铁磁流体动力学

李明军　张荣培　著

科学出版社

铁磁流体动力学

李明军　张荣培　著

科学出版社

北京

内 容 简 介

全书共 10 章内容. 第 1 章为绪论, 介绍麦克斯韦电磁学理论, 铁磁流体力学基本内容、发展现状和应用. 第 2 章介绍铁磁流体的物理性质. 第 3 章介绍铁磁流体力学基本方程组, 包括铁磁流体组分、基本结构、基本物理参数、热磁不稳定性和体积分数等内容, 而铁磁流体的磁粘性(特别是自旋)特征将在第 4 章单独介绍. 第 5~7 章从铁磁流体力学基本方程组出发研究三类典型模型方程, 分别给出铁磁颗粒所受磁压、铁磁流体扩散抛物化稳定性方程组和铁磁流体热传导模型. 第 8 和 9 章分别给出铁磁流体化学机械抛光和铁磁流体发电两个典型应用实例. 第 10 章从理论上给出铁磁流体多孔介质的正定性和对称性定理, 可作为喜欢理论分析读者的补充资料.

本书可供从事铁磁流体动力学研究的科技人员及青年学者参考, 或作为相关领域的研究生教材, 也可作为理工科高等院校高年级学生课外学习的参考资料.

图书在版编目(CIP)数据

铁磁流体动力学/李明军, 张荣培著. —北京: 科学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-03-056604-1

Ⅰ. ①铁… Ⅱ. ①李… ②张… Ⅲ. ①铁磁流体-磁流体动力学 Ⅳ. O361.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 033255 号

责任编辑: 王丽平 / 责任校对: 邹慧卿
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 黄华斌

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

北京东华虎彩印刷有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2018 年 2 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16
2018 年 2 月第一次印刷 印张: 11 1/2 插页: 1
字数: 222 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前　言

本书著者从事铁磁流体动力学理论和实验研究与教学工作的十余年中，一直使用 1985 年 Rosensweig 的开山之作 *Ferrohydrodynamics* 和 1993 年池长青等编著的《铁磁流体力学》，毋庸置疑，这两本书对初学者来说是必备读物. 1977 年在意大利乌迪内 (Udine) 市召开了首届磁流体国际会议，开启了磁流体及其动力学研究的新阶段. 目前，人们对磁流体的理论与应用研究涉及诸多领域，其兴趣有增无减. 几年前，在日本参加第十二届磁流体国际会议期间，著者有幸认识了清华大学磁性液体密封专家李德才教授，并一起参加了 2016 年在俄罗斯叶卡捷琳堡举办的第十四届磁流体国际会议.

随着铁磁流体力学理论和应用研究的进一步深入，新的研究方向和研究成果不断涌现，因此有必要写一本适合中国读者且涵盖铁磁流体力学研究领域呈现的新思想和新方法的书籍. 2014 年 11 月，著者受邀参加云南师范大学和科学出版社联合组织的“交叉创新数学应用”专题出版会议，受到极大鼓舞，开始着手撰写本书. 本书的许多成果是在多项国家自然科学基金的资助下完成的，在此深表谢意. 倪明玖教授和任忠鸣教授主持召开了中国首次“磁流体力学学术研讨会”，之后每年召开一次，大大增强了我国磁流体力学工作者的凝聚力，对本书写作起到激励作用. 日本工程院院士山口博司、澳大利亚库克大学苏宁虎、北京大学张信荣和汕头大学牛小东等知名教授与著者的许多合作工作都包含在本书中，在此表示感谢!

参与本书有关研究工作的研究生有郑秋云、唐树江、徐双艳、罗丰、张欢、李胜男、蔡振宇、王迪等，他们长期以来组织铁磁流体力学讨论班，帮助搭建铁磁流体发电实验台，以及收集整理文献等，每一项工作尽职尽责，在此一并表示感谢!

本书凝聚着集体智慧，而且经过长期酝酿和反复斟酌，参考了近年来该领域所能查阅到的诸多经典著作. 写作过程中，在用词和表述上特别注重与经典著作和文献资料的衔接，以便读者查阅参考. 由于著者以往没有接触过铁磁流体非牛顿流的工作，所以本书没有涉及此方面内容，对此感兴趣的读者可参阅北京科技大学郑连存教授的《非线性偏微分方程近代分析方法》一书. 著者深感李德才的《磁性液体密封理论及应用》近乎完美，故本书未涉及磁性液体密封内容. 著者虽倾尽全

力但仍感觉能力和水平有限, 不当之处在所难免, 敬请读者批评指正. 著者联系方式：Email:alimingjun@163.com；微信：18309838001.

