

文章编号: 1001-4888(2017)06-0751-09

磁流变剪切变硬胶的“磁力”耦合效应研究^{*}

龚立平¹, 王胜², 尹冠生¹, 宣守虎²

(1. 长安大学 理学院, 西安 710061; 2. 中国科学技术大学 近代力学系 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 剪切变硬胶(shear stiffening gel)是一种新型智能材料, 由于其在外界应力刺激下模量可以迅速增大, 表现出优良的剪切变硬效应, 所以在人体防护和阻尼隔振等领域具有重要的应用前景。本文将软磁性羰基铁粒子(CI)引入到剪切变硬胶体中, 成功制备出多功能磁流变剪切变硬胶复合材料(MSC), 通过流变测试系统分析了该复合材料的“磁力”耦合效应。研究表明, MSC 具有优良的剪切变硬效应(S-ST effect), 其储能模量随着剪切频率的增加而显著增大(4 个数量级)。磁控测试和蠕变实验结果均表明该复合材料对于外界磁场表现出较好的响应性能。当羰基铁粉含量为 60wt% 时, 样品的模量随着磁场的增加而迅速增大, 其最大模量高达 2.44 MPa。在磁场和剪切应力双重刺激下, 复合材料的剪切变硬效应得到极大提高, 且剪切应变增大, 样品模量相对降低。同时, 该材料在低温下也具有良好的剪切变硬和磁流变效应, 高温下性能略有下降。最后, 探讨了 MSC 在磁场、剪切场耦合条件下性能增强原因, 发现“B-O 化学交联键”和 CI 粒子链的形成是该复合材料具有优良剪切变硬效应和磁流变性能的主要原因。

关键词: 剪切变硬性能; 磁流变效应; 磁力耦合行为; 实验力学

中图分类号: O373; TH703

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-314

0 引言

剪切增稠材料是一种应变率相关的新型智能材料。常温下, 材料极为柔软, 处于粘流态, 当外界剪切的应变率超过某一临界值时, 材料的粘度会急剧上升, 呈现固态状, 而一旦撤除外力, 材料迅速恢复至其初始状态^[1-5]。由于具有这样独特的流变特性, 剪切增稠材料已被广泛运用于人体防护、吸能和振动控制等诸多领域^[6-10]。常见的剪切增稠材料为剪切增稠液, 主要是由微纳米粒子通过球磨等手段分散到有机溶剂中制备而成的。然而, 液体材料存在制备工艺繁琐、性能不稳定以及需要密封保存等弊端, 因而严重限制了该材料的实际工程应用。

作为一种新型剪切增稠材料, 剪切变硬胶是一种固态有机硼硅氧烷聚合物, 商业命名为 silly putty。其常温下为柔性固态, 当受到快速冲击时材料迅速变硬, 呈现固态特性, 撤除外力后材料重新恢复到柔性状态。基于其特有的流变特征, 该材料在阻尼隔振等领域具有广阔的应用前景, 因而受到越来越多的关注。目前为止, 多功能剪切增稠材料的研制及力学性能分析成为一个十分重要的研究方向。Palmer 等人将剪切变硬胶引入到聚氨酯海绵中, 成功制备了一种新型抗冲击衬垫, 并研究了其抗冲击性能^[11]。Conor 将石墨烯引入到剪切变硬胶中, 制备了一种灵敏度极高的压力传感器^[12]。Wang 等人将极少量的碳纳米管掺杂到剪切变硬胶体内, 发现其具有良好的应变率相关的导电特性和自愈性能, 因

^{*} 收稿日期: 2017-08-11; 修回日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(11372301/11772320)资助

通讯作者: 尹冠生(1958—), 男, 教授/博士生导师, 主要研究领域: 结构动力学、工程力学。Email: yings@chd.edu.cn

宣守虎(1981—), 男, 副教授/硕士生导师, 主要研究领域: 智能材料制备与应用。Email: xuansh@ustc.edu.cn

而在防护同时能够感应材料所受冲击的大小^[13]。

磁流变聚合物材料是由软磁性微纳米粒子与高分子基体复合而成的。其力学性能能够通过外加磁场进行调控,因而被广泛应用于振动控制、磁性传感和电磁屏蔽等诸多领域^[14-17]。鉴于磁流变材料特殊的磁致效应,将磁性粒子与剪切变硬胶相结合有望提高剪切变硬胶的力学性能。本课题组将羰基铁粉引入到剪切变硬胶中制备出一种同时具有优良磁增强和剪切变硬效应的磁流变剪切变硬胶材料。已有成果表明,在磁场下该复合材料的剪切变硬性能出现协效增强。同时,磁流变剪切变硬胶的力学性能显示出独特的磁控特性,因而有望应用于主动防护和阻尼隔振。然而,由于剪切变硬效应独特的非线性特征,对磁流变剪切变硬胶材料的力学性能机理研究较为困难。深入分析磁流变剪切变硬胶材料的流变行为,特别是在磁场和剪切应力多场耦合下的性能特点,亟待进一步展开。

