

新型磁流变胶的流变性能

叶兴柱¹, 龚兴龙¹, 江万权², 严长青²

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

摘 要: 研制了一种新型的磁流变胶, 通过稳态和动态剪切试验对其流变性能进行了测试。结果表明: 在较大磁场作用下磁流变胶的剪切应力对剪切率的依赖性很小, 并具有较大的剪切应力; 其线性粘弹性区域随着外加磁场的增大而变宽; 其储能模量 G 在外加磁场作用下可以达到 7.98 MPa ($H = 102.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$), 并且与磁流变液一样在外加磁场作用下其 G 曲线也出现了三个明显的变化区域。

关键词: 磁流变胶; 粘弹性; 剪切应力; 储能模量

中图分类号: TQ138.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3738(2008)07-0021-03

Rheological Properties of Magnetorheological Gel

YE Xing-zhu, GONG Xing-long, JIANG Wan-quan, YAN Chang-qing

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A new type of magnetorheological gel (MRG) was prepared and its rheological properties were examined. The results showed that shear stress of the MRG was insensitive to shear rate when the applied magnetic field strength was large and its linear viscoelastic range was enlarged by the increase of applied magnetic field strength. Its storage modulus reached 7.98 MPa when the applied magnetic field was $H = 102.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Just like magnetorheological fluids, three characteristic regions were observed in MRG.

Key words: magnetorheological gel; viscoelasticity; shear stress; storage modulus

0 引 言

磁流变液是将微米尺寸的磁极化颗粒分散于非磁性液体(矿物油、硅油等)中形成的悬浮体系。在零磁场情况下,磁流变液流动性能良好,其表现粘度很小;在外加强磁场作用下表现粘度可在短时间(毫秒级)内增加两个数量级以上,并呈现类固体特性;而且这种变化是连续的、可逆的,即去掉磁场后又恢复到原来的状态。近年来随着对机电一体化的需求和材料制备技术的提高,磁流变液的研究得到迅速发展,成为当前智能材料研究领域的一个重要分支^[1]。但目前磁流变液本身的沉降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。因此一种新型的、无沉降磁流变材料——磁流变胶

(magnetorheological gel)应运而生^[2-5]。

磁流变胶是以溶胶作为连续相的母液,将微米级的磁性颗粒均匀地分散到其中而形成。Shiga^[6]等对磁性颗粒在硅树脂胶中的磁流变性能进行了分析;Mitsumata^[7,8]对添加了胶体的磁流变液的磁致压缩模量进行了研究;Rankin^[9]等对磁性颗粒在粘塑性基体中的磁流变行为进行了研究;Lopez^[10,11]等对添加了硅胶的磁流变液稳定性和流变性能进行了研究;Fuchs^[2-5]等则对硅树脂胶和聚亚胺酯基体的磁流变胶进行了较为全面的研究^[2-4],同时还对超分子聚合体基体进行了研究^[5]。磁流变胶不仅解决了沉降问题,而且保持了磁流变液的一些主要优点,比如在外磁场作用下具有快速响应、表现粘度和剪切模量可以发生显著的变化等特点。但是目前的磁流变胶还存在一些问题,如沉降稳定性还不是非常理想,同时制备成本也比较高。为解决制备成本高的问题,作者制备了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,并对其磁控流变性能进行了分析。

收稿日期:2007-08-30;修订日期:2008-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10672154);中国科学院“百人计划”资助项目

作者简介:叶兴柱(1981-),男,浙江宁波人,硕士研究生。

导师:龚兴龙教授

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用磁性颗粒为德国 BASF 公司的平均粒径为 $3.5\ \mu\text{m}$ 的羰基铁粉,铁粉的质量分数为 80%;明胶(化学纯)和丙三醇(分析纯)均为市售。

