

纳米磁性流体 密封液体技术

封士彩 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

纳米磁性流体密封液体技术

封士彩 著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

零泄漏、零磨损、长寿命、自润滑的密封方式一直是机电设备密封的理想性能要求。纳米磁性流体是唯一一种具有真正工业实用价值的液体智能磁性材料，纳米磁性流体密封液体技术则充分利用了这一材料性能。全书共分 10 章：第 1 章概述说明了纳米磁性流体的组成特点及在密封液体方面的研究状况；第 2 章全面分析了纳米磁性流体的性能特性及应用；第 3 章阐述了纳米磁性流体的制备方法及工艺，并分析了它与被密封液体的不相溶性；第 4 章阐述了纳米磁性流体的非牛顿特性；第 5 章阐述了纳米磁性流体与被密封液体的相对运动速度；第 6 章阐述了纳米磁性流体与被密封液体界面的波动性；第 7 章阐述了纳米磁性流体静密封液体界面的稳定性；第 8 章阐述了纳米磁性流体动密封液体界面的稳定性理论；第 9 章介绍了纳米磁性流体动密封液体界面的稳定性试验；第 10 章介绍了纳米磁性流体动密封液体的工程应用实例。

本书是作者近期的研究成果，可供机械密封设计开发与制造专业技术人员，高等院校相关专业的本科生、硕士研究生、博士研究生及科研机构的研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

纳米磁性流体密封液体技术/封士彩著. —西安：西安电子科技大学出版社，2017.12

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4827 - 9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 010574 号

策 划 高 樱

责任编辑 张 倩 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 11.5

字 数 266 千字

定 价 28.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4827 - 9/TM

XDUP 5129001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

自然界是充满规律的，而规律是客观的，是不以人的意志为转移的。科技工作者的任务主要是观察归纳自然现象并揭示它的因果关系及规律，探索并解决那些通常被认为是不可克服的难题，探索从现象到本质，达到遵循和应用规律的目的。

磁性流体是 20 世纪 40 年代发现的，60 年代获得应用，是目前在常温下唯一可以存在的液态磁性物质。对磁性流体的研究是一门涉及数学、电磁学、物理学、化学、力学、流变学、机械学等学科的边缘学科和新兴学科。磁性流体在重力和磁力作用下能够长期保持稳定，不会出现沉淀或分层现象，属于软物质的一种，兼有固体磁性材料的磁性与液体材料的流动性，既非普通的牛顿流体，也不同于常用的非牛顿流体，故有着广泛的应用。纳米磁性流体密封液体技术是有许多特殊功能的尖端纳米技术之一，对此进行研究有着实用的意义。

机械密封自 19 世纪末的第一项专利开始至今已发展了 100 多年。机械密封新技术、新概念、新结构、新产品、新材料、新工艺和新标准不断涌现，并向广度发展；高性能、高参数和高水平的产品大量研制出来，并向深度发展，使机械密封的使用范围不断扩大。随着人们对环境保护的日益关注，对机械密封的要求也越来越严格。因此，机械密封的发展总体趋势是利用新概念、新技术、新工艺和新材料，改进机械密封结构，以提高机械密封的可靠性、延长寿命、降低泄漏量和开发出适用于特殊工况下的机械密封产品。

作者从 2000 年开始从事纳米磁性流体的研究，10 余年来，一直关注并从事该领域的教学与科研工作。本书是在博士论文基础上撰写而成的，主要内容为综述磁性流体的性能特点及在密封液体方面的研究状况，分析纳米磁性流体的性能特性、应用、制备及非牛顿特性，阐述纳米磁性流体静密封液体界面的稳定性，以及纳米磁性流体与被密封液体的相对运动速度、界面的波动性，并对纳米磁性流体动密封液体界面的稳定性进行理论和试验分析，阐明纳米磁性流体动密封液体的工程应用实例。

本书以界面化学、物理学、工程热力学、流体力学、磁学、机械学等为基础，以建立模拟试验台及用相关仪器进行测试和试验为桥梁，以应用 MATLAB 语言进行计算机仿真的

方法为手段，以探讨磁性流体与被密封液体界面的稳定性的内在规律为目的，从理论上和试验上来研究，意义在于为密封行业的发展和进步作出一定的贡献。

本书在撰写过程中参阅了国内外多种同类教材、论文、专著及相关网站中的资料，得到了各界人士的帮助、指导和支持，受到了常熟理工学院现代机电技术中心项目(KYZ2012088Z)、天银机电项目(KYZ2011025Z)、矿山机械的理论与应用研究项目(KYZ2013005Z)以及电梯智能安全实验室的资助，在此一并表示衷心的感谢。同时，还要感谢中国矿业大学杨志伊、肖兴明、唐小行、刘同冈、刘书进、高宏、钱济国、鲍久圣、胡元等老师及所有关心、支持和帮助过我的常熟理工学院各级领导、老师和同事，感谢家人多年来的理解和大力支持。最后，还要特别感谢本书所引用文献的作者李德才、池长清、王之珊、赵丕智、邹继斌、杨洪娟、杨恩霞、许杨等，他们辛勤的工作和对科技事业的默默贡献给本书提供了良好的铺垫和基础，他们的开创性研究和智慧结晶同样令人尊敬。

