

文章编号: 1001-1455(2006)03-0245-05

磁流体特性对磁流变火炮后坐阻尼器性能的影响*

侯保林

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对火炮后坐磁流变阻尼器的特点, 以某单管 25 mm 火炮实验用磁流变阻尼器为研究对象, 基于 Herschel-Bulkley 本构模型, 建立了该炮磁流变后坐阻尼器的轴对称一维层流模型, 获得了不同磁场作用下阻尼力随活塞速度的变化规律。运用火炮的后坐运动方程, 计算了不同磁流体特性指数下, 火炮的后坐位移和后坐速度。计算结果表明, 磁流体特性指数的变化对磁流变后坐阻尼器的性能影响显著。

关键词: 流体力学; 磁流变阻尼器; Herschel-Bulkley 模型; 火炮后坐

中图分类号: O361.3 **国标学科代码:** 130·2547 **文献标志码:** A

1 引言

磁流体(magneto-rheological fluid, MR 流体)是铁磁粒子均匀悬浮在载体中的一种智能材料^[1], 这种材料能够随不同的磁场作用而改变其流变特性, 因此, 可以实现阻尼力的半主动实时连续控制。磁流变阻尼器在各技术领域有着广泛深入的研究, 包括车辆技术、各种往复式机械设备以及桥梁、高层建筑等领域。将磁流体应用在冲击或碰撞场合, 研制磁流变冲击阻尼器, 如军用越野车辆的悬架、飞机着陆装置以及火炮后坐阻尼器^[2], 是磁流体应用的一个重要方向。本文中主要关注磁流变阻尼器在火炮反后坐装置中的应用。

与普通磁流变(MR)阻尼器相比, 武器后坐 MR 阻尼器要经历更大的速度。大多数研究 MR 阻尼器的文献, 都采用 Bingham 剪切模型, 因为该模型比较简单, 容易处理。但是 Bingham 模型不能准确描述在高速和高磁场输入情况下的阻尼器行为。在高剪切率或高磁场强度的情况下, 磁流体会在后屈服区发生剪切变稀或剪切变稠现象。而 Herschel-Bulkley 剪切模型可以看作是 Bingham 模型的一种修正^[3], 它用剪切应变率指数模型来代替 Bingham 模型的后屈服粘性特性(常量)。磁流体特性指数 n 是 Herschel-Bulkley 模型的重要参数, 它反映了 MR 流体在后屈服区剪切变稀或剪切变稠的程度。

本文中采用 Herschel-Bulkley 本构模型, 建立 25 mm 火炮 MR 后坐阻尼器的轴对称一维层流模型, 以探讨不同磁场作用下阻尼力随活塞速度的变化规律。

2 基于 Herschel-Bulkley 模型的 MR 阻尼器流动模型

图 1 是实验用 MR 火炮后坐阻尼器结构原理图。它具有前后两个活塞杆, 无气囊。线圈缠绕在活塞上, 活塞与油缸均用低碳钢制成, 二者形成一个磁通回路, 使活塞与油缸形成的环状流口具有一定的磁通密度, 从而使 MR 流体达到一定的屈服应力。

对于活塞和油缸所形成的环状流口(见图 2), 根据 Navier-Stokes 方程, 流体的运动方程可表示为^[3]

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{\partial u(r)}{\partial t} + \frac{\partial \tau(r)}{\partial r} + \frac{\tau(r)}{r} \quad (1)$$

式中: z 是轴向坐标, r 是径向坐标, ρ 是流体的密度, $u(r)$ 表示流速, τ 是剪切应力, $\partial p/\partial z$ 是压力梯度。

