

文章编号: 1000-8055(2000)02-0174-05

均匀磁场中铁磁流体润滑的轴颈轴承

池长青

(北京航空航天大学 机械系第六研究室, 北京 100083)

摘要: 当均匀外加磁场强度从 0 增加到 0.12 MA/m 时, 在高剪切速率下铁磁流体润滑膜的承载能力提高 25%, 而在低剪切速率下, 承载能力可提高 35%。所以, 从实用的观点来看, 铁磁流体润滑是为了利用外磁场来调节轴承的承载性能, 而不是为了获得高承载力。为了避免轴承承载能力受到限制, 需要将铁磁流体密封与润滑膜分离开来。分析表明均匀磁场和剪切速率对姿态角的影响甚为微小。

关键词: 铁磁流体; 润滑; 磁场; 轴承

中图分类号: TH 117.2 **文献标识码:** A

1 前言

铁磁流体流变特性的一般表达式可以采用幂多项式来拟合实验数据:

$$\tau(H) = \tau_s(H) + \left[\sum_{k=1}^n \eta_k(H) \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{k-1} \right] \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

式中: H 为外磁场强度。这种幂多项式具有很高的精度。在对轴承做理论分析时, 过多的项数并不存在数学上的困难。在实际上, 往往采取 $n=2$ 即可以在一定的范围内满足润滑分析的精度要求。

铁磁流体由于组成成分不同而有许多品种。不仅各品种的磁化性能各异, 而且流变性能也有差别: 有的铁磁流体品种如式(1)所示的那样集 Bingham 体和拟塑性体的流变特性于一体; 也有品种仅具有 Bingham 体或仅具有拟塑性体的流变特性; 最简单的情况就是符合牛顿流体的行为。在速度较高的轴承中, 选择具有屈服应力的铁磁流体作为润滑剂并不合适, 屈服应力虽然增大轴承的承载能力, 但同时在更大程度上增加摩擦力, 并且这种现象随屈服应力增大而愈加严重, 显然这将造成高温升, 从而改变轴承性能和使轴承运转的安全性变坏。而且温升还降低铁磁流体的磁化性能, 使外加磁场对轴承性能的控制受到严重削弱, 甚至不能实现。因此采用低屈服应力或单

纯拟塑性的铁磁流体是合理的选择。通常在轴颈轴承中, 润滑膜的剪切速率可以达到 $10^4 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 的量级, 甚至更高。在这样的剪切速率下, 低屈服应力不能保持固态粘附核的存在。若低屈服应力的影响可以忽略, 则轴承的实际性能主要取决于铁磁流体的拟塑性流变特性。Reynolds 润滑方程可以写成:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{h^3}{\eta(H)} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{h^3}{\eta(H)} \frac{\partial p}{\partial \zeta} \right] = 6U r_j \frac{dh}{d\theta} \quad (2)$$

式中: $\theta = x/r_j$, $\zeta = z/r_j$

2 窄轴颈轴承

在窄轴颈轴承的假设下, (2) 式简化成:

$$\frac{d}{d\zeta} \left[\frac{h^3}{\eta(H)} \frac{dp}{d\zeta} \right] = 6U r_j \frac{dh}{d\theta}$$

对于具有单纯拟塑性流变特性的铁磁流体, 在式(1)中取 $\tau_s(H) = 0$, 同时取 $n=2$, 则粘度为:

$$\eta(H) = \eta(0) \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \left[1 + \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{H \theta} \right] \quad (3)$$

式中 $\eta(0)$ 是 $H=0$ 时的一次粘度系数, $H \theta$ 是轴承的间隙函数 $h = h_{av} H \theta$, $H \theta = 1 + \epsilon \cos \theta$, 二次粘度项用膜厚上的平均剪切率 $|U|/h$ 代入。由于轴承两侧的铁磁流体密封与润滑膜是分离的, 所以两侧的边界条件取润滑膜的压力等于环境压力 p_a ,

收稿日期: 1999-11-09; 修订日期: 1999-12-26

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(9611011008C)

作者简介: 池长青(1934-), 男, 北京航空航天大学机械系第六研究室教授



由 Reynolds 润滑方程积分得:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \left[\frac{1}{H^3} + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{H^4} \right] \times \frac{dH}{d\theta} (\zeta - B^2) \quad (4)$$

