

# 磁流变液研究进展及发展展望

王如平, 王光硕\*

河北工程大学, 材料科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2022年7月11日; 录用日期: 2022年7月22日; 发布日期: 2022年8月3日

## 摘要

磁流变液是一种由微米级或纳米级可磁化颗粒均匀分散在特定基载液中制备而成的智能材料。磁流变液主要由磁性颗粒、基载液、添加剂组成。磁流变液在外部磁场下具有良好的可控性和减震性, 被广泛应用于磁流变液减震器、磁流变液阻尼器等领域中。本文主要介绍磁流变液组成部分、特性及研究进展。

## 关键词

磁流变液, 智能材料, 磁性颗粒, 研究进展

# Research Progress and Development Prospective of Magnetorheological Fluid

Ruping Wang, Guangshuo Wang\*

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Jul. 11<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Aug. 3<sup>rd</sup>, 2022

## Abstract

Magnetorheological fluid is a kind of smart materials composed of micron or nanoscale magnetized particles evenly dispersed in a specific base carrier liquid. Magnetorheological fluid is mainly composed of magnetic particles, base load liquid and additives. Magnetorheological fluid has good controllability and shock absorption under the external magnetic field. Therefore, it is widely used in shock absorber, damper and other fields. This paper mainly introduces the main components and characteristics of magnetorheological fluids and their research progress and devel-

\*通讯作者。

opment prospective.

## Keywords

Magnetorheological Fluid, Smart Materials, Magnetic Particles, Research Progress

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 磁流变液的简介

磁流变液(MRF)是响应/驱动材料的一种,隶属于智能材料的范畴,因其独特的响应机理而成为学术界和工业界的研究热点。磁流变液是一种由磁性颗粒、非磁性载液和其他添加剂组成的磁场响应流体。

### 1.1. 磁性颗粒

磁性粒子是磁流变液的核心组成部分,其一般粒径为微米甚至纳米级别,因此具备一些独特的性能,如:单畴性,超顺磁性,特殊的矫顽力等。因此磁流变效应的产生是建立在粒子磁化并带有磁性的基础上的。当外界磁场施加时,磁性粒子被磁化,进而相互作用在一起,形成类似链状或体状结构[1],阻碍与之接触非磁性载液的流动,从而引起磁流变液整体剪切粘度和应力的增加;一旦磁场被移除,已经被磁化的粒子立即失去磁性,使得原有的类固态结构被破坏,磁流变液内部的磁性粒子又恢复到随机分布的状态。要想制得优良的磁流变液,其磁性粒子需要具备以下性质:满足使用要求的饱和磁化强度( $M_s$ 值)和磁导率,且矫顽力和磁滞损耗的大小可以忽略不计;需与非磁性载液之间的密度相匹配;需具备良好的环境稳定性;需具备无毒的特性,并具有良好的耐载液腐蚀性和耐磨性。

目前使用最多的和应用最广泛的磁性颗粒当属羰基铁颗粒,其较高的  $M_s$  值,微小的矫顽力和磁滞损耗,被广泛的应用于商业磁流变液及其相关器件。除此之外,一些软磁性铁氧体材料,如铁钴合金、铁镍合金以及其他元素的铁氧体目前也常常被用来研究,以得到更高性能的磁流变液。

### 1.2. 非磁性基载液

非磁性载液是将磁性粒子均匀地分散在磁流变液中,并且不与磁性粒子产生化学反应的一种粘稠状载流体,从而确保当施加外界磁场时,非磁性载液和磁性粒子所形成的固液共存悬浮体系可呈现出一系列可控的链状整体行为,以抵抗外界的作用力。

目前用于磁流变液非磁性载液最多的是不同粘滞系数的硅油、水、及各种矿物油等[2]。第一,油类载液的粘滞系数和密度较大,当它作为磁流变液非磁性载液时可以有效增加粒子的沉降稳定性;第二,油类载液的饱和蒸气压较小,不易挥发,因此磁流变液可以在较长的时间段里稳定使用。但有利就有弊,油类载液在较高温度下长期工作时,会发生一些内部分子链的团聚,变质等,并带有燃烧的风险,这是制约其使用寿命的致命因素。相比之下,以水作为载液的磁流变液虽然不具备易燃,分子团聚,变质等缺陷,但由于去离子水的密度为  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ,与大多数磁性粒子的密度相差甚远,当它作为载液使用时,粒子会由于其巨大的密度差异导致相对较快的沉降;并且水在温度较高下长期使用,会使蒸发量增加,不利于长久使用。但水基磁流变液由于其无毒环保,低成本等优点,使其在环保和便于更换的领域有所造诣,如磁流变液抛光等。