* 收稿日期: 2005-03-18; 修回日期: 2005-05-27

作者简介: 侯保林(1965—), 男, 博士, 副教授。

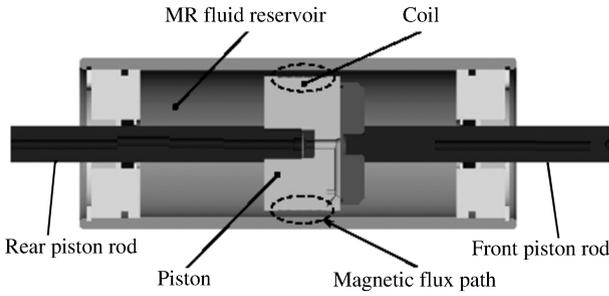


图1 MR 火炮后坐阻尼器

Fig. 1 A gun recoil MR damper

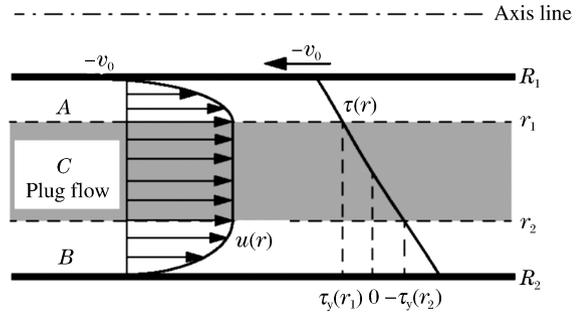


图2 通过环状流孔的 MR 流体速度分布图

Fig. 2 Velocity profile of MR fluid passing the annular duct

若忽略流体的惯性,仅研究流体的准静态一维流动,方程(1)可以简化为

$$\frac{d\tau(r)}{dr} + \frac{\tau(r)}{r} = \frac{dp}{dz} \quad (2)$$

对式(2)进行积分,得

$$\tau(r) = \frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} \quad (3)$$

式中: D 是由边界条件确定的常数。

MR 流体是一种粘塑性流体,图2给出了流过环状流孔的 MR 流体的速度分布图。在区间 A 和 B, 剪切应力超过了流体屈服应力,因而存在剪切流动。而在区域 C, 因为剪切应力小于屈服应力,因此没有形成剪切流,这个区通常被称为塞流区。

剪切应力 τ 与剪切应变率 du/dr 的关系是 MR 流体的“本构关系”。由于所研究的阻尼器是一种冲击 MR 阻尼器,所以采用 Herschel-Bulkley 粘塑性模型。

在区域 A, 剪切应变率 $\dot{\gamma} = du/dr \geq 0$, 剪切应力可表示为

$$\tau(r) = \tau_y(r) + K \left(\frac{du(r)}{dr} \right)^n \quad (4)$$

式中: τ_y 是 MR 流体的屈服应力, K 是流体的粘度系数, n 是流体的特性指数。 τ_y 的大小取决于磁场强度: $\tau_y = \alpha H^\beta$, α 和 β 是 MR 流体的特征量; 而磁场强度 $H = NI / (2(R_2 - R_1))$, N 是线圈匝数, I 是应用电流。在本文中,取^[3] $K = 0.33 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$, $\alpha = 60.0$, $\beta = 1.3$ 。

将式(4)带入式(3),应用边界条件: 当 $r = R_1$ 时, $u(R_1) = -v_0$, 对 r 积分得

$$u(r) = \int_{R_1}^r \left[\frac{1}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} - \tau_y(r) \right) \right]^{1/n} dr - v_0 \quad R_1 \leq r \leq r_1 \quad (5)$$

类似地,通过应用区域 B 的边界条件: 当 $r = R_2$ 时, $u(R_2) = 0$, 得

$$u(r) = \int_r^{R_2} \left[-\frac{1}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} + \tau_y(r) \right) \right]^{1/n} dr \quad r_2 \leq r \leq R_2 \quad (6)$$

在塞流区 C, 流速为常数, 在塞流区边界上流速满足: $u(r_1) = u(r_2)$ 。合并方程(5)、(6)得

$$\int_{R_1}^{r_1} \left[\frac{1}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} - \tau_y(r) \right) \right]^{1/n} dr - \int_{r_2}^{R_2} \left[-\frac{1}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} + \tau_y(r) \right) \right]^{1/n} dr = v_0 \quad (7)$$

为了求常数 D , 利用条件: $\tau(r_1) = \tau_y(r_1)$, $\tau(r_2) = -\tau_y(r_2)$, 从方程(3)得

$$D = r_1 r_2 [\tau_y(r_2) r_1 + \tau_y(r_1) r_2] / (r_2^2 - r_1^2) \quad (8)$$

假设 MR 流体是不可压缩的, 则体积流量

$$Q = v_0 (A_p - A_r) = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r u(r) dr = \pi (R_1^2 - r_1^2) v_0 - \pi \int_{R_1}^{r_1} r^2 du(r) - \pi \int_{r_2}^{R_2} r^2 du(r) \quad (9)$$

