

磁流变体在机械工程中的应用综述*

OVERVIEW ON APPLICATION OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS IN MECHANICAL ENGINEERING

李鸽鸽** 刘保国*** 董亚军

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

LI GeGe LIU BaoGuo DONG YaJun

(School of Mechanical and Electronical Engineering, Henan University of Technology,
Zhengzhou 450001, China)

摘要 简单回顾了磁流变体的发展历史,对磁流变液和磁流变弹性体在国内外的研究进行了综述;对磁流变液和磁流变弹性体的工作原理做比较,介绍了磁流变液在振动控制、传动装置等方面的应用,以及磁流变弹性体在减震和智能器件等方面的应用;分析了磁流变体在研究应用方面存在的问题,并对其发展趋势进行了展望。

关键词 磁流变液 磁流变弹性体 磁场 变刚度 阻尼

中图分类号 TH133 TH133.4 TH137

Abstract This paper gives a brief review of the development of magnetorheological fluids, and summarizes the researches works on magnetorheological fluids and magnetorheological elastomers both at home and abroad; The working principle of magnetorheological fluids is compared with that of magnetorheological elastomers, then it is introduced that the application of magnetorheological fluids in the vibration control and the transmission device etc, as well as the application of magnetorheological elastomers in the damping and the intelligent devices etc; The problems existed in the applications and researches of magnetorheological fluids are analyzed, and the development trend in the aspect is prospected.

Key words Magnetorheological fluids; Magnetorheological elastomers; Magnetic field; Variable stiffness; Damping

Corresponding author: LIU BaoGuo, E-mail: bgliu1978@ sina. com, Fax: +86-371-67758626.

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11172092、10872064), and Science and Technology Leading Talent Project of Zhengzhou City (10LJRC187).

Manuscript received 20140612, in revised form 20140628

引言

磁流变材料是一种新型智能材料,其流变性能可由外加磁场进行控制。由于其可逆性好、磁场响应速度快、以及可通过调节外加磁场强度的大小来控制其刚度、阻尼等连续变化的特性,因而近年来在机械工程方面得到了广泛应用。目前,磁流变材料主要包括:磁流变液、磁流变弹性体、磁流变泡沫等,其中最具有代表性的是磁流变液和磁流变弹性体。磁流变液是一种特殊的悬浮体,其在零磁场条件下一般会呈现出低粘度的牛顿流体特性;在强磁场作用下一般呈现出低流动性和高粘度的 Bingham 体特性;而磁流变弹性体是由铁磁性颗粒和高分子橡胶类材料等混合组成,混合物在磁场下固化成型,呈现链状

或柱状结构。磁流变液是利用外加磁场对材料的屈服强度进行控制,和实现智能化控制,它主要工作在磁流变液的屈服阶段后期;而磁流变弹性体是利用外加磁场对材料的弹性模量进行控制,和实现智能化控制,它主要工作在磁流变液屈服阶段前期。磁流变液和磁流变弹性体的组成、工作原理等都不同,因此在工程应用方面也有所不同。

1 磁流变体的研究发展历史

磁流变体是一种新型智能材料,具有很广的工程应用价值和发展前途。磁流变液智能材料于 1948 年被美国人 Jacob Rabinow 发现^[1]。由于磁流变液在最初应用过程中遇到了一些难题,如稠化、沉降和磨损等等,导致许多研究机构都将注意力集中在了电流变液

* 20140612 收到初稿, 20140628 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (11172092、10872064); 郑州市科技领军人才工程项目 (10LJRC187) 资助。

** 李鸽鸽, 男, 1987 年 10 月生, 河南灵宝人, 汉族, 河南工业大学硕士研究生, 研究方向为机械振动。

*** 刘保国 (通信作者), 男, 1962 年 06 月生, 河南武陟人, 汉族。河南工业大学, 教授, 博士。研究方向为机械振动和转子动力学。

的发展上。因此,从二十世纪五十年代到八十年代,磁流变液(MRF)的研究一直被搁置。二十世纪八十年代末期,电流变液的剪切屈服强度过小和电压过高等技术难题一直没有得到解决。进入九十年代,随着计算机水平的不断提高和科技的快速发展,磁流变液(MRF)的研究才重新开始引起人们的重视。

近年来,人们对磁流变液进行了大量的研究工作。如:美国匹兹堡大学研究了不同浓度和微粒大小磁流变液的流变特性,和美国 J. M. Ginder 和 L. C. Davis 等用有限元分析了磁流变液屈服应力^[2-3]。德国 BASF AG 对颗粒的直径和表面层等作了一些适当的修饰改进后,成功的研制了一种纳米级磁流变液^[4],其性能十分稳定。白俄罗斯的 Kordonski W 和其他人取得了较大的实质性研究进展,主要在磁流变液的抛光和磁流变液的密封等特性方面^[5]。法国某大学研究了磁流变液的机理,主要是针对磁流变液的微观结构分析等方面作了大量研究工作^[6]。我国在磁流变材料方面的研究起步较晚,我国重庆大学的司鹄、彭向和等对磁流变液的流变特性作了研究^[7]。我国的李金海、关新春等人研究了磁流变液的制备和磁流变结构和模型^[8];和唐新鲁研究和分析了磁流变液机理的若干问题^[9]。

