

磁性流体及其应用

郭 华 聪

(四川大学原子核科学技术研究所)

磁性流体是一种强磁性液体，是用 100 \AA 以下的 Fe_3O_4 等磁性微粒稳定地分散在水和油中形成的磁性胶体溶液，在重力和磁场的作用下也不发生凝聚和沉淀。

1965 年美国的 Papell 首先研制成功磁性流体。在七十年代后期，美、日、苏和英等国的研究工作迅速发展，美国还成立了专门生产磁性流体和开发其应用的“磁性流体公司”。从 1977 年开始，定期三年一次召开磁性流体国际会议。第四次磁性流体会议将于 1986 年 7 月在日本召开。到 1983 年为止，在这个领域中发表的专利超过 600 份，发表的文章超过 1500 篇，其中应用文章为 226 篇。磁性流体的应用范围很广^[1]，例如应用于密封，比重差分离，阻尼器、轴承，喷射印刷，磁分离，润滑，磁记录等等。

一、磁性流体的性质

在磁性流体中，除了热运动外，两个磁微粒之间受到三种力的作用，即长程磁吸引力、短程范德瓦尔斯力和由表面活性剂产生的排斥力。只有当排斥力大于吸引力时，磁性流体才能保持稳定。Popplewell 给出计算磁能的公式，当两个磁粒子相接触时，其磁能

$$E_m = -\mu_0 \pi D^3 M_s^2 / 72,$$

其中 D 是粒子直径， M_s 是单位体积的磁化强度。当磁能 E_m 小于热能 kT 时，热运动就能阻止粒子凝聚。计算表明，当 Fe_3O_4 粒子直径小于 100 \AA ， Fe 粒子的直径小于 30 \AA 时，才能满足这个条件。图 1 是两个磁粒子的势能曲线，其直径 $D = 100 \text{ \AA}$ ，磁化强度 $M_s =$

1000 kAm^{-1} ，表面活性剂链长 $\delta = 20 \text{ \AA}$ 。三种力总的的作用结果使得总势能曲线有一个约 $25 kT$ 的势垒，可以阻止磁粒子凝聚。

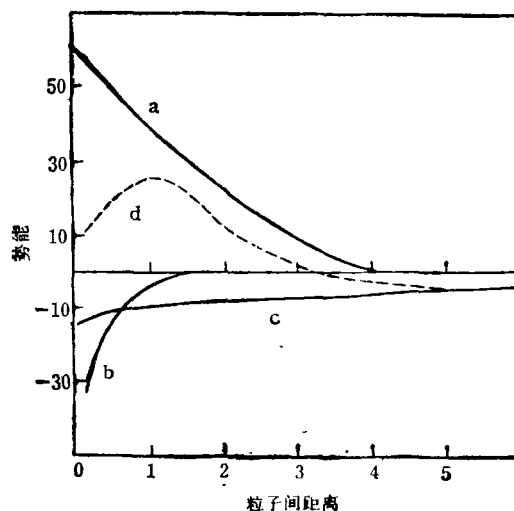


图 1 两个磁粒子的势能曲线
曲线 a 表示表面活性剂排斥力；曲线 b 表示范德瓦尔斯力；曲线 c 表示长程磁吸引力；曲线 d 表示总势能曲线

磁性流体的伯努利方程为

$$P + \frac{1}{2} \xi v^2 + \rho gh - \mu \int_0^H M dH = \text{常数}, \quad (1)$$

式中 P, v 和 ρ 是磁性流体的压力、速度和密度， μ 是真空磁导率， M 是磁化强度， H 是外磁场强度， g 是重力加速度， h 是磁性流体相对高度。这里比一般流体多了一个磁能的作用。由于磁能同压力、动能和势能的相互作用，使磁性流体具有一些特殊的性质。图 2 (a) 表示磁能和压力的相互作用，压力 P_1 大于 P_2 。由于磁能的作用，

$$P_1 = P_2 - \mu \int_0^H M dH,$$

使磁性流体保持平衡。这个原理可用于磁性流体密封和轴承。图 2 (b) 表示磁能和动能相互作用。由于磁能作用,使速度 v_2 大于 v_1 , 有

$$\frac{1}{2} \rho v_2^2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \mu \int_0^H M dH.$$

