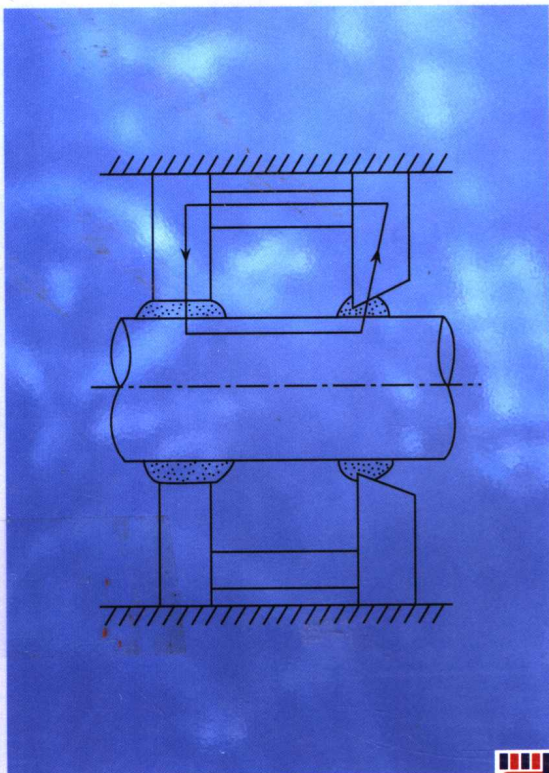





应用物理学丛书

磁性液体理论及应用

李德才 著



 科学出版社
www.sciencep.com

应用物理学丛书

磁性液体理论及应用

李德才 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共分10章。第一章介绍了磁性液体的制备,第二章阐述了与磁性液体理论及应用有关的稳定电磁场理论,第三章阐述了磁性液体的物理性能,第四章推导了磁性液体动力学方程,第五章阐述了磁性液体密封磁场的数值计算,第六章分析了磁性液体的应用,第七章说明了磁性液体密封的原理,第八章、第九章和第十章详细分析了磁性液体的静密封、旋转密封和往复密封的理论及应用。

本书可作为高等学校本科生、研究生、博士生、科研机构的研究人员以及对此技术有兴趣人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

磁性液体理论及应用/李德才著. —北京:科学出版社,2003

(应用物理学丛书)

ISBN 7-03-011113-3

I. 磁… II. 李… III. 磁性液体 IV. TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 003397 号

责任编辑: 邢德平 郝鸣藏/责任校对: 柏连海

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 黄华斌 陈 敬

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

2003年8月第一次印刷 印张: 19 1/4

印数: 1—2000 字数: 510 000

定 价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

《应用物理学丛书》编委会

主 编:吴自勤 杨国桢

编 委:(按姓氏笔画)

王 琛	王之江	王业宁	叶朝辉
华中一	肖定全	张泰永	冼鼎昌
姜承烈	莫 党	阎守胜	章 综

《应用物理学丛书》出版说明

1978年夏在庐山召开的中国物理学会年会（“文化大革命”结束后的全国物理学界第一次大型学术会议）上，部分与会专家与学者经过充分酝酿和热烈讨论后一致认为，为了迎接科学春天的到来和追赶世界先进科学技术水平，有必要编辑出版一套《实验物理学丛书》，并组成以钱临照院士为主编，工淦昌等5位院士为副主编，王之江、王业宁等26位院士或专家为编委的《实验物理学丛书》编委会。

20年来，这套丛书在钱临照院士的主持下，通过编委们的积极工作（有的编委还亲自撰稿），先后出版了《实验的数据处理》、《X射线衍射照相学》、《粒子与固体相互作用物理学》、《压电与铁电材料的测量》、《电介质的测量》、《物理技术在考古学中的应用》及《材料科学中的介电谱技术》等20部实验物理学著作。这些著作都是实验、科研和教学的系统总结，出版后受到读者的欢迎和好评，有不少被评为国家级、部级和院校级的优秀科技图书，如《实验的数据处理》一书获全国优秀科技图书一等奖。这套丛书的陆续出版，在社会上引起较大影响，在科研、教学、经济建设和国防建设中发挥了积极的作用。

