

• 研究论文 •

温度对磁流变胶复合材料动态力学性能的影响研究与分析

石利云*

(河北化工医药职业技术学院, 石家庄 050026)

摘要:磁流变胶(MRG)是新一代磁流变材料,其有效克服了磁流变液易沉降等缺点。磁流变胶是由软磁颗粒悬浮在凝胶状基质中形成的,其流变特性主要受磁场和温度两个因素控制。本文制备了含有羰基铁粉质量分数为 60% 的聚氨酯基磁流变胶。系统研究了温度对磁流变胶流变特性的影响。结果表明,温度对磁流变胶的粘弹性有显著影响。测量了频率分别为 0.1、5 和 15 Hz,振幅分别为 10% 和 50% 的谐波应变信号在 5 个温度水平下的迟滞响应,分析了磁流变胶的粘弹性特性,并采用粘弹塑性模型预测了磁流变胶的非线性迟滞特性。分析结果表明,粘弹塑性模型能够准确预测磁流变胶在不同温度下的迟滞特性。

关键词:磁流变胶; 温度; 粘弹行为; 粘弹塑性模型

The Influence and Analysis of the Temperature on the Dynamic Behaviors of Magnetorheological Gel Composite

SHI Li-yun*

(Hebei Chemical & Pharmaceutical Vocational Technology College, Shijiazhuang 050026, China)

Abstract: Magnetorheological (MR) gel is a new generation of MR materials, which effectively overcomes the shortcomings of easy settlement of MR fluid. MR gel is formed by the soft magnetic particle suspension in the gel-like matrix and its rheological properties are mainly controlled by two factors: magnetic field and temperature. In this work, a polyurethane-based MR gel containing carbonyl iron powder with a mass fraction of 60% was prepared. The influence of temperature on the rheological properties of MR gel was systematically investigated. The results show that temperature has a significant effect on the viscoelastic properties of MR gel. The hysteresis response of harmonic strain signals with frequencies of 0.1, 5 and 15 Hz and amplitudes of 10% and 50% at five temperature levels was measured, the viscoelastic properties of MR gel were analyzed, and the viscoelastic plasticity model was used to predict the nonlinear hysteresis characteristics of MR gel. The analysis results show that the viscoelastic plasticity model can accurately predict the hysteresis characteristics of MR gel at different temperatures.

Keywords: Magnetorheological gel; Temperature; Viscoelastic behaviors; Viscoelastic-plastic model

磁流变胶(MRG)是一种由微或亚微铁磁材料和载体聚合物软凝胶组成的新型场致智能材料,其流变特性可由外加磁场的强度控制^[1,2]。因此,磁流变胶具有巨大的工程应用潜力^[3~5]。磁流变胶在磁场作用下的粘弹性流变行为具有可逆、

连续和瞬时的特性,这使得磁流变胶在阻尼器、离合器、制动器和阀系器件中具有重要的应用前景^[6~11]。磁流变器件的工作原理是通过消耗机械能并将其转化为磁流变材料的内能来控制振动或减振^[12~15]。而工作温度的升高反过来又会影响

收稿:2022-11-28;修回:2022-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51805209)

* 通讯联系人:石利云(1985-),硕士,讲师,研究方向为智能材料与结构控制。E-mail: xzjx092@163.com

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2023.07.009

材料的工程应用,这将极大地影响建立控制模型时的复杂性以及控制的精度。

大多数磁流变装置如磁流变阻尼器都工作在动态模式下。因此,磁流变材料在磁场控制下的动力学行为越来越受到人们的关注,其在动态剪切模式下的力学性能变化最显著的是其粘弹性行为,磁场、材料成分、温度、软磁颗粒质量和添加剂等影响因素都将对其产生影响。Li 等^[16]对磁流变弹性体在正弦激励下的粘弹性特性进行了实验和建模研究,结果表明,磁流变弹性体表现为线性粘弹性特性,而四参数粘弹性模型在描述磁流变弹性体样品的迟滞特性方面具有很大潜力。Aziz 等^[17]研究了多壁碳纳米管(MWCNT)对磁流变弹性体粘弹性行为的影响,其结果表现在低应变幅值时加入 MWCNT 能够大大改善磁流变弹性体的磁流变效应。王成等^[18]对磁流变液在小变形下的粘弹性特性进行了实验研究和理论分析,结果表明,理论模型与试验结果吻合较好,且能较准确地描述其损耗模量的变化。Li 等^[19]研究了磁流变液在不同振幅、频率、温度和电流的大振幅振荡剪切作用下的非线性粘弹性行为,结果表明,低频时储能模量与频率无关,并且随电流的增大而增大,同时随温度的增加而减小。Mohamad 等^[20]研究对比了板状羰基铁颗粒磁流变润滑脂与球状羰基铁颗粒磁流变润滑脂粘弹性行为,结果表明,羰基铁颗粒的形状对磁流变润滑脂的粘弹性性能有显著影响。Zhang 等^[21]利用大振幅振荡剪切法研究了不同质量的羰基铁颗粒的磁流变胶的动力学行为,结果表明,随着羰基铁颗粒质量的增加,初始应变值由线性区向非线性粘弹性区增大。

在利用参数模型对磁流变材料的粘弹性滞回曲线进行实时控制的研究领域中,最具挑战性的是用简单的模型准确地描述磁流变材料的高度非线性迟滞响应。贺俊智等^[22]首先提出了频率、振幅和磁场多变量相关的模型,即各向同性磁流变弹性体的线性动态粘弹性模型。结果表明,所引入的模型能较好地预测多变量相关的滞后响应,尤其适用于激励频率大于 1 Hz 的情况。Kou 等^[23]提出了一种新的非线性本构模型,即扩展的三参数模型来描述磁流变弹性体的迟滞响应,结果表明,该模型在谐波激励下具有捕获动态滞后环的潜力。Poojary 等^[24]分别对 two-Maxwell 模型和 fraction Maxwell 模型预测磁流变弹性体的

