

# 旋转磁场作用下磁流变液 颗粒运动及结构演化的模拟<sup>\*</sup>

方 生<sup>\*\*</sup> , 张培强

(中国科学技术大学力学与机械工程系,合肥 230026)

摘 要: 通过对旋转磁场作用下磁流变液一定数目颗粒运动的数值模拟,在旋转平面内得到盘状聚集结构,在垂直于旋转平面的平面内得到层状结构,得出旋转磁场作用下磁流变液的结构特点。在模拟过程中颗粒受到的磁场作用力简化为磁偶极子间相互作用。

关键词: 磁流变液;旋转磁场;磁偶极子

中图分类号:TB303 文献标识码:A

## 1 引 言

磁流变液一般是由微米尺寸的可磁化颗粒混合于液体如油或水中的悬浮液,其流变性能是由其微观结构及颗粒间的作用力决定的。在外加磁场作用下,磁流变液中的颗粒被磁化,磁化后的颗粒之间相互作用形成另一种结构,结构的演化引起其力学性能的变化。磁流变液以其快速、可控以及可承受剪切屈服应力大等优点越来越受到人们的关注,在某些方面已经有了工业应用,如用于研制新型的离合器、制动闸、液压器件等。

旋转磁场是通过由交流电产生相差 $90^\circ$ 的两磁场在旋转平面内正交叠加而成。旋转磁场下磁流变液的各种性质最近才引起人们的注意。旋转磁场通过诱导颗粒的转动使磁流变液具有一些特有性能,磁流变液的微观结构与旋转磁场的转动频率有关<sup>[1]</sup>,旋转磁场下其热传导系数可比未加磁场前提高15倍以上,而在稳定磁场下只能提高70%;旋转磁场下磁流变液呈层状结构<sup>[2]</sup>。旋转磁场下磁流变液的这些性质在相关领域都可以得到重要应用。

Melle和Fuller通过实验观察到在旋转磁场下磁流变液中的颗粒转动的角度与旋转磁场的方向存在相位滞后,即颗粒不能跟随磁场同步转动,且相差与旋转磁场的转动频率有关,并根据力矩平衡方程建立模型对其作了解释<sup>[1]</sup>。Volkova在实验中发现旋转磁场作用下磁流变液在旋转平面内成盘状聚集结构,而在垂直于旋转平面的平面内成条纹状即层状结构,并且给出了在不同磁场强度下的层间距离<sup>[2]</sup>。

Mohebi通过建立简单的力学模型,对稳恒磁场作用下的磁流变液进行了模拟,在磁场方向观察到链状结构<sup>[3]</sup>。Reitich利用FMM算法也对稳恒磁场作用下的磁流变液进行了二维模拟,并考虑了不同时刻、不同体积分数 $\varphi$ 下磁流变液的结构<sup>[4]</sup>。

本文先模拟旋转磁场作用下磁流变液的结构,然后通过模拟两颗颗粒的运动对其作简单解

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(19834020)安徽省“十五”科技攻关项目。

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人,Email:sh-fang-ustc@263.net

收稿日期:2001-08-14;修回日期:2001-08-25。

释,并同实验结果进行比较。

## 2 力学模型

在外加磁场作用下,颗粒被磁化成磁矩为  $\mathbf{m} = 4\pi a^3 \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \mathbf{H}$  其中  $\mu_p$  和  $\mu_f$  分别为磁流变液中颗粒和液体的磁导率,  $a$  为颗粒的半径,  $\mathbf{H}$  为磁场强度。当磁场不是很强时,忽略颗粒被磁化后产生的磁场使周围颗粒磁化。颗粒  $i$  受到磁场作用力为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_m &= \mathbf{m} \cdot \nabla \mathbf{B} \\ &= \mathbf{m} \cdot \nabla (\mathbf{B}_0 + \sum_{j \neq i} \mathbf{B}_j) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{B}_0$  为外加磁场的磁感应强度;  $\mathbf{B}_j$  为磁距  $\mathbf{m}$  的颗粒  $j$  在颗粒  $i$  处产生的磁场的磁感应强度

$$\mathbf{B}_j = -\frac{\mu_f \mathbf{m}}{4\pi r^3} + \frac{3\mu_f (\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r}}{4\pi r^5} \quad (2)$$

$$\mathbf{r} = (x - x_j)\mathbf{i} + (y - y_j)\mathbf{j} + (z - z_j)\mathbf{k}, \quad r = |\mathbf{r}|$$

