



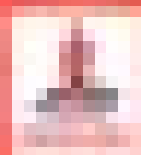
国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

纳米磁性液体的制备 及其性能表征

STUDY ON NANOMETER
MAGNETIC FLUID &
ITS PROPERTY
CHARACTERIZATION

张金升 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



中国科学院
中国科学院图书馆
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES
LIBRARY

纳米磁性液体的制备 及其性能表征

田晓宁 田文波 田文波 田文波
田文波 田文波 田文波
田文波 田文波 田文波
田文波 田文波 田文波
田文波 田文波 田文波

中国科学院图书馆



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

纳米磁性液体的制备 及其性能表征

STUDY ON NANOMETER
MAGNETIC FLUID &
ITS PROPERTY
CHARACTERIZATION

张金升 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

纳米磁性液体是一种特殊的液态磁性材料,兼具纳米特性、优良磁性能和良好的流动性,从而具有一系列独特的优异性能,在尖端高科技领域有着十分重要的应用,并已渗透到工业、医药、交通、民用等广泛的领域。其中 Fe_3O_4 磁性液体是一类重要的磁性液体,在其发展研究过程中产生了各种独具特色的制备理论和表征理论,并开拓出不同的应用领域。本书根据作者多年从事纳米磁性液体的研究成果,介绍一种简便易行的制备技术及表征方法,全面分析其稳定机制,并对其在机械、医药、交通等领域的应用做了一些探索。

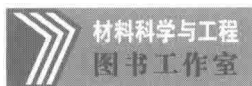
本书适合于纳米磁性液体研究生产领域的技术人员参考,也可作为相关专业大学生和研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

纳米磁性液体的制备及其性能表征/张金升著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.6
ISBN 978-7-5603-5921-2

I. ①纳… II. ①张… III. ①纳米材料-磁流体-
研究 IV. ①TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062161 号



材料科学与工程
图书工作室

策划编辑 杨 桦 张秀华
责任编辑 刘 瑶 范业婷
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司
开 本 660mm×980mm 1/16 印张 19.5 字数 337 千字
版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5921-2
定 价 98.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《材料研究与应用著作》

编写委员会

(按姓氏音序排列)

毕见强	曹传宝	程伟东	傅恒志
胡巧玲	黄龙男	贾宏葛	姜越
兰天宇	李保强	刘爱国	刘仲武
钱春香	强亮生	单丽岩	苏彦庆
谭忆秋	王铀	王超会	王雅珍
王振廷	王忠金	徐亦冬	杨玉林
叶枫	于德湖	藏雨	湛永钟
张东兴	张金升	赵九蓬	郑文忠
周玉	朱晶	祝英杰	

前 言

运动是物质的根本属性和存在形式。像运动一样,磁性也是物质的基本属性之一,因为磁性直接产生于物质的运动,确切地说,磁性产生于旋转运动。物质在旋转时,由于离心力的作用,物质的力场会出现不均衡分布。在垂直于旋转轴的平面上,旋转中心合力为零,其余位置都受到离心力的作用,离心力的分布遵从 $F=mv^2/r$ (m 为质量,单位为 kg ; v 为速度,单位为 m/s ; r 为半径,单位为 m),即离旋转中心越远所受离心力越小。在平行于旋转轴的方向上,力场分布没有出现不均衡,但却出现了磁场,并且磁场分布也是不均衡的。磁场的大小与物质的总质量以及所在位置距物质质量中心的距离有关,质量越大磁场越强,越接近于物质的质量中心磁场越强(人们研究较多的是电磁感应)。这里要注意,无论离心力场还是磁力场,都是由旋转运动产生的,没有旋转运动,上述质量、速度、距离等因素对于离心力场和磁力场都是没有意义的。

宏观上,地球旋转产生离心力场和地磁场。离心力一般小于万有引力产生的地心引力,所以人和物体不会飞出地球,但如果运动速度超过第二宇宙速度(11.2 km/s),物体就会在离心力的作用下飞离地球。至于地磁场,动物(飞鸟等)会利用地磁场确定方向寻找回家的路径,而我们人类的感受性已经退化,平常感受不到地磁场的存在,但通过仪器测量很容易测得某位置的地磁场数值,常见的指南针也清楚地表明地磁场的存在。