刚度和阻尼能力进行了评估,结果定量地证明在描述磁流变弹性体样品的粘弹性行为中,后者比前者更加准确。为了使模型能更准确地描述宽应变幅值(20%~90%)下的迟滞回线,Ichwan 等^[10]提出了一种新的修正的 Bouc-Wen 模型,该模型被证明可以有效地捕获磁流变弹性体的迟滞响应。

由于温度将对材料的流变特性产生影响,学者已经将温度变化对磁流变液、磁流变弹性体和磁流变胶的动态流变特性影响以及相应的模型进行了实验研究,并在以往的研究中得到了验证。然而,关于温度对磁流变胶动态性能影响的研究相当少。此外,对磁流变胶在不同温度下的应力-应变关系的建模还没有进行研究。因此,本文重点研究了磁流变胶在不同温度的振荡剪切模式下的场致流变行为,测量了频率分别为 0.1、5 和 15 Hz,振幅分别为 10% 和 50% 的谐波应变信号在 5 个温度水平下的迟滞响应,分析了磁流变胶的粘弹性特性,并采用粘弹塑性模型捕捉了磁流变凝胶的非线性迟滞特性。最后,对参数进行了普适化,并进行了验证。采用最小二乘法对模型参数进行了辨识,并通过实验验证了模型的正确性。为了实现这一目标,研制了 60% 羰基铁颗粒的聚氨酯基磁流变胶。聚氨酯作为基体,是因为聚氨酯是一种具有可变的物理和机械性能的聚合物基体,根据其交联的程度,它们可以从可流动的液体调至半固体(凝胶状)^[25]。与有机硅相比,聚氨酯具有较高的阻尼值,更加适用于磁流变阻尼器^[26]。通过一系列动态力学测试,研究了该材料的热流变学性能和磁流变学性能。

1 实验

1.1 磁流变胶的制备

本文制备了含羰基铁颗粒质量分数为 60% 的聚氨酯基磁流变胶。磁流变胶的研制步骤如下:(1)首先,利用电子分析天平(型号:CTD-Y A522)量取 120 g 羰基铁颗粒和 80 g 聚氨酯基体;(2)将量取的材料缓慢倒入 250 mL 的烧杯容器中;(3)利用机械搅拌器(BS-110PRO 型)将容器置于高温下进行均匀搅拌;(4)利用真空机(2XZ-0.5 型)进行抽气操作,得到磁流变胶。

采用商用流变仪(型号:MRC302, Anton Paar,奥地利)附 MRD 180 获得磁流变胶的动态响应。通过测量结果可知,磁流变胶的初始状态

(线圈无电流流过时)为凝胶状,如图 1(a)所示。施加电流后,磁流变胶从初始的凝胶状变为固体状态,并呈现出可控的性能,如图 1(b)所示。选用聚氨酯(中国上海盛聚建材有限公司提供)和羰基

铁颗粒(德国巴斯夫公司生产,直径 $1\sim8\ \mu\text{m}$)作为磁流变胶的基体和分散相。其中,聚氨酯的性能如表 1 所示。

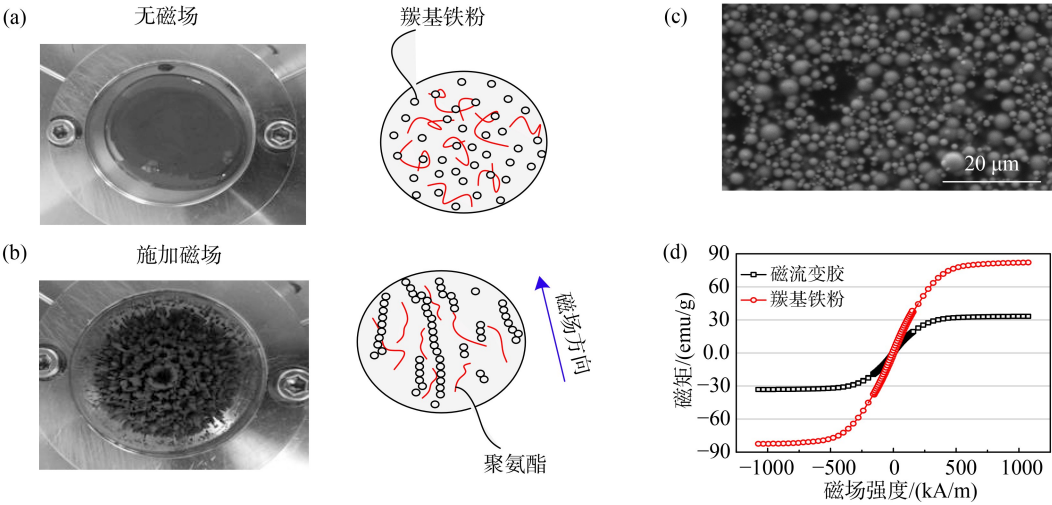


图 1 磁流变胶(a)无磁场时状态,(b)磁场存在时状态,(c)微观结构和(d)羰基铁粉与聚氨酯基磁流变胶的磁性性能

Figure 1 MR gel (a) without magnetic field, (b) under application of the magnetic field, (c) micro-structure and (d) magnetic behaviors of carbonyl iron particles and polyurethane-based MR gel

表 1 本文所用聚氨酯的性能

Table 1 Properties of the polyurethane used in this paper

工艺名称	工艺性能
状态	胶体溶液
外形	透明状
粘性 (mPa·s)	室温 25 ℃ :1200±50
密度 (g/mL)	1.12~1.2
工作温度 (℃)	-20~120
热膨胀系数 (1/℃)	180×10^{-6}
固体含量 (%)	100
颗粒尺寸 (μm)	<0.001

