

引用本文:雷 拓,郭绪新,刘伯权,等.磁流变弹性体及其隔震(振)应用研究进展[J].建筑科学与工程学报,2021,38(1):61-77.

LEI Tuo, GUO Xu-xin, LIU Bo-quan, et al. Research Progress of Magnetorheological Elastomers and Their Isolation Applications[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 61-77.

DOI:10.19815/j.jace.2020.08043

# 磁流变弹性体及其隔震(振)应用研究进展

雷 拓, 郭绪新, 刘伯权, 王沁怡, 孙向梅, 邓煜生

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为促进磁流变弹性体及其隔震(振)技术的发展,系统总结了磁流变弹性体在土木工程领域的研究、应用现状和存在的问题。综述了磁流变弹性体的材料组成、制备方法、本构模型,对比了材料、制备方法对磁流变弹性体磁致力学性能的影响;总结了磁流变弹性体隔震(振)支座研究开发方面的最新成果,比较了几类磁流变弹性体智能隔震(振)支座和不同控制算法下隔震(振)支座的减震效果。结果表明:天然橡胶基磁流变弹性体更能适应高承载力、大变形的要求,但还需提高磁致效应;预结构化结合 3D 打印技术可制备各向异性和特殊结构的磁流变弹性体材料;磁流变弹性体隔震(振)支座能够明显降低结构的地震响应,优于传统隔震(振)支座的减震效果。

**关键词:**磁流变弹性体;磁流变效应;力学模型;隔震(振)支座;隔振器

中图分类号:TU352.12

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)01-0061-17

## Research Progress of Magnetorheological Elastomers and Their Isolation Applications

LEI Tuo, GUO Xu-xin, LIU Bo-quan, WANG Qin-yi, SUN Xiang-mei, DENG Yu-sheng

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to promote the development of magnetorheological elastomer and its isolation technology, the research, application status and existing problems of magnetorheological elastomer in the field of civil engineering were systematically summarized. The material composition, preparation method and constitutive model of the magnetorheological elastomer were reviewed and the effects of materials and preparation methods on the magnetorheological properties of magnetorheological elastomer were compared. The latest research and development of magnetorheological elastomer isolation bearings were summarized and the shock absorption effects of several kinds of magnetorheological elastomer isolation bearings with different control algorithms were compared. The results show that the natural rubber-based magnetorheological elastomer can better meet the requirements of high load-carrying capacity and large deformation, but the magnetorheological effect needs to be improved. With the combination of pre-structured and 3D printing technology, magnetorheological elastomer materials with anisotropic and special structural form can be prepared. Magnetorheological elastomer isolation bearings can obviously reduce the seismic response of structures, which is better than the traditional isolation bearings,

收稿日期:2020-08-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51778060)

作者简介:雷 拓(1973-),男,陕西岐山人,副教授,工学博士,E-mail:Leituo616@163.com。

but their structural designs and control algorithms still need to be optimized.

**Key words:** magnetorheological elastomer; magnetorheological effect; mechanical model; isolation bearing; vibration isolator

## 0 引言

中国是地震频发国家,因地震造成的损失相当惨重,如唐山地震、汶川地震等。传统的抗震设计是基于保证结构具有足够的强度和延性来抵抗地震作用,该方法虽能实现结构“大震不倒”,但结构局部破坏在所难免且往往不易修复。隔震技术因其减震概念明确、技术成熟及减震效果显著而在工程中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。然而,从结构振动控制方式看,目前的隔震技术仍属被动控制范畴,其减震效果直接与地震动特性相关。随着材料科学的发展,以智能材料为驱动的现代隔震技术为工程结构减震控制提供了新的思路。

磁流变材料因其能对外界磁激励做出响应而归为智能材料,包括磁流变液(Magnetorheological Fluid, MRF)<sup>[2-5]</sup>、磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomer, MRE)<sup>[2,6-8]</sup>等。磁流变效应最早在20世纪40年代由Rabinow<sup>[5]</sup>发现。Shiga等<sup>[9]</sup>提出MRE的概念,MRE是将微米级磁性颗粒分散于固态基体材料中,在磁场作用下能够改变自身力学性能,且克服了MRF易沉降、稳定性差、环境污染等不足<sup>[10-12]</sup>。MRE基体材料主要有硅橡胶、天然橡胶、聚氨酯橡胶等高分子材料。在制备过程中对MRE施加磁场,使磁性颗粒取向的过程称为预结构化,经预结构化的MRE为各向异性材料,而无预结构化MRE则为各向同性,2种材料在力学性能方面差异较大。MRE具有可控性、可逆性以及响应速度快等特点,在医学<sup>[13]</sup>、汽车制造<sup>[14-15]</sup>、机械设备<sup>[16-19]</sup>等方面已有广泛应用。中国在磁流变材料及应用方面的研究起步较晚,但在一些高校及科研院所的努力下取得了一定成果<sup>[20-24]</sup>。在土木工程信息化、智能化的发展趋势下,MRE具有广阔的应用前景。本文综述了近年来MRE在隔震(振)应用方面的新进展,以期能够对土木工程领域MRE智能隔震方面的研究和应用提供参考。

## 1 MRE研究进展

### 1.1 MRE组成

MRE主要由基体材料、微米级的导磁性颗粒及辅助添加剂组成。

#### 1.1.1 基体材料

硅橡胶较为柔软,在固化成型前黏度较低,有利于磁性颗粒在基体中均匀分散,或在磁场中形成有序的链状、簇状结构,如图1所示<sup>[25]</sup>。

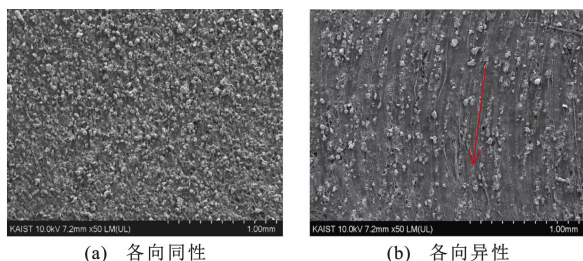


图1 含15%(质量分数)铁颗粒磁流变弹性体SEM图  
Fig. 1 SEM Images of Magnetorheological Elastomer with 15% (Mass Fraction) Iron Particles

聚氨酯橡胶因其较好的力学性能、较低的黏度及良好的热稳定性而备受关注<sup>[26]</sup>。天然橡胶等材料制备的MRE磁流变效应相对较低,部分学者研制了混合橡胶体系MRE。Zhang等<sup>[27]</sup>将磁流变液或磁流变胶注入MRE孔洞中,让MRE发挥“骨架作用”,结果表明混合型材料比原MRE具有更高的初始模量和磁流变效应。Hu等<sup>[28]</sup>通过调整聚氨酯与硅橡胶比例,使基体内部形成互穿结构,改善聚氨酯与硅橡胶的相容性,提高了磁流变效应。Zhang等<sup>[29]</sup>使用顺丁橡胶和天然橡胶制备不同混合比例的MRE,研究材料的耐久性问题,分析了耐久性与循环荷载和老化条件的关系。表1汇总了以不同基体材料制备的MRE。与硅橡胶相比,天然橡胶、顺丁橡胶等具有更好的弹性、力学性能,在土木工程领域更具有潜力。此外,还有学者利用废旧轮胎橡胶颗粒制备MRE,对MRE进行了物理表征,以探索其微观结构和磁性能,并进行了热分析<sup>[53]</sup>。Liao等<sup>[38]</sup>研究了 $\gamma$ 辐射对MRE剪切模量的影响,结果表明,初始剪切模量和磁致剪切模量均随 $\gamma$ 辐射的增大呈先增大后减小的趋势,辐射诱导的交联和降解反应影响MRE聚合物基体的剪切模量。基体材料作为磁性颗粒的载体,本身不具有磁性,但对磁流变效应具有显著影响。一般规律是,在较软的基体材料中,磁性粒子可发生较大位移,形成有序排列的颗粒链,并产生较大磁致模量;较硬基体材料对磁性颗粒的“禁锢”作用更强,其力学性能主要建立于基

表 1 不同基体材料制备的 MRE

Tab.1 MRE Prepared from Different Matrix Materials

数据来源	基体材料	颗粒种类	颗粒含量	MRE 类型
文献[30]	硅橡胶	铁粉	40%(体积分数)	各向异性,各向同性
文献[31]	硅橡胶	羰基铁粉(粒径 5~9 μm)	10%~40%(质量分数)	各向同性
文献[32]	硅橡胶	铁粉(粒径 5~9 μm)	30%(体积分数)	各向异性
文献[33]	硅橡胶	羰基铁粉(平均粒径 5.89 μm)	70%,75%(质量分数)	各向同性
文献[34]	硅橡胶	羰基铁粉(粒径 3.9~5.0 μm)	30%(体积分数)	各向异性;各向同性
文献[35]	天然橡胶	羰基铁粉(平均粒径 3 μm)	200 phr	各向异性
文献[36]	天然橡胶	羰基铁粉(平均粒径 7 μm)	50%~80%(质量分数)	各向异性
文献[37]	天然橡胶	铁粉	20 phr	各向异性
文献[38]	天然橡胶	羰基铁粉(平均粒径 6 μm)	80%(质量分数)	各向异性
文献[39]	天然橡胶	羰基铁粉	30 phr	各向同性
文献[40]	天然橡胶	铁粉	18.3%(体积分数)	各向同性
文献[41]	顺丁橡胶	羰基铁粉(平均粒径 7 μm)	60%(质量分数)	各向异性
文献[42]	顺丁橡胶	羰基铁粉	60%~85%(质量分数)	各向异性
文献[43]	顺丁橡胶	羰基铁粉	60%~80%(质量分数)	各向异性
文献[44]	丁腈橡胶	SrFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> 纳米粒子	20~80 phr	各向异性
文献[45]	聚氨酯橡胶	羰基铁粉	40%~80%(质量分数)	各向异性;各向同性
文献[46]	聚氨酯橡胶	羰基铁粉, 铁粉(平均粒径 70 μm)	11.5%(体积分数)	各向同性;各向异性
文献[47]	聚氨酯橡胶	羰基铁粉	40%~70%(质量分数)或 8.4%~24.2%(体积分数)	各向同性
文献[48]	聚氨酯橡胶	羰基铁粉(平均粒径 7 μm)	40%~80%(质量分数)	各向同性
文献[49]	聚氨酯橡胶	羰基铁粉(粒径 1~8 μm)	70%(质量分数)	各向异性
文献[50]	顺丁橡胶+天然橡胶	羰基铁粉(平均粒径 7 μm)	60%(质量分数)	各向异性
文献[51]	顺丁橡胶+SEBS	羰基铁粉(平均粒径 3.4 μm)	60%(质量分数)	各向异性
文献[52]	顺丁橡胶+天然橡胶	羰基铁粉(粒径 3~4 μm)	60%(质量分数)	各向异性

