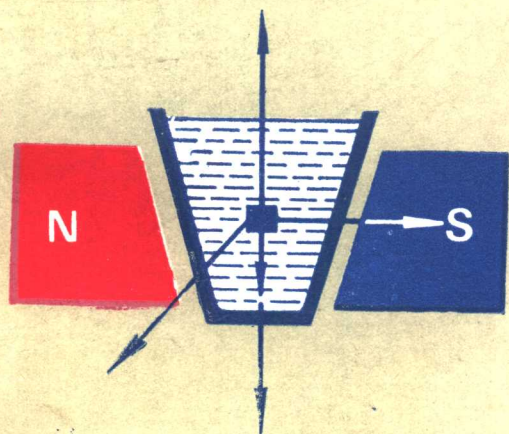


中学生课外读物



磁性液体

孙克 罗河烈 著



人民教育出版社

中学生课外读物

现代科学技术丛书

磁 性 液 体

孙 克 罗 河 烈 著

人 民 教 育 出 版 社

内 容 提 要

磁性液体是一种奇妙的液体，它在磁场的作用下可以变形或流动，在磁场变化的影响下，密度、粘度会改变。它可以用于密封高速转动的轴承、测量物质的密度、分选矿物、沙里淘金。它还是热的导体，可以使扬声器的功率提高3~5倍。它还有许多其他用途。磁性液体作为一种新型的磁性材料，现已广泛地应用在电气、机械、化学、物理等各个方面，解决了过去的许多技术难题，形成了全新的产品设计概念，受到科学技术界的广泛重视。

本书通俗地介绍了磁性液体的性质、制备和测试方法及其应用，内容丰富，可供高中学生和有中等文化程度的青年阅读，也可供中学物理教师参考。

中学生课外读物
现代科学技术丛书
磁 性 液 体
孙 克 罗河烈 著

*

人民教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

北京东光印刷厂印装

*

开本787×1092 1/32 印张2.375 字数45,000

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数 1—1,460

ISBN 7-107-10173-0

G·1059 定价 0.85元

目 录

一、前言	1
二、磁性液体的性质	4
1. 磁性液体的基本知识	4
2. 磁性液体的几个重要物理性质	10
3. 对磁性液体的基本要求和影响稳定性的主要因素	16
三、磁性液体的制备	21
1. 铁氧体在非导体液体中的磁性液体	21
2. 金属颗粒在非导体液体中的磁性液体	27
3. 在液态金属载体中的铁磁颗粒	28
四、磁性液体的测试	31
1. 磁饱和值的测量	31
2. 磁性液体磁性微颗粒尺寸的测量	34
3. 磁性液体中颗粒和表面活性剂相互作用的测定	36
4. 观察磁性液体颗粒凝聚的方法	37
5. 烘烤法判断磁性液体的时效	38
6. 红外光谱法判断载体溶液的结构	39
五、磁性液体的应用	41
1. 密封、轴承和润滑	41
2. 分选矿物	47
3. 磁性液体在扬声器中的应用	54
4. 清除污染	62
5. 磁性离合器	66
6. 测量密度	68

7. 声波换能器 ..	68
8. 阻尼和减振 ..	69
9. 磁性墨水和快速印刷 ..	69
10. 推动涡轮机 ..	70
11. 医学上的应用 ..	71

一、前 言

磁性液体(magnetic fluid),又叫磁流体。按英文名称翻译似乎后面的译名更准确一点,但不巧的是有一种等离子体发电早就称为磁流体发电,为了不至于弄混,我们觉得还是称为磁性液体好。事实上,称做磁性液体很恰当地描述了它的特性。但是有一些人,甚至制作磁性液体的人还是称它为“磁流体”。

