

磁性液体密封试验研究

芮菁 顾建明 徐烈

(上海交通大学低温中心, 上海 200030)

(收稿日期 1997-02-21)

EXPERIMENTAL STUDY FOR MAGNETIC FLUID SEAL

Rui Jing Gu Jianming XuLie

(Cryogenics Laboratory, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: In this paper, computation and experimental study of the seal capacity for magnetic fluid seal was carried out based on the theory of the magnetic fluid seals. It is believed that if the magnetic fluid can be supplemented into the gap while applying the pressure differential the effect will be better. The difference between experiment and theory was discussed throughout the paper.

Keywords: Magnetic fluid, Seal, Test.

摘要: 在磁性流体密封理论的基础上计算了磁性流体密封的耐压能力, 并进行了实验研究。结果表明当间隙在 0.05~0.3 mm 之间时密封能力较好。讨论了理论和实验结果之间的差异。

关键词: 磁性液体、密封、试验。

分类号: O513、TB42、TM 155.45。

磁性液体是一种新型的磁性材料, 自 60 年代美国首先在实验室研制成功以来, 几十年来发展迅速。由于磁性液体具有独特而奇妙的特性, 不仅在密封、润滑、浮选、研磨、抛光及阻尼器等机械方面的应用得到不断开发。同时在热学、光学、声学、医学上磁性流体密封也有着日益广阔的应用前景^[1]。这种兼具磁性与流体特性的新材料的应用研究领域在不断拓宽, 应用水平也在不断提高。然而性能良好的磁性液体种类少、产量小、价格贵。在国内, 磁性液体的制备与应用主要停留在实验阶段, 这在一定程度上制约了它的应用研究。从目前磁性液体的密封研究来看, 在下述诸方面是很有意义的: 1) 研制界面不相掺混的磁性液体, 实现液体介质的密封; 2) 研制具良好导电性的磁性液体, 解决一切相对运动件之间的电流传输问题; 3) 研制低饱和蒸气压的磁性液体, 并研究其在密封上的应用。

1 磁性液体

磁性液体由三种成分组成^[2]: 1) 基液; 2) 磁性固体微粒, 一般为 Fe_3O_4 颗粒, 直径通常为 $2.5 \times 10^{-9} \sim 15 \times 10^{-9} \text{ m}$; 3) 表面活性分散剂。将分散于基液中的磁性固体微粒包覆, 使磁性固体微粒不能自行凝聚而发生沉淀, 从而得到稳定的胶体。其性能如表 1。

目前国内磁性液体未能大量投入实用。主要在于市场上的磁性液体品种单一、价格昂贵。而且是少数单位的小批量试产, 性能亦不稳定。如何在高磁感应饱和强度、低粘度、低挥发性等互相干扰的要求中达到最佳性能还需更进一步研究。本次研究, 主要使用了西南磁学研究所生产的磁性液体。

表 1 几种磁性液体的性能

载液	水	煤油	透平油 30 [#]
磁化强度/(kA/m)	14	15	17
密度/(g/cm ³)	1.27	1.2	1.23
粘度/(25℃)	4	105	140
蒸发量/(g/cm ²)	—	—	6.4×10^{-5}
饱和蒸气压/kPa	3.2	—	2×10^{-5}

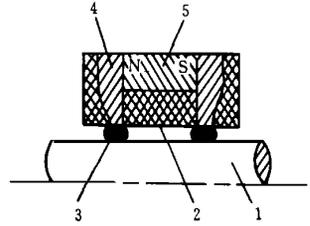


图 1 磁流体密封原理

1—转轴；2—绝磁材料；3—磁性液体；4—磁极；5—永久磁铁

2 密封实验装置

2.1 磁路设计

目前,密封结构的几何设计已经初步规范化^[3]。但是这些数据不是一成不变的。在一些重要场合下,应当按具体的情况进行优化设计,以取得最佳的组合结构尺寸等。

密封部分原理如图 1。由永久磁铁在磁路中产生强磁场,将磁性液体保持在密封间隙内形成液体“O”形环,磁场力与外加压差相平衡。本实验设计的外磁式静态磁路,根据工作气隙磁场的要求,确定磁路结构和选用磁性材料。极齿形状设计参考文献^[4]。实验选材为铁氧体,根据其性能,初步选取工作点。利用文献^[2]中公式 $B_q = B_m S_m / K_f S_q$ 反复叠代,直到气隙的饱和磁感应强度 B_q 在 0.02~0.08 T 之间。此时满足密封所需强度,方可最后确定工作点。据本实验条件,设气隙为 0.3 mm,气隙磁感应强度为 0.0615 T。其中, K_f 为待定常数; B_m 、 S_m 分别为磁极的磁感应强度和截面积; S_q 为气隙面积。

