

应用流变学丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

电磁流变液及其在 机械工程中的应用

Application of Technique of
Electro-rheological and Magneto-rheological
in Machinery Engineering

黄宜坚 刘晓梅 / 编著

湘潭大学出版社
Xiangtan University Press

应用流变学丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

应用流变学丛书编委会

电磁流变液及其 在机械工程中的应用

DIANCILIUBIANYE JIQI
ZAIJIXIEGONGCHENGZHONG DE YINGYONG

黄宜坚 刘晓梅 / 编著

湘潭大学出版社
Xiangtan University Press

图书在版编目(CIP)数据

电磁流变液及其在机械工程中的应用 / 黄宜坚, 刘晓梅编著. — 湘潭: 湘潭大学出版社, 2015.12

(应用流变学丛书)

ISBN 978-7-81128-921-3

I. ①电… II. ①黄… ②刘… III. ①电磁流体力学—研究 IV. ①O361

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015)第 320731 号

电磁流变液及其在机械工程中的应用

黄宜坚 刘晓梅 编著

责任编辑: 王亚兰

封面设计: 李娜

出版发行: 湘潭大学出版社

社址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印刷: 长沙超峰印刷有限公司

经销: 湖南省新华书店

开本: 787×1092 1/16

印张: 13

字数: 293 千字

版次: 2015 年 12 月第 1 版

印次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-81128-921-3

定价: 28.00 元

(版权所有 严禁翻印)

应用流变学丛书编委会

主 任:欧进萍

副主任:张 平

委 员:(按姓氏笔画排序)

尹久仁 关新春 刘晓梅 吴云鹏

张俊彦 李之达 罗文波 修瑞娟

赵荣国 常晓年 黄宜坚

前 言

自 20 世纪 20 年代学者们发现无法用古典弹性理论、塑性理论和牛顿流体理论解释诸如橡胶、塑料、金属、混凝土、石油、血液等材料的复杂性,进而产生流变学的思想以来,流变学经过近百年的发展,已经扩展至许多学科领域。电/磁流变效应从发现到形成学科并开发应用也仅仅经历了几十年的时间,但却渗透进许多学科,如材料科学、力学、土木工程、机械工程等。

本书的撰写,主要是介绍电/磁流变学的基本概念及理论,介绍电/磁流变技术在机械工程领域的发展和应用,全书共 7 章:第 1 章介绍了电/磁流变液体的特性及电/磁流变技术的研究内容;第 2 章介绍电/磁流变效益的机理及电/磁流变技术在机械工程领域的典型应用;第 3 章介绍典型的电/磁流变器件的工作原理、力学模型,基于不同的本构方程,分析了电/磁流变传动器件和阻尼器件等的力学特性;第 4 章针对典型的电/磁流变器件的具体结构,分析其结构参数对工作性能的影响,及典型器件的优化设计思路;第 5 章着重介绍将时间序列谱分析的思想用于研究电/磁流变系统的非线性,从而更加深入认识和理解包含电/磁流变器件的系统的动力学特性;第 6 章和第 7 章分别以电流变传动装置和磁流变减振装置的应用为例,展示了从设计、实验到系统动力学特性的分析的完整过程。

本书由黄宜坚教授拟定大纲和条目,并由黄宜坚教授和刘晓梅副教授共同完成,其中,第 1 章至第 5 章主要由刘晓梅副教授编写,第 6 章和第 7 章主要由黄宜坚教授撰写。成书的基础是国内外学者的研究文献、专利和作者近三十年的一些研究成果,希望能够为促进我国电/磁流变技术的研究与应用尽一份力量。

本书得以出版还要感谢湘潭大学出版社的全力支持。

由于我们水平和能力有限,书中难免有错误和不当之处,敬请各位读者批评指正,不胜感激!

