




华夏英才基金学术文库

李德才 著

磁性液体密封 理论及应用



科学出版社
www.sciencep.com

 华夏英才基金学术文库

磁性液体密封理论及应用

李德才 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共分7章:第1章介绍了磁性液体的制备方法,物理性能及磁性液体的典型应用.第2章论述了磁性液体密封的理论基础.这包括从一般流体的质量守恒方程,运动方程出发推导出磁性液体质量守恒方程,运动方程.进而得出磁性液体的伯努利方程和磁性液体密封耐压公式.第3章阐述了磁性液体密封磁场的计算.第4章分析了磁性液体密封设计的几个关键问题;第5~7章分别详细分析了磁性液体的静密封、旋转密封和往复密封设计的理论及应用.

本书可供密封设计开发与制造专业技术人员、高等学校相关专业本科生、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阅读和参考.

图书在版编目(CIP)数据

磁性液体密封理论及应用/李德才著. —北京:科学出版社,2010
(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-027116-7

I. 磁… II. 李… III. 磁流体-液体密封-研究 IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 055642 号

责任编辑:张 静 杨 然/责任校对:鲁 素
责任印制:钱玉芬/封面设计: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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年2月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年2月第一次印刷 印张: 16 1/4

印数: 1—2 500 字数: 311 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

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的胶体溶液.磁性液体最重要的应用之一就是磁性液体密封.磁性液体密封是利用磁性液体对磁场的响应特性而实现的.磁性液体密封具有严密的密封性,其泄漏率几乎难以测量;由于它是非接触式密封,故长寿命,可靠性高,能承受较高的转速,具有低的黏性摩擦;既能起动密封作用,又能起静密封作用,在停车期间也不像普通弹性体密封那样受弛豫的影响.由于其优点和特点十分突出,磁性液体密封在许多场合具有几乎不可替代的作用.

磁性液体密封的研究涉及多学科的综合.就磁性液体密封的理论分析而言,在微观上涉及热力学、统计物理、量子力学的基本原理和纳米技术;在宏观方面,依靠流体力学和电磁学的基本方程;就应用而言,涉及化学、机械、材料、磁路设计等.正因如此,人们对该技术的认识至今仍不够深入、系统和全面.

本书作者李德才教授从 1989 年开始一直从事这一技术的研究、开发和应用.先后完成了包括 2 项国家重大专项、6 项军工项目及 4 项国家自然科学基金项目在内的省部级以上项目共 16 项,对磁性液体密封进行了深入的理论研究和技术开发,取得了一系列创新性成果.主要体现在以下几个方面:在磁性液体制备方面,作者采用化学共沉淀法成功制备了包括水基、二酯基、氟碳化合物基等 7 种具有实用价值的磁性液体;在磁性液体密封理论方面,作者从一般流体力学的质量守恒方程和运动方程出发,推导了磁性液体的质量守恒方程和运动方程,在此基础上推导了磁性液体的伯努利方程,进而得出磁性液体密封的耐压公式.鉴于各种文献中有关磁性液体在磁场中所受磁体积力的表达式不同,作者进行了深入的分析,揭示了其本质的一致性;在磁性液体静密封方面,作者研究了磁性液体静密封的失效机理以及密封间隙中磁性液体固体颗粒的凝聚规律,并在此基础上得出了提高磁性液体静密封寿命的有效方法;在磁性液体旋转密封方面,研究了磁性液体黏度变化对密封轴旋转阻力矩的影响,以及各种参数对密封性能的影响;在磁性液体往复密封方面,发现了磁性液体往复密封的失效机理,建立了磁性液体变形和携带量的数学模型,将麦克斯韦方程和纳维-斯托克斯方程联合求解,推导出了往复轴磁性液体耐压公式及磁性液体被携带量公式,并在理论指导下,发明了往复轴磁性液体密封的新结构,成功应用于实际.在磁性液体密封应用方面,经过二十多年的研究开发,作者在磁性液体静密封、旋转密封和往复密封方面形成了完整的设计理论和方法,并在实际中积累了大量的实验数据和宝贵经验.特别值得指出的是:作者在世界上首

