

1003-7713/2002/04-300-3

# 平面旋转场诱导下磁流变液的结构模型\*

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:** 针对平面旋转场下磁流变液中诱导产生的层状结构, 提出了恰当的理论模型, 该模型成功的解释了层状结构在同步旋转状态下: 层间距随磁场的变化关系; 旋转层的滞后角随旋转角频率以及其他物理量之间的关系; 层半径与旋转角频率之间的关系. 理论结果与文献中发表的实验结果相吻合.

**关键词:** 磁流变液; 平面旋转场; 层结构

**中图分类号:** TB303 **文献标识码:** A

## 1 引言

磁流变液在平面旋转场下表现出平行为旋转平面的层状结构, 层间距、层的厚度、层的半径大小以及层的运动状态取决于场的旋转频率以及场强的模<sup>[1,2]</sup>. 在旋转频率较低时, 层状结构表现为与场的同步旋转; 当旋转频率超过一定的门限时, 层状结构的均值旋转频率低于场频率; 当旋转频率增高后, 层结构表现为在一定位置附近的摆动(jerk motion). 本文的主旨在于介绍在同步旋转状态下, 磁流变液的结构模型.

## 2 理论模型

假定平面旋转场位于  $x-y$  平面内, 场强可以表示为:

$$\vec{H}(t) = H_0 [\hat{x} \cos(\omega t) + \hat{y} \sin(\omega t)] \quad (1)$$

其中,  $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  分别为  $x$ 、 $y$  的单位矢量;  $\omega$  为旋转角频率;  $H_0$  为磁场强度矢量的模.

磁场中平行于磁场方向的圆盘处于均匀线形极化状态, 则作用在其上的力矩可表示为:

$$\vec{T}_{mag} = \pi \sin\delta(\omega) \mu_0 \beta(\omega) D H_0^2 R^2 \hat{z} \quad (2)$$

其中, 磁极化强度  $\vec{M} = \beta(\omega) H_0 [\hat{x} \cos(\omega t - \delta(\omega)) + \hat{y} \sin(\omega t - \delta(\omega))]$ ;  $D$  为圆盘厚度;  $R$  为其半径;  $\beta(\omega)$  为比例函数;  $\delta(\omega)$  为滞后角;  $\mu_0$  为真空中的磁导率;  $\hat{z}$  为  $z$  轴的单位矢量.

由于圆盘与场同步旋转, 作用在圆盘上的粘性

力矩可以表示为:

$$\vec{T}_{vis} = -0.6159\pi \sqrt{\eta\rho\omega^3} R^4 \hat{z} \quad (3)$$

其中,  $\rho$  为磁流变液中母液的密度;  $\eta$  为其粘性.

旋转场下, 盘状颗粒聚集体对边界颗粒的平均吸引力为:

$$\vec{F}_{md} = -7.704 \frac{D[\mu_0\beta(\omega)H_0]^2}{R^2} \Delta V \hat{r} \quad (4)$$

其中,  $\Delta V$  为边界的颗粒的体积;  $\hat{r}$  为盘中心到颗粒中心的单位矢量.

由于盘状粒子群的旋转, 边界粒子所受的粘性作用力为:

$$\vec{F}_{pr} = \rho R \omega^2 \Delta V \hat{r} \quad (5)$$

由力学平衡关系, 可以得到盘状颗粒聚集体的半径为(边界颗粒的力平衡):

$$R = \left\{ \frac{7.704D[\mu_0\beta(\omega)H_0]^2}{(\rho_p + \rho)\omega^2} \right\}^{1/3} \quad (6)$$

其中  $\rho_p$  为颗粒的密度.

极化强度矢量的滞后角为(由盘的力矩平衡关系得到):

$$\sin\delta(\omega) = 2.4\mu_0^{1/3} \frac{\sqrt{\eta\rho}}{(\rho_p + \rho)^{2/3}} \frac{\beta(\omega)^{1/3} \omega^{1/6}}{D^{1/3} H_0^{2/3}} \quad (7)$$

对于给定的磁流变液样品, 式(7)可以表示成

$$\sin\delta(\omega) = K \frac{\beta(\omega)^{1/3} \omega^{1/6}}{D^{1/3} H_0^{2/3}}$$

## 3 结果与讨论

假定仅仅是的函数并且在我们所考察的频率段

\* 国家自然科学基金(19834020)、教育部博士点基金资助项目. \*\* 通讯联系人, Email: gyzhou@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2001-08-14; 修回日期: 2001-08-25.