这个原理可用于磁性墨水的喷射印刷。图 2(c) 表示磁能和势能的相互作用。在磁能作用下,磁性流体可从自由表面上升一段高度,有关系式:

$$\rho gh = - \mu \int_0^H M dH.$$

这个原理可用于非磁性固体的比重差分离和比重计。

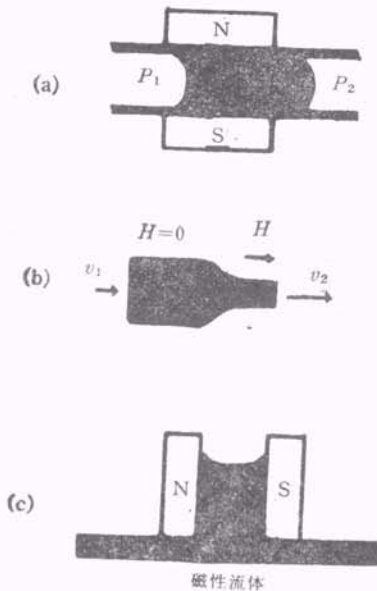


图 2 磁性流体的性质

- (a) 磁能和压力相互作用 $P_1 > P_2$
 (b) 磁能和动能相互作用 $v_2 > v_1$
 (c) 磁能和势能相互作用

磁性流体在外磁场作用下,有光的双折射现象,有双色性,还有法拉第旋转现象。利用这些性质,有可能制作光学开关和快门。磁性流体具有超顺磁性,其磁化曲线无磁滞现象。另外,在旋转磁场中,磁性流体会出现涡流等现象,这些现象目前还不能很好解释^[2-4]。

二、磁性流体的制造

1965 年 Papell 用粉碎法制得磁性流体,他把 Fe_3O_4 小块放在含有油酸的有机溶液中长时间粉碎,得到了磁性流体。这种方法的缺点是制造时间太长。1966 年日本的下饭坂润三发明水溶液中吸附的方法(称为有机相分散法)。在水溶液中使油酸离子吸附在用湿法制得的 Fe_3O_4 微粒表面,经水洗脱水后进行分散处理,这个方法现在是磁性流体工业生产的主要方法。1972 年美国 Khalaflla 提出和第二种方法类似的解胶法,即在二价和三价铁离子混合液中加入碱,然后再将这种混合溶液倒入含有油酸的煤油中,在一定温度下加热。

美国的磁性流体公司和日本的东北金属工业株式会社都专门生产磁性流体。表 1 列出日本生产的一些磁性流体的性能。

表 1 磁性流体性能

	W-35	HC-50	DEA-40	LS-20	LS-40	LS-60
饱和磁化	360	420	400	200	305	560
比重(25°C)	1.35	1.30	1.35	1.19	1.33	1.67
粘度(25°C, CPS)	30	30	400	170	320	1600
沸点(°C)	100	180-212	335	250	250	250
流动点(°C)	0	-27.5	-72.5			
引出点(°C)		65	192	225	225	225
蒸气压 T (60°C)			2.5 (200°C)	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-7}
分散介质	水	煤油	双酯	二十烷萘	二十烷萘	二十烷萘
应用例子	比重差分离, 研磨	比重差分离, 废水处理	密封, 阻尼器, 轴承	防尘密封	真空密封	高压密封

三、磁性流体密封和轴承

根据磁能和压力的相互作用发展起来的磁

性流体密封技术,已经到了实用阶段。

用环形磁铁把磁性流体固定在转轴表面,形成环状密封膜。这种密封的结构简单,不产生磨损和摩擦发热,可以做到完全密封,也可以从磁铁小孔补充磁性流体,还可以用多段密封来增加耐压性能。用 500 G 磁场时,密封耐压 $0.7 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$,若采用多段密封,则可用于 50atm 以上的高压密封。这种密封很适合用于放射性、毒性和腐蚀性的环境中。

