

# Study on Coat Stability of Magnetic Fluid Viscosity Drag Reduction

Ming-li Sun<sup>1</sup>, De-cai Li<sup>2</sup>, Bin Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, P. R. China <sup>2</sup>School Mechanical Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China Email: sunmingli1@sina.com

**Abstract:** Drag reduction is always a popular field in science research. The reason lies in that it has the wide applications and important academic merits. One of key point of magnetic fluid viscosity drag reduction effect is coat stability. By experimentation, we have observed that coat exterior occur circumfluence, this is causation of coat stability.

Keywords: magnetic fluid; viscosity drag reduction; coat; experimentation

# 磁性液体粘性减阻涂层稳定性研究

## 孙明礼<sup>1</sup>,李德才<sup>2</sup>,汪彬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江师范大学工学院,金华,中国,321004 <sup>2</sup>北京交通大学机电学院,北京,中国,100044 Email: sunmingli1@sina.com

**摘 要:**粘性减阻一直是科学工作者进行研究的一个热门领域,之所以如此,是因为粘性减阻有 着广泛的实际应用和重要的学术价值。磁性液体涂层稳定性是决定磁性液体粘性减阻是否有效的 关键因素之一,通过实验,发现涂层表面存在回流现象,进而造成涂层稳定吸附在减阻管道壁上。

关键词:磁性液体;减阻;涂层;实验

### 1 引言

粘性减阻一直是科学工作者进行研究的一个热 门领域,之所以如此,是因为粘性减阻有着广泛的实 际应用和重要的学术价值。磁性液体粘性减阻具有结 构简单、可控性好、寿命长、使用范围广等优点,是 一种新型粘性减阻方法。

磁性液体粘性减阻是利用磁性液体磁特性,在外加磁场的作用下使磁性液体附着在边界表面,用柔顺的边界面替代刚性边界面,使边界面随流体的流动而同步波动,引起层流附面层流速分布的改变,使边界层表面流速大于零,边界面上流速梯度减小,从而减小边界面上的剪力,减小由于剪力作功而消耗的能量,达到减阻目的,提高流速。磁场越强,磁性液体饱和磁化强度越高,磁性液体涂层就越稳定,减阻效果就越好。磁性液体粘度越低,交界处阻力越小,减阻效果也越好,但要保证较好的附着性。只有当作用在涂层上的剪力大于稳定极限时,涂层破坏,减阻才

资助信息:浙江省教育厅科研项目(Y200909250);浙江师范大学博士科研启动基金(ZC304009095)

失效[1-2]。

磁性液体涂层的稳定性是决定磁性液体粘性减 阻是否有效的关键因素之一,因此,有必要对磁性液 体涂层的稳定性进行研究。

## 2 磁路设计

为了对磁性液体涂层稳定性进行试验,我们设计了如图1所示的减阻实验台。其原理为:设所输运液体的体积为*V*,管道截面积为*S*,流速为*v*,容器中液体全部流出所需时间为*t*,所以*v*•*S*•*t*=*V*。

根据此原理, 先测出管道内壁未附着磁性液体时, 容器内一定体积液体流出所需时间 t<sub>1</sub>; 再将管 道外部加上磁铁, 在管道内壁附着一定量的磁性液 体,测出容器中液体全部流出所需时间 t<sub>2</sub>, 比较 t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub>的大小, 获得磁性液体涂层在此条件下的减阻 效果。

在磁性液体粘性减阻的实验过程中,为了使磁 性液体稳定地被束缚在有机玻璃管壁上,必须要对 放置在管壁外围的永久磁铁进行磁路设计。我们设



计磁路结构如图2所示。其中两个相邻的永磁的极 性相反,这样相邻永磁之间形成回路,使整个管壁 附近都有很强的磁场强度(包括两个磁铁之间的空 隙部分),束缚住磁性液体涂层。

为了验证磁路设计的合理性,使用 ANSYS 软件对整个磁路结构进行计算,获得磁力线分布图和 磁场强度矢量图<sup>[3]</sup>。图 3 和 4 是弧形稀土永磁磁路 结构的计算结果。