限于作者水平，书中的缺点和不足在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2017年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米磁性流体概述	1
1.1.1 纳米磁性流体的定义	1
1.1.2 纳米磁性流体的组成	2
1.1.3 纳米磁性流体的性能及与其他液体相比具有的特点	5
1.1.4 纳米磁性流体密封与传统密封相比具有的特点	5
1.2 机械密封概述	7
1.3 界面概述	9
1.4 稳定性概述	10
1.5 文献综述	11
1.5.1 纳米磁性流体研究的历史状况及主要研究方向	11
1.5.2 纳米磁性流体应用于液体密封方面的研究状况	14
第 2 章 纳米磁性流体的性能特性及应用	18
2.1 纳米磁性流体的性能指标	18
2.2 纳米磁性流体的特性	19
2.2.1 稳定性	19
2.2.2 磁化性能——超顺磁特性和无磁滞特性	21
2.2.3 表观黏度特性	22
2.2.4 热学特性	24
2.2.5 光学特性	24
2.2.6 磁致伸缩效应	25
2.2.7 声学特性	25
2.3 纳米磁性流体的应用	26
2.3.1 磁性流体应用概述	26
2.3.2 密封	27
2.3.3 润滑	30

2.3.4	阻尼	31
2.3.5	研磨及抛光	33
2.3.6	矿物分选	34
2.3.7	生物医学	35
2.3.8	油水分离和废水处理	36
2.3.9	工业机器人	36
2.3.10	其他应用	37
第3章 与被密封液体不相溶的纳米磁性流体的制备		38
3.1	纳米磁性流体的制备方法	38
3.2	纳米磁性流体的制备过程及工艺	41
3.2.1	化学原料及仪器	41
3.2.2	制备过程及步骤	43
3.2.3	制备注意事项	45
3.3	纳米磁性流体与被密封液体不相溶性试验	47
第4章 纳米磁性流体的非牛顿特性		50
4.1	非牛顿流体的基本特性及其本构方程	50
4.1.1	非牛顿流体概述	50
4.1.2	非牛顿流体不同于牛顿流体的奇异特性	51
4.1.3	非牛顿流体类型及其本构方程	52
4.2	两相流的特性	53
4.2.1	两相流概述	53
4.2.2	两相流的类型	54
4.2.3	两相流的基本理论	55
4.3	纳米磁性流体的非牛顿特性	56
4.3.1	纳米磁性流体非牛顿特性分析及试验	56
4.3.2	纳米磁性流体黏度特性分析	61
第5章 纳米磁性流体与被密封液体的相对运动速度		63
5.1	纳米磁性流体与被密封液体为定常层流(Stratified flow)的条件	63
5.2	被密封液体的速度分布规律	65
5.3	纳米磁性流体的速度分布规律	70
5.4	纳米磁性流体与被密封液体的相对运动速度差分析	77
第6章 纳米磁性流体动密封液体界面的波动性		81
6.1	波动概述	81

6.2	纳米磁性流体与被密封液体界面波动存在性的试验	82
6.2.1	试验目的	82
6.2.2	试验用的材料及仪器	83
6.2.3	试验装置的设计及试验现象	83
6.2.4	试验结果	86
6.3	纳米磁性流体与被密封液体界面波动性的机理分析	87
6.4	纳米磁性流体与被密封液体界面波动性的理论探讨	88
6.4.1	双流体模型的确定	88
6.4.2	纳米磁性流体与被密封液体界面波动性数学模型的建立	88
第7章	纳米磁性流体静密封液体界面的稳定性	96
7.1	纳米磁性流体静密封液体要解决的主要问题	96
7.2	外磁场对纳米磁性流体薄膜的影响	97
7.2.1	薄膜的研究意义	97
7.2.2	垂直磁场对纳米磁性流体薄膜的影响	97
7.2.3	平行磁场对纳米磁性流体薄膜的影响	100
7.3	外磁场对磁性流体静密封液体界面影响的试验	101
7.4	纳米磁性流体与被密封液体静密封界面稳定性的机理分析	104
7.4.1	物理模型	104
7.4.2	数学模型	104
7.4.3	无磁场情况下界面稳定性分析	105
7.4.4	外加垂直磁场情况下界面稳定性分析	106
7.4.5	外加平行磁场情况下界面稳定性分析	107
第8章	纳米磁性流体动密封液体界面的稳定性理论	109
8.1	从界面的化学及热力学特性来分析界面的稳定性	109
8.1.1	界面张力及界面自由能的特性	109
8.1.2	液液界面形成的机理	110
8.1.3	液液界面稳定的机理	110
8.2	从流体分层及界面层的特性来研究界面稳定性	111
8.2.1	流体流动的层面分析	111
8.2.2	物理模型	113
8.2.3	数学模型	114
8.3	从界面波动性来研究界面稳定性	122
8.3.1	界面稳定性与波动性的关系	122