1.2 实验方法及表征

利用扫描电子显微镜 (SEM, 类型: Quant 250FEG)对磁流变胶的微观尺度进行研究。利用振动样品磁力仪 (VSM, Lake Shore 7407, USA) 获得了磁流变胶和羰基铁颗粒在 25 ℃ 下的磁感应强度-磁场强度 (H-B) 关系。利用奥地利 Anton Paar MRC Physica 302 商用流变仪 (MRD 180) 和应变控制模式下的温度控制单元, 获得了磁流变胶的动态行为。温度则是通过流体的循环系统控制。

为了研究温度和磁场对磁流变胶的影响, 在进行所有测量操作之前, 首先需将样品在室温下

以 $20\ \text{s}^{-1}$ 的剪切速率进行 60 s 的预剪切, 并让样品维持 15 s 稳定。利用振荡模式测试磁流变胶的动力学特性。在振荡流变测量中, 当频率固定为 5 Hz 时, 应变振幅从 0.001% 扫至 10%, 呈对数变化。整个测量过程施加电流 (0、0.5、1、2、3、4 A) 和温度 (10、30、50、70、90 ℃), 控制精度为 $\pm0.02\ ^\circ\text{C}$ 。并进行了大振幅振荡应力 (LAOS) 试验。在恒定振幅应变为 0.01%、10% 和 50%, 频率为 0.1、5 和 15 Hz, 电流为 0、1 和 2 A, 温度为 10、30、50、70 和 90 ℃ 的条件下进行 LAOS 测量。每次试验重复 3 次, 以保证实验的可靠性。值得注意的是, 作为比较, 本文还测量了聚氨酯在稳态剪切模式下的流变性能。

2 结果与讨论

2.1 结构和磁性能

利用 SEM 观察了所制备的磁流变胶的微观结构, 如图 1(c) 所示。图 1(c) 中的白点表示羰基铁颗粒的位置, 深色背景为聚氨酯。羰基铁颗粒大多呈规则球形, 平均直径为 $2.4\ \mu\text{m}$, 聚氨酯将羰基铁颗粒基本分开。温度为 25 ℃ 时, 磁场范围为 $-1073\sim1073\ \text{kA/m}$ 的磁流变胶的 B-H 响应如图 1(d) 所示。由图 1(d) 可以看出, 室温下羰基

铁颗粒和磁流变胶均表现为软磁行为,没有明显的磁滞特性。羰基铁颗粒的饱和磁通密度为 81 emu/g,磁阻凝胶的饱和磁通密度为 33 emu/g。

2.2 储能模量和损耗模量

模量即储能模量 G' 和损耗模量 G'' ,是描述磁流变材料粘弹性特性的两个重要参数。储能模量,用来描述储能能力。损耗模量描述能量的消耗能力。因此,本工作将在振荡剪切模式下,通过

不同温度下的应变幅值和电流扫描实验,研究温度对磁流变胶粘弹性行为的影响。

在本次测量中,得到了在 0、0.5、1、2、3、4 A 电流下,不同温度下 G' 作为剪切应变的函数的关系图如图 2 所示。在电流为 0、0.5 和 1 A 的不同温度下, G'' 作为剪切应变的函数如图 3 所示。由图 2 可以看出,在不同电流和温度下,随着剪切应变的增加,磁流变胶的 G' 均呈下降趋势。从图 2(a)