黄宜坚 刘晓梅

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 流体的分类	1
1.2 电/磁流变流体的本构方程	3
1.3 电/磁流变流体的性能要求	4
1.4 电/磁流变工程学的研究任务	5
本章主要参考文献	5
第 2 章 电/磁流变效应及其应用	7
2.1 电流变效应与电流变液	7
2.1.1 电流变效应及其机理	7
2.1.2 电流变液的组成、分类及其性能	8
2.2 磁流变效应与磁流变液	13
2.2.1 磁流变效及其应机理	13
2.2.2 磁流变液体的传统本构方程	14
2.2.3 磁流变液体的分数阶微分模型	15
2.2.4 磁流变液的组成及其性能	17
2.3 电/磁流变技术的应用	20
2.3.1 电/磁流变应用装置分类	20
2.3.2 电/磁流变技术工程应用实例	21
2.4 电/磁流变技术应用展望	32
本章主要参考文献	33
第 3 章 电/磁流变器件的力学模型	35
3.1 电/磁流变器件的静力学模型	35
3.1.1 电/磁流变液在平行平板间的压差(Poiseuille)流动	35
3.1.2 电/磁流变液在平行平板间的剪切(Couette)流动	37
3.1.3 电/磁流变液的轴对称流动模型	39
3.2 电/磁流变流体传动装置工作原理	42

3.2.1 圆盘式传动装置	42
3.2.2 圆筒式传动装置	47
3.3 电/磁流变阻尼器的阻尼力	48
3.4 磁流变阻尼器的动力学模型	50
本章主要参考文献	61
第4章 电/磁流变器件结构设计	63
4.1 电/磁流变器件工作原理	63
4.2 传动器件结构设计	64
4.2.1 平圆盘式传动装置结构设计	64
4.2.2 波纹盘传动装置结构设计	67
4.2.3 圆筒传动装置结构设计	69
4.3 电流变阀结构设计	70
4.4 磁流变阻尼器结构设计	72
4.4.1 磁流变阻尼器结构参数确定	72
4.4.2 磁流变阻尼器结构优化设计	73
4.5 磁流变阻尼器磁路设计	74
4.5.1 磁路设计的基本要求	75
4.5.2 磁路设计准则	75
4.5.3 磁路设计	76
4.5.4 磁路的分析计算	79
4.5.5 磁场数值模拟	83
本章主要参考文献	88
第5章 电/磁流变器件的系统动力学分析	90
5.1 包含电/磁流变器件系统的时间序列建模	90
5.1.1 时间序列分析的意义	90
5.1.2 时间序列模型的基本形式	92
5.1.3 时间序列的时域和频域特性	96
5.1.4 时间序列建模	101
5.2 时间序列高阶谱分析	107
5.2.1 高阶谱分析的优势	107
5.2.2 高阶矩和高阶累积量	108
5.3 高阶(累积量)谱	114
5.3.1 高阶矩谱和高阶累积量谱的定义	114
5.3.2 双谱	115

5.3.3	三谱	120
5.3.4	双谱、功率谱重构	122
5.3.5	双谱、三谱的物理意义及应用	123
5.3.6	高阶谱分析在电/磁流变系统中的应用	124
5.4	磁流变阻尼系统的混沌特性	137
5.4.1	混沌与分形基础理论	137
5.4.2	复杂非线性机电系统的混沌特性	138
5.4.3	电/磁流变系统的混沌特性	139
本章主要参考文献		148

第 6 章 电流变转向器 149

6.1	圆盘式电流变传动器工作原理	149
6.2	电流变转向器	151
6.3	电流变转向器的动力学模型	152
6.4	虚拟转矩、转速仪的设计	155
6.5	测控系统架构方案	157
6.5.1	转向器实验装置	157
6.5.2	转向器网络化测控方案	158
6.6	转向器仿真	159
6.7	转向器动力学参数识别	161
6.8	转向器的动力学仿真	162
6.9	转向器动力学模型的简化	163
6.10	转向器的 AR 模型	164
	本章主要参考文献	166

