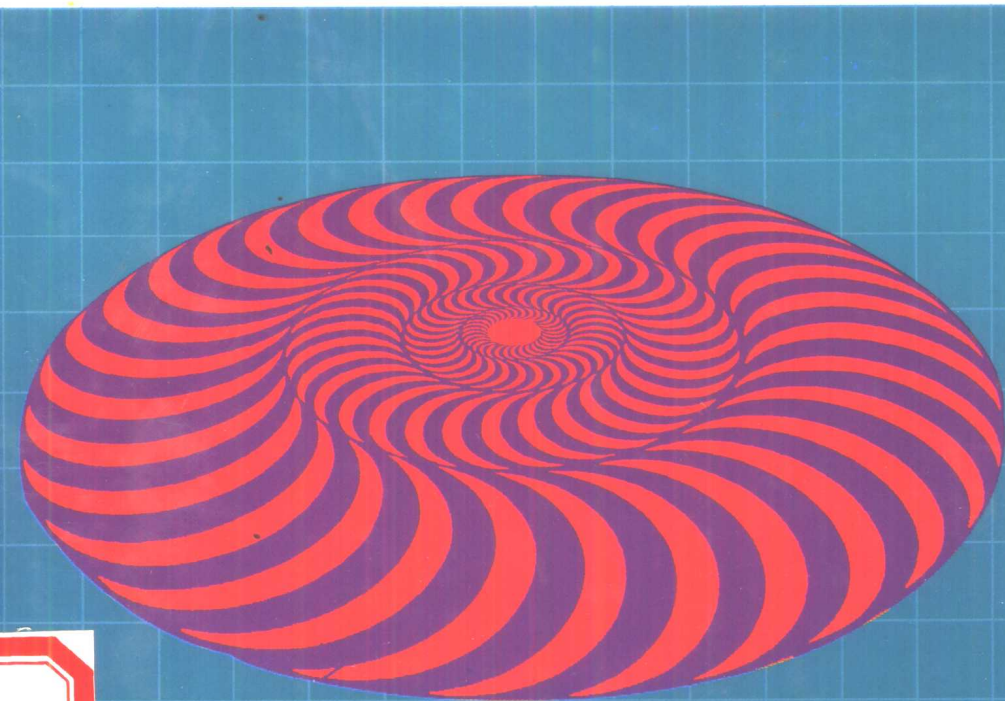


# 磁性流体密封原理与设计

## Fundamentals and Design Method of Magnetic Fluid Seals

邹继斌 陆永平 著



国防工业出版社

# 磁性流体密封原理与设计

## Fundamentals and Design Method of Magnetic Fluid Seals

邹继斌 陆永平 著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

磁性流体密封原理与设计/邹继斌,陆永平著. —北京:国防工业出版社,2000.8

ISBN 7-118-02231-4

I. 磁... II. ①邹... ②陆... III. 磁流体-密封  
IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 11796 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 5½ 134 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:15.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

## 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成  
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

## 前 言

磁性流体密封是近年发展起来的一项新技术,在旋转轴密封中具有其它密封方式不可比拟的优点:无泄漏、无磨损、结构简单、寿命长,受到国内外学者和工程技术人员的重视。在工业、国防等领域具有重要的应用,如俄罗斯将该技术用于航天飞机,已运行10余年,仍保持良好的密封状态。由于磁性流体密封是一项涉及电磁学、流体力学、机械、物理学、化学等边缘学科的新技术,而以往的研究多从单一学科进行,缺乏结合多学科的综合研究。同时,关于这一技术的研究多见于一些论文,少有完整体系的论著,因而人们对这一技术的认识不够深入、系统和全面。作者从1985年开始从事这一技术的研究,先后完成了国家教委基金课题“含磁液磁场的分析与计算”、国家自然科学基金课题“旋转轴磁性流体密封机理的综合研究”等科研课题。发挥高校多学科的优势,结合不同学科的理论与技术,对磁性流体密封从理论到计算、设计与实验等方面进行了全面系统的综合研究。本书是作者在总结多年科研工作积累的基础上出版的,在理论和技术上形成了完整的体系。书中所反应的理论与技术上的创新性成果主要表现在以下方面:在理论上,对磁性流体进行静力学和动力学分析,推导出磁性流体内部压强分布及运动规律,为揭示磁性流体密封的机理奠定了理论基础;在计算方法上,建立了含磁性流体磁路与磁场的模型,并论述了磁场和密封能力的计算方法。为密封的设计提供了方法和依据,同时发展了电磁场计算方法。通过对密封特性的分析,可使读者进一步加深对磁性流体密封机理的认识。所提出的高压密封方法,使磁性流体密封的密封能力有突破性的进展和提高。