式中 B 是轴承的宽径比, 无量纲参数的定义为:

$$\Lambda = \frac{6\eta(0)U r_i}{h_{av}^2}, \quad \Lambda_F = \frac{6\eta(0)U}{h_{av}}$$

$$P = \frac{p - p_a}{\Lambda}, \quad P_{sp} = \frac{f_L}{2\Lambda b r_j}, \quad T_{sp} = \frac{f_F}{2\Lambda_F b r_j}$$

式中 f_L 是轴承承载力, f_F 是摩擦力, b 是轴承宽度。在半 Sommerfeld 条件下积分无量纲压力得到表示承载能力的无量纲比压 P_{sp} 的两个分量:

$$(P_{sp})_{\xi} = \frac{B^2 \epsilon^2}{3(1 - \epsilon^2)^2} \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \times \left[1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{4}{3(1 - \epsilon^2)} \right]$$
$$(P_{sp})_{\eta} = - \frac{TB^2 \epsilon}{12(1 - \epsilon^2)^{1.5}} \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \times \left[1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{1 - \epsilon^2} \right] \quad (5)$$

摩擦应力包括由压力流动和由剪切流动引起的摩擦应力两个部分。对于压力流动的摩擦应力只在 $[0, \pi]$ 的区间内积分, 而剪切流动的摩擦应力则在全周 $[0, 2\pi]$ 的区间内积分, 结果得到的无量纲比摩擦力 T_{sp} 为:

$$T_{sp} = \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{\pi}{3\sqrt{1 - \epsilon^2}} \left[1 + \frac{B^2 \epsilon^2}{4(1 - \epsilon^2)} \right] \times \left[1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{1 - \epsilon^2} \right] \quad (6)$$

由式(4)~(6)可以看到, 均匀外加磁场对铁磁流体润滑膜性能的影响, 实际上是通过改变 $\eta(H)$ 和 $\eta(H)$ 来实现。对于具有拟塑性体流变特性的铁磁流体, 其 $\eta(H)$ 是负的, 它表示剪切稀化。式(4)~(6)清楚地表示润滑膜的压力、承载能

力和摩擦均因润滑剂的剪切稀化而降低。

图 1 是外加磁场强度 H 对铁磁流体润滑膜压力分布的影响。其铁磁流体的特性为:

$$\eta(H) = (16.73 + 9.35H - 332H^2) 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta(H) =$$

$$- (0.0576 + 3.30H - 1.32H^2) 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}^2$$

H 增高而轴承内的压力也随之增大, 但压力峰位置几乎不受外加磁场影响。在偏心率 $\epsilon = 0.5$ 时, 大约保持为 145° 与牛顿流体润滑膜基本一致。当 H 低于 0.03 MA/m 以后, 铁磁流体润滑膜的压力水平比牛顿流体润滑膜的还低, 这说明剪切稀化作用此时已超过了外加磁场的贡献。

图 2 是 P_{sp} 与 T_{sp} 随 H 的变化。由于外加磁场增强使铁磁流体的粘度增大, 所以无量纲比压 P_{sp} 与无量纲比摩擦力 T_{sp} 同时增大。在外加磁场强度低于 0.03 MA/m 以后, 表示承载能力的 P_{sp} 因剪切稀化而低于牛顿流体, 这表明, 除了为抑制侧泄以外, 将铁磁流体使用于无磁场的轴承间隙中是不合理的。

图 3 表示剪切速率 D 对 P_{sp} 和 T_{sp} 的影响。由于铁磁流体的剪切稀化使 P_{sp} 和 T_{sp} 均随 D 的增大而下降。然而由于外加磁场强度比较高, 达到 0.12 MA/m , 故在 $D = 1.2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 的剪切速率下, 承载能力 P_{sp} 仍然高于牛顿流体润滑膜的。铁磁流体润滑膜的实际有量纲承载力与剪切速率的关系低于正比的关系, 这一点与普通牛顿流体显著不同。所以, 用外加磁场来提高轴承的承载能力, 既可在自作用轴承中实现低速下的大承载力, 又可以避免高速下的不安全问题。

图 4 是铁磁流体润滑轴承的姿态角与牛顿流体润滑轴承的比较。由图 4 可以看到均匀外加磁场的强度和剪切速率对轴承的姿态角 φ 几乎没有影响, 因此, 在小偏心率下铁磁流体润滑的轴颈轴