顾名思义,磁性液体就是又有磁性又能像液体一样流动的东西。这是一种奇妙的液体。我们所知道的强磁体都是固态的,但是磁性液体在磁场的作用下可以变形或流动,在磁场变化的影响下它的密度、粘度会改变。它可以用于密封,特别是它可以密封高速旋转的转轴,这是其他方法望尘莫及的。它又可以用于测量密度,分选矿物,沙里淘金。它又是热的传导体,因而在扬声器中得到应用,使扬声器的功率提高3~5倍。它可以钻进形状很复杂的内腔中,用磁的方法检测腔壁的厚度。除了这些,它还有许多用处。磁性液体作为一种新型的磁性材料,现在广泛地应用在电气、机械、化学、物理等各个方面,它解决了过去的许多技术难题,形成了全新的产品设计概念。因而,磁性液体受到了人们高度的重视。

磁性液体实际上早在1938年就出现了。当时有一个叫埃尔莫尔(Elmore)的人,为了观察磁畴(磁体中存在的自发磁化的小区域),采用化学方法制成了 Fe_3O_4 的胶体溶液,将

这种胶体溶液涂在待观察的磁性材料表面上，就显示出磁畴的形状。但是除此而外，这种胶体溶液，在相当长的时间里，没有得到进一步的应用和研究。把磁性液体作为一种独特的材料进行研究，还是六十年代以后的事。

磁性液体的正式发明，是在 1965 年。美国国家航空和宇宙航行局(NASA)的研究人员波贝尔(S.S.Papell)为了研制转动的燃料控制机构而制成了磁性液体。当时他用煤油类物质做溶剂，将 Fe_3O_4 强磁性粉末分散到溶剂中去，制成了煤油基的磁性液体。磁性的胶体溶液非常稳定，它不因重力或磁场等的作用而凝聚，不会因 Fe_3O_4 微粒沉降而固液分离，外观上是液体而具有强磁性。六十年代以后，磁性液体越来越受到人们的注意，引起人们极大的兴趣。1977 年召开了第一次

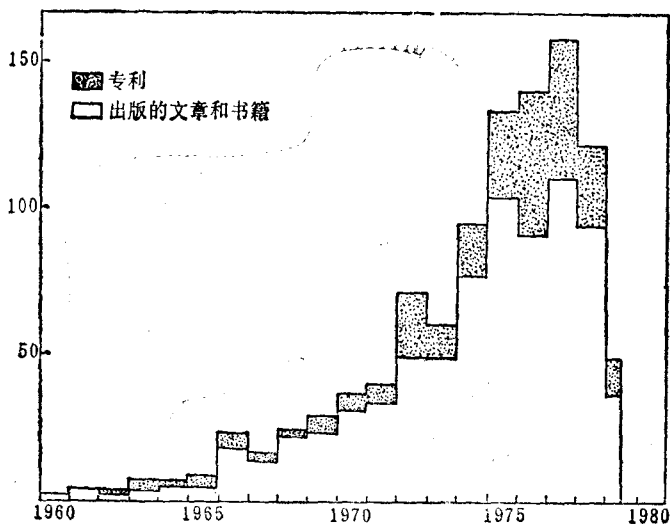


图 1 历年有关磁性液体的文章、书籍和专利数量

全世界磁性液体会议，1980年召开了第二次磁性液体国际会议，到目前为止已经召开了三次国际会议。1980年的会议编了论文和专利索引，共收集了专著808篇，专利262项。由此可以看出磁性液体的发展情况。从一张图表(见图1)可以清楚地看出，从六十年代中期开始，磁性液体的研究工作发展得十分迅速。

目前在国外已有多种磁性液体商品出售，用途也十分广泛，并且仍在继续研究，改进磁性液体的质量，扩大它的应用范围。我国从七十年代末开始开展这项工作，在应用的领域内不断取得进展，对磁性液体的物理性能等方面也进行了深入的研究，目前，研究队伍在不断壮大，前景十分喜人。

