

磁流变液效应对远端流场的扰动^{*}

周刚毅^{**}, 张培强

(中国科技大学力学与机械工程系, 合肥 230027)

摘要: 研究了磁流变液效应对远离磁极的流道中流动的扰动问题。通过双腔型结构器件的动态力学响应以及混合流模式的流动分析, 揭示了当磁流变液离开磁极后, 由于剩磁的影响, 磁极后方的管道中的流动将受影响, 主要表现在流过管道的介质的体积比浓度将发生显著变化。

关键词: 磁流变液; 管道流; 扰动

中图分类号: TB329 文献标识码: A

1 引言

电、磁流变液在管道中的流动是十分复杂的, 有很多研究工作涉及该领域。研究手段在实验上有核磁共振成像技术以及显微观测技术, 理论上主要是借助 Bingham 模型的流场分析。研究结论表明, 在流道中随着压力梯度的增加, 磁流变液表现为复杂的两相流, 在流道内有局部堵塞现象, 颗粒的体积比浓度也表现为非均匀性^[1, 2]。然而在工程实践中, 对磁流变液的管道流的研究是十分有意义的, 它直接对工程设计磁流变液应用器件提供设计依据。

当流道设置在磁极远端时, 流道中的磁流变液是否可以视为连续均匀介质? 磁极附近的磁流变液效应是否会干扰流道中的流动, 将是本文关注的重点。

2 实验设置

实验装置图如图 1 所示, 其工作原理描述如下: 孔洞 6 选择合适的尺寸, 可以保证在整个工作循环(运动杆件的往复运动)过程中, 内腔充满磁流变液; 当杆件 12 固定, 外桶沿着“shaft-out”方向运动时, 磁流变液从左侧冲击盖板, 因此强迫磁流变液经过流道 14 流入流道 16 最后流向区域 C; 当杆件 12 固定, 外桶沿着“shaft-in”方向运动时, 磁流变液从右侧冲击盖板, 盖板压迫弹簧, 因此磁流变液经过流道 16 直接流入区域 B。由于流道 16 的截面尺寸较 14 大许多, 因此在两个运动方向上, 活塞 5 提供的阻尼力不同。

需要指出的是, 磁极 4 与活塞之间必须留有较长的距离, 这样才能够保证当无磁场时流经流道 14 的流动可以视为均匀来流, 亦即磁极周围的流动与流道 14 的流动彼此不干扰。在我们的实验中这段距离设置为运动杆直径的 5 倍。该装置被安装在 MTS 上, 测试的时候, 运动杆件 12 保持固定, 外桶做周期运动, 测量的物理量为杆件上的阻尼力以及外桶的位移。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(19834020) 安徽省“十五”科技攻关项目。

^{**} 通讯联系人, Email: gyzhou@mail.edu.edu.cn

收稿日期: 2001-08-14; 修回日期: 2001-08-25。

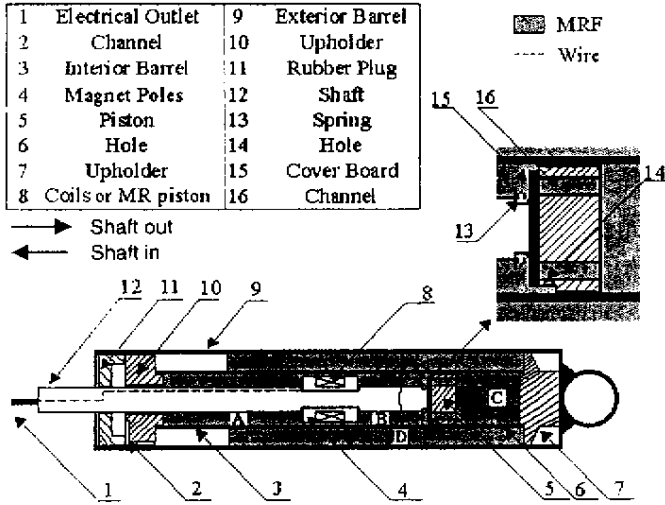


图 1 装置图

Fig. 1 Illustration of the equipment

3 理论分析

作用在运动杆件 12 上的阻尼力符合式 (1):

$$F(H, v) = F_m(H, v) + F_f + F_p \quad (1)$$

式中, $F_m(H, v)$ 为作用在磁极上的阻尼力; F_f 为系统内的摩擦力(比如橡皮塞); F_p 为活塞上流体流经流道引起的阻尼力; v 是外桶运动速度。