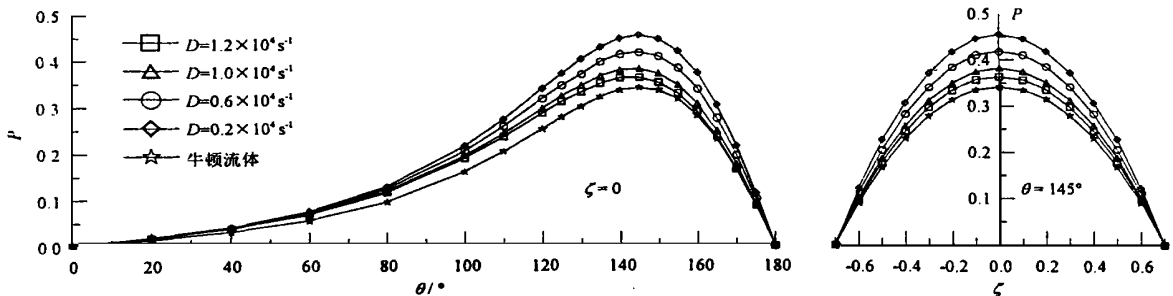


图 1 外加均匀磁场 H 对铁磁流体润滑膜压力的影响 ($D = 10^4 \text{ s}^{-1}$, $\epsilon = 0.5$)

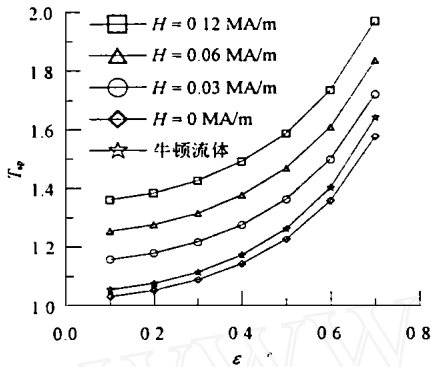
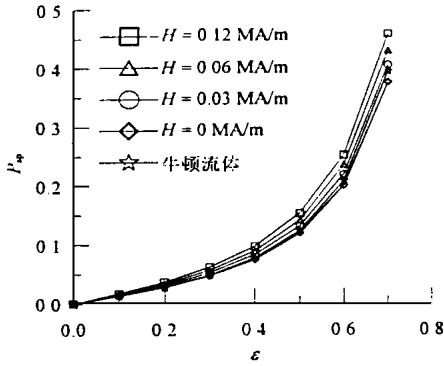


图 2 P_{sp} 与 T_{sp} 受 H 的影响
($D = 0.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $B = 0.7$)

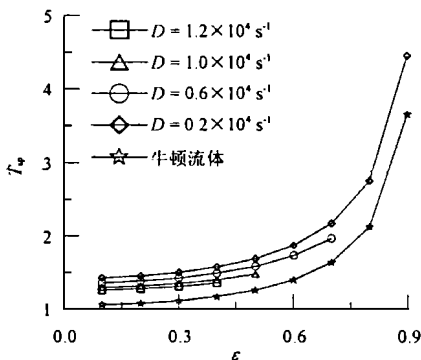
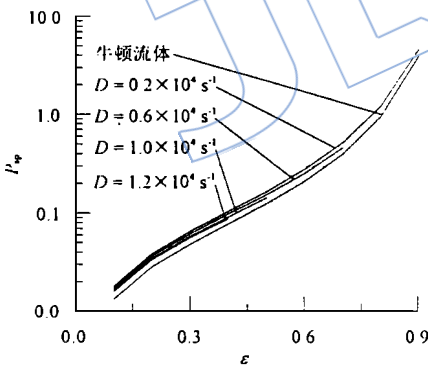


图 3D 对 P_{sp} 与 T_{sp} 的影响 ($H = 0.12 \text{ MA/m}$, $B = 0.7$)