二、磁性液体的性质

1. 磁性液体的基本知识

我们知道有一些固体,如铁磁材料,有较强的磁性。把它们分成非常细小的颗粒,然后分散到水等溶液中,它们仍然是可以被磁化的。这样就可以得到均匀的液体磁性材料,它像固体一样具有磁性,却又保留了液体的性质。确切一点讲,磁性液体是一种将强磁性微粒(尺寸为10纳米左右,1纳米= 10^{-9} 米)分散在液相^①中得到的稳定的胶体溶液(又称胶态溶液或胶质溶液)。

图2是磁性液体的电子显微镜照片,照片中把微粒放大了8万倍,根据放大倍数计算,每个粒子尺寸约10纳米(100埃)。这些粒子(例如, Fe_3O_4 细颗粒)分散在载体溶液里,形成了稳定的磁性悬浮胶体。载体溶液分为水基和油基两大类,包括水、碳氢化合物、碳氟化合物、酯和双酯等。

磁性颗粒为什么会悬浮在载体溶液中呢?主要原因有两个:

(A) 因为粒子很小,热运动使微粒在液体中做无规则运动,每一个粒子都是一会往这儿,一会往那儿,其速度和方

① 这里所说的相是物体系统中的均匀部分(即物理和化学性质到处相同),它跟其他部分之间有一定的界面隔离开来。一个相可以是固体、液体或气体,可以由一种单质组成,也可以由一种化合物或均匀的混合物组成。

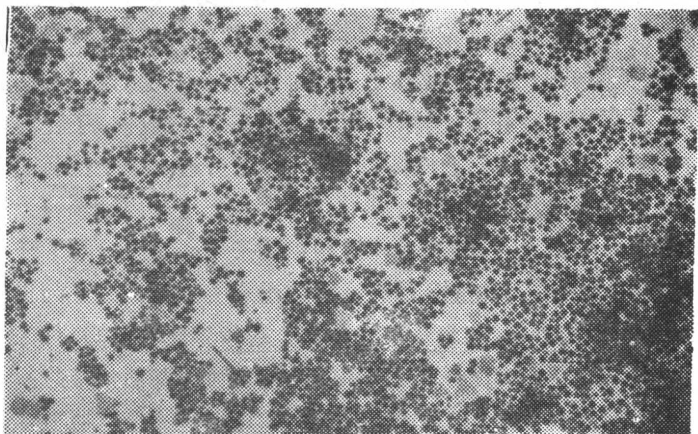


图 2 磁性液体的电子显微镜照片 (8 万倍)

向是随机变化的,就像一个大广场上有许多人在自由运动一样,这些粒子跑来跑去,并且相互碰撞,这种运动叫做布朗运动,或者称为热骚动,意思就是杂乱的、没有规则可循的运动。由于布朗运动,这些粒子就不会静止下来,也不会聚合在一起。如果颗粒较大(如铁屑),由于磁性液体中磁化颗粒之间的相互作用力与磁化强度的平方和颗粒半径的六次方成正比,磁性粒子会相互吸引而聚集在一起,在载体溶液中沉降下来。颗粒愈小,磁性颗粒间的引力就愈小,只要磁能小于热能 kT ($k=1.38 \times 10^{-23}$ 焦/K 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度),热运动就可以阻碍它们聚合,粒子就不会因磁性引力而聚集起来。计算表明,颗粒的直径为 2.5~15 纳米时,至今所知的磁性材料都可以满足这个条件。例如 Fe 的上限尺寸为 3 纳米, Fe_3O_4 的上限尺寸为 10 纳米,它们只要分别小于各自的

