

智能磁流变液的制备及应用研究进展

张博宇^{1*}, 李亚坤^{1*}, 司方方^{1#}, 祁雄威¹, 王光硕^{1,2,3#}

¹河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北工程大学, 河北省改性塑料技术创新中心, 河北 邯郸

³河北工程大学, 邯郸市新型无机非金属复合材料重点实验室, 河北 邯郸

收稿日期: 2022年10月20日; 录用日期: 2022年11月19日; 发布日期: 2022年11月28日

摘要

进入新世纪智能材料发展迅速, 其中智能材料领域研究最为活跃的当属磁流变液。它一般由磁性颗粒、基液、添加剂组成。当磁流变液外部存在磁场时, 其会呈现从低粘度的牛顿流体到高粘度的宾汉流体的转变。磁流变液具有转换耗能低、易于控制且响应迅速的特点, 被广泛应用于离合器、阻尼器和传感器等领域。本文详细介绍了磁流变液智能材料的制备、作用机理和应用领域等方面的研究进展。

关键词

磁流变液, 制备方法, 作用机理, 工程应用

Research Progress in Preparation and Application of Intelligent Magnetorheological Fluids

Boyu Zhang^{1*}, Yakun Li^{1*}, Fangfang Si^{1#}, Xiongwei Qi¹, Guangshuo Wang^{1,2,3#}

¹School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Technology Innovation Center of Modified Plastics of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

³Key Laboratory of New Inorganic Nonmetallic Composite of Handan, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Oct. 20th, 2022; accepted: Nov. 19th, 2022; published: Nov. 28th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张博宇, 李亚坤, 司方方, 祁雄威, 王光硕. 智能磁流变液的制备及应用研究进展[J]. 材料科学, 2022, 12(11): 1198-1203. DOI: 10.12677/ms.2022.1211133

Abstract

In the new century, intelligent materials have developed rapidly, among which magnetorheological fluid is the most active research field. It is generally composed of magnetic particles, base fluid and additives. When there is a magnetic field applied to the magnetorheological fluid, it will change from a low viscosity Newtonian fluid to a high viscosity Bingham fluid. Magnetorheological fluid is widely used in the clutch, damper, sensor and other fields because of its low energy consumption, easy control and rapid response. In this paper, the preparation, mechanism and application of magnetorheological fluid intelligent materials are introduced in detail.

Keywords

Magnetorheological Fluid, Preparation Method, Action Mechanism, Engineering Application

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. 引言

磁流变液自新世纪被发现以来就备受关注，并在各个领域大放光彩。其在正常状态下是黏度很小的流动性液体，一旦施加外部磁场会瞬间变成类似固体的状态，黏度比正常状态下增加至少两个数量级以上，并且此变化是连续可逆的[1]。进入九十年代后，随着科学技术水平的不断提高，磁流变液又一次焕发生机，在汽车减震、医疗、抛光等领域发挥着巨大作用，其凭借巨大的市场前景，经过不断的研究已成为智能材料的重要分支。

2. 磁流变液材料制备

目前磁流变液制备主要分两类：传统制备法与基载液置换法。

传统制备法即将成比例的磁性粒子、基液、添加剂通过机械搅拌混合制成。所以磁流变液一般由容易磁化的磁性颗粒作为分散相、性能良好的油作为连续相、添加剂来调节磁流变液系统的稳定性。基载液置换法是在去离子水或者乙醇中，将磁性颗粒和添加剂一齐放入进行改性，最后将改性完毕的磁性颗粒与添加剂，一并加入基液中[2]。

工程上磁流变液常用羰基铁粉作为磁性分散相，因为羰基铁粉材料除了具有较高的饱和磁化强度外，还具有制作成本低，原材料简单等特点。磁流变液的基液起承载磁性粒子作用，所以为使磁性粒子工作稳定，一般选取性能稳定的非磁性液体，如矿物油、硅油等。基液一般在没有磁场时具有较低黏度，大范围的温度稳定性，环保性等[3]。所以基液选取一般会参考基液的黏度、稳定、环保及经济等因素。添加剂的作用是用来缓解磁性粒子因为比重大易沉降，从而导致磁流变液稳定性变差致使工作产生误差。影响磁流变液沉降稳定性的因素主要来自两个方面：一是粒子之间互相吸引，集结成很大的结块。二是磁性粒子自身比重比较大，长时间放置后，由于重力的作用会自身沉降。但经过研究表明这两种因素都可以通过添加添加剂来解决。如表面活性剂，依靠其亲水性及亲油性可以来降低张力，从而缓解沉降。或者添加由石英制成的硅胶来做稳定剂。因为该物质具有很大的表面积，可以吸附磁性粒子使其可以依靠此类物质做支撑分散在载液中。目前关于磁流变液沉降稳定性的报道及研究很多，比如我国高校研制的 KDC-1 磁流变液其沉降稳定性及其他各方面性能均已达到世界一流水平。