承与普通牛顿流体轴承具有同等的涡动倾向。

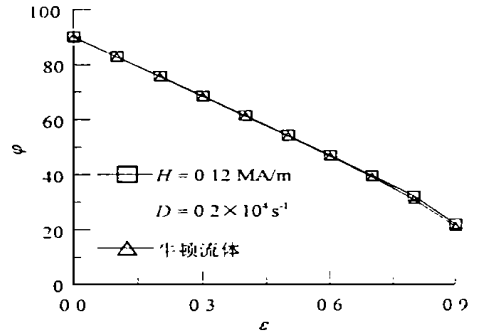


图 4 姿态角 φ 随偏心率 ϵ 的变化 ($B = 0.7$)

3 宽轴颈轴承

在宽轴颈轴承的假设下, (2) 式简化成为:

$$\frac{d}{d\theta} \left[\frac{h^3}{\eta(H)} \frac{dp}{d\theta} \right] = 6U r_j \frac{dh}{d\theta}$$

对于宽轴颈轴承, 两侧是否存在铁磁流体密封或密封是否与润滑膜分离, 对求解上式均不产生影响。无量纲压力分布由积分上式得:

$$P = - \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \left\{ 1 - \frac{4 - \epsilon^2 + 3\epsilon \cos \theta}{(2 + \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)} f + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{4 - \epsilon^2 + 3\epsilon \cos \theta}{2(2 + \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)} + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{4f}{3(2 + \epsilon^2)} \left[1 - \frac{1 - \epsilon^2}{2(1 + \epsilon \cos \theta)^2} - \frac{5(4 - \epsilon^2 + 3\epsilon \cos \theta)}{4(1 - \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)} \right] \frac{\epsilon \sin \theta}{(1 - \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)} \right\} \quad (7)$$

式中

$$f = \frac{1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{2 + \epsilon^2}{2(1 - \epsilon^2)}}{1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{2 + 3\epsilon^2}{(1 - \epsilon^2)(2 + \epsilon^2)}} \quad (8)$$

$$\text{最大压力截面 } H_0 = \frac{2(1 - \epsilon^2)}{2 + \epsilon^2} f \quad (9)$$

对于拟塑性体, $\eta(H) < 0$, $f > 1$; 对于触变体, $\eta(H) > 0$, $f < 1$ 。

由压力积分得到表示承载能力的无量纲比压 P_{sp} 的两个方向的分量:

$$(P_{sp})_{\xi} = - \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{1}{2} \left\{ P \sin \theta - \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{1 + \epsilon \cos \theta} - \left(\frac{1 - \epsilon^2}{2 + \epsilon^2} f - \frac{1}{2} \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \right) \frac{1}{(1 + \epsilon \cos \theta)^2} - \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{2(1 - \epsilon^2)f}{3(2 + \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)^3} \right] \right\} \theta_c \quad (10)$$

$$(P_{sp})_{\eta} = \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{1}{2\epsilon} \left\{ P(1 + \epsilon \cos \theta) - \left[\frac{2(1 - \epsilon^2)}{2 + \epsilon^2} f - \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \left(1 - \frac{4 - \epsilon^2 + 3\epsilon \cos \theta}{(2 + \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)} f \right) \right] \right\} \times$$

$$\frac{\epsilon \sin \theta}{(1 - \epsilon^2)(1 + \epsilon \cos \theta)} + \left[\frac{\epsilon^2}{(2 + \epsilon^2) \sqrt{1 - \epsilon^2}} + \frac{1 - f}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \left(\frac{2}{2 + \epsilon^2} + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{1 - \epsilon^2} \right) \right] \times$$

$$A \operatorname{rcsin} \frac{\epsilon + \cos \theta}{1 + \epsilon \cos \theta} \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (11)$$

式中: θ 和 θ 分别是完整润滑膜的起点和终点, 在上面的两式中 θ 总是取为零。

(1) 全周 Sommerfeld 解

取 $\theta = 0, \theta = 2\pi$, 得到:

$$(P_{sp})_{\xi} = 0 \quad (12)$$

$$(P_{sp})_{\eta} = - \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{\pi}{\epsilon \sqrt{1 - \epsilon^2}} \left[\frac{\epsilon^2}{2 + \epsilon^2} + \left(\frac{2}{2 + \epsilon^2} + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{1 - \epsilon^2} \right) (1 - f) \right] \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可见 $\varphi \propto \pi/2$ 。这再次表明均匀外加磁场和剪切稀化对 φ 实际没有影响。

