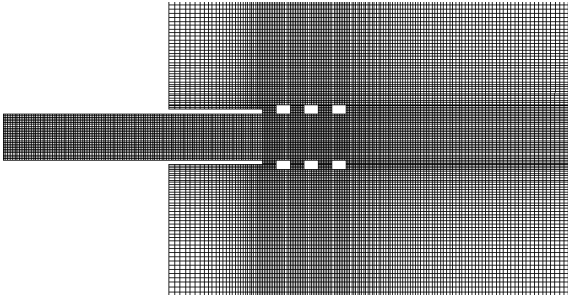


图 2 反作用式炮口制退器几何结构及网格划分

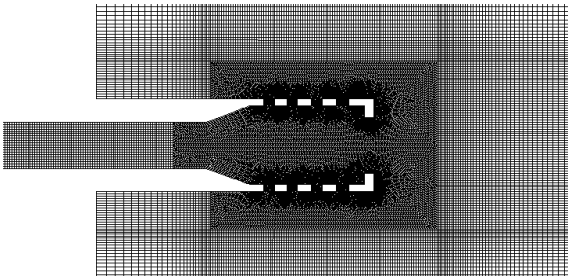


图 3 冲击反作用式炮口制退器及网格划分

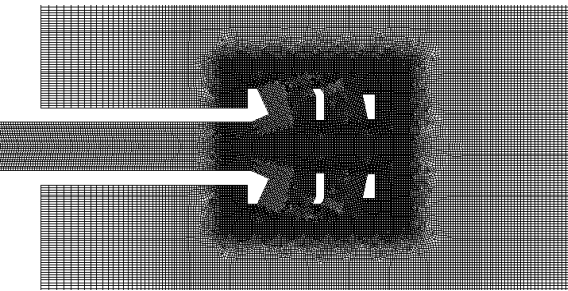


图 4 冲击式炮口制退器及网格划分

2.2 火药气体属性

取火药气体的比热比 $k=1.33$ ；密度由完全气体状态方程 $p = \rho RT$ 决定， $R = 287.4 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.3 边界条件

边界条件为压力入口、压力出口、壁面、轴对称轴。压力入口和压力出口因具体设置和计算要求的不同而不同，如表 1~5 所示。

3 计算结果

因为炮口截面总是临界截面^[3]，炮口制退器入口马赫数总是为 $\lambda=1$ ，所以，查气动函数表得

$$f(\lambda)=1.2679$$

所以，根据算式 (3) 和已知入口总压，可以求得入口截面气流总反力 P^* 。

3.1 定常流条件下计算结果

表 1、表 2 和表 3 是在入口总温为 3 000 K 不变

的条件下计算得到的结果。表 4 是在入口总压为 2.5 MPa 不变的条件计算所得结果。

表 1 反作用式炮口制退器结构特征量计算(定温)

入口总压 P^*/MPa	入口截面气流总反力 F^*/N	炮口制退器轴向受力 F_N/N	比值 F_N / F^*	结构特征量 α
0.5	4 979.0	1 592.1	0.319 7	0.680 3
0.8	7 966.4	2 526.9	0.317 2	0.682 8
1.5	14 937.1	4 771.2	0.319 4	0.680 6
2.5	24 895.5	8 031.3	0.322 6	0.677 4
3.5	34 853.2	11 231.7	0.322 2	0.677 8
4.5	44 811.3	14 457.7	0.322 7	0.677 3

表 2 冲击反作用式炮口制退器结构特征量计算(定温)

入口总压 P^*/MPa	入口截面气流总反力 F^*/N	炮口制退器轴向受力 F_N/N	比值 F_N / F^*	结构特征量 α
0.5	4 979.0	2 559.6	0.513 9	0.486 1
0.8	7 966.4	4 154.5	0.521 5	0.478 5
1.5	14 937.1	7 747.9	0.518 7	0.481 3
2.5	24 895.5	12 930.7	0.519 4	0.480 6
3.5	34 853.2	18 026.1	0.517 2	0.482 8
4.5	44 811.3	23 145.0	0.516 5	0.483 5

表 3 冲击式炮口制退器结构特征量计算(定温)

入口总压 P^*/MPa	入口截面气流总反力 F^*/N	炮口制退器轴向受力 F_N/N	比值 F_N / F^*	结构特征量 α
0.5	4 979.0	4 120.6	0.827 6	0.172 4
0.8	7 966.4	6 482.5	0.813 7	0.186 3
1.5	14 937.1	12 341.0	0.826 2	0.173 8
2.5	24 895.5	20 459.7	0.823 0	0.177 0
3.5	34 853.2	28 729.5	0.824 3	0.175 7
4.5	44 811.3	36 866.3	0.822 7	0.177 3

表 4 反作用式炮口制退器结构特征量计算(定压)