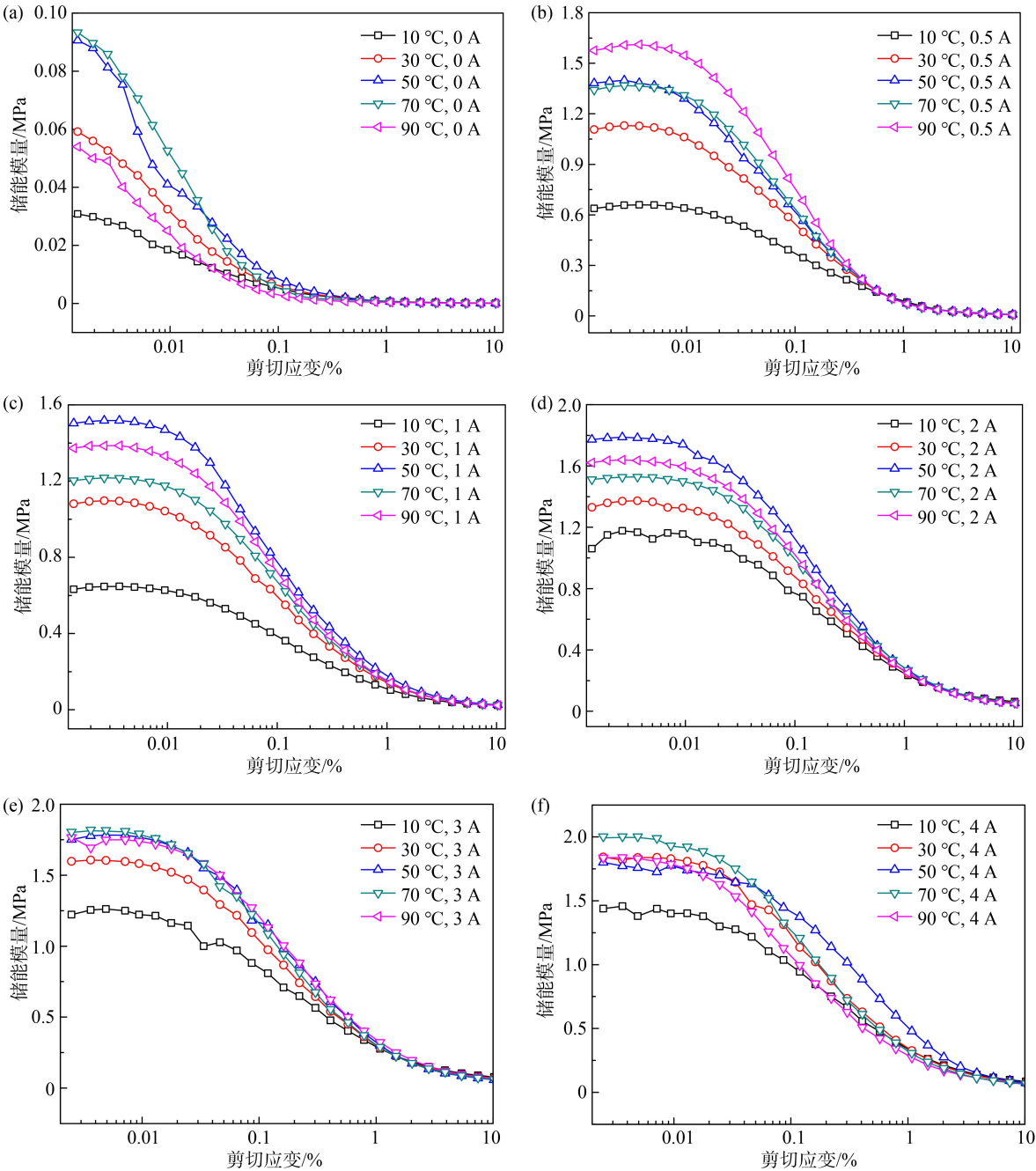


图 2 在不同温度和电流条件下,磁流变胶的储存模量在 5 Hz 频率下的剪切应变函数:(a) 0 A,(b) 0.5 A,(c) 1 A,(d) 2 A,(e) 3 A 和(f) 4 A

Figure 2 Storage modulus as a function of shear-strain at frequency of 5 Hz under various temperatures and currents for magnetorheological gel: (a) 0 A, (b) 0.5 A, (c) 1 A, (d) 2 A, (e) 3 A and (f) 4 A

可以看出,线圈不流过电流时, G' 在温度为 $10\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时先增大后减小。这主要是温度对聚氨酯基体的影响所致。随着温度的升高,聚氨酯基基质膨胀,使基质溢出有效剪切面积,最终导致磁流变胶中羰基铁颗粒的含量增加。因此,在 $10\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, G' 随温度的升高而增大;进一步升高温度,磁流变胶的粘度^[27] 迅速降低,导致 G' 降低。而在如图 2 (b) 所示 0.5 A 电流下, G' 几乎随着温度的升高而升高,这主要是基体的膨胀和溢出使羰基铁颗粒的质量分数增加所致。由图 2 (c) 的曲线可以看出, G' 在温度范围 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时增速较快,在温度范围为 $50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时减少,在温度范围为 $70\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时再次增加。首先 G'' 的增加主要是由于羰基铁颗粒质量分数的增加;进一步提高磁流变胶的温度,导致体系中基体含量迅速降低,减弱了羰基铁粒子与基体的相互作用,使 G' 降低;随着温度的升高和基质的流出,磁流变胶中极化粒子之间的距离非常近,粒子之间的作用力显著增大,这表明当温度从 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,储能模量增加。当电流达到 2 A 时(图 2d),可以观察到 G' 在 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内随温度的升高而增强,这是聚氨酯基体膨胀后羰基铁颗粒质量分数增加所致;进一步升高温度导致体系中基体含量降低,减弱了羰基铁粒子与基体的相互作用,使 G' 降低;当温度从 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,储能模量增强,这可能是由于在大电流下,基质黏度变得很低,颗粒间的相互吸引足以克服基质电阻所致。进一步增大电流(3 A 和 4 A)(图 2e 和 2f),可以表明储能模量随温度的变化现象变得相对无序。因此,在实际应用中,研究 0 A 与 2 A 之间电流的变化,这有利于实现控制。此外,当电流为 2 A 时,材料的存储模量基本达到饱和值。损失模量和 $\tan\delta$ 随剪切应变的变化规律与储存模量相同。

对于图 3 所示的每个温度下的 G'' ,在不同的电流下,它随剪切应变呈现不同的趋势。从图 3(a) 可以看出,在没有电流流过线圈的情况下,在每个温度下, G'' 随剪切应变减小。而当施加电流荷载时,从图 3(b) 和 3(c) 可以看出,在试验幅值范围内, G'' 随剪切应变先增大后减小。由图 3 可以看出,磁流变胶的 G'' 在各电流下随温度的升高而波动,这与 G' 的波动规律相似。产生这些现象的主要原因有:(1) 聚氨酯的膨胀使磁流变胶的羰基铁颗粒含量增加;(2) 羰基铁颗粒的磁化性能随温度的升

