

油膜轴承磁流体 润滑理论

YOU MO ZHOUC HENG CILIUTI RUNHUA LILUN

王建梅 著 ◀



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

油膜轴承磁流体润滑理论

王建梅 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2019

内 容 简 介

本书共分9章,主要内容涉及理论算法推导、数值模拟、方案设计、试验验证等。本书对油膜轴承磁流体润滑理论进行了研究,详细地介绍了磁流体、油膜轴承和磁流体力学的相关基础知识、磁流体润滑性能理论基础、油膜轴承磁流体润滑机理、外加磁场设计、磁流体润滑油膜黏度特性、磁流固多场耦合润滑油膜数值模拟和磁流体润滑油膜轴承的静动特性等。

本书旨在为读者提供油膜轴承等滑动轴承类基础件的润滑理论与方法,并为工程应用提供最新的知识服务。本书可供从事机械设计及理论研究的科技人员参考,也可供高等院校机械类专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

油膜轴承磁流体润滑理论/王建梅著. —北京:冶金工业出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5024-7951-0

I. ①油… II. ①王… III. ①油膜—轴承—磁流体—
润滑理论 IV. ①TH133.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 244276 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹蕊

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7951-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2019年1月第1版,2019年1月第1次印刷

169mm×239mm; 14.75印张; 283千字; 217页

56.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

基础件是我国高端装备制造产业的关键组成部分，其设计质量和水平直接关系到产品的性能和技术经济效益。油膜轴承是应用于工业的典型关键基础件，因其具有承载能力大、使用寿命长、速度范围广、运转精度高、结构尺寸小、抗冲击能力强等优点，广泛应用于钢铁、矿山、冶金、航空、航天等系统的高、精、尖关键设备。

轧机油膜轴承是迄今所公认的现代轧机比较理想的轴承，也是其他一些高运转精度、大外加载荷、长使用寿命、低摩擦损耗、宽速度范围等重型机械的比较理想的轴承。随着轧机油膜轴承理论与技术的研究进展，结合不同轧制工况的特点，油膜轴承润滑理论由最初的刚流润滑，逐渐发展到热流润滑、弹流润滑和热弹流润滑。为了进一步改善油膜轴承的润滑性能，弥补巴氏合金蠕变对油膜润滑的负面效应，引入磁流体润滑，通过设置磁场强度动态提高润滑油黏度和承载能力，以保证低速重载下油膜的形成和稳定性。开展油膜轴承磁流体润滑理论研究，拓展了磁流体润滑的应用，完善了油膜轴承润滑理论。

本书的主要内容包括：(1) 磁流体概述，简要介绍磁流体的概念、组成、特点和制备，以及磁流体润滑的特点和影响因素；(2) 油膜轴承概述，简要介绍了油膜轴承的特点、工作原理、润滑特点和油膜轴承润滑的数学模型；(3) 磁流体力学基础，给出了磁流体力学的预备公式、电磁学相关方程、磁流体动力学方程、控制磁流体流动的方程组，以及分析所需的初始条件和边界条件；(4) 油膜轴承磁流体润滑性能理论基础，给出了经典的磁流体润滑理论模型、磁流体润滑相关参数定义、磁流体润滑性能参数关系式和磁流体润滑性能参数的关联度和权重分析；(5) 油膜轴承磁流体润滑机理，给出了磁流体润滑油膜轴承数学模型，进行了磁流体润滑模型的无量纲化，以及对磁流体

润滑油膜的数值求解；(6) 磁流体润滑油膜轴承外加磁场设计，基于电磁学基本方程，推导了限长通电螺线管中的磁感应强度，建立了磁流体润滑油膜轴承外加磁场模型，开展了螺线管磁场的试验研究；(7) 磁流体润滑油膜的黏度特性，制备了磁流体油膜轴承油，进行了磁流体黏度测量和磁流体黏度特性分析，给出了磁流体黏度控制策略；(8) 磁流固多场耦合润滑油膜数值模拟，实施了磁流体润滑油膜轴承系统建模、磁流体润滑油膜模拟和磁流固多场耦合模拟，分析了磁流体润滑性能，开发了磁流体润滑油膜轴承油膜分析系统；(9) 磁流体润滑油膜轴承的静动特性，建立了磁流体润滑油膜轴承的静动特性数学模型，进行了静动特性数学模型的无量纲化和数值求解。