本文将羰基铁粉掺杂到剪切变硬胶中制备出磁流变剪切变硬胶材料,并深入研究了该材料磁力耦合性能。研究表明材料在受到剪切应力时表现出了良好的剪切变硬效应。同时,羰基铁粉良好的磁响应性能也赋予该多功能材料较好的磁流变性能。蠕变实验结果显示磁流变剪切变硬胶剪切储能模量随着外加磁场的增强迅速增大,而材料的最大剪切应变急剧减小。材料在磁场和剪切应力的协调刺激下,其储能模量得到极大提高,该材料的剪切变硬特性可以通过外加磁场进行实时调控。同时,我们也探究了剪切应变和温度对流变性能的影响,分析了该材料的磁力耦合作用机制,为该复合材料的实际应用提供了有力的实验指导和理论依据。

1 磁流变剪切变硬胶的研制

1.1 基本材料介绍

二甲基硅氧烷、硼酸(浓度 99.8%)和乙醇(浓度 99.8%)均购买于国药集团化学试剂有限公司,它们用于制备剪切变硬胶基体材料。过氧化苯甲酰为硫化剂。羰基铁粒子(CN 系列,铁含量超过 99.5%)购买于 BASF 公司。所有的试剂都是分析纯且未经过特殊处理。

1.2 剪切变硬胶聚合物基体的制备

将硼酸在 160℃ 高温环境中处理 2h,脱水后得到焦硼酸。再将质量分数为 15% 的焦硼酸和 81% 的二甲基硅氧烷以及 4% 乙醇均匀混合,将混合物放置于高温烘箱中 230℃ 条件下反应 7h,反应结束后取出样品自然冷却即可得到相应的聚合物基体。

1.3 磁流变剪切变硬胶多功能复合材料的制备

用开炼机将剪切变硬胶聚合物基体、羰基铁粉和过氧化苯甲酰均匀混合,保持剪切变硬胶基体和过氧化苯甲酰的质量比为 25 : 1,再将羰基铁粉质量分数分别为 0%、30%、60%、80% 的上述材料在 100℃ 下硫化处理即可得到实验所需多功能复合材料。为方便起见,本文将所制备的不同样品命名为 MSC-X%,其中 X 代表羰基铁粉的质量分数。

1.4 复合材料的性能表征方法

傅里叶红外光谱仪(A Nicolet Model 8700)用于测试剪切变硬胶聚合物基体的红外光谱,测试范围为 4000~500 cm^{-1} 。X 射线衍射仪(TTRAX III)用于测试胶体材料的 XRD 图谱。材料的磁滞回线是用磁滞回线仪(HyMDC)测试得到的。另外,材料的流变性能是通过流变仪(Physica MCR 302, Anton Paar Co, Austria)测试得到的。测试包括两个部分:频率扫描和磁流变测试。在频率扫描测试中,测试样品保持为直径 20mm,厚 1mm 的圆柱状。材料剪切应变振荡幅值设置为 0.1%,剪切频率从 0.1Hz 增加到 100Hz。在磁流变测试过程中,剪切频率为 10Hz,磁场强度由 0mT 增加到 1200mT,预结构化磁场 880mT,时间为 3min。

2 磁流变剪切变硬胶复合材料的性能研究

2.1 剪切变硬胶的成分分析及形貌表征

图 1(a)是剪切变硬胶聚合物基体的 FT-IR 谱图,测试范围为 1750~650 cm^{-1} 。1335 cm^{-1} 的特征峰是 B-O 振动所引起的,1257 cm^{-1} 的强吸收峰表明了 Si-CH₃ 键的存在,1018 cm^{-1} 的峰值对应着 Si-O 键,

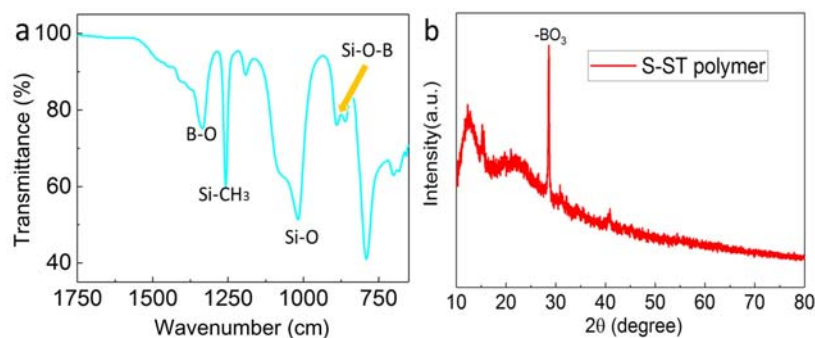


图1 剪切变硬胶基体的 FT-IR 谱图(a)和 XRD 图谱(b)