将 5 mL 水和 15 mL 的丙三醇混合均匀,再加入 0.5 g 明胶,将混合液加热至 $80\ ^\circ\text{C}$ 左右,同时不停搅拌直至明胶完全溶解,得到淡黄色溶胶溶液;在溶胶凝结前将 95.6 g 羰基铁粉分批加入,机械搅拌至均匀,然后放入 $0\ ^\circ\text{C}$ 的冷藏室中冻成凝胶。

1.2 试验方法

用配备了磁流变附件 PS-DC-MR/5A 及 PP20 测量头的 Physica MCR 301 型流变仪测试磁流变胶的流变性能,测试原理见图 1,试验在 $25\ ^\circ\text{C}$ 下进行。将试样置于半径为 10 mm 的两片平行圆盘中,间距为 1 mm,上盘片为动片(非导磁材料),可以对试样施加各种载荷,通过传感器测量动盘片受到的扭矩和角位移信息,分析得到相应试样的应力、应变等信息;磁场垂直通过试样,对其在稳态剪切和动态剪切下的流变性能测试按如下方案进行:(1) 固定剪切率 $\dot{\gamma} = 10\ \text{s}^{-1}$,外加磁场强度 H 从 0 增加到 $102.8\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$,测试剪切应力与 H 之间的关系;(2) 分别将磁场强度 H 固定在 0, 26.7 和 $57.1\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$,剪切率 $\dot{\gamma}$ 在 $1\sim 100\ \text{s}^{-1}$ 变化,测试不同 H 下剪切应力与剪切率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系;(3) 分别将磁场强度 H 稳定在 1.72, 57.1, 102.8, $142.8\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$,固定角频率 ω 为 $10\ \text{s}^{-1}$,应变值 ϵ_0 从 0.01%~2% 连续变化,测试储能模量 G' 与应变幅值 ϵ_0 的关系,确定不同磁场下线性粘弹性区域临界应变值 ϵ_L 。在固定角频率 ω 和 H 条件下作应变扫描,观察 G' 的变化,当 G' 出现明显变化时,说明材料已经进入非线性区,此时的应变值即为线性粘弹性区域临界应变 ϵ_L ;(4) 将应变值 ϵ_0 稳定为 0.01%,固定角频率 ω 为 $10\ \text{s}^{-1}$,磁场强度在 $0\sim 102.8\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 变化,测试储能模量 G' 、损耗模量 G'' 和损耗因子

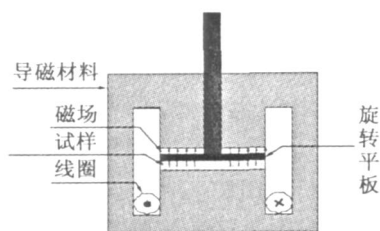


图 1 流变仪测试原理示意

Fig. 1 Principle of the magnetorheological test device

$\tan\delta$ 与 H 的关系。为了保证试验在不破坏试样本身结构的条件下进行,采用在小应变下(应变值 $\epsilon_0 < \epsilon_L$)的磁场扫描模式来测量。

2 试验结果与分析

2.1 磁流变胶稳态剪切流变性能

由图 2 可见,当外加磁场为零时,剪切应力为 0.9 kPa;随着外加磁场的增加,剪切应力快速增大;但当 H 达到 $30\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 以后,剪切应力虽然随着外加磁场的增加也增大,但是增大速率已经明显变缓;在 H 为 $102.8\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 时剪切应力可达到 87.6 kPa。此时磁流变胶内部已经形成稳定的链柱结构。

由图 3 可见,在零磁场下剪切应力随着剪切率的增大从 119.5 Pa 增大到 5 164 Pa,与剪切率成近似对数线性关系。随着外加磁场的增大,磁性颗粒在胶体中形成链柱结构的速度加快,形成的结构更加稳定,所以在磁场强度为 $26.7\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $57.1\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 时剪切应力基本不随着剪切率的增大而变化,说明材料在较高磁场下剪切应力对剪切率的依赖性不大,在实际应用中可提供稳定的剪切应力。