次解决了大直径磁性液体静密封, 低温大直径磁性液体旋转密封以及高速、大行程往复轴磁性液体密封的难题, 并均获得发明专利, 在航空、航天和核工业等领域中发挥了重要作用. 此外, 在磁性液体方面共申请了 39 项专利, 其中有 25 项发明专利, 14 项实用新型专利. 以上理论研究、技术开发和工程应用成果总体上具有国际先进水平, 有的属于国际领先.

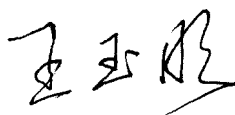
作者发表了 130 多篇文章, 学术成果受到了国内外学术界的广泛关注和认可. 他是国内外十几家重要学术期刊磁性液体部分的审稿人, 也是第十二届国际磁性液体学术委员会成员.

本书将理论和应用紧密结合, 在密封的每一章都以作者解决过的实际问题为例, 阐述了如何运用理论去分析和解决实际问题, 这是本书的重要特色之一.

本书内容新颖, 系统完整, 理论结合实际, 科学性强, 结构严谨. 深信该书的出版将促进磁性液体密封技术的进步, 促进我国流体密封事业的深入发展, 提高我国在关键和基础零部件自主研发和应用领域的竞争力, 也对世界的科技进步有所贡献.

我作为流体密封技术的研究者, 谨对此书的付梓表示最热烈的祝贺, 并非常高兴地将其推荐给相关的科技工作者, 教师和研究生.

中国工程院院士



2010 年 3 月 6 日
于清华园

序 二

磁性液体是将纳米尺度的磁性颗粒高度弥散地分散在基载液中而形成的稳定的胶体溶液。20世纪60年代,研究初期,国外文献中对其采用 Ferrofluid 一词,中译名为“磁流体”,鉴于磁流体早已成为等离子体发电中应用的名词,然而,流体还应包括液体与气体,显然再用磁流体一词是不确当的,而采用磁性液体一词更为妥帖。80年代起这一词在国内已逐步被公认,国外也变更为相应的 Magnetic liquid 一词。磁性液体应用十分广泛,其中最重要的应用之一就是磁性液体密封。磁性液体密封是利用磁性液体对磁场的响应特性而实现的。磁性液体密封具有严密的密封性,不可测量的泄漏率,长寿命,可靠性高,没有污染,能承受高转速,最佳的扭矩传递、低的黏性摩擦;磁性液体密封即使在中断运行时,也不像弹性密封在停机期间受增塑和弛豫的影响等优点。正因如此,磁性液体密封在很多行业有着重要的不可替代的作用。

磁性液体密封的研究涉及多学科的综合,就磁性液体密封的理论分析而言,利用了热力学、统计物理和量子力学的基本原理,以及流体力学和电磁学的基本方程,就应用而言,它涉及机械、材料、磁路设计等。作者从1989年开始一直从事这一技术的研究,先后完成了包括2项国家重大专项,6项军工项目及4项国家自然科学基金在内的省部级以上项目共16项,对磁性液体密封的理论及应用进行了深入研究,取得了一系列创新成果,主要体现在以下几个方面:在磁性液体制备方面,作者采用化学共沉淀法成功制备了包括水基、二酯基、氟碳化合物基等7种具有实用价值的磁性液体;在磁性液体密封理论方面,作者从一般流体力学的质量守恒方程、运动方程出发,推导了磁性液体的质量守恒方程和运动方程,在此基础上推导了磁性液体的伯努利方程,进而得出磁性液体密封的耐压公式。鉴于各种文献中有关磁性液体在磁场中所受磁体积力的表达式不同,作者进行了深入分析,揭示了其本质的一致性;在磁性液体静密封方面,作者研究了磁性液体静密封的失效机理及密封间隙中磁性液体固体颗粒的凝聚规律,在此基础上得出了提高磁性液体静密封寿命的有效方法;在磁性液体旋转密封方面,作者研究了在磁性液体黏度变化时密封轴旋转阻力矩的计算方法和各种参数对密封性能的影响;在磁性液体往复密封方面,发现了磁性液体往复密封失效机理,建立了磁性液体变形和携带量研究数学模型;将麦克斯韦方程和纳维-斯托克斯方程联合求解,推导出了往复轴磁性液体耐压公式及磁性液体被携带量公式;在理论指导下,发明了往复轴磁性液体密封的新结构,并成功应用于实际设备的往复密封中;这些成果都是国际领先的。在磁性液体密封