磁性流体密封主要用于防尘密封和真空密封。在防尘密封中,计算机磁盘存贮器的密封是一个突出的例子。随着记录密度和转速的提高,送入加压惰性气体和迷宫式密封方法不能阻挡轴承润滑油蒸气和灰尘吸附到磁盘表面。因为高记录密度磁盘和磁头的距离只有 $0.2-0.5 \mu\text{m}$,所以尘埃的吸附将影响磁盘的可靠性。采用磁性流体密封可以很好地解决这一问题,寿命可长达 6—10 年。在半导体工业中,磁性流体密封已用于各种薄膜沉积装置,光刻和腐蚀装置。用于单晶炉的真空密封,可保持 10^{-8}Torr 以上的超高真空。日立公司的 IP-815 型强流离子注入机的靶室就是采用磁性流体密封的。

近年来国外发表的专利较多,应用的例子也较多。如用于 X 射线机的旋转靶、真空加热炉,电厂贮能大飞轮、气体激光器、发酵罐,超导电机、核辐射和宇航环境的模拟装置等。此外,还在发展一些新的密封技术,如美国 Phillips 公司研制的线性运动密封,用在人造心脏中,密封寿命至少是十年。一种把磁力和离心力联合使用的结构正在研究,高压液体和低压气体两端的密封技术也正在研究,这一技术有可能使船尾的轴密封问题得到解决。

美、日、苏等国对磁性流体轴承的研究很重视。为了克服承重能力差的缺点,他们发展一种复合结构,即将机械轴承和磁性流体组成一个整体,在轴和轴承套之间注入磁性流体,使其同时起轴承和密封作用,当转速达到 60000rpm 时也能保持密封状态,这种复合结构有可能用于船舶的螺旋推进器上(5-11)。

物理

四、比重差分离和阻尼器

根据图 2(c) 的原理,把非磁性固体放入磁性流体中,调节外加磁场 H ,使磁力大于重力,即

$$(\rho_s - \rho_L)gh < \mu \int_0^H M dH, \quad (2)$$

其中 ρ_s 为非磁固体密度, ρ_L 为磁性流体密度,这时可以使非磁固体浮到磁性流体表面。利用这个现象可以分离不同比重的非磁固体粒子。在冶金工业中,利用一般的液体浮选不能使比重大于 5 的固体浮起,而磁性流体比重差分离可以浮起任何比重的固体,也可以使要分离的固体沉积下来。日本东北大学的下饭坂等人解决了处理过程中的磁性流体回收问题,使这一技术进入实用阶段。日本日铁工业公司建立了每小时分离半吨的实用化装置,用来回收废汽车中的有色金属。

当外加磁场上升时,磁性流体的粘度增加,利用这个现象来作阻尼器,应用于音频扬声器上。磁性流体被注入扬声器的音圈间隙并被扬声器磁铁保持在这个间隙中。由于磁性流体的热导率比空气大六倍,注入磁性流体后散热效果良好,可使扬声器输入功率增加一倍以上。同时又由于阻尼作用降低了音圈的振动,改善了频率响应特性曲线,改善了扬声器的音质。美、日一些公司已有磁性流体扬声器出售^[12]。

磁性流体还可注入到永磁步进电机的转子和定子之间,作为阻尼器以改善步进电机转动的精度。

磁性流体还可以作除振器。用橡胶等弹性体不能消除 2—3 Hz 以下的超低频振动。日本东北大学研制的磁性流体除振台,取得良好除振效果,当磁性流体磁化度为 410 G 时,几乎完全消除了这种超低频振动。

磁性流体还可以代替液压传动装置,用来制作机器人的人造“肌肉”。最近日本发表一项将磁性流体用于汽车制动器并改善了制动器性能的专利。

五、精密研磨和磁性墨水喷射印刷

近年来由日本金沢大学和东京大学研究的磁性流体精密研磨技术引人注目。他们把碳化硅磨粒加入到磁性流体中,在外加磁场作用下,磨粒浮到表面,被磨工件在磁性流体中转动,进行研磨加工。曾提出过几种不同的加工方案,实验证明采用 LS-40 磁性流体的效果最好,每分钟可研磨 $0.02-0.05 \mu\text{m}$ 。这项技术的优点是加工时间短,可自动控制,可研磨各种材料,可研磨各种异性曲面,还可以内、外两面同时研磨,在机械和电子工业中有着广泛的应用^[13-17]。

用磁性流体可以制作高质量的磁性墨水,用于无铅字高速喷射印刷。美国的一些银行已使用磁性墨水印刷的支票,以便于计算机识别,保证安全。日本松下电器公司还研制了一种使用磁性流体墨水的无喷管式喷射印刷装置。

