

特约来稿

磁流变弹性体的性能研究

王 静, MUHAMMAD Wasim Asim, 危银涛
(清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084)

摘要:以天然橡胶为基体制备磁流变弹性体(MRE),研究MRE的Payne效应及磁感应强度和磁流变效应。扫描电子显微镜分析得出,对于羰基铁粉质量分数最大(81.67%)的MRE,羰基铁粉分布密集,出现羰基铁粉团聚现象。流变仪测试结果表明:随着羰基铁粉质量分数的增大,MRE的Payne效应和磁流变效应增强;随着应变的增大,MRE的储能模量减小,损耗因子增大。

关键词:磁流变弹性体;羰基铁粉;天然橡胶;磁流变效应

中图分类号:TQ330.1⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2023)11-0845-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.11.0845



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

近年来,随着社会的快速发展,人们的生活方式发生了很大的变化,对新技术、新智能材料的需求越来越大,智能材料成为科学研究的热点之一。磁流变材料作为智能材料在当今世界工业中具有巨大的应用潜力。根据外部磁场的不同,它们表现出不同的流变性能和粘弹性,如剪切应力、屈服应力、动态模量和阻尼特性。随着磁感应强度的变化,磁通密度也发生变化。在某些应用中,磁流变材料的剪切应力、温度和化学成分等会随着环境而改变,因此很难控制磁流变材料的这些特性^[1-5]。

磁流变材料在汽车、医疗、印刷等领域有着广泛的应用^[7-10]。根据应用场合的不同,磁流变材料有不同的种类,如磁流变液(MRF)、磁流变凝胶、磁流变泡沫和磁流变弹性体(MRE)^[6]。MRE是一种固体软质材料,克服了MRF存在的泄漏及沉降问题^[11-14],并避免了因沉积导致的磁流变效应的降低。

本工作以天然橡胶(NR)为基体制备MRE,研究MRE的Payne效应^[15-16]及磁感应强度和磁流变效应。

1 实验

1.1 主要原材料

NR, 1[#]烟胶片,泰国产品;羰基铁粉(铁磁性粒子),江西悦安超细金属有限公司产品;氧化锌,分析纯,山东阳谷华泰化工股份有限公司产品;防老剂4020和促进剂CBS,山东尚舜化工有限公司产品。

1.2 试验配方

试验配方(用量/份)为:NR 100,羰基铁粉变量(见表1),炭黑N660 10,氧化锌 2.5,硬脂酸 2,防老剂4020 4,硫黄 2,促进剂CBS 0.7。

表1 羰基铁粉用量及其对应的质量分数

Tab. 1 Amounts of carbonyl iron powder and its corresponding mass fractions

项 目	配方编号			
	A	B	C	D
羰基铁粉用量/份	200	300	400	500
羰基铁粉质量分数/%	64.06	72.78	78.09	81.67

1.3 主要设备和仪器

BB-1600IM型密炼机和BL-6175-AL型开炼

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52003142)

作者简介:王静(1989—),女,山东济宁人,清华大学助理研究员,博士,主要从事高分子材料的合成、表征及性能研究。

E-mail:wangjing9917@126.com

引用本文:王静, MUHAMMAD Wasim Asim, 危银涛. 磁流变弹性体的性能研究[J]. 橡胶工业, 2023, 70(11): 845-849.

Citation: WANG Jing, MUHAMMAD Wasim Asim, WEI Yintao. Study on properties of magnetorheological elastomer[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(11): 845-849.

机,宝轮精密检测仪器有限公司产品;XLB-D型平板硫化机,湖州东方机械有限公司产品;PREMIER MV型无转子硫化仪,美国阿尔法科技有限公司产品;QUANTA 200FEG型扫描电子显微镜(SEM),荷兰FEI公司产品;MCR702型流变仪,奥地利安东帕公司产品。

1.4 试样制备

胶料分两段混炼,一段混炼在密炼机中进行,转子转速为 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,混炼工艺为:NR、羰基铁粉和小料→压压砣混炼 25 s →提压砣加炭黑→压压砣→提压砣混炼至 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ →压压砣→提压砣混炼至 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ →压压砣混炼至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ →排胶。二段混炼在开炼机上进行,包辊后左右割刀1次,加硫磺和促进剂,待吃料完全后左右割刀3次,减小辊距,打三角包5次,调大辊距,胶料包辊、表面光滑并无气泡后下片。