作者出版此书的目的在于将多年的科研成果系统地加以整

理,以献给社会,满足科研与生产的需要,为磁性流体密封技术的研究和应用提供理论基础和技术指导。同时也为从事电磁理论和磁性流体应用的人员提供有益的参考资料。

全书共分八章,第一章主要介绍磁性流体产生的历史、主要组成部分、典型的制备方法,给出磁性流体的各种特性,介绍其目前的主要应用及原理。第二章介绍磁性流体密封的基本原理、各种密封形式、磁性流体密封的特点及其应用。第三章分析磁性流体所受磁场力、离心力及其与外界压强的关系,揭示密封的机理。第四章建立磁性流体密封的磁网络模型,介绍磁路的求解及密封压差的计算方法。第五章讲述含磁性流体的磁场、等压线的数值计算方法,给出密封压差的数值求解过程。第六章介绍密封结构与磁路最优尺寸的确定方法。第七章分析磁性流体密封的各种特性。第八章论述多极—多级密封方法,简介磁性流体离心密封。

本书由邹继斌、陆永平等合著。第一章、第四章至第七章由邹继斌撰写,第二章、第三章和第八章由邹继斌与陆永平共同撰写,齐毓霖参与撰写了磁性流体的特性等部分内容。

本书力求内容精炼,主要论述磁性流体密封的理论与技术,对成熟的知识不再赘述,读者可以参阅有关书籍。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

1999年8月



## 内 容 简 介

本书是作者多年从事科研工作的经验总结,系统地阐述了磁性流体的特性与应用,磁性流体密封的理论、密封特性,磁场与密封压差的磁路解法和数值解法,密封的优化设计和高压密封方法。本书内容新颖、丰富、系统性强。可供从事密封、磁性流体应用或相关的技术人员使用,也可供高等院校教师、研究生参考。

Based on the summation of the author's research on magnetic fluid seals, this book makes a systematic exposition on the fundamentals and design method of magnetic fluid seals. The main contents include the properties and applications of magnetic fluid, the principle and the features of magnetic fluid seals, the analytic and numerical method for computing the magnetic field and seal pressure differential of magnetic fluid seals, the optimization design and high pressure differential magnetic fluid seal method. The feature of this book is that its contents are substantial, new and original, systematic. It is suitable for engineering and technical personnel. It is also a reference book for university teachers and students.

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第一章 磁性流体的制备、特性及应用</b> ..... | 1  |
| 第一节 磁性流体及其发展 .....             | 1  |
| 第二节 磁性流体的制备 .....              | 6  |
| 第三节 磁性流体的稳定性 .....             | 8  |
| 第四节 磁性流体的特性 .....              | 10 |
| 第五节 磁性流体主要性能的测量 .....          | 20 |
| 第六节 磁性流体的应用 .....              | 22 |
| <b>第二章 磁性流体密封原理</b> .....      | 32 |
| 第一节 磁性流体密封的产生 .....            | 32 |
| 第二节 磁性流体密封的基本原理 .....          | 33 |
| 第三节 磁性流体密封的形式 .....            | 35 |
| 第四节 磁性流体密封的应用 .....            | 38 |
| <b>第三章 磁性流体密封理论</b> .....      | 40 |
| 第一节 磁性介质受力分析 .....             | 40 |
| 第二节 磁性流体静力学分析 .....            | 42 |
| 第三节 磁性流体动力学分析 .....            | 45 |
| 第四节 磁性流体密封压差 .....             | 51 |
| <b>第四章 磁性流体密封的磁路计算</b> .....   | 57 |
| 第一节 磁路的基本定律 .....              | 57 |
| 第二节 铁磁材料及其特性 .....             | 60 |
| 第三节 磁性流体密封的磁路模型 .....          | 66 |
| 第四节 磁导计算 .....                 | 69 |
| 第五节 磁路计算方法 .....               | 74 |
| <b>第五章 磁性流体密封的数值计算</b> .....   | 77 |