### 1.3. 添加剂

所谓添加剂, 就是可以添加到一种体系之中, 并对这种体系起到调节作用的一种物质。在磁流变液中, 磁性粒子和非磁性载液之间较大的密度不匹配, 使得粒子在载液中不足以抵抗自然条件下自身重力的影响, 从而容易发生沉降现象; 在所制备的磁流变液中加入一定量的添加剂是有一定必要的, 其主要为了提高沉降稳定性, 根据调控机理的不同主要分为: 助分散剂、抗沉降剂、润滑剂、触变剂等[3]。

助分散剂一般都为表面活性剂, 主要作用是改变磁性粒子的表面性质, 其作用机理主要是通过表面活性剂与粒子表面结合, 诱导液相中离子的向表面定向迁移, 使得表面同一种属性的电荷含量增加, 从而增大了颗粒之间的静电排斥力, 从而起到分散并增加表面积的作用[4]。当然, 过多的表面活性剂虽然会显著的提高沉降稳定性, 所以想要制备出性能优异的磁流变液, 其中包含的各成分的比例应当分配得当, 以使得表面活性剂能够发挥其最大的作用。

抗沉降剂, 顾名思义是防止密度不匹配导致的沉淀过快而采用的一种添加剂。其主要是在不影响磁流变液的零场粘度下, 又可以起到防止粒子快速沉降的目的, 这里的作用类似于触变剂[5]。常见的抗沉降剂为: 有机膨润土、氢化蓖麻油、硬脂酸铝等。有些时候, 依照应用需求, 微量的润滑剂、抗氧化剂等其他添加剂也需要向悬浮体系中加入。

## 2. 磁流变液特性

磁流变液中的磁性粒子是软磁材料的一种, 并且是磁多域的, 每个粒子都具备很低的矫顽力和很高的磁导率。之所以称为智能材料, 就是因为其流变行为可受磁场的控制任意改变, 且瞬时响应。磁流变液具体机理如图 1 所示: 每个磁性粒子在外部磁场的感应下瞬时被磁化, 导致粒子之间立即产生很强的“链状”相互作用, 这种相互作用随着磁场的增加表现的更加明显, 可磁场一旦消失, 这种“链状”相互作用力就会瞬间消除, 进而恢复到零场状态。因此, 磁流变液在磁场作用下可以瞬时从无序液体状态可逆地转变为半固态状态[6]。

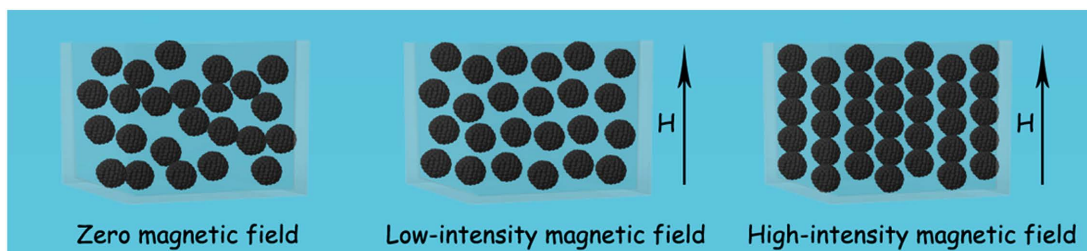


Figure 1. Rheological mechanism of magnetorheological fluid

图 1. 磁流变液流变机理

### 2.1. 剪切屈服应力

众所周知, 当外界释放出现磁场的信号时, 磁流变液中的磁性粒子会根据磁场施加方向迅速响应, 并聚集成链状或类圆柱状的类固体结构。而类固体结构具有一种抵抗破坏的能力, 这种达到破坏临界值所施加的剪切力即为屈服应力。在磁流变液的应用场合, 要想正常使用磁流变液相关器械, 其释放剪切应力的大小都不得超过屈服应力, 否则将无法工作。已知屈服应力的大小受磁场强度、体积分数、粒子性质和磁流变流体等自身固有性质的影响[7]。