李明军　张荣培

2016 年 12 月于沈阳

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

目　录

前言
第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　麦克斯韦电磁学理论 ····· 1
1.2　铁磁流体力学基本内容 ····· 3
1.3　铁磁流体力学的发展现状 ····· 4
1.4　铁磁流体力学的应用 ····· 6
参考文献 ····· 8
第 2 章　铁磁流体的物理性质 ····· 9
2.1　铁磁畴结构理论 ····· 9
2.1.1　铁磁矿 ····· 9
2.1.2　铁磁畴结构理论 ····· 11
2.2　铁磁流体基载液和表面活性剂特性 ····· 12
2.3　铁磁流体颗粒的基本结构及其稳定性 ····· 14
2.3.1　克服重力场的稳定性问题 ····· 15
2.3.2　避免凝聚的稳定性问题 ····· 15
2.4　铁磁流体的基本物理参数 ····· 17
2.4.1　铁磁流体的粘度 ····· 17
2.4.2　铁磁流体的磁化强度 ····· 18
2.5　热磁不稳定性 ····· 22
2.6　铁磁颗粒的体积分数 ····· 24
参考文献 ····· 25
第 3 章　铁磁流体力学基本方程组 ····· 28
3.1　流体力学基本方程组 ····· 28
3.2　铁磁流体力学运动方程 ····· 31
3.3　麦克斯韦方程组 ····· 34
3.4　铁磁流体力学 Bernoulli 方程 ····· 38
3.5　磁流体静力学 ····· 41
3.6　铁磁颗粒和载液之间相互作用的边界条件 ····· 43
3.7　热对流现象 ····· 45

参考文献 ····· 50
第 4 章　铁磁流体的磁粘性特征 ····· 52
4.1　铁磁流体的磁粘性 ····· 52
4.2　铁磁流体管道流的自旋 ····· 54
4.2.1　不可压缩铁磁流体控制方程及其简化 ····· 55
4.2.2　非平衡磁场的表达形式 ····· 56
4.2.3　铁磁流体管道流各方向分量的控制方程 ····· 58
4.2.4　磁粘度表达式 ····· 59
4.3　结果与讨论 ····· 60
参考文献 ····· 61
第 5 章　铁磁流体颗粒在载液中的运动理论 ····· 64
5.1　铁磁颗粒之间的范德瓦耳斯势能 ····· 64
5.2　铁磁流体颗粒大小分布参数的测量 ····· 67
5.2.1　铁磁流体颗粒的中值直径和标准偏差 ····· 67
5.2.2　铁磁流体颗粒大小分布 ····· 69
5.2.3　结论分析 ····· 72
5.3　铁磁流体颗粒在载液中运动所受磁压 ····· 72
5.4　用磁流体测量气液二相流中气泡速度的技术 ····· 74
5.4.1　实验 ····· 74
5.4.2　结果和考察 ····· 77
5.4.3　结论 ····· 79
参考文献 ····· 79
第 6 章　铁磁流体扩散抛物化稳定性理论 ····· 82
6.1　流体力学扩散抛物化理论 ····· 82
6.1.1　扩散抛物化方程组特征和次特征 ····· 84
6.1.2　扩散抛物化稳定性方程组的数学特征 ····· 85
6.2　铁磁流体扩散抛物化稳定性方程组 ····· 86
6.3　铁磁流体抛物化稳定性方程组的椭圆特性分析 ····· 89
6.3.1　线性铁磁流体 PSE 的特征和次特征 ····· 89
6.3.2　非线性铁磁流体 PSE 的特征和次特征 ····· 92
6.4　消除 PSE 的剩余椭圆特性途径 ····· 94
参考文献 ····· 94
第 7 章　铁磁流体热传导模型问题 ····· 97
7.1　模型方程 ····· 98
7.2　铁磁流体扩散抛物化方程组 ····· 99