微观上,人们研究的结论是,电子、质子、中子等微观粒子的自旋和公转形成磁偶极子和微磁场。物质中存在无数的磁偶极子,方向杂乱。当磁偶极子的磁性方向平行或近平行时,磁力不为零,从而表现出磁性;保持杂乱状态或磁性方向反平行时,则不表现出磁性。因此,物质实质上是万物有磁,差别在于是否表现出来以及表现出来的程度大小。

通常的磁性材料是指铁氧体等固体磁性材料,一般是刚性或脆性材料,后来人们发展了柔性的磁性材料,如橡胶磁体,大大扩大了磁性材料的应用领域。随着航空航天技术和国防技术的发展,具有更加神奇性能的液

体磁性材料应运而生,这就是纳米磁性液体。

纳米磁性液体,是将纳米磁性粒子经表面包覆处理,然后均匀稳定地分散于某种基载液中,形成的一种胶体体系的液体磁性材料。它兼具流动性和磁性,因此可起到刚性的固体磁性材料和柔性的橡胶磁性材料所起不到的作用,在国防领域得到了广泛应用,是很多技术实现的关键,同时在机械密封、医疗器械、电子信息等诸多民用领域有着重要应用。

纳米磁性液体是一种重要的高科技材料,属于前沿研究领域,极具发展前景,但有关纳米磁性液体研究的著作不多。作者从事该领域研究多年,取得了丰富的成果,具备一定的理论功底,方法独到。本书内容包括:阐述了纳米磁性液体的基础理论,论述了基本的生产制备方法,重点介绍了作者研究工作中总结的简便易行的生产工艺,对影响磁性液体制备的诸多复杂因素做了较全面的分析,探讨了纳米磁性液体的稳定机制及其主要应用。

本书适应国内外科技发展的需要,可以作为相关专业科技工作者的参考书,它的出版将对纳米磁性液体的研究具有一定的促进作用。

限于作者水平,书中疏漏及不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者
2016年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米材料	1
1.2 磁性材料基础	4
1.3 胶体化学基础	13
1.4 纳米磁性液体	26
1.5 小结	57
第 2 章 磁性液体的物理性能	59
2.1 磁性液体的稳定性	59
2.2 磁性液体的黏度	70
2.3 磁性液体的密度	78
2.4 磁性液体的磁化强度及其测试	80
2.5 磁性粒子的平均直径的测量	89
2.6 磁性液体的热导和热容	90
2.7 磁性液体的声学特性	91
2.8 磁性液体的光学性质	94
2.9 小结	94
第 3 章 纳米磁性液体的制备理论	95
3.1 纳米磁性液体的制备方法概述	95
3.2 工艺研究方法、原材料及仪器设备	101
3.3 全损耗系统机油基系列磁性液体的制备	104
3.4 煤油基磁性液体的制备方法	109
3.5 水基磁性液体的制备方法及其电镜表征	110
3.6 双酯基磁性液体的制备方法及其性能测试	111
3.7 纳米磁性液体制备基本问题综述	113
3.8 小结	119
第 4 章 Fe_3O_4 纳米磁性液体的制备研究	120
4.1 FeCl_3 水溶液系统和 FeCl_2 水溶液系统的研究	120

4.2	水基纳米 Fe_3O_4 磁性液体的制备研究	127
4.3	柴油基纳米 Fe_3O_4 磁性液体的制备研究	129
4.4	制备方法讨论	133
4.5	小结	135
第5章	纳米 Fe_3O_4 磁性液体制备过程中的影响因素	136
5.1	引言	136
5.2	反应前驱体溶液浓度对磁性液体性能的影响	136
5.3	表面活性剂种类对磁性液体性能的影响	137
5.4	表面活性剂用量对磁性液体性能的影响	138
5.5	表面活性剂带电符号对磁性液体 ζ -电位即磁性液体动电稳定性的影响	140
5.6	NH_4OH 溶液滴加量对磁性液体性能的影响	141
5.7	NH_4OH 溶液滴加速度对磁性液体性能的影响	142
5.8	表面活性剂和 NH_4OH 溶液滴加顺序对磁性液体性能的影响	143
5.9	搅拌方式对磁性液体性能的影响	143
5.10	沉淀的洗涤和洗涤方式对磁性液体性能的影响	144
5.11	沉淀老化对磁性液体性能的影响	145
5.12	磁性液体的分散和超声分散对磁性液体性能的影响	146
5.13	离子强度对磁性液体性能的影响	146
5.14	表面活性剂包覆时间对磁性液体性能的影响	147
5.15	氧化作用对磁性液体性能的影响	148
5.16	pH 对磁性液体性能的影响	148
5.17	制备过程中温度对磁性液体性能的影响	149
5.18	表面活性剂种类与制备工艺的关系	150
5.19	小结	151
第6章	纳米 Fe_3O_4 磁性液体的表征	152
6.1	引言	152
6.2	磁性液体在磁场下的形貌观察	152
6.3	磁性液体的性能测试	153
6.4	磁性液体的 X-射线(XRD)研究	156
6.5	磁性液体的扫描电镜(SEM)研究	158
6.6	磁性液体的透射电子显微镜(TEM)表征	160