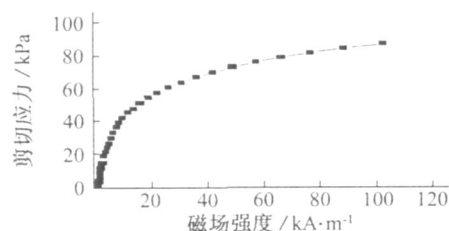


图 2 在剪切率为 $10\ \text{s}^{-1}$ 时剪切应力与外加磁场强度的关系

Fig. 2 Shear stress as a function of magnetic field strength at $\dot{\gamma} = 10\ \text{s}^{-1}$

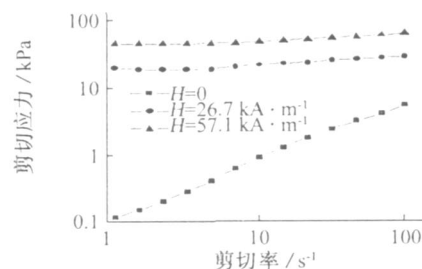


图 3 不同磁场强度下的流变曲线

Fig. 3 The flow curves of MRG with different magnetic field strength

2.2 磁流变胶的动态粘弹性能

2.2.1 线性粘弹性区域临界应变 ϵ_L 与外加磁场 H 的关系

由图 4 可见,在 $H = 1.72\ \text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 时 $\epsilon_L =$

0.02%;在 $H=57.1 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时 $\varepsilon_L=0.15\%$;在 $H=102.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时 $\varepsilon_L=0.2\%$;当 $H=148.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,储能模量 G 的线性段明显增加, $\varepsilon_L=0.3\%$, ε_L 比低磁场作用下增大了 14 倍,同时储能模量 G 也明显增大。试验表明:磁流变胶的临界应变 ε_L 可以受外加磁场控制,随着外加磁场强度 H 增大,临界应变 ε_L 也随之增大,线性粘弹性区域明显拓宽,同时储能模量 G 也明显增大。在实际应用中如果粘弹性材料工作于线性粘弹性段内,可以容易控制材料的工作状态,因此应该尽量拓宽粘弹性材料的线性粘弹性段,这样有利于在工程应用中减少材料的非线性。

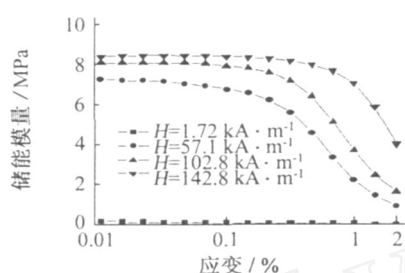


图 4 不同磁场强度下的应变扫描曲线

Fig. 4 Strain sweep curves with different magnetic field strength

2.2.2 动态模量与外加磁场的关系

由图 5 可见,在外加磁场作用下磁流变胶的储能模量 G 从 0.05 MPa 增长到 7.98 MPa,损耗模量在磁场强度为 $18.9 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时出现峰值 1.29 MPa,损耗因子 $\tan \delta$ 在磁场强度为 $7 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时达到最大值 0.62,在磁场强度为 $102.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时值仅为 0.03。从储能模量与损耗因子曲线中可以看出随着外加磁场的增大,磁流变胶和磁流变液^[12]一样也可以分为三个变化区域,即:在小磁场作用下 ($H < 7 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$),颗粒开始移动形成链状结构,材料的储能模量变化并不明显,但是损耗因子一直增大;随着磁场强度的增大,部分颗粒形成链柱结构,材料的储能模量开始快速增大,损耗模量开始下降;随着磁场强度的继续增大,材料内颗粒形成稳定的链柱结构,储能模量也不再随着磁场强度的增长而增长,达到一个稳定值,此时的磁流变胶已经成为了类固体,损耗因子也降到了最小值。