颗粒之间的碰撞通过引入短程斥力  $\mathbf{F}_s$  来模拟,当两球之间距离小到某一值时,斥力迅速增大,使其背向而行<sup>[3,4]</sup>。颗粒  $i$  由于与其他颗粒碰撞受到的斥力为:

$$\mathbf{F}_s = \sum_{j \neq i} F_0 e^{-\beta(r_{ij}/2a-1)} \mathbf{r}_{ji}^0 \quad (3)$$

$F_0$  是磁场对颗粒作用力的量级;  $\beta$  为一常数,  $r_{ij}$  是颗粒  $i$  与颗粒  $j$  之间的距离;  $\mathbf{r}_{ji}^0$  是由颗粒  $j$  指向颗粒  $i$  的单位矢量。同理颗粒与器壁之间的碰撞也可以通过  $\mathbf{F}_w$  来模拟。

流体对颗粒  $i$  的作用简化为 Stokes 阻力:

$$\mathbf{F}_f = -6\pi a \eta \mathbf{v} \quad (4)$$

$\eta$  为磁流变液中液体的粘性系数;  $\mathbf{v}$  为颗粒  $i$  的速度。

模拟过程中把颗粒看作质点,不考虑颗粒自身的转动,颗粒  $i$  的力学方程为:

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} + 6\pi a \eta \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_w \quad (5)$$

$m$  为颗粒  $i$  的质量;  $t$  为时间。对于室温下,磁场不是很强时,方程中第一项是可以忽略的<sup>[4]</sup>。

## 3 模拟结果与讨论

模拟体积为圆柱形,半径为 10,高为 40,单位为  $a$ 。颗粒半径  $a = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $\eta = 0.975 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $H = 10 \text{ kA/m}$ ,颗粒数目  $N = 300$ ,旋转磁场的转动频率  $f = 2 \text{ Hz}$  在旋转磁场作用下,颗粒  $j$  产生的磁场对颗粒  $i$  的作用力为:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{Q}{r^7} \{ r^2 [(1 + 2\cos^2\theta)(x - x_j) + 2\sin\theta\cos\theta(y - y_j)] \\ &\quad - [(x - x_j)\cos\theta + (y - y_j)\sin\theta](x - x_j) \} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{Q}{r^7} \{ r^2 [(1 + 2\sin^2\theta)(y - y_j) + 2\sin\theta\cos\theta(x - x_j)] \\ &\quad - [(x - x_j)\cos\theta + (y - y_j)\sin\theta](y - y_j) \} \end{aligned} \quad (7)$$

$$F_z = \frac{Q}{r^7} \{ r^2(z - z_j) - [(x - x_j)\cos\theta + (y - y_j)\sin\theta](z - z_j) \} \quad (8)$$

$F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别为  $\mathbf{F}_m$  的三个分量； $Q = \frac{12\pi a^6}{\mu_j} k^2 B^2$ ； $k = \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f}$ ； $\theta$  为旋转磁场方向与  $x$  轴的夹角，旋转平面为  $xoy$  平面。

在未加磁场前颗粒位置是随机的。加入旋转磁场后，经过 12 个周期，磁流变液的结构渐趋稳定。图 1 给出了在旋转平面内磁流变液的结构，在旋转平面内磁流变液成盘状聚集结构。图 2 为磁流变液在垂直于旋转平面的平面内的结构。在垂直于旋转平面的平面内磁流变液成层状结构分布，且层间距离约为  $10a$ 。