式中: A_p 、 A_r 是活塞头和活塞杆的横截面积, v_0 是活塞速度。将方程(5)、(6)带入方程(9), 得

$$Q = v_0 (A_p - A_r) = \pi (R_1^2 - r_1^2) v_0 - \pi \int_{R_1}^{r_1} r^2 \left[\frac{1}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} - \tau_y(r) \right) \right]^{1/n} dr - \pi \int_{r_2}^{R_2} r^2 \left[-\frac{1}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dp(z)}{dz} r + \frac{D}{r} + \tau_y(r) \right) \right]^{1/n} dr \quad (10)$$

在环状流口的 $r_1 < r < r_2$ 范围内, 取一个微元体(见图3), 根据在 z 轴方向上的力平衡, 可得

$$\frac{dp}{dz} (r_2^2 - r_1^2) + 2[\tau_y(r_2)r_2 + \tau_y(r_1)r_1] = 0 \quad (11)$$

归纳前面的推导, 若假设在流口内的磁场激活区内各点的屈服应力相同, 则有 $\tau_y(r_1) = \tau_y(r_2) = \tau_y$ 。再假设 dp/dx 沿激活区长度 L_a 呈线性分布, 得

$$\int_{R_1}^{r_1} \left[\frac{1}{K} \left(\frac{\Delta p_a}{2L_a} r + \frac{D}{r} - \tau_y \right) \right]^{1/n} dr - \int_{r_2}^{R_2} \left[-\frac{1}{K} \left(\frac{\Delta p_a}{2L_a} r + \frac{D}{r} - \tau_y \right) \right]^{1/n} dr = v_0 \quad (12)$$

$$Q = \pi (R_1^2 - r_1^2) v_0 - \pi \int_{R_1}^{r_1} r^2 \left[\frac{1}{K} \left(\frac{\Delta p_a}{2L_a} r + \frac{D}{r} - \tau_y \right) \right]^{1/n} dr - \pi \int_{r_2}^{R_2} r^2 \left[-\frac{1}{K} \left(\frac{\Delta p_a}{2L_a} r + \frac{D}{r} + \tau_y \right) \right]^{1/n} dr \quad (13)$$

$$r_2 - r_1 = -2L_a \tau_y / \Delta p_a \quad (14)$$

式中: Δp_a 是由流口内的激活区引起的压力降。求解式(12)、(13)和(14)组成的方程组, 可获得塞流厚度 $(r_2 - r_1)$ 、以及由激活区产生的阻尼力 $F_{d,a} = (A_p - A_r) \Delta p_a$ 。而速度分布由方程(5)和(6)确定。

用 L 表示活塞的总长度, 则流口内磁通密度为零的区域所产生的阻尼力可以表示为^[4]

$$F_{d,u} = (A_p - A_r)^2 \frac{12K(L - L_a)}{2\pi R_1 (R_2 - R_1)^3} \quad (15)$$

若不考虑摩擦力的影响, 总的阻尼力为: $F_d = F_{d,a} + F_{d,u}$ 。

所研究的 MR 阻尼器的主要结构和电磁参数为: 活塞外径 43.64 mm, 活塞长度 60 mm, 活塞杆直径 14.0 mm, 间隙 1.2 mm, 线圈匝数 280。求解上述方程, 得到 MR 阻尼器的阻尼力随活塞速度的变化规律, 如图4所示。

3 MR 流体特性指数对后坐阻尼器行为的影响

图5为 MR 后坐阻尼器的工作原理图, 即用 MR 阻尼器来承受火炮的后坐阻力。容易建立如下运动方程^[5]

$$m_h \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{pt} - 2F_d = F_t - F_{zm} - F_{dz} - 2F_d \quad (16)$$

式中: m_h 为后坐部分的质量, x 为后坐行程, F_{pt} 为炮膛合力, 所研究的火炮有两个后坐阻尼器。炮膛合力由下列力分量构成: 火药气体作用在膛底的力 F_t , 火药气体作用在药室锥面上的轴向分力 F_{zm} , 弹丸对膛线作用的轴向分力 F_{dz} 。