第 7 章 混凝土砌块成型机的磁流变减振研究..... 168

7.1	混凝土砌块成型机	168
7.1.1	砌块机结构与砌块成型原理	168
7.1.2	砌块机不同激振系统比较	169
7.2	砌块机磁流变减振系统设计	171
7.2.1	磁流变阻尼器的设计	171
7.2.2	磁流变阻尼器性能测试	173
7.2.3	减振效果测试	175
7.2.4	响应时间	176
7.3	磁流变缓冲补偿器	177
7.3.1	磁流变缓冲补偿器设计技术方案	178

7.3.2 磁流变缓冲补偿器实施方案	180
7.4 振动信号采集系统	182
7.4.1 信号采集系统	182
7.4.2 信号采集过程分析	184
7.5 磁流变器实验平台上振动信号的三谱特性分析	186
7.5.1 三谱 2 维切片	186
7.5.2 三谱 1.5 维与等频率切片	188
7.5.3 三谱 1 维切片	190
7.6 砌块机整机实验振动信号的三谱切片分析	190
7.6.1 三谱 2 维切片	191
7.6.2 三谱 1 维切片	193
7.6.3 砌块抗压强度综合验证	194
本章主要参考文献	195

第 1 章 绪 论

流变学是力学的一个新分支,它主要研究材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下与时间因素有关的变形和流动的规律。流变学出现在 20 世纪 20 年代,学者们在研究橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土以及金属等工业材料,岩石、土、石油、矿物等地质材料,以及血液、肌肉、骨骼等生物材料性质的过程中,发现使用古典弹性理论、塑性理论和牛顿流体理论已不能说明这些材料的复杂特性,于是就产生了流变学的思想。英国物理学家麦克斯韦和开尔文很早就认识到材料的变化与时间存在紧密联系的时间效应。经过长期探索,人们终于得知,一切材料都具有时间效应,于是出现了关于流变学的研究,并在 20 世纪 30 年代后得到蓬勃发展。流变学从一开始就是作为一门实验基础学科发展起来的,因此实验是研究流变学的主要方法之一,它通过宏观实验获得物理概念发展新的宏观理论。

电流变学(Electrorheology)是研究在电场作用下,流体变形和流动规律的学科,主要研究电场强度、剪切应力、剪切变形速率以及时间之间的关系。相应地,磁流变学(Magnetorheology)则研究磁场作用下,磁场强度与磁流变流体的剪切应力、剪切变形速率以及时间的关系。

电流变液体(Electro-Rheological Fluids, ERF)和磁流变液体(Magneto-Rheological Fluids, MRF)是一种新型“智能”软物质(Soft Matter),在外加直流或交流电场作用下,ERF 和 MRF 的表观黏度(Apparent Viscosity)可较未加电场时增加几个数量级,甚至失去流动性。而当外加电场或磁场撤去后,其表观黏度又很快恢复至初始状态,这一过程可逆、可重复,且其响应速度一般为毫秒级。电/磁流变液体的这种能够“感知”外加电/磁场作用的特性,且其流动特性随电/磁场变化的可逆性、连续可控性、快速响应性、功耗小等特性,使电/磁流变技术在 20 世纪中期被发现后,迅速成为研究与应用的热点,成为新型智能材料的代表之一。

1.1 流体的分类

按照流体的应力与应变关系,可以将黏性流体分为牛顿流体和非牛顿流体两大类。牛顿流体的应力与应变为线性关系,反之,非牛顿流体的应力与应变则为非线性关系。在流变学中流变曲线常以剪切速率 $\dot{\gamma}$ 为横坐标、剪切应力 τ 为纵坐标,不同的体系有不同的流变曲线。牛顿流体的黏度不随剪切应力而改变,定温下有定值,所以 $\dot{\gamma}$ 与 τ 成正比,其流变曲线是直线,且通过原点,即在任意小的外力作用下液体就能流动。对于非牛顿液

体,其流变曲线依照 $\tau = f(\dot{\gamma})$ 函数的不同形式可以有塑性流体、拟塑性流体、胀性流体和 Bingham 流体等几种,如图 1-1 所示。各类流体的剪切应力与剪切速率间的变化规律如图 1-2 中的流变曲线所示。