应用方面, 经过二十多年的研究, 作者在磁性液体静密封、旋转密封和往复密封方面形成了自己独特的完整的设计理论和方法, 并在实践中积累了大量的实验数据和宝贵经验. 值得指出的是: 作者在世界上首次解决了大直径磁性液体静密封问题, 低温大直径磁性液体旋转密封及大速度、大行程往复轴磁性液体密封. 这些密封技术都获得发明专利, 所设计的密封在航空航天、核工业中发挥了重要作用. 经过作者二十多年在磁性液体方面的不懈研究, 共申请了 39 项专利, 其中有 25 项发明专利, 14 项实用新型专利, 发表了 130 多篇文章. 学术成果受到了国内外学术界的广泛关注和认可, 据笔者所知李德才教授是国内外十几家重要学术期刊磁性液体部分的审稿人, 也是第十二次国际磁性液体学术委员会成员.

将理论和应用相结合, 在阐述理论的同时, 特别注意应用, 并且在关于密封的每一章都以作者解决过的实际问题为例, 论述了如何进行理论分析和解决实际问题, 这也是本书的重要特色之一.

本书内容新颖, 结果严谨, 系统完整, 理论结合实际, 科学性强. 我深信该书的出版将有助于开阔从事密封研究工作者和相关研究生的视野, 促进磁性液体密封技术的开发和应用, 对我国磁性液体的应用与发展将会起到积极的推进作用.

值此书付印之际, 谨做简单介绍, 很高兴将它推荐给我国从事磁性液体理论及应用的科技工作者、教师和研究生.

中国科学院院士



2010 年 2 月于南京

前 言

随着核能、宇航、深海、化工、军工和石油等工业的迅速发展,对设备的密封性能要求越来越高,传统密封已经很难满足泄漏率、使用寿命方面的苛刻要求.磁性液体密封是一种新型的密封形式.它具有零泄漏、长寿命、高可靠性、适用特殊工况等突出优点,但此类密封涉及学科广,技术难度高.

著者从 1989 年至今一直在不断进行磁性液体制备的理论及应用研究,其硕士生和博士生论文的内容也都是有关磁性液体密封的研究.期间得到了国家重大专项、国家自然科学基金、北京市自然科学基金等近 20 个项目的资助.通过近 20 年的研究,著者在磁性液体密封的理论、实验、应用方面形成了完整的体系,取得了一系列创新成果,在国内外产生了较大影响.多年来著者经常收到公司、企业、大专院校的科技人员来信、来电,咨询有关磁性液体密封方面的问题,著者时常想撰写一本磁性液体密封方面的著作,为从事磁性液体密封技术的研究和应用提供基础理论和技术指导,这是一种社会责任,也是报答社会的一种方式.于是有了这本书的问世.

著者对华夏英才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,至今共 4 次给予资助,如果没有这些资助,也不会有本书的面世.在此再一次向国家自然科学基金委员会表示最深切的谢意!著者愿以此书献给导师袁祖贻教授(北京交通大学)、池长青教授、王之珊教授、赵丕智教授(北京航空航天大学),他们引导著者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!在本书写作过程中著者的导师北京航空航天大学池长青教授多次与著者讨论有关磁性液体密封的理论问题,书中也凝聚着池先生的大量心血,在经池先生同意后书中也引用了一些他的研究成果.在此对池先生表示深深的感谢!