高而降低;(3) 温度对羰基铁颗粒与基体相互作用的影响;(4) 基体粘度随温度的升高而降低。

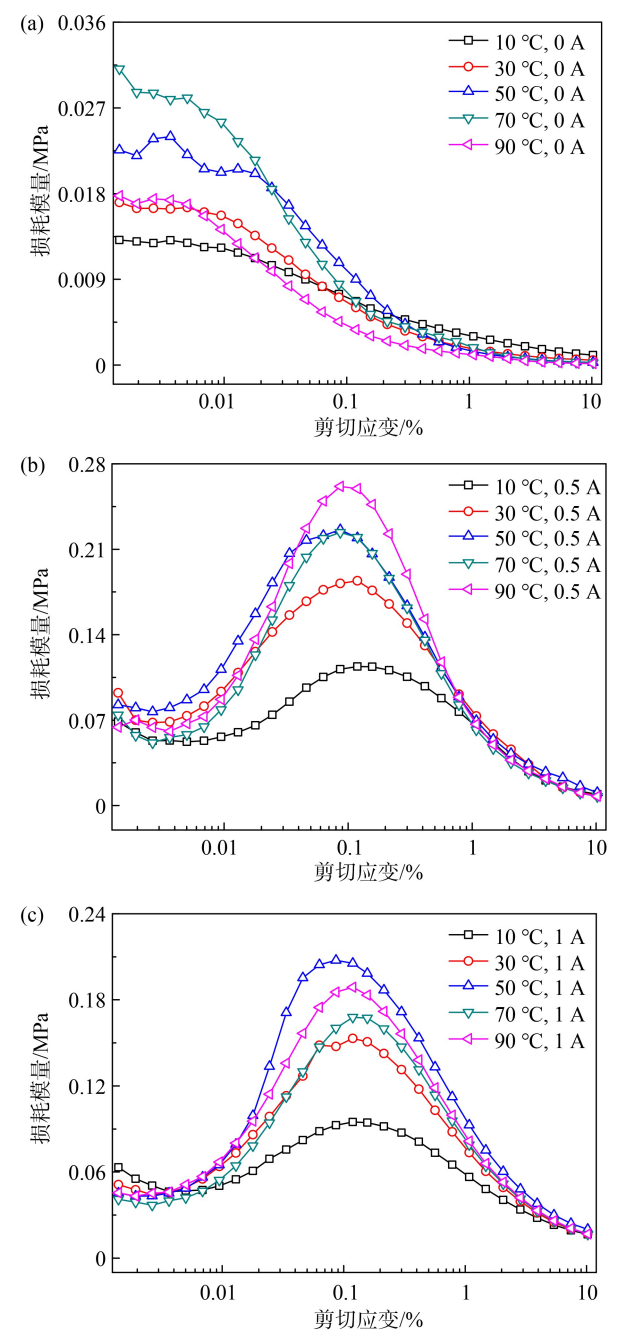


图 3 在不同的温度和电流条件下,损耗模量在 5 Hz 频率下的剪切应变函数:(a) 0 A , (b) 0.5 A , (c) 1 A
Figure 3 Loss modulus as a function of shear-strain at frequency of 5 Hz under various temperatures and currents for MR gel: (a) 0 A , (b) 0.5 A , (c) 1 A

损耗因子 $\tan\delta = G''/G'$ 的磁场依赖性是一个非常重要的参数,它反映了材料在动态流变下的能量损耗能力。图 4 显示了不同温度和电流下, 5 Hz 加载频率下 $\tan\delta$ 随剪切应变的变化。从

图 4 的数据可以看出,温度对粘弹性行为的影响或多或少与加载幅值和电流有关。从图 4(a)可以看出,在没有加载电流的情况下,各温度下 $\tan\delta$ 随剪切应变增大而增大。当剪切应变小于 0.1% 时,温度对磁流变胶样品的粘弹性性能影响不大。但随着加载幅值的进一步增大,粘弹性性能的温度效应变得明显。进一步增大加载电流(0.5 A),

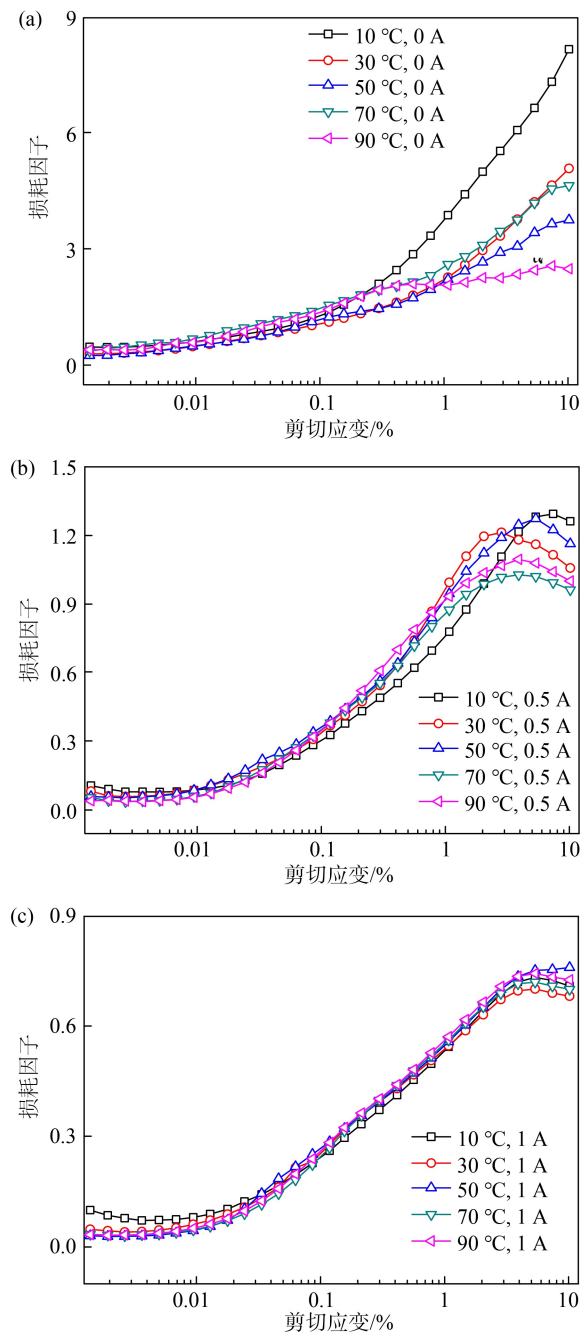


图 4 损耗因子($\tan\delta$)在不同温度和电流下,在 5 Hz 频率下剪切应变的函数:(a)0 A, (b)0.5 A, (c)1 A

Figure 4 $\tan\delta$ as a function of shear-strain at frequency of 5 Hz under various temperatures and currents: (a) 0 A, (b) 0.5 A, (c) 1 A