首先分析 $F_m(H, v)$, 由于磁流变液流经磁极的流动属于混合模式, 见图 2, 所以对于处于“shaft-out”状态下, 描述方程为:

$$\begin{cases} v = \frac{Q_{f,1} + Q_2 + Q_3}{S_p^m + \pi(R_{pi}^2 - R_1^2)} \\ R_{po} - R_{pi} = \frac{2L\tau_d(H)}{\text{sgn}(v)\Delta P^m} \\ u_1(R_{pi}) = u_2(R_{po}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{\pi\Delta P^m}{8\eta_0 L} \left[(3R_{pi}^2 - R_1^2)(R_{pi}^2 - R_1^2) - 4R_{pi}^4 \ln \frac{R_{pi}}{R_1} \right] \\ \quad - \frac{\pi\tau_d(H)}{6\eta_0} \left[(R_{pi} - R_1)(7R_{pi}^2 + R_{pi}R_1 - 2R_1^2) - 6R_{pi}^3 \ln \frac{R_{pi}}{R_1} \right] - v\pi(R_{pi}^2 - R_1^2) \\ Q_2 = u_1(R_{pi})\pi(R_{po}^2 - R_{pi}^2) \\ Q_3 = \frac{\pi\Delta P^m}{8\eta_0 L} \left[(-3R_{po}^2 + R_2^2)(R_{po}^2 - R_2^2) + 4R_{po}^4 \ln \frac{R_{po}}{R_2} \right] \\ \quad + \frac{\pi\tau_d(H)}{6\eta_0} \left[-(R_{po} - R_2)(7R_{po}^2 + R_{po}R_2 - 2R_2^2) + 6R_{po}^3 \ln \frac{R_{po}}{R_2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

其中, R_1 和 R_2 分别为内桶外半径和外桶内半径; u_1 和 u_2 为 1、2 区的速度分布函数; Q_i 为各区的流量; L 为磁极长度; $\tau_d(H)$ 为磁流变液动态剪切屈服应力; S_p^m 为磁极的横截面积;

2001年10月

CHINESE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS

Oct. 2001

ΔP^m 为磁极上的压力差; $Q_{f,1} = Q_1 + v\pi(R_{pi}^2 - R_1^2)$ 。由于结构几何尺寸:内桶内径 20 mm;磁极外直径 18 mm,磁极长度为 10 mm 并且考虑到实验过程中 $v < 0.4$ m/s,所以可以认为在实验过程中 R_{pi} 、 R_{po} 的变化是很小的,以至于可以忽略,因此, ΔP^m 可以表示成磁场强度的函数:

$$\Delta P^m = \varphi(H) \quad (4)$$

由于对称关系,当处于“shaft-in”状态时, $\Delta P^m = -\varphi(H)$ 。因此

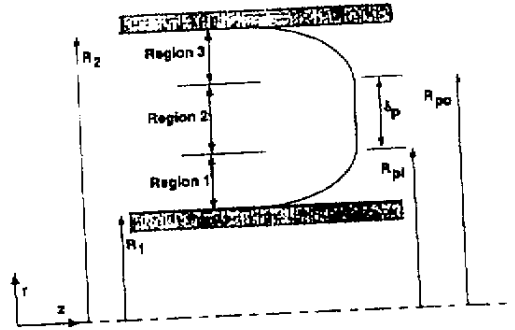


图2 混合流模式流场分析简图

Fig.2 Illustration of the mixed mode

$v) = \Delta P^m S_p^m + 4\pi r h \left[\tau_d(H) \operatorname{sgn} \frac{\partial u_z(r)}{\partial r} \Big|_{R=R_1} - \tau_d(H) \operatorname{sgn} \frac{\partial u_z(r)}{\partial r} \Big|_{R=R_2} \right]$