著者衷心感谢清华大学流体密封专家王玉明院士、南京大学磁学与磁性材料专家都有为院士,他们在百忙中细读本书,并为之作序.他们是著者终生学习的楷模.

著者衷心感谢北京市神然磁性流体技术有限公司该公司为著者的研究提供了大量帮助.

著者的博士生:杨文明、何新智、郝瑞参、邢斐斐、蔡玉强、崔红超、李建玲、崔海蓉、杨小龙.研究生:王积尚、张少兰、陈燕、冯振华、张猛等帮助著者做了大量文字输入、整理、编制、插图等工作.在此表示衷心的感谢!

本书浸透了著者近二十年的心血。二十年来, 著者刻苦学习了与磁性液体有关的物理、化学、流体、机械、电磁场等学科内容。在写作过程中, 重视文字的概念清晰, 通俗浅显; 注重技术内容的翔实、具体, 实用性与先进性, 重视取材新颖, 通过大量实例介绍磁性液体密封技术。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做的工作。由于能力和水平所限, 谬误和不当之处敬请读者指正。著者的联系方式: E-mail: decai.li@yahoo.com; 手机: 13651206606。如蒙指正, 著者不胜感激。

李德才

2009年12月于北京

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 磁性液体	1
1.1 引言	1
1.2 磁性液体的制备方法	2
1.2.1 共沉淀法	2
1.2.2 粉碎法	7
1.2.3 阴离子交换树脂法	8
1.2.4 氢还原法	8
1.2.5 火花电蚀法	8
1.2.6 紫外线分解法	9
1.2.7 热分解法	10
1.2.8 真空蒸发法	10
1.2.9 电着法	10
1.3 磁性液体的物理性能	12
1.3.1 磁性液体的黏度	12
1.3.2 磁性液体的密度	17
1.3.3 磁性液体的磁化强度	18
1.4 磁性液体的应用	25
1.4.1 磁性液体的研磨	25
1.4.2 磁性液体润滑	27
1.4.3 磁性液体阻尼器件	27
1.4.4 磁性液体用于选矿分离	28
1.4.5 磁性液体减阻	29
1.4.6 磁性液体在阀门行业中的应用	30
1.4.7 磁性液体在生物医学中的应用	30
1.4.8 磁性液体在传感器中的应用	32
参考文献	35
第 2 章 磁性液体密封的理论基础	38
2.1 概述	38

2.2	磁性液体的质量守恒方程	38
2.2.1	一般流体的质量守恒方程	38
2.2.2	磁性液体的质量守恒方程	39
2.3	不考虑内部自由度的磁性液体运动方程	40
2.3.1	一般流体的 Navier-Stokes 方程	40
2.3.2	磁性液体彻体力的能量法	44
2.3.3	磁性液体彻体力的其他常用表达式	53
2.4	磁性液体动力学方程的边界条件	57
2.5	磁性液体的伯努利方程	59
2.5.1	从一般形式的彻体力密度推导液体的伯努利方程	59
2.5.2	从其他形式的彻体力密度推导磁性液体的伯努利方程	61
	参考文献	68
第 3 章	磁性液体密封磁场的计算	69
3.1	磁场计算的理论基础——麦克斯韦方程组	69
3.1.1	麦克斯韦方程组的微分形式	69
3.1.2	麦克斯韦方程组的积分形式	70
3.1.3	麦克斯韦方程组的边界条件	71
3.2	标量位和矢量位微分方程及其边界条件	73
3.3	磁场的有限元法	76
3.3.1	概述	76
3.3.2	二维电磁场的有限元法	76
3.3.3	稀土永磁的处理	86
3.4	磁场计算	88
3.5	磁性液体密封磁场的磁路计算	95
3.5.1	磁路的基本定律	95
3.5.2	永磁磁路的计算	103
3.5.3	磁性液体密封的磁路模型	105
3.5.4	磁性液体密封磁路的磁导计算	106
3.5.5	磁性液体密封中磁路的计算方法	109
	参考文献	110
第 4 章	磁性液体密封的设计	112
4.1	磁性液体密封原理	112
4.1.1	磁性液体密封的优点	112
4.1.2	磁性液体密封破坏的机理	113