3 结论

(1) 研制的磁流变胶的剪切应力在较大磁场作用下时,对剪切率的依赖性很小,并具有较大的剪切应力;当磁场强度为 $102.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,其剪切应力可达到 87.6 kPa。

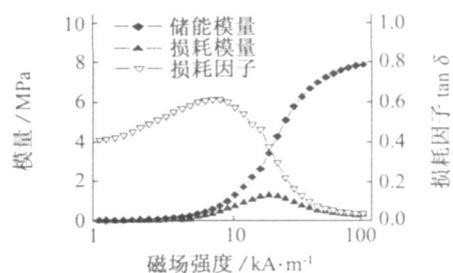


图 5 应变为 0.01% 时模量、损耗因子与外加磁场强度的关系

Fig. 5 The dependence of modulus, loss tangent on applied magnetic field strength at $\varepsilon_0 = 0.01\%$

(2) 磁流变胶线性粘弹性区域的临界剪应变受外加磁场影响,外加磁场强度越大,其线性粘弹性区域越宽,当外加磁场强度为 $148.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, $\varepsilon_L=0.3\%$ 。

(3) 在线性粘弹性区域内磁流变胶的储能模量 G 在外加磁场作用下变化明显,最大达到 7.98 MPa ($H=102.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$),出现了类似磁流变液的三个变化区域。

参考文献:

- [1] 王建晓,孟光. 磁流变液研究进展[J]. 航空学报,2002,23:6-11.
- [2] Fuchs A, Xin M, Gordaninejad F, et al. Development and characterization of hydrocarbon polyurethane and silicone magnetorheological polymeric gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92:1176-1182.
- [3] Wilson M, Fuchs A, Gordaninejad F. Development and characterization of magnetorheological polymer gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84:2733-2742.
- [4] Fuchs A, Hu B, Gordaninejad F, et al. Synthesis and characterization of magnetorheological polyimide gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98:2402-2413.
- [5] Fuchs A, Hu B, Gordaninejad F, et al. Supramolecular magnetorheological polymer gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100:2464-2479.
- [6] Tohru Shiga, Akane Okada, Toshio Kurauchi. Magnetorheological behavior of composite gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1995, 58:787-792.
- [7] Mitsumata T, Ikeda K, Gong J P, et al. Magnetism and compressive modulus of magnetic fluid containing gels[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85:8451-8455.
- [8] Mitsumata T, Furukawa K, Juliac E, et al. Compressive modulus of ferrite containing polymer gels[J]. International Journal of Modern Physics B, 2002, 16:2419-2425.
- [9] Rankin P J, Horvath A T, Klingenberg D J. Magnetorheology in viscoplastic media[J]. Rheological Acta, 1999, 38:471-477.

(下转第 51 页)

国内专业生产厂家的主要研究课题。而垂直上引连续铸造铸铁管以其高致密性、优越的力学性能和良好的机加工性能,将会部分代替传统铸造法生产的中小缸径缸套。

连铸管在铁路运输、机械制造行业中的应用也不断扩大,如导向套、机车车辆奥贝衬套、支撑套等,连铸管已在青岛四方车辆厂使用,外径 $\phi 112$ mm 的管材其球化级别为 2 级,石墨大小级别为 6 级,硬度 45 HRC,强度 $\sigma_b = 1\ 500$ MPa,伸长率 1%,冲击韧度(无缺口) $a_k = 35$ J·cm⁻²,完全符合铁道部铁路客车用贝氏体球墨铸铁(ADI)衬套技术条件

(试行稿)。用管材制作的衬套的材料利用率比棒料制作的高 40%~60%,经济和社会效益显著。

参考文献:

- [1] 刘韶山,韩晰宇,崔慧远. 我国铸铁管业的现状与发展[J]. 山东冶金,2003(6):81-83.
- [2] 王海生,黄志强,时胜利. 齿轮新材料的选择-水平连铸 ADI[J]. 机械传动,2005(2):61-64.
- [3] 徐春杰,雷宏,郭跃军,等. 铸铁型材及其应用[J]. 铸造,1999(8):50-53.
- [4] 王海生,黄志强,许扬,等. 连铸 ADI 汽车发动机活塞环的成功应用[J]. 铸造技术,2005(12):1127-1129.