7.2.1 定解条件及其参数取值 ····· 99
7.2.2 铁磁流体基本方程组的层次结构 ····· 100
7.3 采用扩散抛物化方程组数值模拟热传导过程 ····· 104
7.4 结果讨论 ····· 106
参考文献 ····· 107
第 8 章 铁磁流体润滑理论与化学机械抛光技术 ····· 108
8.1 平衡方程 ····· 109
8.2 具有空化的圆柱滚子的铁磁流体润滑 ····· 111
8.2.1 铁磁流体动压润滑 ····· 113
8.2.2 挤压薄膜轴承 ····· 114
8.2.3 滑动轴承 ····· 115
8.3 铁磁流体化学机械抛光模型问题 ····· 117
8.4 CMP 的工作原理 ····· 118
8.5 考虑对流效应的铁磁流体 CMP 模型及数值模拟 ····· 119
8.5.1 具有对流效应的 CMP 润滑方程的推导 ····· 119
8.5.2 具有对流效应的铁磁流体 CMP 润滑方程的推导 ····· 122
8.5.3 数值实验及其实验结果分析 ····· 124
8.5.4 结论 ····· 130
参考文献 ····· 130
第 9 章 铁磁流体发电 ····· 134
9.1 微型的电能供应装置 ····· 134
9.2 铁磁流体发电实验系统 ····· 135
9.2.1 实验装置 ····· 135
9.2.2 实验流体 ····· 137
9.2.3 实验结果及其分析 ····· 138
9.2.4 结论 ····· 142
9.3 改进的铁磁流体发电实验系统 ····· 142
9.3.1 改进的实验装置 ····· 142
9.3.2 实验所用流体 ····· 143
9.3.3 实验过程 ····· 144
9.3.4 实验原理与结果分析 ····· 145
参考文献 ····· 149
第 10 章 铁磁流体在多孔介质中的流动 ····· 151
10.1 多孔介质的渗流定律 ····· 151
10.1.1 达西定律 ····· 151

10.1.2　在多孔介质中磁流体渗流的渗透定律 ····· 152
10.1.3　多尺度渐近展开技术 ····· 153
10.1.4　宏观体积平衡下的达西定律 ····· 155
10.2　铁磁流体在多孔介质中的微观描述 ····· 157
10.2.1　铁磁流体在多孔介质中流动的微观描述 ····· 157
10.2.2　尺度阶的分析 ····· 158
10.2.3　无量纲化的局部流的描述 ····· 159
10.3　均匀化方法在磁流体渗流中的应用 ····· 160
10.3.1　均匀化方法 ····· 160
10.3.2　宏观磁场和磁感应强度 ····· 161
10.3.3　宏观质量流 ····· 163
10.4　渗透张量的正定对称性 ····· 165
10.4.1　渗透张量的正定性 ····· 165
10.4.2　渗透张量的对称性 ····· 166
参考文献 ····· 166
附表 1　重要变量 ····· 168
附表 2　重要名词 ····· 170
彩图

第1章 绪　　论

1.1 麦克斯韦电磁学理论

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell，1831 ~ 1879) 出生于苏格兰爱丁堡, 英国物理学家、数学家, 经典电动力学的创始人, 统计物理学的奠基人之一 (图 1.1). 麦克斯韦是从牛顿到爱因斯坦这一整个阶段中最伟大的理论物理学家, 于 1873 年出版了科学名著《电磁理论》, 系统、全面、完美地阐述了电磁场理论. 这一理论成为经典物理学的重要支柱之一.

图 1.1　青年时代的麦克斯韦

在麦克斯韦以前, 人们就对电和磁这两个领域进行了广泛的研究, 人们都知道这两者是密切相关的. 适用于特定场合的各种电磁定律已被发现, 但是在麦克斯韦之前却没有形成完整、统一的学说. 麦克斯韦用列出的简短四元方程组 (但却非常复杂), 就可以准确地描绘出电磁场的特性及其相互作用的关系. 这样他就把混乱纷纭的现象归纳为一种统一完整的学说. 一个多世纪以来, 麦克斯韦方程组在理论和应用科学上都已经得到广泛研究.

麦克斯韦方程组的最大优点在于它的通用性, 在任何情况下都可以应用. 在此之前的所有电磁定律都可由麦克斯韦方程组推导出来, 许多从前没能解决的未知数也能在方程组推导过程中寻求答案. 这些新成果中最重要的结果都是由麦克斯