本书介绍的油膜轴承磁流体润滑理论属于摩擦学理论与设计范畴。本书的特点是对油膜轴承润滑理论、磁流润滑理论与方法的完善与改进，体现了多学科知识、技术与方法的融合，为机械零件设计的科学计算提供了理论依据，对于提高设备运行效率和运行可靠性具有一定的实用参考价值。

本书撰写时充分注意到理论知识的连贯性，理论分析和公式推导时，立足基础理论知识，科学推理、循序渐进、有理有据、系统完整，力求做到理论研究与企业专家经验和现场生产实际相结合，是作者所在课题组成员多年来科学研究成果的结晶。本书是《油膜轴承蠕变理论》（冶金工业出版社，2018年）著作的姊妹篇，是对油膜轴承理论与技术的进一步补充与完善。

本书出版的目的在于为读者提供油膜轴承等滑动轴承类基础件的润滑理论与方法，并为油膜轴承的工程应用提供最新的知识服务。本书可供从事机械设计及理论、摩擦学研究的科技人员参考，也可供高等院校机械类专业师生阅读。

借本书出版之际，向资助本书出版的国家自然科学基金资助项目（51875382）、国家自然科学基金煤炭联合基金项目（U1610109）、山西省基础研究计划（自然）项目（201601D011049）和太原重型机械装备协同创新中心（1331工程）专项资助表示由衷的感谢，并向攻读硕

士研究生期间共同参与本书相关工作的黄讯杰、康建锋、张艳娟、张亚南、左正平、张婉茹、高悦鹏、管永强、赵雅琪等研究生，表示衷心感谢！封面图片由太原重型机械集团油膜轴承分公司提供，在此一并表示感谢。

创新之作，限于作者的水平，不当之处在所难免，欢迎广大读者批评与指正。

作 者

2018年6月于太原

目 录

1 磁流体概述	1
1.1 磁流体的组成和特性	1
1.1.1 磁流体的组成	1
1.1.2 磁流体的特性	2
1.2 磁流体的制备	3
1.2.1 磁流体的制备方法	3
1.2.2 实验材料与仪器	4
1.2.3 实验原理	6
1.2.4 实验方法	7
1.3 磁流体的表征	10
1.3.1 宏观表征	10
1.3.2 磁流体的磁光效应	11
1.3.3 磁锥现象	11
1.3.4 电子显微镜	12
1.3.5 振动样品磁强计	13
1.3.6 X射线衍射测定	15
1.3.7 稳定性测试	17
1.4 磁流体润滑	18
1.4.1 磁流体润滑的特点	18
1.4.2 磁流体润滑的影响因素	19
1.4.3 磁流体油膜轴承	19
2 油膜轴承概述	21
2.1 油膜轴承的特点与工作原理	21
2.1.1 油膜轴承的特点	21
2.1.2 油膜轴承的工作原理	22
2.2 油膜轴承润滑	23
2.2.1 油膜轴承润滑理论发展	23