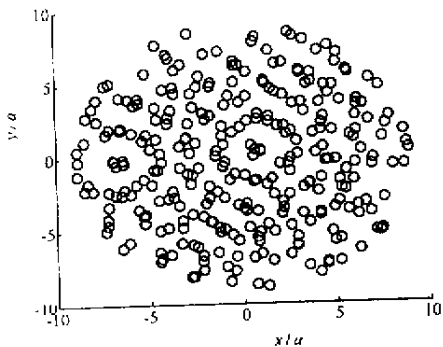


图 1 旋转平面内磁流变液的结构

Fig.1 The top view of the structure of MR fluids

图 3 为 Volkova 在实验中观察到的结果。图中的小黑点表示不同磁场强度下旋转磁场中磁流变液的层间距离，图中右上角为旋转磁场中磁流变液的周期性层状结构，黑条纹表示该处颗粒聚集在一起。与图 2 相比较，实验观察到的条纹状结构与模拟得到的层状结构基本一致。

旋转磁场中磁流变液在旋转平面中呈盘状聚集结构，在垂直于旋转平面的平面中为层状结构，可以通过模拟两颗粒运动来解释。

考虑旋转平面内两颗粒分别位于  $(4, 0, 0)$ 、 $(-4, 0, 0)$ ，单位： $a$ ，从图 4 可以看出两颗粒不断靠近，直至几乎互相接触。正是由于在旋转平面内两颗粒互相靠近，因而磁流变液在旋转平面内成盘状聚集结构。简单解释如下：

位于  $(4, 0, 0)$  处的颗粒受到另一颗粒作用力为：

$$F_x = \frac{Q}{r^4}(1 - 3\cos^2\theta) \tag{9}$$

$$F_y = \frac{Q}{r^4} 2\sin\theta\cos\theta \tag{10}$$

$Q$ 、 $r$ 、 $\theta$  同 (6)、(7) 式。当  $1 - 3\cos^2\theta < 0$  时，颗粒间为引力，颗粒互相靠近，否则颗粒间为斥力，颗粒互相远离。当  $\theta = 54.7^\circ$  时作用力为 0。在一个周期内，颗粒互相靠近的距离正比于：

$$\int_0^{54.7^\circ} |1 - 3\cos^2\theta| d\theta - \int_{54.7^\circ}^{90^\circ} |1 - 3\cos^2\theta| d\theta = \frac{\pi}{4} > 0$$

因而颗粒会不断靠近，最终形成盘状聚集结构。

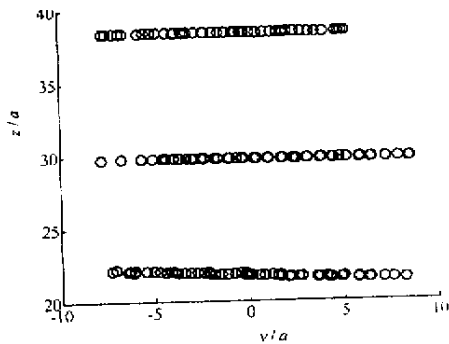


图 2 在垂直于旋转平面的平面内的结构

Fig.2 The side view of the structure of MR fluids

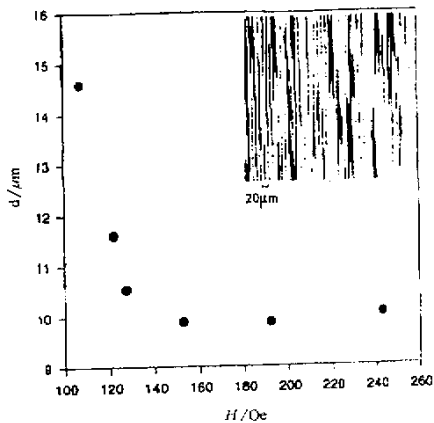


图 3 不同磁场强度下旋转磁场 ( $f = 10$  Hz) 中磁流变液的层间距离<sup>[2]</sup>

Fig.3 Period of the layered structure obtained in a rotating field ( $f = 10$  Hz) versus the amplitude