(2) 半周 Sommerfeld 解

取 $\theta = 0, \theta = \pi$, 得到:

$$(P_{sp})_{\xi} = \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{2(1 - f) + \epsilon^2}{(1 - \epsilon^2)(2 + \epsilon^2)} \left[1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \times \frac{|U|}{h_{av}} \left(\frac{1}{1 - \epsilon^2} \right) \frac{6(1 - f) + (3 - 2f)\epsilon^2}{6(1 - f) + 3\epsilon^2} \right] \quad (14)$$

$$(P_{sp})_{\eta} = - \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{\pi \epsilon}{2(2 + \epsilon^2) \sqrt{1 - \epsilon^2}} \times \left[1 + \frac{1 - f}{\epsilon^2} \left(2 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{2 + \epsilon^2}{1 - \epsilon^2} \right) \right] \quad (15)$$

由表面上的摩擦应力积分得出 T_{sp} :

(1) 全周 Sommerfeld 解

将摩擦应力在整个圆周上积分得到:

$$T_{sp} = \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{\pi}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \times \left[\frac{2}{3} \left(1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{1 - \epsilon^2} \right) - \frac{2f}{2 + \epsilon^2} \left(1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{2 + \epsilon^2}{1 - \epsilon^2} \right) \right] \quad (16)$$

(2) 半周 Sommerfeld 解

将压力流产生的剪切应力分量在 $[0, \pi]$ 上积分, 而剪切流产生的剪切应力分量在全圆周 $[0, 2\pi]$ 上积分, 得到:

$$T_{sp} = \frac{\eta(H)}{\eta(0)} \frac{\pi}{2\sqrt{1 - \epsilon^2}} \times \left[\frac{1}{3} \left(1 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{1}{1 - \epsilon^2} \right) - \frac{f}{2 + \epsilon^2} \left(2 + \frac{\eta(H)}{\eta(H)} \frac{|U|}{h_{av}} \frac{2 + \epsilon^2}{1 - \epsilon^2} \right) \right] \quad (17)$$

在式(4)~(17)中, 若取 $\eta(H) = 0$, 则所有各式均退为牛顿流体润滑的结果。

图 5 是外加磁场强度对宽轴颈轴承的铁磁流体润滑膜性能的影响。在低偏心率 ϵ 下, 承载能力 P_{sp} 随外加磁场强度增大比较平缓, 而在高偏心率下, 则增加显著, 这说明铁磁流体润滑的轴承能较好地适应重载荷(大偏心率)的工况。

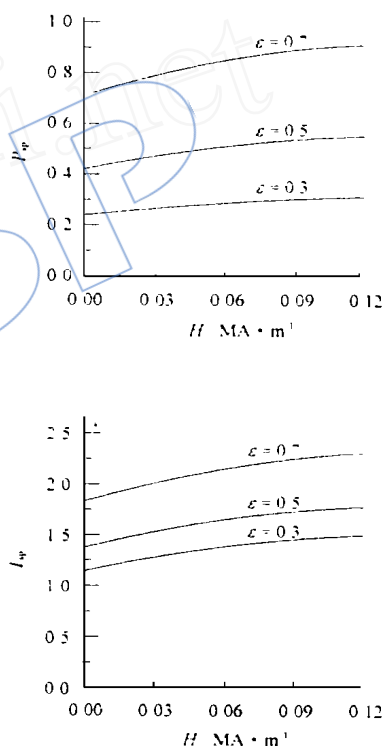


图 5 外加磁场强度 H 对铁磁流体轴承性能的影响

($D = 0.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)

图 6 表明当偏心率 $\epsilon = 0.5$ 时, 在不同的外加磁场强度下, 铁磁流体轴承的性能随剪切速率 D 的变化。由图可见, 在低外加磁场强度下, 其承载能力 P_{sp} 随剪切速率变化平缓, 而在高外加磁场下, P_{sp} 随 D 的减小而显著增大, 这说明在高磁场和低速下铁磁流体轴承有较好的性能。