8.3.2	物理模型	123
8.3.3	数学模型	123
8.3.4	无磁场情况下界面稳定性分析	124
8.3.5	平行磁场对界面稳定性的影响分析	125
8.3.6	垂直磁场对界面稳定性的影响分析	125
第 9 章 纳米磁性流体动密封液体界面的稳定性试验		127
9.1	纳米磁性流体密封液体的工作原理	127
9.2	试验目的	128
9.3	试验的仪器及材料	129
9.4	界面稳定性试验系统设计	130
9.4.1	试验系统总体布置	130
9.4.2	可调磁场装置的设计	131
9.4.3	供液装置的设计	134
9.4.4	管道设计	135
9.4.5	辅助装置及测量装置的设计和选择	136
9.5	试验得到的现象及结果	137
9.5.1	层流的试验	137
9.5.2	磁性流体与被密封液体原界面被破坏及新界面形成的过程	139
9.5.3	界面不稳定时被破坏的过程	141
9.5.4	纳米磁性流体与被密封液体相对运动速度差的阈值	147
9.6	磁性流体动密封液体界面稳定性的机理分析	151
第 10 章 纳米磁性流体动密封液体的工程应用实例		153
10.1	船舶艉轴的纳米磁性流体密封	153
10.1.1	船舶艉轴密封概述	153
10.1.2	船舶艉轴磁性流体密封装置结构设计	156
10.1.3	船舶艉轴磁性流体密封试验	158
10.2	水轮机主轴的纳米磁性流体密封	159
10.3	微泵式上游泵送磁性流体密封装置	163
参考文献		165

第1章 绪 论

【导读】 德国工业 4.0 和中国制造 2025 强调加快发展智能制造装备和产品,组织研发具有深度感知、智慧决策、自动执行功能的高档数控机床、工业机器人、增材制造装备等智能制造装备以及智能化生产线,突破新型传感器、智能测量仪表、工业控制系统、伺服电机及驱动器和减速器等智能核心装置;推进工程化和产业化,加快机械、航空、船舶、汽车、轻工、纺织、食品、电子等行业生产设备的智能化改造,提高精准制造、敏捷制造能力;统筹布局和推动智能交通工具、智能工程机械、服务机器人、智能家电、智能照明电器、可穿戴设备等产品研发和产业化。纳米磁性流体作为唯一一种具有真正工业实用价值的液体智能磁性材料,在机械密封领域具有零泄漏、零磨损、长寿命、自润滑等特点,在润滑、机器人、传感器、艺术及植物生长等其他领域也有许多神奇的特性。它与德国工业 4.0、中国制造 2025 的规划和要求紧密相连,对其所展开的研究正逐步成为一门引人注目的热门学科和充满魅力的学术领域。

1.1 纳米磁性流体概述

1.1.1 纳米磁性流体的定义

纳米磁性流体又名磁性流体(Magnetic Fluid)即为纳米磁性液体,也称磁流体(Magnetic Liquid)或磁性胶体(Magnetic Colloid)或铁磁流体(Ferromagnetic Fluid),简称磁液^{[1][2][3][56]}。通常有两种磁性流体:一种为能导电的并能在磁场中运动的流体,如用于磁性流体推进的海水,可利用其中的电流和磁场间的相互作用使海水运动而产生推力^[52],再如利用高速通过发电通道切割磁力线产生感生电流的磁性流体发电^[53];另一种为在磁场中具有磁性的磁性液体。本书研究的是后一种,它被定义为铁磁性或超顺磁性微粒借助于表面活性剂(Surfactant)稳定地分散于基液(Carrier Fluid)的胶体溶液或悬浊液或固液分散体系^[54];也是指吸附有表面活性剂的磁性微粒在基液中高度弥散分布而成的稳定胶体(胶体一词由英国人 Thomas Graham 于 1961 年提出)体系,它是一种人工合成的胶体体系^{[55][58]},属于固液相混的二相流体。Rosensweig 定义为:“A ferromagnetic fluid is a colloidal suspension of submicron-sized ferrite particles in a carrier fluid with a dispersing agent added

to prevent flocculation”^[56]。磁性流体既具有磁性，又兼有液体流动性，在外磁场作用下可以被控制、定位、定向与移动，是一种新型的、重要的智能化液体功能材料^[57]，也是唯一一种真正具有工业实用价值的液体磁性材料^[3]。