6.7	磁性液体的电子衍射谱(EDP)研究	161
6.8	磁性液体的红外光谱(IR)研究	161
6.9	磁性液体的拉曼光谱研究	170
6.10	磁性液体的高分辨电子显微镜(HREM)研究	174
6.11	小结	177
第7章	纳米 Fe_3O_4 磁性液体稳定机制研究	179
7.1	引言	179
7.2	磁性液体热力学稳定机制	180
7.3	磁性液体动力学稳定机制	184
7.4	磁性液体的流变学稳定性	187
7.5	磁性液体的静电稳定机制	191
7.6	磁场和重力场对磁性液体的作用	193
7.7	磁性液体中表面活性剂的空间位阻和弹性位阻稳定机制	195
7.8	磁性液体的综合稳定机制	197
7.9	小结	197
第8章	磁性液体密封动力学及密封结构设计	199
8.1	引言	199
8.2	磁性介质受力分析	199
8.3	磁性液体静力学分析	200
8.4	磁性液体动力学分析	202
8.5	磁性液体密封压差	204
8.6	磁性液体密封的磁路(磁场)计算	207
8.7	密封结构设计	217
8.8	密封能力研究	230
8.9	小结	240
第9章	纳米磁性液体在生物医学领域的应用	242
9.1	高疗效的磁性针剂	242
9.2	用磁性液体处理血栓	243
9.3	用磁性液体技术分离细胞	244
9.4	用磁性液体技术处理血液和骨髓	245
9.5	用磁性液体技术研究病毒	246
9.6	用磁性胶体粒子尝试治癌和做 X 光造影剂	247
9.7	用磁性液体血栓切除与血管相连的肿瘤	248

9.8 小结	248
第 10 章 纳米磁性液体在交通材料研究中的应用	250
10.1 磁性液体作为液态纳米分散体系用于改性沥青	250
10.2 纳米磁性液体改性沥青分散稳定性研究	252
10.3 纳米磁性液体改性沥青的三大指标研究	258
10.4 基于截面畸变和微区反应的 Fe_3O_4 纳米改性沥青的机制 研究	265
10.5 小结	274
参考文献	275
名词索引	298

第1章 绪 论

纳米磁性液体,简称纳米磁液,又称铁磁液、磁(性)流体,是铁磁性物质(如 Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Co 等)的纳米颗粒表面吸附一层表面活性剂后,均匀稳定地分散在某种基载液中形成的一种弥散溶液,即磁性微粒的胶体溶液。纳米磁液不但具有磁性,而且具有流动性,是液态体系、纳米材料和现代磁学技术有机结合的产物,是一种液态的强磁性材料,具有其他常规材料和高技术材料都不具备的一系列独特的优异性能^[1-20],在航空航天、电子技术、机械化工、生物医药、信息技术等高新技术领域中得到了广泛的应用。

本书涉及的基础理论知识有:磁性材料基础^[11,13-16,21-40],无机化学和现代化学基础^[41-46],胶体化学基础^[47-50],有机化学基础,界面物理和表面化学基础^[51-55],物理化学和材料热力学基础^[39,51-53,56],纳米材料和纳米技术基础^[13-15,21,35,57-60]。

1.1 纳米材料^[13,61,62]

1.1.1 纳米材料的传统意义和发展历程

纳米(nm)为一种长度单位, $1\text{ nm} = 1 \times 10^{-9}\text{ m}$ 。最小的原子(H)的半径为0.037 nm,最大的原子(Ce)的半径为0.235 nm。1 nm 相当于人类头发直径的万分之一。不仅人的肉眼看不到纳米尺度,就连普通光学显微镜也不能企及,必须用较高倍率的电子显微镜才可以观测到。

纳米材料的传统定义为:特征尺度(三维空间尺度中的至少一维)小于100 nm的各种材料。这个特征尺度可以是一个颗粒的直径(如量子点、纳米簇、纳米晶等)、一个晶粒的大小(纳米结构材料)、一层薄膜的厚度(薄膜及超晶格)、在一个芯片上一条导线的宽度等。