从图 3 中可以看出,磁力线分布情况为:在磁铁的两极之间形成回路,尤其是在管道内近壁面附近,磁力线密集,越往管道中心磁力线分布越稀疏,也就是说在管道近壁处磁场较强,越远离管道壁面磁场越弱,这样就能保证磁性液体能稳定地吸附在



1.支架 2.盛液桶 3.橡皮软管 4.管道 5.量桶 6.磁铁

Figure 1. Drag reduction test-bed 图 1 减阻实验台



1.所输送液体 2.磁铁 3.管道 4.磁性液体涂层

Figure 2. The sketch of magnetic circuit for magnetic fluid viscosity drags reduction

#### 图 2 磁性液体粘性减阻磁路结构示意图



Figure 3. Magnetic contour line for sector magnet 图 3 弧线磁铁的磁力线分布



Figure 4. Magnetic field H vector for sector megnet 图 4 扇形磁铁磁场强度 H 矢量

管道内壁。

同样在图4中磁场强度H的矢量分布图也可以 看出,相邻磁铁的极性是相反的,并且它们之间形 成回路,这可以从代表矢量方向的箭头指向清楚表 明;代表矢量大小的线段长度也是在管道内近壁面 附近最长,说明此处磁场的强度最强,并且在两个 磁铁之间的空隙处也有很强的磁场,这对稳定束缚 磁性液体涂层尤为重要。

### 3 磁性液体涂层稳定性实验

为了验证减阻实验中磁性液体涂层的稳定性, 有必要进行磁性液体涂层进行破坏性实验,在如图 1 所示试验台上进行实验。设计制作了内径为 50mm、长度为800mm圆形管道,管道用有机玻璃 材料,为了方便与软管连接,管端都连接了一个内 径为10mm的小接管,使用煤油基磁性液体进行实 验。通过实验观察磁性液体涂层在圆形管道中被水 冲击时的变形和破坏过程。

磁铁为 60°弧形稀土永磁,半径为 150mm, 厚度为 40mm,平均磁场强度为 232.2KA/m。磁性 液体体积为 3ml,磁化强度 59.8mT,密度 1.48g/cm<sup>3</sup>, 粘度 19.47cP。为了明确实验中的观察位置,我们 规定迎水的一端为前端,距离出水口近的一端为后 端。涂层破坏的标准为管道中开始出现游散的磁性 液体液滴。

实验过程及主要现象:

实验中用的摄像机拍摄的是连续变化的图像,

这里限于篇幅不能一一列出,为了说明问题的方 便,只列出期间比较重要的部分。

(1) 先在管道中注入 3ml 的磁性液体, 使它能覆盖住磁铁;

(2) 调整摄像机的镜头,以能拍摄到清晰的



图像为准;

(3)上面两步完成后,记录下没有输送液体 通过时磁性液体的表面形状,供对比分析涂层变化 使用,前端如图 5(a)所示,实际上,静止时前端和 后端形状基本相同;

(4)打开阀门,逐渐增大阀门的开口以增大 流量,拍摄下整个过程中磁性液体涂层的变形情 况,直到最后涂层破坏。



#### Figure 5. Magnetic fluid surface figure 图 5. 磁性液体表面形状

当管道中流速较小时,磁性液体受水的冲击比较小,涂层的变化较缓慢,涂层界面上相邻两个刺之间的间隔较大,此时能清楚地看到刺的形状,如图 5(b)所示。这时涂层的形状与静止时的形状相比没有明显的变化。