上限尺寸,原则上就可以克服磁相互作用力。

(B) 表面活性剂的作用。表面活性剂又称界面活性剂,通常是降低液体表面张力或二相间界面张力的物质。它们的分子中包含亲水的和憎水的两个组成部分,这些分子在液体中趋向于集中在该液体和另一相的界面,形成分子薄膜而减小表面张力,从而起润湿、乳化、分散等作用。磁性颗粒经过油酸等表面活性剂处理后,犹如在粒子外面穿上一层油酸单分子层的外衣。油酸分子有亲水和憎水的两端,或称为极性部分和非极性部分,极性部分与磁性粒子亲合,而非极性部分与溶剂(载体)分子亲合,这样油酸就在粒子与载体液之间筑起了一道“屏障”。有了这道“屏障”,可以进一步克服磁性吸引力和范德瓦尔斯引力。范德瓦尔斯引力是由于分子或原子间的电的相互感应引起的极性(即正电荷的中心跟负电荷的中心不相重合)而产生的,不管颗粒大小,在两个颗粒紧密接触时,都会有一负的势能,就是说它们是相互吸引的,要克服引力做功增大它们的势能,才能分开它们。布朗运动不能阻止由于这种力而引起的凝聚。两个粒子间的范德瓦尔斯力与其距离的六次方成反比,当球(为方便起见,把粒子看作球)表面距离等于球半径时,它们的势能等于热能。这种关系对任何尺寸的球都适用。当球表面的距离小于球半径时,吸引力增大,两球相接触时吸引力可以变得很大。但是,如果每个颗粒表面都包上一层单分子膜,颗粒便不能靠得太近,这样可以克服颗粒之间的范德瓦尔斯力,也可以进一步克服它们之间的磁吸引力(见图3)。表面活性剂添加量的比例是很小的,越是高级的表面活性剂,添加量就越少,可以少到1~2%。各个厂家对有关使用表面活性剂的情况都严加保密,想通过分析

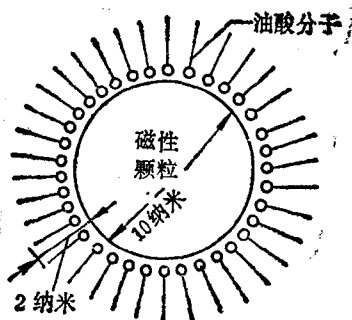


图 3 粒子表面包覆一层单分子膜的示意图

磁性液体来了解特殊表面活性剂的品种是不太容易的，有的时候由于采用复合表面活性剂，各个组分的协同作用使分析更为困难。表面活性剂的选择和使用对制作磁性液体是至关重要的，事实上，磁性液体的制作在某种意义上讲就是表面活性剂的选择和制备问题，成败的关键，可能就在于此。

这样制成的磁性液体，不会因重力或磁场而凝聚，不会由于沉降而导致固液分离，外观上好像液体一样，本身具有铁磁性。磁性液体的性质可以通过选择不同的载液来改变，磁性大小除了取决于磁性粒子本身的磁性以外，还可以通过改变磁性粒子和载液的比例来改变，一般规律是磁性粒子越多磁性越强，当然也不可以太多，太多了其他性质要变坏。磁性液棒的浓度一般为3~10%（质量比），磁性粒子在液体中的数量一般为 10^{17} 个/厘米³。磁性液体的密度一般为1.0~1.7克/厘米³，在有外磁场的情况下，磁性液体（一般地说是磁性物质）磁性的大小可以用单位体积内磁矩的矢量和来表示，也可以用

单位质量里磁矩的矢量和 σ 来表示。 M 称为磁化强度， σ 称为比磁化强度， $\sigma = \frac{M}{\rho}$ ， ρ 是磁性液体的密度。这里讲的磁矩，是一个表征平面电流回路产生的磁效应的物理量，它的大小为 $m = IS$ ，其中 I 表示回路中的电流， S 表示回路包围的面积。磁矩的方向可由右手定则来确定。

从前面的介绍可以看到，磁性液体像均匀的液体并可以高度磁化。它的饱和磁化强度一般在 0.2 特斯拉到 0.4 特斯拉 (200~400 高斯)。在一定磁场下，如果不考虑粒子间的相互作用，磁性液体的比磁化强度可以近似地用下式表示：

$$\sigma = \frac{\sigma_s}{\rho} \cdot \frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \cdot \rho_2。$$