纳米材料在自然界的存在可追溯到上百万年前,人类自发地使用纳米材料始于数千年前(古代的熏墨、宝剑的表面处理层等),但人们真正地认识纳米材料则是在19世纪。1861年,英国的 Thomas Graham 用“胶体”描述了悬浮在溶液中粒径为1~100 nm的颗粒,这是科学家首次发现纳米材

料。20 世纪初,一些著名的科学家,如 Arayleigh, Maxwell, Einseir 等系统地研究了胶体。1960 年, Uyeda 用电子显微镜研究了胶体颗粒。20 世纪 80 年代以后,纳米材料和技术重新引起了人们的重视。1980 年,少于 100 个原子组成的簇被发现;1985 年, Smally 和 Kroto 领导的研究小组发现了 C_{60} 簇;20 世纪 90 年代以后,纳米科技进入蓬勃发展的时期。1991 年, Iijimas 发现了碳纳米管。在 1991 年、1992 年、1993 年,连续召开了三次关于纳米材料研究的国际会议,内容涉及纳米技术和装置的各个领域,如金属簇及其化合物的合成与性质、纳米颗粒的合成与性质、生物纳米材料、分子自组装和纳米化学、STM (scanning tunneling microscope) 观察纳米材料的结构、先进量子装置、纳米结构的光学行为等。与体相材料相比,纳米材料不仅展现了更强大的新特性,而且为制造新材料创造了机会。纳米材料具有许多奇异的特性,因此在国防、电子、化工、冶金、轻工、航空、陶瓷、核技术、催化剂、医药等领域得到了广泛的应用。许多科学家预言,纳米材料和技术必将引发 21 世纪新一轮的产业革命。

纳米技术是当代三大技术革命之一——材料技术革命的重点,是 21 世纪科学研究的重点。未来包括信息和通信技术、汽车技术、医疗技术、生物技术、分析和诊断技术、化学技术、制造和生产技术、环保技术等几乎所有现代技术领域的革新和进步都离不开纳米技术。以微电子技术及其集成为代表的微米技术曾经并且仍在对世界产生着影响,比微米技术更深入微观世界的纳米技术,将使人类进一步掌握物质运动的规律,掌握改造客观世界的武器。

1.1.2 纳米材料的基本特征

当物质(材料)的结构单元(如晶粒或空隙)为纳米量级时,物质(材料)的性质发生了重大变化,不仅大大地改善了原有材料的性能,甚至会产生新的性能或效应。利用纳米材料的新特性制作器件或制品将会引起诸多工业、农业、医疗和社会的重大变革。

纳米材料具有大量的界面,晶界原子比例达 15% ~ 50%。这些特殊的结构使得纳米材料具有独特的体积效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应以及常规材料不具有的非同寻常的物理化学特性。前述 1 ~ 100 nm 以内为纳米尺度的概念是纳米工程工作者的观点,与纳米工程工作者不同,纳米科学工作者是以材料是否具有这些效应来界定纳米材料的,即某些材料尺寸即使在 100 nm 以上,但只要具有上述纳米效应,就可以称为纳米材料。在纳米尺度下,物质中的电子波性以及原子间的相互作用

用受尺度大小的影响,物质会出现与体相材料完全不同的性质。例如,即使不改变材料的成分,纳米材料的基本性质如熔点、磁性、电学性质、光学性质、力学性质和化学性质等也将与传统材料大不相同,呈现出用传统的模式和理论无法解释的独特性能。

本书研究的体系首先是一个纳米体系,其粒径范围在纳米分散体系(1~100 nm)的下限区域(主流粒径10 nm以下)(范围内颗粒数目占总颗粒数80%以上的颗粒粒径为主流粒径),而且是一种零维(纳米质点、量子阱)纳米材料。

纳米材料还具有其他的特殊性质,如特殊的催化性质、特殊的力学性质、特殊的磁学性质等。下面主要介绍一下磁学性质。

1.1.3 纳米材料特殊的超顺磁性

材料中颗粒尺寸的减小,使其能级发生显著变化,这必将引起磁性的改变。例如,粒径为20 nm的铁颗粒的矫顽力比块体材料大1000倍,而当粒径进一步减小到6 nm时,又表现出超顺磁性(矫顽力下降到0)。利用超顺磁性可制成高性能的磁液用于密封以及医疗等领域。在医学上,利用磁性纳米颗粒为药物“导航”,不仅能提高药效,还能减少副作用。