体材料之上,磁致性能相对较弱。

1.1.2 磁性粒子

制备 MRE 的磁性粒子应具有高磁导率、高饱和磁化强度及低剩磁和低矫顽力的特点<sup>[54]</sup>。由表 1 可见,磁性颗粒多用微米级的羰基铁粉,除此之外还有铁粉、镍粉<sup>[55]</sup>等。Koo 等<sup>[56]</sup>研究了含有 4 种硬磁性粒子(BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>,SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>,SmCo<sub>5</sub>,Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)MRE 在磁场下的位移响应,发现每一类型粒子产生的位移与磁场强度正线性相关。

Tian 等<sup>[44]</sup>将包覆硅烷偶联剂的 SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 纳米粒子掺入丁腈橡胶基体中,通过扫描电镜和 X 射线光谱对其进行表征,结果表明,SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 纳米粒子在橡胶基体中具有良好的分散性。Behrooz 等<sup>[57]</sup>研究了氧化对 MRE 剪切模量的影响,结果表明,氧化作用主要影响基体材料,铁粒子经聚合物处理后有助于减小 MRE 剪切模量的损失。Padalka 等<sup>[58]</sup>分别以 Fe,Ni,Co 合成的纳米线作为磁性填料,制备了硅橡胶基 MRE,结果表明填充镍纳米线 MRE 的

动态刚度最大,填充铁纳米线 MRE 的最小。粒子形状对 MRE 性能有显著影响,Hapipi 等<sup>[59]</sup>比较了片状和球状羰基铁粉粒子的 MRE 性能,发现磁性颗粒含量相同时,MRE-P(片状羰基铁粉 MRE)的初始模量高于 MRE-S(球状羰基铁粉 MRE),但 MRE-P 相对磁流变效应却低于 MRE-S。一方面由于 MRE-P 中基体与颗粒的相互作用较强,能量耗散小,初始模量较高;另一方面是 MRE-P 中磁性颗粒形成“纸牌屋”结构,这些链结构连接较弱,在较大应变时易于断裂。磁性颗粒粒径也会影响 MRE 的磁流变效应。Winger 等<sup>[60]</sup>对 4 种不同粒径铁颗粒进行测试,显示磁流变效应对颗粒粒径有明显依赖性。通常认为,在一定的粒径范围内,磁流变效应随磁性粒子粒径的增大而增大。

磁性粒子是橡胶智能化的驱动材料。含有硬磁性粒子的 MRE 会形成磁极,类似于柔性永磁体,可用于执行器或驱动器。含羰基铁粉的 MRE 在隔震(振)器件中的效果更好,且高饱和磁化强度、低剩磁

的粒子使得隔震(振)器件刚度变化更大,可调节范围更广。

### 1.1.3 辅助添加剂

除基体材料和磁粉外,添加剂也是制备 MRE 的重要成分。硅油加入硅橡胶中可使基体分子间间隙增大,分子间凝集减少。添加剂可提高基体的塑性和流动性,还可以平均材料内应力分布,使 MRE 具有稳定的材料性能<sup>[12]</sup>。

炭黑作为高温硫化型橡胶(如天然橡胶、丁腈橡胶、顺丁橡胶)的补强剂,可极大提高橡胶的机械性能和耐热性能,因其种类、粒径、结构等不同,硫化胶性能也有所差异。Rajhan 等<sup>[39]</sup>研究了天然橡胶基 MRE 的拉伸强度、硬度、回弹率等与炭黑含量的关系。试验表明,硬度随炭黑含量的增加而增加,回弹率随炭黑含量的增加呈下降趋势。Chen 等<sup>[61]</sup>通过试验发现 MRE 的零场模量和相对磁流变效应均随炭黑含量的增加而增加,阻尼比随炭黑含量的增加而减小,拉伸强度随炭黑含量增加而增大。炭黑含量(质量分数)从 0% 增加至 7% 时,抗拉强度提高了 48.5%。

Aziz 等<sup>[62]</sup>研究了不同类型多壁碳纳米管(Multiwall Carbon Nanotubes, MWCNT)对 MRE 形态、磁性和黏弹性的影响。结果表明,羧基化多壁碳纳米管(Carboxylated Multiwall Carbon Nanotubes, COOH-MWCNT)和羰基铁粉有较好的相容性,形成相互连接的网络,通过加入 COOH-MWCNT,饱和磁化强度比原有 MWCNT 增加 5%。同时还发现,环氧化棕榈油(Epoxidised Palm Oil, EPO)有助于分散 MWCNT 和羰基铁粉,增强磁流变效应。与传统 MRE 相比,添加 COOH-MWCNT 有助于提高 MRE 的初始模量、磁致模量和阻尼性能<sup>[63]</sup>。

### 1.1.4 MRE 制备方法

因基体材料不同,MRE 制备方法也有差异。研究人员尝试了多种 MRE 制备方法,包括人工模塑 MRE<sup>[64]</sup>、真空辅助注射成型<sup>[65]</sup>。以室温硫化硅橡胶为基体材料的 MRE 一般制备方法如下:首先按设计比例将磁性颗粒、硅橡胶及其他添加剂混合均匀,再将混合物注入模具,放入真空箱排除混合物中气泡,最后混合物在室温下即可固化(硫化)。制备各向异性 MRE 时,需将试样放置在定向磁场中进行预结构化。与硅橡胶不同,天然橡胶、丁腈橡胶等需经过塑炼,将橡胶高分子剪切断链,降低分子量,以获得更好的可加工性和操作性,最后在硫化温度和压力下使橡胶线性高分子交联,形成网状高分子。

Bastola 等<sup>[66]</sup>使用 3D 打印技术开发了一种混合型 MRE,通过 3D 打印机将一定体积的 MRF 逐层封装至弹性体中,成品如图 2 所示。

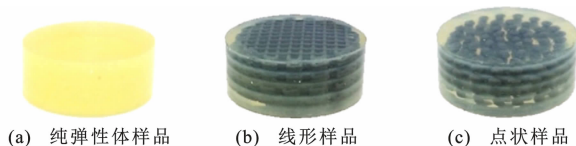


图 2 3D 打印 MRE 样品

Fig. 2 3D-printed MRE Samples

在打印过程中会出现 MRF 不连续、形状和尺寸不易控制、层厚不稳定等问题。通过对不同材料流变性能的测定,发现挤出压力、初始高度和加料速度等打印参数对打印质量影响显著<sup>[67]</sup>。Bastola 等<sup>[68]</sup>研究了 MRF 图形化和不同磁场方向对混合型 MRE 磁流变效应的影响,测试了挤压模式下混合型 MRE 的动态特性。Bastola 等<sup>[69]</sup>进一步发现,3D 打印 MRE 的磁流变效应与打印图案和外加磁场方向有关,表明 3D 打印具有制备各向异性或特殊结构 MRE 的潜力。将 MRF 分割成较小的点,可使磁流变效应保持一定的水平并减少磁性颗粒的沉降和 MRF 的渗漏。3D 打印技术的应用,不仅实现了 MRE 制备方法的革新,也是对 MRE 材料结构上的创新。

## 1.2 MRE 磁致力学性能

MRE 力学性能在外部磁场作用下发生改变是其重要特征,如弹性模量、阻尼等,其中磁流变效应备受关注。相对磁流变效应反映了 MRE 在磁场下的变化能力,在实际工程应用中有重要意义。相对磁流变效应  $M_R$  按下式定义

$$M_R = \frac{G_{\max} - G_0}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $G_{\max}$  为磁场作用下的最大剪切模量; $G_0$  为零磁场下的剪切模量。

影响 MRE 力学性能的自身因素主要有基体材料的种类、磁性粒子的含量、基体材料与磁性粒子界面的结合能力等。由表 2 可见,硅橡胶基 MRE 的剪切模量普遍低于天然橡胶或顺丁橡胶制成 MRE 的剪切模量。另外,磁性粒子含量越高,MRE 的剪切模量越高<sup>[75,82]</sup>。

Davis<sup>[83]</sup>通过理论计算得出,剪切模量变化最大时,磁性颗粒最佳体积分数为 27%。尹兵雪等<sup>[84]</sup>通过试验得出,有磁场下制备的 MRE 具有更高的磁致剪切模量和高磁流变效应。此外,添加剂对基体材料与磁性粒子的界面结合也有影响,合适的添

表 2 MRE 试验条件及磁流变效应

Tab. 2 Experimental Conditions of MRE and Magnetorheological Effect

数据来源	基体材料	测试频率	测试应变/%	磁感应强度/T	最大相对磁流变效应/%	零场剪切模量/kPa	最大剪切模量/kPa
文献[70]	硅橡胶	1.0 Hz	0.10	0~1.000	1 520.00		
文献[71]	硅橡胶	0.1~100.0 Hz	0.01~100.00	0~0.456	357.57	52.27	293.118
文献[72]	硅橡胶	0.5~100.0 Hz	0.01~10.00	0~1.000	429.41	174.00	920.000
文献[73]	硅橡胶	1.0 Hz	0.01	0~0.900	571.43	70.00	470.000
文献[74]	硅橡胶	0.0~100.0 Hz		0~0.800	667.00	120.00	920.000
文献[75]	硅橡胶	0.1,1.0,10.0,50.0 Hz	2.50~20.00	0~0.45	1 672.10	49.03	868.980
文献[76]	聚二甲基硅氧烷	1.0 Hz	1.00	0~0.08	60.58	164.58	264.290
文献[38]	天然橡胶			0~1.000	164.71	1 870.00	4 960.000
文献[77]	天然橡胶	1.0~100.0 rad·s <sup>-1</sup>	0.02	0~0.035	65.40	48.00	79.400
文献[78]	天然橡胶	1.0~100.0 rad·s <sup>-1</sup>	0.02	0~0.035	36.64		
文献[79]	天然橡胶	10.0 Hz	0.10	0~1.000	440.00	740.00	3 230.000
文献[41]	顺丁橡胶	10.0 Hz	0.50	0~1.000	90.00	200.00	380.000
文献[42]	顺丁橡胶	0.1~40.0 Hz	0.10~1.30	0~0.800	83.87		
文献[45]	聚氨酯橡胶	5.0 Hz	0.20	0~0.860	708.00	650.00	5 250.000
文献[48]	聚氨酯橡胶	5.0 Hz	0.10	0~1.000	2 373.00	230.00	6 120.000
文献[80]	三元乙丙橡胶	0.1~10.0 Hz		0~0.150	187.00		
文献[81]	三元乙丙橡胶	1.0~200.0 Hz	0.10~4.50	0~0.700	77.10	629.10	1 114.000
文献[51]	顺丁橡胶+SEBS	1.0 Hz	0.05	0~0.800	44.00	410.00	590.400
文献[52]	顺丁橡胶+天然橡胶	10.0 Hz	0.00~1.00	0~0.750	50.00	400.00	600.000