磁流变液是将固体颗粒分散溶于载液中形成的非胶体悬浮液。铁、钴、镍等软磁材料是在磁流变液中使用最多的固体颗粒。由于磁流变液颗粒沉降的问题,它的发展受到一定程度限制。为了解决磁流变液易沉降问题,人们在磁流变液中添加一定的稳定剂,如用高分子橡胶来取代磁流变液里的油基,得到了磁流变弹性体。由于磁流变弹性体兼有磁流变液和弹性体的优点,并且具有比磁流变液材料更为稳定的特性,工程应用中不需要密封等优点,所以得到了迅速的发展。如:1996 年日本人使用硅橡胶与铁粉混合制备了磁流变弹性体,并对磁流变弹性体的力学性能进行了测试^[10]。同年,美国 Lord 公司 Jolly M R 等全面研究了以铁粉和硅橡胶为基础的磁流变弹性体^[11]。1997 年以来,美国福特汽车公司 Ginder J M 等对磁流变弹性体的力学模型做了许多有突出贡献的研究工作^[12]。2001 年法国的 Bossis G 对磁流变弹性体的电学和磁学等物理性质进行了初步的观测^[13]。我国在磁流变材料方面的研究起步较晚,2002 年中国科学技术大学王桦等实验研究了磁流变弹性体的剪切性能^[14],方生等建立了一套磁流变弹性体测试系统及其性能进行了研究测试^[15],2005 年张先舟等对磁流变弹性体机理进行了研究^[16],随后磁流变弹性体在工程上的应用也得到发展。

2 磁流变液在机械工程中的应用

磁流变液(MRF)是一种特殊的新型智能材料,其磁流变性能对外部磁场会发生急剧变化。它在外加磁场为零的作用下会呈现出牛顿流体特性,而在强磁场作用下,具有一定的表观粘度和它可以在很短的时间内快速上升,并且具有一定的机械力学性质和类似固体性质,粘度的变化是连续的和可逆的。上述特点使得磁流变液器件在机械工程方面得到广泛应用。

根据流体动力学原理和按照磁流变液工作机理,可以将以磁流变液为基础的磁流变液器件划分为三种不同的工作模式^[17],如剪切模式、挤压模式和流动模式。如图 1 所示。

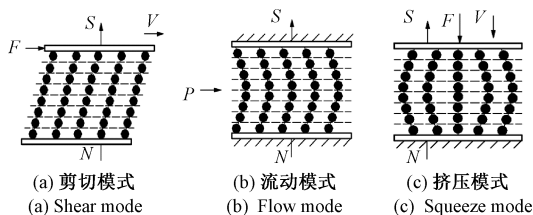


图 1 磁流变液工作模式

Fig. 1 Modes of operation for MR fluid

如图 1a 所示,为剪切模式。这种模式是上下两个极板间充满磁流变液,两极板与外加磁场相互垂直,在外加磁场作用下,两极板间的液体相互运动,产生剪切变形。这种模型适用于离合器、变速器、联轴器、制动器等磁流变器件。如图 1b 所示,为流动模式。这种模式是将上下两个极板固定,外加垂直的磁场,使磁流变液粘性发生变化,导致磁流变液在外加压力差的作用下相互流动。该工作模式下的成熟产品主要应用于阻尼器、振动吸收器和驱动器等磁流变液器件。如图 1c 所示,为挤压模式。这种模式是在两极板上增加平行于两个极板之间运动方向的磁场,使磁流变液在两极板间做拉伸和压缩的交替运动。这种工作模式下的成熟产品主要可以用于隔振器和振动阻尼器等磁流变液器件。

2.1 磁流变液应用于振动控制

磁流变液具有一定的力学特性,当外加磁场强度发生变化时其力学特性也会相应变化,并且具有响应速度快、调节范围广、控制精度高、结构简单、阻尼力大等特点。因此,很多学者将开发的磁流变器件广泛用于各种振动控制系统中。在流动模式下最常用的为磁流变液阻尼器。磁流变液阻尼器可以通过外加磁场强度大小,让阻尼器两端的压差发生变化,使其产生强度的阻尼力来实现减震功能。

