

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.032

筒壁沟槽式火炮制退机的流场数值仿真

徐明珂

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为了研究某火炮筒壁沟槽式制退机在火炮后坐运动过程中内部流体的流动状态,研究不同后坐速度下制退机的特性,应用 Fluent 软件建立了制退机的等效流场模型,由工作腔压力和流量,推导出液压阻力系数 K 并分析流速、沟槽面积和液压阻力系数 K 的关系。对比分析仿真和实验数据表明:无论活塞杆匀速还是变速运动,同截面上两不同流道的流速几乎相等,且同截面不同流道的流量比近似等于各流道的面积比。

关键词:火炮;制退机;流场;仿真

中图分类号:TJ302 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0153-04

Numerical Simulation of Internal Flow Field of Barrel Grooved Gun Brake

XU Mingke

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

Abstract: In order to study the flow state of the internal fluid of the grooved recoil brake on the barrel wall of an artillery during the recoil motion of the artillery and the characteristics of the recoil force at different recoil speeds, the equivalent flow field model of the recoil brake was established using Fluent software. From the pressure and flow rate of the working chamber, the hydraulic pressure resistance coefficient K was derived, and the relationship between the flow rate, groove area and hydraulic resistance coefficient K was analyzed. The comparative analysis of simulation and experimental data shows that no matter the piston rod moves at a constant speed or a variable speed, the flow velocity of two different channels on the same section is almost equal, and the flow ratio of different channels on the same section is approximately equal to the area ratio of each channel.

Keywords: artillery; brake retreat machine; flow field; simulation

0 引言

在现代战争中,功率增大、机动性提高是传统火炮的发展趋势^[1],而体积小、质量轻、射程远、打击类型多是五人战车发展的重要方向^[2]。随着战争多元化,装备火炮的威力不断提高,其火炮装药量及后坐力也随之增大。软后坐火炮可以大幅减小炮架受力,从而使火炮设计得更轻巧,提高火炮射击稳定性以及综合指标^[3]。

制退机是软后坐火炮的关键组成部分,理论上软后坐技术可将平均后坐阻力减至常规火炮的1/4,实际中可降至1/3到1/2^[4]。制退机是火炮反后坐装置的重要组成部分,是一种液压阻尼器。在火炮后坐的运动过程中,制退机通过内部液体受到挤压对火炮产生阻力,同时消耗后坐动能,将后坐运动限制在规定的长度内并控制后坐和复进运动的规律^[5],对提高火炮的射击稳定性有重要作用。制退机可分为节制杆式、活塞沟槽式、筒壁沟槽式^[6]。沟槽式的制退机力与沟槽的面积有

关,目前工程上一般用带损耗项的伯努利方程进行求解计算^[7]。

由于制退机内部结构的复杂性以及工作时间的短暂性,使得制退机的工作规律难以控制^[8]。制退机内部流场的规律是决定制退机工作性能的重中之重。因此制退液在工作时的运动状态一直以来都是制退机相关研究方面的重点^[9]。流体仿真作为设计验证手段能较好地与试验数据吻合^[10]。

1 某带流口的筒壁沟槽式制退机原理

1.1 制退机的结构

制退机的结构形式有很多种,通常按液孔的形成方式分为节制杆式、沟槽式、活门式、转阀式和多孔衬筒式。本文研究对象采用带流口的筒壁沟槽式制退机,如图1所示。该制退机的内筒壁上刻有6条沟槽,深度随后坐距离而变化,且在活塞后有一前挡环,环内部周向环列有4个面积相等的中心流口。

筒壁沟槽深度随后坐位移的增大从5.5 mm

作者简介:徐明珂(1999—),男,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为火炮制退机,18004448980@163.com。

线性减小到 0.5 mm。经计算,其对应单道沟槽液液通道面积计算公式为:

$$R = 6 + [(-5.5/900)v]t + 75 \quad (1)$$

$$S = 40(\sqrt{R^2 - 400} - \sqrt{75^2 - 20^2}) - 20\sqrt{R^2 - 400} + \frac{[2\arcsin\theta(20/R) \times 180/\pi] \pi R^2}{360} - 72.15786 \quad (2)$$