Fig. 1 FT-IR (a) and XRD (b) pattern of shear stiffening gel

在 889cm^{-1} 和 860cm^{-1} 的两个吸收峰说明高温反应过程形成了 Si-O-B 键。图 1(b) 是聚合物基体的 XRD 图谱。在 28.6° 的吸收峰表明基体中存在 $-\text{BO}_3$ 基团。

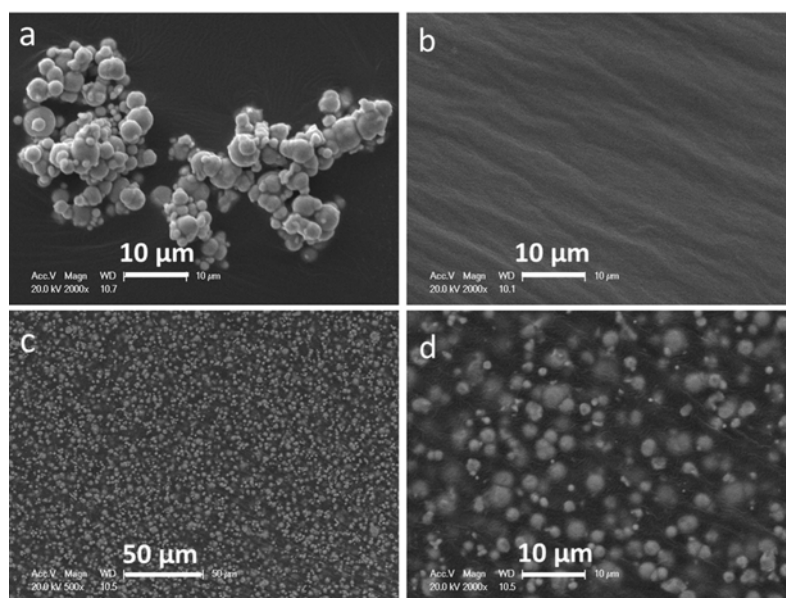


图2 羰基铁粒子(a)、MSC (b)和 MSC-80% (c-d)样品的 SEM 图片

Fig. 2 The SEM images of CI particles (a), MSC (b) and MSC-80% (c-d)

图 2(a) 和 (b) 分别是羰基铁粒子和纯剪切变硬胶的 SEM 图片。由图 2(a) 可知羰基铁粒子为球型结构, 其平均直径约为 $3.6\mu\text{m}$ 。未添加羰基铁粉的剪切变硬胶表面较为光滑, 略微呈条纹状(图 2(b))。图 2(c) 为 MSC-80% 的 SEM 电镜图片, 其中白色点状为 CI 粒子, 羰基铁粒子均匀分布于高分子材料中, 形成了较为规整的结构。图 2(d) 进一步显示出所制备的高分子复合材料具有良好的均匀性, 从而保证了其均一稳定的力学性能。

2.2 磁流变剪切变硬胶材料的剪切变硬性能研究

图 3 为不同羰基铁粉含量剪切变硬胶的剪切变硬性能图。随着剪切频率的增加, 所制备样品的储能模量迅速上升, 表现出了应变率相关性。以 MSC-30% 为例, 当剪切频率为 0.1Hz 时, 其最小储能模量为 150Pa 。随着剪切频率的增加, 样品的储能模量迅速上升。当频率达到 100Hz 时, 材料的储能模量达到 1.13MPa , 增加了近 4 个数量级, 表现出了典型的剪切变硬性能。另外, 羰基铁粉的含量也影响着材料的剪切变硬性能。当羰基铁含量达 $80\text{wt}\%$ 时, 其最大储能模量高达 2.12MPa , 比 MSC-30% 最大模量提高了近 88%。因此, 该材料在剪切或冲击作用下可以表现出优良的变硬性能。为了综合对比所有样品的剪切变硬效应(RSTe%), 本文定义了相对剪切变硬效应来进一步分析其流变性能:

$$\text{RSTe}\% = \frac{G'_{\text{max}} - G'_{\text{min}}}{G'_{\text{min}}} \times 100\%$$