在外磁场下,铁磁性物质具有很高的诱导磁性,而顺磁性物质的诱导磁性很小。超顺磁性的概念是铁磁性物质的颗粒小于一临界尺寸时(此时的铁磁性物质具有单畴或近单畴结构),(温度足够高时)外磁场产生的磁取向力不足以抵抗热骚动的干扰,其磁化性质与顺磁体相似(不再表现为铁磁性,即单畴微粒在外磁场下不再形成强烈的取向作用)。但在外磁场作用下其磁化率仍比一般顺磁材料大几十倍(尽管如此,其磁化率仍较原来体相铁磁性物质的磁化率小得多)。微粒呈现超顺磁性还与温度有关,温度越高越易出现超顺磁性,对一定直径的微粒,其铁磁性转变成超顺磁性的温度常记为 T_B ,称为转变温度;转变温度以下时,该颗粒将不表现为超顺磁性(仍表现为铁磁性)。临界尺寸与温度有关,温度越低临界尺寸越小(因其热运动能小),例如球状铁粒在室温的临界半径为12.5 nm,而在4.2 K时半径为2.2 nm,还是铁磁性的。

当将铁磁体做成微粒状或通过沉淀法得到极细粒子时(超顺磁性临界尺寸以下,对于 Fe_3O_4 为10~16 nm),该粒子自发磁化本身做热振动,产生郎之万顺磁性(自旋之间无相互作用,自由地进行热振动的现象)。基本特征是,在外磁场下各磁畴定向排列,撤去磁场无任何磁滞,此时微粒尺寸减小到其各向异性能与热运动能相当,整个微粒不再沿一个固定的易磁化方向自发磁化,而处于无序状态。

除上所述,纳米材料的热学、相变、能带结构、光学特性等方面的性质也发生了显著变化,出现了许多全新的现象,如熔点、热容、相变温度和压力的反常降低和升高等。

1.2 磁性材料基础

我们把顺磁性物质和抗磁性物质称为弱磁性物质,把铁磁性物质和亚铁磁性物质称为强磁性物质。反铁磁性物质则在任何情况下都不表现出宏观磁性(但微观上是有磁性的)。通常所说的磁性材料是指强磁性物质。磁性材料按磁化后去磁的难易可分为软磁性材料和硬磁性材料,容易去掉磁性的物质称为软磁性材料,不容易去磁的物质称为硬磁性材料。一般来讲,软磁性材料剩磁较小,硬磁性材料剩磁较大(剩磁是某些能被感应出磁性的物体如钢或磁合金等在外界磁场消除后保留的磁性)。软磁性和硬磁性都属于强磁性物质,铁磁性物质多属于硬磁性材料,所有亚铁磁性物质均属于软磁性材料。所以,磁性材料是由铁磁性物质或亚铁磁性物质组成的、具有磁有序性强磁性物质,广义上还包括可应用其磁性和磁效应的弱磁性及反铁磁性物质。

磁性材料是古老且用途十分广泛的功能材料。物质的磁性早在3 000年以前就被人们所认知并应用。中国是最先发现物质磁性现象和应用磁性材料的国家。早在战国时期就有关于天然磁性材料(如磁铁矿)的记载;11世纪就发明了制造人工永磁材料的方法;1086年宋代沈括所著《梦溪笔谈》就记载了指南针的制作和使用;1099~1102年就有了指南针用于航海的记录,同时还发现了地磁偏角的现象。图1.1所示为中国古代用天然磁铁制造的指南针——司南。



图 1.1 中国古代的指南针——司南

1.2.1 磁性材料的概念

磁性(magnetism)通常是指磁体具有的吸引铁、钴、镍等金属的性质。磁体是指具有磁性、能产生磁场的物体。磁铁矿、磁化的钢、有电流通过的导体以及地球、太阳和其他恒星等许多天体本身都是磁体。一般把磁体能够产生磁性作用的空间称为磁场,而物理学上,磁体周围的空间具有特殊物理性能,这个空间被称为磁场。磁场具有作用力、动量和能量等物理属性,因此是物质存在的特殊形式之一。整个地球的内外空间都有磁场存在,指南针能指南就是在地球磁场的磁力下而发生的定向作用。