式中: v 为活塞后坐的速度; R 为沟槽内表面的半径; S 为单条沟槽的面积。沟槽面积是关于后坐位移一一对应关系的函数,当给定一定速度时,式(2)则变为沟槽面积与时间的对应函数。

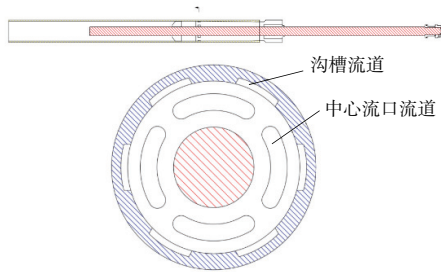


图1 某制退机结构简图

当活塞随制退杆向后后坐运动时,工作腔内的液体受到挤压,通过流口和沟槽两条流道向中间腔流动,同时中间腔内的液体也受到挤压向非工作腔流动,因此该制退机相较于以往制退机内部流体运动更加复杂。

1.2 制退机的工作原理及数学模型

制退机流场边界运动复杂,运动速度快且幅度大,局部流动通道狭窄且形状不规则,这给制退机的研究工作带来了巨大的挑战^[11]。筒壁沟槽式制退机在火炮后坐过程中需要起到阻尼作用时其内部有两条流液路径,分别是刻在制退筒内壁上的沟槽和与活塞杆相固连的前挡环上的流口,其内部流液原理简图如图2所示。

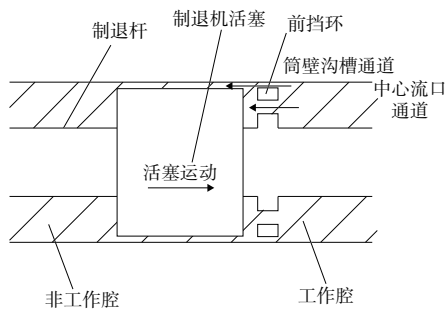


图2 某制退机工作原理简图

假设制退液为不可压流体,对于后坐过程,有

$$A v_p = S_g v_g + S_1 v_1 \quad (3)$$

式中: A 为活塞受压面积; v_p 为活塞绝对速度; S_g 为中心流口面积; v_g 为制退液流过流口的平均绝对速度; S_1 为沟槽总面积; v_1 为制退液流过沟槽的平均绝对速度。运用伯努利方程(流体的能量守恒定律)建立制退机工作腔的压力计算公式。由图2可见,筒壁沟槽通道分为两段,分别是由工作腔内的液体分流流过的沟槽通道和最终汇流到非工作腔的沟槽通道,沿后坐流液路径,根据伯努利公式有:

$$z_1 g + P_1 / \rho + v_0^2 / 2 = z_2 g + P_2 / \rho + v_1^2 / 2 + H_{r12} \quad (4)$$

$$z_3 g + P_1 / \rho + v_0^2 / 2 = z_4 g + P_2 / \rho + v_2^2 / 2 + H_{r34} \quad (5)$$

$$z_5 g + P_2 / \rho + v_1^2 / 2 + v_2^2 / 2 = z_6 g + P_3 / \rho + v_3^2 / 2 + H_{r56} \quad (6)$$

式中: ρ 为制退液密度;下标1代表工作腔;下标2代表前挡环与活塞中间的腔。式(4)和式(5)是液体流过工作腔的分流公式,式(6)是液体流入非工作腔的汇流公式。

由于工作腔和非工作腔重力势能项变化相对较小,近似相等。假设工作腔液体的流速 v_0 为0,非工作腔抽真空,其压强 P_3 为0,并假设损耗与动能成正比,即

$$H_{r12} = \xi_1 v_1^2 / 2, H_{r34} = \xi_2 v_2^2 / 2, H_{r56} = \xi_3 v_3^2 / 2$$