韦本人推导出来的. 1865 年麦克斯韦发表《电磁场的动力学理论》, 为解决与光速之间的纯唯象问题提供了一个新的理论框架. 它以实验和几个普遍的动力学原理为根据, 证明了不需要任何有关分子涡旋或电粒子之间的力的专门假设, 电磁波在空间的传播就会发生. 在这篇论文中, 麦克斯韦完善了他的方程. 他采用拉格朗日和哈密顿创立的数学方法, 由该方程组直接导出了电场和磁场的波动方程, 其波动的传播速度为一个介电系数和磁导系数的几何平均的倒数, 接近每秒 300000 千米 (186000 英里), 这一速度正好等于光速. 这一结果再一次与麦克斯韦的推算结果完全一致, 至此电磁波的存在是确定无疑了. 由此, 麦克斯韦大胆断定, 光也是一种电磁波. 法拉第当年关于光的电磁论的朦胧猜想, 经过麦克斯韦的精心计算而变成科学的推论. 因此, 麦克斯韦方程组不仅是电磁学的基本定律, 也是光学的基本定律. 的确如此, 所有先前已知的光学定律可以由方程组导出, 许多先前未发现的事实和关系也可由麦克斯韦方程组导出. 在此基础上, 麦克斯韦认为光是频率介于某一范围之内的电磁波. 这是人类在认识光的本性方面的又一大进步. 正是在这一意义上, 人们认为麦克斯韦把光学和电磁学统一起来了, 这是 19 世纪科学史上最伟大的综合之一.

麦克斯韦方程组表明与可见光的波长和频率不同的其他电磁波也可能存在, 也就是说, 可见光并不是唯一的一种电磁辐射. 海因里希·鲁道夫·赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857 ~ 1894) 公开演示证明了这些从理论上得出的结论. 赫兹不仅生产出而且检验出了麦克斯韦预言的不可见光波. 几年以后, 古列尔莫·耶尔摩·马可尼 (Guglielmo Marchese Marconi, 1874 ~ 1937) 证明这些不可见光波可以用于无线电通信, 无线电随之问世. 今天我们也用不可见光作为电视通信. X 射线、γ 射线、红外线、紫外线都是电磁波辐射的其他一些例子, 所有这些射线都可以用麦克斯韦方程组加以研究.

在物理学上, 麦克斯韦的《电磁理论》可与牛顿的《数学原理》、达尔文的《物种起源》相提并论. 从安培、奥斯特经法拉第、汤姆孙, 最后到麦克斯韦, 通过几代人的不懈努力, 电磁理论的宏伟大厦终于在麦克斯韦的系统总结之后建立起来. 麦克斯韦比以前更为彻底地应用了拉格朗日方程, 推广了动力学的形式体系. 麦克斯韦系统地总结了人类在 19 世纪中叶前后对电磁现象的探索研究轨迹, 其中包括库仑、安培、奥斯特、法拉第等不可磨灭的功绩, 更为细致、系统地概括了他本人的创造性努力的结果和成就, 从而建立起完整的电磁学理论.

麦克斯韦的主要贡献包括: 建立了麦克斯韦方程组, 创立了经典电动力学, 预言了电磁波的存在, 并且提出了光的电磁说. 麦克斯韦是电磁学理论的集大成者. 1831 年, 麦克斯韦诞生, 同一年电磁学理论奠基人法拉第提出电磁感应定律. 后来麦克斯韦与法拉第结成忘年之交, 共同构筑了电磁学理论的科学体系. 在物理学历史上, 人们认为牛顿的经典力学打开了机械时代的大门, 麦克斯韦的电磁学理论则

试读结束: 需要全本请在线购买: www.ertongbook.com

为电气时代奠定了基石.

1.2 铁磁流体力学基本内容

普通流体所受外力作用一般只考虑重力场, 当考虑重力场之外其他不同场对流体的作用时, 我们主要关注如下三类特殊流体:

(1) 电动流体动力学 (electrohydrodynamics, EHD), 主要考虑电场对流体的作用, 一般不涉及磁场作用.

(2) 磁流体动力学 (magnetohydrodynamics, MHD), 同时考虑电场和磁场的综合作用, 这在等离子体物理尤其是磁约束聚变物理中很常见.

(3) 铁磁流体动力学 (ferrohydrodynamics, FHD 或者 ferrofluid mechanics, FFM), 主要考虑磁场对流体的动力学作用. 这是近几十年来出现的人工流体材料的动力学理论被深入研究并广泛应用于现代工业的典型范例.