入口总温 T^*/K	入口截面气流总反力 F^*/N	炮口制退器轴向受力 F_N/N	比值 F_N / F^*	结构特征量 α
300	24 895.5	8 015.0	0.321 9	0.678 1
450	24 895.5	8 086.4	0.324 8	0.675 2
1 000	24 895.5	8 051.2	0.323 4	0.676 4
3 000	24 895.5	8 031.3	0.322 6	0.677 4

3.2 非定常流条件下计算结果

在非定常流条件下，炮口制退器入口总压随着时间的变化如表 5 中入口总压 P^* ，笔者将入口总压分线性变化、抛物线变化、指数变化，线性变化取 2 种不同变化速率的情况。炮口制退器入口总温保持不变。

表 5 反作用式炮口制退器结构特征量计算(非定常)

入口总压 P^*/MPa	入口截面气流总反力积分 $I^*/(\text{N} \cdot \text{S})$	制退器轴向受力积分 $I_N/(\text{N} \cdot \text{S})$	比值 I_N / I^*	结构特征量 α
$5e5+3e5t$	6 662.38	2 141.685 0	0.321 5	0.678 5
$1.5e6+1e6t$	20 148.55	6 526.209 0	0.323 9	0.676 1
$5e5+3e5t^2$	6 557.13	2 118.664 0	0.323 1	0.676 9
$5e5\exp(t)$	12 394.47	4 004.135 6	0.323 1	0.676 9

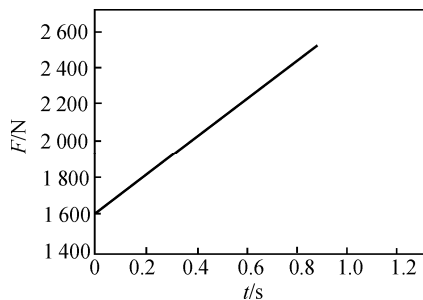


图5 线性规律变化 1

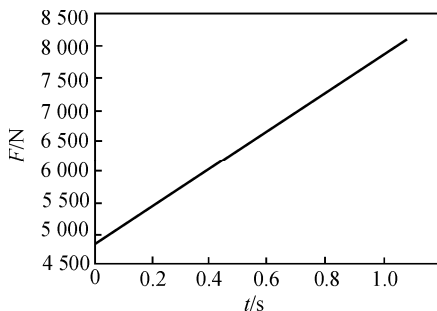


图6 线性规律变化 2

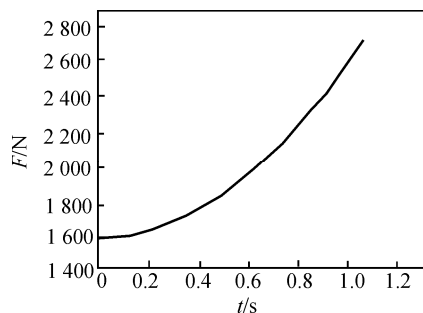


图7 抛物线规律变化

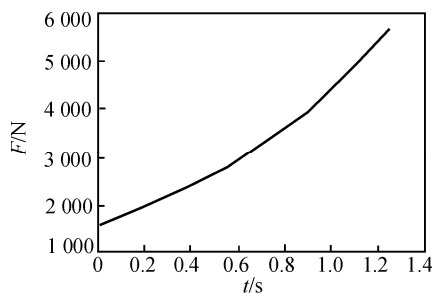


图8 指数规律变化

得到炮口制退器的受力曲线(如图 5~8)后, 根据式 (3)、(10)、(11)、(12) 可计算得 I^* 、 I_N 和 α , 计算结果如表 5。

4 结论

用计算流体力学的方法, 通过对 3 种炮口制退器结构特征量的计算, 对表 1~5 中计算所得结构特征量 α 分析可以发现, 炮口制退器的结构特征量 α 与炮口制退器的入口条件没有关系, 无论是入口总压变化、还是入口总温变化, 也无论是定常流还是非定常流, 炮口制退器结构特征量是一个常数。这与炮口制退器的试验结果一致^[10]。

参考文献:

- [1] 张月林. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 255-304.
- [2] 中国人民解放军 412 部队. 火炮设计手册下册[M]. 北京: 中国人民解放军后字 412 部队出版, 1975: 553.
- [3] 高树滋, 陈运生, 张月林, 等. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [4] 石春明, 闫留海, 刘万余. 在炮架上测试炮口制退器效率的方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2007(3): 47-49.
- [5] 张辉, 谭俊杰, 催东明, 等. 基于 CFD 的炮口制退器效率计算[J]. 弹道学报, 21(2): 74-77.
- [6] 江坤. 某火炮炮口制退器的研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(3): 55-57.
- [7] 李伟. 炮口制退器流场数值仿真研究[D]. 南京理工大学, 2008.
- [8] Roxan Cayzac, Eric Carette. Computational Fluid Dynamics and Experimental Validations of the Direct Coupling Between Interior, Intermediate and Exterior Ballistics Using the Euler Equations[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(6): 1-15.
- [9] 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 19-29.
- [10] 张福三, 尤广志, 姚志军, 等. 火炮发射火药气体动力学特性与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 25-40.