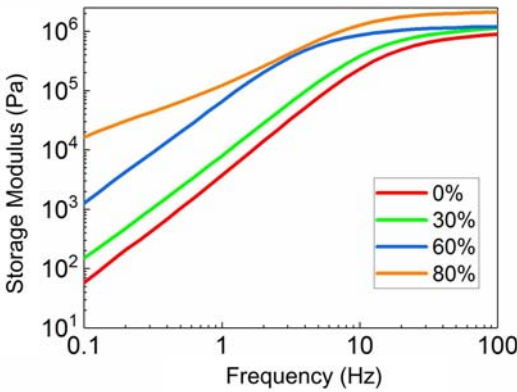


图 3 不同质量分数碳基铁粉掺杂 MSC 的储能模量—剪切频率测试结果
Fig. 3 Storage modulus (G') vs shear frequency of magnetorheological shear stiffening polymer composites with different CI contents

其中, $G'_{\min}$ 为剪切频率为 0.1Hz 时样品的初始模量; $G'_{\max}$ 为剪切频率为 100Hz 时最大的剪切模量, 所有样品的性能参数如表 1 所示。

表 1 频率扫描测试中样品的 $G'_{\max}$, $G'_{\min}$ 和 $RSTe\%$
Tab. 1 The $G'_{\max}$, $G'_{\min}$ and $RSTe\%$ of MSC samples in the frequency tests

CI content	$G'_{\min}$ (Pa)	$G'_{\max}$ (Pa)	$RSTe\%$
0%	58	9.01×10^5	1550728%
30%	150	1.13×10^6	752531%
60%	1252	1.19×10^6	94918%
80%	16239	2.12×10^6	12955%

由表 1 可知, 随着碳基铁粉含量的不断增加, 样品的初始模量和最大模量均不断增大。纯胶体的最大模量只有 0.9MPa, 质地较软。而 MSC 在最大剪切频率下的储能模量显著提高, 表明材料的变硬效果显著增强。综上所述, 本文所制备的复合材料显示出了理想的力学性能, 确保了其在工程领域的应用前景。

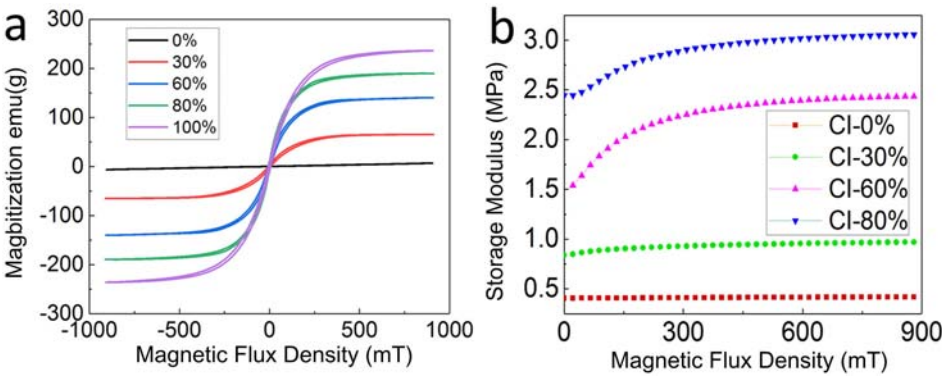


图 4 磁流变剪切变硬胶的磁滞回线(a)和在不同磁场刺激下的磁流变效应测试结果(b)
Fig. 4 The magnetic hysteresis loops of the as-prepared samples (a); Storage modulus (G') vs shear frequency of magnetorheological shear stiffening polymer composites with different CI contents

2.3 磁流变剪切变硬胶材料的流变性能研究

碳基铁粉为软磁性物质, 故掺杂了碳基铁粉的复合材料必然具有明显的磁性。本文选用了磁滞回线仪来表征其相关性能(图 4(a))。由于纯碳基铁的矫顽力很低, 所有磁流变剪切变硬胶样品均表现出软磁性能。碳基铁质量分数分别为 0%、30%、60%、80% 的样品的饱和磁化强度分别是 8emu/g、

65emu/g、140.4emu/g 和 189.5emu/g,比纯羰基铁的饱和磁化强度 235.8emu/g 要低。随着磁性颗粒含量增加,样品的饱和磁化强度提高,因而材料的磁驱动性能增强。

图 4(b)是样品在磁场刺激下的储能模量变化测试结果。随着磁场强度的增加,材料的储能模量先迅速增大后缓慢增加,最终达到饱和值,表现出了显著的磁流变效应。随着羰基铁含量的不断提高,其初始储能模量也在显著增大,显示出颗粒增强效应。高含量的羰基铁具有更强的磁致增强效应,因此高磁场下的最大模量也随着铁粉含量增加而增大。例如, MSC-30%样品的最大模量为 0.97MPa,而 MSC-60%的最大模量高达 2.44MPa。由磁场引起的储能模量的增大主要是由于粒子链的形成所引起的,故磁场对纯剪切变硬胶的最大模量(0.42MPa)几乎没有影响。同时,相对磁流变效应(RMe%)由下面的公式计算得到:

$$RMe\% = \frac{G'_{max} - G'_{min}}{G'_{min}} \times 100\%$$

其中 G'_{min} 为样品初始模量; G'_{max} 为最大剪切模量。所有样品的模量变化及相对磁流变效应参数见表 2。

表 2 磁场扫描测试中样品的 G'_{min} , G'_{max} 和 RMe%

Tab. 2 The G'_{min} , G'_{max} and RMe% of MSC samples induced by magnetic field

CI content	G'_{min} (Pa)	G'_{max} (Pa)	RMe%
0%	4.07×10^5	4.19×10^5	2.95%
30%	8.38×10^5	9.70×10^5	15.8%
60%	1.54×10^6	2.44×10^6	58.4%
80%	2.44×10^6	3.06×10^6	25.41%

随着铁粉含量提高,材料的磁流变效应相应增加。然而, MSC-80%的磁流变效应要低于 MSC-60%,这是由于 MSC-80%的初始模量过高导致的(表 2)。综合考虑材料的剪切变硬效应和磁流变性能, MSC-60%综合性能最优,所以后续选择 MSC-60%样品进行深入研究。

2.4 磁流变剪切变硬胶材料磁控蠕变性能研究

此外,为了进一步探究磁场对 MSC-60%力学性能的影响,我们表征了样品在不同加载应力和磁场强度下的剪切蠕变性能,其中应力加载时间为 120s,松弛时间 180s。无外加磁场时,在不同应力作用下,样品应变随着时间增加逐渐增大(图 5(a))。当撤去外力后,样品无回复现象,最大应变保持恒定,表现出了良好的可塑性和粘流性。当测试应力从 50Pa 增加至 300Pa 时,复合材料的最大蠕变应变增长了近 800%,可见在一定应力范围内,材料的蠕变应变对于应力变化十分敏感。而加载磁场以后,样品在相同剪切应力作用下最大应变迅速减小。且磁场越大,最大应变越小。例如在 200Pa 应力作用下,加载磁场为 0mT、110mT、165mT 和 220mT 的材料的最大应变值分别为 151.9、2.3、0.4 和 0.1,说明材料的强度随着磁场的增加而迅速增强,这主要是由于在磁场作用下材料内部的羰基铁粒子逐渐形成粒子链,且随着磁场强度的增大,羰基铁粒子链更加完整,因此最大应变值迅速减小,体现出优良的磁致增强效应。此外,撤除应力以后,图 5(b)-(d)中的样品存在明显的回复现象,这主要是因为材料在磁场作用下处于弹性态所导致的。

2.5 磁流变剪切变硬胶材料的“磁力”耦合效应研究

图 6(b)为不同应变条件下, MSC-60%在不同外界磁场与剪切应力协同作用下的流变特性。相比于单一剪切刺激(0mT),材料在受到剪切力和磁场双重刺激作用下,其储能模量显著增大,表现出较好的“磁力”耦合效应,这主要是由于此时材料呈现剪切变硬和磁流变双重效应导致的。在保持剪切频率一定的情况下,材料的储能模量随着磁场强度的增加而增大。例如,当剪切频率为 10Hz,外界磁场为 110mT 时,材料模量为 1.94MPa;而磁场增大到 220mT 时,材料模量增大到 2.44MPa。基于上述结果可以得知,通过控制外界磁场和剪切频率的变化, MSC 的力学性能可以实现定向控制,且调控范围也显著扩大。