洛伦兹力定律是荷兰物理学家亨德里克·安东·洛伦兹 (Hendrik Antoon Lorentz, 1853 ~ 1928) 于 1895 年建立经典电子论时, 作为基本假定而提出的, 后被大量实验结果所证实, 因此得名. 根据洛伦兹力定律, 如果电场和磁场同时存在, 则运动点电荷受力为电场力和磁场力之和, 从而描述洛伦兹力的洛伦兹力方程可以表达为

$$\boldsymbol{F} = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}),$$

其中, $\boldsymbol{F}$ 是洛伦兹力, q 是带电粒子的电荷量, $\boldsymbol{E}$ 是电场强度, $\boldsymbol{v}$ 是带电粒子的速度, $\boldsymbol{B}$ 是磁感应强度. 在国际单位制中, 洛伦兹力的单位是牛顿, 符号是 N. 洛伦兹力有如下几个基本特性:

(1) 洛伦兹力方向总与运动方向垂直;

(2) 洛伦兹力永远不做功 (有束缚时, 其分力可以做功, 但总功一定为 0);

(3) 洛伦兹力不能改变运动电荷的速率和动能, 只能通过改变电荷的运动方向使之偏转.

电动流体和等离子体中带电颗粒在外磁场作用下, 同样受到洛伦兹力.

20 世纪 30 年代后期到 40 年代初期, 磁流体动力学已经成为一门完全成熟的学科. 1942 年, 阿尔芬波被发现, 这一现象是磁流体动力学特有的现象, 在天体物理中非常重要. 大约在同一时期, 地球物理学家开始怀疑地球磁场产生于地心的液态金属的力学行为. 1919 年, 拉莫尔首次在太阳磁场存在下提出假说, 引起长时间激烈的研究, 并持续至今.

铁磁流体力学是电磁学理论和流体力学基本理论相结合发展起来的一门新兴学科, 主要研究铁磁性流体在外磁场和温度梯度作用下的流动和传热过程. 1985 年

Rosensweig 的开山之作*Ferrohydrodynamics* 掀起了铁磁流体力学研究的热潮.

铁磁流体由铁磁颗粒、表面活性剂和载体溶液三要素构成. 铁磁颗粒是一种直径约为 10nm 的铁磁纳米微粒, 通过吸附于表面的活性剂分子 (2nm) 而稳定分散于合适基液中所形成的一种胶态磁性材料, 通常源自磁铁矿、赤铁矿或者其他包含铁的混合物. 铁磁颗粒分散于载体溶液 (如油或水) 中, 表面活性剂吸附于铁磁颗粒表面, 即制成一种胶态磁性材料, 铁磁颗粒是一种人工材料. 铁磁流体拥有两个方面的明显特征, 既具有液体的流体特性, 又具有固体的磁性.

根据所含铁磁颗粒的不同, 铁磁流体可分为铁氧体系、金属系和氮化铁系 3 类. 根据基液的不同, 又可分为水基、油基、醚基和酯基 4 类. 铁磁流体在功能材料中是一支新秀, 既具有磁性又具有流动性. 由于具有交叉特性, 所以这种液体磁性材料应满足的性能要求是：高的饱和磁化强度 (saturatior magnetization), 在常温下有长期的稳定性, 在重力和电磁力的作用下不沉淀, 有好的流动性. 铁磁流体一般不考虑电导率作用, 在外磁场作用下存在磁感应强度, 主要受到开尔文 (Kelvin) 力作用. 与普通流体相比, 铁磁流体具有以下特点.

(1) 铁磁流体和外界磁场的响应性. 在外加磁场作用下, 铁磁颗粒有悬浮在载体中的能力, 并将流向固定在磁场强度高的一方. 在垂直磁场作用下, 会自发地形成稳定的波峰.

(2) 铁磁流体的磁化强度 (magnetization) 感应性. 铁磁流体既具有液体的流动性, 又具有固体磁性材料的特性, 有感应磁通的能力. 调节外加磁场强度, 可以改变铁磁流体的表观比重和粘度, 能使磁性的铁磁颗粒稳定地悬浮在其中.

(3) 铁磁流体的磁粘滞现象. 在外磁场作用下, 磁场影响磁矩, 从而影响与流体有关的铁磁颗粒本身. 对磁矩与粒子为刚性联系的情形, Shiliomis 给出了旋转粘度理论. 在没有外磁场作用下, 磁性粒子之间的相互作用可以忽略, 铁磁流体的粘度和流体动力学粘度一样只和浓度有关. 对外加磁场的响应速度快, 撤去外磁场后, 铁磁流体中的磁性粒子很快呈现无规则分布, 即在无外加磁场时, 铁磁流体本身是不显磁性的.