胶料在平板硫化机上硫化,硫化条件为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}\times 10\text{ min}$ 。

1.5 测试分析

采用SEM对试样断面形貌进行观察,断面经

过喷金处理;采用流变仪进行应变扫描,圆形试样的直径为 25 mm 、厚度为 2 mm ,测试条件为:应变范围 $0.1\%\sim 10\%$,频率 5 Hz ,温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,磁感应强度分别为 $0, 110, 220, 330$ 和 440 mT 。

2 结果与讨论

2.1 SEM分析

不同羰基铁粉质量分数的MRE的SEM照片如图1所示。

从图1可以看出,由于制备的NR基MRE是各向同性的,羰基铁粉随机分布在NR基体中。羰基铁粉质量分数最大的MRE在同一区域内羰基铁粉最多,分布最密集,出现团聚现象,这对MRE的磁流变效应和耐疲劳性能会有不良影响。

2.2 Payne效应

不同羰基铁粉质量分数的MRE的储能模量(G')与应变(ϵ)的关系曲线如图2所示。

从图2可以看出,在低应变下,随着羰基铁粉质量分数的增大,MRE的 G' 增大,且随着应变的增大,羰基铁粉质量分数较大的MRE的 G' 下降较

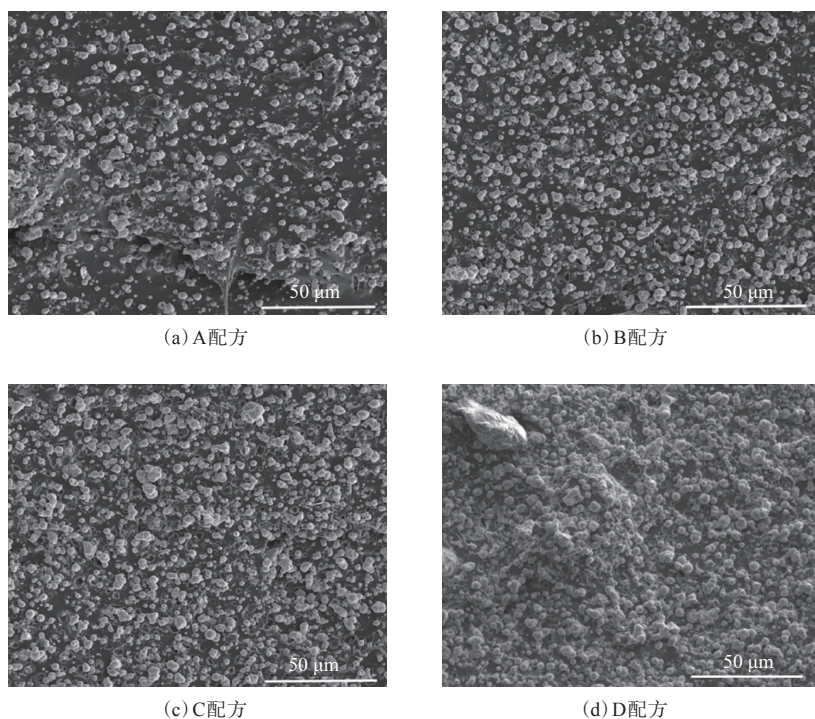


图1 不同羰基铁粉质量分数的MRE的SEM照片

Fig. 1 SEM photos of MRE with different carbonyl iron powder mass fractions

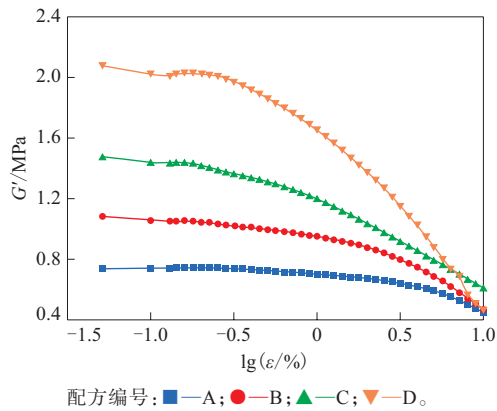


图2 不同羰基铁粉质量分数的MRE的 G' - $\lg \varepsilon$ 曲线
Fig. 2 G' - $\lg \varepsilon$ curves of MRE with different carbonyl iron powder mass fractions