2.2.2 油膜轴承润滑的特点	24
2.3 油膜轴承润滑数学模型	25
2.3.1 油膜轴承承载能力	25
2.3.2 油膜轴承润滑基本方程	27
3 磁流体力学基础	35
3.1 磁流体力学预备公式	35
3.2 电磁学方程	36
3.2.1 基本方程的导出	36
3.2.2 磁扩散方程	37
3.2.3 磁力体密度和磁力功体密度	38
3.3 磁流体动力学方程	38
3.3.1 质量守恒方程	38
3.3.2 动量守恒方程	39
3.3.3 能量守恒方程	40
3.4 控制磁流体流动的方程组	42
3.4.1 磁流体方程组的微分形式	42
3.4.2 不可压缩导电流体的矢量形式微分方程组	42
3.4.3 直角坐标系中微分方程组的分量形式	43
3.4.4 柱坐标系中微分方程组的分量形式	44
3.4.5 球坐标系中的微分方程组的分量形式	45
3.4.6 磁流体力学方程组的积分形式	46
3.5 初始条件和边界条件	47
3.5.1 磁流体力学方程的定解条件	47
3.5.2 初始条件	47
3.5.3 磁场边界条件	48
3.6 磁流体力学方程组无量纲化	49
4 油膜轴承磁流体润滑理论基础	51
4.1 经典的磁流体润滑理论模型	51
4.2 磁流体润滑相关参数定义	53
4.2.1 磁流体油膜刚度	53
4.2.2 轴承系统固体变形影响函数	54
4.2.3 轴承系统流体场承载函数	55
4.2.4 轴承系统磁场函数	57

4.3 磁流体润滑性能参数关系	57
4.3.1 基载液的黏-温/压方程	57
4.3.2 油膜温度与转速的关系	58
4.3.3 磁场强度与磁流体润滑油膜黏度关系的推导	58
4.4 磁流体润滑性能参数的关联度和权重分析	62
4.4.1 关联度分析	62
4.4.2 计算润滑特性参数的影响权重	65
4.5 磁流体黏度的控制策略	68
4.5.1 磁流体润滑油膜黏度与磁场强度的关系	68
4.5.2 磁流体润滑油膜黏度与温度的关系	70
4.5.3 磁流体润滑油膜黏度与压力的关系	72
4.5.4 磁流体磁-黏本构方程与控制	73
4.5.5 结果分析	78
5 油膜轴承磁流体润滑机理	80
5.1 磁流体润滑油膜轴承数学模型	80
5.1.1 磁流体动力学方程	80
5.1.2 雷诺方程	85
5.1.3 膜厚方程	90
5.1.4 黏度方程	91
5.1.5 能量方程	93
5.1.6 固体热传导方程	95
5.1.7 界面热流连续方程	95
5.1.8 其他润滑性能参数计算	96
5.2 润滑模型无量纲化	100
5.2.1 数学模型的差分格式	100
5.2.2 雷诺方程无量纲化	101
5.2.3 膜厚与黏度方程	104
5.2.4 能量方程无量纲化	105
5.2.5 其他方程的无量纲化	106
5.3 磁流体润滑油膜的数值求解	109
5.3.1 Fortran 语言简介	109
5.3.2 数值求解过程中相关参数	110
5.3.3 数值求解计算流程图	112
5.3.4 润滑模型的数值求解	114

5.3.5	数值求解结果对比分析	120
6	磁流体润滑油膜轴承外加磁场设计	125
6.1	电磁学基本方程	125
6.1.1	磁场中的高斯定理	125
6.1.2	磁场中的安培环路定理	126
6.1.3	有限长通电螺线管中的磁感应强度	126
6.2	磁流体润滑油膜轴承外加磁场模型	128
6.2.1	永磁铁磁场模型	128
6.2.2	螺线管磁场模型	129
6.2.3	亥姆霍兹线圈磁场模型	130
6.3	油膜轴承外加磁场的数值求解	131
6.3.1	多层螺线管线圈产生的磁感应强度	131
6.3.2	缠绕螺线管线圈的油膜轴承内部的磁感应强度	132
6.3.3	衬套楔形间隙内的磁感应强度分布	133
6.4	螺线管磁场的试验研究	135
6.4.1	螺线管设计	136
6.4.2	磁场测量	139
6.4.3	实验测量缠绕通电螺线管衬套的磁感应强度分布	142
6.4.4	轴承的磁化电流	145
6.5	计算结果和分析	146
6.5.1	不同磁场模型的模拟结果	146
6.5.2	油膜区磁场分布	147
6.5.3	螺线管电流对磁场大小的影响	149
7	磁流体润滑油膜的黏度特性	151
7.1	磁流体黏度特性	151
7.1.1	无磁场作用时磁流体的黏度方程	151
7.1.2	外磁场作用时磁流体黏度方程	152
7.2	磁流体黏度测试	153
7.2.1	测试装置	153
7.2.2	测试原理及方法	154
7.3	磁流体黏度分析	156
7.3.1	无外加磁场作用时磁流体的黏度特性	156
7.3.2	外加磁场作用时磁流体的黏度特性	157