由图 4(b)可知, $\tan\delta$ 随剪切应变先增大后减小。当剪切应变大于 0.12% 时,温度对粘弹性行为的影响逐渐明显。当加载电流为 1 A 时,温度对磁流变胶的粘弹性几乎没有影响。这主要是由于在不施加电流的情况下,磁流变胶的粘弹性性能主要由基质主导;但电流流过线圈后主要由链网决定,温度对基体的影响大于对羰基铁颗粒的影响。另外,从图 4 可以看出,磁流变胶的黏性随加载电流的增大而减小。在不加电流的情况下,当剪切应变大于 0.01% 后,磁流变胶在整个温度范围内(10~90 °C)具有更强的粘性,即 $G'' > G'$ 。在 0.5 A 电流下,磁流变胶的粘弹性行为呈现由弹性主导的 $\tan\delta < 1$ 向粘性主导的 $\tan\delta > 1$ 转变的规律。在整个温度范围(10~90 °C)和整个剪切应变测试范围内,磁流变胶表现出较强的弹性行为,即 $G'' < G'$ 。

图 5 显示了在 10~90 °C 温度范围内, G' 在加载幅值为 0.01%、频率为 5 Hz 时电流的函数。可以看出,在每个温度下, G' 随电流近似线性增加,然后达到饱和值。温度对磁流变凝胶样品的饱和度和影响较大,表现出温度波动特征。影响这一现象的因素与不同温度下振幅扫描的模量相似。

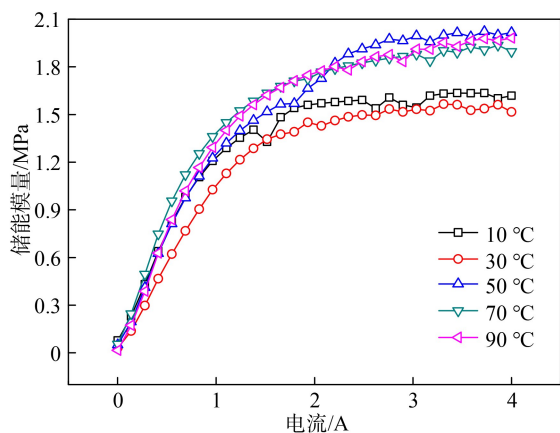


图 5 在不同温度下,储能模量与电流的函数关系

Figure 5 Storage modulus as a function of current under various temperatures

2.3 动态磁滞回线

磁流变凝胶器件,即半主动变刚度和阻尼减振器,通常工作在较宽的温度范围内^[28]。因此,测量了 10、30、50、70、90 °C 不同温度下正弦信号激励的可控磁滞回线,结果如图 6~8 所示。