美国的 Pinkos 等设计了一种性能远高于传统减振器的转盘式磁流变主动悬架系统^[18], 这种悬架系统对汽车的安全性、质量性、舒适性等都起一定作用, 并完成了汽车半主动悬架控制试验。德国研究人员利用磁流变液的特性设计了一种磁流变阻尼器, 它具有比普通磁流变阻尼器更长的行程^[19]。我国欧进萍和关新春等已经制作出一类非常全面的磁流变液阻尼器, 它具有各种尺寸、形状和类型^[20], 并已经将其应用于控制黄河大桥斜拉索的振动; 武汉理工大学的瞿伟廉等通过研究磁流变液的最大屈服剪应力、磁滞响应时间、抗沉降稳定性等特性, 研制出了一种 500kN 大吨位磁流变液阻尼器, 已经成功应用在长江三峡升船机工程中^[21]。南京理工大学的李赵春、朱超和王昊等^[22]设计了一种火炮式磁流变阻尼器, 并将其应用到了武器后坐系统中, 用来减小系统的冲击, 如图 2 所示。

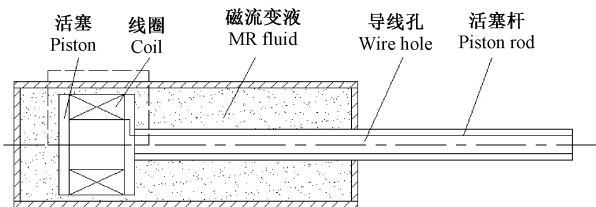


图2 单级活塞结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single stage piston

Andrew, N. 等^[23]研制了一种可以调节阻尼的动力吸振器。中科院光电研究院的陈进新和王宇等设计了一种小阻尼力领域的新型磁流变液阻尼器^[24], 可应用于地面小型机械结构或空间微重力环境下减振系统等场合。哈尔滨工业大学的杨涛和赵杰等设计了一种小型旋转式磁流变阻尼^[25], 解决了目前已有的研究成果侧重于输出大阻尼力的直线式运动的大型磁流变阻尼器的问题。

2.2 磁流变液应用于传动装置

磁流变液因其特殊的性能, 可用在机械部件间传递力或力矩的场合。在这类器件中, 最常用的磁流变液器件为磁流变液离合器和磁流变液联轴器等。磁流变液离合器主要用于辅助可控动力的传递, 磁流变液联轴器主要用于可控动力的传递。

美国通用汽车公司研究了磁流变液制备方法, 并研制了磁流变液离合器^[26]。马里兰大学等主要研究了圆柱式的磁流变离合器^[27]。我国的黄金等通过对磁流变结构设计的理论分析和研究, 设计了一种圆柱式磁流变液离合器, 并且给出了磁流变液离合器的强度校核方法^[28]; 我国的孟维佳等对双平板磁流变离合器进行了设计研究^[29~30]。北京化工大学的王维民为了对多转子藕联系统进行稳定性控制, 消除各个转子

振动叠加造成的强烈振动, 设计了一种能够随机变刚度变阻尼的波纹管联轴器^[31]。武汉科技大学的李名杰和李友荣等设计了一种筒式磁流变液联轴器^[32]。武汉科技大学的雷阳和李友荣等设计了一种以永磁铁为磁源的圆筒式磁流变液极限转矩联轴器^[33]。其主要利用磁流变液的剪切工作模式进行转矩的传递, 如图 3 所示。

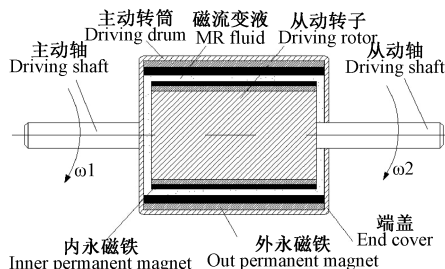


图3 磁流变液联轴器(MRC)的结构简图

Fig. 3 Magnetorheological fluid coupling (MRC) structure diagram

美国 Lord 公司利用磁流变液制动器一般工作在剪切模式下, 制造了一种可控回转阻力旋转式制动器^[34], 其具有结构紧凑、功耗较低、运行平稳等特点, 已用于台阶攀登式健身机。

2.3 磁流变液应用于其它方面

Kordonsky W I 等利用磁流变液的粘度随外加磁场的变化而变化, 研究了一种通过磁流变液为密封介质对旋转轴进行密封的技术^[35]。它主要是利用磁流变液的粘度随磁场变化来调整和控制密封间隙, 实现密封效果。

Tang X 等利用磁流变液的相变随外加磁场的变化而迅速变化, 具有较大的屈服强度等特点, 设计了一种可以用来制造各种形状不规则和小型的零部件的磁流变液柔性夹具^[36]。该磁流变液柔性夹具具有较高的加工精度, 节省时间, 解决了制造业的一个弊端。

3 磁流变弹性体在机械工程中的应用

磁流变弹性体是一种新型的智能材料, 其弹性模量在外加磁场作用下会发生迅速的变化。磁流变弹性体既有磁流变液和弹性体的优点, 又具有比磁流变液材料更加稳定的特性。磁流变弹性体不仅具有可控的随磁场变化的力学特性, 而且还具有随磁场变化的电阻、随磁场变化的伸缩性能和随磁场变化的光学性能等特点。由上述特点可以看出, 磁流变弹性体具有巨大的应用前途。因此磁流变弹性体在工程机械中得到广泛应用。