7.3.3 磁流体的温升特性	166
8 磁流固多场耦合润滑油膜数值模拟	168
8.1 有限元方法简介	168
8.1.1 ANSYS CFX 软件概述	168
8.1.2 ANSYS 参数化设计语言	169
8.1.3 磁流体润滑油膜轴承油膜分析系统	169
8.2 磁流体润滑油膜轴承系统建模	171
8.2.1 油膜轴承几何模型	171
8.2.2 油膜轴承有限元模型	173
8.3 磁流体润滑油膜模拟	175
8.3.1 传统润滑油模拟	177
8.3.2 磁流体无磁场模拟	177
8.3.3 磁流体有磁场模拟	179
8.3.4 模拟结果对比分析	179
8.4 磁流固多场耦合模拟	182
8.5 铁磁流体润滑性能分析	186
8.5.1 偏心率对轴承承载能力的影响	187
8.5.2 磁感应强度对轴承承载能力的影响	188
8.5.3 磁性微粒质量分数对轴承承载能力的影响	189
8.5.4 入口压力对轴承承载能力的影响	189
8.5.5 轧辊转速对轴承承载能力的影响	190
9 磁流体润滑油膜轴承静动特性	192
9.1 静动特性数学模型	192
9.1.1 雷诺方程	192
9.1.2 边界条件	193
9.1.3 膜厚方程	194
9.1.4 黏度方程	195
9.1.5 静特性分析	195
9.1.6 动特性分析	196
9.1.7 稳定性分析	198
9.2 静动特性数学模型的无量纲化	199
9.2.1 雷诺方程的无量纲化	199
9.2.2 膜厚与黏度方程的无量纲化	202

9.2.3	磁场模型的无量纲化	202
9.2.4	静特性的无量纲化	204
9.2.5	动特性无量纲化	205
9.2.6	稳定性分析	205
9.3	静动特性的数值求解	205
9.3.1	数值求解的相关参数	206
9.3.2	数值求解计算流程图	206
9.3.3	磁流体润滑模型静特性的数值求解	206
9.3.4	磁流体润滑模型动特性的数值求解	211
参考文献		215