图 6 为 10% 和 50% 振幅下温度和电流对磁流变胶磁滞回线形状的影响。对于每个滞回线,将应力-应变所包围的面积定义为一个周期内的能

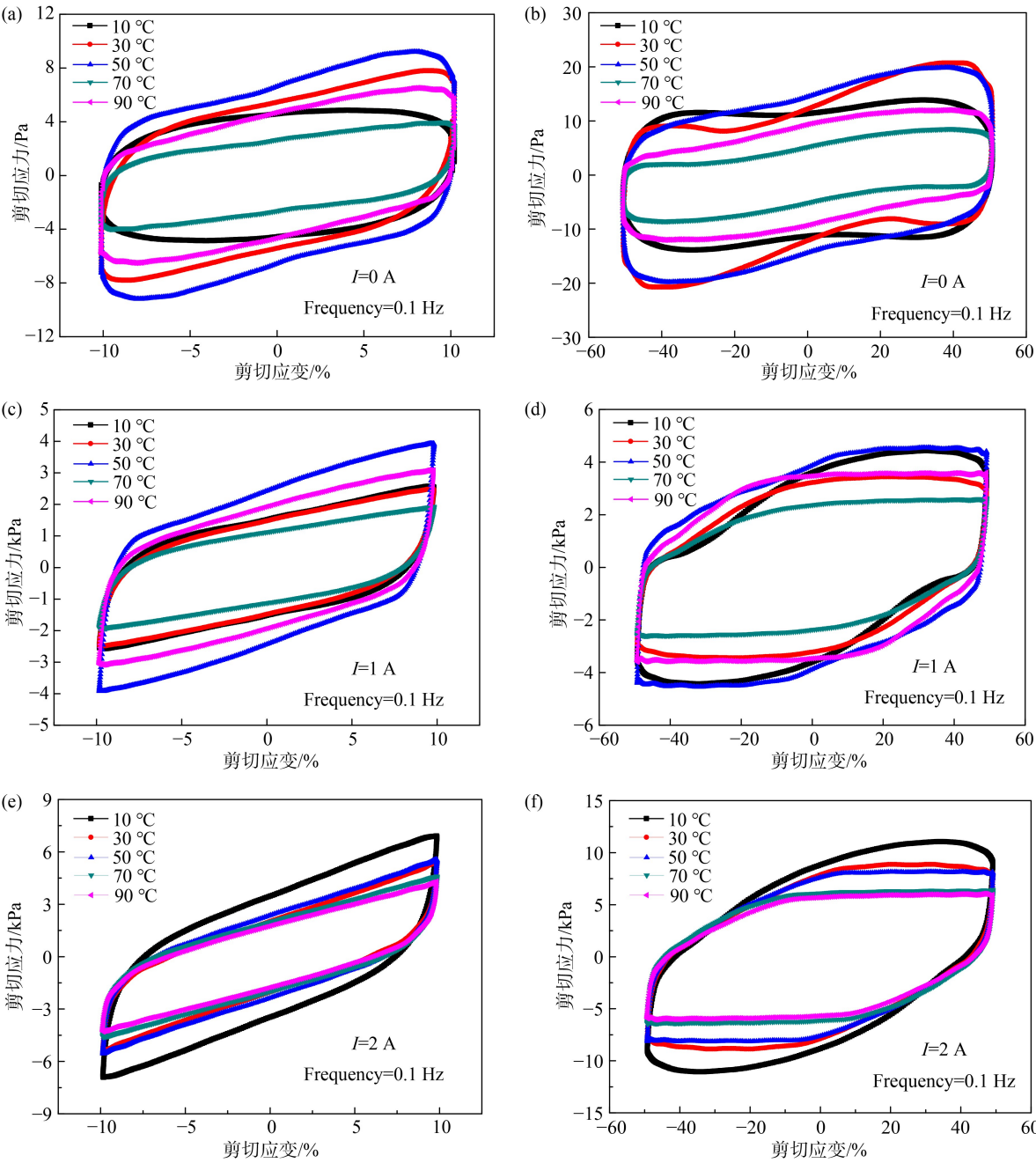


图 6 激励频率为 0.1 Hz 时,磁滞回线对电流和温度的依赖性:(a)、(c)、(e)的振幅为 10%;(b)、(d)、(f)的振幅为 50%
Figure 6 Dependence of hysteresis loops on current and temperature under excitation frequency is 0.1 Hz: amplitude of (a), (c) and (e) are 10%; amplitude of (b), (d) and (f) are 50%

量损失,即阻尼。同时,滞回线的斜率表示刚度的大小^[29]。由图 6 可以看出,每个应力-应变迟滞回线都不是椭圆的,这说明在上述试验条件下磁流变胶表现出非线性粘弹性特性。磁流变胶的刚度和阻尼随温度、电流和振幅的变化而变化。当激励幅值为 10% 和 50% 时,对于每个温度,滞回线的面积和斜率都随着电流的增大而增大,这在表 2 中有明显的体现。这意味着通过增加流过线圈的

电流,可以显著提高阻尼和刚度。例如,当电流由 $I=0\text{ A}$ 增加到 $I=2\text{ A}$ 时,滞后环面积由原来的 $0.002(\text{kPa}\cdot[1])$ 增加到 $0.743(\text{kPa}\cdot[1])$,即在 10% 的振幅和 30 °C 的温度下,滞后环面积增加 361 倍。同时,滞回线斜率由 $0.073(\text{kPa}/[1])$ 增加到 $53.704(\text{kPa}/[1])$,即增加了 736 倍。电流对磁流变胶的阻尼和刚度增强产生影响的主要原因是沿磁通密度方向形成一系列粒子链网络结

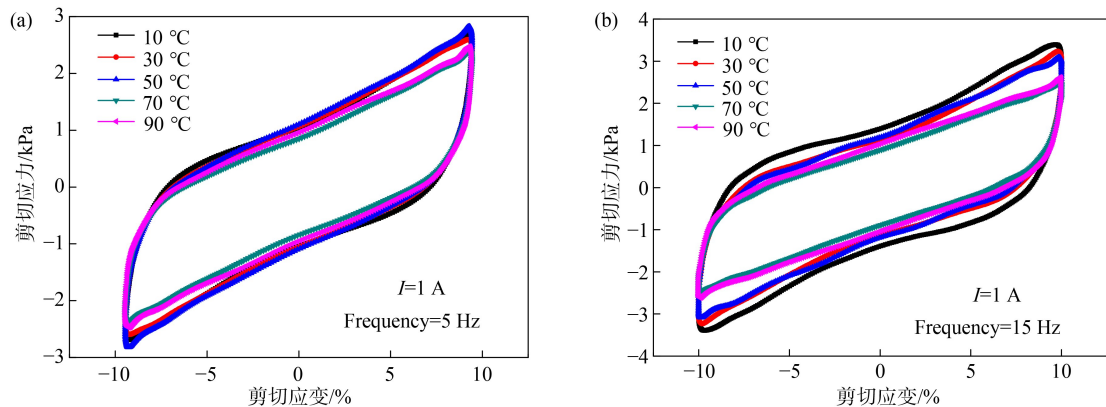


图 7 电流 $I=1$ A,幅值为 10%时,磁滞回线对激励频率的依赖性:(a) 5 Hz,(b)15 Hz

Figure 7 Dependence of hysteresis loops on excitation frequency under current $I=1$ A and amplitude is 10% : (a) 5 Hz,(b)15 Hz

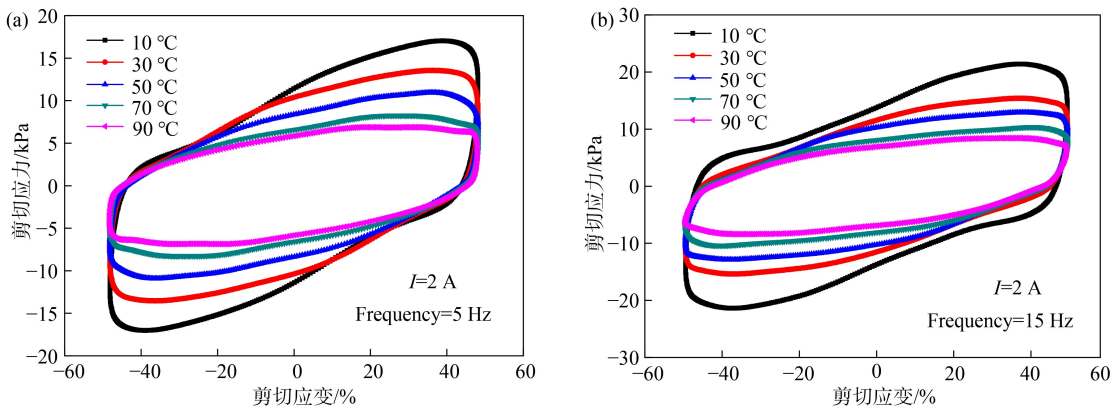


图 8 电流 $I=2$ A,幅值为 50%时,磁滞回线对激励频率的依赖性:(a) 5 Hz,(b)15 Hz

Figure 8 Dependence of hysteresis loops on excitation frequency under current $I=2$ A and amplitude is 50% : (a) 5 Hz,(b)15 Hz