1.1.2 纳米磁性流体的组成

根据国际纯粹化学和应用化学联合会(IUPAC)的规定，凡颗粒直径在1~1000 nm范围者，皆属胶体颗粒，含有胶体颗粒的体系称为胶体体系或分散体系^[58]。而纳米磁性流体(磁性流体)的磁性微粒的直径一般为3~10 nm，因而磁性流体属于胶体体系。磁性流体是用表面活性剂严密地覆盖在10 nm数量级强磁性超微粒子表面上并使其均匀分散于溶剂中的稳定的胶体溶液，其结构如图1.1所示。它由磁性微粒、基液和表面活性剂组成。

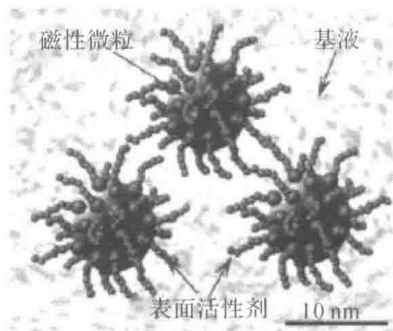


图 1.1 磁性流体的组成

1. 磁性微粒(Magnetic Particles)(分散相)

磁性微粒为磁性流体提供了磁性，它的粒度为3~10 nm，尺寸介于原子、分子与宏观固体之间，其中磁性微粒的性质及含量很大程度上决定着磁性流体的磁性能及使用范围^[59]。可作为强磁性微粒的元素和化合物有 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、Co、Ni及Mn、Co、Ni、Cu和Mg等元素所组成的铁氧体^[60]。它们可分为铁酸盐系(Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 CoFe_2O_4 、 NiFe_2O_4)、金属系(Ni, Co, Fe, Fe-Co, Ni-Fe)和氮化铁系。要求磁性流体在工作温度范围内能保持长期稳定，磁化强度高，起始磁导率大，黏度和蒸气压较低，在重力场和磁场梯度下比较稳定，在均匀磁场中没有明显的凝聚，热传导性好，耐化学腐蚀好^[61]。

2. 基液(Carrier Fluid)(载液、分散液体、分散介质)

基液的种类很多，可分为极性和非极性两大类，也可分为水基、有机基和金属基三大类。几乎所有的液体都可制成磁性流体，如水、煤油、酯、硅油、氟油、石蜡油和水银等^{[59][62][63]}。人们常常根据磁性流体的不同用途而选择不同的基液，可以选择有机溶剂(庚烷、二甲苯、甲苯、丁酮)，也可以选择无机溶剂(水)及碳氢化合物(合成剂、石油、酯合成剂等)^{[61][63]}，还可以选择聚二醇、聚苯醚、氟聚醚、硅碳氢化物、卤化烃、苯乙烯以及直链烃、芳香烃等。选择基液的要求是低蒸发速率、高化学稳定性、耐高温和抗辐射^[61]。常用的基液是氟碳化合物、碳氢化合物、酯类、二酯类、聚苯醚等。从用途来看，基液及其所对应的磁性流体的特点和适用范围如表1.1所示。尽管基液的选择应以低蒸发速率、低黏度、高化学稳定性、耐高温和抗辐射为标准，但同时满足上述条件非常困难，因此往往根据磁性流体的用途来选择具有相应性能的基液。例如：低温环境的磁性流体可用硅酸酯基液；