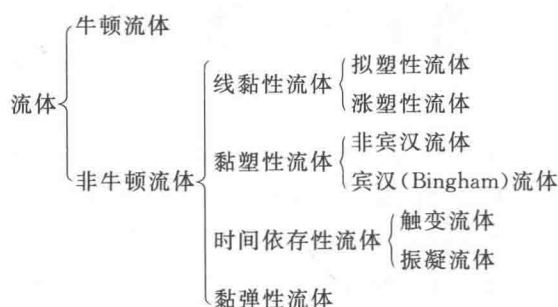


图 1-1 流体的分类

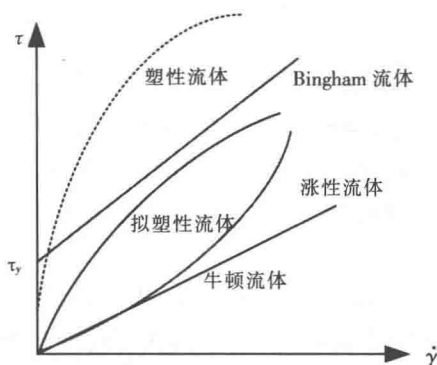


图 1-2 流体的流变曲线

电/磁流变液体属于非牛顿液体,其流变曲线依照 $\tau = f(\dot{\gamma})$ 函数的不同形式对应图 1-2 中的塑性流体、拟塑性流体和胀性流体等几种。

1. 塑性流体

塑性流体流变曲线的特点是具有屈服值(也称塑变值),即剪切应力必须超过某一临界值 τ_y 后,体系才开始流动,一旦开始流动,其 $\dot{\gamma}$ - τ 之间可能像牛顿流体一样呈线性关系,即如图 1-2 中的 Bingham 流体。也可能不呈线性关系。

2. 拟塑性流体

如缩甲基纤维素、淀粉、橡胶等高分子溶液均为拟塑性流体,其特点是:

(1) 体系没有屈服值,流变曲线从原点开始。

(2) 黏度不是一个固定不变的常数,它随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加而减少,即具有剪切稀化作用。随着 $\dot{\gamma}$ 的增加,溶液中不对称质点沿流线定向的程度提高,因而黏度下降。

3. 涨性流体

有些固体粉末的高浓度浆状体在搅动时,其体积和刚性都有增加,故称为涨性体系,此类体系的特点是:

- (1) 无屈服值;
- (2) 与拟塑性流体不同,其黏度随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加而升高,且有剪切稠化作用。

1.2 电/磁流变流体的本构方程

在一定假设下推导出的表达黏性规律的应力与应变之间关系的方程式,称为本构方程(Constitutive Equation),也称流变方程(Rheological Equation)。本构方程是反映材料宏观性质的数学模型,不依赖于坐标的选取,研究局部材料应力、应变和应变率之间的关系。

牛顿流体的应力-应变关系如图 1-3 中的一条通过原点的直线表示,其本构方程

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

式中, τ 为剪切应力; η 为液体的动力黏度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

电/磁流变液体为典型的非牛顿流体,其应力-应变关系可以由图 1-3 中的另外几种常用模型拟合。

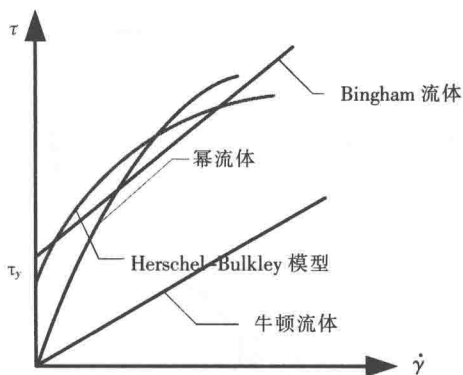


图 1-3 电/磁流变液体的应力-应变关系模型

1. Bingham 模型(Bingham Fluids)的本构方程(1927 年)

$$\tau = \tau_y + \eta_{ps} \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