由于磁流变弹性体属于固体材料, 和磁流变液是半固体状态, 并且具有一定的粘度。所以磁流变弹性体和磁流变液在工作模式上存在一定程度的不同。磁

流变弹性体的工作模式主要有剪切模式和拉-压模式两种情况。如图4所示,为磁流变弹性体的工作模式图。在两极板之间固化和粘贴一定的磁流变弹性体,当两极板间受到外界磁场作用时,其所受作用力与磁场方向垂直,并且磁流变弹性体受到剪切作用,如图4a。在两极板之间固化和粘贴一定的磁流变弹性体,当移动两极板间受到的作用力与磁场方向一致时,磁流变弹性体受拉-压作用,如图4b。

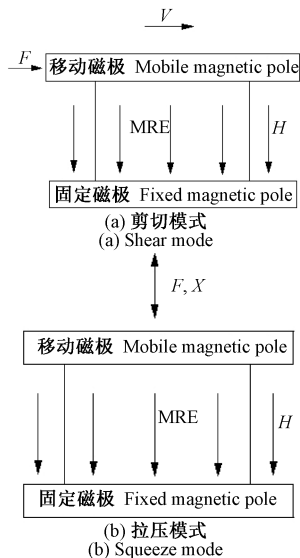


图4 磁流变弹性体的工作模式

Fig. 4 Modes of operation for MR elastomer

3.1 磁流变弹性体在减振方面的应用

由于磁流变弹性体具有弹性模量和剪切模量等力学性能,并且它们可以随着外加磁场强度 E 的变化而变化,所以磁流变弹性体可以应用到减振方面的器件中,并且国内外学者都对其进行了一定的研究。

美国 Ford 公司等利用磁流变弹性体的刚度和阻尼随外加磁场强度可以调节这一特性,设计了一种基于磁流变弹性体的汽车轴衬套^[37]。它通过调节外加线圈中电流的大小来调节刚度的变化,以此来实现汽车对复杂路况的调整,实现和提高乘车人的舒适度。同时,美国福特汽车公司还申请了基于磁流变弹性体的汽车悬架套筒专利^[38]。通过外加磁场线圈内电流的大小变化,来调节套筒刚度的大小。使其套筒具有刚度和阻尼可调可控的性能,使其能够控制车辆轮臂与汽车之间的连接。如图5所示。

宁波大学邓益民教授利用磁流变弹性体这种材料的特殊性能,通过对其仿真分析及其性能特点,设计一种汽车悬架减震系统,其在汽车的减震方面具有良好的调节功能^[39]。

Zhang N 等利用磁流变弹性体在外加磁场作用下弹性模量的变化,设计了一种自适应调谐吸振器,可以

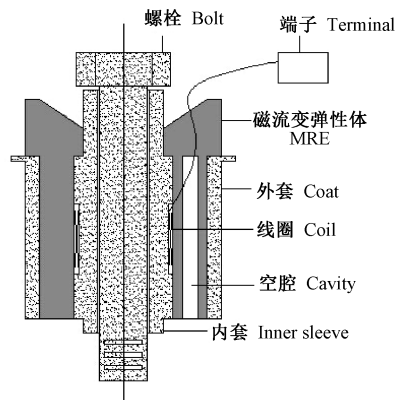


图5 磁流变弹性体汽车套筒

Fig. 5 MR elastomer automobile sleeve

用来抑制发动机的振动^[40]。龚兴龙和邓华夏等以磁流变弹性体为核心件,利用磁流变弹性体的剪切模量可由外加励磁电流控制,设计和制作一种自适应移频式吸振器^[41],并且还申请了一个可变刚度和阻尼的吸振器专利^[42],在他们的专利中,吸振器的变刚度和阻尼是通过力学性能参数可变的磁流变弹性体来实现的。

徐振邦等利用磁流变弹性体的磁致模量可以由外加磁场进行控制,并且状态可以迅速切换等特点,研制出了一种主动自调谐吸振器,通过在结构梁平台和振动控制台上测试吸振器的减振性能,使其减振效果明显提高^[43]。如图6所示。