用于旋转轴密封液体的磁性流体,可选择耐高温且与被密封介质(水或一般机械油)不相溶的有机硅油基液。

表 1.1 基液及其所对应的磁性流体的特点和适用范围^{[60][65][66]}

序号	基液名称	所对应的磁性流体的特点及适用范围
1	酯类基液	熔点和黏度都很低,适用于低温、高饱和和磁化强度的磁性流体
2	二酯类基液	具有沸点高、低蒸气压、中等黏滞性,可应用于高速旋转密封的真空系统及长期使用的工作环境;同时又具有很好的润滑作用;当作为阻尼应用时,黏滞性可以在较宽的范围内变化
3	烃类基液	具有低黏滞性,可以与其他烃类混合;电阻率为 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ (60 Hz),介电常数为 20 (1000 Hz),饱和磁化强度达 0.07~0.1 T;具有很好的稳定性,但熔点低、蒸气压高,适用于高速场合
4	水基液	制备工艺简单,适用于制备较高的起始磁导率的磁性流体;价格低廉,可用于选矿、研磨、磁印刷、医疗等的磁性流体;pH 值可以在较宽范围内改变
5	氟碳类基液	具有宽的使用温度范围,沸点高,不易燃,不溶于其他液体,对氯气、氨气、臭气具有高稳定性,适用于液体介质密封及温度高的场合
6	聚苯醚类基液	具有低蒸气压、低黏度,可用于高真空、辐照阻抗大于 $10^8 \Omega$ 的情况,也可用于强辐射条件及旋转轴高速密封的情况
7	有机硅类	耐高温,与水及一般机械油互不相溶,可用于机械的旋转轴密封
8	金属基	具有优良的导电性和导热性,饱和磁化强度大,可用于要求有热量传导及电流传导的特殊场合

3. 表面活性剂(Surfactant)(分散剂、稳定剂、表面涂层剂)

表面活性剂的作用是使磁性微粒稳定均匀地分散在分散介质中,吸附在磁性微粒上形成一层缓冲层,以避免磁性微粒之间的相互凝聚(Aggregation)^[67],主要表现在:①防止磁性微粒的氧化;②降低界面自由能,克服范德华力所造成的微粒凝聚,减弱微粒自发聚集的热力学过程;③削弱静磁吸引力,保持分散体系的稳定化;④改变磁性微粒表面的性质,增加磁性微粒表面与基液的亲和力,使微粒和基液浑然一体^[68]。

为了实现这些功能,就要求表面活性剂的一端能吸附于微粒表面,形成很强的化学键,另一端能与基液溶剂化而进入周围介质,在粒子表面形成含有基液的有机吸附层。不同基液的磁性液体要选择不同的表面活性剂,有时甚至需要选择两种以上的表面活性剂。由于表面活性剂降低了固液表面张力并在分散相固体颗粒表面形成位垒阻碍颗粒接近,所以它能适应于一定的基液性质,又能适应于一定粒子的界面要求。因此,表面活性剂必须具有永久吸附磁性微粒的特殊分子结构,一端有一个对磁性微粒界面产生高度亲和力的钉扎功

能团(Anchor Group),亦称作“头”,另一端还需有一个极易分散于某种基液中去的适当长度的弹性的“尾”(Flexible Tail)^[69]。就 DLVO 理论(胶体稳定性的理论)来说,表面活性剂的影响主要表现在影响介质的离子强度(特指离子型表面活性剂)、Hamaker 常数以及胶体颗粒的表面电势等三个方面^[65]。对表面活性剂总的要求是使分子的一端能化学吸附在磁性微粒表面,形成溶剂化膜,另一端与基液胶溶化,有较高的亲和性,并使其能在基液中自由伸展摆动。另外,为了能有效地防止磁性微粒凝聚,要求分子有一定的链长,以克服微粒间的范德华力,并且还要与基液相适应。通常吸附在微粒表面的膜,其有效厚度为 3~100 nm,还要求磁性微粒直径和溶剂膜厚度的比值大于 0.2。因此,两个微粒碰撞时,其表面间的最小距离为溶剂膜厚度的 2 倍^[70]。

表面活性剂是一大类化合物^[41],可分为阳离子表面活性剂、阴离子表面活性剂、两性表面活性剂和非离子表面活性剂四大类;也可以是油酸、亚油酸、丁二酸可氟醚酸^[64]、明胶、聚乙二醇^[63]、4-氧杂环己胺、十四烯酸、琥珀酰胺^[61]等。不同基液相对应的表面活性剂如表 1.2 所示,如水基磁性流体可选用饱和一元酸 $C_n H_{2n+1} COOH$ 。其中, $C_n H_{2n+1}$ 为烃基, $-COOH$ 为羧基, n 越大,分子链越长。烃基与羧基具有不同的特点,羧基具有亲水性,烃基却具有疏水性。如 $C_1 \sim C_4$ 的羧酸可与水相溶, $C_5 \sim C_{11}$ 的羧酸在水中的溶解度随分子量的增加而减少,从 C_{12} 起几乎不溶于水。而对烃类基液,常采用油酸作为表面活性剂。表面活性剂的含量,一般是 Fe_3O_4 重量的 5%~10%。表面活性剂对磁性流体来说,能使强磁性微粒表面吸附一层长链分子,以组成缓冲层(厚度约为 3~100 nm)^[72],用以避免电场、磁场作用下微粒的凝聚;对界面来说,具有显著改变界面性质的特点,同时此类物质能够在溶液中和界面上形成多种分子的有序的组合体。而对磁性流体来说,磁性微粒能否均匀稳定地分散在某种基液中形成稳定的磁性流体,表面活性剂的选择是相当关键的。其选择原则是既能适应于一定的基液性质,又能适应于一定磁性微粒的界面要求。