|            |                        |     |
|------------|------------------------|-----|
| 第一节        | 磁场的边值问题 .....          | 77  |
| 第二节        | 电磁场有限元法原理 .....        | 81  |
| 第三节        | 齐次边界恒定磁场的有限元解法 .....   | 82  |
| 第四节        | 非齐次边界条件的处理 .....       | 88  |
| 第五节        | 非线性磁场问题的求解 .....       | 90  |
| 第六节        | 磁性流体密封的磁场模型 .....      | 91  |
| 第七节        | 磁场与等压线计算 .....         | 95  |
| 第八节        | 旋转密封计算 .....           | 105 |
| <b>第六章</b> | <b>磁性流体密封的设计</b> ..... | 107 |
| 第一节        | 磁性流体密封的结构形式 .....      | 107 |
| 第二节        | 永久磁铁的设计 .....          | 108 |
| 第三节        | 单级密封的设计 .....          | 114 |
| 第四节        | 多级密封的设计 .....          | 117 |
| <b>第七章</b> | <b>磁性流体密封的特性</b> ..... | 123 |
| 第一节        | 密封装置的负载过程 .....        | 123 |
| 第二节        | 多级密封的压差分配 .....        | 125 |
| 第三节        | 阻力矩与损耗分析 .....         | 127 |
| 第四节        | 影响密封能力的因素 .....        | 132 |
| 第五节        | 磁性流体密封的寿命 .....        | 137 |
| 第六节        | 液体介质密封问题 .....         | 138 |
| <b>第八章</b> | <b>磁性流体高压密封</b> .....  | 140 |
| 第一节        | 多级密封特性分析 .....         | 140 |
| 第二节        | 多极—多级密封方法 .....        | 142 |
| 第三节        | 多极—多级密封的设计与试验研究 .....  | 145 |
| 第四节        | 多极密封的分段加压方法 .....      | 149 |
| 第五节        | 磁性流体离心密封 .....         | 151 |
| 参考文献       | .....                  | 157 |

# Contents

|                  |                                                                          |    |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1</b> | <b>Preparations, characteristics and applications of magnetic fluids</b> | 1  |
| 1.1              | Magnetic fluid and its development                                       | 1  |
| 1.2              | Preparation of magnetic fluid                                            | 6  |
| 1.3              | Stability                                                                | 8  |
| 1.4              | Characteristics                                                          | 10 |
| 1.5              | Property measurement                                                     | 20 |
| 1.6              | Applications                                                             | 22 |
| <b>Chapter 2</b> | <b>Principle of magnetic fluid seals</b>                                 | 32 |
| 2.1              | The birth of magnetic fluid seals                                        | 32 |
| 2.2              | Seal principle                                                           | 33 |
| 2.3              | Classification                                                           | 35 |
| 2.4              | Applications                                                             | 38 |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Fundamental theory of magnetic fluid seals</b>                        | 40 |
| 3.1              | Electromagnetic force on magnetic media                                  | 40 |
| 3.2              | Hydrostatic analysis on magnetic fluid                                   | 42 |
| 3.3              | Hydrodynamic analysis on magnetic fluid                                  | 45 |
| 3.4              | Seal pressure differential of magnetic fluid seals                       | 51 |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Magnetic circuit analysis of magnetic fluid seals</b>                 | 57 |
| 4.1              | The law of magnetic circuit                                              | 57 |
| 4.2              | Magnetic materials and their properties                                  | 60 |
| 4.3              | Magnetic circuit model of magnetic fluid seal apparatus                  | 66 |