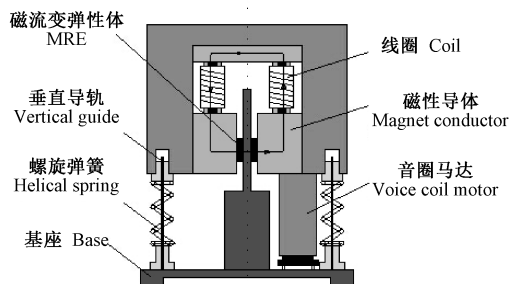


图6 自调谐式吸振器

Fig. 6 Adaptive tuned vibration absorber

华南理工大学的王世旺等设计制作了剪切式磁流变弹性体阻尼器^[44],将其应用到了转子系统振动的控制系统中,并且研究了磁流变弹性体的剪切模量在转子振动性能方面的影响。佛山大学的汪建晓等研究和制作了一种自定心挤压式磁流变弹性体阻尼器^[45],并将其应用在柔性转子系统,测试了在该阻尼器的作用下柔性转子系统的不平衡响应特性。武汉理工大学吴平、涂建维等研制了一种磁流变弹性体阻尼器^[46]。该磁流变弹性体阻尼器是用磁流变弹性体替换普通叠层橡胶支座中的橡胶材料,再加入电磁线圈,便组成了一个具有完整磁路的隔震支座,不但具有普通叠层橡胶

支座功能,还具有剪切刚度可调性,从而达到最佳隔振效果。

重庆大学的余森和毛林章等利用磁流变弹性体随外界磁场强度的变化而变化的特性,开发了一种可变刚度的主动缓冲器^[47-48],并采用仿人智能式方法对其磁流变隔振缓冲器进行控制,使登月机器人着陆缓冲过程中加速度的最大峰值得到有效地抑制。胡宗成利用磁流变弹性体处于剪切压缩状态设计了一种舰用新型的磁流变弹性体隔振器^[49]。

湖南工程学院的魏克湘设计了一种挤压式磁流变弹性体隔振器^[50]。该磁流变弹性体处于上下两个导磁体之间。通过控制励磁线圈电流的大小即可使磁流变弹性体的刚度和阻尼得到变化,从而改变隔振器的频率,实现对外界激励的跟踪。宁波大学的邓益民教授对磁流变弹性体变刚度隔振系统及其减振性能进行了研究。通过改变电磁励磁线圈的电流大小来调整磁流变弹性体的弹性模量,以此来调节隔振系统的刚度变化,使力和力矩的传递能够在系统中较宽的频率范围内得到控制和降低^[51]。该磁流变弹性体变刚度隔震系统具有单层和多层等结构,如图 7 所示。

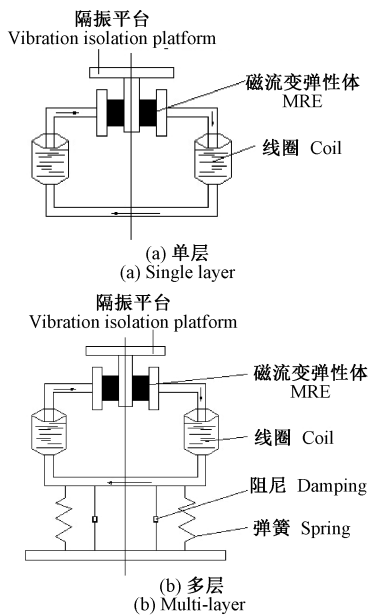


图 7 磁流变弹性体隔振器结构示意图
Fig. 7 MR elastomer vibration isolator structure schematic diagram

3.2 磁流变弹性体在智能器件方面的应用

磁流变弹性体在外加磁场作用下,其具有一定的伸缩效应。波兰人通过实验研究得出:外加磁场作用下磁流变弹性体的磁致伸缩效应显著和响应迅速。通过研究分析了磁流变伸缩效应,利用其特殊性能制作了一种主动控制制动器^[52]。

磁流变弹性体在外加磁场作用下,磁流变弹性体

的电阻值对压力变化有着敏感的反应。宁波大学的叶伟强等利用该特性研制了一种磁流变弹性体可以测试压阻特性的实验装置^[53]。和由于磁流变弹性体的电阻对磁场和压力的变化也都非常的敏感,因而可用于制造一些关于磁场和应变的磁流变弹性体传感器。

3.3 磁流变弹性体在其它方面的应用

磁流变弹性体还可以应用在降噪上, Farshad 等^[54]利用磁流变弹性体可以通过外加磁场的激励,使其产生的振动可以抵消噪声源产生的振动,设计了一款基于磁流变弹性体的智能隔音窗,可以进行噪声控制。

International Paper 公司的 Anderson 等发明了一款磁流变弹性体造纸机,该造纸机是用磁流变弹性体作为滚筒,利用磁流变弹性体的刚度可以随着外加磁场的变化而调节,来调节滚筒的表面情况,减少了在现实生产中因为用力不均匀和不平衡而导致的纸张表面不平等问题^[55]。

4 存在问题和的发展趋势展望

目前,传统的磁流变液还存在一些问题,如:研制的磁流变液温度稳定性和沉淀稳定性还不能令人十分满意;磁流变液的机理研究、磁流变液力学性能的测试方法等还需要进一步研究,等等。因此,从微观层面研究磁流变液介质相互作用的机理,研究磁流变液流变学性能与磁场、温度、环境的关系,是磁流变液在工程中得到更广泛应用的基础;研制低成本的磁流变液、开发更多的基于磁流变液的元器件,是磁流变技术在工程中得到更广泛应用的关键。