注:零场剪切模量和最大剪切模量与最大相对磁流变效应相对应。

加剂可使基体材料与磁性粒子有效结合,不仅提高 MRE 的剪切模量,还可提高磁流变效应<sup>[31,61,63]</sup>。

MRE 的磁致力学性能与相对磁流变效应存在一定的相互制约性,较高的相对磁流变效应往往基于较低的零场模量,但在工程应用中有较大的局限性。MRE 虽解决了 MRF 的沉降问题,但也降低了磁场调控的灵活性。制备具有良好磁致力学性能和相对磁流变效应的 MRE,需要在材料设计和研发方面开辟新思路。

MRE 的剪切模量随磁通密度的增大而增大,当磁通密度达到 600~800 mT 时,磁流变效应达到平台期,即 MRE 进入磁饱和阶段,剪切模量不再增加。随着剪切应变的增加,存储模量与损耗模量均呈下降趋势<sup>[71-72,75]</sup>。这是由于基体中分子链断开,磁性粒子间的距离增大,引力减小,呈现出宏观的模量减小。存储模量、损耗模量均随激励频率的增加而增大,对频率有较强的依赖性<sup>[72,75]</sup>。

另外,研究人员通过损耗因子评估 MRE 的阻尼特性。MRE 的阻尼  $D_{\text{MRE}}$  为<sup>[85]</sup>

$$D_{\text{MRE}}=D_{\text{C}}+D_{\text{I}}+D_{\text{M}}$$

(2)

式中: $D_{\text{C}}$  为基体阻尼; $D_{\text{I}}$  为界面阻尼; $D_{\text{M}}$  为磁力阻尼。

随着应变幅值增大,颗粒与基体材料之间的界面摩擦增大,由于颗粒与基体运动不同步,使颗粒与基体材料之间的弱物理键断裂。在磁场作用下,粒子间相互挤压,增加了粒子和基体之间的摩擦,从而消耗更多能量。颗粒与橡胶基体之间的强相互作用能减小滑动位移,使能量耗散减小,当磁场进一步增大时,损耗系数减小。这是因为在较强的磁场作用下,磁性颗粒之间相互作用,橡胶受到更大的约束,降低了橡胶分子的能量耗散,从而降低了损耗系数。随着磁通密度增大,MRE 损耗因子呈现先增大后减小的趋势<sup>[72]</sup>。当磁场较低时,粒子间作用力增加了由界面滑移引起的能量耗散,对能量损失起关键作用;另外,基体与粒子的相互作用也较弱;在剪切应力作用下容易产生滑移能量耗散<sup>[74]</sup>。

1.3 MRE 本构模型

1.3.1 磁偶极子模型

Jolly 等<sup>[86]</sup>研究平行链中球形颗粒的磁力学特性,通过磁偶极子间能量相互作用关系,推导出小剪切应变  $\gamma(<0.1)$  下的磁致剪切模量  $G$ ,即

$$G=\frac{\Phi J_{\text{p}}^2}{2\mu_1\mu_0(d_0/d)^3}$$

(3)

式中: $\Phi$  为颗粒体积分数; $J_{\text{p}}$  为单位颗粒体积磁偶



极矩;  $\mu_0, \mu_1$  分别为真空磁导率和介质相对磁导率;  $d_0$  为链中相邻颗粒中心距;  $d$  为颗粒直径。

Zhu 等<sup>[87]</sup>分析了由柱状结构组成 MRE 的力学性能,考虑了颗粒所在链和相邻链的影响,建立体心四方结构模型对 MRE 的磁偶极子模型进行修正,计算了含有柱状结构 MRE 的磁致剪切模量  $\Delta G$ ,即

$$\Delta G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{9m^2\Phi}{32\pi^2\mu_0\mu_1d_0^3R^3\gamma} \cdot \sum \frac{n(k\lambda + \gamma n)[4n^2 - (k\lambda + \gamma n)^2 - (l\lambda)^2]}{[(k\lambda + \gamma n)^2 + (l\lambda)^2 + n^2]^{7/2}} \quad (4)$$

式中:  $\tau$  为剪切应力;  $m$  为磁偶极矩;  $\lambda = D_0/d_0$ ,  $D_0$  为相邻链间距;  $R$  为球状颗粒半径;  $k, l, n$  分别为模型长、宽、高方向颗粒的数量。

结果表明,传统磁偶极子模型高估了 MRE 磁致剪切模量。从增加磁致剪切模量角度看,当颗粒体积分数较小时,链状结构比柱状结构表现更好,但当颗粒体积分数较大时,柱状结构更好。

Li 等<sup>[88]</sup>提出了 MRE 双模态粒子链模型,即

$$\Delta G \approx \begin{cases} 56.52\Phi\mu_0H_0^2/(9\mu_0H_0+9-\frac{6.28}{1-s})^2 & s \leq 23.2\% \\ \frac{(73.64s-17.12)\Phi\mu_0H_0^2}{(9\mu_0H_0+2.72)^2} + \frac{0.908(1-s)\Phi\mu_0H_0^2}{(\mu_0H_0+0.091)^2} & s > 23.2\% \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $H_0$  为磁场强度;  $s$  为小颗粒体积在颗粒总体积中的占比。

通过理论和试验研究了大颗粒与小颗粒混合制备 MRE 的力学模型和磁流变效应,计算表明  $s = 23.2\%$  时,磁致模量达到最大值,将试验结果与模型结果进行比较,发现模型结果准确地预测了大颗粒和小颗粒的最佳配比,但低估了 MRE 的磁致模量。

Ivaneyko 等<sup>[89]</sup>提出了一个正则矩形晶格模型,即

$$G = G_0 + u_0\Phi^2\left(\frac{M}{M_s}\right)^2 \times 3\alpha^3(1+\epsilon_{eq})^{9/2} \cdot \sum_{\{i_x, i_y, i_z\} \neq 0} \{i_x^2[4\alpha^4 i_x^4(1+\epsilon_{eq})^6 + 3\alpha^2 i_x^2(i_y^2 - 9i_z^2)(1+\epsilon_{eq})^3 - i_y^4 + 3i_y^2 i_z^2 + 4i_z^4]/[\alpha^2 i_x^2(1+\epsilon_{eq})^3 + i_y^2 + i_z^2]^{9/2}\} \quad (6)$$

式中:  $u_0 = \mu_0 M_s^2/(4\pi)$ ;  $M$  为磁化强度;  $M_s$  为饱和磁化强度,  $M_s \approx 2 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\alpha$  为颗粒的不同分布形式;  $\epsilon_{eq}$  为等效应变;  $i_x, i_y, i_z$  分别为模型  $x, y, z$  方向上第  $i$  个颗粒。

考虑基体内部粒子的不同空间分布:各向同性分布( $\alpha=1$ )、链状分布( $\alpha<1$ )和平面片状分布( $\alpha>1$ ),研究了小变形、考虑磁致伸缩情况下,剪切模量与磁场的关系。Ivaneyko 等<sup>[90]</sup>在文献[89]基础上进行了拓展,剪切模量随磁化强度的增大而增大,对磁颗粒的所有分布都具有相同的趋势,对剪切模量的预测与试验数据进行比较,两者有很好的一致性。

### 1.3.2 宏观力学模型

MRE 是一种典型的黏弹性材料,实际应用中需建立数学模型对其复杂的力学行为进行表征,通过弹性元件和黏性元件的不同组合来反映应力-应变关系。Li 等<sup>[91]</sup>提出了 MRE 四参数模型,即

$$\tau = G\gamma = (G_1 + iG_2)\gamma \quad (7)$$

$$G_1 = \{(k_1 k_b + k_2 k_b + k_1 k_2)[(k_1 + k_2)^2 + c_1 \omega^2] + c_1^2 \omega_1^2 k_1^2\} / \{(k_1 + k_2)[(k_1 + k_2)^2 + c_1^2 \omega_1^2]\} \quad (8)$$

$$G_2 = \frac{c_1 \omega_1 k_1^2}{(k_1 + k_2)^2 + c_1^2 \omega_1^2} \quad (9)$$

式中:  $k_1, k_2, k_b$  均为弹性元件刚度系数,  $k_b$  反映模量对磁场的依赖性;  $c_1$  为黏性元件黏度系数;  $\omega_1$  为激励频率。

通过 MATLAB 优化算法对不同工况下 4 个参数进行了识别。经试验与模型预测结果比较可知,四参数黏弹性模型在 10% 应变内能较好地预测 MRE 性能。

王奇等<sup>[92]</sup>考虑 MRE 的松弛行为,建立了五参数广义 Maxwell 模型,总结了模量与参数和时间  $t$  的函数关系,即

$$G(t) = k_1 e^{-\frac{k_1}{c_1}t} + k_2 e^{-\frac{k_2}{c_2}t} \quad (10)$$

式中:  $k_3$  为弹性元件的刚度系数;  $c_2$  为黏性元件的黏度系数。

Chen 等<sup>[93]</sup>采用流变模型来研究 MRE 动态力学行为,推导了流变模型的本构关系,通过模拟具有多种内在特性和受外部激励的 MRE 特性,验证了该模型的有效性。朱俊涛等<sup>[94]</sup>根据 MRE 基体黏弹性行为和磁致模量的变化,引入黏弹性分数阶导数模型(VFD),给出了 MRE 磁参数模型的复数模量  $Y(\omega)$ ,即

$$Y(\omega) = \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon(\omega)} = (E_0 + E_m) + i\beta E_0 T^\beta \omega^\beta = Y_1(\omega) + iY_2(\omega) \quad (11)$$

$$Y_1(\omega) = E_m + E_0 [1 + T^\beta \omega^\beta \cos(\frac{\beta\pi}{2})] \quad (12)$$

$$Y_2(\omega) = E_0 T^\beta \omega^\beta \sin(\frac{\beta\pi}{2}) \quad (13)$$

式中:  $Y_1(\omega)$ ,  $Y_2(\omega)$  分别为存储模量和损耗模量;  $\sigma(\omega)$  为应力;  $\varepsilon(\omega)$  为应变;  $\omega$  为角频率;  $E_m$  为非线性弹簧元件的磁致模量;  $E_0$  为弹簧元件的弹性模量;  $T$  为 VFD 元件中表征特征时间的参数;  $\beta$  为分数阶导数;  $i^\beta = \cos(\beta\pi/2) + i\sin(\beta\pi/2)$ ,  $\beta \in (0, 1)$ 。

