

# 硅树脂基磁流变胶流变特性研究 及 Herschel-Bulkley 模型参数识别\*

张广<sup>1</sup>, 汪辉兴<sup>1</sup>, 欧阳青<sup>2</sup>, 王灵<sup>1†</sup>, 郑佳佳<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 嘉兴学院 机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001;  
3. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:**为了探究硅树脂基质磁流变胶的流变特性,自行制备了羰基铁粉质量分数分别为30%、50%、70%的三种磁流变胶 MRG-30、MRG-50、MRG-70,并对其展开稳态旋转剪切测试和动态振荡剪切测试。结果表明:剪切应力随磁场变化分为快速增长、缓慢增长、饱和三个阶段,羰基铁粉含量对零场粘度、剪切应力、响应速率影响较大,MRG-70 磁流变胶效应最好;磁流变胶的流动特性符合 Herschel-Bulkley 函数变化规律,且非牛顿指数  $n$  都满足  $n < 1$ ,具有剪切稀化特性;线性粘弹性区域临界应变幅值  $r_{LVE}$  随着磁感应强度增强而增大,磁流变胶的储能模量对频率的依赖性微弱;法向应力随着磁感应强度增强而增大,但频率对材料的法向应力的影响十分微弱。

**关键词:**磁流变胶;稳态旋转;动态振荡;Herschel-Bulkley;线性粘弹性

**中图分类号:** TB303

**文献标志码:** A

## Study on Rheological Properties of Magnetorheological Gel Based on Silicone and Parameter Identification of Herschel-Bulkley Model

ZHANG Guang<sup>1</sup>, WANG Huixing<sup>1</sup>, OUYANG Qing<sup>2</sup>, WANG Jiong<sup>1†</sup>, ZHEN Jiajia<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxin University, Jiaxin 314001, China;  
3. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** In order to study the rheological properties of magnetorheological gel (MRG) based on silicone, three kinds of MRGs named MRG-30, MRG-50, MRG-70 were prepared based on carbonyl iron powder with a mass fraction of 30%, 50%, 70%, respectively. The steady state rotation shear and dynamic oscillation were systematically tested. The results show that the shear stress varies with the magnetic field and can be classified into three stages: rapid growth, slow growth and saturation. The content of carbonyl iron powder has a great influence on the zero-field viscosity, shear stress and response rate, and MRG-70 has the best magnetorheological effect. The flow characteristic of MRG is consistent with the Herschel-Bulkley function, and the non-Newtonian exponent  $n$  satisfies that  $n < 1$  with shear thinning property. The critical strain amplitude of linear viscoelastic region increases with the enhancement of the magnetic field, and the storage modulus of the MRG is weakly dependent on the frequency. Normal stress increases with the increase of magnetic field, but the influence of frequency on the normal stress of MRG is very weak.

\* 收稿日期:2017-05-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675280,5170546), National Natural Science Foundation of China(51675280,5170546)

作者简介:张广(1990-),男,浙江温州人,南京理工大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: wjiongz@njust.edu.cn

**Key words:** magnetorheological gel; steady state rotation; dynamic oscillation; Herschel-Bulkley; linear viscoelastic property

磁流变材料作为一种智能材料,在外加磁场的作用下,其流变特性会发生连续、快速、可逆变化,由于其具有耗能低、适应温度范围广、低污染、易控制等特点,可广泛应用于各种悬架减振系统、光学球面透镜抛光、建筑结构防震、直升机起落架减振等<sup>[1-4]</sup>.磁流变材料是一类多功能复合材料,通过将微米或纳米级软磁性颗粒分散在不同种类载体中制备而成,根据载体不同,可将磁流变材料分为磁流变液、磁流变胶、磁流变弹性体等<sup>[5-10]</sup>.

磁流变液是最早研制出来的一种呈液态悬浮状磁流变材料,其流变机理已被界内学者进行广泛而深入的研究<sup>[11-13]</sup>,在磁场作用下,其剪切屈服应力和粘度变化幅度可在短时间(毫秒级)内增加两个数量级以上,使其在阻尼器、制动器、减振器、离合器等<sup>[14-17]</sup>方面的应用得到了广泛的发展.但目前磁流变液本身的颗粒沉降、凝聚、稳定性不足等问题以及磁流变器件的密封问题仍然没有得到很好的解决.为了解决这些问题,将具有高粘度的高分子基质作为软磁性颗粒的载体,制备磁流变胶(MRG)<sup>[18]</sup>和磁流变弹性体(MRE)<sup>[19-20]</sup>.

磁流变弹性体的磁致剪切模量可以通过外加磁场连续改变,因而能够根据外部条件实现半主动控制,以被广泛应用到减振降噪领域<sup>[21]</sup>,但是磁流变弹性体的磁流变效应较小(天然橡胶基质的磁流变弹性体的磁流变效应为 133%)<sup>[22]</sup>,说明磁流变弹性体的磁致可控范围较小,从而限制磁流变弹性体在实际中的应用.

磁流变胶是一种新型磁流变智能材料,其特性介于磁流变液和磁流变弹性体之间,兼有两者的优点,是由微/纳米级磁性颗粒(如:羰基铁粉,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )分散在高分子聚合物胶体(如:硅树脂,聚氨酯)中制得<sup>[23]</sup>,并通过改变高分子基质的交联度来控制磁流变胶的零场粘度,进而改善颗粒沉降问题,在外加磁场作用下具有较高的剪切屈服应力,因此具有比磁流变弹性体更高磁流变效应,在振动控制、阻尼器件、离合器件等方面具有广泛的应用前景<sup>[24]</sup>.龚兴龙等<sup>[25]</sup>制备以明胶作为基体的磁流变胶,并对其在磁场作用下的主要流变性能进行了测试,对其磁控流变性能进行了分析,解决了制备成本高的问题;Mitsumata 等<sup>[26-27]</sup>对添加流明胶的磁流变液的磁致压缩模量进行了研究;Rankin 等<sup>[28]</sup>对磁性颗粒在粘塑性基体中的磁流变行为进行流研究;Fuchs

等<sup>[29]</sup>对聚亚安酯基体的磁流变胶进行了较为全面的研究,同时还对超分子聚合物基体进行了研究.

硅树脂分子内部是由立体结构分子交联成更大的立体结构而成的,因而能够更好地阻止由于重力引起的颗粒的沉降,以及由于分子之间作用力引起的颗粒局部聚集<sup>[24, 29]</sup>,这对提高器件使用过程中的稳定性具有一定意义.另外硅树脂具有明显的剪切稀化特性,目前研究对硅树脂基质磁流变胶在 Herschel-Bulkley 剪切稀化模型的流变机理鲜有报道,因此本文采用硅树脂聚合物作为软磁性颗粒载液,在硅树脂聚合物交联之后加入羰基铁粉制备磁流变胶,并对其稳态和动态磁流变特性进行测试分析,并对硅树脂基磁流变胶在不同磁场下的 Herschel-Bulkley 流变模型进行参数识别,特别地,从微观角度分析了磁流变胶在剪切过程中法向力产生机理.