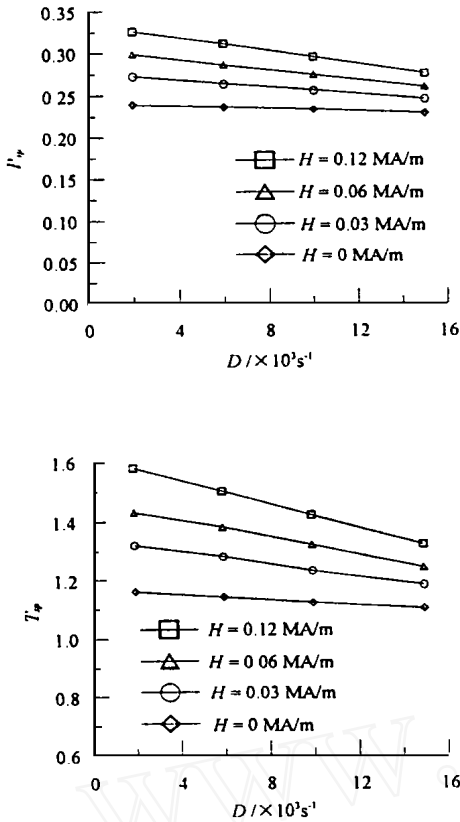


图 6 铁磁流体轴承的性能随外加磁场强度和剪切速率的变化 ($D = 0.6 \times 10^3 s^{-1}$, $\epsilon = 0.5$)

4 结 论

(1) 除非必须抑制侧泄的场合以外, 铁磁流体不宜于在无外加磁场或低外加磁场的状况下用作润滑剂, 因为此时其承载能力比普通牛顿流体低。

(2) 在高外加磁场下, 铁磁流体润滑的自作用轴承可以提供较好的低速重载性能。

(3) 均匀外加磁场和剪切稀化对铁磁流体轴颈轴承的姿态角影响甚微。

参 考 文 献

- Scholten P C, Felijs J A P. The Magnetical and Rheological Behavior of Aggregate Magnetic Suspensions[J]. JMMM 1990, 85: 107- 113
- Matsuno Y, Arai K, Yamamoto H. Magnetic Fluid Flows in a Two-Dimensional Channel[J]. JMMM 1993, 122: 204- 206
- Kamiyama S, Koike K, Wang Z S. Rheological Characteristics of Magnetic Fluids [J]. JSME International Journal, 1987, 30 (263): 761- 766
- Grants A, et al. Rheological Properties of Magnetite Magnetic Fluid[J]. JMMM 1990, 85: 129- 132
- Rosenswig R E. Ferrohydrodynamics [M]. Cambridge University Press, 1985: 63- 66
- Zhang Y. Static Characteristics of Magnetized Journal Bearing Lubricated with Ferrofluid [J]. Trans ASME J. of Tribol. 1991, 113: 533- 538
- Constantinescu V N, et al. Sliding Bearings[M]. New York: Allerton Press Inc, 1985: 82- 86
- Sun D C. On the Magnetic Sealing Capability of Ferrofluid-Lubricated Journal Bearings[C]. Proc R. Soc Lond, Series A. 1986, 404: 69- 88
- Chang H S, Chi C Q, Zhao P Z. A Theoretical and Experimental Study of Ferrofluid Lubricated Four-Pocket Journal Bearings [J]. JMMM 1987, 65: 372- 374
- Chi C Q, Wang Z S, Zhao P Z. Research on a New Type of Ferrofluid-Lubricated Journal Bearing[J]. JMMM 1990, 85: 257- 260

(责任编辑 王震华)

Performance of Ferrofluid Lubricated Journal Bearing

Chi Changqing

(Dept of Mech Eng, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The load carrying capacity of the ferrofluid lubricating films can be increased directly by means of the applied magnetic field. The ferrofluid behaves simultaneously as a Binghamoplastic and as a pseudoplastic. The constitutive equations of the ferrofluid can be expressed as $\tau(H, D) = \tau(H) + \eta(H)D + \eta_l(H)D^2$. When the uniform applied magnetic field intensity increases from zero to 0.12 MA/m, the load carrying capacity of ferrofluid lubricating film is enhanced by 25 per cent under the condition of high shear rate and by 35 per cent under the condition of low shear rate. So for practical purpose, the ferrofluid lubrication is used to control load carrying capacity by applied magnetic field, but not to obtain high load carrying capacity. It is necessary to make the ferrofluid seal separate from lubricating film in order to avoid restrictions on the load carrying capacity of journal bearing. The calculated results show that the uniform applied magnetic field intensity and the shear rate have little effect on the attitude angle.

Key words ferromagnetic flow lubrication; magnetic field; bearings