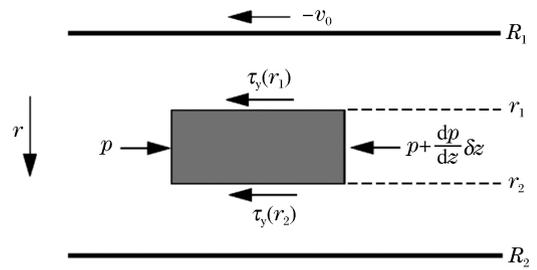


图3 环状流口内流体微元体受力图
Fig. 3 Forces acting on a unit body in the annular duct

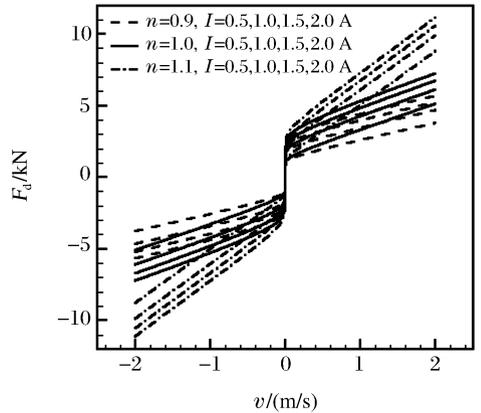


图4 不同 MR 流体特性指数下的阻尼力与速度的关系

Fig. 4 Damping force and velocity of the MR damper for the different MR fluid index

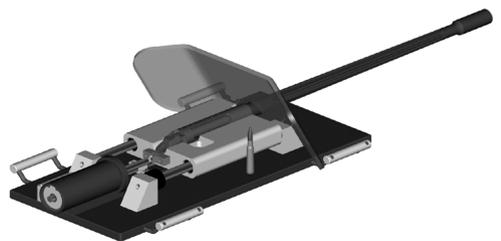


图5 火炮后坐 MR 阻尼器的工作原理^[2]

Fig. 5 Action principle of the gun recoil MR damper

所研究的火炮为某实验用单管 25 mm 火炮,其后坐质量为 130 kg。计算时取指数 n 的变化范围为 0.9~1.1。真实的特性指数 n 主要取决于不同 MR 流体的种类和工况,本文中指数 n 的讨论范围主要参考文献[3]。图 6~8 分别给出了当应用电流为 1 A 时,计算获得的不同 MR 流体特性指数下阻尼器的阻尼力、火炮的后坐位移以及后坐速度。

从这些计算结果可以看出,MR 流体的特性指数 n 对磁流变后坐阻尼器的性能影响显著,指数 n 较小的变化会引起火炮后坐速度和后坐长度较大的变化。在同样的电流作用下, n 越大,阻尼器产生的阻尼力也越大,火炮的后坐位移和后坐速度也越小。因此,在设计火炮的后坐阻尼器时,除了要关心 MR 流体的屈服应力外,还必须慎重考虑 MR 流体在后屈服区的剪切应力特性,应该在设计前对磁流体进行必要的实验,确定出所用 MR 流体的特性指数的具体数值。另外,我们也注意到,在后坐起始阶段,因为 MR 阻尼器能够产生的阻尼力远小于膛膛合力,所以不同特性指数 n 下的后坐起始阶段的火炮后坐位移和后坐速度的区别不大,这个阶段实现阻尼力的控制是不可能的。

