

# 神奇

MAGIC MAGNETIC LIQUID

# 的磁性液体

李德才◎著



科学出版社

# 神奇的磁性液体

李德才 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

磁性液体是一种既能像液体一样流动又能像固体磁性材料一样被磁场吸引的胶体溶液。将直径小于10纳米的固体磁性颗粒通过一定的技术手段使其均匀地分布于水、煤油等液体当中,就形成了磁性液体。磁性液体以其独特的性质,例如对磁场的响应特性、热学特性以及光学特征等,使其在工业、航空航天,甚至医学、艺术领域都有其独特的应用。本书用通俗的语言向人们介绍了神奇的磁性液体,揭开其神秘的面纱。

本书适合物理、力学、机械等专业相关领域本科生阅读学习,也适合中学生课外阅读拓宽知识面,对磁性液体有兴趣的科研工作者和一般爱好者亦可阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

神奇的磁性液体 / 李德才著. —北京: 科学出版社, 2016  
ISBN 978-7-03-048827-5

I. 神… II. 李… III. ①磁流体 - 普及读物 IV. ①TM27-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第134246号

---

责任编辑: 钱俊 周涵 / 责任校对: 彭涛

责任印制: 肖兴 / 封面设计: 金舵手世纪

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年11月第一版 开本: 720×1000 1/16

2016年11月第一次印刷 印张: 6 1/2

字数: 80 000

定价: 68.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

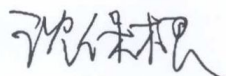
# 序

磁性液体是一种新型功能材料，它是将纳米尺度的磁性固体颗粒均匀地分散在基载液中而形成的稳定胶体溶液。磁性液体具有独特的磁流变、磁学、流体力学特性，在军工、航天、航空、机械、电子、真空等方面有着巨大的应用前景，被国内外学者认为是最具有发展潜力的新型功能材料之一。

二十多年来，李德才教授带领他的科研团队在磁性液体领域进行了深入的研究，取得了丰硕的成果。在磁性液体制备方面，先后制备了水基、煤油基、机油基、二酯基和氟醚油基等多种磁性液体，研制出耐酸、耐碱的氟醚油基磁性液体，填补了该种材料的国内空白；在磁性液体密封的理论方面，首次建立了低温大直径磁性液体旋转密封，磁性液体往复密封和磁性液体静密封的设计方法，揭示了磁性液体往复密封的失效机理，建立了往复轴磁性液体密封耐压及往复轴磁性液体被携带量公式；在磁性液体应用方面，在国内外首次成功解决了特殊领域的低温大直径及超大直径磁性液体密封，研制出大行程、高往复速度的往复式磁性液体密封装置，在国内首次解决了单晶硅炉的磁性液体密封问题，成功解决了航空、航天等很多领域长期未能解决的密封难题，同时将磁性液体用于传感和阻尼减振等领域，成功研制出多种磁性液体传感器和减振器。这些成果对推动该学科的发展和工程应用做出了很大的贡献。

本书以通俗易懂的语言向我们介绍了磁性液体的各种特性及应用，内容丰富，理论与实践紧密结合。深入浅出，图文并茂，知识性和趣

味性相统一，是读者全面了解磁性液体这一新型功能材料的最佳读本。衷心希望本书的出版使我国更多的读者深入了解磁性液体的各种特性，提高我国在磁性液体领域的教学、科研与生产水平，为我国磁性液体研究事业做出贡献。



中国科学院物理研究所研究员、中国科学院院士

2016年8月1日于北京

# 前 言

磁性液体，有时也称磁流体或铁磁流体，它像固体一样具有磁性，又保留了液体的流动性。确切地讲，磁性液体是将纳米级的固体磁性颗粒通过一定的技术手段均匀地分散于水、煤油等液体当中形成的胶体溶液。20世纪60年代，为解决航天器和宇航服可动部分的密封问题及在失重状态下的燃料补充问题，磁性液体首先由美国国家航空航天管理局试制成功，以其特有的性质，开拓了固体磁性材料无法胜任的新型领域。磁性液体自诞生以来，其潜力不断地得以发挥，在工业、航空航天，甚至医学、艺术领域都有其独特的应用。

自1977年在意大利召开了第一届国际磁性液体会议以来，此会议每隔三年召开一次，至今已14次，国内外发表论文、专利数千篇，并逐年递增，这充分反映了这一研究领域生气蓬勃的景象。然而在我国尽管有不少研究单位进行磁性液体的研究，但实际应用的局面并未完全打开，从一个侧面反映磁性液体这一新型材料尚未普遍被人们了解。著者从1989年至今一直不停地进行磁性液体理论及应用研究，时至今日，深感编撰这样一本著作是一种责任和心愿，旨在让更多的人了解磁性液体，在更多的领域发掘和利用磁性液体的巨大潜力，使磁性液体不再神秘。