在磁流变弹性体的研究应用方面也存在一些问题,如:可控动态范围还比较小,综合机械性能无法达到工程实用指标,现有的理论模型无法精确的描述磁流变弹性体的力学性能,并且目前还没有完全统一的磁流变弹性体性能测试标准。所以,制作出综合机械性能和可控动态性能等方面优良的磁流变弹性体,建立准确的力学性能模型,是影响磁流变弹性体在精密电子设备的隔振平台、飞机起落架减振系统、各种旋转机械的基座、武器反后坐系统等领域中应用的难题。

综上所述,磁流变体及其应用研究还处于起步阶段。本文通过对磁流变体在机械工程中发展概况的论述,分析比较了磁流变液和磁流变弹性体的异同和在机械工程中的应用,有助于对磁流变器件进行进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] Rabinow J. The magnetic fluid clutch [J]. AIEE Transaction,

- 1948,67:1308-1315.
- [2] Mezzasalma S A, Koper G J M. Semiclassical approach to electrorheological fluids. Influence of solid volume fraction on the suspension yield stress[J]. *Colloid Polym Sci*, 2002, 280: 160-166.
 - [3] Ginder J M, Davis L C, Elie L D. Rheology of magnetorheological fluids: models and measurements[A]. 5th Int Conf on ER fluids and MR Suspensions[C]. Singapore: World Scientific, 1995. 504-514.
 - [4] Kormann C, Laun H M, Richter H J. MR suspensions and associated technology[A]. Bullogh W A. Proc of the 5th Int Conf on ER Fluids[C]. Singapore: World Scientific, 1996. 362-367.
 - [5] Kordonsky W I, Demchuk S A. Bullogh W A. Proc of the 5th Int Conf on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology[C]. Singapore: World Scientific, 1996. 613-619.
 - [6] Cutillas S, Bossis G, Cebers A. Rheological properties of MR fluids[J]. *Phys Rev E*, 1998, 57(1): 804-811.
 - [7] 司 鹄, 彭向和. 磁流变材料的流变性能研究[J]. *材料科学与工程*, 2002, 20(1): 61-63.
SI Hu, PENG XiangHe. Study on the rheological properties of magnetorheological materials[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2002, 20(1): 61-63 (In Chinese).
 - [8] 关新春, 欧进萍. 磁流变液的配制及其流变模型的研究[J]. *功能材料*, 2004(35): 577-581.
GUAN XinChun, OU JinPing. Magnetorheological fluid preparation and rheological model[J]. *Journal of Functional Materials*. 2004(35): 577-581 (In Chinese).
 - [9] 唐新鲁. 有关电流变液、磁流变液机理若干问题的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1996: 86-102.
TANG XinLu. Research on electrorheological fluids and magnetorheological fluid mechanics problems[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1996: 86-102 (In Chinese).
 - [10] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1995, 58: 787-792.
 - [11] Jolly M R, Carlson J D, Munoz B C, et al. [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 7: 613-622.
 - [12] Ginder J M, Clark S M, Schlotter W F. [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2002, 16: 2412-2418.
 - [13] Bossis G, Abbo C. Electro active and Electrostructured Elastomers. *International Journal of Modern Physics B*, 2001, 15(6&7): 564-573.
 - [14] 王 桦, 周刚毅, 方 生, 等. 磁流变弹性体剪切性能的动态实验研究[J]. *实验力学*, 2004, 19(01): 01-05.
WANG Ye, ZHOU GangYi, FANG Sheng et al. Experimental study on dynamic shear properties of Magnetorheological Elastomers[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(01): 01-05 (In Chinese).
 - [15] 方 生, 龚兴龙, 张先舟等. 磁流变弹性体力学性能的测试与分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2004, 34(04): 456-463.
FANG Sheng, GONG XingLong, ZHANG XianZhou et al. Test and analysis of performance of magnetorheological elastomer[J]. *University of Science and Technology of China*. 2004, 34(04): 456-463 (In Chinese).