改革开放以来，我国在各个方面发生了翻天覆地的变化，经济体制由计划经济逐步转向社会主义市场经济，科学技术和教育也得到了空前的发展。为了适应社会主义市场经济的需要和满足社会的需求，我们决定对原丛书的出版宗旨、选题方向做相应的调整，重新组建编委会，并将原丛书更名为《应用物理学丛书》，使新丛书能在“科教兴国”和将科学技术转化为生产力的伟大实践中发挥更大的作用。

《应用物理学丛书》的出版宗旨和选题方向如下：

1. 密切联系当前科研、教学和生产的实际需要，介绍应用物理学各领域的基本原理、实验方法、仪器设备及其在相关领域中的应用，并兼顾有关交叉学科。

2. 反映国内外最新的实验研究与技术水平和发展方向，并注重实用性。

3. 以大专院校师生以及科研单位、国防部门、工矿企业的科研人员为对象，理论与实践紧密联系。

这套丛书将按照“精而准，系统化”的原则，力求保持并发展原《实验物理学丛书》已形成的风格和特色，多出书、出好书。

需要强调的是，《应用物理学丛书》将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们坚信，在编委们的共同努力下，在广大科研和教学人员的积极参与和大力支持下，《应用物理学丛书》的出版将对我国科学技术和教育事业的持续发展发挥积极的作用！

《应用物理学丛书》编委会

序 言

磁性液体是一种新型的功能材料，它是将纳米尺度的磁性固体颗粒均匀地分散在液体介质中而形成的稳定的胶体溶液。它将液体的流动性和磁性材料的磁性统一在一种物质中，使之具备了很新物理机理和特性，也正因如此，它的制备和理论研究都有着重要的科学意义。它的应用，特别是在军事方面的应用有着广阔的前景。

北方交通大学机械与电子控制工程学院教授李德才博士从1989年至今一直从事有关磁性液体的研究，有着良好的理论基础和丰富的实践经验。十多年来，他和他带领的新型功能材料研究室制备了多种具有实用价值的不同基液的磁性液体，研究了往复轴磁性液体密封的耐压公式及密封机理，同时，在磁性液体的静密封、旋转密封、往复密封方面也取得了相当丰富的实验数据，为国内外不同设备成功设计了几百种磁性液体密封结构，在国内首次成功解决了单晶硅炉的磁性液体密封，在国际上首次成功解决了特殊领域的低温大轴径及超大轴径磁性液体密封问题。这些成果对推动该学科的发展和工程应用做出了积极的贡献。

本书广泛收集了国际上的最新文献，结合作者的研究成果，经系统分析而著成。本书取材新颖，内容详实，是国内第一部反映当前磁性液体发展全貌的专著。书中结合作者在此领域的研究成果不仅系统地论述了磁性液体的制备、物理性能及动力学特性，还详细介绍了磁性液体在静密封、旋转密封和往复密封中的应用。

磁性液体是一门多学科交叉的综合学科。著者从机械、物理、化学、流体动力学、统计力学、应用数学等的结合中阐述了理论，并将这些理论与实践密切结合，这是本书的两个重要

特征。

本书对于从事磁性液体研究及应用的科学工作者及工程技术人员都有很高的参考价值。

中国科学院院士

徐叔谨

2003年4月7日于北京

前 言

著者在长期从事磁性液体的教学和研究中，深感需要一本比较系统的论述磁性液体理论和应用的书，磁性液体出现在 20 世纪 60 年代中期，到现在也只不过 30 余年的历史，但它一经问世，就得到了许多专家学者的重视。在理论上对它进行深入的研究；在应用上使用范围越来越宽广。就理论分析而言，磁性液体的研究包括微观和宏观两个方面。微观上，利用热力学、统计物理和量子力学的基本原理来考察磁性液体的结构、物理性质及其胶体稳定性。在宏观方面是依靠磁性液体和电磁学的基本方程来分析磁性液体在磁场中的行为规律。就应用而言，磁性液体在机械、印刷卡、浮选、声学器件、光学、热学和医疗等领域都得到了或即将得到应用。