表 1.2 与基液相对应的表面活性剂^{[68][73][74]}

基液	对应的表面活性剂
水	油酸、亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸
酯、合成油	油酸、亚油酸、亚麻酸
氟碳基化合物	氟醚磺酸、全氟聚异丙醚等
硅油	硅烷偶联剂、羧基聚二甲基硅氧烷、烃基聚二甲基硅氧烷、羧基聚苯基甲基硅氧烷、烃基聚苯基甲基硅氧烷等
聚苯醚	苯基十一烷酸等
碳氢化合物	油酸、亚油酸、亚麻酸等

表面活性剂不仅与矿物浮选、石油开采、食品加工、化学工业、制药工业、纺织工业等领域,以及研磨、润湿、防水、防污、脱色、洗涤、乳化、催化等技术过程紧密相关,而且在高新技术发展中有重要作用^[3]。表面活性剂领域已成为当前科学研究的热点之一。

1.1.3 纳米磁性流体的性能及与其他液体相比具有的特点

纳米磁性流体不同于普通的流体,与其他液体相比具有下列特点:

- (1) 在外磁场的作用下,有悬浮在载体中的能力。
- (2) 既具有液体的流动性,又具有固体磁性材料的特性,且有感应磁通的能力。
- (3) 调节外磁场强度,可以改变磁性流体的表观比重和黏度,能使磁性微粒稳定地悬浮在其中。
- (4) 在垂直磁场的作用下,会自发地形成稳定的波峰,如图 1.2 所示。

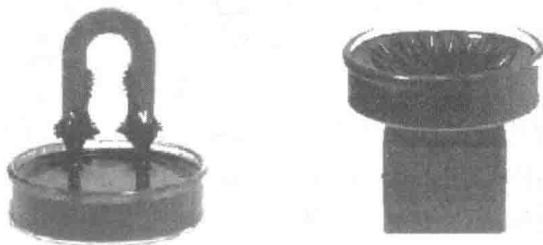


图 1.2 纳米磁性流体在磁场作用下的变形图

- (5) 对外磁场的响应速度快,撤去外磁场后,纳米磁性流体中的磁性微粒很快便呈现无规则分布^[70],即在无外磁场时,纳米磁性流体本身是不显磁性的。
- (6) 纳米磁性流体在外磁场的作用下,将流向并固定在磁场强度高的一方。
- (7) 在声学、光学特性方面具有普通液体无法比拟的优点,能获得特殊的应用。

1.1.4 纳米磁性流体密封与传统密封相比具有的特点

传统的密封技术(如垫片密封、机械密封、填料密封、螺旋密封和迷宫密封等)虽然结构简单,成本低廉,是解决静密封的良好途径,但在动密封条件下,它们与转轴之间存在严重的摩擦磨损,因此密封的寿命短且可靠性不高。尽管迷宫密封和螺旋密封没有摩擦磨损等缺点,但是却存在泄漏的问题,无法满足“零”泄漏的要求。纳米磁性流体密封技术是一种利用新型的纳米材料磁性液体实现密封功能的技术,它不仅可以克服机械密封和填料密封存在的摩擦磨损的不足,而且还具有“零”泄漏的优点,同时由于它的低黏性摩擦,使其使用寿命可达 10 年以上。目前,在纳米磁性流体密封的应用领域方面,大功率气体激光器中鼓风机的旋转轴密封、大型超导发电机冷却系统的密封等,都可以采用纳米磁性流体密

封。纳米磁性流体非接触式机械密封技术生产的真空密封传动装置、真空密封轴承及旋转密封管阀接头产品已获得应用。纳米磁性流体密封技术在电子、机械及自动化设备、真空机电设备、包装设备、电子真空加工设备(如真空点胶机、真空镀膜设备、半导体真空焙烧装置,以及硅生长、目标位置电子指示器、溅射、等离子蚀剂、化学气相淀积、离子移置技术、液晶再生过程),高强度压力设备(如气泵^[90]、压缩机、风动机、压力机等零部件的动态密封,包括轴的旋转密封和直线密封)等领域已得到了广泛的应用。另外,磁性流体密封可用于封尘、封烟雾等,是防止污染物通过的有效屏障,可广泛地应用于各种领域,例如计算机磁盘存储器的密封,X射线管和X射线机的旋转靶密封,单晶炉真空旋转轴的密封,在半导体工业中各种薄膜沉积、光刻、腐蚀等装置和半导体生产的清洁机器人的连接处的密封,在纺织和机械加工中的隔绝密封,气体激光器、真空加热炉、电厂贮能大飞轮、超导电机的密封,船舶的螺旋推进器的密封,飞行时间质谱仪的密封,宇宙飞船上望远镜的轴端部的密封等。磁性流体除了用于旋转轴密封外,还可以制成面密封、直线运动密封以及各种特殊的磁性流体机械构件^[91],如离合器、联轴节、压力调节阀、制动器、无机械转动部件的开关及照相机快门等。