## 1 试样制备与实验方法

### 1.1 硅树脂基磁流变胶制备

#### 1.1.1 材料

改性环氧硅树脂的合成成分为三个步骤<sup>[30-31]</sup>:首先,如表 1 所示的材料通过缩聚反应生成含有羟基或乙氧基的有机硅低聚物(中间体);其次,在催化剂的作用下,将第一步所得的有机硅中间体与环氧树脂在溶剂中进行缩合反应生成改性环氧硅树脂,其材料的具体参数如表 2 所示.最后,将羰基铁粉末(型号:JCF2-2,吉林吉恩镍业有限公司,中国,平均直径为  $5\ \mu\text{m}$ )作为磁性颗粒与硅树脂基质均匀混合.

#### 1.1.2 试样制备

硅树脂基磁流变胶(MRG)的制备流程如图 1 所示.制备过程分为三步:分别是有机硅低聚物(中间体)的制备、改性环氧硅树脂的制备(成品)和硅树脂基的磁流变胶的制备.

有机硅低聚物的制备:在洁净、干燥的三颈圆底烧瓶中加入乙酸乙酯、丁醇和水的混合液,将系统温度维持在  $20\sim 40\ ^\circ\text{C}$  之间,搅拌状态下由加料口逐渐滴入二甲基二乙氧基硅烷、一甲基三乙氧基硅烷、二苯基二乙氧基硅烷、一苯基二乙氧基硅烷和一苯基三氯硅烷的混合液,并在  $1\sim 1.5\ \text{h}$  滴加完后将系统温度上升至  $80\ ^\circ\text{C}$ ,蒸出反应中生成的乙醇,待大部

分乙醇蒸出后,将系统温度上升至 120~130 °C 并在真空度为 8 kPa 以下脱出残留乙醇,保持 0.5~1 h 将体系温度降到 60 °C,得到乙氧基质量分数为 5.2%、固体质量分数为 54.21% 的有机硅中间体。

表 1 缩聚产生有机硅低聚物所需材料  
Tab. 1 Materials used to produce organic silicon oligomer

编号	材料	规格	生产厂家
1	二甲基二乙氧基硅烷 (DDS)	≥98%	国药集团化学试剂有限公司
2	一甲基三乙氧基硅烷 (MTS)	≥98%	国药集团化学试剂有限公司
3	二苯基二乙氧基硅烷	≥98%	江苏三木化工试剂有限公司
4	一苯基二乙氧基硅烷 (PES)	≥98%	江苏三木化工试剂有限公司
5	乙酸乙酯	工业	南京国晨化工有限公司
6	丁醇	工业	南京国晨化工有限公司
7	水	纯净水	南京一七九纯净水公司
8	一苯基三氯硅烷	≥98%	河北泰丰化工有限责任公司

表 2 聚合产生改性环氧硅树脂所需材料  
Tab. 2 Materials applied to prepare a modified epoxy silicone resin

编号	材料	规格	生产厂家
1	环氧树脂	E-20	江苏三木化工试剂有限公司
2	有机硅低聚物		自制
3	乙酸乙酯	工业品	南京国晨化工有限公司
4	正钛酸四丁酯	化学纯	天津石油化工有限公司
5	二甲苯	分析纯	南京国晨化工有限公司

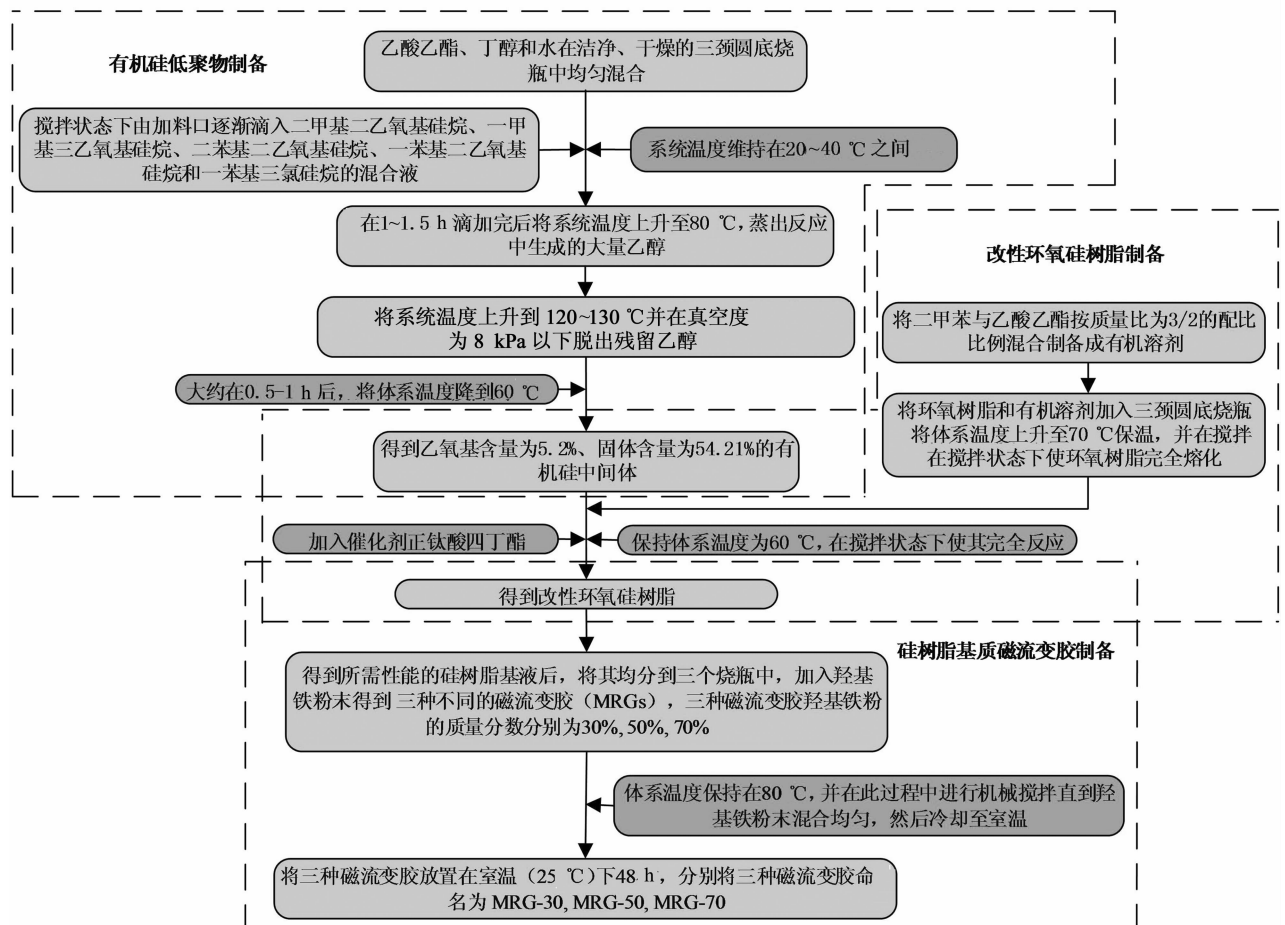


图 1 硅树脂基质磁流变胶制备流程

Fig. 1 Preparation process of silicone-based MRGs

改性环氧硅树脂的制备:将二甲苯与乙酸乙酯按质量比为 3/2 的配比比例混合制备成有机溶剂,将一定量的环氧树脂和有机溶剂加入三颈圆底烧瓶,将体系温度上升至 70 °C 保温,并在搅拌状态下使环氧树脂完全熔化,将之前配制的有机硅中间体缓慢加入到环氧树脂熔化物中,同时加入催化剂正钛酸四丁酯,保持体系温度为 60 °C,在搅拌状态下使其完全反应,得到改性环氧硅树脂成品。