分析了 MRE 磁参数模型复数模量、力学损耗等动态特性与频率、外加磁场及分数阶导数的关系, 结果表明, 采用 VFD 模型能够在较宽频率范围内较好地模拟试验性能。

Guo 等<sup>[95]</sup>建立了基于分数阶的参数化本构模型, MRE 的  $Y(\omega)$  为

$$Y(\omega) = E_m + \frac{\eta^2 \omega^{2\beta} E_0 + \eta \omega^\beta E_0^2 \cos(\beta\pi/2)}{E_0^2 + \eta^2 \omega^{2\beta} + 2\eta \omega^\beta E_0 \cos(\beta\pi/2)} \quad (14)$$

在耦合场基础上, 提出了一种在压应力作用下的颗粒链剪切模型, 用于研究 MRE 的磁流变效应, 即

$$Y(\omega) = \frac{18\mu_0 \mu_1 \chi^2 H_0^2 \Phi A k_0^3 (1 - \epsilon_{\text{matrix}})^3 (4 - \gamma^2)}{(1 + \gamma^2)^{7/2} [3k_0^3 (1 - \epsilon_{\text{matrix}})^3 - 4\chi A]^2} + \frac{\eta^2 \omega^{2\beta} E_0 + \eta \omega^\beta E_0^2 \cos(\beta\pi/2)}{E_0^2 + \eta^2 \omega^{2\beta} + 2\eta \omega^\beta E_0 \cos(\beta\pi/2)} \quad (15)$$

式中:  $\chi$  为颗粒磁化率;  $k_0 = d_0/R$ ; 当颗粒足够多时  $A \approx 1.202$ ;  $\epsilon_{\text{matrix}}$  为基体压缩应变;  $\eta$  为 Abel 黏壶的黏度系数。

当颗粒体积分数较小时, 建立的模型与试验数据吻合较好, 该模型能较好地描述 MRE 的动态模量与频率和变化磁场的关系; 当  $\Phi = 46\%$  时, 拟合结果与试验结果的差距变大。文献[94], [95]虽都采用分数阶的参数化模型, 但二者的模型建立方式不同。

Eem 等<sup>[96]</sup>提出一种结合 Ramberg-Osgood 模型和 Maxwell 模型的动态模型, 用来描述 MRE 的力和位移关系。式(16)为 Ramberg-Osgood 模型的表达式, 式(17)为模型卸载情况。

$$x = \frac{F_R}{K_0} + \frac{F_R}{K_0} \left( \frac{F_R}{F_y} \right)^{r-1} \quad (16)$$

$$x - x_i = \frac{F_R - F_i}{K_0} + \frac{F_R - F_i}{K_0} \left| \frac{F_R - F_i}{2F_y} \right|^{r-1} \quad (17)$$

式中:  $F_R$  为加载力;  $x$  为位移;  $K_0$  为剪切刚度;  $F_y$  为屈服力;  $F_i$ ,  $x_i$  分别为加载、卸载转换点时的力和位移;  $r$  为黏弹比例,  $r$  由滞回环形状决定。

进而可得 Maxwell 模型

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{k_1} \frac{dF_M}{dt} + \frac{F_M}{c_1} \quad (18)$$

$$F = F_R + F_M \quad (19)$$

式中:  $F_M$  为作用在 Maxwell 模型上的力。

通过试验和模型仿真结果比较, 较好地描述 MRE 的力-位移关系, 验证了所提动态模型的有效性。

由于 MRE 应用时磁力耦合的复杂性, 本构模型仍需深入研究。MRE 在磁、力共同作用下, 磁性粒子位置、相互作用力的变化非常复杂, MRE 的材料、制备方法的差异导致试验结果的离散性较大, 也使 MRE 本构模型研究难度增加。此外, 还需在试验基础上, 通过微观模型揭示 MRE 内部结构在外界磁场下的流变机理和主要影响因素, 进一步建立合理的宏观力学模型和参数表征 MRE 宏观力学行为。显然, MRE 本构模型研究是 MRE 器件产品开发应用的基础。

## 2 MRE 隔震(振)应用研究进展

### 2.1 MRE 隔震(振)应用类型

目前, 多数 MRE 隔震支座是基于传统叠层橡胶支座研发的, 将 MRE 片(块)与钢板结合形成叠层结构, 该结构形式可使隔震支座在发生较大水平位移时, 能够承担较大竖向荷载。Wahab 等<sup>[97]</sup>制作了天然橡胶基 MRE 全尺寸隔震支座, 如图 3(a)所示。Li 等<sup>[98]</sup>设计了大容量叠层 MRE 隔震装置, 如图 3(b)所示, 并在振动台上进行试验, 以评估该装置的性能, 其竖向荷载超过 2 744 N, 最大为 3 626 N。Yarra 等<sup>[99]</sup>制作了基于 MRE 的高速公路桥自适应隔震支座, 每个支座配有 4 组叠层 MRE-钢板, 有 8 个电磁铁, 电磁铁形成闭环磁场, 如图 3(c)所示, 评估了支座在不同磁场、剪切应变、激励频率下的性能。Gu 等<sup>[100]</sup>提出智能基础隔震策略, 通过 3 层建筑模型, 比较了地震激励下不同隔震方案的有效性, 结果表明被动隔震系统性能有限, 智能隔震策略的适用性得到试验验证, MRE 隔震支座如图 3(d)所示。

MRE-钢板叠层结构隔震(振)支座能够有效隔离水平方向振动, 但给隔震(振)支座设计带来挑战。线圈外置式设计将 MRE-钢板叠层结构置于线圈内部, 如图 4(a)所示。该设计可为 MRE 提供较为稳定的匀强磁场, 外侧钢轭一方面可使隔震(振)支座形成完整磁路, 减小磁损耗, 另一方面可为电磁线圈和叠层结构提供保护作用, 但该线圈布置形式在工作时产生的热量不易散除, 对 MRE 性能有一定影响。此外, 考虑到隔震(振)支座在极限工况下水平变形的要求, 线圈和外侧钢轭与叠层结构要留有一定安全距离, 因此隔震(振)支座直径较大。线圈端

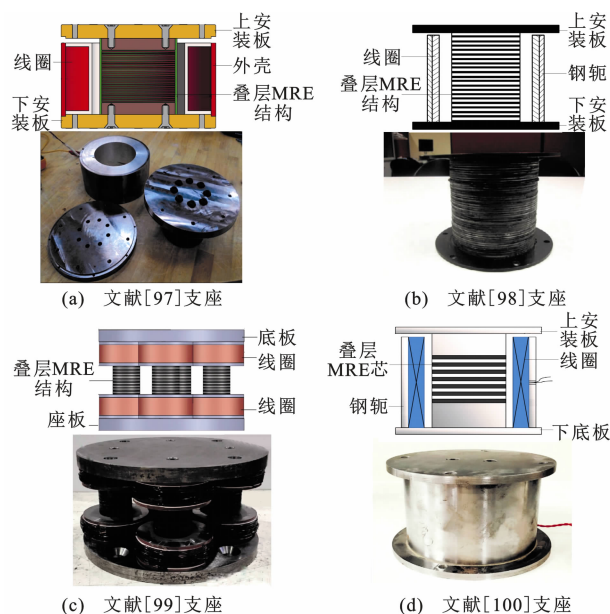


图 3 叠层型 MRE 隔震支座

Fig. 3 Laminated MRE Isolation Bearings

部式设计如图 4(b)所示,线圈位于 MRE-钢板叠层结构的端部,该设计为保证足够磁场强度,通常会在叠层结构两端布置线圈,或布置多组 MRE-钢板叠层结构形成闭合磁路,如图 3(c)所示。Sun 等<sup>[101]</sup>通过软件模拟发现多组 MRE-钢板叠层结构中的磁通密度要高于单组 MRE-钢板叠层结构,线圈端部设计有利于减小隔震(振)支座直径,但需要考虑磁路的完整性。

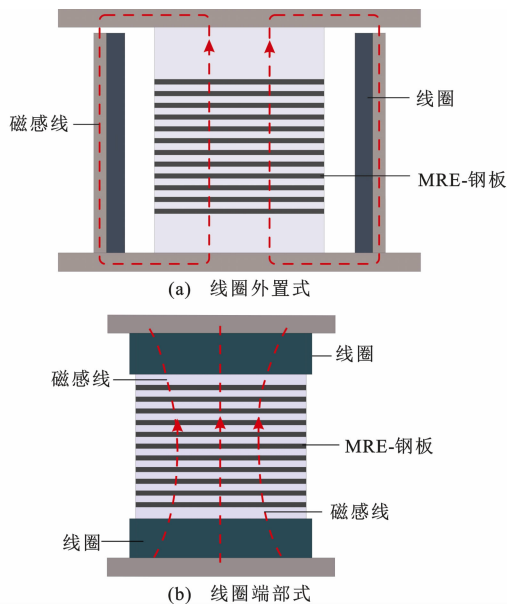


图 4 叠层型 MRE 隔震(振)支座磁路设计示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Magnetic Circuit Design of Laminated MRE Isolation Bearings

除了典型的叠层 MRE 隔震支座外,还有按剪-

压工作模式设计的隔振器。隔振器水平刚度调节范围较大,但由于重力作用,存在竖向预应变,导致竖向刚度调节范围变小,限制了其应用范围<sup>[102]</sup>。Yang 等<sup>[102]</sup>提出了 MRE 剪切-压缩混合模式,在混合 MRE 隔振器中嵌入 2 个 MRE 块,一个用于剪切模式,另一个用于压缩模式,如图 5(a)所示。Leng 等<sup>[103]</sup>也研发了混合模式 MRE 隔振器,如图 5(b)所示,并对其进行试验测试,通过数值模拟验证该装置能有效减轻波浪荷载对海洋结构工程的振动。剪-压模式隔振器能够对水平和竖直 2 个方向的振动进行控制,但各方向的变形控制范围均有所限制。因此,该类型隔振器尚有优化空间,若各 MRE 能够受独立电磁线圈控制且互不影响,则 MRE 可调控范围能得到较大改善。