式中 σ ——磁性液体的比磁化强度；
 σ_s ——分散粒子的比磁化强度；
 ρ ——磁性液体的密度；
 ρ_1 ——溶剂的密度；
 ρ_2 ——分散粒子的密度。

这个公式和实测数值符合得很好。上式说明，如果知道了分散质的比磁化强度和密度，又知道溶剂和磁性液体的密度，就可以求出磁性液体的磁化强度。磁性液体密度越大，它的磁化强度值也越大。这个公式可以改写成用质量百分浓度表示的公式 $\sigma = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \sigma_s$ (m_1 是载液质量， m_2 是磁性粒子总质量)，两个公式等效，由前者可以推出后者。并且从后一公式可以直接看出：磁性粒子所占的质量百分比愈大，磁性越强，磁性液体的磁性也就愈强。

在磁场中，颗粒沿磁力线取向，如果磁场不是匀强的，磁力线分布的疏密程度不一样，磁性液体将在非匀强磁场的作用下，受到一个力，它将被推向场强的方向。例如，一束磁性液体由上面流下来，本来应该竖直下落，但是如果它在旁边放一块磁铁，那么这束磁性液体将会改变原来的流向，向磁铁那一边偏移。如果两者的距离很近，磁性液体受到的力很大，将飞向那块磁铁，而吸附在它的表面。

罗森威格 (Rosensweig) 描述了匀强磁场情况下的物理过程，提出磁性液体的伯努利 (Bernoulli) 方程。通常的流体力学的伯努利方程为：

$$p + \frac{Q}{2}v^2 + Qgh = \text{常数},$$

式中的 p 、 v 和 h 分别表示流体在某处的压强、速度和高度， Q 是流体的密度， g 是重力加速度。式中左侧的三项都具有压强的量纲。这个公式的意义是：流体的压强 p 跟它的高度 h 和运动速度 v 有关。速度 v 和高度 h 越大，流体的压强越小；反之，流体的压强越大。

考虑到磁场的作用，磁性液体的伯努利方程可修正为：

$$p + \frac{Q}{2}v^2 + Qgh - \mu_0 \int_0^H M dH = \text{常数}.$$

式中 M 表示磁化强度， H 为磁场强度。这两个量之间的关系是 $M = \chi H$ ， χ 叫做磁化率，是由磁性物质本身决定的参数。这里，我们引入了一个表示磁场强弱的物理量 H ，单位是安/米，它与磁感应强度 B 的关系是 $B = \mu H$ ，其中 μ 是介质的磁导率，单位是牛/安²。真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 牛/安²。

读者可能对方程的第四项感到陌生。这个积分表示磁性

液体在磁场中出现了个附加的压强，也就是压强增大了。它的效果就好像液体的密度增大了一样。

把一个密度大于磁性液体的非磁性物体放在磁性液体内，只要加上一个适当的磁场，原先沉在底部的物体就会“漂浮”到表面上来（图4）。在磁性液体中，磁性物体也会漂浮到表面上来，所不同的是这时不一定需要加磁场，因为磁性物体本身会产生磁场，只要磁场足够强就可以出现漂浮现象。实际计算起来，磁性物体漂浮的情况要比非磁性物体漂浮的情况复杂一些。利用这个原理可以测量物体的密度。加上大小不同的磁场，磁性液体的表观密度会产生变化，可以将不同密度的物体托起来。也可以利用这个原理来分选矿物，轻的浮上来，重的沉在下面。在后面的有关章节中将对此做详细介绍。



图4 加磁场时，磁性液体中的非磁性物体将“漂浮”到表面上来

2. 磁性液体的几个重要物理性质

在前面我们介绍了磁性液体的一些基本知识，也谈到了一些简单的性质，如密度变化，在有磁场条件下表观密度的增大，粒度范围，磁性范围等。除此而外磁性液体还有许多性质，如磁学性质、光学性质和流体力学性质等，这些已有人系统地总结过。最近还有人研究了超声在磁性液体中的衰减，以及磁性液体的介电性质。在这许多重要性质中有两