 - [16] 张先舟. 磁流变弹性体的研制及其机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005: 39-88.
ZHANG XianZhou. Study on Preparation and mechanism of magnetorheological elastomer[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005: 39-88 (In Chinese).
 - [17] 汪建晓, 孟 光. 磁流变液装置及其在机械工程中的应用[J]. *机械强度*. 2001, 23(1): 50-56.
WANG JianXiao, MENG Guang. Magnetorheological fluid devices and applications on mechanical engineering [J]. *Journal of Mechanical Strength*. 2001, 23(1): 50-56 (In Chinese).
 - [18] Lou, Z. Ervin, R. D., Filisko, F. E., A Preliminary Parametric Study Of Electrorheological Damper, *Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol. 116, 1994: 570-577.
 - [19] Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender and J. D. Carlson, Properties and applications of Commercial Magnetorheological Fluid, *SPIE*, Vol. 3327, 1998: 262-275.
 - [20] 关新春, 欧进萍. 磁流变耗能器的阻尼力模型及其参数确定[J]. *振动与冲击*. 2001, 20(1): 05-08.
GUAN XinChun, OU JinPing. To determine the damping force model and parameter of magnetorheological dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*. 2001, 20(1): 05-08. (In Chinese).
 - [21] 瞿伟廉, 刘 嘉. 500kN 磁流变阻尼器设计的关键技术[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(2): 124-130.
QU WeiLian, LIU Jia. The key technology of 500kN full-scale magnetorheological fluid damper design[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 2007, 27(2): 124-130 (In Chinese).
 - [22] 李赵春, 朱 超. 火炮磁流变阻尼器结构设计与优化[J]. *机械设计*. 2012. 29(11): 58-62.
LI ZhaoChun, ZHU Chao. Design and optimization of gun magnetorheological damper structure[J]. *Journal of Machine Design*. 2012: 58-62 (In Chinese).
 - [23] Andrew, N., Vavreck. Control of adynamics vibration absorber with magnetorheological damping[J]. *SPIE*, Vol. 4073, 2000: 252-263.
 - [24] 陈进新, 王 宇. 一种可应用于小阻尼力领域的新型磁流变液阻尼器[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(02): 189-195.
CHENG JinXin, WANG Yu. A small damping force model of magnetorheological fluid damper [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(02): 189-195 (In Chinese).
 - [25] 杨 涛, 赵 杰. 磁流变阻尼器的设计和磁路研究[J]. *哈尔滨商业大学学报: 自然科学版*, 2012, 28(05): 636-642.
YANG Tao, ZHAO Jie. Design and Study on magnetic circuit of magnetorheological damper [J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Science Edition*, 2012, 28(05): 636-642 (In Chinese).
 - [26] Ulicny J C, Mance A M. Evaluation of electroless nickel surface treatment for iron powder used in MR fluids [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, 369(1-2): 309-313.
 - [27] Gopalswamy S. Magneto-rheological transmission clutch [P]. US Patent, 5896965, 1999-04-27.
 - [28] 黄 金. 磁流变液与磁流变器件的分析与设计[D]. 重庆: 重庆大学. 2006: 47-79.
HUANG Jin. Analysis and design of the magnetorheological fluid and the magnetorheological device [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 47-79 (In Chinese).
 - [29] 孟维佳. 双平板式磁流变液离合器的研究设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 32-38.
MENG WeiJia. Study and design of a double flat plate type magneto-rheological fluid clutch [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 32-38 (In Chinese).
 - [30] 徐国梁, 陈 镨, 江万权, 等. 径向自加压磁流变液离合器 [P].