内近似为常数,那么式(7)可表示为: $\delta(\omega) = \arcsin \left[ K'(H_0) \frac{\omega^{1.6}}{H_0^{2.3}} \right]$ . 选择不同的  $K'(H_0)$  可以得到针对图1实验曲线的理论预测曲线(图2). 对比图1和图2,随着场强的增加,滞后角将变小;随着频率的增加,滞后角将增大;在频率很低的情况下,滞后角与场强无关,与旋转频率成近似线性关系.

依据这些  $K'(H_0)$  的离散值,可以对如下函数关系进行拟合: $\frac{D}{K^3\beta(\omega)} = \left[ \frac{1}{K'(H_0)} \right]^3$ , 见图4. 由于对于给定的磁流变液样品  $K$  为常数,又对于我们考察的频率段是常数,所以图4的曲线反映了层状结构的厚度随外场的变化. 由于层状结构的厚度与其空间周期成比例(样品的体积比浓度是常数),所以层状结构的厚度可以反映层状结构的厚度. 对比

图3的实验曲线,理论曲线与实验结果是吻合的.

考察式(6)可以看出,层状结构的半径随旋转频率的增加而减小,该实验现象已在文献[1]中被证实. 从式(6)可以得到如下结论: 1. 层状结构的半径与母液粘性无关; 2. 层状结构的半径与层的厚度成增函数关系; 3. 母液和颗粒的密度越高,层状结构的半径越小; 4. 层状结构的半径正比于  $\omega^{-2.3}$ . Bossis 曾提出了层状结构间距随磁场增加而变小的理论模型,相关内容见文献[1].

依据上述拟合得到了层厚度随场强变化的关系,可以进一步利用式(7)拟合不同旋转频率下滞后角度与场强的关系(即确定  $K\beta(\omega)$ ). 图5 a 和 b 分别是实验和理论预测曲线,拟合结果表明,当旋转频率高于 0.5 Hz 后,  $K\beta(\omega)$  为一常数.

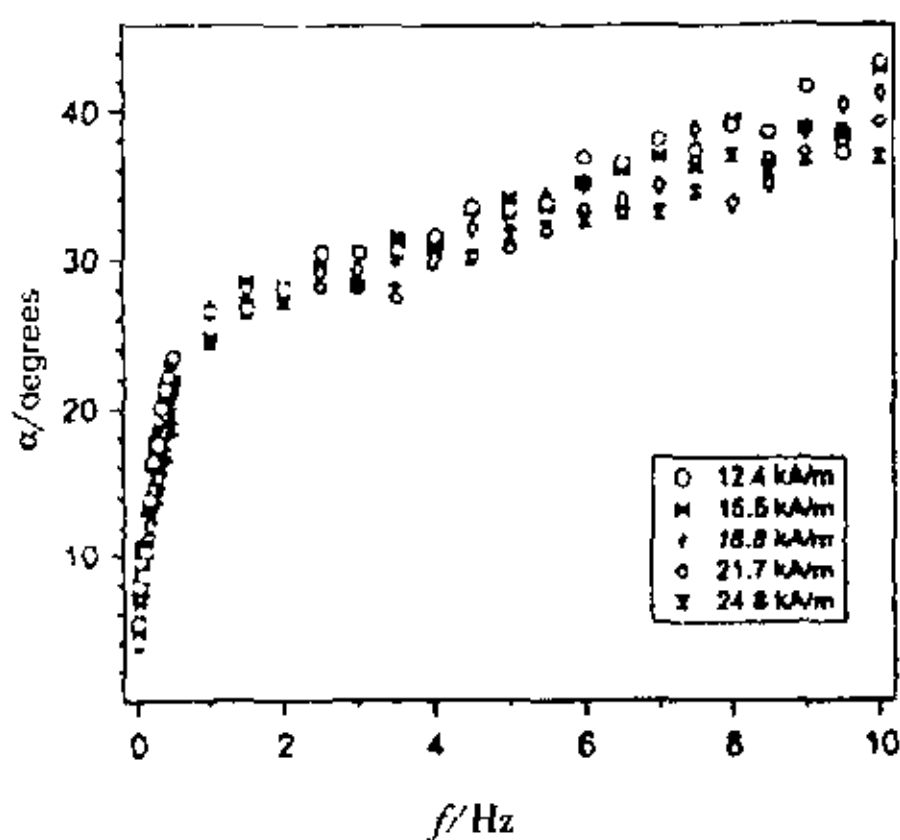


图1 相位滞后角与旋转频率之间的关系  
(实验结果摘自文献[1])

Fig. 1 The relationship between the phase lag and the rotating frequency at varies strength of the applied magnetic field: experimental result, copied from the reference [1]