随着流速的增加,涂层所受的冲击变大,刺的 运动也逐渐加快,刺与刺之间的间隔减小并逐渐变 的模糊,此时的磁性液体形状如图 5(c)所示。

流量增大到一定程度时,前端的磁性液体开始顺着水的流向沿管壁向后滑移,如图 5(d)中磁性液体在不同位置留下的前端边界迹线所示。

继续增大水的流量,发现前端的磁性液体继续向后滑移,开始发生破坏,如图 5(e)。当涂层完全破坏时管道底部留下树枝状的磁性液体痕迹,如图 5(f)所示。

图 5(a)~(f)基本拍摄了磁性液体在传输液冲击下的破坏过程,使我们对磁性液体在整个过程中的变形情况有一个初步掌握<sup>[4-5]</sup>。

通过图 5(a)~(f)的对比可以看出:传输液——水 对磁性液体的冲击使磁性液体全部发生运动,得出 磁性液体涂层在破坏过程中的一般变化过程:

(1)磁性液体在磁场的作用下静止时,保持 一定的形状,并且表面有刺状突起;

(2)当传输液冲击时,磁性液体随着传输液 发生运动,引起涂层界面的波动,且出现回流现象;

(3)当增大流速时,传输液对磁性液体的冲击力增强,涂层表面运动加剧;在流速不变的情况下,减小作用在磁性液体上的磁场强度,就减小了作用在磁性液体上的体积力即管壁对磁性液体的吸附力,涂层表面运动也加剧;

(4)当涂层变形到一定程度时,就脱离了管壁的吸附,涂层开始发生破坏,管道中出现磁性液体小液滴。

## 4 磁性液体涂层稳定性理论分析

在分析之前,建立如图6所示的数学模型:

设下部流体为磁性液体,速度为 $v_1$ ,磁导率和 密度分别为 $\mu_1$ 、 $\rho_1$ ;上部为传输液体,速度为 $v_2$ , 磁导率和密度分别为 $\mu_2$ 、 $\rho_2$ ;管道的上下表面距r轴 的距离分别为 $h_1$ 和 $h_2$ ;中间的曲线表示两种液体的 分界面: $Z=Z_0$ 。



#### Figure 6. The model of surface stability of magnetic fluid 图 6. 磁性液体表面稳定性模型

作用在两种液体分界面上的力包括:流体压力 P,磁力 P<sub>s</sub>(磁性液体在磁场中体积变化引起的磁 致伸缩压力)、Pm(磁性液体磁化压力)、P<sub>n</sub>及表面 张力 P<sub>c</sub>。当作用在分界面上力处于平衡状态时,有 下式成成立:

$$\begin{split} P_1 + P_{1s} + P_{1m} + P_{1n} &= P_2 + P_c \\ \\ 上述色散方程可化为下式 \\ -\rho_1 (w - k_1 v_{r1})^2 \coth(k_1 h_1) + \rho_2 (w - k_1 v_{r2})^2 \coth(k_1 h_2) \\ &= k_1 (\rho_1 - \rho_2) g + k_1^3 \sigma + \\ \frac{(\mu_2 - \mu_1)^2 (k_1 H_{0r})^2}{\mu_2 + \mu_1} - \frac{\mu_2 \mu_1 k_1^2 (H_{02z} - H_{01z})^2}{\mu_2 + \mu_1} \\ \end{split}$$

#### 5 结论



从实验和理论分析可知,磁性液体表面涂层中 存在回流现象,从而使磁性液体涂层稳定吸附在减 阻管道的壁上。实验还发现,只有当管道内部磁性 液体涂层厚度适当时,磁性液体才有减阻效果。

## References (参考文献)

- Li Decai. The Theory and Application of Magnetic Fluid [M]. Beijing: Science Press, 2003. (Ch)
- [2] Li Decai. The requisition for Mechanism and Experimentation Research on Magnetic Fluid Viscosity Drag Reduction ( Ch)
- [3] Sun Mingli. Tutorial of ANSYS1010 Electromagnetic Finite Element Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (Ch)
- [4] Sun Mingli. Experimentation Research on Magnetic Fluid Viscosity Drag Reduction [D]. Beijing Jiaotong University. 2008 (Ch)
- [5] Li Decai. postmortem report of the national natural science foundation of china for Mechanism and Experimentation Research on Magnetic Fluid Viscosity Drag Reduction (Ch)