磁性液体的第一届国际学术会议是 1977 年在意大利召开的，此后每三年举行一次，著者 1998 年 6 月有幸作为中国大陆惟一的参加者，在国家自然科学基金委员会的资助下参加了在罗马尼亚举行的第 8 届国际磁性液体会议，2001 年著者又在国家自然科学基金委员会的资助下参加了在德国举行的第 9 届国际磁性液体会议，事实说明，我国的科学技术工作者极敏锐地意识到磁性液体的重大学术价值和推动国民经济发展的巨大现实意义。我们在此学科领域已经引起国外同行的注目并逐步占有一席之地。

磁性液体是一种新型的功能材料，它的诞生可以追溯至 20 世纪 60 年代，即由 R. Rosensweig 等发表的研究论文及几项著名的专利为标志，但能够成为国内外学者所公认的一门专门独立学科，是 20 世纪 80 年代中叶，它的重要标志是 R. E. Rosenweig 的第一本专著“Ferrohydrodynamics”的出版。

磁性液体经国内外学者多年系统的研究，它的内容已初具规模，一般说来它包括如下几个方面的内容：磁性液体的合成；磁

性液体的性能；磁性液体热和质量传导；磁性液体的表面现象；磁性液体基本理论和实验方法；磁性液体流变学；磁性液体的工程应用；磁性液体的医学应用。

多年来经过国内外科学技术工作者的辛勤努力，磁性液体的理论及应用由鲜为人知发展到今天，已逐步成为一门引人注目的热门学科，目前在国内外参与此项科研开发的人员日益增多，各国投入的物力和财力也日益增加。因此，为了有力促进这门学科的发展，归纳和总结多年来人们在此领域的工作成果，系统地向人们进行广泛的介绍，已经变得十分必要。

著者从 1989 年至今一直在不停地进行磁性液体的制备、理论及应用研究，其中硕士和博士论文的内容都是有关磁性液体的研究，时至今日深感编撰这样一本著作是一种责任和心愿。尽管个人才疏学浅，但是著者愿以最大努力去完成这项工作，以便对后来人有所帮助。

撰写时，著者以下列几点作为编写本书的指导原则：

1. 尽可能以著者参与的科学研究和科学试验为基础来编著此书。

2. 广泛介绍国内外，尤其是国外学者在此领域已取得的成就和成果。

3. 充分注意理论、应用的系统性和完整性。

4. 重视理论联系实际，所介绍的理论应能够说明问题和指导实践。

5. 重视磁性液体技术的应用。

6. 著者多年来在密封方面进行了大量的密封理论和应用研究，为了突出磁性液体密封这一磁性液体最成熟的应用，著者将磁性液体密封原理、磁性液体静密封、磁性液体旋转密封、磁性液体往复密封分别作为一章进行单独论述。

7. 考虑到读者专业差异，著者对与磁性液体理论及应用有关的电磁学一章进行了由浅入深的详细论述。

著者对中国科学院科学出版基金和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，在5年内共2次给以资助，因此可以说没有这些资助，也不会有本书的面世。著者再一次向国家自然科学基金委员会表示最深切的谢意！著者愿以此书献给我的导师袁祖贻教授（北方交通大学），池长青教授、王之珊教授、赵丕智教授（北京航空航天大学）；献给我的老师，国内外知名的机械工程专家查建中教授（北方交通大学），是他们引导我进入并深入了这一充满魅力的学术领域。他们期待的目光一直是我奋斗的源泉，他们对我的谆谆教诲和关心爱护将永远激励我奋进不息！

著者衷心感谢国内外著名物理学家徐叙琰院士能在百忙中细读本书，并为之作序。徐院士深厚的学术造诣和高尚的人品是著者终生学习的楷模。

著者的研究生王长有、刘丁雷、王强、炊海春、何新智、廖平、崔海蓉等帮助绘制了大量的插图，做了很多文字输入方面的工作，在此表示衷心的感谢。

本书浸透了著者十多年的心血，十多年来，刻苦研读了与磁性液体有关的物理、化学、流体、机械等学科内容。但著者深知自己能力有限，编写此书只是个人出于一种责任驱使而必须从事的工作。由于能力和水平所致，谬误和不当之处敬请读者指正（著者的通信地址：北京市北方交通大学机电学院磁性液体研究室，邮政编码100044；E-mail: decal_Li@yahoo.com）；手机：13911510189。如蒙指正，著者不胜感激。