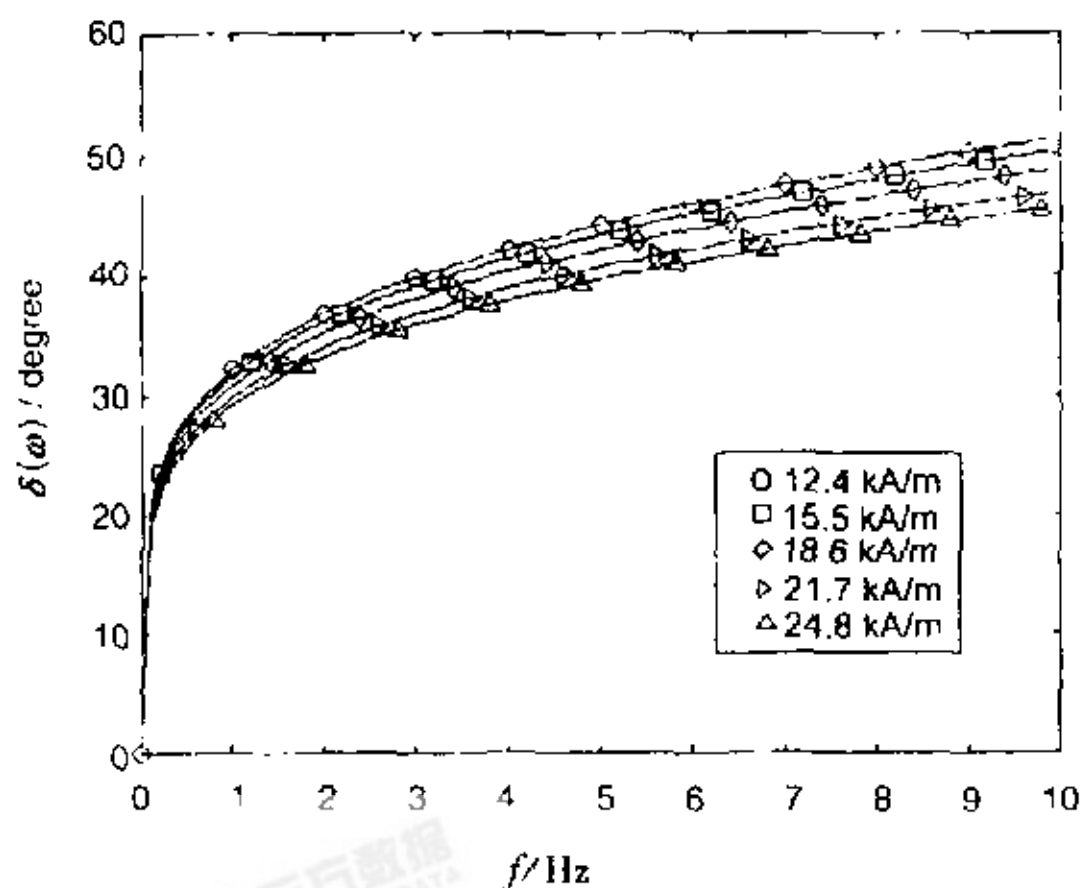


图2 式(7)的理论预测曲线  
Fig. 2 Predicted result by equation (7)