同时在流动, 剪切, 挤压三种不同模式下工作时, 也会产生一定的热量, 这时的温度也可能对屈服应力造成影响[8]。随着磁场的增加, 屈服应力不断增加直到达到饱和值, 这个饱和值和磁流变液自身的

性质有关。目前, 为了提高磁流变液的屈服应力上限, 大多从这些影响条件做调整, 因为一旦屈服应力得到提升, 磁流变液器件的可调节范围也会相应变大, 从而实现更广泛的应用。

## 2.2. 零场粘度

当外加磁场不作用于磁流变液的条件时, 磁流变液被认为具有典型牛顿流体行为, 它在这时的粘度和剪切速率的比值恒为一个定值。所谓零场粘度就是在磁场不作用时, 磁流变液自身所具有的本征粘度。不同磁流变液的零场粘度也大不相同, 这主要与它的组成成分的性质有关, 高粘度的非磁性载液和高体积分数的磁性粒子势必会导致零场粘度的增加[9]。

但是, 零场粘度增加会使屈服应力增加, 这样初始启动时受到的阻力也增大, 启动时所消耗的能量就会增加, 从而造成不必要的损失; 零场粘度的增加也会导致磁流变液的应力可调范围减小, 使得在高精度、高需求领域的应用受限。因此, 在磁流变液可以满足要求的前提下, 认为它的零场粘度越低越好。

## 2.3. 磁性能

良好的磁性能是磁流变液可以发挥作用而必须具备的, 例如超顺磁性、零剩磁性、低矫顽力、高磁化率和高饱和磁化强度。

具备超顺磁性的材料可以给予磁场信号时迅速磁化(毫秒级), 磁场一旦移除, 当时所具有的磁性瞬间湮灭, 磁流变液之所以可以用于精密控制领域, 是因为相比于平时的顺磁性物质, 磁流变液可以实现更加精密地控制磁性的得失。同时, 在磁化和消磁的过程中, 磁流变液所表现出来的磁滞回线几乎完全重合在一起, 是一种完全可逆的过程, 也证明了剩磁  $M_r$  和矫顽力  $H_c$  几乎不存在, 这都远远优于顺磁性的一些物质。当然, 磁流变液也应具备可观的饱和磁化强度( $M_s$ )。否则无法满足正常磁流变液应用的需要。对于  $M_s$  值来说, 因磁性粒子的种类和含量不同而异, 研究数据表明: 随着磁性粒子的直径和在磁流变液中含量的增加, 其  $M_s$  值也会相应的变大, 但有一定的饱和值。

## 2.4. 温度稳定性

温度对磁流变液也有着重要的影响, 并且温度的影响是不可避免的, 由于磁性粒子之间在运动时会产生摩擦, 也就会伴随着热量的产生; 同时在磁流变液器件工作时, 也难免会产生机械热。当温度升高时, 非磁性载液的粘度降低, 影响磁性粒子的沉降稳定性和磁流变液的零场粘度。对于沉降稳定性来说, 长时间的处于高温条件下工作使得粒子容易不可逆地沉积到体系底部, 会导致磁流变液过早的失效。提高磁流变液的温度稳定性是保证磁流变液长期使用的关键, 而温度的影响是不可忽略的。

## 3. 磁流变液的应用

磁流变液的连续可控性、瞬时响应性、粘度区间广泛性和优良的力学性能, 这些特性使其在广泛的应用于工程应用场合。

### 3.1. 磁流变液阻尼器

磁流变液阻尼器是一种利用磁流变液的特性实现阻尼或减震效果的器械。磁流变液阻尼器的基本原理如图 2 所示: 利用可调节的外加电源来控制磁场的大小, 进而控制圆柱管壁内磁流变液的粘度, 这样就产生了不同的缓释阻尼力。将外加电压的大小与外界振动通过控制系统联系在一起, 当外界环境发生变化时, 产生不同的阻尼力, 实现了精确可控的减振效果[10]。例如: 在地震时可以起到防震目的; 在汽车上可以根据颠簸程度随时调整, 提高舒适度。