(4) 超声波和光在铁磁流体中表现出较大的能量耗散和各向异性. 超声波在铁磁流体中传播时, 会受到较大的粘性作用, 能量的耗散会迅速加大. 速度衰减还与外磁场有关, 并显示各向异性. 它的介电常数也是各向异性的. 铁磁流体一般是不透明的, 光通过稀释的铁磁流体或铁磁流体的薄层时, 会产生双折射现象. 磁化时, 使相对于磁场方向具有光的各向异性, 具有高的折射率.

1.3　铁磁流体力学的发展现状

荷兰物理学家洛伦兹是经典电子论的创立者. 他认为电具有 “原子性”, 电的本

身是由微小的实体组成的. 后来这些微小实体被称为电子. 洛伦兹以电子概念为基础来解释物质的电性质. 从电子论推导出运动电荷在磁场中要受到力的作用, 即洛伦兹力. 这样当把光源放在磁场中时, 光源的原子内电子的振动将发生改变, 使电子的振动频率增大或减小, 导致光谱线的增宽或分裂. 1896 年 10 月, 洛伦兹的学生塞曼发现, 在强磁场中钠光谱的正线有明显的增宽, 即产生塞曼效应, 证实了洛伦兹的预言. 塞曼和洛伦兹共同获得 1902 年诺贝尔物理学奖.

早在 18 世纪下半叶, 英国自然哲学家 G. 奈特在磁学研究中就意识到铁磁流体的重要性和应用的可能性. 他试图将铁粉撒入水中制取铁磁流体, 但未成功.

1907 年, Pierre Weiss 提出磁畴 (domain) 的概念, 假想铁磁固体存在磁畴, 在磁畴内单个原子的磁矩具有固定方向, 磁畴的存在是能量极小化的结果, 这是物理学家列夫 • 朗道和叶津 • 李佛西兹 (Evgeny Lifshitz) 提出的观点. 假设一个铁磁性长方块是单独磁畴, 那么会有很多正磁荷与负磁荷分别形成于长方块的顶面与底面, 从而拥有较强烈的磁能. 假设铁磁性长方块分为两个磁畴, 其中一个磁畴的磁矩朝上, 另一个朝下, 则会有正磁荷与负磁荷分别形成于顶面的左右边, 又有负磁荷与正磁荷相反地形成于底面的左右边, 所以, 磁能较微弱. 假设铁磁性长方块是由多个磁畴组成的, 由于磁荷不会形成于顶面与底面, 只会形成于斜虚界面, 所以所有的磁场都包含于长方块内部, 磁能更微弱. 这种组态称为“闭磁畴”(closure domain), 是最小能量态.

如果物体的总磁矩平衡, 也就是物体的总磁矩为 0, 则物体不显示磁性. 对物体而言不能无限地把自己分割成无限个磁畴, 所以需要用能量来构成磁畴壁 (magnetic domain walls). 当铁磁材料受到某一固定方向的磁场磁化时, 就会打破磁壁垒, 这时物体的总磁矩不再为零, 就会显示一定的磁性. 这一理论直到 1928 年才由沃纳 • 卡尔 • 海森伯 (Werner Karl Heisenberg) 通过量子理论来解释. 磁畴理论的建立为铁磁流体研究提供了很好的理论基础. 在学术上, 海森伯不仅开拓了量子力学的发展道路, 而且为物理学的其他分支 (如量子电动力学、涡动力学、宇宙辐射性物理和铁磁性理论等) 都做出了杰出的贡献, 获得 1932 年度的诺贝尔物理学奖.

1963 年美国的 Papell 获得了第一个铁磁流体制备专利, 并于 1965 年在美国国家航空航天局 (NASA) 航天产品的密封中被成功应用. 自此引发了对这种新型材料的研究开发和应用, 并不断取得新的进展, 人们迅速将实验结果转化为实用化产品. 1964 年 Neuringer 和 Rosensweig 在*Physics of Fluids* 上发表有关铁磁流体的第一篇奠基性文章. 之后, 铁磁流体力学理论研究快速发展, 特别是美国和苏联在该领域取得了许多重要成就.

自铁磁流体发现以来, 铁磁流体的特殊力学行为就受到力学工作者的广泛关注. 国际上第一本系统描述铁磁流体力学的专著是 1985 年 Rosensweig 撰写的 *Ferrohydrodynamics*, 很好地总结了前人研究成果, 将麦克斯韦方程组和流体力学基

本方程组结合起来, 形成一套完整的力学体系. 自此铁磁流体力学开始独立成为一门新兴学科分支.