经化简得到:

$$P_1 / \rho = P_2 / \rho + K_1 v_1^2 / 2 \quad (7)$$

$$P_1 / \rho = P_2 / \rho + K_2 v_2^2 / 2 \quad (8)$$

$$P_2 / \rho + v_1^2 / 2 + v_2^2 / 2 = P_3 / \rho + K_3 v_3^2 / 2 \quad (9)$$

式中 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为从工作腔分流到沟槽、分流到流口和汇流到非工作腔流道的液压阻力系数。有研究者处理燃油时将供给管路中的 K 视为面积的函数^[12],实际上其与流动速度和流道的结构特征有关,且其值可在一定范围内发生变化。

故工作腔压力:

$$P_1 = \rho (K_1 v_1^2 / 2 + K_3 v_3^2 / 2 - v_1^2 / 2 - v_2^2 / 2) \quad (10)$$

或

$$P_1 = \rho (K_2 v_2^2 / 2 + K_3 v_3^2 / 2 - v_1^2 / 2 - v_2^2 / 2) \quad (11)$$

取式(10)计算制退机力:

$$F = A_1 \rho (K_1 v_1^2 / 2 + K_3 v_3^2 / 2 - v_1^2 / 2 - v_2^2 / 2) \quad (12)$$

以上所有公式中, v_1 、 v_2 和 v_3 由体积流量 q_1 、 q_2 和 q_3 与对应截面的流液通道面积的比值计算, P_1 、 P_2 和 P_3 由Fluent监测得到。因此,知道了制退液的流速即可计算制退机力。有研究人员将带旁路的阀控制退机的主流支流流速比值设为液压阻力系数的1/2次方的反比,但是针对于气体的流量分配研究表明,流量分配与过液面几何因素和流速有关^[13]。

2 制退机内部流体仿真

2.1 有限元建模及仿真设置

火炮后坐时,制退杆带动活塞沿摇架导轨向后运动,液体受到挤压后从工作腔流入非工作腔,在挤压过程中非工作腔的空间不断增大,而工作腔不断被压缩减小^[14]。利用有限元软件 ANSYS ICEM 分别绘制制退机内腔和六道沟槽网格模型,最终合并成制退机流体腔网格模型。网格类型采用六面体网格,大多数网格尺寸约为 3 mm。由于整体尺寸较大和网格局部加密,制退机流体腔网格模型共包含 600 多万个网格单元和 600 多万个网格节点。

将建立的网格模型文件输出格式设为 msh 文件类型,在 Fluent 中将网格模型导入,制退液密度取 $1\ 100\text{ kg/m}^3$,制退液黏性系数取 $0.003\ 3\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。采用瞬态仿真的方法,令制退机以不同速度[2, 4, 6, 8] m/s 匀速后坐,将非工作腔端面设为压强出口,出口高斯压强设为 0。监测前挡环工作面压强 P_1 和活塞工作面压强 P_2 ,动网格设置如图 3 所示。求解器类型为压力基,湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型,离散算法为 SIMPLE,残差最大值取 0.001,制退液为不可压液体,提交计算。

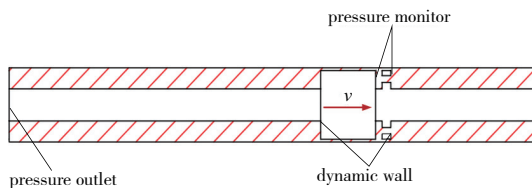


图 3 制退机几何模型的边界条件设置

2.2 仿真结果分析

在传统的计算方法中, K 值的选取是根据经验,参考同类型制退机,在一定范围内选取,这导致计算结果和实际测量结果存在较大的误差。采用数值方法对制退机内流场进行模拟计算,避免了选取制退机液压阻力系数 K ,使液压阻力更接近真实值^[15]。影响筒壁沟槽式制退机主流流场变化的主要参数为制退机的结构特征、尺寸和后坐运动速度,其中结构特征和尺寸是固定的,但是在后坐运动过程中,后坐速度是不断变化的^[16]。活塞工作面压强与沟槽总面积的对应关系如图 4 所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。将仿真得到的相关数据代入式(7)、式(8)和式(9)中计算得到 K_1 、 K_2 和 K_3 与沟槽面积的对