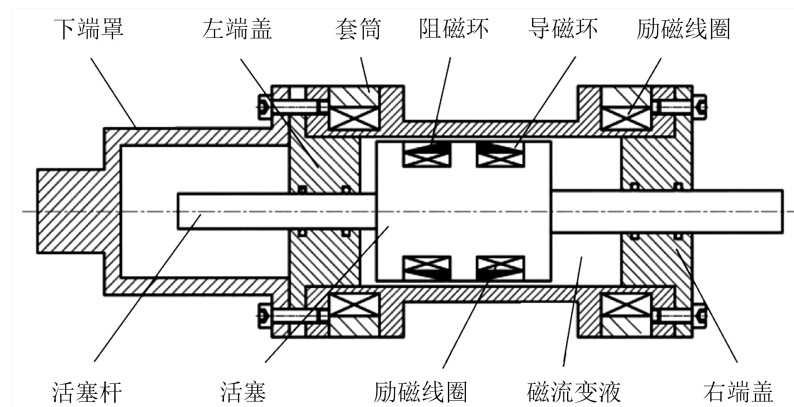


Figure 2. Magnetorheological fluid based damper and its structure diagram [10]  
图 2. 磁流变液阻尼器及其结构图[10]

### 3.2. 磁流变液制动器

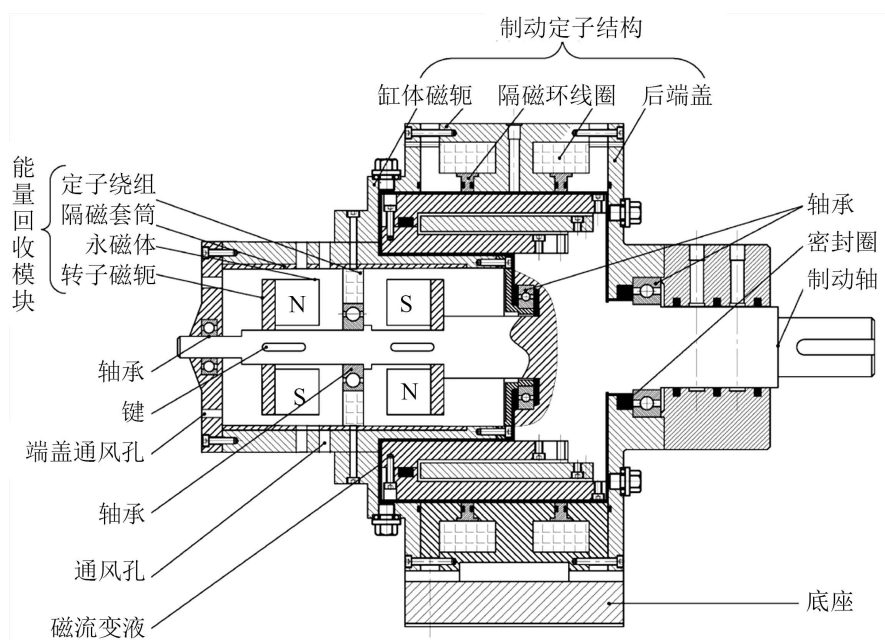


Figure 3. Magnetorheological fluid based braker and its structure diagram [11]  
图 3. 磁流变液制动器及其结构图[11]

对于制动器来说, 过去传统的制动器原理是靠摩擦力实现的, 这个过程产生了大量的热量, 而磁流变液制动器是通过剪切颗粒聚集成链状或柱状结构而实现的制动[11]。如图 3 所示: 磁流变液充满壳体内部, 当线圈无电流时, 也就不存在磁场, 磁流变液为牛顿流体态, 粘度很小; 当线圈通电时, 磁流变液的粘度随着磁场的增加而增加, 也就是所谓的宾汉流体, 从而产生一定的屈服应力, 纵向剪切这个屈服应力时需要的应力就代表了阻尼力的大小。该类磁流变液制动器工作稳定, 功率低, 可以随时控制, 相比于典型的涡流制动器具有很大的使用优势。

### 3.3. 磁流变液抛光机

磁流变抛光是一种比较精确的抛光方式, 多应用于对精密光学器件的抛光。如图 4 所示: 磁流变液

在控制系统的命令下,根据器件表面情况对磁流变液自身硬度和形状做出调整,以适应实际需求情况[12]。

当前抛光方面的应用都不选择油基磁流变液而选择水基磁流变液,这是由于油基磁流变液会附着在样品表面且不易清洗,且粘度较大,不宜回收等。水基磁流变液则不存在这些缺点,并且价格低,出于环保和低成本的要求下,水基磁流变液也就被广泛地在磁流变抛光机上所使用的。此外,磁流变液还应用在磁流变液密封部件、控制阀、医疗器械与设备与一些智能控制系统等方面。