4.2 磁性液体密封结构中常用的铁磁材料	114
4.2.1 常用铁磁材料及其特性	114
4.2.2 电工用纯铁	117
4.2.3 碳素结构钢	119
4.3 磁性液体密封系统中静密封圈的选择	122
4.3.1 真空密封用橡胶	122
4.3.2 橡胶密封槽尺寸	126
4.4 磁性液体密封中胶黏剂的选择	127
4.5 磁性液体密封中永磁材料的选择和设计	130
4.5.1 衡量永磁材料性能的主要磁性参数	130
4.5.2 各类永磁材料性能的比较	136
4.5.3 永磁材料的选择和使用注意事项	137
4.5.4 磁性液体密封中永磁材料的设计	138
4.6 磁性液体密封中轴承的设计	150
4.6.1 轴承类型的选择	150
4.6.2 滚动轴承尺寸的选择	151
4.7 极靴极齿的结构设计	155
4.8 密封级数和密封结构的确定	155
4.9 磁性液体轴封的使用法	157
参考文献	159
第 5 章 磁性液体静密封	161
5.1 磁性液体静密封原理及理论模型	161
5.1.1 静态磁性液体塞	161
5.1.2 实验结果	163
5.1.3 一些设计启示	167
5.1.4 结论	167
5.2 面向工程应用的磁性液体静密封实验研究	167
5.3 磁性液体静密封耐压对各参数的依存性	169
5.3.1 磁性液体注入量对耐压能力的影响	169
5.3.2 磁性液体密封最小间距对耐压能力的影响	170
5.3.3 磁性液体密封齿距对耐压能力的影响	170
5.3.4 磁性液体饱和磁化强度对耐压能力的影响	171
5.3.5 转轴偏心对密封耐压能力的理论分析	172
5.4 磁性液体静密封耐压能力计算的半解析法	174
5.4.1 数学模型的建立	174

5.4.2	极靴表面磁势的确定方法	176
5.4.3	理论计算结果与实验值的比较	177
5.5	磁性液体静密封的应用研究	177
5.5.1	大法兰磁性液体静密封	177
5.5.2	大直径、大间隙磁性液体静密封	182
	参考文献	185
第 6 章	磁性液体旋转密封	187
6.1	磁性液体旋转密封的理论	187
6.2	磁性液体旋转密封耐压的实验研究	190
6.3	密封耐压对各种参数的依存性	192
6.3.1	密封形状及密封耐压	192
6.3.2	密封耐压的转速依存性	194
6.3.3	密封耐压的温度依存性	195
6.3.4	密封耐压的时间依存性	196
6.3.5	磁性液体密封消耗功率的计算	198
6.4	磁性液体真空旋转密封实验研究	201
6.5	磁性液体旋转密封的应用	204
6.5.1	磁性液体旋转密封在单晶炉设备上的应用	204
6.5.2	干式罗茨真空泵磁性液体密封的研究	205
6.5.3	磁性液体旋转密封在坦克周视镜上的应用	208
6.5.4	低温、大直径磁性液体旋转密封在雷达上的应用	209
	参考文献	211
第 7 章	磁性液体往复密封	213
7.1	概述	213
7.2	往复轴磁性液体密封的试验方法	218
7.2.1	实验装置的总体设计	218
7.2.2	实验结果和分析	222
7.2.3	结论	225
7.3	往复运动轴带走磁性液体量的理论分析	226
7.4	往复轴磁性液体密封耐压的理论分析	230
7.5	往复轴磁性液体密封实验台的设计	232
7.5.1	实验装置的总体设计	232
7.5.2	实验装置主要部分设计	233
7.6	磁性液体往复运动密封的实验研究	236
7.7	往复轴磁性液体密封结构的改进	242

7.7.1 往复轴磁性液体密封结构改进之一	242
7.7.2 往复轴磁性液体密封结构改进之二	244
参考文献	244

第1章 磁性液体

1.1 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混成的这种磁性液体即使在重力场、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.