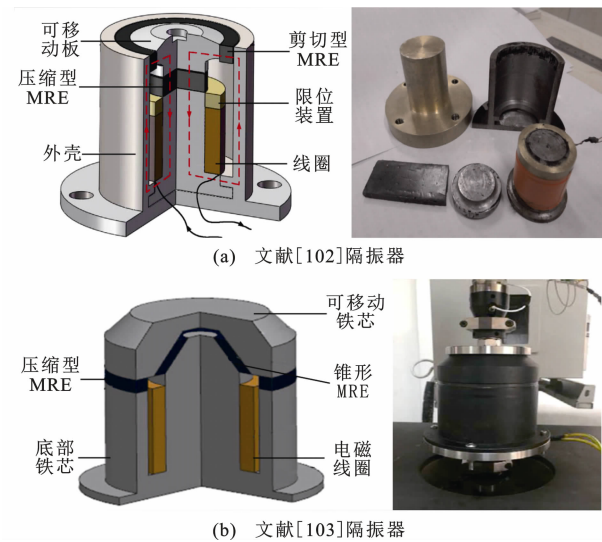


图 5 剪-压模式 MRE 隔振器

Fig. 5 MRE Isolator in Shear-compression Mixed Mode

Sun 等<sup>[101]</sup>研究并评估了一种半主动调谐质量阻尼器,该阻尼器由 4 组 MRE-钢板叠层结构组成,4 组叠层结构形成正方形,用于调节刚度,如图 6(a)所示。该设计不仅增加了调谐质量阻尼器的稳定性,而且消除了设计中的磁路间隙。Wang 等<sup>[104]</sup>提出了一种基于锥形 MRE 隔振器的变刚度调谐质量阻尼器系统,介绍了锥形隔振器的设计,并与传统圆柱形隔振器进行了比较。在此基础上,制作了 MRE 调谐质量阻尼器,如图 6(b)所示,在谐波荷载作用下进行试验。结果表明,该 MRE 调谐质量阻尼器系统能有效控制结构振动。

2.2 MRE 隔震(振)支座试验研究

研究人员对 MRE 隔震(振)支座的试验可分为以下 2 类。

第一类试验是对隔震(振)支座性能进行测试,



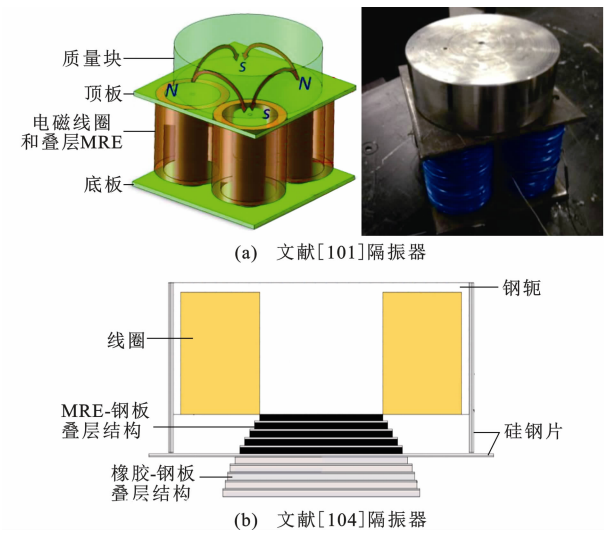


图 6 MRE 调谐质量阻尼器  
Fig. 6 MRE Tuned Mass Damper

测试条件及隔震(振)支座的刚度、阻尼变化情况如表 3 所示。从试验结果看,当隔震(振)支座通电后,刚度和阻尼发生明显变化,说明 MRE 发挥作用。Xing 等<sup>[107]</sup>所做试验中,隔震支座的刚度、阻尼变化特别突出,究其原因,一是制备 MRE 的磁性颗粒含量较高,通入电流较大所得磁场较高;二是激励频率较大,MRE 剪切模量与频率呈正相关。Li 等<sup>[98]</sup>在试验中发现,隔震支座的磁场强度远未达到 MRE 磁饱和场强,其主要原因是隔震支座存在空气间隙导致漏磁和 MRE 与钢板黏结较差、存在气泡等。Yarra 等<sup>[99]</sup>进行了隔震支座破坏形式的试验,结果表明该支座破坏是因为 MRE 与钢板的黏结失效,这与文献<sup>[98]</sup>情况相似。

第二类试验是将 MRE 隔震(振)支座安置在缩尺框架模型中,在振动台上输入地震激励,并通过相

应控制算法来实现对隔震(振)支座的智能控制,试验情况如表 4 所示。从采用的控制算法看,模糊逻辑控制可以提供一个简单且稳健的框架来指定非线性控制,以适应不确定性和不精确性<sup>[115-116]</sup>。此外,模糊控制器不依赖于数学模型的分析过程,与经典控制理论相比,模糊控制器更容易处理来自外部荷载和结构响应的不确定性<sup>[111]</sup>。Gu 等<sup>[114]</sup>使用 2 种控制算法对 4 种地震波(按震级的 20% 输入)进行了比较,结果发现遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化的模糊逻辑控制明显优于基于广义回归神经网络(General Regression Neural Network, GRNN)逆模型 LQ 调节器(LQR)控制,表明模糊逻辑控制算法可以更好地应对 MRE 隔震支座控制系统的高非线性、滞后性。Gu 等<sup>[100]</sup>使用滑模控制(SMC)衍生的 Bang-Bang 控制作为基准控制算法进行试验。Bang-Bang 控制系统能较好地限制底层位移,但在 El Centro 和 Northridge 地震波下, Bang-Bang 控制系统的层间位移明显大于被动控制系统的隔震支座。Chen 等<sup>[113]</sup>为解决结构控制系统的时滞问题,提出了一种双循环自适应控制器。内循环用来补偿 MR 器件引起的响应时间延迟,外循环则采用一个类似李雅普诺夫函数的自适应控制算法。该算法使结构位移主要控制在隔震系统中,而上部结构仅有少量层间位移,实现了上部结构近似刚体的平动,结果表明新型双循环控制策略能够提供令人满意的性能,减轻建筑物和其他结构由于地震引起的结构振动。通过试验对比发现,有源控制的结构响应明显低于无源被动控制,有源控制隔震支座的隔震效果更优。各控制算法所优化控制的目标量不同,同时考虑到隔震支座的设计、试验装置不

表 3 MRE 隔震(振)支座试验条件及性能

Tab. 3 Experimental Conditions and Properties of MRE Isolation Bearing

数据来源	频率/Hz	位移/mm	磁感应强度/T	电流/A	刚度变化幅度/%	阻尼变化幅度/%	支座规格	叠层结构直径/mm	钢板规格		MRE 规格		线圈匝数	总电阻/Ω
									片数	厚度/mm	片数	厚度/mm		
文献[98]	0.5,1.0,3.0	5.0,10		0.0,3.0,5.0	37.83	58.16	φ232,* 276 mm	140	46	1	47	2	3 100	32.3
文献[105]	3.0	2.0		0.0~4.0	182.44	173.25		35	11	1	10	1		
文献[102]	10.0~100.0			0.0~1.5	329.63	181.01							450	
文献[106]	0.1,1.0,2.0,4.0	2.0,4.0,8.0		0.0~3.0	1 630.22	44.09		120	26	1	25	1	2 900	42.3
文献[107]	5.0~45.0		0.00~0.45	0.0~5.0	312.67	157.49	φ182(204),* 92 mm	60	19	1	20	2	1 400	17.2
文献[103]	0.5	0.2		0.0~2.0	18.24	15.95								

注:φ 表示支座直径或上顶板直径(下安装板直径);\* 表示高度。

表 4 MRE 隔震(振)支座隔震(振)性能试验

Tab. 4 Isolation Performance Test of MRE Isolation Bearing

数据来源	结构层数	地震波	控制算法	底层位移/mm		相对位移/mm	
				无源控制	有源控制	无源控制	有源控制
文献[108]	1	7.5Hz 简谐波		2.210	0.760	−0.290	0.050
文献[109]	1	El Centro	模糊逻辑控制	0.884	0.858	−0.819	−0.835
		人工地震波		2.414	1.793	−2.252	−1.650
文献[110]	3	El Centro	Lyapunov 控制策略	4.500	2.930	2.330	0.560
文献[111]	3	El Centro	模糊逻辑控制			0.991	0.775
文献[101]	3	El Centro	模糊逻辑控制			5.470	4.100
文献[112]	3	随机激励	半主动模糊控制器	1.150	0.980	0.570	0.470
文献[113]	5	El Centro	双循环自适应控制	314.900	96.030	−314.260	−95.540
		Kobe		381.900	178.780	−380.690	−178.010
		Hachinohe		561.390	83.170	−560.270	−82.720
		Northridge		973.570	311.540	−971.610	−310.150
文献[100]	3	El Centro	Bang-Bang 控制器	2.640	1.310	1.570	2.860
		Kobe		10.080	2.790	5.910	5.860
		Hachinohe		2.200	0.740	1.370	0.950
		Northridge		5.240	2.210	3.610	5.380
文献[114]	3	El Centro	广义回归神经网络 (GRNN)逆模型 LQ 调节器 (LQR)控制	7.910	2.530	4.730	6.280
		Kobe		19.620	4.160	11.570	11.310
		Hachinohe		6.590	1.810	4.120	3.800
		Northridge		15.630	4.250	10.930	17.810
		El Centro	遗传算法(GA)优化的模糊 逻辑控制	7.910	2.110	4.730	2.640
		Kobe		19.620	3.550	11.570	4.410
		Hachinohe		6.590	1.610	4.120	1.390
		Northridge		15.630	3.690	10.930	6.370

注:相对位移为顶层位移与底层位移的差值。

同,隔震效果差异较大。进一步对比文献[100]和文献[114],Bang-Bang 控制对于底层位移的控制要优于 LQR 控制和模糊逻辑控制,但对于相对位移,模糊逻辑控制算法更优。

2.3 MRE 隔震(振)支座力学模型

为了模拟隔震(振)支座的动力性能,研究人员建立了不同的力学模型,如表 5 所示。Bouc-Wen 模型是一种经典的迟滞模型,可用于修正 MRE 隔震(振)器的性能,Yang 等<sup>[117]</sup>提出了唯象学模型,该模型是由 Bouc-Wen 模型与 Voigt 模型并联组成,用来描述 MRE 隔震支座的磁致阻尼、刚度变化。试验证明,该模型预测隔震支座的力-位移关系与电流恒定时的试验测量数据相吻合。MRE 隔震支座与传统叠层橡胶支座相似,而当剪切变形超过临界剪切应变时,自适应隔振器会出现应变硬化现象。为此,Li 等<sup>[118]</sup>提出了一种新的模型,在该模型中,上支路为标准三参数实体模型,下支路为修正的 Maxwell 模型,包含一个应变硬化弹簧单元和一个