此外,研究发现应变在 0.01%~0.1% 范围内,在相同刺激条件下材料的储能模量并未有太大变

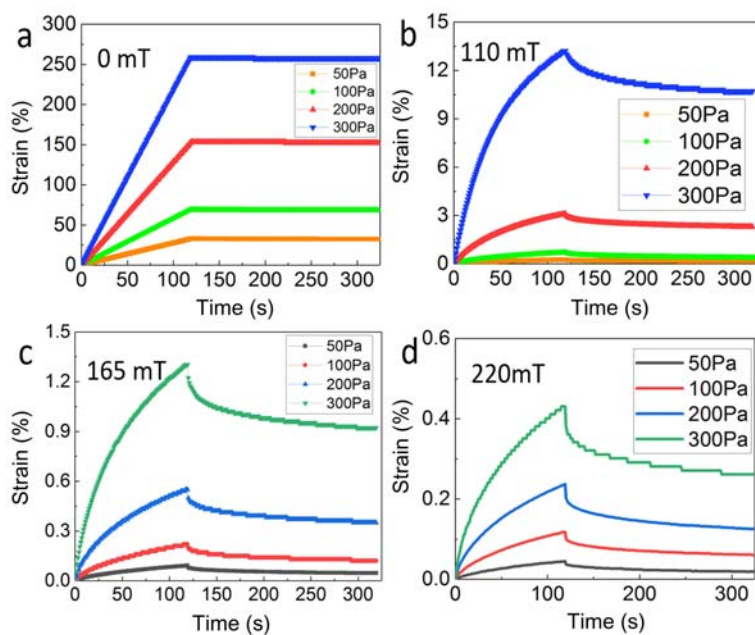


图 5 MSC-60%样品在不同外加应力和磁场刺激下的蠕变性能测试结果

Fig. 5 The shear stress and magnetic field dependent-creep behaviors of MSC-60%

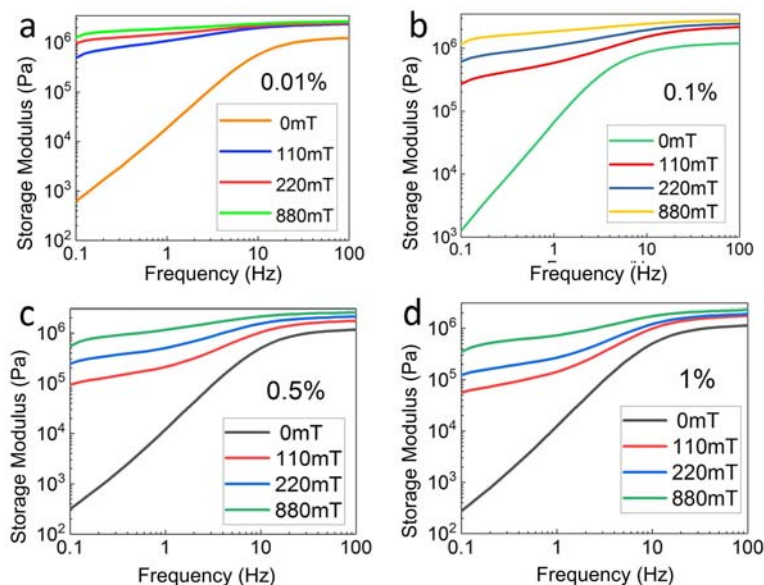


图 6 MSC-60%在应变分别为 0.01% (a)、0.1% (b)、0.5% (c)和 1% (d)时，
外界磁场和剪切应力协同作用下的流变性能测试结果

Fig. 6 The rheological properties of MSC-60% under the excitation of shear stress and
magnetic field at the strain of 0.01% (a), 0.1% (b), 0.5% (c) and 1% (d)

化,显示出良好的稳定性。而随着应变超过 0.5%,材料的整体强度下降。例如,当磁场为 220mT,剪切频率为 1Hz 时,样品的模量随着应变从 0.1%增大到 1%,其数值从 1.85MPa 降低到 0.27MPa。这主要是由于过大的应变破坏了材料内部的结构,因此导致了性能明显下降。通过上述结果可知,该复合材料的流变性能可以通过调节外界磁场强度和剪切频率而加以定向控制。

由于高分子材料的性能具有温度相关性,所以研究温度对 MSC 力学性能的影响至关重要。图 7 为 MSC-60%材料在不同温度条件下的流变性能测试结果。当温度降为 10℃时,其“磁力”耦合的流变性能与室温下的性能相差较小(图 7(a)和(b)),可见该材料在低温工作环境下仍能保持优良的剪切变硬和磁流变性能。而当外界温度上升到 50℃和 70℃时,在相同刺激条件下,材料的最大储能模量都有

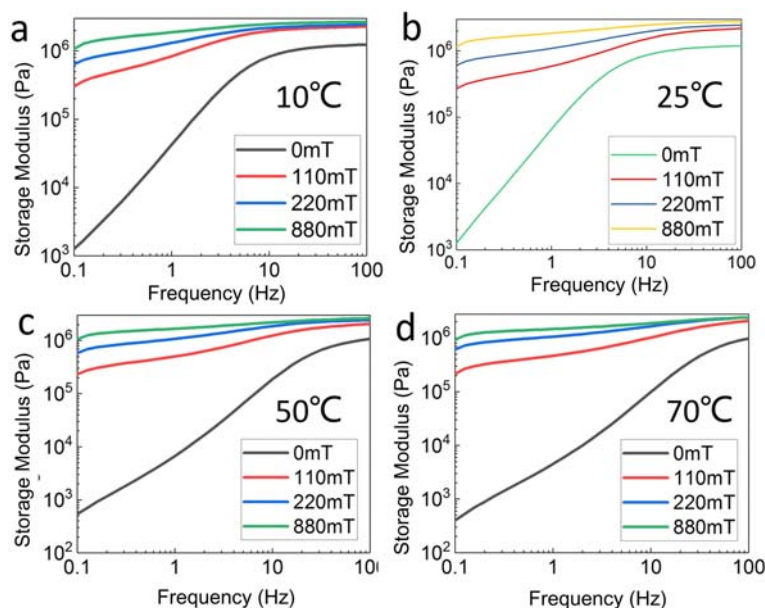


图7 温度分别为10℃(a)、25℃(b)、50℃(c)和70℃(d)时, MSC-60%在外界磁场和剪切应力协同作用下的流变性能

Fig. 7 The rheological properties of MSC-60% under the excitation of shear stress and magnetic field at the temperature of 10℃ (a), 25℃ (b), 50℃ (c) and 70℃ (d)