本书共有三个章节，用通俗的语言介绍了磁性液体的物理化学性质以及在众多领域的独特应用。在选材方面，尽量考虑到内容的知识性、科学性和趣味性。语言力求生动活泼、清新明快、简洁易懂。文、图、表、数据并茂，深入浅出，并对某些难点词汇做了适当注释便于

读者理解。

著者对国家自然科学基金的资助深表感谢。著者所从事的磁性液体研究工作，始终是在国家自然科学基金委员会的资助下进行的，至今共5次给予资助。在此再一次向国家自然科学基金全体委员会表示最深切的谢意！著者愿以此书献给我的导师北京航空航天大学的池长清教授、王之珊教授、赵丕智教授，献给我的老师，国内外著名的流体密封专家清华大学的王玉明院士，他们引导著者进入并深入研究了这一充满魅力的学术领域，他们期待的目光一直是著者奋斗的源泉，他们对著者的谆谆教诲和关心爱护将永远激励著者奋进不息！

著者衷心感谢沈保根院士能在百忙之中细读本书，并为之作序。

编写此书只是个人出于一种责任驱使而做的工作，由于学识水平有限，磁性液体的学问博大精深，书中疏漏之处在所难免，望广大读者批评指正。

著者联系方式：Email: [lidecai@tsinghua.edu.cn](mailto:lidecai@tsinghua.edu.cn)；手机：13911510189。如蒙指证，著者不胜感激。

李德才

2016年9月于清华大学

# 目 录

神奇的磁性液体 .....	001
第1章 什么是磁性液体 .....	003
磁性液体的起源 .....	005
第2章 磁性液体的各种特性 .....	007
2.1 磁性液体具有良好的稳定性 .....	007
2.2 磁性液体对磁场的响应 .....	010
2.3 磁性液体的热学性质 .....	012
2.4 磁性液体的光学性质 .....	015
2.5 磁性液体的声学性质 .....	016
2.6 磁性液体的磁性 .....	016
2.7 磁性液体的磁热效应 .....	022
2.8 磁性液体的热磁对流 .....	024
第3章 磁性液体的各种应用 .....	028
3.1 磁性液体密封 .....	028
3.1.1 磁性液体密封应用于雷达方面 .....	032
3.1.2 磁性液体旋转密封在坦克周视镜上的应用 .....	034
3.1.3 磁性液体密封在罗茨真空泵中的应用 .....	036
3.2 磁性液体传感器 .....	037
3.2.1 磁性液体微压差传感器 .....	040
3.2.2 磁性液体水平和体积传感器 .....	042
3.2.3 磁性液体倾角传感器 .....	045
3.2.4 磁性液体加速度传感器 .....	046
3.3 磁性液体阻尼减振 .....	048





3.3.1 磁性液体惯性阻尼器 .....	050
3.3.2 磁性液体阻尼减振器 .....	051
3.4 磁性液体发电 .....	053
3.5 磁性液体黏性减阻 .....	056
3.6 磁性液体润滑 .....	059
3.6.1 磁性液体轴承电机 .....	062
3.6.2 磁性液体润滑在轧机油膜轴承中的应用 .....	064
3.7 磁性液体用于医学 .....	066
3.7.1 靶向给药 .....	066
3.7.2 肿瘤的温热——磁熵热效应应用 .....	067
3.8 磁性液体选矿 .....	068
3.8.1 “纯”磁选 .....	071
3.8.2 物料密度分选法 .....	073
3.8.3 磁性液体静力跳汰 (MHSJS) 分选法 .....	074
3.8.4 磁性液体旋流器 .....	074
3.9 磁性液体用于扬声器 .....	075
3.9.1 承受高功率 .....	076
3.9.2 改善低音音质 .....	077
3.9.3 减少频谱污染 .....	077
3.9.4 降低共振 .....	078
3.9.5 改善失真 .....	078
3.10 磁性液体用于印刷产业 .....	079
3.10.1 纳米磁性油墨在防伪印刷中的应用 .....	079
3.10.2 快速射流印刷 .....	080
3.10.3 印染工业污水处理 .....	081
3.11 磁性液体雕塑 .....	082
3.11.1 磁性液体艺术雕塑 .....	083
3.11.2 磁性液体雕塑工具 .....	084
3.11.3 磁性液体雕塑形态 .....	085