2.2 实验装置

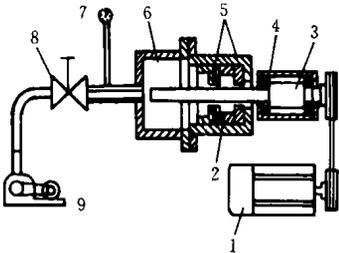


图 2 密封试验装置

1—电机；2—永磁体；3—转轴；4—轴承座；5—磁极；6—密封腔；7—压力表；8—阀门；9—压力泵

密封试验装置如图 2 所示。它由压力泵、密封腔、永磁体与磁极、转轴和电机等组成。电机与转轴之间由皮带来传动,用不同的直径皮带轮实现转速的改变。并配备几组密封间隙不同的磁极。在实验中研究密封间隙与耐压的变化关系。对于密封有效判断还没有一个统一的标准。本次实验中,因压差不是很大,所以在一定的转速和一定压力下,当压力表的读数在一天后没有改变,便认为密封有效。

3 磁性液体的理论密封能力

静止条件下的密封能力取决于磁极环和轴表面间的磁场梯度。为了造成所必要的磁场梯度,磁极环做成带扩张角的形式。间隙小的一边是高压区,而间隙大的一端是低压区。在使用 Bernoulli 方程时要作以下三个假设:1) 磁性液体本身的重力和磁场力相比较可以忽略;2) 磁力线可以近似用圆弧代替,并且认为等磁场线与磁力线相重合;3) 忽略磁性液体的表面张力。

于是有 Bernoulli 方程: $P_1^* - \mu \int_{H_1}^1 M dH = P_2^* - \mu \int_{H_2}^2 M dH$; 边界条件: $P_1^* = P_1, P_2^* = P_2$ 。式中, P_1^*, P_2^* 为磁性液体界面所受压力; μ 为磁导率; M, H 分别为磁性液体的磁化强度和气隙的磁场强度。将边界条件代入方程, 并假定磁流体在最小间隙处达到饱和和磁化强度 M_s 时, 分段积分有

$$\Delta P = \mu M_s (H_1 - H_2) + \mu \int_{H_2}^{H_1} M dH$$

另外, 从磁性液体工作时的情况可以推出如下的运动方程组

$$\begin{cases} -\frac{\rho \dot{u}}{r} = -\frac{\partial P^*}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \int_0^{\dot{u}} \mu M dH \\ 0 = -\frac{\partial P^*}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{\dot{u}} M dH \end{cases}$$

式中, ρ 为磁性液体的密度, 一般假设为常数; \dot{u} 为磁性液体周向速度; r, z 为径向和轴向座标变量; H 为外磁场强度; M 为磁化强度; μ 为真空磁导率。

将上式写成全微分形式并积分可得

$$-P^* + \int_0^{\dot{u}} \mu M dH = \rho (r_j \omega)^2 \left(\ln \frac{r_p}{r_p - r_j} \right)^2 \left(\ln \frac{r}{r_p} - 2 \frac{r}{r_p} + \frac{1}{2} \frac{r^2}{r_p^2} \right) + c$$

式中, c 为积分常数; ω 为转速; r_p 为磁极环上一点与轴心间距离; r_j 为转轴半径。密封能力最大时磁流体密封环的断面如图 3。磁流体 CD 界面向里收缩是压力 P_i 和离心力的共同作用。而 AB 界面向里收缩却主要是离心力使磁流体表面的变形。显然 AB 界面是等压面, 即 P_A 与 P_B 相等。在 AB 界面上使用上式并代入 Bernoulli 方程式的右边, 便得密封能力表达式

$$\Delta P_{max} = P - P_a = \int_{H_A}^{H_D} \mu M dH + \rho (r \omega)^2 \left\{ \left[\left(1 - \frac{r_i}{r_p} \right)^{-2} \left(\ln \frac{r_i}{r_p} + \frac{1}{2} \frac{r_i^2}{r_p^2} \right) \right]_B + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{r_i}{r_p} \right)^{-2} \right\}$$

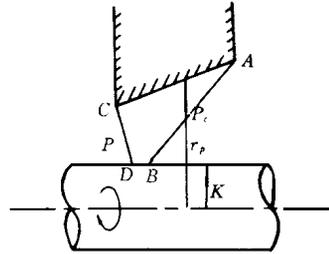


图3 磁流体密封断面

离心力的存在降低了密封能力, 为此本实验在磁极两旁都添置了绝磁材料。增大图 3 中 DB 间的距离, 也加大了 H_A 与 H_B 的差值, 从实验中可观察到密封能力有较大提高。