磁性液体的组成如图 1-1 所示.

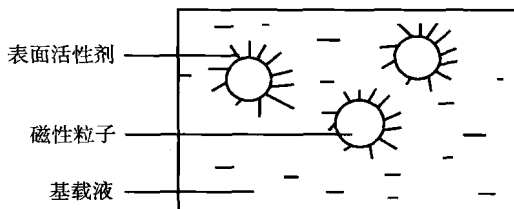


图 1-1 磁性液体的组成

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 ($\text{Me}=\text{Co}$, Mn , Ni 等)、 Fe_3O_4 、 Ni 、 Co 、 Fe 、 FeCo 和 NiFe 合金等,目前常用的为 Fe_3O_4 粉末.

作为磁性液体的基载液应满足这样一些条件:低蒸发率、低黏度和高度化学稳定性,以及具有耐高温和抗辐射特性等.由于这些要求之间在很大程度上往往是相互矛盾的,因此为满足某特定条件去选择适宜的载液,经常会遇到各种不易克服的难题,有时欲获得完全符合上述要求的液体,甚至是不可能的.通常所选用的载液名称以及制得相应磁性液体的应用范围如表 1-1 所示.

表面活性剂的选用对磁性液体制造来说是至关重要的,它关系到磁性液体能否成功制备,磁性液体是否稳定等大问题,也是磁性液体制备需要解决的关键问题.表 1-2 是供磁性液体用的部分表面活性剂.

表 1-1 供磁性液体制备用的载液^[3]

载液名称	所制磁性液体特点及用途举例
水	pH 可在较宽范围内改变, 价格低廉, 制备工艺简便, 适用于医疗、磁性分离、选矿、显示及磁带、磁泡检验
酯及二酯	蒸气压较低, 适用于真空及高速密封环境, 润滑好的磁性液体特别适用于要求摩擦低的装置并可用于阻尼装置, 其他如用于扬声器及步进马达等阻尼
精制合成油	类似于酯及二酯所制磁性液体, 它的蒸气压很低
硅酸盐酯类	耐寒性好, 适用于低温场合
碳氢化合物	黏度低, 适用于高速密封环境, 各种碳氢化合物载液可互相混合
氟碳化合物	具有不易燃、宽温、不溶于其他液体的特性, 在活泼性环境, 如含臭氧、氯气等环境特别适用
聚苯基醚	蒸气压低, 黏度低, 适用于高真空和强辐射场合, 辐射阻抗大于 106Gy
水银	可作 Fe、Co、Fe-Co、Fe-Ni 磁性微粒的载液, 所制磁性液体饱和磁化强度大, 导热性好

表 1-2 供磁性液体用的部分表面活性剂^[3]

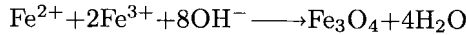
载液名称	适用于该载液的表面活性剂举例
水	不饱和脂肪酸, 如油酸、亚油酸、亚麻酸以及它们衍生物的盐类及皂类、12 烷酸、二辛基磺化丁二酸钠等
碳氢化合物	油酸、亚油酸、亚麻酸以及其他非离子型表面活性剂
酯及二酯精制合成油	油酸、亚油酸、亚麻酸或相应的酯酸如磷酸二 (2-乙基己基) 酯及其他非离子型表面活性剂
氟碳化合物	氟醚酸、氟醚磺酸, 以及它们相应的衍生物, 全氟聚异丙醚等
硅油	硅烷偶联剂, 羧基聚二甲基硅氧烷, 羟基聚二甲基硅氧烷, 巯基聚二甲基硅氧烷, 氨基聚二甲基硅氧烷, 羧基聚苯基甲基硅氧烷, 氨基聚苯基甲基硅氧烷, 羟基聚苯基甲基硅氧烷, 巯基聚苯基甲基硅氧烷, 氨基聚苯基甲基硅氧烷
聚苯基醚	苯基十一烷酸, 邻苯氧基苯甲酸