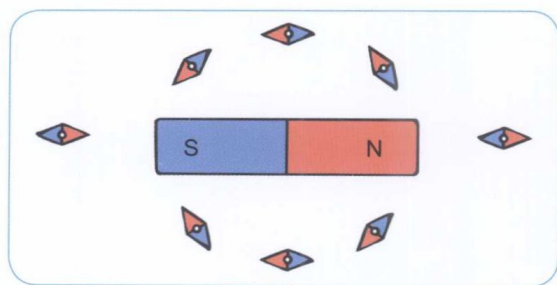
结束语 .....	091
-----------	-----

参考文献 .....	092
------------	-----

# 神奇的磁性液体

你可能见过形形色色的磁铁，你可能玩过用磁铁吸引铁屑，这隔空的吸引力是不是给你的童年带来诸多美好的回忆呢？如果有人告诉你，除了这些常见的固体磁性材料外，现在还有一种以液体形式存在和使用的磁性材料，你是否会觉得不可思议呢？看到下面的“花”了吗？如果告诉你下面的“花”是液体，你是不是觉得匪夷所思呢？

没错，下面的“花”确实是液体，而且是像铁屑、小磁针等可以跟随磁铁摆出任意形态的液体。



磁铁吸引小磁针



液体“花”

你对浮力了解多少呢？我们已经知道木块能够浮在水面上是浮力的作用。可是，你若看到实心的铝块在液体中悬浮起来时，你会不会惊讶呢？

在一个烧杯中注入一定量的这种液体，将一个实心的铝块放入液体中，铝块沉到了烧杯底部，这时候在烧杯

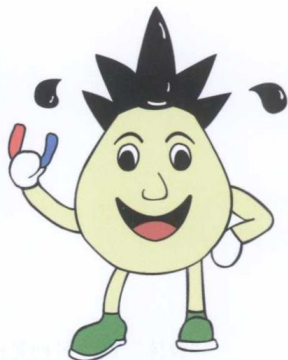


铝块“漂”在液体中

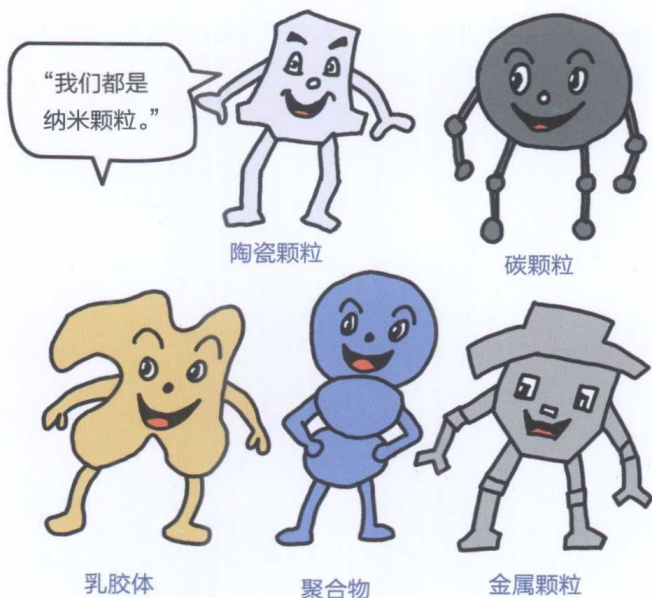


## 第1章 什么是磁性液体

所谓磁性液体，是一种既能像液体一样流动，又能像固体磁性材料一样被磁场吸引的胶体溶液。将直径在 10 纳米以下的固体磁性颗粒通过一定的技术手段使其均匀地分布于水、煤油等液体当中，就形成了我们所说的磁性液体了。这种固体磁性颗粒通常为铁磁性颗粒，例如四氧化三铁颗粒。