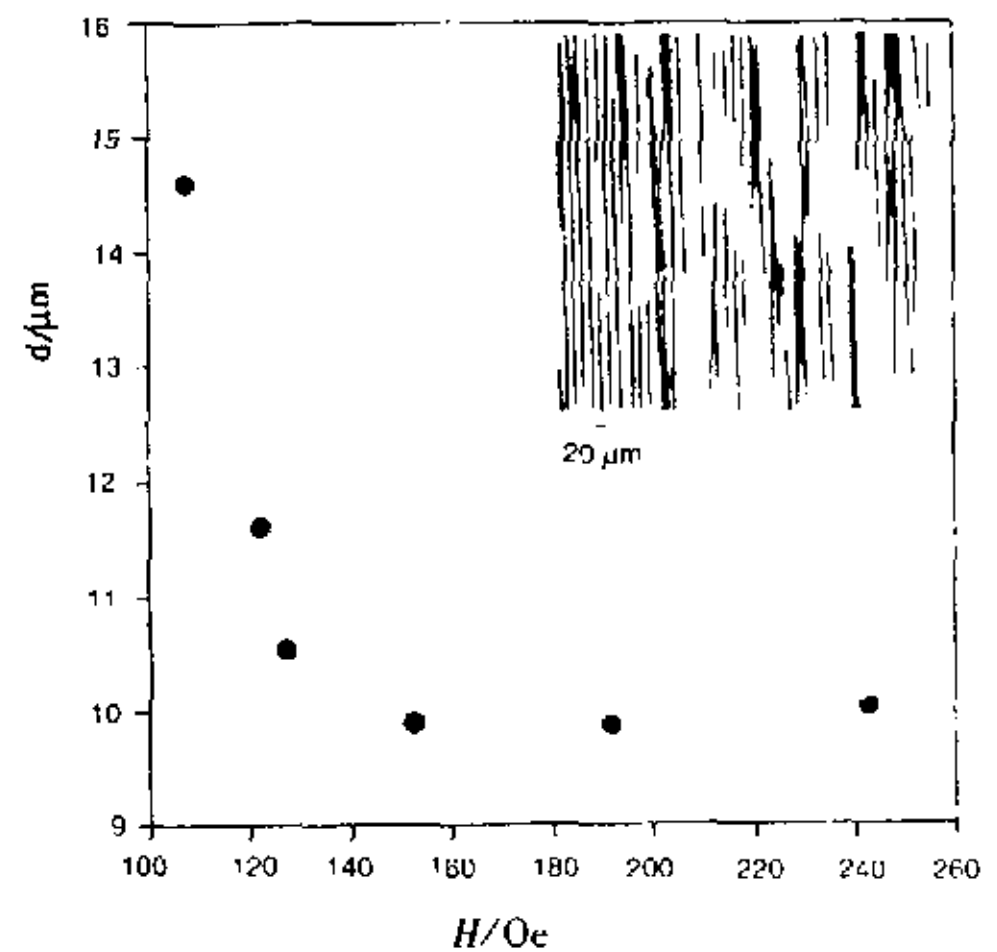


图3 层周期与场强的关系(实验结果摘自文献[2])  
Fig. 3 The relationship between the period of the layers and the magnetic field strength: experimental results, copied from the reference [2]

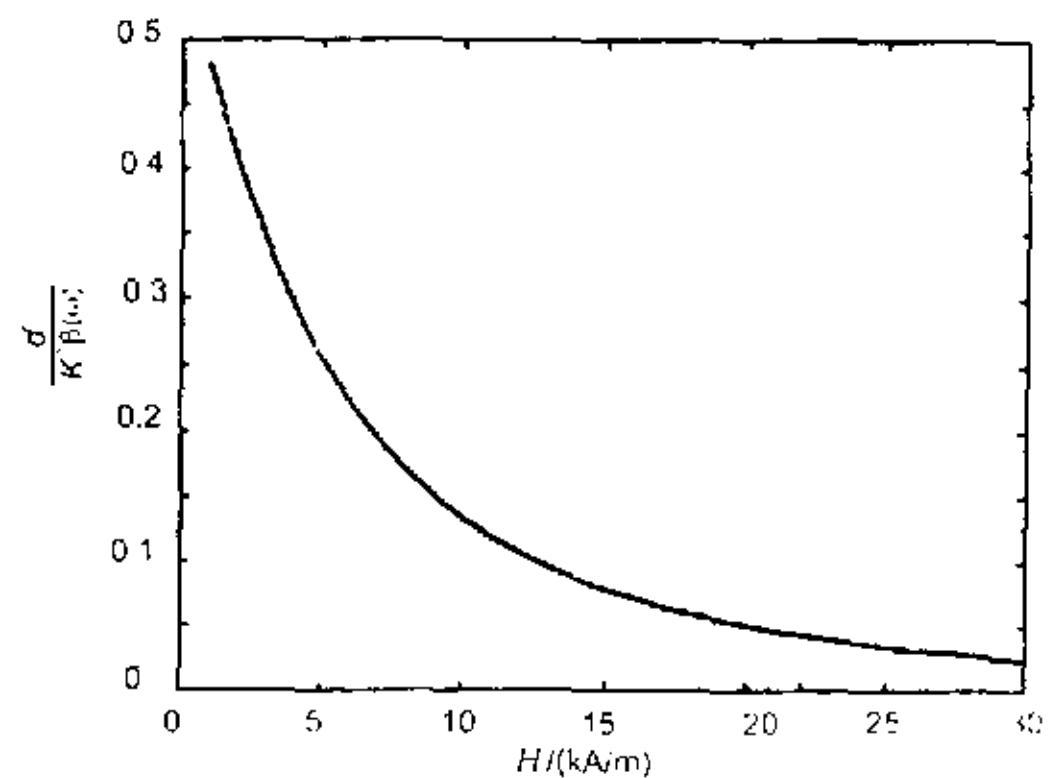


图4 层厚度与场强的关系  
Fig. 4 The relationship between the period of the layers and the magnetic field strength