主要符号表

M_n, M_L 磁性颗粒和润滑油质量, kg	H 磁场强度, A/m
P_n, P_L 磁性颗粒和润滑油密度, kg/m ³	F_e 库仑力, N
ϕ 油基磁流体的体积分数	τ 空间中任意一个体积, m ³
A Fe ₃ O ₄ 颗粒吸附量	S, Σ 封闭的和张在 C 上任一曲面
M_s 饱和磁化强度, emu/g	Re, Re_m 雷诺数, 磁雷诺数
k_0 玻耳兹曼常数	a_0 流体的特征声速, m/s
μ_0 真空磁导率和 m 粒子间的磁矩, emu	λ_T 热传导系数
d_{av} Fe ₃ O ₄ 晶粒尺寸, nm	I 单位体积粒子惯性矩总和, m ² ·kg·s ⁻²
β 衍射峰半宽高, mm	ρ_p 单个粒子的质量密度, kg/m ³
λ 射线波长, mm	Ω 角速度, rad/s
ρ_{NP}, ρ_f 固相微粒和油基磁流体密度, kg/m ³	C_H, C_0 磁流体和基载液 (润滑油) 油膜刚度, N/m
h 固相微粒距参考点高度, m	h 巴氏合金层原始厚度, mm
C 最可几动量	$R_{(y)}$ 轴承内径, mm
δ, ψ 半径间隙和相对间隙, mm	I 电流强度, A
e, ε 偏心距, mm; 相对偏心率	$\Delta\eta$ 磁流体润滑油膜的黏度增量, Pa·s
d, r 轴颈直径和半径, mm	d_p 团聚体分子平均直径, mm
l 轧辊与轴承理论接触长度, mm	R_l 判断矩阵平均随机一致性指标值
h_{JT}, h_{BT} 轧辊和轴承的热变形, mm	f_p 压力梯度
$\hat{\alpha}_J, \hat{\alpha}_B$ 轧辊和轴承的材料线膨胀系数	r_p 磁性微粒的半径, mm
D_p, μ_f 密温系数; 黏性系数	t_s Newton 松弛时间, s
ρ_0 大气压下温度 T_0 时润滑油密度, kg/m ³	h_e, h_T 弹性变形和热变形, mm
B 磁感应强度, T	h_c 巴氏合金层厚度, mm
θ 热流量, W	k_B 轴承热传导系数
E 电场强度, V/m	T_R 轧辊轴径表面温度, °C
	k_e 表面对流换热系数
	$\eta (\dot{\gamma})$ 表观黏度, Pa·s
	B 轧辊和轴承间磁感应强度, T
	B', B_0 磁场增量和外加磁场磁感应

强度, T	F 轴承载荷, kN
H, M 外加磁场强度, 磁化强度, A/m	h_{\min} 最小油膜厚度, mm
V 封闭曲面 S 包围的面积	L 轴承宽度, mm
r 线圈上任意一点 Q 到点 P 的距离, mm	ω 轴颈旋转角速度, r/min
R 任一层到中心轴线的距离, mm	h_1, h_2 几何间隙, 轧辊和轴承弹性变形, mm
R_1, R_2 螺线管内半径和外半径, mm	E_1, E_2 轧辊和轴承弹性模量, MPa
B_{oy}, B_{ox} 径向和轴向磁感应强度, T	P 作用于轧辊或轴承的油膜压力总和, kN
n_1, n_2 单位长度和厚度上螺线管的匝数	μ_1, μ_2 轧辊和轴承泊松比
B_ρ, B_z 径向和轴向的磁感应强度分量, T	η_0 常压(大气压)基载液黏度, Pa·s
η_p 纳米固相微粒和的黏度系数	ΔT 温度热变化量, °C
β_1 管流涡旋矢量与外加磁场强度的夹角, (°)	α Barus 黏压系数
μ 磁流体的磁导率	c_v 定容比热容, J/(kg·K)
P_0 入口油压, MPa	D 电感应强度, H
M_0 磁流体摩尔质量, g/mol	ρ_e 电荷的体密度, C/m ³
c, c_c 比热容和磁流体比热容, J/(kg·K)	η 磁扩散系数
c_p 纳米固相微粒比热容, J/(kg·K)	ε_m 磁力功体密度
λ 热导率, W/(m·K)	n 表面 S 的单位外法向矢量
λ_c, λ_p 磁流体热和纳米固相微粒热导率	V_0 特征速度, m/s
Z, S_0 无量纲黏压系数和无量纲黏温系数	B_0 特征磁场
γ^2 不稳定的涡动频率系数	M_0, M_m 马赫数, 磁马赫数
χ_i 初始磁化率	Pr 普朗特数
T, T_0 绝对温度和特征温度, °C	τ_s, τ_B 粒子由于摩擦内阻和布朗运动引起的旋转松弛时间, s
D_m 磁性粒子粒径, nm	S 角动量, kg·m ² /s
k_1 Sherrer 常数	U 速度矢量, m/s
θ 掠射角, (°)	G 静压轴承同心时的静刚度, N/m
V_{pl} 单个微粒体积, m ³	$H_{(i)}$ 外磁场强度函数
g 重力加速度, m/s ²	$S_{(h)}, L_{(h)}$ 轴承系统固体变形函数和磁流体油膜承载函数
	$\partial T/\partial r_B$ 轴瓦温度梯度
	$A_{(y)}$ 厚度方向上的作用面积, mm ²
	L 轴承轴向宽度, mm
	η_H, η_i 磁流体有磁场作用的黏度和基