磁性液体



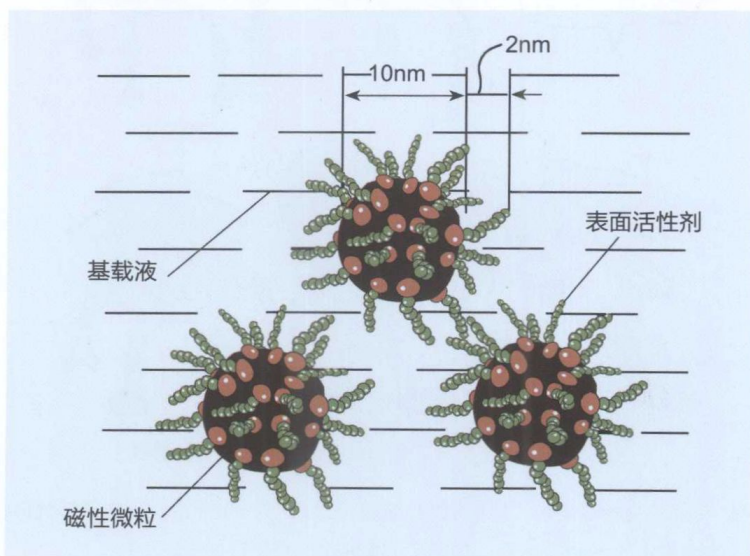
**Tip:**【纳米 (nm): 又称毫微米, 是长度的度量单位,  $1 \text{ 纳米} = 10^{-9} \text{ 米}$ 。现在很多材料的微观尺度多以纳米为单位, 例如截止到 2012 年 6 月, 最新的中央处理器制程是 22 纳米。】

**Tip:**【纳米颗粒: 又称纳米尘埃、纳米尘末, 指纳米量级的微观颗粒。纳米颗粒是一种人工制造的、大小不超过 100 纳米的微型颗粒。它的形态可能是乳胶体、聚合物、陶瓷颗粒、金属颗粒和碳颗粒。】

Tip:【胶体: 又称胶状分散体, 是一种均匀混合物。在胶体中含有两种不同状态的物质, 一种连续, 另一种分散。连续的部分可以由水、油或是空气组成; 分散的部分是由微小的粒子或液滴组成, 直径在 1~1000 纳米, 几乎遍布在整个连续态物质中, 例如尘埃等, 被称为分散质粒子。



“胶体”这个名词是由英国科学家托马斯·格拉汉姆 (Thomas Graham) 在 1861 年提出来的。格拉汉姆将一块羊皮纸缚在一个玻璃筒上, 筒里装着要试验的溶液, 并把筒浸在水中, 来进行多物质扩散速度的研究。他发现有些物质, 如糖、无机盐等扩散快, 很容易从羊皮纸渗析出来; 另一些物质, 如明胶、氢氧化铝、硅酸等扩散很慢, 不能或很难透过羊皮纸。后一类物质不能结晶, 大多变成无定形胶状物质。溶胶是胶体的一种, 习惯上把分散介质为液体的胶体分散体系称为液溶胶式溶胶; 分散介质为气体的分散体系称为气溶胶, 介质为固体时, 称为固溶胶。