从磁性流体密封的应用中,可以看出磁性流体密封有着传统密封无法比拟的优越性及实质性差异,改变了人们的思想观念,在密封中显示了非常独到的特点,解决了无泄漏、无磨损和高速密封问题。磁性液体密封与传统的密封相比有以下优点^{[2][12]}:

(1) 零泄漏:在动态和静态测试中,采用质谱测定法对氦气密封进行评估。在常温常压下,氦气的泄漏量小于 $10\sim 11 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,通常称为零泄漏。

(2) 使用寿命长:一般寿命在10年以上。

(3) 高可靠性:磁性液体密封装置包括一块简单的永磁体、极靴和少量的磁性液体,唯一会产生磨损的是轴承,因而可靠性高。

(4) 完全无污染:由于没有机械磨损,液体密封环不产生污染系统的粒子。

(5) 能承受高转速:它可承受几十万转每分钟的高转速。

(6) 最佳的扭矩传递:传动轴可进行100%的扭矩传动而没有功率损耗,并能够不间断地提供同向旋转。

(7) 低的黏性摩擦:磁性流体黏性摩擦小,并不依赖于密封所加的压力,因而设备运转平稳。

(8) 自愈合能力好:是指当磁性流体密封失效时它具有良好的两次甚至三次密封能力。这是因为当密封系统两侧外加压差大于密封系统所能承受的压差时,被密封介质将会开始泄漏,且泄漏的介质会带走部分磁性液体,当泄漏导致磁性流体密封结构两侧压差降到残余磁性流体所能承受的压差时,残余磁性流体在磁场力作用下能自动愈合,恢复密封功能,即依然能实现“零”泄漏。因此,磁性流体具有良好的自愈合能力。

(9) 不需要预紧力及外部动力,从而避免装配中由于密封预紧力而造成的变形,这对于精密机械十分有利。

(10) 对轴的跳动、偏心和表面光洁度等要求都不高,即不需要很高的表面加工精度,不怕轴有偏心振动。

(11) 密封的同时又有润滑作用,故无需外加润滑系统。

(12) 密封两边都可以受压,密封没有方向性,防内漏和外漏一样有效。

(13) 具有最佳的力矩传输特性。力矩可 100% 输送,保证无阻碍地单向运行。

(14) 具有低阻尼和高速旋转能力。磁性流体极低的黏滞阻力和磁性流体进给装置无需接触密封圈的结构,决定了它的稳定操作和高速转动。

当然,目前磁性流体密封液体还存在较多问题,还不能长时间稳定地密封液体,通常只限于密封气体介质。尽管磁性流体在气体真空方面的研究取得了很大的进展,但还需要进一步深入研究磁性流体在密封中的作用机理,研究流体力学和动力学在振动、偏心、离心力与磁力中的影响,以及在不同磁场中磁性流体极齿齿形和气氛(如气体、流体或尘埃)等条件下的优化设计;推广磁性流体密封在各种设备中的使用,用组合密封、压力平衡和某些特殊处理拓宽磁性流体的应用范围(如线速度超过 35 m/s、温度超过 80 °C、压力超过 2~10 MPa),提高磁性流体密封各项性能指标,加强研究机构和生产企业的合作,把各种不同种类和性能的磁性流体密封推向实际应用^[92]。

1.2 机械密封概述^{[13][14][15]}

密封是把压力、工作介质和温度相应的各个空间隔开,以抑制或杜绝泄漏。机械密封又称端面密封,是一种旋转机械,如离心泵、离心机、反应釜和压缩机等的轴封装置。机械密封的定义是由至少一对垂直于旋转轴线的端面在流体压力和补偿机构弹力(或磁力)的作用以及辅助密封的配合下,保持贴合并相对滑动而构成的防止流体泄漏的装置。机械密封的结构简图如图 1.3 所示。它一般由端面摩擦副(静、动环)、弹性元件、辅助密封件、传动件以及紧固件 5 大部分组成。图 1.3 中 A、B、C、D 分别表示机械密封结构中的四个泄露通道。从图 1.3 所示的机械密封结构中,可以看出静环与动环接触的端面间隙、静环密封圈以及动环密封圈均有可能产生泄漏。静环与动环接触的端面间隙是主要的密封面,它决定了机械密封的有效工作寿命,更重要的是,它也是决定密封性能的关键因素。