如图 5 所示。

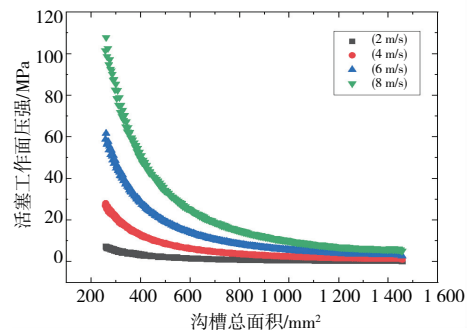


图 4 不同后坐速度下活塞工作面压强随沟槽面积的变化

$$K_1 = 4.259\ 49 - 0.005\ 58x + 4.176\ 61 \times 10^{-6}x^2 - 9.771\ 18 \times 10^{-10}x^3 \quad (13)$$

$$K_2 = 3.438\ 13 - 0.003\ 62x + 3.132\ 88 \times 10^{-6}x^2 - 9.989\ 17 \times 10^{-10}x^3 \quad (14)$$

$$K_3 = 5.848\ 10 - 0.010\ 29x + 1.049\ 79 \times 10^{-5}x^2 - 9.771\ 18 \times 10^{-9}x^3 \quad (15)$$

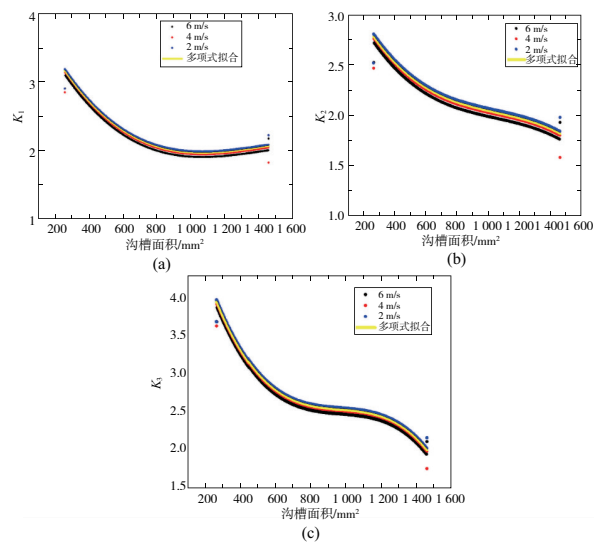


图 5 K_1 、 K_2 和 K_3 与沟槽面积的对应关系

不同后坐速度下,中心流口通道与沟槽通道流量比值与流液通道面积的比值关系如图 6 所示,两比值接近于 1:1,近似为一条线性直线。使用 Matlab 对火炮后坐部分击发全过程的运动进行仿真,仿真得到活塞杆的后坐速度,将后坐速度用 profile 文件的形式导入 Fluent 里驱动活塞运动进行流体仿真,后坐速度如图 7 所示。将仿真得到的数据经过计算,代入到式(12)计算,用 Matlab 仿真计算得到制退机力并与仿真监测的活塞工作面静压面积进行对比,结果如图 8 所示。