磁性液体的组成

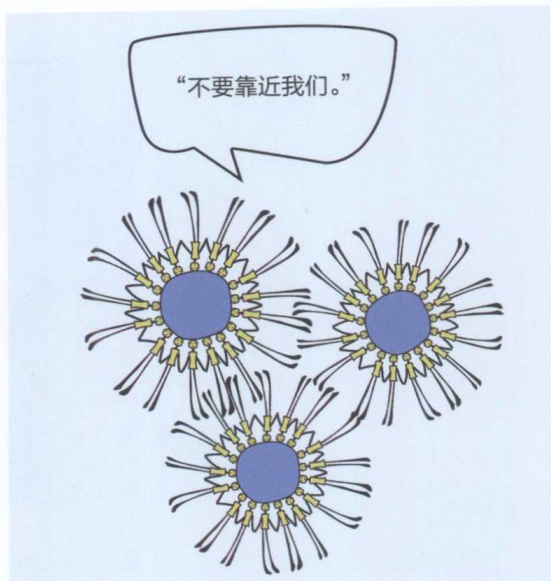
我们将水、煤油等可以使得铁磁性颗粒均匀、稳定地分布于其中

的液体叫作基载液。

磁性液体应具有足够的稳定性，它在重力和磁场的长期作用下也不会发生团聚和沉降。

为了能够达到这样的性能，我们在纳米级的固体磁性颗粒周围包覆一层能够防止固体颗粒相互结合的物质，我们将这种包覆的物质叫作表面活性剂。

磁性液体能够表现出各式各样的现象得益于磁性液体独特的物理性质。



固体磁性颗粒吸附表面活性剂

## 磁性液体的起源

制备磁性液体的想法最早出现在 1778 年，Gowan Kinght 试图把铁磁性颗粒在基载液中分散开来，但没有成功。到了 20 世纪 30 年代，人们才真正开始磁性液体的研究。1931 年 F. Bitter 在他发表的文章中提出了铁磁性液体研制的问题。1938 年 W. C. Elmore 发表了两篇关于铁磁性胶体的文章，但当时并没有研制成可用的磁性液体。到了 60 年代中期，美国国家航空航天管理局（NASA）为解决航天器和宇航服可动部分的密封问题及在失重状态下的燃料补充问题，而投入大量资金研究与磁性液体相关的问题。1965 年 S. S. Papell 用粉碎法第一次研制成功一种稳定的铁磁性液体，它的磁性颗粒是通过研磨将磁粉研磨成粒度为 10 纳米量级的粉，这是一项非常费时费力的工作。直到 1966 年，日本下坂教授首先用化学方法制出磁性固体颗粒，开始了磁性液体工业化生产。



1964年 J. Neuringer 和 R. Rosensweig 在 *Phys. Fluids* 上发表了一篇题为 *Ferrohydrodynamics* 的文章。这篇文章奠定了铁磁性液体热力学和磁性液体流体力学的基础。如今，磁性液体已形成一个独立的学术领域，自 1977 年开始每三年举行一次国际会议，迄今已举行过十三次会议。磁性液体的研究与应用有着广阔的前景，在许多未知的领域还有待开发。

## 第 2 章 磁性液体的各种特性

### 2.1 磁性液体具有良好的稳定性

磁性液体的稳定性包括两个方面的含义：一个是胶体溶液的稳定性；另一个是组成成分的稳定性。

所谓胶体溶液的稳定性，是指磁性液体中固体磁性颗粒的团聚和沉降问题。磁性液体的稳定需要铁磁性颗粒均匀稳定地分散于基载液中。

铁磁性颗粒不发生聚沉的原因是铁磁性颗粒之间存在布朗运动。这种布朗运动，是依靠基载液中的分子不停地做无规则运动、不断地碰撞铁磁性颗粒，使得铁磁性颗粒也无时无刻在做无规则运动，无数的铁磁性颗粒的无规则运动使磁性液体达到一种动态稳定。

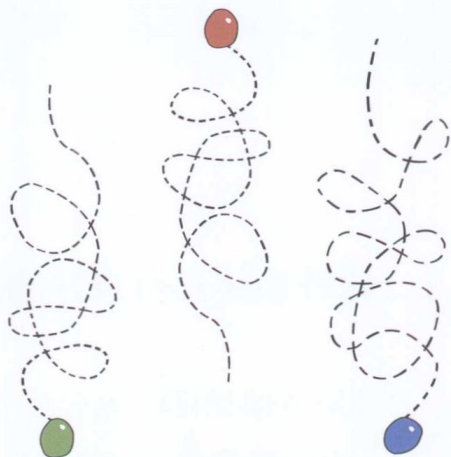
在磁性液体中，使悬浮颗粒互相趋近的势能是磁吸引势能和 Van der Waals 力的吸引势能，而抵抗这两种吸引势能的是表面活性剂长链分子在颗粒表面构成的保护层的排斥势能。表面活性剂的分子是一种长链分子，长链分子的一端吸附在固体铁磁性颗粒的表面，另一端是自由的，可以随意摆动。这种摆动是一种热运动。表面活性剂的长链分子摆动的动能就是一种防止两颗粒接触的排斥势能。



“我在培养我的植物时发现了花粉颗粒在水中会不停地做无规则运动。我把这种运动叫作布朗运动。”



罗伯特·布朗



铁磁性颗粒的布朗运动

**Tip:**【布朗运动：悬浮微粒永不停息地做无规则运动的现象叫作布朗运动。1827年，苏格兰植物学家罗伯特·布朗发现水中的花粉及其他悬浮的微小颗粒不停地做不规则的曲线运动，后来把悬浮微粒的这种运动叫作布朗运动。不只是花粉和小碳粒，对于液体中各种不同的悬浮微粒，都可以观察到布朗运动。】

磁性液体组成成分的稳定性，主要取决于基载液的蒸发以及与其他液体介质在接触时的掺混。在工程应用中，磁性液体经常处于低压甚至真空的环境下，有时环境温度可达 $100^{\circ}\text{C}$ 左右，因而基载液在这些环境条件下蒸发量的大小就决定了磁性液体的使用寿命。磁性液体与其他液体介质在接触界面上的相互掺混问题，除了由于分子扩散而引起的互相渗透以外，磁性液体在和其他液体接触的界面上会形成一种迷宫状图案，这种现象称为界面的不稳定性。所以，在使用磁性液体过程中，我们要尽量避免磁性液体和其他液体接触。