硅树脂基的磁流变胶的制备:将得到的硅树脂基质按配比分到三个烧瓶中,在内温为 80 °C 的条件下加入羰基铁粉末并搅拌使其混合均匀得到三种不同配比的磁流变胶.将得到的磁流变胶在室温(25 °C)下放置 48 h.三种不同配比的 MRGs 的磁性颗

粒的质量分数分别为 30%,50%,70%.根据羰基铁粉质量分数不同分别将三种 MRGs 命名为 MRG-30,MRG-50,MRG-70.

## 1.2 测试方法

在稳定剪切和振荡剪切实验中,用安东帕 MCR 301 型流变仪测试磁流变胶流变性能,实验原理如图 2 所示.测试实验均在 20 °C 下进行,试样置于直径为 20 mm、间距为 1 mm 的两平行圆盘之间,磁场垂直穿过试样,转盘对试样施加稳态和动态载荷,通过计算传感器得到的相应扭矩和角速度信号,对样品的流变特性进行分析,其稳态和振荡剪切试验是按如下方式展开。

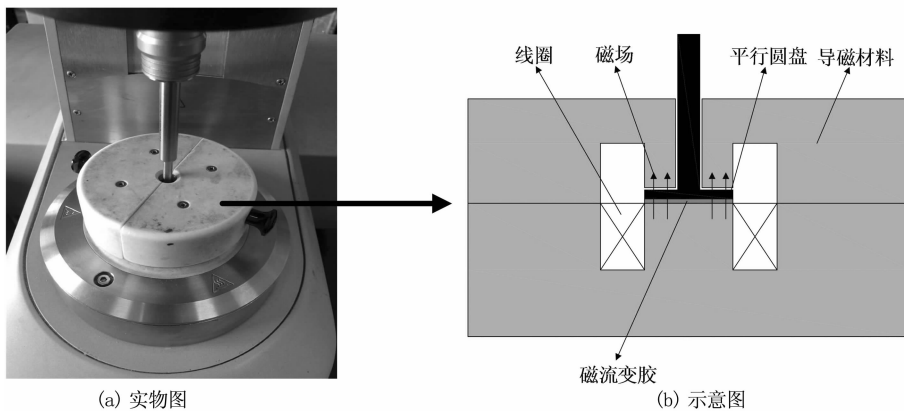


图 2 流变仪测试原理

Fig. 2 Testing principle of rheometer

### 1.2.1 稳定剪切实验

固定剪切速率  $\dot{\gamma}$ , 分别对 MRG-30、MRG-50、MRG-70 三种试样进行磁感应强度  $B$  从 0~1 056 mT 的磁场扫描,测试剪切应力  $\tau$  随磁感应强度  $B$  的变化规律;

固定剪切速率  $\dot{\gamma}$ , 分别对 MRG-30、MRG-50、MRG-70 三种试样进行磁感应强度  $B$  从 250~1 056 mT(250 mT 为一临界值,该值之后法向应力随磁场有明显变化)的磁场扫描,测试法向应力  $\sigma$  随磁感应强度  $B$  的变化规律;

对 MRG-70 进行不同定常磁场(0 mT, 131 mT, 264 mT, 528 mT, 1 056 mT)下,剪切速率  $\dot{\gamma}$  从 0~100  $s^{-1}$  变化,分别测试不同磁场下剪切应力  $\tau$  和表观粘度  $\eta$  随磁感应强度  $B$  的变化规律;

对 MRG-70 进行不同定常磁场(0 mT, 264 mT, 528 mT, 1 056 mT)下,剪切速率  $\dot{\gamma}$  从 0~100  $s^{-1}$  变化,测试不同磁场下法向应力  $\sigma$  随剪切速率  $\dot{\gamma}$  的变化规律。

### 1.2.2 振荡剪切实验

恒定应变频率  $f=5$  Hz,对 MRG-70 进行不同定常磁场(0 mT, 120 mT, 240 mT, 480 mT, 960 mT)下,应变幅值  $r_0$  在 0.001%~10%之间变化,测试不同磁场下储能模量  $G'$  随应变的变化情况,确定不同磁场下线性粘弹性区域临界应变幅值  $r_{LVE}$ ,观察  $G'$  随  $r_0$  变化情况,当  $G'$  出现明显变化,说明材料开始进入非线性区,此时的  $r_0$  为  $r_{LVE}$ ;

恒定剪切应变幅值  $r_0=0.05\%$ ,对 MRG-70 进行不同定常磁场(120 mT, 240 mT, 480 mT)下,应变频率从 0~100 Hz 变化,测试不同磁场下储能模量  $G'$  随频率  $f$  的变化规律;

恒定剪切应变幅值  $r_0=0.05\%$ ,对 MRG-70 进行不同定常磁场(0 mT, 120 mT, 240 mT, 480 mT, 960 mT)下,应变频率  $f$  从 20~100 Hz 变化,测试不同磁场下法向应力  $\sigma$  随频率  $f$  的变化规律。

## 2 测试结果与分析

### 2.1 磁流变胶稳态剪切流变特性

#### 2.1.1 剪切应力随磁场变化

分别对 MRG-30、MRG-50、MRG-70 三种试样在恒定剪切速率  $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$  下进行剪切应力的磁场扫描,结果如图 3 所示。

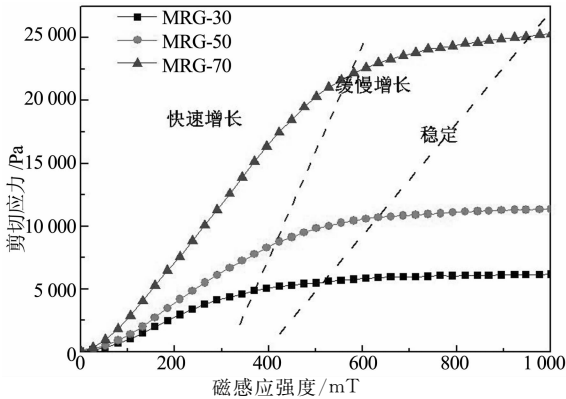


图 3 剪切速率为  $50 \text{ s}^{-1}$  时不同配比磁流变胶的剪切应力与外加磁场关系

Fig. 3 Shear stress as a function of magnetic field at  $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$  for different MRGs