|                  |                                                                                                |            |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4              | Magnetic conductance computation .....                                                         | 69         |
| 4.5              | Solution of magnetic circuit .....                                                             | 74         |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Numerical computation of magnetic fluid seals .....</b>                                     | <b>77</b>  |
| 5.1              | Boundary value problem of magnetic field .....                                                 | 77         |
| 5.2              | Fundamentals of finite element method .....                                                    | 81         |
| 5.3              | Finite element computation of constant magnetic<br>field with homogeneous boundary value ..... | 82         |
| 5.4              | Treatment of non-homogeneous boundary .....                                                    | 88         |
| 5.5              | Nonlinear magnetic field solution .....                                                        | 90         |
| 5.6              | Magnetic field model of magnetic fluid seal .....                                              | 91         |
| 5.7              | Computation of magnetic field and isobar .....                                                 | 95         |
| 5.8              | Computation of rotating shaft seals .....                                                      | 105        |
| <b>Chapter 6</b> | <b>Magnetic fluid seal design .....</b>                                                        | <b>107</b> |
| 6.1              | Structure of magnetic fluid seals .....                                                        | 107        |
| 6.2              | Design of permanent magnet .....                                                               | 108        |
| 6.3              | Design of single stage seal .....                                                              | 114        |
| 6.4              | Design of multi-stage seal .....                                                               | 117        |
| <b>Chapter 7</b> | <b>Features of magnetic fluid seals .....</b>                                                  | <b>123</b> |
| 7.1              | Pressure loading course of magnetic fluid seal<br>apparatus .....                              | 123        |
| 7.2              | Pressure differential distribution in multi-stage<br>seals .....                               | 125        |
| 7.3              | Viscous torque and loss .....                                                                  | 127        |
| 7.4              | Factors affecting seal capacity .....                                                          | 132        |
| 7.5              | Life .....                                                                                     | 137        |
| 7.6              | Liquid seal problem .....                                                                      | 138        |
| <b>Chapter 8</b> | <b>High pressure differential sealing method .....</b>                                         | <b>140</b> |
| 8.1              | Features of multi-stage seals .....                                                            | 140        |
| 8.2              | Multi-pole and multi-stage seal .....                                                          | 142        |
| 8.3              | Design and test of multi-pole and multi-stage seal .....                                       | 145        |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 8.4 Stage loading for multi-pole and multi-stage seal ..... | 149 |
| 8.5 Magnetic fluid centrifuge seal .....                    | 151 |
| References .....                                            | 157 |

# 第一章 磁性流体的制备、特性及应用

磁性流体是产生于 60 年代末、70 年代初的一种液体磁性材料,具有与普通磁性材料及液体材料所不同的特性,在许多领域中有其特殊的用途。本章将介绍磁性流体的组成与制备、磁性流体的特性及其较典型的应用。

## 第一节 磁性流体及其发展

### 一、磁性流体的组成

磁性流体也叫磁液或铁流体,是一种对磁场敏感、可流动的液体磁性材料。它由三部分组成:磁性微粒;基液(也叫载液);表面活性剂。与真的溶液不同,磁性流体是一种固液相混的二相流体,是一种胶体溶液。

磁性微粒通常为铁磁矿,即四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、赤铁矿( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )、铁氧体及稀土合金等固体微粒。近年来又研制出氮化铁磁性微粒。磁性微粒不是分子,是粒度很小的颗粒,直径大约在  $100\text{\AA}$  左右。由于直径很小,磁性微粒在基液中作布朗运动,获得动能,悬浮于基液中。目前常用的磁性微粒是四氧化三铁粉末。

基液,也叫载液或母液,一般为非导电性液体,如水、煤油、酯、硅油、烷烃、氟碳、氟醚等,也可以是导电的液态金属,如水银。基液不同,则磁性流体的特性也不同,表 1-1 为几种不同基液的性质。