式中, τ_y 为电/磁流变液的剪切屈服应力,对于电流变液体,其由电场强度 E 决定;对于磁流变液体,其由磁场强度 H 决定。 η_{ps} 为伪塑性黏度。从式中的可以看出,流体只有当剪切力大于屈服应力 τ_y 时,才会流动,且剪切应力与剪切速率之间呈线性关系,它是塑性流体中最简单的一种。

将式(1-2)改写,伪塑性黏度 η_{ps} 写为:

$$\begin{cases} \eta_{ps} = \infty, & \tau < \tau_y \\ \eta_{ps} = \eta_a - \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}}, & \tau \geq \tau_y \end{cases} \quad (1-3)$$

其中, η_a 称为表观黏度(Apparent Viscosity)。

这样,也可以将 Bingham 流体用剪切速率描写为:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_y}{\eta_{ps}}, & \tau > \tau_y \\ \dot{\gamma} = 0, & \tau \leq \tau_y \end{cases} \quad (1-4)$$

2. 幂律流体(Power Law Fluids)的本构方程(1925 年)

$$\tau = k\dot{\gamma}^n = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-5)$$

同样的,式中的系数 k 和指数 n 也对应地决定于电场强度 E 或磁场强度 H 。指数 n 为无量纲数,代表流体特性。当 $n < 1$ 时,说明剪切变稀,为伪塑性流体,一般 ERF 和 MRF 都属这类流体;当 $n > 1$ 时,说明剪切变稠,为胀塑性流体;当 $n = 1$,为牛顿流体。

如果引入黏度函数描写非牛顿流体中的广义牛顿流体,即

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1-6)$$

就有

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1-7)$$

式中, k 称为稠度系数(Ns^n/m^2)。

3. Herschel-Bulkley 模型的本构方程(1926 年)

Herschel-Bulkley 模型是基于 Herschel 和 Bulkley 发现的剪切稀化现象提出的一种黏塑性模型,其基本形式

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^{\frac{1}{m}} \quad (1-8)$$

式中, $m > 1$ 。当 $m = 1$ 时,方程与 Bingham 模型等效, $k = \eta$ 。

1.3 电/磁流变流体的性能要求

总体来说,满足良好应用要求的电/磁流变液体应具有以下性能:

(1) 没有外加电/磁场作用时,液体应该具有很低的抗剪切应力及表观黏度;有外加电/磁场作用时,应表现出很高的屈服应力及抗剪切应力和表观黏度值,即有明显的电/磁流变效应,且它们的流变行为应能再现并可预知。

(2) 达到固态时对场强的要求不应太大。

(3) 应该具有良好的动态性能,即电/磁流变液体的剪切应力随剪切速率的增大而明显地增加,确保其表观黏度没有显著下降。

(4) 应该具有良好的物理稳定性。

(5) 尽可能低的电压或尽可能小的电流。

(6) 能在毫秒级的时间里完成固态与液态的可逆转化。

(7) 电/磁流变液体应该具有十分稳定的化学性能,即有较好的温度稳定性。另外,还应满足长期储存等条件的要求,使其在长期使用储存过程中不发生退化、变质现象。

(8) 电/磁流变流体应该无毒、无腐蚀性,以保证其使用过程中工作人员的人身安全和满足环保要求,延长器件的使用寿命。

1.4 电/磁流变工程学的研究任务

电流变工程学(Electrorheological Engineering)或磁流变工程学(Magnetorheological Engineering)是用电/磁流变学基本理论,探讨电/磁流变流体在外加电/磁场作用下,在典型机械构件中的运动规律,以及它在流体动力控制系统中的应用方法、特点、器件和系统结构模型的工程学科。电/磁流变流技术是一门新兴的科学。随着现代科学技术的发展,把机、电、液融合为一体,用智能方法控制的流体器件及系统将越来越多地被开发和应用。将电/磁流变流体技术应用于机械系统和流体传动控制系统,可实现无移动件或少移动件的机构,极大地改善系统的动态品质。

电/磁流变学同时也是一门综合性的学科,因此,其研究任务自然也涉及不同领域:

(1) 对物理学提出建立 ERF 和 MRF 的微观结构理论;

(2) 对流变学提出解释电流变现象和磁流变现象中外加电场或外加磁场、应变速率、应力等的关系,开发“电(磁)流体力学”的新领域;

(3) 对化学学科提出研制价格低、温度稳定和电黏特性好的 ERF 和 MRF 并研究其物化机理;

(4) 要求机电学科设计出可编程、高出力比例和刚性装置,并建立系统的控制模型,建立“电(磁)流体动力控制工程”新的应用学科体系。

在电/磁流变工程学中,需要讨论流体的一些重要物理量之间的关系,这里所涉及的主要物理量包括:

(1) 运动学特性参量:线速度、角速度、加速度、应变率等。

(2) 输运特性参量:黏度、热导率、质量扩散系数等。

(3) 电磁学参量:电压、电场强度、电流强度、电流密度、电容量等。

(4) 热力学参量:压力、密度、温度、焓、熵、功率等。

本章主要参考文献:

- [1] 张远君. 流体力学大全[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1990.
- [2] 杨瑞芳. 流变学理论基础及其应用[M]. 重庆:重庆大学出版社,1998.
- [3] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [4] 王凯. 非牛顿流体的流动、混合和传热[M]. 杭州:浙江大学出版社,1988.

- [5] [英]巴勒斯 H A、斯顿 J H、瓦尔特斯 K,吴大诚、古大治译校. 流变学导引[M]. 北京:中国石化出版社,1992.
- [6] [美]怀特 F M. 黏性流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [7] 陈文芳,等. 非牛顿流体力学[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [8] 韩式方. 非牛顿流体本构方程和计算解析理论[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [9] [英]道森 D、希金森 G R,程华译. 弹性流体动力润滑[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [10] 童诗铸,杨沛然. 弹性流体动力润滑[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
- [11] 袁龙蔚. 流变力学[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [12] Therese C J, Montgomery T S. Electrorheology, IEEE[J]. Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24 (5).
- [13] Donald L K, Thomas W M. Electroviscous Fluids. I[J]. Rheological Properties, Journal of Applied Physics, 1967, 38(1): 67—74.
- [14] Donald L K, Thomas W M. Electroviscous Fluids. II [J]. Rheological Properties, Journal of Applied Physics, 1967, 38(1): 75—80.
- [15] Strangroom J E. ER Fluids[J]. Phys Technol, 1983, 14: 290—296.
- [16] Arguelles J, Martin H R, Pick R. A Theoretical Model for Steady Electroviscous Flow between Parallel Plates[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1974, 16(4): 232—239.

第 2 章 电/磁流变效应及其应用

2.1 电流变效应与电流变液

2.1.1 电流变效应及其机理

1948 年,美国学者 Winslow 首先发现并揭示了电流变效应^[1]。他系统地论述了某些悬浮体在电场作用下黏度增大的实验结果,并申请了专利^[2],从此开辟了电流变流体的应用前景。他在 8 年的研究中发现,某些具有特殊“流变特性”(Rheological Properties)的液体在外加电场的作用下会发生戏剧性的变化。液体的黏度可以敏感地随着电场强度的增加而迅速变化、增长,甚至能够在某一电场强度下停止流动达到固化,并且有固体的属性,即抗剪切能力。这种变化被称为“电流变效应”(Electro-Rheological Effect)。具有这种特性的液体被称为“电流变液体”(Electro-Rheological Fluid, ERF)。

电流变效应通常具有以下几个特征^[3,4]:

(1) 在电场作用下,电流变液体的表观黏度随电场强度的增大而增大,当电场强度增加到一定值时,液体可能停止流动甚至固化;

(2) 电流变液体黏度随电场强度的变化是连续、无级的,通常还是非线性的;

(3) 该转换过程是可逆、可控的;