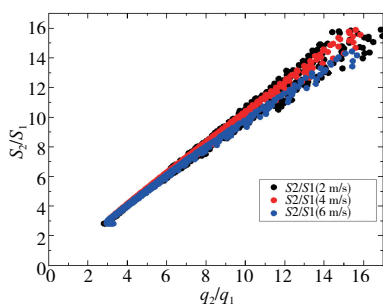


图6 通道面积比与流量比的关系

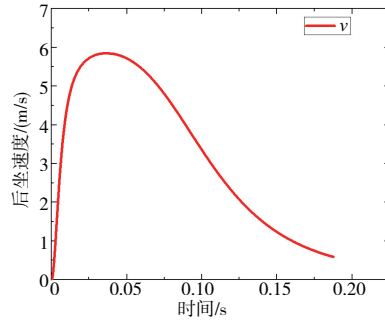


图7 Matlab仿真的后坐速度

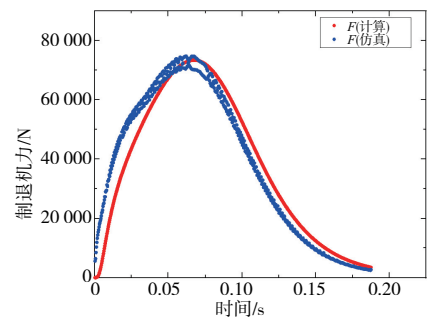


图8 本文模型与Fluent仿真的制退机力结果对比

根据以上仿真结果对比发现,制退液从工作腔分流流入沟槽流道的流量 q_1 和中心流道的流量 q_2 的流量比约等于沟槽流道的流液通道面积与中心流道的流液通道面积的比值,且流入两流道时的流速近似相等。这说明仿真过程监测的制退机力与本文模型计算得到的力不论在数值还是变化趋势上都比较接近。

3 结语

本文利用 ANSYS ICEM 对某制退机内部的流体模型进行网格划分,利用 Fluent 进行流体仿真计算,推导出了该模型的液压阻力系数 K 并将模型计算得到的制退机力与仿真监测的进行对比分析。对于筒壁沟槽式制退机,可通过匀速仿真的方法得到液压阻力系数与面积的关系且适用于变速仿真。对制退机内流场的变化机理作进一步的仿真研究,同时得到了制退机液压阻力曲线,避免了人工凭经验选取液压阻力系数 K ,提高了计算精度。通过对比仿真和计算结果,液压阻力近似相等,对今后制退机的设计及优化起到一定的参考和借鉴作用。

参考文献:

- [1] QIU M, SI P, SONG J, et al. Recoil reduction method of Gun with side to rear jet controlled by piston motion[J]. Symmetry, 2021, 13(3): 396.
- [2] LIU J B, HUANG H S, ZHU W F, et al. Research on high efficiency muzzle brake technology of small caliber automatic Gun [J]. Journal of Physics - Conference Series, 2020, 1507(3): 032003.
- [3] 秦凯. 某软后坐火炮动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [4] 谈乐斌, 侯保林, 陈卫民. 降低火炮后坐力技术概述[J]. 火炮发射与控制学报, 2006, 27(4): 69-72.

- [5] 张相炎. 武器发射系统设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [6] 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.
- [7] 郝保臣, 孙卫国, 潘孝斌. 某火炮液压缓冲器缓冲特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(9): 54-58.
- [8] SEFIANE K, BENIELLI D, STEINCHEN A. A new mechanism for pool boiling crisis, recoil instability and contact angle influence [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1998, 142(2/3): 361-373.
- [9] 林志宸. 新型阀控式制退机性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [10] 张晓东, 张培林, 傅建平, 等. 基于动网格的火炮制退机内部流场数值模拟[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 533-536, 546.
- [11] 孙也尊, 秦俊奇, 狄长春, 等. 基于计算流体力学的火炮制退机故障仿真研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 31-34, 96.
- [12] CHO J H. Engineering design and analysis of flow distribution in multiple flow circuits with partial contractions [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(9): 3979-3987.
- [13] 杨春信, 席兵. 稳定流动的流量分配计算方法[J]. 流体机械, 2000, 28(2): 38-39.
- [14] 肖本勇. 一种变阻力火炮制退技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [15] 范永, 刘树华, 曹广群. 基于动网格的某驻退机三维流场数值模拟与分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 31(4): 63-65.
- [16] 潘孝斌, 宋彦明, 谈乐斌. 筒壁沟槽式制退机主流液压力系数分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 146-150.

收稿日期: 2022-09-06