由图 3 可知:随着外加磁感应强度的增强,剪切应力增大速率经历三个阶段:剪切应力首先快速增大,磁感应强度增强到一定值时剪切应力增长缓慢,进一步增强磁感应强度剪切应力趋于饱和值。当无外加磁场时,MRG-30、MRG-50、MRG-70 的剪切应力分别为 48.36 Pa、52.12 Pa、99.15 Pa,这表明磁流变胶的零场粘度随着羰基铁粉质量分数的增加而增大。随着磁感应强度增强,MRG-70 增大速率最快,这表明羰基铁粉含量越高,材料的磁致响应越快,此时,磁流变胶内部开始快速形成链柱状或网状结构;进一步增强磁感应强度,MRG-30 首先达到饱和值,此时所形成的链状或柱状结构强度达到最大或饱和,表明羰基铁粉含量越低,内部结构达到稳定所需的磁感应强度越低,且饱和剪切应力值也越小。如在  $B$  为 450 mT 时,MRG-30 的剪切应力达到饱和值 5 300 Pa;  $B$  为 633 mT 时,MRG-50 的剪切应力达到饱和值 10 700 Pa;在  $B$  为 950 mT 时,MRG-70 的剪切应力达到饱和值 25 090 Pa。由测试结果计算可得:MRG-30、MRG-50、MRG-70 的剪切应力饱和值与零场下剪切应力的比值分别为 109.59、205.29 和 253.05,说明 MRG-70 的磁致剪切应力变化最明显,材料的磁流变效应最好,因此,实验主

要针对 MRG-70 展开测试研究。

#### 2.1.2 剪切应力与表观粘度随剪切速率变化

图 4 和图 5 分别为 MRG-70 流动曲线和粘度曲线。由图 4 可知:剪切应力随剪切速率呈非线性变化,剪切屈服应力(流动曲线中零剪切速率时所对应的剪切应力)随磁感应强度增强而增大。由图 5 可知:在不同磁场下表观粘度都随着剪切速率增大而减小,说明磁流变胶为非牛顿流体,并表现为剪切稀化特性。

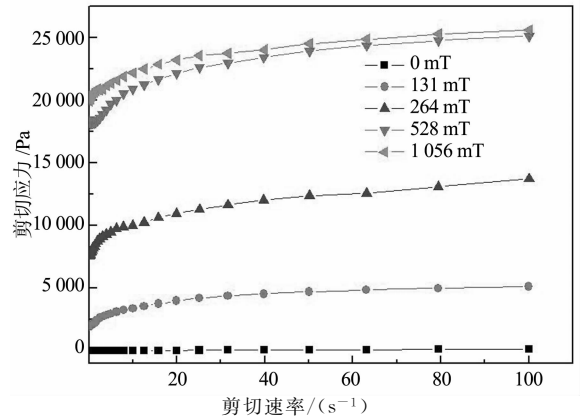


图 4 MRG-70 在不同磁场下的流动曲线  
Fig. 4 Flow curves at different magnetic fields for MRG-70

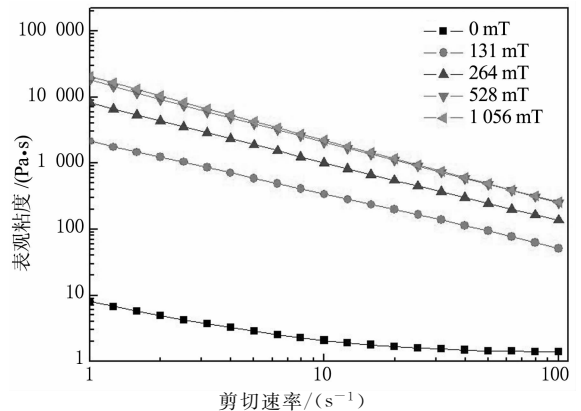


图 5 MRG 在不同磁场下的粘度曲线  
Fig. 5 Viscosity curves at different magnetic fields for MRG-70

基于以上论述,流动特性可以用 Herschel-Bulkley 描述,其方程如下:

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: $\tau$  为剪切应力; $\tau_y$  为剪切屈服应力; $\dot{\gamma}$  为剪切速率; $k$  为稠度系数; $n$  为非牛顿指数。

其中,

$$\begin{cases} n = 1 & \text{牛顿流体} \\ n < 1 & \text{剪切稀化} \\ n > 1 & \text{剪切增稠} \end{cases} \quad (2)$$

分别对不同磁场下磁流变胶的流动曲线进行 Herschel-Bulkley 函数拟合, 如图 6 所示, 并对剪切屈服应力  $\tau_y$ , 稠度系数  $k$ , 非牛顿指数  $n$  进行参数识别, 结果如表 3 所示。

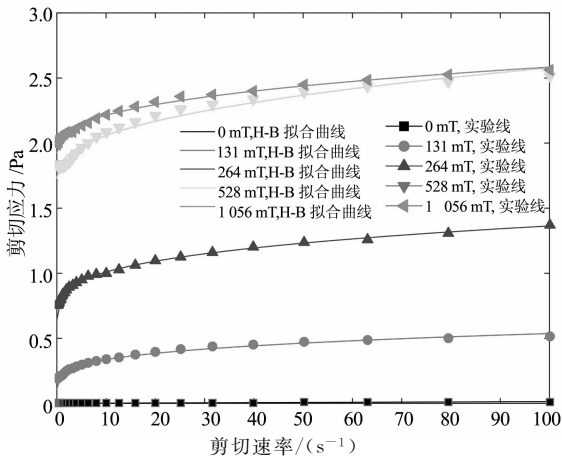


图 6 不同磁场下流动曲线 Herschel-Bulkley 函数拟合  
Fig. 6 Flow curve Herschel-Bulkley function fitting at different magnetic field

表 3 不同磁场下 Herschel-Bulkley 函数拟合各参数值  
Tab. 3 Each parameter value of Herschel-Bulkley function at different magnetic field

磁感应强度/mT	$\tau_y$ /Pa	$k$	$n$
0	6.467 09	1.452 01	0.978 52
131	1 083.382	1 221.878	0.272 57
264	6 396.720	1 893.302	0.291 34
528	17 307.305	1 273.850	0.411 41
1056	19 247.619	1 268.907	0.357 75