(4) 电流变液的黏度随电场强度变化的响应迅速,通常的响应时间为毫秒级。

对电流变效应的机理通常有三种解释。

第一种是分子极化理论。电流变液体是由分散相粒子和连续相基础液组成的,这两种物质都是导电性差的电介质,在电场作用下两者都会产生极化。有研究表明,在任何稀释悬浮液体中,偶极颗粒在外加电场的作用下都有沿电场方向成链的趋势。分子极化理论认为:没有外加电场时,电流变液中分散相固体粒子的正负电荷中心重合,无固有电偶极矩或者电偶极矩之和为零;外加电场后,分散相中的粒子根据其微观结构的不同会发生电子云位移极化、离子位移极化或偶极子取向极化等而使其产生电偶极矩。极化粒子在“多粒子效应”作用下增强,进而通过库仑力使粒子产生强烈的相互吸引或排斥,沿电场方向形成粒子链或柱状体,电流变液呈现剪切屈服应力 τ_y 及表观黏度 η 增加等现象。分子极化理论能够解释部分电流变现象,但是不能够解释全部,例如无机离子能够增强电流变效应等,应用分子极化理论就无法解释^[5]。

第二种为双电层理论。Klass 认为电流变效应来源于颗粒周围的双电层诱导极化^[6]。电流变液体中的分散相粒子带电后会形成了一个双电层,双电层的一面紧密地吸附在粒子表面,另一层处于粒子周围的连续相中,这一层电荷在电场作用下,可能在粒子两端不均匀分布,而形成双电层极化。电流变液体在电场中流动时,需要克服其内部的摩擦力和双电层之间的静电引力,使流动阻力增大,即产生电流变效应。

第三种是介电理论。由于分散相粒子和连续相介质液体的介电常数不同,它们内部的传导电流密度不相等,因此在各分散相粒子和连续相介质液体的分界面上形成自由电荷的聚积,造成电流变液体介质中电荷的不均匀分布,产生界面极化现象。这就使得分散相粒子和分散介质之间存在着相互作用,从而增大了液体的流动阻力^[7]。

正是基于上述的几种机理,电流变液在电场的作用下,在正负极之间形成了一束束纤维状的链,而基础液的分子同时重新取向排列,使电流变液体的流变特性发生改变进而被加以应用,如图 2-1 所示。

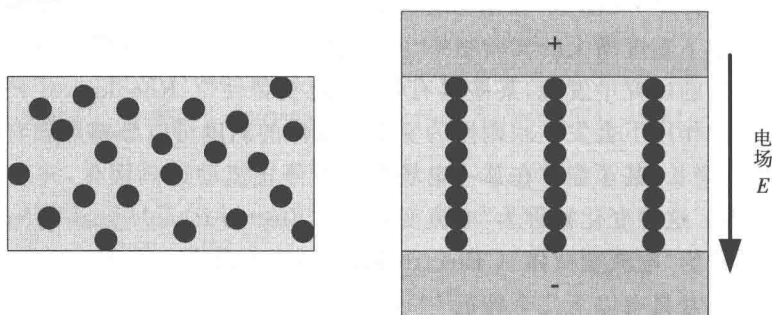


图 2-1 电流变效应

2.1.2 电流变液的组成、分类及其性能

1. 电流变液的组成

电流变液一般由基础液(连续相)和分散颗粒(分散相)以及一些添加剂组成。

(1) 作为连续相的基础液,一般采用低介电常数、低电导率的绝缘油,如硅油、植物油、变压器油、煤油、矿物油和卤代烃等。

(2) 分散相是电流变液中最主要的成分,分散相粒子的介电性质极大影响着电流变效应的强弱,通常要求分散相粒子具有高的介电常数和电导率,密度接近基础液以使其易于形成悬浮状态,此外还要求具有合适的几何尺寸、无毒、耐磨、性能稳定等性质,常见的分散相可分为无机材料、聚合物材料和复合型材料。

(3) 添加剂的作用主要在于表面活化,要求具有增溶、润湿、抗团聚等作用。

2. 电流变液的分类

早期的电流变液体分为含水的和单相的,但应用具有很大的局限性。目前普遍应用