快。通常情况下,用低应变(最小应变)与高应变(最大应变)下的 G' 差值($\Delta G'$)来表征胶料的Payne效应^[11]。

A—D配方的MRE的 $\Delta G'$ 分别为0.294,0.601,

0.868和1.628 MPa。可见,随着羰基铁粉质量分数的增大,MRE的 $\Delta G'$ 增大,Payne效应增强,说明随着羰基铁粉质量分数的增大,胶料的混炼越来越困难,羰基铁粉的分散性变差,羰基铁粉出现团聚现象,这与SEM分析结果一致。

2.3 磁感应强度对磁流变效应的影响

磁感应强度对MRE的磁流变效应的影响如图3和表2所示。

从图3可以看出:当磁感应强度为440 mT时,D配方的MRE的 G' 最大;随着应变的增大,MRE的 G' 呈线性减小趋势。

从表2可以看出:随着羰基铁粉质量分数的增大,MRE的磁流变效应逐渐增强;当羰基铁粉质量分数为81.67%时,MRE的磁流变效应急剧增强。

磁感应强度对MRE损耗因子($\tan \delta$)的影响如图4所示。

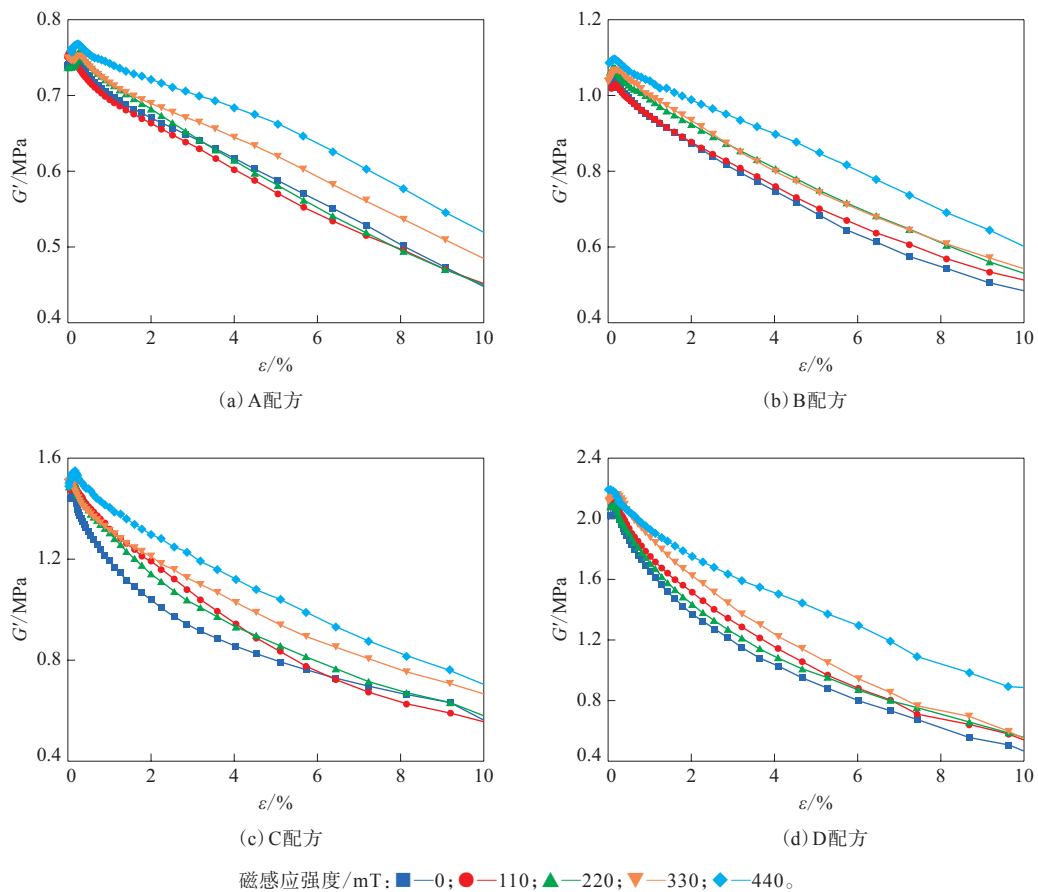


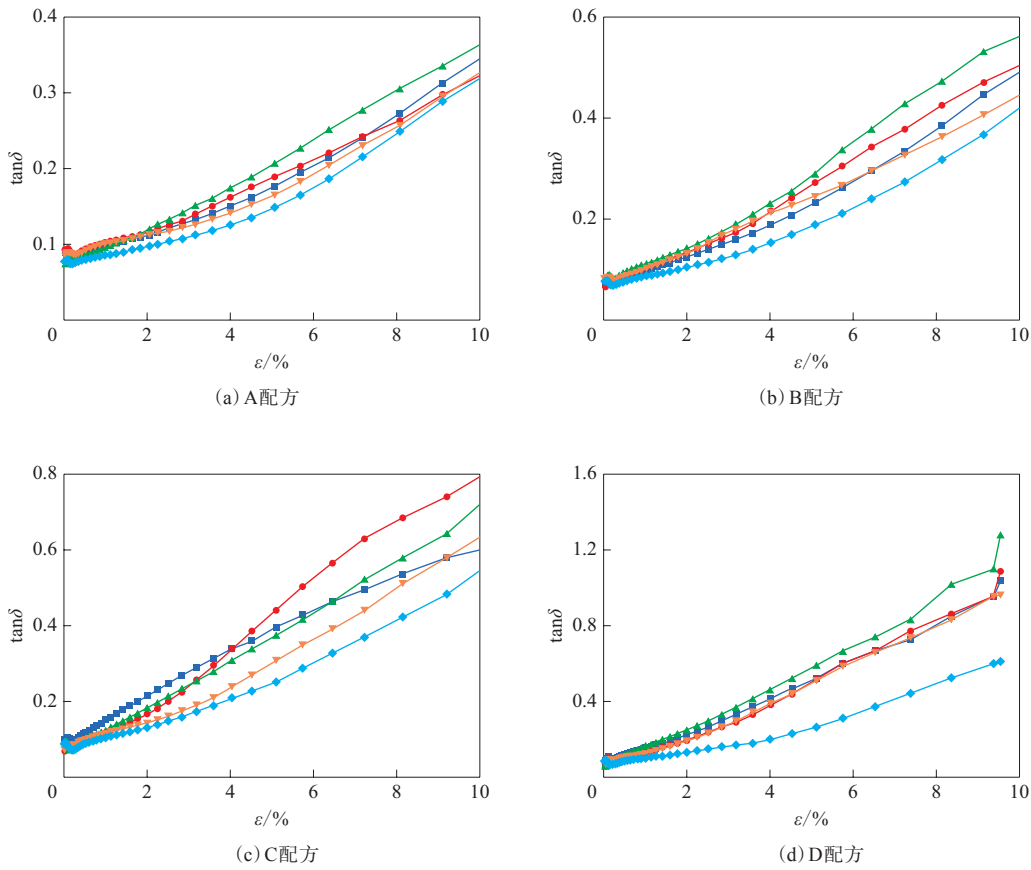
图3 磁感应强度对MRE的 G' 的影响
Fig. 3 Effect of magnetic induction intensities on G' of MRE

表2 不同羰基铁粉质量分数的MRE的磁流变效应

Tab. 2 Magnetorheological effects of MRE with different carbonyl iron powder mass fractions

项 目	配方编号							
	A		B		C		D	
磁感应强度/mT	0	440	0	440	0	440	0	440
G'/MPa	0.444	0.513	0.479	0.605	0.547	0.691	0.452	0.886
磁流变效应/%		15.5		26.3		26.3		96.0

注:应变为10%。



注同图3。

图4 磁感应强度对MRE的 $\tan \delta$ 的影响

Fig. 4 Effect of magnetic induction intensities on $\tan \delta$ of MRE

从图4可以看出:随着应变的增大,MRE的 $\tan \delta$ 增大;随着磁感应强度的增大,MRE的 $\tan \delta$ 呈先增大后减小的趋势,这可能是由于磁感应强度增大,羰基铁粉趋向各向排列,MRE的门尼粘度增大,增稠作用明显,流动性变差, $\tan \delta$ 增大,但是当磁感应强度增大到一定程度后,以偶极子为基础的羰基铁粉粒子间的相互作用增强,羰基铁粉快速朝着同一方向排列,MRE的弹性占主导, $\tan \delta$ 减小。