由表 3 可知: 对于不同磁场条件下非牛顿指数  $n$  都满足  $n < 1$ , 说明在不同磁场下磁流变胶是一种具有初始剪切屈服应力并伴随剪切稀化特性的非牛顿流体, 结果符合 Yangguang Xu 等<sup>[32]</sup> 人的研究结论, 因此可进一步证明用 Herschel-Bulkley 模型描述磁流变胶流动特性的可行性; 另外, 由表 3 可得剪切屈服应力(此时剪切屈服应力可近似描述为流动曲线的 Herschel-Bulkley 拟合曲线在零剪切速率时所对应的剪切应力)随磁场变化情况如图 7 所示。

结合表 3 和图 7 可知: 随着磁感应强度增强, 剪切屈服应力变化情况分为三个阶段: 在 0~131 mT 时磁性颗粒开始被磁化, 局部形成较弱磁畴, 开始挣脱高分子链的束缚沿着磁场方向移动, 排列成分段链状, 但由于磁场较弱, 只有被高分子链束缚较小的少数磁性颗粒挣脱开来, 如图 8(a), 因此在此磁场范围内力学性能上表现为剪切屈服应力随磁场

变化较缓的特点. 当磁感应强度进一步增强(约在 131~528 mT 之间), 大部分磁性颗粒挣脱高分子链的机械束缚, 并迅速沿着磁场方向排列成链柱状或网状, 如图 8(b), 表现为剪切屈服应力迅速随磁感应强度增强而增大<sup>[33]</sup>. 再进一步增强磁感应强度, 剩余的小部分被严重束缚的磁性颗粒也开始沿磁场方向移动, 链柱状和网状结构加强, 表现为剪切屈服应力随磁场增强有微小上升最后达到饱和值。

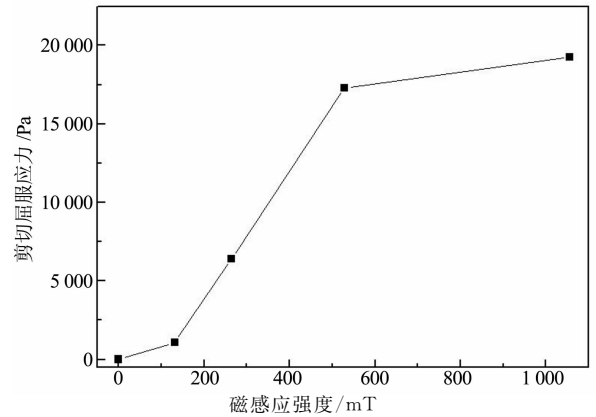


图 7 剪切屈服应力与磁场关系  
Fig. 7 Shear yield stress as a function of magnetic field

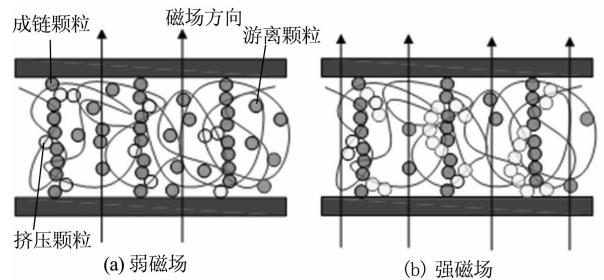


图 8 MRG 内部结构随磁场变化示意图  
Fig. 8 Variation of internal structure with magnetic field

## 2.2 磁流变胶动态粘弹特性

### 2.2.1 线性粘弹区域临界应变随磁场变化规律

为进一步研究磁场对磁流变胶流变特性的影响, 在不定常磁场下对 MRG-70 在恒应变频率为 5 Hz, 应变幅值范围从 0.001%~10% 条件下进行动态特性实验, 测试结果如图 9 所示。

由图 9 可知: 在小应变情况下, 储能模量随应变变化为常数, 材料表现为线性粘弹特性, 在零场条件材料的线性粘弹性(LVE)范围约为 0~0.008%; 随着磁感应强度的增强, 线性粘弹性区域扩大, 磁感应强度为 131 mT 时, 线性粘弹性范围约为 0~

0.021%；当磁感应强度为 528 mT 时，线性粘弹性范围约为 0~0.07%；进一步增大应变幅值，储能模量随应变变化明显，呈现出明显的非线性关系。

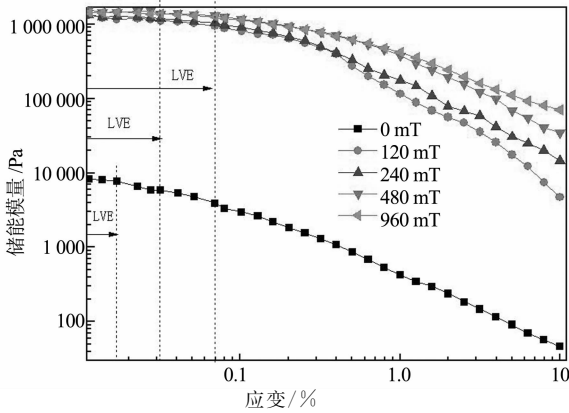


图 9 不同磁场下储能模量与应变关系  
Fig. 9  $G'$  as a function of strain at different magnetic field

其中在小应变条件下，材料表现为线性粘弹特性，具有特殊的物理意义：在线性粘弹性区域内，外加激励信号引起的材料微结构的破坏可以忽略，这个特性有助于进一步研究材料微结构演化与动态特性的关系。线性粘弹区域内磁流变胶的性能通过磁流变效应(MR effect)进行评价，磁流变效应定义为磁场引起的储能模量的变化量与零磁场储能模量的比值，其计算公式如下：

$$MR\ effect(\%) = \frac{G'_B - G'_{B=0}}{G'_{B=0}} \times 100 \quad (3)$$

式中： $G'_B$  为零磁场储能模量。

磁流变效应越高说明材料在磁场下的可控性越好，图 10 给出在应变为 0.011 3%，应变频率为 5 Hz 下，MRG-70 在不同磁场下的磁流变效应。

由图 10 可知：试样在磁感应强度为 480 mT 时，磁流变效应达到最大值 188.8%，还可以看出在磁感应强度为 120 mT 附近，磁流变效应达到饱和。说明材料磁致特性在磁感应强度为 0~120 mT 范围内磁场依赖性较大，能满足磁流变器件振动控制要求。

另外，由图 11 可知：在非粘弹性区域内，材料的损耗因子随着应变幅值的增大而增大，表现出材料的弹性特性减弱，粘性特性增强，内部微结构被破坏，产生不可恢复变形。

### 2.2.2 储能模量随应变频率变化规律

在恒定剪切应变幅值  $r_0 = 0.05\%$  下，对 MRG-70 的储能模量进行不同磁场条件下的频率扫描，结果如图 12 所示。

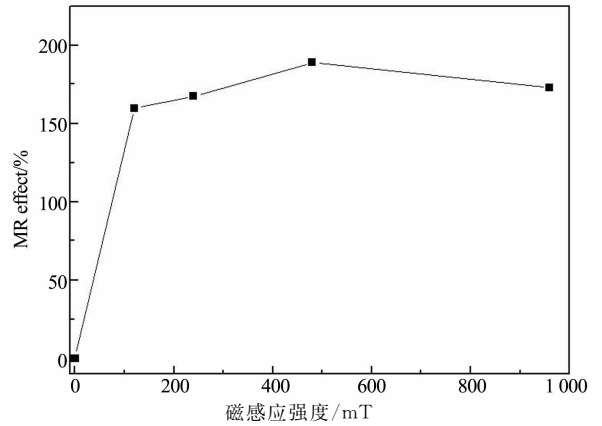


图 10 磁流变效应与磁感应强度的关系  
Fig. 10 MR effect as a function of different magnetic field