阻尼单元串联。结果表明,该模型能较好地描述自适应隔震支座力-位移、力-速度滞回行为,当剪切变形超过临界应变时,该模型可描述隔震支座的应变硬化现象。Nguyen 等<sup>[112]</sup>为了描述 MRE 在剪切方向变形的动力学特性,建立了动力学模型,并将模型及相关仿真结果与谐波激励下的试验结果进行比较。结果表明,大多数情况下,模型适应度高于 90%,平均适应度约为 93%。在频率 3~30 Hz、剪切应变 6%~14%的范围内,MRE 模型可以很好地工作,但在低频、小幅值激励情况下,模型预测结果不够精确。

3 结 语

(1)MRE 经过多年发展,日益成熟,基体材料可根据磁致力学性能、相对磁流变效应等因素综合考虑,磁性粒子根据功能化需求选择软磁性粒子或硬磁性粒子。基体材料、磁性粒子种类繁多,各有优劣,需结合具体应用环境选择合适配方。MRE 在制

表 5 MRE 隔震(振)支座力学模型

Tab. 5 Mechanical Models of MRE Isolation Bearing

数据来源	力学模型示意图	数学表达式
文献[117]		$F = \theta k_1 x + (1 - \theta) k_1 z + c_1 \dot{x},$ $\dot{z} = p \dot{x} - u   \dot{x}     z  ^{q-1} z - v \dot{z}   z  ^q$ <p>式中: <math>\theta</math> 表示滞回环的线性水平, <math>\theta \in (0, 1)</math>; <math>p, q, u, v</math> 为量纲一的参数, 表示滞回环的形状和大小。</p>
文献[118]		$F = k_2 y + \alpha z^3,$ $k_2 y = k_1 (x - y) + c_1 (\dot{x} - \dot{y}),$ $\alpha z^3 = c_2 (\dot{x} - \dot{z}),$ $\dot{z} = -\alpha z^3 / c_2 + \dot{x}$ <p>式中: <math>\alpha</math> 为表征 MRE 隔振器存在的应变硬化行为的模型参数。</p>
文献[112]		$F_1 = k_1 x,$ $F_2 = c_1 \dot{x}_1,$ $F_2 = k_2 (x - x_1),$ $F_v = F_1 + F_2,$ $F_m = k_m x,$ $F_f = F_{fs} + \frac{(x - x_s) [F_{fmax} - \text{sgn}(\dot{x}) f_{fs}]}{x_2 [1 - \text{sgn}(\dot{x}) w] + \text{sgn}(\dot{x}) (x - x_s)}$ $F = F_v + F_m + F_f$ <p>式中: <math>x_1</math> 为黏性元件位移; <math>k_m</math> 为变刚度元件的刚度系数; <math>F_f</math> 和 <math>F_{fmax}</math> 分别为摩擦力和最大摩擦力; <math>x_2</math> 为 <math>F_f = F_{fmax}/2</math> 时的位移; <math>F_{fs}</math> 和 <math>x_s</math> 分别为静力平衡时的摩擦力和位移; <math>w = F_{fs}/F_{fmax}</math>。</p>

备、测试等方面尚未建立起统一标准,不同测试方法导致数据差异较大,无法直接比较。现阶段鲜有能投入土木工程领域进行应用的 MRE,天然橡胶基 MRE 具有较好的力学性能,但还需提高相对磁流变效应,才能有效扩大隔震(振)支座刚度变化范围。对于材料制备,可结合新兴技术,如 3D 打印等,从 MRE 结构、制备方法进行革新,解决 MRE 力学性能和相对磁流变效应相互影响的问题,使 MRE 能够广泛应用。

(2)基于磁偶极子的力学模型经不断完善,从仅考虑单一链模型发展至考虑多链相互作用、不同链形态的影响,但模型均引入大量假设,而实际颗粒分布更为复杂。宏观上,MRE 的性态和弹性体相似,但在磁场作用下,磁性粒子的相互作用、基体材料与磁性粒子的相互作用使得 MRE 力学行为变得复杂。可通过先进技术如 CT、电镜扫描等,结合多尺度 MRE 计算模型,经试验数据校验,完善 MRE 本构模型。

(3)MRE 智能隔震(振)支座的研发取得了一定

进展,已设计出多种用于土木工程领域的智能隔震支座,但还需进一步优化设计。隔震(振)支座在承受较大竖向荷载同时还需满足较大剪切变形,而现有试验中的应变鲜有超过 10%,并且钢板与 MRE 存在黏结失效的问题。隔震(振)支座在极限使用状态下须保证能输出稳定磁场,不断优化磁路,合理控制器件尺寸以满足工程需要;同时,还需减小电磁线圈发热对 MRE 性能的影响,综合考虑各种因素优化智能隔震(振)支座的结构设计。

(4)控制算法是控制智能隔震(振)支座的“中枢大脑”。通过试验发现,经历相同地震动时,不同算法得到的结构响应存在差异。因此,还需不断优化算法、深度学习,以适应不同类型地震动。控制算法的混合使用也是一个发展方向,但要考虑算法复杂化带来“时滞”的不利影响,在实现控制要求的同时,应尽量简化。

参考文献:

References:

[1] 周福霖. 隔震、消能减震与结构控制体系——终止我

- 国城乡地震灾难的必然技术选择[J]. 城市与减灾, 2016(5):1-10.
- ZHOU Fu-lin. Isolation, Energy Dissipation and Structural Control System; The Inevitable Technical Choice for Ending the Earthquake disaster in Urban and Rural Areas of China[J]. City and Disaster Reduction, 2016(5):1-10.
- [2] 许阳光, 龚兴龙, 万强, 等. 磁敏智能软材料及磁流变机理[J]. 力学进展, 2015, 45: 461-495.
- XU Yang-guang, GONG Xing-long, WAN Qiang, et al. Magneto-sensitive Smart Soft Material and Magnetorheological Mechanism[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45: 461-495.
- [3] 巫金波, 温维佳. 场诱导软物质智能材料研究进展[J]. 物理学报, 2016, 65(18): 188301.
- WU Jin-bo, WEN Wei-jia. Research Progress of Field-induced Soft Smart Materials[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(18): 188301.
- [4] 龚微, 熊世树, 谭平, 等. 拟负刚度磁流变智能隔震系统振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 1-10.
- GONG Wei, XIONG Shi-shu, TAN Ping, et al. Shaking Table Test of Smart Isolation System with Magneto-rheological Damper Employing Pseudo-negative-stiffness Control Algorithm[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 1-10.
- [5] RABINOW J. The Magnetic Fluid Clutch[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948, 67(2): 1308-1315.
- [6] UBAIDILLAH, SUTRISNO J, PURWANTO A, et al. Recent Progress on Magnetorheological Solids; Materials, Fabrication, Testing, and Applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(5): 563-597.
- [7] 温舒瑞, 杨云峰, 李凤明, 等. 新型声学超材料梁带隙特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 194-199.
- WEN Shu-rui, YANG Yun-feng, LI Feng-ming, et al. Band-gap Property of Novel Acoustic Metamaterial Beam[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 194-199.
- [8] 丁丽, 胡涛, 曹旭峰, 等. 导电性磁流变弹性体的研究进展[J]. 固体力学学报, 2018, 39(6): 553-577.
- DING Li, HU Tao, CAO Xu-feng, et al. Research Progress on Conductive Magnetorheological Elastomers[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(6): 553-577.
- [9] SHIGA T, OKADA A, KURAUCHI T. Magnetorheological Behavior of Composite Gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1995, 58(4): 787-792.
- [10] SCHUMANN M, ODENBACH S. In-situ Observation of the Particle Microstructure of Magnetorheological Elastomers in Presence of Mechanical Strain and Magnetic Fields[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 441: 88-92.
- [11] ALIAS N F, MUTHALIF A G A, ARPAN K A M, et al. Experimental Investigation of Static Properties of Magnetorheological Elastomer[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2018, 42(2): 185-197.
- [12] LI Y C, LI J C, LI W H, et al. A State-of-the-art Review on Magnetorheological Elastomer Devices[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 123001.
- [13] GAVRILOVICI A M, ANITAS E M, CHIRIGIU L, et al. Magnetodielectric Effects in Magnetorheological Elastomers Based on Polymer Fabric, Silicone Rubber, and Magnetorheological Suspension[J]. Advances in Polymer Technology, 2019, 2019: 1-5.
- [14] HOANG N, ZHANG N, DU H. An Adaptive Tunable Vibration Absorber Using a New Magnetorheological Elastomer for Vehicular Powertrain Transient Vibration Reduction[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(1): 015019.
- [15] 李锐, 陈伟民, 廖昌荣, 等. 基于磁流变技术的发动机隔振控制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 183-190.
- LI Rui, CHEN Wei-min, LIAO Chang-rong, et al. Engine Isolation Control via Magnetorheological Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 183-190.
- [16] 王贡献, 周鹏中, 袁建明, 等. 起重机回转传动系统启动冲击载荷磁流变控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 16-20.
- WANG Gong-xian, ZHOU Peng-zhong, YUAN Jian-ming, et al. Magnetorheological Control for Shock Loads Induced by Start of Crane Slewing Transmission System[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 43(2): 16-20.
- [17] 王贡献, 周鹏中, 胡勇, 等. 基于磁流变技术的回转机构制动冲击控制[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(9): 1306-1310.
- WANG Gong-xian, ZHOU Peng-zhong, HU Yong, et al. Control of Braking Impact of Slewing Mechanism Based on Magnetorheological Technology[J].

- Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(9): 1306-1310.
- [18] 赖俊杰, 浮洁, 白俊峰, 等. 精密加工平台隔振系统多频振动控制[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 242-249.
- LAI Jun-jie, FU Jie, BAI Jun-feng, et al. Vibration Control of a Precision Fabrication Platform Under Multiple Frequency Excitations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(10): 242-249.
- [19] 孙玉华, 柯尚娟, 王国成, 等. 新型微耕机磁流变弹性体隔振系统控制策略仿真[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 218-225.
- SUN Yu-hua, KE Shang-juan, WANG Guo-cheng, et al. Control Strategy Simulation Analysis of a New Micro-cultivator MR Elastomer Vibration Isolation System[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 218-225.
- [20] 龚兴龙, 李剑锋, 张先舟, 等. 磁流变弹性体力学性能测量系统的建立[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 733-735.
- GONG Xing-long, LI Jian-feng, ZHANG Xian-zhou, et al. Development of Testing System for Properties of Magnetorheological Elastomers [J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(5): 733-735.
- [21] 龚兴龙, 邓华夏, 李剑锋, 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): 1192-1203.
- GONG Xing-long, DENG Hua-xia, LI Jian-feng, et al. Magnetorheological Elastomers and Corresponding Semi-active Vibration Absorption Technology [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(10): 1192-1203.
- [22] 余森, 严小锐, 毛林章. 一种刚度、阻尼可控的新智能材料——磁流变弹性体[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 103-107.
- YU Miao, YAN Xiao-rui, MAO Lin-zhang, et al. A New Smart Material with Controllable Stiffness and Damping — Magnetorheological Elastomer[J]. Materials Reports, 2007, 21(7): 103-107.
- [23] 余森. 刚柔并济——具有磁敏特性的粘弹性智能材料[J]. 中国材料进展, 2018, 37(10): 791-802, 816.
- YU Miao. "Couple Hardness with Softness" — Viscoelastic Smart Materials with Magnetic-sensitive Characteristics[J]. Materials China, 2018, 37(10): 791-802, 816.
- [24] 涂建维, 朱倩莹, 刘凡, 等. 新型防泄漏磁流变阻尼器的密封构造与力学模型[J]. 土木工程学报, 2018, 51(增2): 92-97.
- TU Jian-wei, ZHU Qian-ying, LIU Fan, et al. New Sealing Device and Mechanical Model of Leakproof MR Damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(S2): 92-97.
- [25] LEE C W, KIM I H, JUNG H J. Fabrication and Characterization of Natural Rubber-based Magnetorheological Elastomers at Large Strain for Base Isolators[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-12.
- [26] AGARWAL K, PRASAD M, SHARMA R B, et al. Studies on Microstructural and Thermophysical Properties of Polymer Nanocomposite Based on Polyphenylene Oxide and Ferrimagnetic Iron Oxide[J]. Polymer Testing, 2011, 30(1): 155-160.
- [27] ZHANG W, GONG X L, XUAN S H, et al. High-performance Hybrid Magnetorheological Materials; Preparation and Mechanical Properties[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(24): 12471-12476.
- [28] HU Y, WANG Y L, GONG X L, et al. New Magnetorheological Elastomers Based on Polyurethane/Si-rubber Hybrid[J]. Polymer Testing, 2005, 24(3): 324-329.
- [29] ZHANG W, GONG X L, JIANG W Q, et al. Investigation of the Durability of Anisotropic Magnetorheological Elastomers Based on Mixed Rubber[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(8): 085008.
- [30] CHIKH N, NOUR A, AGUIB S, et al. Dynamic Analysis of the Non-linear Behavior of a Composite Sandwich Beam with a Magnetorheological Elastomer Core[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 29(3): 271-283.
- [31] PERALES-MARTINEZ I A, PALACIOS-PINEDA L M, LOZANO-SANCHEZ L M, et al. Enhancement of a Magnetorheological PDMS Elastomer with Carbonyl Iron Particles[J]. Polymer Testing, 2017, 57: 78-86.
- [32] WAN Y X, XIONG Y P, ZHANG S M. Temperature Dependent Dynamic Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers; Experiment and Modeling[J]. Composite Structures, 2018, 202: 768-773.
- [33] GAO W, WANG X Z. Dynamic Magneto-mechanical Properties of Magneto-sensitive Elastomers Determined Using a New Experimental Test Involving Forced Longitudinal Vibration[J]. AIP Advances, 2019, 9(11): 115214.
- [34] VATANDOOST H, HEMMATIAN M, SEDAGHATI R, et al. Dynamic Characterization of Isotropic and Anisotropic Magnetorheological Elastomers in the Oscillatory Squeeze Mode Superimposed on Large



- Static Pre-strain[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2020,182:107648.
- [35] 夏永强,余 森,刘胜龙. 磁流变弹性体隔振缓冲器设计及实验研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(9):196-200,252.
- XIA Yong-qiang, YU Miao, LIU Sheng-long. Design and Experimental Study on Isolation Buffer of Magnetorheological Elastomer[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(9):196-200, 252.
- [36] GE L, GONG X L, FAN Y C, et al. Preparation and Mechanical Properties of the Magnetorheological Elastomer Based on Natural Rubber/Rosin Glycerin Hybrid Matrix[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(11):115029.
- [37] VASUDEVAN M P, SUDEEP P M, AL-OMARI I A, et al. Enhanced Microactuation with Magnetic Field Curing of Magnetorheological Elastomers Based on Iron-natural Rubber Nanocomposites[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2015, 38(3):689-694.
- [38] LIAO G, XU Y, WANG F, et al. Influence of  $\gamma$  Radiation on the Shear Modulus of Magnetorheological Elastomer[J]. *Materials Letters*, 2016, 174:79-81.
- [39] RAJHAN N H, HAMID H A, IBRAHIM A, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomer[J]. *Journal Teknologi*, 2016, 78(4/5):33-37.
- [40] GORMAN D, MURPHY N, EKINS R, et al. The Evaluation of the Effect of Strain Limits on the Physical Properties of Magnetorheological Elastomers Subjected to Uniaxial and Biaxial Cyclic Testing[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 103:1-4.
- [41] FAN Y C, GONG X L, JIANG W Q, et al. Effect of Maleic Anhydride on the Damping Property of Magnetorheological Elastomers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(5):055015.
- [42] SUN T L, GONG X L, JIANG W Q, et al. Study on the Damping Properties of Magnetorheological Elastomers Based on Cis-polybutadiene Rubber[J]. *Polymer Testing*, 2008, 27(4):520-526.
- [43] ZHANG W, GONG X L, SUN T L, et al. Effect of Cyclic Deformation on Magnetorheological Elastomers[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2010, 23(2):226-230.
- [44] TIAN Y, LIU Y Q, HE M H, et al. High Damping Properties of Magnetic Particles Doped Rubber Composites at Wide Frequency[J]. *Materials Research Bulletin*, 2013, 48(5):2002-2005.
- [45] XU Y G, GONG X L, XUAN S H, et al. A High-performance Magnetorheological Material: Preparation, Characterization and Magnetic-mechanic Coupling Properties[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(11):5246-5254.
- [46] BOCZKOWSKA A, AWIETJAN S F, PIETRZKO S, et al. Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers Under Shear Deformation[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2012, 43(2):636-640.
- [47] LIU T X, GONG X L, XU Y G, et al. Magneto-induced Large Deformation and High-damping Performance of a Magnetorheological Elastomer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(10):105028.
- [48] GE L, XUAN S H, LIAO G J, et al. Stretchable Polyurethane Sponge Reinforced Magnetorheological Material with Enhanced Mechanical Properties[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(3):037001.
- [49] ZHANG Y, FANG F, HUANG W, et al. Dynamic Mechanical Hysteresis of Magnetorheological Elastomers Subjected to the Cyclic Loading and Periodic Magnetic Field[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6:1-12.
- [50] ZHANG W, GONG X L, JIANG W Q, et al. Investigation of the Durability of Anisotropic Magnetorheological Elastomers Based on Mixed Rubber[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(8):085008.
- [51] SONG X C, WANG W J, YANG F F, et al. A Novel Approach for Fabricating Adjustable Zero Field-modulus Magnetorheological Elastomer Based on IPN Matrix[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10):105706.
- [52] SONG X C, WANG W J, YANG F F, et al. The Study of Natural Rubber/Polybutadiene Rubber Hybrid Matrix-based Magnetorheological Elastomer[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2019, 43:1-19.
- [53] UBAIDILLAH, IMADUDDIN F, LI Y, et al. A New Class of Magnetorheological Elastomers Based on Waste Tire Rubber and the Characterization of Their Properties[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(11):115002.
- [54] 李光辉, 黄学功, 王 昊. 磁流变弹性体的制备及力学性能研究[J]. *材料导报*, 2013, 27(10):36-39.
- LI Guang-hui, HUANG Xue-gong, WANG Jiong. Fabrication and Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomer[J]. *Materials Reports*, 2013, 27(10):36-39.
- [55] LENG J S, HUANG W M, LAN X, et al. Significantly Reducing Electrical Resistivity by Forming Conductive Ni Chains in a Polyurethane Shape-memory Poly-

- mer/Carbon-black Composite [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(20): 204101.
- [56] KOO J H, DAWSON A, JUNG H J. Characterization of Actuation Properties of Magnetorheological Elastomers with Embedded Hard Magnetic Particles [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(9): 1049-1054.
- [57] BEHROOZ M, SUTRISNO J, ZHANG L Y, et al. Behavior of Magnetorheological Elastomers with Coated Particles [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(3): 035026.
- [58] PADALKA O, SONG H J, WERELEY N, et al. Stiffness and Damping in Fe, Co, and Ni Nanowire-based Magnetorheological Elastomeric Composites [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 2275-2277.
- [59] HAPIPI N, AZIZ S A A, MAZLAN S A, et al. The Field-dependent Rheological Properties of Plate-like Carbonyl Iron Particle-based Magnetorheological Elastomers [J]. Results in Physics, 2019, 12: 2146-2154.
- [60] WINGER J, SCHUMANN M, KUPKA A, et al. Influence of the Particle Size on the Magnetorheological Effect of Magnetorheological Elastomers [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 481: 176-182.
- [61] 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.
- [62] AZIZ S A A, MAZLAN S A, ISMAIL N I, et al. Effects of Multiwall Carbon Nanotubes on Viscoelastic Properties of Magnetorheological Elastomers [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): 077001.
- [63] AZIZ S A A, UBAIDILLAH, MAZLAN S A, et al. Implementation of Functionalized Multiwall Carbon Nanotubes on Magnetorheological Elastomer [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 10122-10134.
- [64] ZHANG X Z, PENG S L, WEN W J, et al. Analysis and Fabrication of Patterned Magnetorheological Elastomers [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(4): 045001.
- [65] WOODS B K S, WERELEY N, HOFFMASTER R, et al. Manufacture of Bulk Magnetorheological Elastomers Using Vacuum Assisted Resin Transfer Molding [J]. International Journal of Modern Physics B, 2007, 21(28/29): 5010-5017.
- [66] BASTOLA A K, HOANG V T, LI L. A Novel Hybrid Magnetorheological Elastomer Developed by 3D Printing [J]. Materials & Design, 2017, 114: 391-397.
- [67] BASTOLA A K, PAUDEL M, LI L. Development of Hybrid Magnetorheological Elastomers by 3D Printing [J]. Polymer, 2018, 149: 213-228.
- [68] BASTOLA A K, PAUDEL M, LI L. Line-patterned Hybrid Magnetorheological Elastomer Developed by 3D Printing [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2020, 31(3): 377-388.
- [69] BASTOLA A K, PAUDEL M, LI L. Dot-patterned Hybrid Magnetorheological Elastomer Developed by 3D Printing [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 494: 165825.
- [70] WANG Y P, DING L, ZHAO C Y, et al. A Novel Magnetorheological Shear-stiffening Elastomer with Self-healing Ability [J]. Composites Science and Technology, 2018, 168: 303-311.
- [71] TONG Y, DONG X F, QI M. Payne Effect and Damping Properties of Flower-like Cobalt Particles-based Magnetorheological Elastomers [J]. Composites Communications, 2019, 15: 120-128.
- [72] LI Y P, QI S, FU J, et al. Fabrication and Mechanical Behaviors of Iron-nickel Foam Reinforced Magnetorheological Elastomer [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(11): 110539.
- [73] AZIZ S A A, MAZLAN S A, UBAIDILLAH U, et al. Enhancement of Viscoelastic and Electrical Properties of Magnetorheological Elastomers with Nanosized Ni-Mg Cobalt-ferrites as Fillers [J]. Materials, 2019, 12(21): 3531.
- [74] KHAIRI M H A, FATAH A Y A, MAZLAN S A, et al. Enhancement of Particle Alignment Using Silicone Oil Plasticizer and Its Effects on the Field-dependent Properties of Magnetorheological Elastomers [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(17): 4085.
- [75] DARGAHI A, SEDAGHATI R, RAKHEJA S. On the Properties of Magnetorheological Elastomers in Shear Mode: Design, Fabrication and Characterization [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 159: 269-283.
- [76] WEN Q Q, SHEN L J, LI J, et al. Temperature Dependent Magneto-mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 497: 165998.
- [77] JUNG H S, KWON S H, CHOI H J, et al. Magnetic Carbonyl Iron/Natural Rubber Composite Elastomer and Its Magnetorheology [J]. Composite Structures, 2016, 136: 106-112.