考虑到具体的设备尺寸和实验条件, $F_m(H, v)$ 可以表示成磁场强度的函数:

$$F_m(H, v) = \operatorname{sgn}(v) \Phi(H)$$

因此,由 Einstein 方程以及管道流方程(用以描述活塞处的粘性阻尼力),可以得到:

$$F(H, v) = \begin{cases} \Phi(H) + F_f + \xi_1 v & \text{shaft-in} \\ -\Phi(H) + F_f + \xi_2 v & \text{shaft-out} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{8\gamma(1+2.5c)S_p^2}{\pi a_c^4} L_c \\ \xi_2 = \frac{8\gamma(1+2.5c)S_b^2}{\pi a_E^4} L_E \end{cases}$$

此处 c 为流道 14 或者 16 中流体的体积比浓度。

4 讨论

基于式(5),当处于“shaft-out”状态,如果磁流变液从磁极处逃逸出后,其中磁颗粒不干扰磁极后方流道 14 中的流动,那么流道中流体的体积比浓度与磁流变液的样品一致: $c = 0.3$ 。

首先在无场、正弦位移激励下,测试了杆上的响应阻尼力曲线,如图 3a 所示。依据式(5)拟合实验曲线得到参数 $\xi_1 = 0.1$ 、 $\xi_2 = 0.42$ 。实验、理论曲线对比说明,在无场情形下,磁极处的流场与流道 14、16 中的流场是解耦的。然后在正弦激励下,使得线圈的输入电流 $I = 0.15$ A,测得响应阻尼力曲线如图 3b 所示,其中理论曲线是依据上述的 ϵ_i 参数计算得到的,从响应曲线的非对称性可以看出,磁极将干扰流道 14 中的流动(曲线正半部分对应“Shaft-out”)。进一步在突加斜坡位移激励下,研究“Shaft-out”状态时,磁颗粒对流道流动的影响。

图 4a 为无场情形下的位移、阻尼力曲线,理论预测模型为式(5),参数为 $F_f = 18$ N, $\xi_2 = 0.37$ 。图 4b 是在 $I = 0.15$ A 下的激励响应曲线,细实线为依据上述参数计算的理论曲线(即假定流道 14 中的体积比浓度跟样品的保持一致),虚线为 $\xi_2 = 0.23$ 下的预测曲线,由于粘性的下降,间接反映了流道 14 中颗粒体积比浓度的下降。关于详细的论述将另文报道。

由于在分析中采用的是准静态、充分发展的管道流模型,因此该模型无法适用于估算暂态响应。

5 总 结

本文介绍了磁流变液效应对远端流场的干扰问题。由于颗粒的剩磁作用,将干扰远端流道中介质的体积比浓度,这种干扰取决于流道与磁极的相对位置以及磁极的运动速度,因此在设计磁流变液应用器件时,此现象必须予以考虑。

参 考 文 献

- [1] Norman M Wereley , Li Pang. *Smart Mater. Struct.* , 1998 , 7 : 732
 [2] Zhou Gangyi(周刚毅) , Jin Yur(金昀) , Zhang Peiqiang(张培强) . *J. University of Science and Technology of China* ,(中国科技大学报) , 2000 , 30 : 46

The Disturbance in the Far – end Flow Induced by Magnetorheological Fluid Effect^{*}

Zhou Gangyi , Zhang Peiqiang

(The Department of Mechanics and Mechanical Engineering ,
The University of Science and Technology of China , Hefei 230026)

Abstract The disturbance in the far – end flow induced by MRF effect is investigated. Based on the double – barrel equipment and the mixed model analysis , it reveals that because of remnant magnetization , the particle escaped from the magnetic poles will change the volume fraction of the medium flowing through the far – end channel.

Key words MRF , Duct flow , Disturbance

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(19834020) and Science and Technology Found of Anhui province.

** To whom correspondence should be addressed , Email : gyzhou@mail.ustc.edu.cn