六、其它应用研究及发展趋势

在医学上,可以将磁性流体和药剂混合注射到血管中,再用磁场将药剂诱导到发病部位,进行大剂量治疗。用磁性流体阻塞动脉瘤血管,使其坏死。在光学上,磁性流体可用作显示

器、测温器和偏光器等。此外,磁性流体也可用来直接把热能转换成机械能,用于处理废水等等。制造磁性流体,现在已从使用 Fe_3O_4 微粒向使用磁性金属微粒发展,可以提高饱和磁化强度和热导率。日本最近已制出钴-铁磁性流体(专利),其饱和磁化强度高达 2460 G 。另一方面从水基磁性流体向各种油基磁性流体发展,并制造出了多种颜色的水基磁性流体。

参 考 文 献

- [1] 関 興一等, *エレクトロニク・ヤラシクス*, **73**(1984), 64.
- [2] J. Popplewell, *Phys. Technol.*, **15-3**(1984), 150.
- [3] 壁井 信之, *医科器械学志*, **53-10**(1983), 536.
- [4] 豊 田太郎, *电子材料*, 别册, (1984), 63.
- [5] E. Евсеев, *Техника и Наука*, No. 6(1981), 14.
- [6] 三宅正二郎, *真空*, **28-6**(1985), 483.
- [7] 吉田 洋一等, *油压技术*, **23-7**(1984), 66.
- [8] 神山 新一, *润滑*, **29-5**(1984), 379.
- [9] 曾我 晴美, *润滑*, **29-5**(1984), 383.
- [10] 武富 荒, *機械の研究*, **36-1**(1984), 18.
- [11] 佐藤 公男, *機械の研究*, **37-2**(1985), 253.
- [12] 石井 泰弘等, *电子材料*, **19-1**(1980), 142.
- [13] 黒部 利次, *機械と工具*, **28-8**(1984), 54.
- [14] 谷 泰弘等, *生产研究*, **35-12**(1983), 531.
- [15] 河田 研治等, *生产研究*, **36-8**(1984), 366.
- [16] 高尾正昭等, *生产研究*, **37-2**(1985), 76.
- [17] 谷 泰弘等, *生产研究*, **37-7**(1985), 257.

(上接第 328 页)

- Hobbs), *Phys. Bulletin*, **36**(1985), No. 10, 421.
- 86-29. LIDAR——用激光观测大气层的装置(R. E. W. Pettifer), *Phys. Bulletin*, **36** (1985), No. 10, 423—425.
- 86-30. 物理学与计算。(D. R. Tilley), *Phys. Bulletin*, **36**(1985), No. 11, 456—458, 参 5.
- 86-31. 固体光学的过去、现在和将来。(B. Henderson et al.), *Phys. Bulletin*, **36** (1985), No. 11, 459—462.
- 86-32. Harwell¹⁾ 的第一个四十年。(F. J. Stubbs), *Phys. Bulletin*, **36** (1985), No. 11, 463—465, 参 4.
- 86-33. 低温高压下的磁性,(藤原浩等), *固体物理* [日], **20**(1985), No. 12, 915—922, 参 39.
- 86-34. 有机超导体中的磁场感生自旋密度波相。(山地邦彦), *固体物理* [日], **20**(1985), No. 12, 930—938. 参 31.
- 86-35. GaAs 表面反转层的超导邻近效应,(高柳英明等), *固体物理* [日], **20**(1985), No. 12, 939—946, 参 23.
- 86-36. 非均匀结构的 Langmuir-Blodgett 膜,(中桐孝志等), *固体物理* [日], **20**(1985), No. 12, 947—954, 参 29.
- 86-37. $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ 的超导性和金属-半导体相变,(内田慎一等), *固体物理* [日], **20**(1985), No. 12, 955—965, 参 59.
- 86-38. 扫描隧道显微镜,(G. Binnig et al.), *Sci. Amer.*, **253** (1985), No. 2, 40—46. [中译文见《科学》,(1985), No. 12].
- 86-39. 经典真空,(T. H. Boyer), *Sci. Amer.*, **253** (1985), No. 2, 56—62. [中译文见《科学》,(1985), No. 12].

(李国栋)

1) Harwell 是英国原子能研究机构所在地。