3 结论

以NR为基体制备MRE,并采用SEM和流变仪对其性能进行研究。SEM分析得出,对于羰基铁粉质量分数最大(81.67%)的MRE,羰基铁粉分布最密集,出现羰基铁粉团聚现象。流变仪测试结果表明:随着羰基铁粉质量分数的增大,MRE的Payne效应和磁流变效应增强;随着应变的增大,MRE的 G' 减小, $\tan \delta$ 增大;在试验的应变范围内,

所有MRE都显示出良好的粘弹性。

参考文献:

- [1] OLABI A G, GRUNWALD A. Design and application of magnetorheological fluid[J]. *Materials & Design*, 2007, 28 (10) : 2658–2664.
- [2] LOKANDER M, STENBERG B. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials[J]. *Polymer Testing*, 2003, 22 (3) : 245–251.
- [3] GONG X L, ZHANG X Z, ZHANG P Q. Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24 (5) : 669–676.
- [4] 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.
- [5] CHEN L, GONG X L, LI W H. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16 (6) : 2645–2650.
- [6] ZHOU G Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12 (1) : 139–146.
- [7] LAKE G J. Fatigue and fracture of elastomers[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1995, 68 (3) : 435–460.
- [8] SEMISALOVA A S, PEROV N S, STEPANOV G V, et al. Strong magnetodielectric effects in magnetorheological elastomers[J]. *Soft Matter*, 2013, 9 (47) : 11318–11324.
- [9] PICKERING K L, KHIMI S R, ILANKO S. The effect of silane coupling agent on iron sand for use in magnetorheological elastomers. Part 1: Surface chemical modification and characterization[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 68 : 377–386.
- [10] JOLLY M R, CARLSON J D, MUÑOZ B C. A model of the behaviour of magnetorheological materials[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5 (5) : 607–614.
- [11] 战艳虎, 孟艳艳, 夏和生. 不同维数填料对橡胶Payne效应的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33 (1) : 92–96.
ZHAN Y H, MENG Y Y, XIA H S. Effect of different dimension fillers on Payne effect of rubber[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33 (1) : 92–96.
- [12] MARS W V, FATEMI A. Factors that affect the fatigue life of rubber: A literature survey[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2004, 77 (3) : 391–412.
- [13] 王昊, 危银涛, 王静. 橡胶材料疲劳寿命影响因素及研究方法综述[J]. *橡胶工业*, 2020, 67 (10) : 723–735.
WANG H, WEI Y T, WANG J. Influencing factors and research methods of rubber material fatigue life[J]. *China Rubber Industry*, 2020, 67 (10) : 723–735.
- [14] 王静, 侯丹丹, 张春生, 等. 微观粒子对橡胶材料疲劳裂纹的影响机理研究[J]. *橡胶工业*, 2021, 68 (12) : 890–894.
WANG J, HOU D D, ZHANG C S, et al. Mechanism of influence of microparticles on fatigue crack of rubber materials[J]. *China Rubber Industry*, 2021, 68 (12) : 890–894.
- [15] 鲁学峰, 郝智, 盛翔, 等. 不同改性白炭黑填充天然橡胶的流变性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33 (2) : 72–77.
LU X F, HAO Z, SHENG X, et al. Rheological properties of different modified silica filled natural rubber[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33 (2) : 72–77.
- [16] 王宝山, 周宏斌, 丁元强, 等. 炭黑混炼胶和白炭黑混炼胶的结合橡胶及Payne效应研究[J]. *橡胶科技*, 2017, 15 (7) : 17–23.
WANG B J, ZHOU H B, DING Y Q, et al. Bound rubber and Payne effect of carbon black filled compound and silica filled compound[J]. *Rubber Science and Technology*, 2017, 15 (7) : 17–23.

收稿日期: 2023-05-22

Study on Properties of Magnetorheological Elastomer

WANG Jing, MUHAMMAD Wasim Asim, WEI Yintao

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Magnetorheological elastomer (MRE) was prepared using natural rubber (NR) as the matrix, and the Payne effect, magnetic induction intensities and magnetorheological effect of MRE were studied. Scanning electron microscopy analysis showed that for the MRE with the largest mass fraction of carbonyl iron powder (81.67%), the carbonyl iron powder was densely distributed, resulting in agglomeration of carbonyl iron powder. Rheometer test results showed that as the mass fraction of the carbonyl iron powder increased, the Payne effect and magnetorheological effect of MRE increased, and as the strain increased, the storage modulus of MRE decreased and the loss factor increased.

Key words: magnetorheological elastomer; carbonyl iron powder; NR; magnetorheological effect