所减小。且温度越高,材料的储能模量降低越明显(图7(c)和(d))。例如,在110mT磁场和100Hz加载条件下,25℃时样品的最大储能模量为2.45MPa,而70℃的样品的最大储能模量为2.07MPa。综上所述, MSC-60%的力学性能表现出了典型的温度相关特点,且在低温和室温条件下流变性能良好稳定,在高温条件下性能有所下降。

3 磁流变剪切变硬胶材料的机理探究

众所周知,聚二甲基硅氧烷(PDMS)单体和焦硼酸在高温聚合过程中分子链均断裂,发生聚合反应,形成了以Si-O键为主链的高分子聚合物。同时,B元素也嵌入到上述分子链中,形成了硼硅氧烷聚合物,其包含Si-O-B键,FT-IR和XRD(图1)测试结果也证明了Si-O-B键的存在。

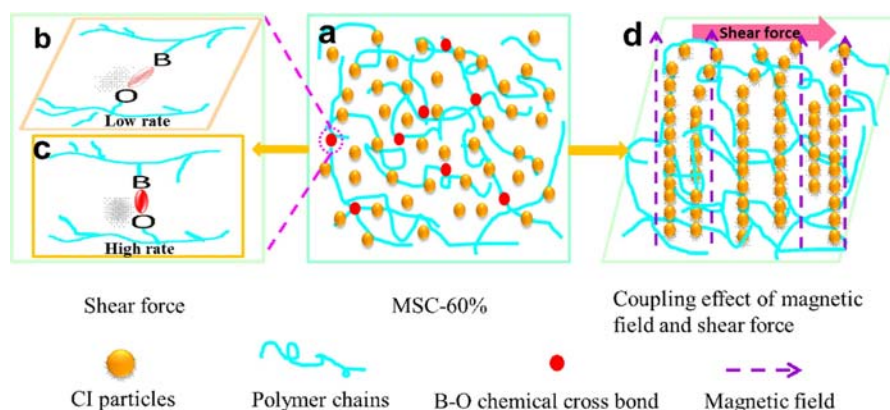


图8 MSC-60%材料机理示意图:原始样品(a),低(b)和高(c)应变率刺激下的剪切变硬效应,磁场—剪切应力双重刺激下的耦合效应示意图(d)

Fig. 8 The mechanism schematic of MSC-60% under various excitations: primary sample (a), loading shear stress with low (b) and high (c) rates, coupling effect of magnetic field and shear force (d)

由于缺乏电子,B元素的外层p轨道与高分子链中富含电子的O原子共享电子,从而形成了微弱的相互吸引作用,称之为“瞬间交联键”。该“B-O瞬间交联键”是动态变化的,且比一般的化学键要弱。当引入羰基铁粉以后,由于颗粒增强效应,胶体的力学性能如储能模量有所提高(图8(a))。当外界剪

切应变率较低时,该“瞬间交联键”有足够时间断裂分离,同时高分子链之间也有足够时间松弛和解缠结,分子链之间阻力较小,易于滑动,所以宏观上材料较为柔软,表现出粘流性(图 8(b))。而随着剪切频率的不断增大,“瞬间交联键”没有足够时间断裂,高分子链之间的解缠结时间长于应力刺激时间时,大量的“瞬间交联键”严重阻碍其他高分子链之间的运动,导致剪切变硬,而材料在宏观上表现为坚硬的固体特性(图 8(c))。加载磁场时,羰基铁粒子在磁场驱使下会排列成粒子链,微观上大量的粒子链会显著增强材料的力学性能,故宏观上材料的储能模量显著增加,在外力作用下其不易发生变形,显示出高磁流变效应(图 8(d))。此外,链状结构也阻碍了高分子链的相对运动,从而导致了磁场对剪切变硬效应的协效增强。