- 中国发明专利. CN00104451. 6, 2002-01-16.
- XU GuoLiang, CHEN Qiang, JIANG WanQuan et al. Radial self pressurized magnetorheological fluid clutch [P]. China Patent. CN00104451. 6, 2002-01-16 (In Chinese).
- [31] 王维民. 变刚度波纹管联轴器设计 [P]. 中国发明专利. CN03119420. 6, 2003-11-19.
- WANG WeiMin. Design of variable stiffness bellows coupling [P]. China Patent. CN03119420. 6, 2003-11-19 (In Chinese).
- [32] 李名杰, 李友荣. 筒式磁流变液联轴器设计与实验研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2009, 33(06): 624-627.
- LI MingJie, LI YouRong. Design and experimental research of Cylinder magneto rheological fluid coupling [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 10 (05): 35-41 (In Chinese).
- [33] 雷 阳, 李友荣. 永磁型磁流变液极限转矩联轴器的设计分析 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31 (02): 294-299.
- LEI Yang, LI YouRong. Design and analysis of permanent magnet type magnetic rheological liquid limit torque coupling [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 31 (02): 294-299 (In Chinese).
- [34] Lord Corporation, http://www.rheonetic.com/fluid_begin.htm.
- [35] Kordousky W I, Garodkin S R. Magnetorheological Valve and Devices Incorporation Magnetorheological Elements. U. S. Patent 5353839, 1994: 06-17.
- [36] Tang X, Zhang X. Flexible Fixture with Magnetorheological Fluids [C]. In: Tao R, Proc. of the 7th Int. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions. Singapore: World Scientific, 2000: 712-720.
- [37] J. R. Watson. In: Patent US ed: 5609353 [P]; 1997-04-29.
- [38] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D, et al. [J]. Pro-ceedings of SPIE, 2000, 3985: 418-425.
- [39] 曹宽宽, 邓益民, 叶伟强. 基于磁流变弹性体的汽车减振系统仿真分析 [J]. 机电工程, 2010, 27 (3): 25-29.
- CAO KuanKuan, DENG YiMin, YE WeiQiang. Simulation analysis of vehicle vibration reduction system based on magnetorheological elastomer [J]. Journal of Electrical and Mechanical Engineering, 2010, 27 (3): 25-29 (In Chinese).
- [40] Hoang N, Zhang N, Du H. A novel dynamic absorber using enhanced magnetorheological elastomers for powertrain vibration control [J]. Multi-Functional Materials and Structures, 2008, 27(3): 25-28.
- [41] 龚兴龙, 邓华夏, 等. 磁流变弹性体及其半主动吸振技术 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1192-1200.
- GONG XingLong, DENG HuaXia, et al. Semi active vibration absorber technology of magnetorheological elastomer [J]. University of Science and Technology of China, 2007, 37(10): 1192-1200 (In Chinese).
- [42] 邓华夏, 龚兴龙, 张培强. 刚度和阻尼均可控的减振器 [P]. 中国专利, CN200520070319, 2005-04-01.
- DENG HuaXia, GONG XingLong, ZHANG PeiQiang. The shock absorber of damping and stiffness Under control [P]. China patent, CN200520070319. 2005-04-01 (In Chinese).
- [43] Xu Z. B, Gong X. L, Liao G. J, et al. An Active-damping-compensated Magnetorheological Elastomer Adaptive Tuned Vibration Absorber [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21: 1039-1047.
- [44] 王世旺, 汪建晓. 剪切式磁流变弹性体阻尼器力学性能研究 [J]. 佛山科学技术学院学报: 自然科学版, 2007, 25(5): 17-20.
- WANG ShiWang, WANG JianXiao. Study on the mechanical performance of shear magnetorheological elastomer damper [J]. Journal of Foshan University: Natural Science Edition, 2007, 25(5): 17-20 (In Chinese).
- [45] 汪建晓, 王世旺, 孟 光. 挤压式磁流变弹性体阻尼器-转子系统的振动特性试验 [J]. 航空学报, 2008, 29(1): 91-94.
- WANG JianXiao, WANG ShiWang, MENG Guang. Experimental study on vibration characteristics of squeeze mode MR elastomer damper and rotor system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 29(1): 91-94 (In Chinese).
- [46] Tu Jian, Wu Ping, Ren Wei. Magnetic Finite Element Analysis of The Intelligent Laminated MRE Isolator. 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Guangzhou, China, Nov. 17-21, 2009.
- [47] 余 森, 董小闵, 张红辉. 基于磁流变技术的并联式隔振缓冲器 [P]. 中国发明专利, ZL200710092716. 9, 2007-09-27.
- YU Miao, DONG XiaoMin, ZHANG HongHui. Parallel type vibration isolation buffer based on magneto rheological Technology [P]. Invention Patent, ZL200710092716. 9, 2007-09-27 (In Chinese).
- [48] 毛林章. 基于磁流变技术的登月缓冲装置研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 37-62.
- MAO LinZhang. The lunar landing buffer device based on magneto rheological Technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007: 37-62 (In Chinese).
- [49] 胡宗成. 船用磁流变弹性体隔振器设计及性能分析 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 39(04): 449-455.
- HU ZongCheng. magnetorheological elastomer vibration isolator design and performance analysis [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 39(04): 449-455 (In Chinese).
- [50] 魏克湘, 孟 光. 磁流变弹性体隔振器的设计与振动特性分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 69-73.
- WEI KeXiang, MENG Guang. Design and analysis of vibration characteristics of magnetorheological elastomer vibration isolator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (11): 69-73 (In Chinese).
- [51] 王 威, 邓益民. 磁流变弹性体变刚度隔振系统设计与仿真分析 [J]. 机械制造, 2011, 49(568): 22-25.
- WANG Wei, DENG YiMin. Design and simulation analysis of variable stiffness vibration isolation system of magneto rheological elastomer [J]. Journal of Machinery Manufacturing, 2011, 49(568): 22-25 (In Chinese).
- [52] Bednarek S. . The giant magnetostriction in ferromagnetic composites within an elastomer matrix [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1999, 68(1): 63-67.
- [53] 叶伟强, 邓益民, 王 威. 磁流变弹性体压阻特性实验装置的设计与实验研究 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 43-45.
- YE WeiQiang, DENG YiMin, WANG Wei. Design and experimental study on the piezoresistivity of magnetorheological elastomers experimental device [J]. Journal of Sensor and Micro System, 2011, 30(3): 43-45 (In Chinese).
- [54] Farshad M, Benine A. Magnetoactive elastomer composites [J]. Polymer Testing, 2004, 23(3): 347-353.
- [55] Anderson D. W. Elastomer roll for papermaking machine [P]. US Patent, Patent No: 6544156, 2003-04-08.