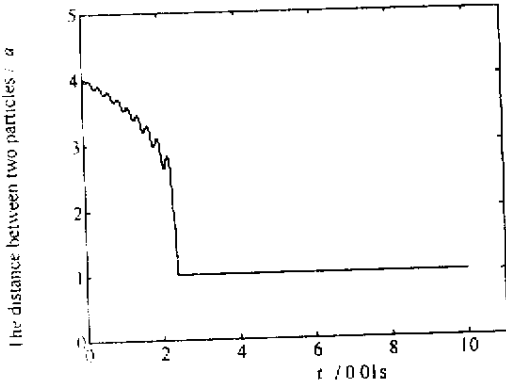
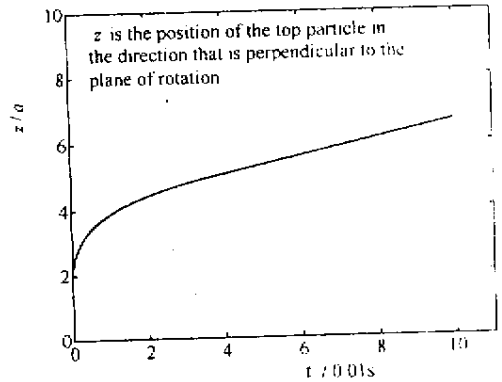


图 4 旋转平面内两颗粒间距离随时间变化曲线

Fig.4 The distance of the two particles in the plane of rotation vs the time



距离随时间变化曲线

Fig.5 The distance of the two particles in the direction of the perpendicular of the plane of rotation vs the time

图 5 在垂直于旋转平面的方向上两颗粒间

当两颗粒在垂直于旋转平面的方向上时,两颗粒互相排斥。这也就是磁流变液在垂直于旋转平面的平面内成层状结构的原因。图 5 中两颗粒 A、B 分别位于(0, 0, 2)、(0, 0, -2)曲线给出了位于(0, 0, 2)的颗粒 A 在垂直于旋转平面的方向上的位移,从图 5 中可以看出两颗粒互相排斥。颗粒 A 受到颗粒 B 的作用力为:

$$F_z = \frac{Q}{r^5}(z_A - z_B) > 0 \tag{11}$$

因而颗粒间为斥力,故在垂直于旋转平面的平面内磁流变液为层状结构。

在旋转磁场作用下,磁流变液中的颗粒在同一旋转平面内互相吸引聚集成盘状结构,而在不同平面内互相排斥形成层状结构。磁流变液的这种性质可用于电磁场诱导下智能材料的自组装,形成有序结构,使其力学、热传导等性能各向异性。

## 4 结 论

本文通过对旋转磁场作用下磁流变液进行数值模拟,在旋转平面内得到盘状聚集结构,在垂直于旋转平面的平面内得到层状结构。对于频率、体积分数对其结构的影响还有待建立更精细的模型。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Sonia Melle , Gerald G Fuller , Miguel A Rubio. *Phys. Rev. E* , 2000 , **61** : 4111
- [ 2 ] Volkova O , Cutillas S , Carletto P , Bossis G , Cebers A , Meunier A. *J. Magn. Magn. Mater.* , 1999 , **201** : 66
- [ 3 ] Mohebi M , Jamasbi N , Jing Liu. *Phys. Rev. E* , 1996 , **54** : 5407
- [ 4 ] Ly H V , Reitich F , Jolly M R , Banks H T , Ito K. *Journal of Computational Physics* , 1999 , **155** : 160

# Simulation of the Structure and the Dynamics of the Particles of MR Fluids in Rotating Magnetic Fields \*

Fang Sheng\*\* , Zhang Peiqiang

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

**Abstract** By the numeric simulation of many particles in MR fluids , we can get the characteristic of the structure of MR fluids in rotating magnetic fields. During the simulation , the magnetic dipole model is used to simulate the force of magnetic fields on particles.

**Key words** Magnetorheological fluids , Rotating magnetic fields , Magnetic dipole

\* 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 : sh - fang - ustc@263.net