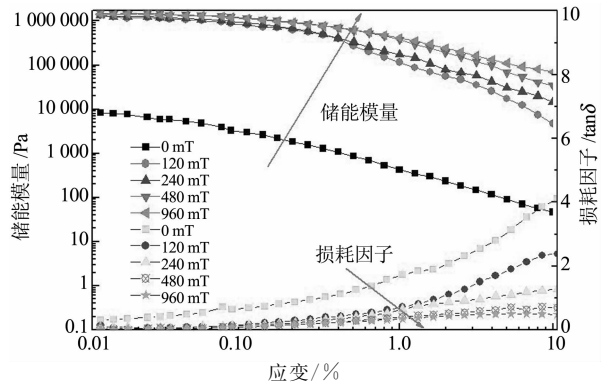


图 11 储能模量和损耗因子与应变的关系  
Fig. 11  $G'$  as a function of strain

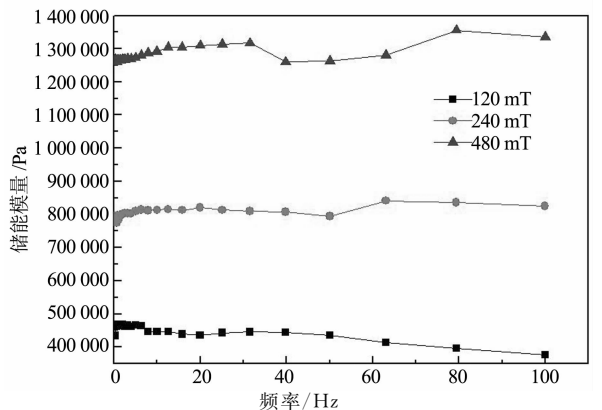


图 12 储能模量与频率的关系  
Fig. 12  $G'$  as a function of frequency

由图 12 可知：在施加磁场时，材料的储能模量随磁感应强度的增强而增大，但随着频率增大，储能模量变化不大，说明在线性粘弹性区域内，频率在 0~100 Hz 之间时，磁流变胶的储能模量对频率的依赖性微弱，结论与重庆大学的廖昌荣等<sup>[34]</sup>研究结果相符，磁流变胶的这种特性使其在器件控制方面更加容易。

### 2.3 磁流变胶法向应力影响因素

#### 2.3.1 磁场对法向应力的影响

恒定剪切速率  $\dot{\gamma}$ , 分别对 MRG-30, MRG-50, MRG-70 三种试样的法向应力进行磁感应强度从 250 mT 到 1 056 mT 磁场扫描, 结果如图 13 所示。

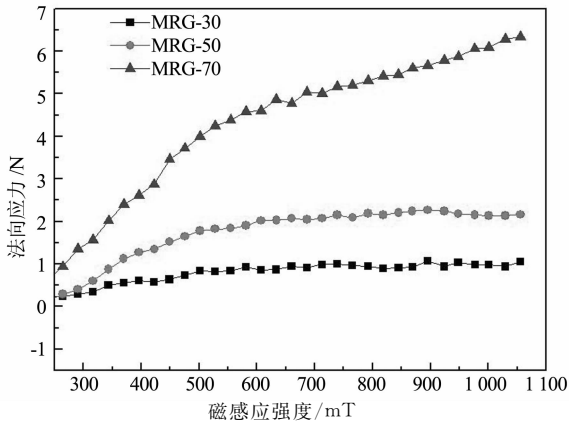


图 13 剪切速率为  $50 \text{ s}^{-1}$  磁流变胶的法向应力与外加磁场关系

Fig. 13 Normal stress as a function of magnetic field at  $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$  for different MRGs

由图 13 可知: 三种试样的法向应力随着磁感应强度增强而增大, 说明在磁场的作用下, 磁性颗粒相互吸引排列成链柱状或网状, 随着磁感应强度增强颗粒之间相互挤压越明显造成法向应力增大; 在  $B$  达到 500 mT 时, MRG-30 首先达到饱和值 0. 939 N, 随着磁场进一步增加到 650 mT 时, MRG-50 达到饱和值 2. 07 N, 当磁场增加到 1 056 mT 时, MRG-70 有达到饱和值的趋势, 约为 6. 34 N, 从法向应力随磁场变化规律同样也可表明羟基铁粉含量越高, 试样形成稳定内部结构所需的磁场越大, 且饱和法向应力值也越大。

#### 2.3.2 剪切速率对法向应力的影响

对 MRG-70 进行不同定常磁场下, 剪切速率从  $0 \sim 100 \text{ s}^{-1}$  变化, 测试不同磁场下法向应力随剪切速率的变化规律, 测试结果如图 14 所示。

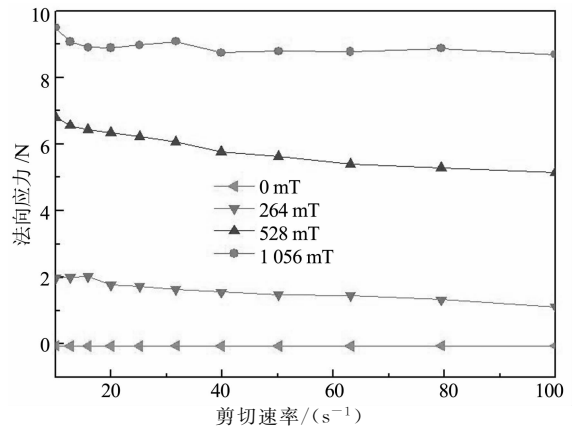


图 14 不同磁场下法向应力与剪切速率的关系  
Fig. 14 Normal stress as a function of shear rate at different field

由图 14 可知: 相同剪切速率下, 法向应力随磁感应强度增强而增大, 在零磁场条件下, 由于重力作用, 法向应力几乎为与零非常接近的负值, 且不随剪切速率的变化而变化; 这表明当外界施加剪切速率时, 硅树脂大分子链团带动附着其分子链上的磁性颗粒一起运动, 且其形状开始由原先的球状沿着剪切速率方向发生改变, 剪切速率越大其形状变化越显著, 如图 15 所示, 因此在垂直剪切速率的法向不产生应力; 而在磁场存在的情况下, 磁性颗粒在磁场方向成链柱状或网状, 颗粒之间产生挤压效果<sup>[35-36]</sup>, 磁感应强度越强挤压越厉害, 因此在磁场存在情况下具有法向应力且随磁感应强度增强法向应力越大, 如图 16 所示。在磁感应强度为 264 mT 和 528 mT 时, 法向应力随剪切速率增大而减小, 这是由于随着剪切速率的增大, 链柱状或网状结构被剪切破坏的速率要越来越大于在此磁场下颗粒重组的速率; 当磁感应强度进一步增加到 1 056 mT 时, 法向应力几乎不随剪切速率变化, 这表明此时颗粒重组与剪切破坏达到动态平衡。