1.2 磁性液体的制备方法

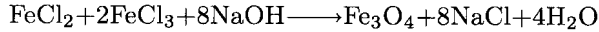
Gowan Knight^[4] 首先尝试制备了磁性液体, 他的方法是使铁磁性颗粒在载液中弥散开来. 这一方法和现在所用的方法基本相同. 他将铁屑弥散在水中, 经过几个小时的混合后, 水中会含有小的悬浮颗粒, 但是混合物不是长期稳定的. Bitter^[5] 制备了一种胶体来研究磁畴, 这种胶体是磁铁矿在水中的胶状悬浮液, 其悬浮颗粒的尺寸在 103nm 左右. Elmore^[6] 制备过含有更小颗粒 (20nm) 的悬浮液, 它们同磁性液体非常类似. 但是, 要获得高磁化强度、高颗粒浓度的超稳定系统, 还须精制以消除大的颗粒.

1.2.1 共沉淀法^[7]

铁盐和亚铁盐的水溶液发生反应, 会生成磁性 Fe_3O_4 固体粒子, 化学反应方程式如下:



如氯化铁和氯化亚铁在氢氧化钠水溶液中反应, 由下列反应可得 Fe_3O_4 固体粒子:



也可以用硫酸铁和硫酸亚铁生成磁性 Fe_3O_4 。如此形成的 Fe_3O_4 超微粒子吸着油酸离子水洗脱水, 分散于二甲苯等基载液中, 即可生成磁性液体。

将稀释的 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 在温度为 70°C 的条件下混合, 加入过量的 NaOH , 然后连续搅拌, 为了获得高度分散的共沉液, 高速搅拌以限制粒子的增长是非常有必要的, 通常用 NH_4OH 代替 NaOH 更能提供 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 生成的条件, 否则 $m\text{FeO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3 (m \neq n)$ 可以使其组成的磁性能变坏。为了确保分散剂和 Fe_3O_4 粒子的作用, 必须用水多次清洗反应物, 以去掉 Cl^- 和盐的离子, 为了确保共沉淀反应的彻底, 碱的数量要过量, 反应的温度为 $25 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

用这种方法制备的 Fe_3O_4 粒子的直径范围为 $2 \sim 20\text{nm}$, 其平均直径为 7nm , 粒子的表面吸附能力好。

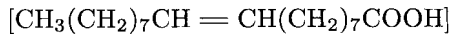
这种方法提供了较之其他制备 Fe_3O_4 粒子方法的基本优点, 该方法的生产效率高, 反应迅速, 可以自动化、机械化, 可以被工业生产所采纳。

以磁铁矿 Fe_3O_4 作为磁性粒子, 选择不同的基载液, 可以做成各种基载液磁性液体, 以下是不同学者采用不同制备工艺和基载液制备出的几种磁性液体。

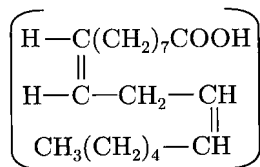
1. 下饭坂的方法^[8]

在 1:2 物质的量比含 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的溶液中, 形成 Fe_3O_4 的固体溶液, 添加以下表面活性剂, 做成磁性液体。

(1) 油酸 (oleic acid)



(2) 亚麻仁油酸 (linoleic acid)



(3) 次亚麻仁油酸 (linolenic acid)