李德才

2003年1月于北京

目 录

序言

前言

第一章 磁性液体的制备	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 磁性液体的制备方法	(3)
第三节 全损耗系统用油基系列磁性液体的制备 ..	(8)
第四节 煤油基磁性液体的制作方法	(16)
第五节 水基磁性液体的制备方法及其性能测试 ..	(17)
第六节 双酯基磁性液体的制备及其性能测试	(18)
第七节 小结	(21)
参考文献	(27)
第二章 与磁性液体理论及应用有关的电磁场理论	(29)
第一节 概述	(29)
第二节 磁场 磁感应强度矢量	(31)
第三节 毕奥-萨伐尔定律	(33)
第四节 磁场的高斯定理和安培环路定理	(39)
第五节 磁场对运动电荷及通电导线的作用	(44)
第六节 电磁感应的的基本规律	(50)
第七节 电磁感应的本质	(53)
第八节 磁场的能量	(63)
第九节 电磁场	(65)
第十节 磁介质	(69)
第十一节 麦克斯韦方程组	(82)
第十二节 库仑定律与磁场强度的关系	(85)

第十三节	磁偶极子	(91)
第十四节	真空中的静电场部分小结	(100)
第十五节	静电场中的导体和电介质部分小结	(103)
第三章	磁性液体的物理性能	(109)
第一节	磁性液体稳定性解析	(109)
第二节	磁性液体稳定性测量	(120)
第三节	磁性液体的黏度	(122)
第四节	磁性液体的黏度测量	(131)
第五节	磁性液体的密度	(132)
第六节	磁性液体的磁化强度及其测试	(134)
第七节	磁性粒子的平均直径	(146)
第八节	磁性液体的热导和热容	(147)
第九节	磁性液体的声学特性	(148)
第十节	磁性液体的光学性质	(151)
	参考文献	(152)
第四章	磁性液体动力学概论	(154)
第一节	概述	(154)
第二节	不考虑固体颗粒旋转的磁性液体运动方程	(155)
第三节	磁性液体的能量守恒方程	(165)
第四节	磁性液体的质量守恒方程	(166)
第五节	不考虑磁性固体颗粒旋转的磁性液体动力 学方程组	(167)
第六节	考虑磁性固相颗粒转动的动力学方程组 ..	(167)
第七节	非平衡磁化强度的磁性液体动力学特性 ..	(173)
第八节	磁学方程	(177)
第九节	磁性液体动力学方程的边界条件	(177)
第十节	均匀磁场对磁性液体黏度的影响	(180)
第十一节	均匀磁场对管流磁性液体黏性的影响 ..	(188)
第十二节	磁性液体的 Bernoulli 方程	(190)

第十三节	磁性液体静力学	(192)
第十四节	非等温磁性液体的现象	(198)
第十五节	界面现象	(209)
	参考文献	(236)
第五章	磁性液体密封磁场的数值计算	(238)
第一节	磁场计算的理论基础——麦克斯韦方程组	(238)
第二节	麦克斯韦方程组的积分形式和边界条件 ..	(240)
第三节	标量位及其微分方程	(243)
第四节	矢量磁位及其微分方程	(244)
第五节	磁场矢量位的边界条件	(246)
第六节	磁场的有限元法	(250)
第七节	磁场计算结果及其分析	(268)
第八节	小结	(278)
	参考文献	(278)
第六章	磁性液体的应用	(280)
第一节	磁性液体在矿物分离中的应用	(280)
第二节	磁性液体陀螺	(283)
第三节	磁性液体用作显示剂	(285)
第四节	磁性液体扬声器	(287)
第五节	磁性液体变压器及电感磁心	(291)
第六节	用磁性液体作为润滑剂	(292)
第七节	磁性液体的研磨	(294)
第八节	磁性液体在生物医学中的应用	(302)
第九节	磁性液体磁光效果的应用	(308)
第十节	磁性液体在微波原件上的应用	(318)
第十一节	磁性液体热引擎	(321)
第十二节	磁性液体黏度可控性的应用	(324)
第十三节	磁性液体在磁墨水、磁记录、射流印刷和 平面扫描型印刷机上的应用	(330)