因此磁流变液性能直接取决于其所制备的材料。同时合格的磁流变液产品应具有良好的磁饱和性, 以确保磁场通过时, 每个磁性颗粒都能获取尽可能多的能量; 应具有良好的磁化和退磁特性, 确保在添加磁场后产生磁流变效应及撤去磁场后失去磁流变效应这一过程是可逆且迅速的。同时也应具有较小的能量损耗及高度磁化和稳定性能等[4] [5]。

3. 磁流变液材料作用机理

在磁流变液外部加一磁场, 其内部磁性颗粒会因为电磁力的作用互相吸引排列成柱状, 形成类似固体的物质, 当撤去磁场后, 其内部分子又会重新排列, 恢复原状。研究人员将该现象成为磁流变效应。目前, 关于磁流变液材料作用机理主要是围绕着磁流变机理展开, 但发展到目前最有说服力的是场致偶极矩理论[6]。

磁流变效应是由于磁流变液中磁性粒子被外加磁场所磁化导致。在没有磁场的情况下, 磁流变液黏度很低, 具有流动性。一旦施加外部磁场, 磁性粒子就会被感应磁化, 磁性粒子沿着磁感线排列并且互相吸引。由于磁性粒子都有吸附能力, 所以会互相吸附周围排列着的磁性粒子, 使其聚集, 因此在宏观上就表现出粘性特征, 因此会存在一个剪切屈服应力。而场致偶极矩理论就是在上述现象中总结出来即磁流变液的液态到固态再到液态的转换, 不存在磁场时, 磁性粒子均匀的分散在黏度很低的基液中, 此时可看作牛顿流体。当在外界施加一定强度的磁场时, 磁性粒子由于感应磁偶极与偶极的相互作用, 分散的磁性粒子会沿着磁场快速聚集成链状结构。因此可以人为的施加电场去控制磁场来使磁流变液发生上述的转变并且这种转变是可逆的[7]。这也可能就是为什么在新世纪会对磁流变液的研究更为深入, 应用更为广泛的原因。对于磁流变液来说, 负责可调控磁流变特性的机制也是相同的。外加磁场使悬浮着的磁性粒子产生偶极矩, 磁性粒子与磁性粒子的偶极矩之间相互作用的强度克服热能时, 磁性粒子彼此之间就会粘连在一起, 沿着磁场线串联成链状结构, 当进一步增加外界磁场强度时, 链与链之间聚集成柱, 因此表现出粘性特征, 所以磁流变液流体流体力学的变化可以归因与施加外部磁场时磁流体内部结构的变化。因为流变学和结构有关, 所以在磁流变液领域, 磁性粒子的场致偶极理论被广泛接受。图 1 是表示在没有外加磁场时磁性粒子的状态与施加外部磁场时磁性粒子开始转变成链状结构的变化示意图。

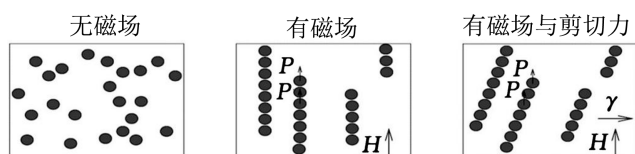


Figure 1. Schematic diagram of magnetorheological mechanism
图 1. 磁流变机理示意图

磁流变液是磁性粒子与磁性绝缘的基液(如硅油)的混合物并且可以在有外部磁场的条件下做出独特的响应。在外加磁场时, 悬浮着的磁性粒子沿着磁场的方向聚集并不断形成柱链。由于这些磁性粒子具有很强的聚集结构所以磁流变液流体的黏度会在几毫秒内增加几个数量级。当外部磁场撤去时, 磁流变液的流体特征会发生转变并恢复如初。正是这种极具特色的转变, 可以使得通过控制磁场去控制磁流变液的流变特征。甚至可以通过通入交流电的线圈去控制磁场进而控制磁流变液的流变特征。这种特性使得磁流变液被广泛应用在汽车减震、建筑物缓震等装置。但是目前还没有一个统一的理论去解释磁流变液上述现象的原理, 只有从微观机制角度出发的场致偶极理论是目前被广泛接受可以解释上述现象的理论[8]。