由于铁磁流体和通常流体的物理性质存在很大差异, 在外部磁场作用下铁磁流体运动将表现出很多特殊的物理特征. Rosensweig 撰写的*Ferrohydrodynamics*以及 1993 年池长青等出版的第一本中文教材《铁磁流体力学》一直作为研究生教材, 前者已经出版 30 余年, 后者也有 20 余年. 铁磁流体力学在之后研究发展过程中产生了许多新概念, 获得了许多新的理论和应用研究成果, 这为本书提供了许多新的内容.

1977 年在意大利乌迪内市召开了首届磁流体国际会议, 对铁磁流体特性的研究和应用研究进展做了全面总结和回顾. 该会议是由勃坷夫斯基 (B. M. Berkovosky) 主持召开的 (库理科夫斯基等, 1966), 人们讨论了铁磁流体的制备及力学特性. 此后, 国际磁流体会议每三年召开一次. 第十四届国际磁流体会议 (ICMF14) 于 2016 年 7 月 3 日 ~ 7 月 8 日在俄罗斯叶卡捷琳堡举行 (图 1.2). 此次大会受邀代表 150 人, 到会 146 人, 其中中国代表 5 人, 并有 2 人发表成果. 本次会议包括物理性质、传质与传热、理论与计算机模拟、磁性聚合物复合材料、结构与流变特性、生物医学及其应用等六个专题, 著者受邀参加了本次会议, 并发表学术论文*Elliptical characteristics analysis for parabolized stability equations of magnetic fluid motion.*

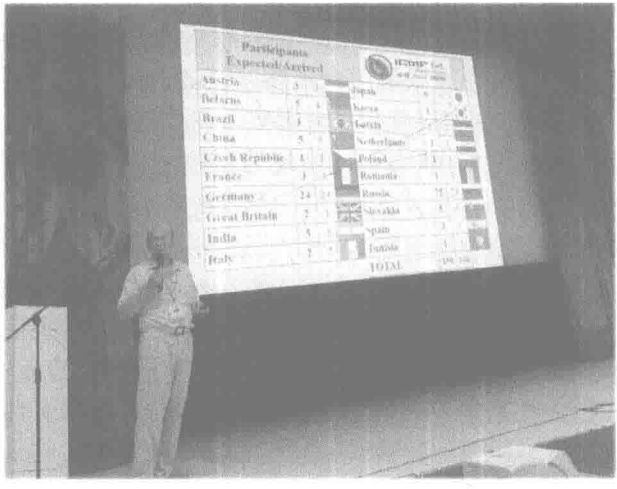

图 1.2　Ural Federal 大学 Ivanov 教授介绍第十四届国际磁流体会议参会情况

1.4　铁磁流体力学的应用

铁磁流体力学主要研究铁磁流体以质量、动量和能量守恒方程组以及麦克斯

韦方程组作为基本控制方程的铁磁流体的力学行为, 针对研究在外磁场作用下以铁磁流体为工作介质的工程实际应用问题中的流动和传热过程. 一直以来人们认为强磁性材料是指磁性固体材料, 但随着铁磁流体的深入研究和广泛应用, 人们开始认识到铁磁流体等磁流体也是一类新型磁性材料, 并和纳米材料紧密相关. 20 世纪 70 年代我国开始进行铁磁流体的基础研究和应用探索. 目前, 应用最广的便是磁流体密封、铁磁流体的重力分选技术以及加速度计等方面.

随着深空、深海、深地、核能、化工、军工和石油等高科技领域的迅速崛起, 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. 磁流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, 但该类密封涉及很多学科, 技术难度很高. 国内磁性液体密封研究领域有代表性的工作主要是清华大学李德才创新团队的研究工作, 一些特色成果包括在《磁性液体密封理论及应用》一书中, 有兴趣的读者可以查阅.