表 1-1 基液及其磁性流体的特点

| 基液名称  | 所对应磁性流体的特点与用途                               |
|-------|---------------------------------------------|
| 水     | 制备工艺简单,价格低,pH 值变化范围大;适用于研磨、医疗、磁性分离、选矿、磁泡检验等 |
| 酯、二酯  | 蒸汽压低;适用于旋转轴高速密封、阻尼、扬声器、水声、换能器等,是一种用途较多的磁性流体 |
| 精制合成油 | 蒸汽压低,与酯基磁性流体相似                              |
| 硅酸盐酯类 | 耐低温,适用于低温场合                                 |
| 碳氢化合物 | 粘度低,适用于旋转轴高速密封                              |
| 聚苯醚   | 蒸汽压低,粘度低;适用于旋转轴高速密封、真空、强辐射场合                |
| 碳化氟   | 沸点高,不易与水、油等液体相混合;适用于液体介质密封及温度较高的场合          |
| 水银    | 磁性流体饱和磁化强度大、导热性好                            |

表面活性剂,也叫分散剂、稳定剂或表面涂层。它将单个磁性微粒的表面包覆起来,使之彼此分开,悬浮于基液中。由于磁性微粒为无机类固体微粒,不溶解或不易分散在基液中,因此,在磁性微粒和基液的两相(即固相与液相)之间应加入第三者,即表面活性剂。它既能吸附于固体微粒表面,又具有被基液溶剂化的分子结构。实验表明,表面活性剂是一种极性官能团的结构,由非极性的亲油疏水碳氢链部分和极性的亲水疏油基团共同构成,两部分分别处于官能团的两端。因此表面活性剂具有亲油亲水两种性质。官能团的一端化学吸附于磁性微粒的表面上,另一端向外伸向基液中,当基液与官能团的外端具有相似结构时,它们就能很好地相互溶解。由于磁性微粒表面上包覆了薄薄的涂层,其官能团外部端带有同性电荷,当磁性微粒彼此接近时,相互排斥,不会因其相互吸引而发生凝聚或沉淀。基液不同,则所需的表面活性剂也不同,表 1-2 列出了与不同基液相对应的表面活性剂。

磁性流体组成的示意图如图 1-1 所示,磁性流体的电子显微镜照片如图 1-2 所示。我国和美国、日本生产的磁性流体及特性如表 1-3~表 1-5 所示。



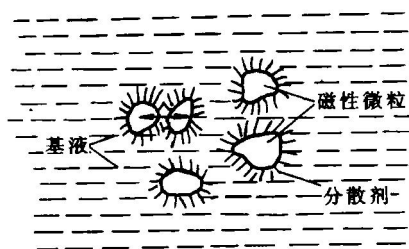


图 1-1 磁性流体组成示意图

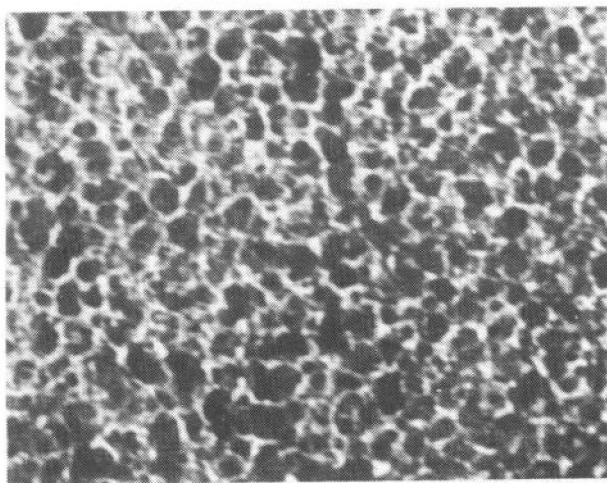


图 1-2 磁性流体电子显微镜照片

表 1-2 基液及相应的表面活性剂

| 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、亚麻酸等                                      |
| 氟碳基化合物 | 氟醚酸、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、羟基聚二甲基硅氧烷、羧基聚苯基甲基硅氧烷、羟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                                      |