4. 磁流变液材料应用

磁流变液是进入新世纪的一种新兴材料, 其在外加磁场的条件下可以得到连续控制, 磁流体响应迅

速甚至可以达到毫秒级水平，具有优秀的剪切屈服应力并且适用的温度范围大，可以应用在任何条件艰苦的地方。正是由于这些优异的性能使磁流体材料在工程上被不断开发与应用[9] [10]。

4.1. 磁流变液阻尼器

由于一些机械在工作时会发生震动，从而影响整个机械的精确度和稳定性。因此工业上常使用阻尼器来解决这种现象。磁流变液阻尼器是一种利用磁流变液的磁流变效应而产生剪切应力的特性来实现缓冲减震的效果的机器。利用励磁线圈来建立电厂与磁场的联系。即在励磁线圈的作用下，可以通过调节外加电源来调控阻尼器的磁场大小，进而控制阻尼器中磁流变液的磁流变效应的大小，使磁流变液在宏观上表现出粘性，对机械产生阻尼力。同样如果将外界震动的控制中心与电源相联系就可以根据机械的需要，自动去调控使其产生不同的阻尼力，来实现精准的减震效果。正是由于其结构简单，操控方便等优点被广泛应用于防震、汽车减震等缓冲减震工程中[11] [12]。具体原理如下图 2 所示。

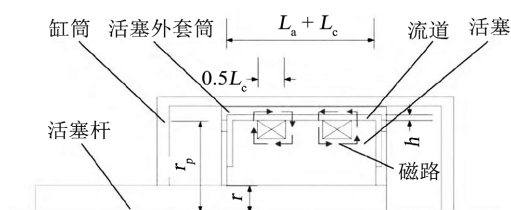
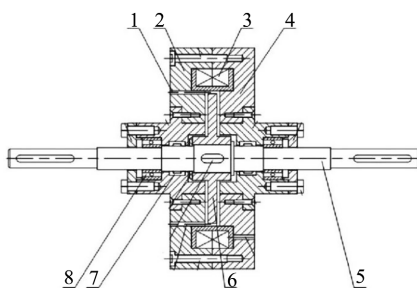


Figure 2. Schematic structure diagram of magnetorheological fluid damper
图 2. 磁流变液阻尼器结构图

4.2. 磁流变液制动器

对于工程上用的制动器一般是靠传统的摩擦来实现。但这个过程会产生大量的热，甚至会使零件之间相互磨损老化。因此研究人员利用磁流变效应将磁流变液应用在制动器方面。磁流变液制动器是利用在外加磁场的作用下，磁性颗粒会因此聚集成柱状结构，因此该柱状结构会存在一个剪切应力，通过该剪切应力实现制动。具体结构如下图 3 所示。磁流变液会充满整个制动机械内部，同样通过外加电源，以线圈作为连接磁场与电厂的媒介，从而在机械内部产生磁场。磁流变液会发生磁流变效应，磁流变液黏度会在短时间内增加，形成类似牙膏状的流体。从而产生一定的剪切屈服应力，因此该剪切屈服应力也就代表了阻尼力的大小。该阻尼力随外加带能源的电流变化，电流越大，磁场强度就越大，该制动器产生的阻尼力也就越大[13]。当不通过电流即制动器内部不存在磁场时，磁流变液会像水一样流动，黏度很小，不存在阻尼力。正是由于此类制动器工作稳定，操作简便，缓解了通过摩擦制动的方式给机械带来的损伤，被广泛应用于各种工程制动方面。



1-液体注入孔；2-左壳体；3-电磁线圈；4-右壳体；5-主轴；6-转盘；7-密封圈；8-深沟球轴承

Figure 3. Schematic structure diagram of magnetorheological fluid braker
图 3. 磁流变液制动器结构图

4.3. 磁流变液抛光机

磁流变液在高精密仪器中也被广泛应用例如抛光机。通常现代抛光机是基于磁流变液在高强度的磁场中具有强磁性效应而设计。磁流变液在没有磁场的作用下黏度很小。但当施加外部磁场后磁流变液会在短时间内实现从液态到半固态之间的转变。可以更好的实现与打磨工件无死角的接触，从而在人为的控制下实现精密打磨。并且应用于抛光机中磁流变液的基液一般都为水溶性，而不是油溶性基液[14]。因为水基磁流变液在抛光后，可以直接清洗，而油基磁流变液不方便清洗。并且考虑到水和油的价格因素，往往会选择具有经济，使工件容易回收的水基磁流变液。磁流变液抛光机由于精度高，可控性强，效率高等因素被广泛应用于精密仪器的抛光，如图4所示[15]。