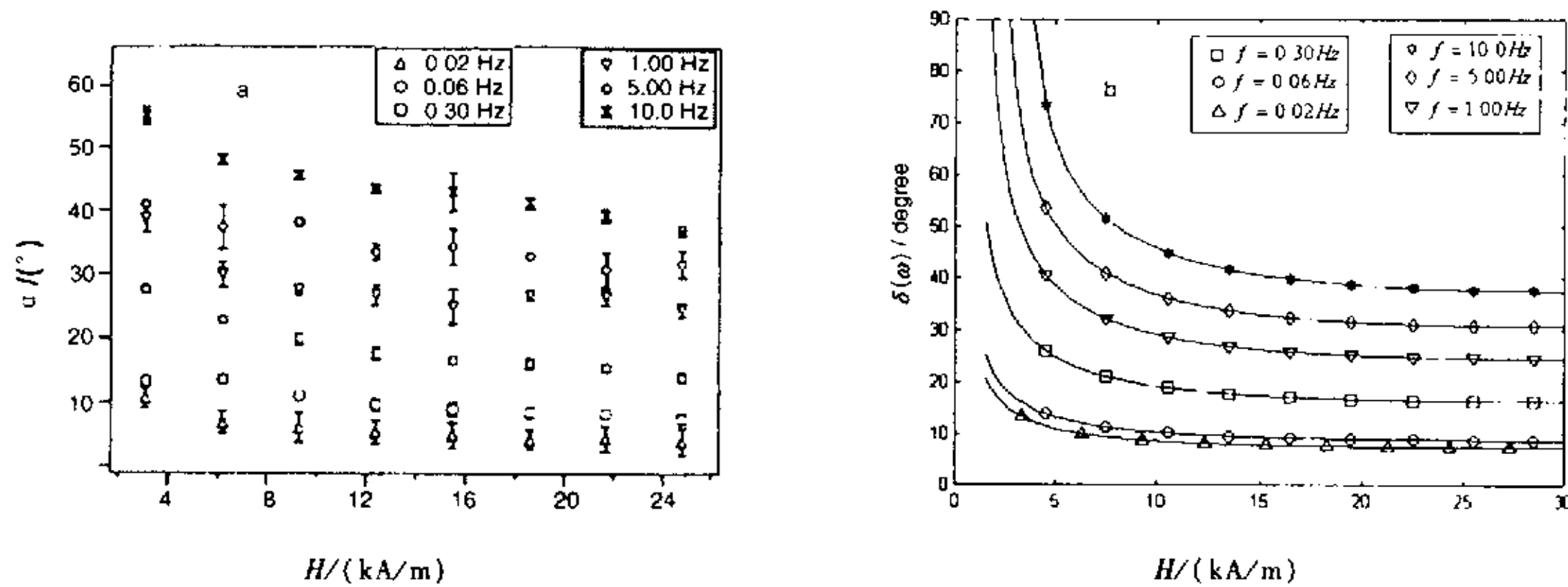


图5 滞后角与场强之间的关系

a. 实验曲线摘自文献[1]; b. 计算得自式(7).

Fig. 5 The relationship between the phase lag the magnetic field strength at varies rotating frequency  
 a. Experimental results copied from the reference [1], b. Predicted results calculated by equation (7).

#### 4 结论

旋转场下磁流变液的结构问题目前在磁流变液研究领域是一个前沿方向. 其结构受诸多物理量影响, 在建立理论模型的基础上, 我们指出, 层状结构半径与母液粘性无关且随着旋转角频率的增加而减小, 这一结果与文献[1]中运动单链模型的解释是不符的. 然而运用本工作建立的理论模型, 很好的吻合了文献[1]中的实验现象(相位滞后角曲线)以及

文献[2]中关于层间距随磁场大小的变化的实验曲线. 对于平面旋转场诱导下, 层状结构与场同步旋转的情形, 本工作提出的解析模型提供了各物理量之间的约束关系.

#### 参 考 文 献

- [1] Melle S, Fuller G G. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**: 4111  
 [2] Bossis G, Cebers A. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, **201**: 218

## Model of the Structure of MRF Driven by Rotating Fields\*

Zhou Gangyi\*\*, Zhang Peiqiang

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

**Abstract** A model to describe the structure of magnetorheological fluid (MRF) driven by rotating fields is presented. The model explains the phenomena of the radius of the layer structure changing with the rotating frequency, the phenomena of the thickness of the layer changing with the modulus of the applied field, the factors that dominate the phase lag of the structure, All the results agree with the experimental results presented in current papers.

**Key words** MRF, Layer structure, Rotating fields

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (19834020) and the Doctoral Foundation of the State Education Commission of China.

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