(上接第 17 页)

参考文献:

- [1] 周镇国. 热处理钢轨的组织参数对性能的影响[J]. 国外金属热处理,1999(3):13-16.
- [2] 徐权,梅海东,俞梦文,等. 钒在钢轨钢中的作用研究[J]. 钢铁,2001,36(6):44-47.
- [3] 周跃清,杨来顺. 钢轨的材质性能及相关工艺[M]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [4] 刘丰收,张银花. 基于焊接的 UIC900A 及 U75V 钢轨钢连续冷却特性[J]. 中国铁道科学,2005,26(6):63-68.

(上接第 20 页)

- [7] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Material Research,1992,7(6):1564-1583.
- [8] 谢存毅. 纳米压痕技术在材料科学中的应用[J]. 物理,2001,30(7):432-435.
- [9] 孙增君. 选择合适的镀镍液处理方法[J]. 电镀与涂饰,1995,14(4):51-52.
- [10] Chen J S, Duh J G. Indentation behavior and Young's modulus evaluation in electroless Ni modified CrN coating on mild steel[J]. Surface and Coating Technology,2001,139:6-13.
- [11] Suresh S, Giannakopoulos A E. A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation[J]. Acta Mater,1998,40(16):5755-5767.

(上接第 23 页)

- [10] De Vicente J, Lopez-Lopez M T, Gonzalez-Caballero F, et al. Rheological study of the stabilization of magnetizable colloidal suspensions by addition of silica nanoparticles[J]. Journal of Rheology,2003,47:1093-1109.
- [11] Lopez-Lopez M T, De Vicente J, Gonzalez-Caballero F, et al. Stability of magnetizable colloidal suspensions by addition of oleic

acid and silica nanoparticles[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects,2005,264:75-81.

- [12] Klaus W, Jorg L, Siegfried H. Magneto sweep—a new method for characterizing the viscoelastic properties of magnetorheological fluids[J]. Applied Rheology,2002,12:25-31.

(上接第 48 页)

层的平整度和光亮度。

(3) ABS 塑料表面镍-磷化学镀优化镀液配方: 28 g·L⁻¹ 硫酸镍, 27 g·L⁻¹ 次亚磷酸钠, 50 g·L⁻¹ 柠檬酸钠, 50 g·L⁻¹ 氯化铵, 0.002 5 g·L⁻¹ 十二烷基苯磺酸钠, pH 值 8.5~9, 温度 25~30℃; 镀液水浴恒温在 25℃ 时, 镀速为 6 μm·h⁻¹ 左右, 镀覆 50 min, 镀层厚度可达 10 μm 以上。

(4) 镀层沉积厚度达到 10 μm 以上时, 平整度、附着力较好; 硬度在 5~6 之间; 方块电阻均小于 10 μΩ·cm⁻¹, 具有一定的导电性, 目测光亮亮度可达 1 级。

参考文献:

- [1] 曾祥德, 曾建勇, 胡廷辉, 等. 防护装饰性节镍电镀新工艺的应用[J]. 电镀与环保, 2005, 25: 16-18.
- [2] YUN Wen, CHANG Genxiao, ZHONG Gangdeng. Structure and corrosion resistance of electroless Ni-Cu-P[J]. Plating and Surface Finishing, 1992(5): 57-59.
- [3] 于会生, 罗守福. 化学沉积 Ni-P 及 Ni-Cu-P 合金镀层晶化行为的比较[J]. 材料工程, 2002(4): 19-23.
- [4] 李宁, 屠振密. 化学镀实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [5] 姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [6] 胡文彬, 刘磊, 仵亚婷, 等. 难镀基材的化学镀镍技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] 陈天玉. 光亮镀镍[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.