可见,密封不是机器的功能性部件,在体积上也只占很小的一部分,但它对整台机器甚至整套设备的影响却是很大的。机械密封通常靠密封件之间的表面压紧力来防止泄漏,表面间压紧力越大,密封效果也越好,但对于相对运动的密封表面来说,不可避免地要出现摩擦力或摩擦力矩,从而消耗有用功并发热,造成材料的磨损,因此机械密封很难做到长

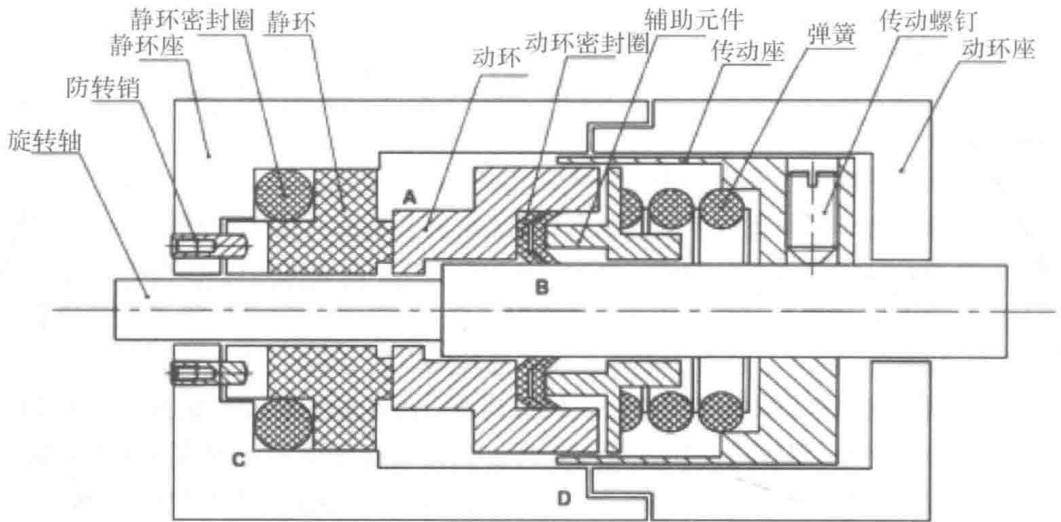


图 1.3 机械密封结构

期的完全不泄漏。目前，工业普遍使用旋转轴动密封技术。该技术主要分为两大类：第一类是固体接触式密封，包括弹性件密封(如填料密封、O型橡胶密封圈及各式油封)和非弹性件接触密封(如机械密封、固定环和浮动环密封)，它们均是以固体弹性元件或耐磨元件作为工作介质，依靠动、静元件的紧密接触达到密封目的；第二类是非接触式密封(如间隙密封、迷宫密封、螺旋密封、离心密封及气动、水力、固定套筒、浮动环等)，它是以被密封流体的动压、静压或流阻作为密封动力的^{[82][83]}。高速旋转机械的密封现在主要使用的仍然是橡胶件，它是最常使用的一种密封形式，但使用橡胶件的主要问题是摩擦大，发热严重、易磨损、低温下因橡胶玻璃化失去弹性而使密封性能差，因而不能达到可靠的密封^[83]。接触式密封由于接触元件之间的摩擦磨损较大，对旋转机械产生阻力矩大造成功率损耗大，转速受到限制(因高速旋转磨损更加严重故适宜高压低转速要求)，使用寿命短，需经常维护；非接触式密封虽无磨损但密封能力和转速密切相关，存在许多问题如迷宫密封存在泄漏通道、密封效果差的问题，浮动环密封承压能力受到转速的影响，不宜用于低速场合(只能适宜低压高速场合)，且静止和低速时不能起到密封作用，即使在高压高转速中采用组合密封也无法完全解决泄漏问题。为了使机械密封向零泄露、高性能和长寿命化的方向发展，采用磁力而不是弹性力的磁性流体密封能很好地符合这一要求。磁性流体具有无污染性，符合现代倡导的绿色生产、清洁生产等环保要求^[85]；对轴的跳动、偏心 and 表面光洁度等要求都不高^[86]；不存在轴在回转中因与密封件摩擦而产生的碎屑；磁性流体本身在磁场中也不会脱落、密封程度高，在压差允许的范围内以及在静态、动态两种情况下，可以实现完全无泄漏密封^[87]；密封的同时又有润滑作用，可将密封与润滑结合为一体。这些特点是普通密