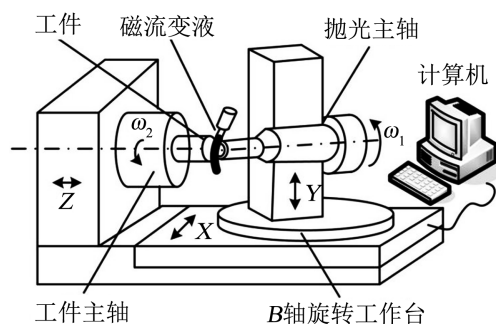


Figure 4. Schematic diagram of magnetorheological polishing machine
图4. 磁流变液抛光机示意图

4.4. 磁流变液离合器

离合器与元件被整合在一个阳极装置上，在使用过程中离合器与其他零部件难免会发生碰撞，碰撞产生的冲击会对装置产生磨损、损伤，长时间的碰撞甚至会损坏机械。而磁流变液在零场状态下黏度小，在施加磁场后，在未达到屈服强度前，会呈现出固体的特征，所以可以根据磁流变液的这一特征来为机械作力与扭矩的传递，缓解机械碰撞。由于磁流变液离合器结构简单、可靠性强、磨损小等特点因而被广泛应用[16] [17]。

5. 结语

磁流变液凭借独特的响应机制和流变效应被广泛关注，但目前磁流变液的理论研究还有待进一步深入，尤其是在实际工程领域的应用还需要更多的实践尝试。磁流变液的应用市场发展潜力巨大，但仍存在磁流体长时间工作导致的磁性粒子沉降等问题，未来可以从磁流变液三要素的微观角度出发，选取合适的制备工艺、制备原料等来逐步提高磁流变液的综合性能。

参考文献

- [1] 侯中福. 新型磁流变液制备与其流变性能分析[J]. 大众标准化, 2020(16): 87-88.
- [2] Ashtiani, M., Hashemabadi, S.H. and Ghaffari, A. (2015) A Review on the Magnetorheological Fluid Preparation and Stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **374**, 716-730.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.020>
- [3] Rabbani, Y., Ashtiani, M. and Hashemabadi, S.H. (2015) An Experimental Study on the Effects of Temperature and Magnetic Field Strength on the Magnetorheological Fluid Stability and MR Effect. *Soft Matter*, **11**, 4453-4460.
<https://doi.org/10.1039/C5SM00625B>
- [4] 侯中福. 一种低密度高稳定性磁流变液制备与性能分析[J]. 科技创新与应用, 2020(27): 51-52.

-
- [5] Rajalakshmi, R., Remya, K.P., Viswanathan, C. and Ponpandian, N. (2021) Enhanced Electrochemical Activities of Morphologically Tuned MnFe_2O_4 Nanoneedles and Nanoparticles Integrated on Reduced Graphene Oxide for Highly Efficient Supercapacitor Electrodes. *Nanoscale Advances*, **3**, 2887-2901. <https://doi.org/10.1039/D1NA00144B>
- [6] 李海涛, 彭向和, 何国田. 磁流变液机理及行为描述的理论研究现状[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 121-124.
- [7] 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.
- [8] Qiao, X.Y., Bai, M.W., Tao, K., *et al.* (2009) Magnetorheological Behavior of Polyethylene Glycol-Coated Fe_3O_4 Ferrofluids. *Journal of the Society of Rheology*, **10**, 23-31. <https://doi.org/10.1678/rheology.38.23>
- [9] 张燕丽. 磁流变材料的研究与应用进展[J]. 化学工程与装备, 2017(10): 192-194.
- [10] 史宇. 浅谈智能材料-磁流变液在智能制造中的应用[J]. 科学技术创新, 2022(22): 17-20.
- [11] 李耀光. 基于压电分流阻尼的车内噪声控制研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [12] 张新刚. 磁流变阻尼器在结构振动控制中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [13] 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.
- [14] Shilan, S.T., Mazlan, S.A., Ido, Y., *et al.* (2016) A Comparison of Field-Dependent Rheological Properties between Spherical and Plate-Like Carbonyl Iron Particles-Based Magneto-Rheological Fluids. *Smart Materials and Structures*, **25**, Article ID: 095025. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/9/095025>
- [15] 马宗桥. 面向半导体晶圆超精密抛光的磁流变抛光液制备及其特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [16] 王书友, 肖鹿, 陈飞, 孟德远, 田祖织, 李艾民, 吴向凡. 磁流变离合器非线性迟滞特性试验与建模[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2049-2059.
- [17] 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, 12136.