磁性材料在日常生活中特指永磁性材料或称硬磁性材料,如磁铁等。永磁性材料可以直接表现出宏观磁场(指无外磁场等作用),对其他磁性材料(硬磁或软磁)产生作用。永磁性材料的直接宏观磁性,既可以是自发磁化而获得,也可以是外磁场去除后保留的磁性(即较大剩磁)。从物质结构和磁感应角度上讲,磁性材料是指由过渡元素铁、钴、镍及其合金等组成能够直接或间接产生宏观磁性的物质。

实验表明,任何物质在外磁场中都能够或多或少地被磁化,只是磁化的程度不同。

磁性是物质的一种基本属性。物质按照其内部结构及其在外磁场中表现出的特性可分为抗磁性、顺磁性、铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性物质。

磁性材料按使用又分为软磁性材料、永磁性材料和功能磁性材料。功能磁性材料主要有磁致伸缩材料(压磁材料)、矩磁材料、磁记录材料、磁电阻材料、磁泡材料、磁光材料、旋磁材料、Nd-Fe-B 永磁材料、磁性纳米材料以及磁性薄膜材料等,反映磁性材料基本磁性能的有磁化曲线、磁滞回线和磁损耗等。

磁性材料从材质和结构(性质)上讲,分为金属及合金磁性材料(金属)和铁氧体磁性材料(非金属)两大类,前者主要有电工钢、镍基合金和稀土合金等,后者主要是铁氧体材料。铁氧体磁性材料又分为多晶结构和单晶结构材料。

磁性材料从形态上讲,分为粉体材料、液体材料、块体材料、薄膜材料等。

1.2.2 磁性的来源及分类

1. 磁性的描述和作用

严谨的磁性定义为:物质由自身原子磁矩的大小及排列方向所决定的

特性。

磁铁两端磁性强的区域称为磁极,一端称为北极(N极),一端称为南极(S极)。试验证明,同性磁极相互排斥,异性磁极相互吸引。

铁中有许多具有两个异性磁极的原磁体,在无外磁场作用时,这些原磁体排列紊乱,它们的磁性相互抵消,对外不显示磁性。当把铁靠近磁铁时,这些原磁体在磁铁的作用下,整齐地排列起来,使靠近磁铁的一端具有与磁铁极性相反的极性而相互吸引;当移开磁铁时,铁中的原磁体重新呈紊乱排列,铁的磁性基本消失。这说明铁中由于原磁体的存在能够被磁铁所磁化,而铜、铝等金属是没有原磁体结构的,所以不能被磁铁所吸引。

2. 磁性的来源——万物有磁

磁性是物质的基本属性之一,一切物质都具有磁性。物质的磁性起源于原子中电子的运动和自旋,电子的运动会产生一个电磁以太的涡旋,从而产生磁场。电流是一群定向移动的电荷。电流或移动的电荷也会在周围产生磁场。

早在1820年,丹麦科学家奥斯特就发现了电流的磁效应,第一次揭示了磁与电存在着联系,从而把电学和磁学联系起来。为了解释永磁和磁化现象,安培提出了分子电流假说。安培认为,任何物质的分子中都存在着环形电流,称为分子电流,而分子电流相当于一个基元磁体。由于微观结构原因,在没有外磁场情况下,分子电流或基元磁体可以做规则取向,也可以做不规则取向。当物质内的分子电流做规则取向时,就表现出宏观磁性;当物质内的分子电流做不规则取向时(分子电流取向无规则),它们所产生的磁效应互相抵消,就不表现出宏观磁性,即整个物体不显示磁性。在外磁场作用下,等效于基元磁体的各个分子电流将倾向于沿外磁场方向取向,而使物体显示磁性。

磁现象和电现象有本质的联系,物质的磁性和电子的运动结构有着密切的关系。乌伦贝克与哥德斯密特最先提出的电子自旋概念,是把电子看成一个带电的小球,他们认为,与地球绕太阳的运动相似,电子一方面绕原子核运转,相应轨道角动量和轨道磁矩,另一方面又绕本身轴线自转,具有自旋角动量和相应的自旋磁矩。施特恩和盖拉赫从银原子射线试验中所测得的磁矩正是这种自旋磁矩(后来人们认为把电子自旋看成是小球绕本身轴线的转动是不正确的)。

因此电子具有磁矩,电子磁矩由电子的轨道磁矩和自旋磁矩组成。在晶体中,电子的轨道磁矩受晶格的作用,其方向是变化的,不能形成一个联合磁矩,对外没有磁性作用。因此,物质的磁性不是由电子的轨道磁矩引