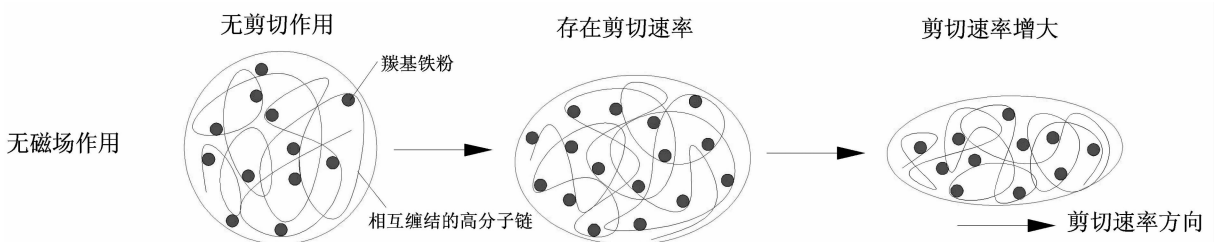


图 15 MRG 内部结构随剪切速率变化示意图  
Fig. 15 Variation of internal structure with shear rate



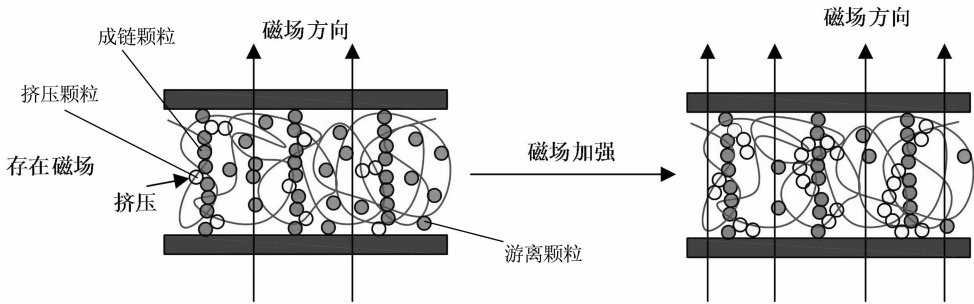


图 16 MRG 内部结构随磁场变化示意图

Fig. 16 Variation of MRG internal structure with magnetic field

### 2.3.3 剪切频率对法向应力的影响

为进一步研究频率对法向应力的影响,在恒定剪切应变幅值  $r_0 = 0.05\%$  下,对 MRG-70 的法向应力进行不同磁场下的频率扫描,结果如图 17 所示.

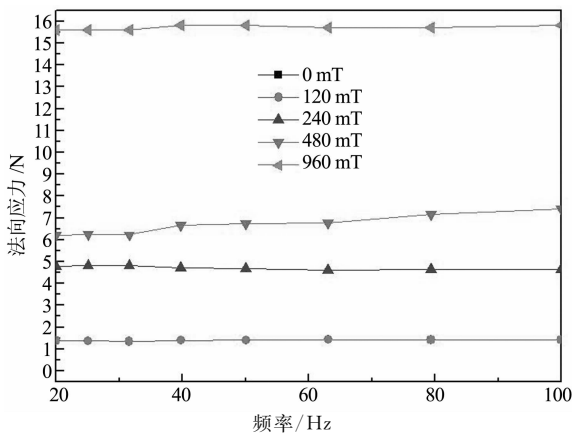


图 17 不同磁场下法向应力与频率的关系

Fig. 17 Normal stress as a function of frequency at different magnetic field

由图 17 可知:在不同磁场下,法向应力随频率变化微小,可见,频率对材料的法向力的影响十分微弱,而磁场对材料法向应力影响较明显;从零场情况下的法向力 1.41 N 增加到 960 mT 时的 15.5 N,增大了将近 11 倍.值得注意的是:结论与 Gong 等<sup>[37]</sup>人关于磁流变液的法向力在稳定磁场下随频率上下震荡的结论不同,磁流变胶不随频率变化的特性能够更加拓宽其在应用领域的视野.

## 3 结论

自行制备了三种不同配比的硅树脂基磁流变胶,根据体系中羰基铁粉质量分数分别为 30%、50%、70%,将三种试样分别命名为 MRG-30、MRG-50、MRG-70,并对其展开稳态旋转剪切实验和动态振荡剪切实验,结论如下:

1) 磁流变胶剪切应力随磁场变化分为快速增

长、缓慢增长、饱和三个阶段;零场粘度随着羰基铁粉质量分数的增加而增大;羰基铁粉含量越高,对磁场的响应越快,羰基铁粉含量越低,内部结构达到稳定所需的磁感应强度越低,且饱和剪切应力值也越小;MRG-70 的磁致剪切应力变化最明显,材料的磁流变效应最好.

2) 磁流变胶的流动特性符合 Herschel-Bulkley 函数变化规律,不同磁场条件下非牛顿指数  $n$  都满足  $n < 1$ ,说明在不同磁场下磁流变胶是一种具有初始剪切屈服应力并伴随剪切稀化特性;随着磁感应强度增强,剪切屈服应力变化情况分为三个阶段:缓慢增长、快速增长、缓慢增长到饱和值.

3) 在小应变情况下,磁流变胶存在线性粘弹特性,线性粘弹性区域临界应变幅值  $r_{LVE}$  随着磁感应强度增强而增大,MRG-70 在磁感应强度为 480 mT 时,磁流变效应达到最大值 188.8%,能满足磁流变器件振动控制要求;在非粘弹性区域内,材料的损耗因子随着应变幅值的增大而增大,材料发生永久变形;材料的储能模量随磁感应强度增强而增大,但与磁流变液不一样,磁流变胶的储能模量对频率的依赖性微弱.

4) 试样的法向应力随着磁感应强度增强而增大,在零磁场条件下,法向应力几乎为零非常接近的负值,且不随剪切速率的变化而变化;在磁场存在情况下具有法向应力且随磁感应强度增强法向应力越大;在不同磁场下,频率对材料的法向力的影响十分微弱.