载液润滑油膜的黏度, Pa · s	η_{H0} 无磁场作用时铁磁流体黏性系数
ω 管流涡旋矢量	γ 剪切速率
f_g, f_η 重力和黏性力, N	ξ 轴承承载能力系数
μ_r 相对磁导率	ρ_c, ρ_p 磁流体和纳米固相微粒密度, kg/m ³
η_c 基载液的动力黏度, Pa · s	η_{c0} 磁流体基载液的动力黏性系数
h_g 轴承几何间隙, mm	r_p 纳米磁性颗粒粒径, mm
J 磁性微粒绕中心轴的惯性矩, m · kg · s ²	δ 表面活性剂厚度, mm
c_B 轴承比热容, J/(kg · °C)	η_H 磁场作用时铁磁流体的黏性系数
K 铁磁流体热传导系数	p_m, p_s 磁化压力和磁场中磁流体的体积变化引起压力变化的磁致伸缩压力, MPa
T_{inlet}, T_{out} 轴承入口和出口油温度, °C	w_{x0}, w_{y0} 轴承稳定运行状态时 x 向和 y 向的油膜力, N
Q_{inlet} 润滑油入油量, mL	α_a 油膜承载区的初始边界
T_s 外界供油温度, °C	α_b 油膜破裂边界的角位置
$\theta_0^{(n)}$ 实际偏位角, (°)	k_s 磁彻体力系数
L, L' 衬套长度和当量宽度, mm	f_k Kelvin 力, N
R_0 线圈半径, mm	K_{eq} 等效油膜刚度系数
a 环形永磁铁外圆柱面半径, mm	
B_x 轴向磁感应强度, T	
χ_{il} Langevin 模型初始磁化率	

1 磁流体概述

磁流体 (magnetic fluid) 又称磁性液体 (magnet liquid)、铁磁流体 (ferrofluid) 或磁液 (magnetic liquid), 是一种具有磁性和流动性的液体, 具有强磁化性能的润滑、密封以及工程阻尼等用途, 是纳米材料的一个重要应用领域。磁流体在摩擦学技术中的应用, 直接在摩擦区域保留一定量的磁流体, 有助于提升传动机构、轴承等的运行质量。许多情况下, 磁流体代替传统的润滑方式, 明显降低因摩擦引起的能量消耗, 同时减少润滑材料的消耗。磁流体广泛应用于航空航天、遥测、机械、能源、电子、冶金、环保、医疗、仪表等诸多领域。

1.1 磁流体的组成和特性

1.1.1 磁流体的组成

磁流体主要由基载液、分散剂以及纳米磁性颗粒组成, 三者通过化学物理反应和热运动形成相对稳定的固、液两相胶体溶液。磁流体是流体, 遵循流体的运动规律; 同时具有一般磁性物质的磁性, 在外加磁场作用下遵从电磁学的基本运动规律。磁性颗粒在外加磁场作用下可以被控制、定位和移动, 且不会出现沉淀或分层现象。其组成见图 1-1。