- [78] AN J S, KWON S H, CHOI H J, et al. Modified Silane-coated Carbonyl Iron/Natural Rubber Composite Elastomer and Its Magnetorheological Performance [J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 1020-1026.
- [79] 卢 坤, 刘 翎, 杨志荣, 等. 基于磁流变弹性体的推进轴系半主动式吸振器研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(15): 36-42.  
LU Kun, LIU Ling, YANG Zhi-rong, et al. Semi-active Dynamic Absorber of a Ship Propulsion Shafting Based on MREs[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(15): 36-42.
- [80] PLACHY T, KRATINA O, SEDLACIK M. Porous Magnetic Materials Based on EPDM Rubber Filled with Carbonyl Iron Particles [J]. *Composite Structures*, 2018, 192: 126-130.
- [81] BURGAS E, GOKSUZOGLU M. Effects of Magnetic Particles and Carbon Black on Structure and Properties of Magnetorheological Elastomers [J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106233.
- [82] SHEN Y, GOLNARAGHI M F, HEPPLER G R. Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15(1): 27-35.
- [83] DAVIS L C. Model of Magnetorheological Elastomers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(6): 3348-3351.
- [84] 尹兵雪, 王明先, 佟 昱, 等. 取向磁场对钴颗粒填充硅橡胶磁流变弹性体动态黏弹性的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1414-1420.  
YIN Bing-xue, WANG Ming-xian, TONG Yu, et al. Effect of Orientation Magnetic Field on Dynamic Viscoelasticity of Cobalt Particles Filled Silicone Rubber Magnetorheological Elastomers [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1414-1420.
- [85] YANG J, GONG X L, DENG H X, et al. Investigation on the Mechanism of Damping Behavior of Magnetorheological Elastomers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(12): 125015.
- [86] JOLLY M R, CARLSON J D, MUNOZ B C. A Model of the Behaviour of Magnetorheological Materials [J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(5): 607-614.
- [87] ZHU Y S, GONG X L, DANG H, et al. Numerical Analysis on Magnetic-induced Shear Modulus of Magnetorheological Elastomers Based on Multi-chain Model [J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2006, 19(2): 126-130.
- [88] LI W H, ZHANG X Z. A Study of the Magnetorheological Effect of Bimodal Particle Based Magnetorheological Elastomers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(3): 035002.
- [89] IVANEYKO D, TOSHCHEVIKOV V P, SAPHIAN-NIKOVA M, et al. Magneto-sensitive Elastomers in a Homogeneous Magnetic Field: A Regular Rectangular Lattice Model [J]. *Macromolecular Theory and Simulations*, 2011, 20(6): 411-424.
- [90] IVANEYKO D, TOSHCHEVIKOV V P, BORIN D, et al. Mechanical Properties of Magneto-sensitive Elastomers in a Homogeneous Magnetic Field: Theory and Experiment [J]. *Macromolecular Symposia*, 2014, 338(1): 96-107.
- [91] LI W H, ZHOU Y, TIAN T F. Viscoelastic Properties of MR Elastomers Under Harmonic Loading [J]. *Rheologica Acta*, 2010, 49(7): 733-740.
- [92] 王 奇, 董旭峰, 李芦钰, 等. 磁流变弹性体松弛行为的本构描述 [J]. *复合材料学报*, 2013, 30(增): 138-141.  
WANG Qi, DONG Xu-feng, LI Lu-yu, et al. Constitutive Description for Relaxation Behavior of Magnetorheological Elastomer [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(S): 138-141.
- [93] CHEN L, JERRAMS S. A Rheological Model of the Dynamic Behavior of Magnetorheological Elastomers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 013513.
- [94] 朱俊涛, 徐赵东. 基于分数阶导数的磁流变弹性体参数模型 [J]. *工程力学*, 2012, 29(8): 45-49, 79.  
ZHU Jun-tao, XU Zhao-dong. The Parameter Model of Magnetorheological Elastomer Based on Fractional Derivative [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 45-49, 79.
- [95] GUO F, DU C B, LI R P. Viscoelastic Parameter Model of Magnetorheological Elastomers Based on Abel Dashpot [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6: 629386.
- [96] EEM S H, JUNG H J, KOO J H. Modeling of Magnetorheological Elastomers for Harmonic Shear Deformation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3080-3083.
- [97] WAHAB N A, MAZLAN S A, UBAIDILLAH. Fabrication and Investigation on Field-dependent Properties of Natural Rubber Based Magneto-rheological Elastomer Isolator [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(10): 107002.
- [98] LI Y C, LI J C, LI W H, et al. Development and Characterization of a Magnetorheological Elastomer Based Adaptive Seismic Isolator [J]. *Smart Materials and*

- Structures, 2013, 22(3):035005.
- [99] YARRA S, GORDANINEJAD F, BEHROOZ M, et al. Performance of a Large-scale Magnetorheological Elastomer-based Vibration Isolator for Highway Bridges[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(20):3890-3901.
- [100] GU X Y, YU Y, LI Y C, et al. Experimental Study of Semi-active Magnetorheological Elastomer Base Isolation System Using Optimal Neuro Fuzzy Logic Control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 119:380-398.
- [101] SUN S S, YANG J, DU H P, et al. Development of Magnetorheological Elastomers-based Tuned Mass Damper for Building Protection from Seismic Events[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(8):1777-1789.
- [102] YANG C Y, FU J, YU M, et al. A New Magnetorheological Elastomer Isolator in Shear-compression Mixed Mode[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(10):1290-1300.
- [103] LENG D X, XIAO H Y, SUN L, et al. Study on a Magnetorheological Elastomer-base Device for Off-shore Platform Vibration Control[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 30(2):243-255.
- [104] WANG Q, DONG X F, LI L Y, et al. Study on an Improved Variable Stiffness Tuned Mass Damper Based on Conical Magnetorheological Elastomer Isolators[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(10):105028.
- [105] YANG J, SUN S S, DU H, et al. A Novel Magnetorheological Elastomer Isolator with Negative Changing Stiffness for Vibration Reduction[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(10):105023.
- [106] LI Y, LI J, TIAN T, et al. A Highly Adjustable Magnetorheological Elastomer Base Isolator for Applications of Real-time Adaptive Control[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9):095020.
- [107] XING Z W, YU M, FU J, et al. A Laminated Magnetorheological Elastomer Bearing Prototype for Seismic Mitigation of Bridge Superstructures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(14):1818-1825.
- [108] EEM S H, JUNG H J, KOO J H. Application of MR Elastomers for Improving Seismic Protection of Base-isolated Structures[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2011, 47(10):2901-2904.
- [109] EEM S H, JUNG H J, KOO J H. Seismic Performance Evaluation of an MR Elastomer-based Smart Base Isolation System Using Real-time Hybrid Simulation[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(5):055003.
- [110] BEHROOZ M, WANG X J, GORDANINEJAD F. Performance of a New Magnetorheological Elastomer Isolation System[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(4):045014.
- [111] YANG J, SUN S S, TIAN T F, et al. Development of a Novel Multi-layer MRE Isolator for Suppression of Building Vibrations Under Seismic Events[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 70-71:811-820.
- [112] NGUYEN X B, KOMATSUZAKI T, IWATA Y, et al. Modeling and Semi-active Fuzzy Control of Magnetorheological Elastomer-based Isolator for Seismic Response Reduction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 101:449-466.
- [113] CHEN X, LI Y C, LI J C, et al. A Dual-loop Adaptive Control for Minimizing Time Response Delay in Real-time Structural Vibration Control with Magnetorheological (MR) Devices[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(1):015005.
- [114] GU X Y, LI J C, LI Y C. Experimental Realisation of the Real-time Controlled Smart Magnetorheological Elastomer Seismic Isolation System with Shake Table[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(1):e2467.
- [115] SUBRAMANIAM R S, REINHORN A M, RILEY M A, et al. Hybrid Control of Structures Using Fuzzy Logic[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 1996, 11(1):1-17.
- [116] ZHOU L, CHANG C C, SPENCER B F. Intelligent Technology-based Control of Motion and Vibration Using MR Dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 1(1):100-110.
- [117] YANG J, DU H P, LI W H, et al. Experimental Study and Modeling of a Novel Magnetorheological Elastomer Isolator[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(11):117001.
- [118] LI Y C, LI J C. A Highly Adjustable Base Isolator Utilizing Magnetorheological Elastomer: Experimental Testing and Modeling[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2015, 137(1):011009.