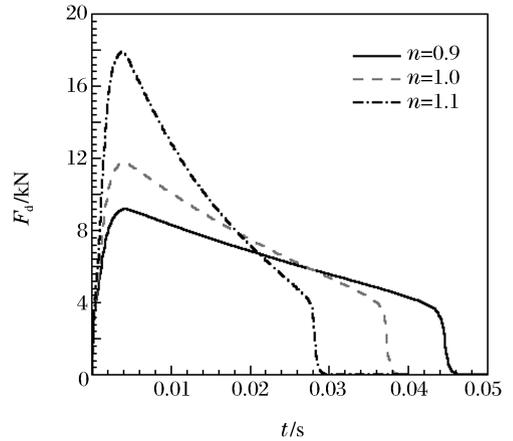


图 6 不同特性指数下两个 MR 后坐阻尼器产生的阻尼力之和与时间的关系

Fig. 6 Sum of damping forces of two MR dampers for the different MR fluid index

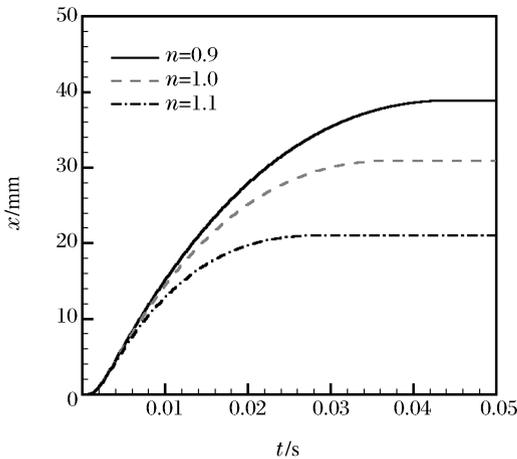


图 7 不同特性指数下火炮的后坐位移

Fig. 7 Displacements of the gun recoil for different MR fluid indexes

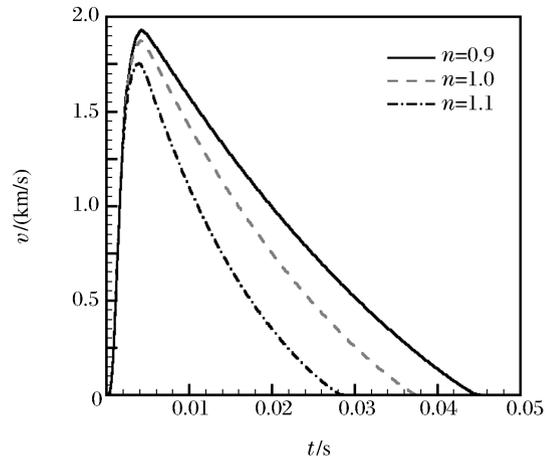


图 8 不同特性指数下火炮的后坐速度

Fig. 8 Velocities of the gun recoil for different MR fluid indexes

4 结 论

利用 Herschel-Bulkley 本构模型,通过对某实验用单管 25 mm 火炮进行数值仿真,评价了 MR 流体特性指数对火炮 MR 后坐阻尼器性能的影响。

反映 MR 流体在后屈服区剪切特性的指数 n 对 MR 后坐阻尼器的行为影响显著,指数 n 的较小变化会引起火炮后坐速度和后坐长度的较大变化, n 越大,阻尼器所产生的阻尼力也越大,火炮的后坐位移和后坐速度也越小。因此,我们在设计火炮的后坐阻尼器时,除了要关心 MR 流体的屈服应力外,还必须慎重考虑 MR 流体在后屈服区的剪切应力特性。在设计火炮磁流变后坐阻尼器之前,利用实验方法获得所用磁流体的特性指数是必要的。

参考文献:

- [1] Carlson J David. What makes a good MR fluid? [J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2002, 13(7-8):431-435.
- [2] Ahmadian M, Poynor C. An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun recoil dynamics[J]. *Shock and Vibration*, 2001(8):147-155.
- [3] Lee D Y, Choi Y T, Wereley Norman M. Performance analysis of ER/MR impact damper systems using Herschel-Bulkley model[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2002,13(7-8):525-531.
- [4] Choi S B Han. MR seat suspension for vibration control of a commercial vehicle [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2003,31(2):202-215.
- [5] 高树滋,陈运生,郑建国.火炮反后坐装置设计[M].北京:兵器工业出版社,1995:30-35.

Influence of fluid behavior index on performance of a gun recoil magneto-rheological damper

HOU Bao-lin *

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

Abstract: A magneto-rheological (MR) recoil damper for a 25 mm air defence gun test application is studied. Based on Herschel-Bulkley shear model, a one-dimensional axisymmetric laminar flow model of the MR recoil damper is proposed, and the relation curves of damping force and piston velocity of the MR damper are obtained according to the proposed model. Using the force-velocity characteristics of the MR damper, the recoil dynamic equation of the 25 mm gun is solved, and the recoil velocity and recoil displacement of the gun are obtained. The simulation results indicate that the value of the MR fluid behavior index has a very big influence on performance of the gun magneto-rheological (MR) recoil damper.

Key words: fluid mechanics; magneto-rheological damper; Herschel-Bulkley model; gun recoil

* Corresponding author: HOU Bao-lin
E-mail address: houbl@mail.njust.edu.cn
Telephone: 025-51694782