个是应用磁性液体的基础。一是磁性液体的磁化曲线，二是磁性液体的动力学性质。这两个性质是必须了解清楚的。

我们首先讨论磁性液体在磁场中磁化的问题。我们已经知道，磁性液体是稳定的磁性悬浮胶体，粒子很小；其尺寸经常小于 10 纳米。这样小的粒子都是单畴颗粒，具有超顺磁性。单畴颗粒可以这样理解，每一个粒子中各部分的磁化方向都一致。具有超顺磁性的含义是每一个粒子和其他粒子都是相同的，可以认为它们的磁化强度值 M_s （因为颗粒内磁矩方向一致，故取饱和值，用下角标 s 表示）是一样的，每一颗粒子的磁矩（磁性）大小 $m = vM_s$ ，只与粒子的体积 v 有关。这样的小颗粒的集合，容易磁化。打个通俗的比喻，这些小颗粒就像广场上的人群，每个人代表一个粒子，有的大一点，有的小一点，但大小相差不多，突然一声口令，大家都朝同一方向转过去。这人群相应于磁性液体中磁性小颗粒的集合，一声口令就是外面加了一个磁场。这个比喻可以帮助我们形象地理解超顺磁性的概念。

严格一点讲，超顺磁性是微小的铁磁单畴颗粒的集合体，在外磁场作用下其总的磁化强度 M 达到一个热平衡值。处于热平衡状态下的磁化强度矢量的取向，是通过悬浮在液体中的铁磁颗粒的布朗运动来实现的。达到平衡所需的时间（称为弛豫时间）由液体的粘滞系数（表示液体粘滞性大小的一个常数）决定。埃尔莫尔首先研究了铁的氧化物在胶体悬浮液中的超顺磁性。

具有磁矩 $m = vM_s$ 的铁磁单畴颗粒在磁场 H 中的势能为 $E_H = -v\mu_0 M_s H \cos \varphi$ ，其中 φ 为磁化强度和磁场间的夹角。

如果各向异性^①很小($Kv \ll kT$, K 为各向异性常数,是颗粒材料特有的一个物理量),热平衡时一组小颗粒的 φ 角按玻尔兹曼分布,能量越大(包括动能和势能)的小颗粒数目越少。颗粒集合的磁化状况可以由朗之万函数表达:

$$M/M_s = \text{cth } \alpha - 1/\alpha = L(\alpha) \text{ ②};$$

$$\alpha = v\mu_0 M_s H / kT.$$

当 $\alpha \ll 1$ 时(弱磁场),可近似表示为:

$$M/M_s \approx v\mu_0 M_s H / 3kT, \quad (1a)$$

当 $\alpha \gg 1$ 时(强磁场),近似表示为:

$$M/M_s \approx 1 - kT/v\mu_0 M_s H. \quad (1b)$$

其中 $L(\alpha)$ 为朗之万函数,自变量是 $\alpha = v\mu_0 M_s H / kT$ 。

图 5 就是用朗之万函数 $L(\alpha)$ 来描述磁性液体的磁化状

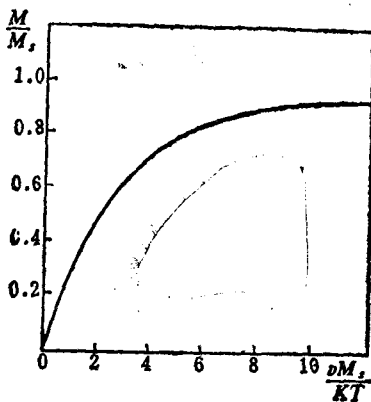


图 5 磁性液体的磁化曲线

① 沿磁性晶体不同方向磁化时, 达到同样磁化强度需要不同的能量, 这种现象称为磁各向异性。

② 式中的 cth 表示双曲余切函数, $\text{cth } \alpha = \frac{e^\alpha + e^{-\alpha}}{e^\alpha - e^{-\alpha}}$ 。