第十四节	磁性液体在引动器方面的应用	(333)
第十五节	磁性液体在阀门行业中的应用	(336)
第十六节	磁性液体在各种传感器中的应用	(337)
第十七节	磁性液体轴承在电动机中的应用	(343)
	参考文献	(345)
第七章	磁性液体密封原理	(347)
第一节	磁性液体密封原理	(347)
第二节	各种磁性液体密封件	(357)
第三节	磁性液体密封结构中极靴常用材料	(361)
第四节	磁性液体密封中永磁磁源材料的选择	(366)
第五节	磁性液体密封系统中静密封圈的选择	(377)
第六节	如何选用磁性液体密封中的胶黏剂	(389)
第七节	磁路及其处理	(398)
第八节	永久磁铁的设计	(406)
第九节	极靴极齿的结构设计	(419)
第十节	密封级数和密封结构的确定	(421)
	参考文献	(422)
第八章	磁性液体静密封	(424)
第一节	磁性液体静密封研究一	(425)
第二节	磁性液体静密封耐压能力的半解析法	(434)
第三节	磁性液体静密封研究二	(438)
第四节	小结	(449)
	参考文献	(450)
第九章	磁性液体旋转密封	(452)
第一节	磁性液体轴封的理论	(452)
第二节	磁性液体密封的实验法	(456)
第三节	密封耐压	(457)
第四节	密封耐压对各种参数的依存性	(460)
第五节	磁性液体轴封的使用法与设计法	(474)
第六节	磁性液体旋转密封的应用	(481)

第七节	磁性液体密封润滑油的研究	(494)
第八节	干式罗茨真空泵磁性液体密封的研究	(499)
第九节	磁性液体——螺旋组合密封在旋片式真空 泵上的应用	(507)
第十节	旋转轴磁性液体密封的新结构	(510)
第十一节	国外磁性液体密封研究	(525)
第十二节	磁性液体密封技术动向	(531)
第十三节	选用磁性液体密封的一些经验	(538)
	参考文献	(541)
第十章	磁性液体往复密封	(544)
第一节	磁性液体在直线密封中的应用研究	(544)
第二节	往复轴磁性液体密封微观实验台的设计、安 装与实验结果分析	(551)
第三节	往复运动轴带走磁性液体量的理论分析	(563)
第四节	往复轴磁性液体密封耐压的理论分析	(568)
第五节	往复轴磁性液体密封实验台的设计	(571)
第六节	磁性液体往复运动密封的实验研究	(578)
第七节	往复轴磁性液体密封结构的改进	(594)
	参考文献	(597)

第一章 磁性液体的制备

第一节 引言

Gubanov^[1]和 Handrich^[2]都指出,从数学上看,液态铁磁性是可能实现的,然而时至今日人们还不知道存在这样的事实:在液体状态下,原子的磁矩按铁磁性排列从而产生内在的液态铁磁性。现在还只能制作这样的磁性液体,即单畴铁磁性颗粒的高稳定胶状悬浮液。这样的双相系统具有单相磁性液体的预期特征,它们具有较高的磁化强度,也能很快对施加磁场作出反应。

本书所介绍的磁性液体是将众多的铁磁性或亚铁磁性微粒高度弥散于液态载液中而构成的一种高稳定性的胶体溶液。微粒与载液通过表面活性剂浑成的这种磁液即使在重力场、电场、磁场作用下也能长期稳定地存在,不产生沉淀与分离,因此具有实用性。

磁性液体的组成如下:

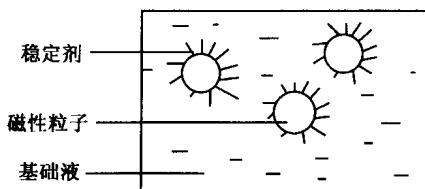


图 1-1 磁性液体的组成

可供选择用于制备磁性液体的磁性材料通常有 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, MeFe_2O_4 ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Mn}, \text{Ni}$ 等), Fe_3O_4 , Ni , Co , Fe , FeCo 和 NiFe 合金等,目前常用的为 Fe_3O_4 粉。