由于转轴偏心的影响, ΔP_{max} 有所下降。根据文献^[5], 存在偏心影响系数

$$\beta = \frac{R_1^2 - R_2^2 - t^2 + [(R_1^2 + R_2^2 - t^2)^2 - \Phi^2 R_2^2] + 2tR_2}{R_1^2 - R_2^2 - t^2 + [(R_1^2 + R_2^2 - t^2)^2 - \Phi^2 R_2^2] - 2tR_2}$$

实际的密封能力: $\Delta P_{max}^* = \beta \Delta P_{max}$

式中, t 为偏心距; Φ 为磁势函数; R_1 为磁极内径; R_2 为转轴直径。

由此表达式可见磁场最弱点在最大间隙处: $x = -R_2, y = 0$ 。文献[7]建议 $\beta = 0.8$ 。

4 实验结果

在一定转速和一定压力下, 实验规定密封时间长达一天便属密封有效。在实验过程中, 当壳体腔内的压力超出耐压极限时, 磁性液体发生破裂。绝大多数情况下破裂与喷射只发生在局部区域, 说明在这一圆周位置上密封能力较弱。由实验观察发现, 各次破坏位置不尽相同, 这就表明局部性薄弱的主要起因在于磁极与磁套的不同心度。当压力表显示密封破坏时, 若立即停

止加压,残余的磁性流体能自动愈合,重新实现较低压差下的密封。

在本试验中,已知参数:单级密封长度 $l=2\text{ mm}$;密封间隙 $0.1\sim 1\text{ mm}$;转速 $2\ 800\sim 15\ 000\text{ r/min}$ 。同时参考文献^[1]密封齿空间磁场分布,计算得到两条理论曲线。与实验曲线相比较,在数值上有一差距,但定性分析完全一致。见图4、图5。由图可见,密封能力随级数增大并不能无限上升,因为多级密封的耐压能力是各个单级的累加。当级数较少时,耐压能力与级数几乎成正比。增至一定级数后,磁路中总磁通基本不变(当永磁材料尺寸一定时,所能产生的总磁通一定),压差也就不变。随着间隙增大,磁场强度急剧下降。当间隙 h 大于 0.5 mm 时,密封能力已很小。实验结果表明间隙在 $0.05\sim 0.3\text{ mm}$ 之间密封能力较好。

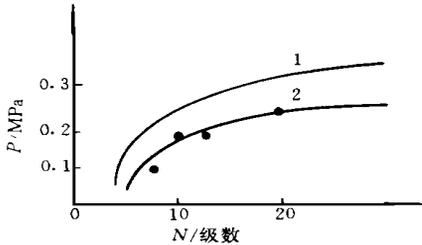


图4 密封级数与密封能力($h=0.15\text{ mm}$)
(曲线1为理论曲线;曲线2为实验曲线)

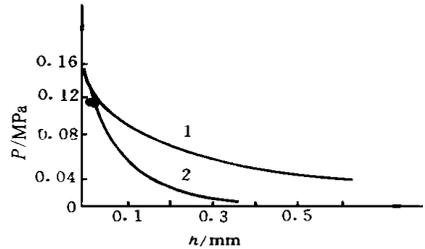


图5 密封间隙与密封能力(单级)
(曲线1为理论曲线;曲线2为实验曲线)

参 考 文 献

- 1 池长清,王之珊. 铁磁流体力学. 北京:北京航空航天大学出版社,1993
- 2 周文运. 磁性流体概述. 仪表材料,1981,12(3)
- 3 李文彬. 磁力应用工程. 北京:兵器工业出版社,第二版 1991
- 4 Mulukutla S S. Magnetic field analysis of ferrofluid seals for optimum design. J. Appl. Phys., 1984, 55(6):15
- 5 张世伟,李云奇. 轴偏心与磁流体密封耐压的关系. 润滑与密封,1996(2)
- 6 施文康,陈文元. 旋转轴的磁流体密封技术. 磨床与磨削,1989(3)
- 7 Bailey R L. The design and operation of magnetic liquid shaft seals. In Berkovsky. Bed. Thermomechanics of Magnetic Fluid, 1987:299~312

作者简介:芮菁,女,1973年10月生,籍贯浙江。1990年进入沈阳航空工业学院,主修机械工程。1994年改入上海交通大学动力机械工程系,攻读硕士学位。学位论文是《磁性流体密封》。1997年3月硕士研究生毕业。