近年来, 铁磁流体在医学上的应用日益受到人们关注, 被称为“生物导弹”, 在外磁场作用下, 磁流体作为药物的载体可以在人体内靶向给药, 对治疗肿瘤效果显著, 另外也用于 X 射线或 NMR 诊断中的不透光材料. 此外, 在生物医学领域也得到了广泛应用, 铁磁流体能够对身体的特定部位加热治疗癌症, 用交替的外部磁场切除肿瘤. 在采矿过程中, 某些流体在磁场或电场与磁场的联合作用下能够磁化, 从而呈现“似加重现象”, 对位于分布在流体中的 (非磁性) 颗粒产生磁浮力作用, 这些流体称为磁流体, 是非常稳定的两相流体. 似加重后的密度称为“表观密度”(apparent density), 可以通过改变外加磁场强度、磁场梯度或电场强度来调节“表观密度” 大小. 由于“表观密度”比介质本身的密度高许多倍, 而分布在流体中的 (非磁性) 颗粒并不磁化, 所以流体对颗粒产生很大的浮力 (可以达到原来的许多倍). 依据磁流体的这一特殊性质发展的磁流体分选技术, 可用来分选密度范围较广的物料. 根据分选原理及分选介质的不同, 磁流体分选技术可分为磁流体动力分选和磁流体静力分选两种. 磁流体分选不仅可以将磁性物料与非 (弱) 磁性物料分开, 也可以将各种非 (弱) 磁性物料按密度差异分离开, 这又使磁流体分选不同于一般普通磁选, 所以有人把磁流体分选称为第二类磁选或特殊磁选. 磁流体分选可用于分选有色、稀有和贵金属矿石 (锡、锆、金矿等)、黑色金属矿石 (铁、锰矿等)、煤炭、非金属矿石 (金刚石、钾盐等). 在岩矿鉴定中磁流体可代替重液进行矿物颗粒的分离. 在固体废物的处理和利用中, 磁流体分选法占有特殊的地位, 它不仅可分选各种工业废渣, 而且可从城市垃圾中分选铝、铜、锌、铅等金属.

最近, 人们成功开发了比铁氧体饱和磁化强度更大的纳米金属铁粉分散于液体中的铁磁流体, 它是一种在水中添加粒径大的正离子或负离子 (取代表面活性剂) 而将铁磁性纳米颗粒分散于液体中的离子性铁磁流体. 目前, 在铁磁流体中分散的铁磁颗粒仅限于粒径 10nm 左右, 但可以通过改变所分散的铁磁性颗粒和表面活性

剂的性质来适应其各种用途. 当采用感温性铁氧体时, 铁磁性颗粒可应用于铁磁流体泵和热泵. 溶剂采用液态金属时则可制备成导电性磁流体, 而溶剂采用弹性橡胶时可制成磁性橡胶. 如果采用气体作为介质还可制成铁磁性气体.

铁磁流体的应用现已扩展到机械、电子、能源、化工、冶金、船舶、航天、遥测、仪表、印刷、环保、卫生、医疗等诸多领域, 在密封、冷却、润滑、医学、发动机、压缩机、换能器、计量阀、造影剂、生物学、精密研磨、阻尼减振、矿物分离、油水分离、快速印刷、定向淬火、执行元件、磁畴观察、各向异性以及其他方面有着新的应用, 是唯一具有工业实用价值的液体磁性智能化功能材料.

参考文献

博伊德, 等. 1977. 等离子体动力学. 戴世强, 等译. 北京: 科学出版社.

池长青. 1993. 铁磁流体力学. 北京: 北京航空航天大学出版社.

池长青. 2011. 铁磁流体的物理学基础和应用. 北京: 北京航空航天大学出版社.

库理科夫斯基, 等. 1966. 磁流体力学. 徐复, 等译. 合肥: 中国科学技术大学出版社.

李德才. 2003. 磁性液体理论及应用. 北京: 科学出版社.

李德才. 2010. 磁性液体密封理论及应用. 北京: 科学出版社.

李学慧. 2009. 纳米磁性液体——制备、性能及其应用. 北京: 科学出版社.

山口博司. 2011. 磁性流体. 东京: 森北出版社株式会社.

吴其芬, 李桦. 2007. 磁流体力学. 长沙: 国防科技大学出版社.

周文运. 1991. 永磁铁氧体和磁性液体设计工业. 成都: 电子科技大学出版社.

Berkovsky B M, Medvedev V F, Krakov M S. 1993. Magnetic Fluids Engineering Application. Oxford: Oxford University Press.

Blums E, Cebers A, Maiorov M M. 1997. Magnetic Fluids. Berlin: Walter de Gryuter and Co.

Davidson P A. 2011. An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press.

Ivanov A. 2016. 14th International Conference on Magnetic Fluids, Book of Abstracts. Ekatricburg, Russia: Ural Federal University.

Martin C R. 1994. Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach. Science, 266(5193): 1961-1966.

Odenbach S. 2002. Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. New York: Springer-Verlag.

Rosensweig R E. 1985. Ferrohydrodynamics. Mineola, New York: Dover Publications.

Yamaguchi H. 2008. Engineering Fluid Mechanics. New York: Springer-Verlag.

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com