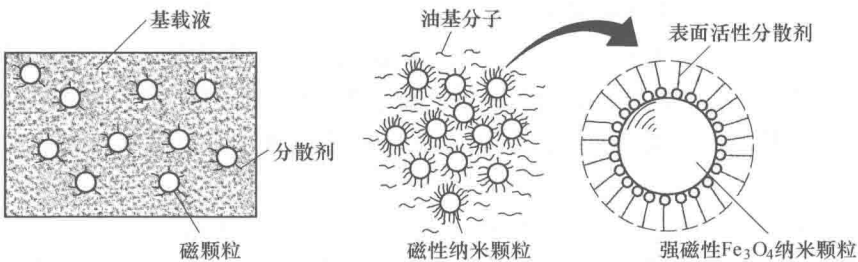


图 1-1 磁流体的组成

在磁流体中, 为了保持磁性颗粒在基载液中弥散分布不产生沉淀, 磁性颗粒的尺寸通常很小, 一般直径范围在 8 ~ 10nm 之间。常用的磁性颗粒有铁、钴、镍及磁铁矿 (Fe₃O₄)、钡铁氧体、锶铁氧体等。纳米磁颗粒可以有效地防止由于引力、磁场力和重力等外界因素而造成的凝聚或聚集现象。由于其尺寸相当于 100 个

分子的大小,磁性颗粒在磁流体中具有纷乱无序的热运动,使磁流体在宏观上具有各向同性的性质,同时磁性颗粒使基载液和固相微粒之间具有巨大的接触面积。因此,仅依靠两相之间的接触黏附作用,就能够通过外磁场控制磁性颗粒来调控整个磁流体溶液。

基载液和分散剂在磁流体的三种组分中占整个溶液体积的90%以上,磁性颗粒占总体积的10%以下。作为基载液的物质来源很广,常用的有水、矿物油、有机硅油、煤油、双脂类、聚苯醚等非导电性液体,也可以是钒、铟、水银等金属或合金。为了防止微小磁性颗粒之间的相互吸引、碰撞发生磁性颗粒的聚集沉淀,引起磁流体磁学性能的改变,需要在基载液中加入分散剂。分散剂又名表面活性剂或扩散剂,是磁流体不发生凝聚的关键因素。常用的分散剂有油酸、亚油酸、卵磷脂等一类长链物质,其长链中的一端依附在磁性颗粒的外表面上,另一端处于自由状态。

1.1.2 磁流体的特性^[1]

磁流体中的磁性颗粒为纳米微粒,由于纳米颗粒所特有的体积效应(量子尺寸效应与小尺寸效应)、表面效应和协同效应等特殊效应,使得磁流体在光、电、热、磁等方面呈现出不同于多数液体材料的奇异特性。磁流体具有磁性材料和流体的双重特性,同时具有利用磁场控制流变性、热物理性和光学性能的能力。

(1) 磁流体的磁学性质。磁流体属于超顺磁材料,其最主要的物理性质是磁化性能。磁流体在磁场作用下被磁化,随着磁场梯度的改变,磁流体会被定位在确定的区域。通常情况下,磁化强度用来衡量磁流体的磁化性能。磁流体磁化后再退磁,一般不会出现磁滞现象。当无外加磁场时,磁性颗粒集合体类似于顺磁体,各磁化矢量相互抵消,对外不显示宏观磁性,此时磁性粒子不显磁性;当有外加磁场时,由于磁场力的作用,磁性粒子将流向磁场强度高的一方,并显示出一定的宏观磁化强度,表现出超顺磁性;同时可通过调节外加磁场改变其黏度。在垂直磁场作用下,会自发地形成稳定的波峰。

(2) 磁流体的力学性质。磁流体力学性质主要体现在黏度,与基载液相比,磁流体的黏度要高许多,且随着体积分数的增加而增大。纳米磁性颗粒的尺寸与其在磁流体中的体积分数对磁流体的黏度起着决定性的作用。

(3) 磁流体的光学性质。当纳米颗粒的尺寸与光的波长相当或者更小时,周期性边界条件将被破坏,使得光的反射率、折射率发生改变,使得磁流体膜体现出特殊的光学性质,如偏振、双折等。

(4) 磁流体的热学性质。在热力学性质方面,磁流体与普通流体的不同之处在于,其热力学性质不仅与自身的磁化强度有关,还与外磁场的强度有关。