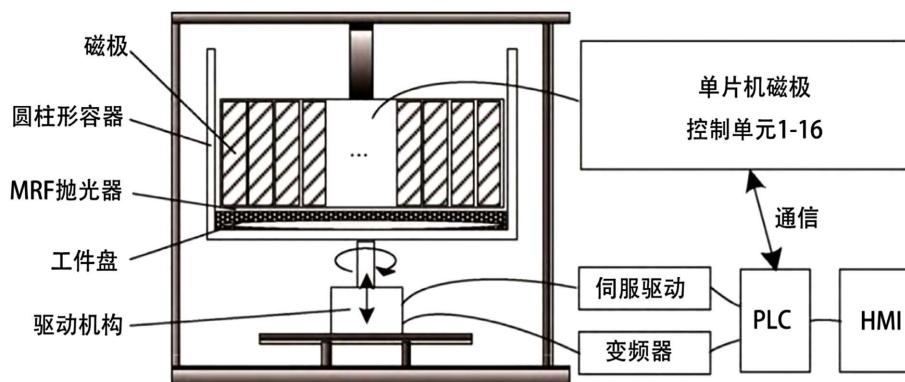


Figure 4. Magnetorheological fluid based polishing machine and its structure diagram [12]  
图 4. 磁流变液抛光机及其结构图[12]

#### 4. 研究展望

磁流变液作为智能磁场控制的一种精确、实用和环保的材料,在未来的应用中还有这不可替代的作用。虽然磁流变液的研究起步较早,但由于自身一些难解决的缺陷使得其发展严重受限,关于提高磁流变液在储存过程中的沉降稳定性以及高屈服强度磁流变的制备等方面具有巨大的提升空间,但随着技术的不断进步和发展,学者们终将攻克这一难题。

#### 基金项目

河北省大中学生科技创新能力培育专项项目,铁酸盐基磁流变液的可控制备及其在智能控速器中的应用研究(编号:22E50122D);河北省大学生创新创业训练计划项目,智能磁流变液的制备及其在控速器中的应用研究(编号:S202210076006);河北工程大学大学生创新创业训练计划项目,智能磁流变液的制备及其在控速器中的应用研究(编号:X202210076043)。

#### 参考文献

- [1] 马良,肖萍,王任胜,修世超. 磁流变液中磁性颗粒成链与团聚的临界特征分析[J]. 东北大学学报, 2018, 39(3): 383-388.
- [2] 江泽琦,刘坪,方建华. 磁流变液的研究综述[J]. 合成润滑材料, 2018, 45(2): 27-30.
- [3] 陈维清,杜成斌,万发学. 表面活性剂与触变剂对磁流变液沉降稳定性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2010, 41(2): 55-57.
- [4] 熊皓,罗一平,王维成,王磊,姜彦文. 不同 HLB 值的表面活性剂对磁流变液沉降稳定性能的影响[J]. 功能材料, 2019, 50(12): 12126-12131.
- [5] 胡志德,晏华,王雪梅,杨健健. 触变剂对硅油基磁流变液摩擦磨损性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(5): 614-617.
- [6] 李凯权,代俊,常辉,黄钰,石庚辰. 磁流变材料的应用综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 6-14.
- [7] 朱绪力,孙慧敏,刘南南,卫洁. 不同体积分数磁流变液对其剪切特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 183-186.

- [8] 黄仕彪. 磁流变液发热机理综述及其影响因素[J]. 现代机械, 2021(2): 89-92.
- [9] 唐龙, 刘奇, 张平. 水基磁流变液的制备及其性能研究[J]. 功能材料, 2006(4): 543-545.
- [10] 朱石沙, 赵银, 曲丽娟. 新型磁流变减震器的设计及特性分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2011, 33(3): 106-109.
- [11] 胡国良, 吴礼繁. 磁流变制动器结构设计研究现状分析[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 1-8.
- [12] 戴斌, 姜平, 周根荣, 喻志刚, 高海洋. 磁流变抛光液的研制、表征及使用[J]. 粉末冶金技术, 2018, 36(5): 355-358.