## 参考文献

- [1] 鞠锐,廖昌荣,周治江,等.单筒充气型轿车磁流变液减振器研究[J].振动与冲击,2014,33(19):86-92.  
JU R, LIAO C R, ZHOU Z J, et al. Car MR fluid shock absorber with mono-tube and charged-gas bag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 86-92. (In Chinese)
- [2] 石峰,戴一帆,彭小强,等.磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺[J].光学精密工程,2010,18(1):162-169.  
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, et al. Removal of subsurface damage in grinding by magnetorheological finishing[J]. Optics

- and Precision Engineering, 2010, 18(1): 162–169. (In Chinese)
- [3] 余强, 方秦, 柳锦春. 磁流变阻尼器在防护工程隔震减振中的应用前景[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术会议论文集. 长春, 2004: 1114–1118.  
YU Q, FANG Q, LIU J C. Application prospect of magnetorheological damper in vibration isolation of protective engineering[C]//Proceedings of the 9th Academic Conference on Protection Engineering Branch of China Civil Engineering Society. Changchun, 2004: 1114–1118. (In Chinese)
- [4] 贾玉红, 武晓娟. 磁流变缓冲器在起落架上的应用[J]. 飞机设计, 2007(4): 41–45.  
JIA Y H, WU X J. Application of magnetorheological damper to landing gear[J]. Aircraft Design, 2007(4): 41–45. (In Chinese)
- [5] TANG L, YUE E, LUO S N, *et al.* Study on temperature performance of magnetorheological fluid[J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(6): 1065–1067.
- [6] CIMENT E, MAXEY M R, KARNIADAKIS G E. Dynamics of self-assembled chaining in magnetorheological fluids[J]. Langmuir, 2004, 20(2): 507–513.
- [7] AN H N, PICKEN S J, MENDES E. Nonlinear rheological study of magneto responsive soft gels[J]. Polymer, 2012, 53(19): 4164–4170.
- [8] AN H N, PICKEN S J, MENDES E. Enhanced hardening of soft-assembled copolymer gels under homogeneous magnetic fields[J]. Soft Matter, 2010, 6(18): 4497–4503.
- [9] YANG I H, YOON J H, JEONG J E, *et al.* Magnetic-field-dependent shear modulus of a magnetorheological elastomer based on natural rubber[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2013, 62(2): 220–228.
- [10] GONG X L, FAN Y C, XUAN S H, *et al.* Control of the damping properties of magnetorheological elastomer by using polycaprolactone as a temperature-controlling component[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2012, 51(18): 6395–6403.
- [11] GINDER J M, DAVIS L C, ELIE L D. Rheology of magnetorheological fluids; models and measurements[J]. International Journal of Modern Physics B, 1996, 10(23/24): 3293–3303.
- [12] YIN H M, SUN L Z, PAULINO G H. Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions[J]. Acta Materialia, 2004, 52(12): 3535–3543.
- [13] ZUBIETA M, ECEOLAZA S, ELEJABARRIETA M J, *et al.* Magnetorheological fluids; characterization and modeling of magnetization[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 095019.
- [14] XIONG C, ZHENG J, ZHANG J Q, *et al.* Design and principle of smart magnetorheological fluid damper[J]. Machine Design & Research, 2004, 20(2): 50–53.
- [15] LI W H, DU H. Design and experimental evaluation of a magnetorheological brake[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(7): 508–515.
- [16] JUNG H J, SPENCER Jr B F, LEE I W. Control of seismically excited cable-stayed bridge employing magnetorheological fluid dampers[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(7): 873–883.
- [17] CHOI Y T, WERELEY N M. Vibration control of a landing gear system featuring electrorheological/magnetorheological fluids[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(3): 432–439.
- [18] HU B, FUCHS A, HUSEYIN S, *et al.* Atom transfer radical polymerized MR fluids[J]. Polymer, 2006, 47(22): 7653–7663.
- [19] GONG X L, ZHANG X Z, ZHANG P Q. Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers[J]. Polymer Testing, 2005, 24(5): 669–676.
- [20] BOCZKOWSKA A, AWIETJAN S F, WROBLEWSKI R. Microstructure – property relationships of urethane magnetorheological elastomers[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(5): 1924.
- [21] CARLSON J D, JOLLY M R. MR fluid, foam and elastomer devices[J]. Mechatronics, 2000, 10(4): 555–569.
- [22] CHEN L, GONG X L, LI W H. Effect of carbon black on the mechanical performances of magnetorheological elastomers[J]. Polymer Testing, 2008, 27(3): 340–345.
- [23] MORDINA B, TIWARI R K, SETUA D K, *et al.* Impact of graphene oxide on the magnetorheological behaviour of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> nanoparticles filled polyacrylamide hydrogel[J]. Polymer, 2016, 97: 258–272.
- [24] WILSON M J, FUCHS A, GORDANINEJAD F. Development and characterization of magnetorheological polymer gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84(14): 2733–2742.
- [25] 叶兴柱, 龚兴龙, 江万权, 等. 新型磁流变胶的流变性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(7): 21–23.  
YE X Z, GONG X L, JIANG W Q, *et al.* Rheological properties of magnetorheological gel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(7): 21–23. (In Chinese)
- [26] MITSUMATA T, IKEDA K, GONG J P, *et al.* Magnetism and compressive modulus of magnetic fluid containing gels[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(12): 8451–8455.
- [27] MITSUMATA T, FURUKAWA K, JULIAC E, *et al.* Compressive modulus of ferrite containing polymer gels[J]. International Journal of Modern Physics B, 2002, 16(17/18): 2419–2425.
- [28] RANKIN P J, HORVATH A T, KLINGENBERG D J. Magnetorheology in viscoplastic media[J]. Rheologica Acta, 1999, 38(5): 471–477.
- [29] FUCHS A, XIN M, GORDANINEJAD F, *et al.* Development and characterization of hydrocarbon polyol polyurethane and silicone magnetorheological polymeric gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(2): 1176–1182.
- [30] SHIGA T, OKADA A, KURAUCHI T. Magnetoelastic behavior of composite gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1995, 58(4): 787–792.
- [31] HU B, FUCHS A, HUSEYIN S, *et al.* Supramolecular magnetorheological polymer gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 100(3): 2464–2479.
- [32] YANG G X, XING L G, SHOU H X. Soft magnetorheological polymer gels with controllable rheological properties[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(7): 1726.
- [33] XU Y, GONG X, XUAN S, *et al.* A high-performance magnetorheological material; preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties[J]. Soft Matter, 2011, 7(11): 5246–5254.
- [34] 王芳芳, 廖昌荣, 周治江, 等. 磁流变胶泥材料的磁控力学行为实验研究[J]. 功能材料, 2014, 45(23): 95–101.  
WANG F F, LIAO C R, ZHOU Z J, *et al.* Experimental study on magneto-mechanical behavior of magnetorheological gel[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(23): 95–101. (In Chinese)
- [35] MIAO Y, JU B, JIE F, *et al.* Magnetoelastic characteristics of magnetorheological gel under a magnetic field[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(12): 4704–4710.
- [36] JU B, MIAO Y, JIE F, *et al.* Magnetic field-dependent normal force of magnetorheological gel[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(33): 11583–11589.
- [37] GONG X L, GUO C Y, XUAN S H, *et al.* Oscillatory normal forces of magnetorheological fluids[J]. Soft Matter, 2012, 8(19): 5256–5261.