4 结 论

本文通过将软磁性羰基铁粉引入剪切变硬胶体中制备出磁流变剪切变硬胶,并深入研究了其“磁力”耦合效应。研究表明该复合材料的储能模量随着剪切应力的频率增加而迅速增大 4 个数量级,表现出优良的剪切变硬效应。此外,材料对于外界磁场也呈现出了较好磁场响应性能。更为重要的是,材料在同时受到外界磁场和剪切应力双重刺激时,其模量得到极大提高,且剪切变硬性能可以通过外加磁场进行调节。另外,不同温度下,磁流变剪切变硬胶性能相对稳定,满足工程应用需求。机理研究表明,B-O 化学交联键和粒子链的协效作用导致材料具有优良剪切变硬效应和高磁流变性能。本研究为该材料在主动防护和阻尼减振等领域的应用打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] Ivo R P, Sayantan M, Heinrich M J. Direct observation of dynamic shear jamming in dense suspension[J]. Nature, 2016, 532:214—217.
- [2] Royer J R, Daniel L B, Hudson S D. Rheological signature of fractional interactions in shear thickening suspensions[J]. Physical Review Letters, 2016, 116:188301—188306.
- [3] Johnson D H, Faeshid V, Bohumir J, et al. Micromechanical modeling of discontinuous shear thickening in granular media-fluid suspension[J]. Journal of Rheology, 2017, 61:265—278.
- [4] Brady J F, Bossis G. The rheology of concentrated suspensions of spheres in simple shear-flow by numerical-simulation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 155:105—129.
- [5] Chen Q, Liu M, Xuan S H, et al. Shear dependent electrical property of conductive shear thickening fluid[J]. Materials & Design, 2017, 121:92—100.
- [6] Tian T F, Nakano M. Design and testing of a rotational brake with shear thickening fluids[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26:035038.
- [7] Zhou H, Yan L X, Jiang W Q, et al. Shear thickening fluid based energy-free damper: design and dynamic characterization[J]. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 2016, 27(2):208—220.
- [8] Iyer S S, Vedad-Ghavami R, Lee H, et al. Nonlinear damping for vibration isolation of microsystems using shear thickening fluid[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102:251902.
- [9] 周鸿, 闫立勋, 陈潜, 等. 剪切增稠液阻尼器隔冲性能的实验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(6):741—750 (ZHOU Hong, YAN Lixun, CHEN Qian, et al. Experimental study of shock isolation performance of shear thickening fluid damper[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(6):741—750(in Chinese))
- [10] Yang J, Sun S S, Li W H, et al. Development of a linear damper working with magnetorheological shear thickening fluids[J]. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 2015, 26:1811—1817.
- [11] Green P, Palmer R. U. S. Pat., 2010/0132099 A1.
- [12] Boland C S, Khan U, Ryan G, et al. Sensitive electromechanical sensors using viscoelastic graphene-polymer nanocomposites[J]. Science, 2016, 354:1257—1260.
- [13] Wang S, Xuan S H, Jiang W Q, et al. Rate-dependent and self-healing conductive shear stiffening nanocomposite: a novel safe-guarding material with force sensitivity[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3:19790—19799.

- [14] 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, 23:123001.
- [15] Behrooz M, Wang X J, Gordaninejad F. Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23:045014.
- [16] 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, 70:811–820.
- [17] Kaluvan S, Park Y D, Choi S B. A novel resonance based magnetic field sensor using a magnetorheological fluid [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 238:19–24.

Investigation on the “Magnetic-Mechanic” Coupling Performance of Magnetorheological Shear Stiffening Polymer Composite

GONG Li-ping¹, WANG Sheng², YIN Guan-sheng¹, XUAN Shou-hu²

(1. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Shear stiffening gel is a novel intelligent material. Its modulus can increase rapidly due to external stress stimulation showing excellent shear stiffening effect, so it has important application prospects in physical protection and damping vibration isolation. In this paper, multifunctional magnetorheological shear stiffening polymer composite (MSC) is prepared by dispersing carbonyl iron (CI) into shear stiffening polymer matrix and its “magnetic-mechanic” coupling performance is systematically investigated by rheological testing system. Results indicate that MSC presents excellent shear stiffening effect (S-ST effect), its storage modulus increases significantly (4 orders of magnitude) with the increase of shear frequency. The mechanical properties of MSC were also enhanced dramatically by magnetic field, indicating its ideal magnetorheological effect. When the content of carbonyl iron powder is 60wt%, the modulus of the specimen increases rapidly with the increase of magnetic field, and the maximum modulus is up to 2.44MPa. More importantly, the storage modulus of MSC was largely enhanced and precisely controlled by changing shear force and magnetic field and it decreased with the increasing of shear strain. In addition, the temperature dependent mechanical properties of MSC were also studied and it could maintain stable mechanical performance at low temperature. Finally, the “magnetic mechanic” coupling mechanism was discussed. It is found that due to the formation of “B-O cross bond” and the CI particle chains induced by magnetic field, this composite presents excellent shear stiffening effect and magnetorheological properties.

Keywords: shear stiffening property; magnetorheological effect; magnetic-mechanic coupling performance; experimental mechanics