表 2 图 7 中各滞回线面积和斜率值

Table 2 The values of area and slope for each hysteresis loop shown in the Fig. 7

电流	振幅	10 °C	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
迟滞回线面积 (kPa•[1])						
0 A	10%	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002
	50%	0.023	0.027	0.029	0.010	0.017
1 A	10%	0.542	0.514	0.884	0.391	0.691
	50%	5.636	4.944	6.627	3.778	5.633
2 A	10%	1.242	0.743	0.854	0.719	0.623
	50%	14.013	11.993	11.564	9.643	8.819
迟滞回线斜率 (kPa/[1])						
0 A	10%	0.032	0.073	0.077	0.038	0.059
	50%	0.015	0.032	0.029	0.014	0.018
1 A	10%	25.388	24.804	39.238	19.307	30.755
	50%	7.207	5.909	8.792	5.248	7.190
2 A	10%	68.752	53.704	55.386	45.835	42.865
	50%	18.212	16.220	16.064	12.871	11.859

构,使得材料内部结构更加稳定。因此,增大电流使其变硬,同时在剪切过程中需要更多的能量来破坏网络^[21]。此外,对于每一个电流和温度,磁滞回线面积随幅值的增大而增大。但是,斜率随振幅的变化呈现相反的趋势。这一现象主要是由于内部网络在不同振幅下的不同程度转换造成的。在较高的振幅,即 50% 时,粒子链网被拉得更长,需要更多的能量,导致粒子之间的距离增加。因此,颗粒间的相互作用减小,导致刚度比振幅减小 10%。除 $I=20$ A,幅值=50% 的试验条件外,温度对阻尼和刚度的影响比电流和幅值的影响更为复杂,因为它们不随温度呈现单调性。对于 $I=0$ A,在 10% 和 50% 的振幅下,从 10~90 °C 的变化过程中,滞回线面积和斜率呈现出 3 种不同的变化趋势:先增大(10~50 °C),然后减小(50~70 °C),最后再次增大(70~90 °C)。不同的是, $I=1$ A 在 10% 和 50% 振幅下,在同一温度范围内,滞回线面积和斜率呈现出 4 种不同的变化趋势:先减小(10~30 °C),然后增大(30~50 °C),再减小(50~70 °C),最后增大(70~90 °C)。磁流变胶样品的相变性能主要与聚氨酯基体的 α 相变^[27,30]和温度变化^[25]引起的软磁粒子偶极子相互作用有关。

图 7 和图 6(c)为不同激励频率下(电流 1 A 和幅值 10% 时的 0.1、5 和 15 Hz)的磁滞回线。可以观察到,不同激发频率下,温度对磁流变凝胶磁滞回线面积和斜率的影响不同,特别是温度对磁流变凝胶的阻尼和刚度影响最大。而在 5 Hz 频率下,不同温度下的阻尼和刚度几乎相同,这一点可以从较小的差异上反映出来。频率为 15 Hz 时,阻尼和刚度随温度的变化而减小。图 8 和图 6(f)为不同激励频率下的磁滞回线。可以清楚地看到,在此试验条件下,温度对面积和坡度的影响是单调的。随着温度的升高,阻尼和刚度都在不断减小,这主要是由于羰基铁颗粒的饱和磁化强度随温度的升高而降低^[31]。

众所周知,磁流变胶在剪切过程中表现出三种不同的机制,即先屈服前阶段,再屈服阶段,最后进入屈服后阶段。在屈服前区域,磁流变胶表现出弹性流变特性;但在屈服后阶段,由于网络结构的破坏,其表现出粘弹性特性;在屈服阶段,其屈服应力是磁场和温度的函数,用于实现半主动控制。因此,采用粘弹塑性模型对磁流变胶在不

同温度下的迟滞特性进行如下建模,原理如图 9 所示。

$$\tau = \tau_{\text{pre}} + \tau_{\text{post}} + \tau_y = S_{\text{ve}}(\dot{x})\tau_{\text{ve}} + S_{\text{vi}}(\dot{x})\tau_{\text{vi}} + S_y(\dot{x})\sigma_y \quad (1)$$

式中, τ_{pre} 、 τ_{post} 和 τ_y 分别为磁流变胶样品的前、后和屈服应力; S_{ve} 、 S_{vi} 、 S_y 表示形状函数,具体表达式由文献^[32]中的式(32)、(35)、(40)给出。 τ_{ve} 、 τ_{vi} 和 σ_y 分别为粘弹性分量、粘滞分量和屈服力参数。

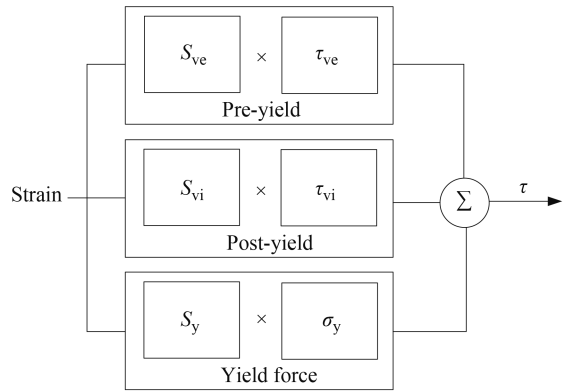


图 9 粘弹塑性模型示意图

Figure 9 Schematics of viscoelastic-plastic model

为了评估其对磁流变胶性能的预测能力,将式(1)中的粘弹塑性模型拟合为正弦应变在不同温度下激发的磁滞回线,频率为 15 Hz,振幅为 50%。图 10 为电流为 2 A 时的响应数据和模型预测数据。采用均方根误差(RMSE)来评价模型的拟合程度,其表达式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tau_p - \tau_e)^2} \quad (2)$$

式中, τ_p 为预测应力值, τ_e 为实验应力值; N 为数

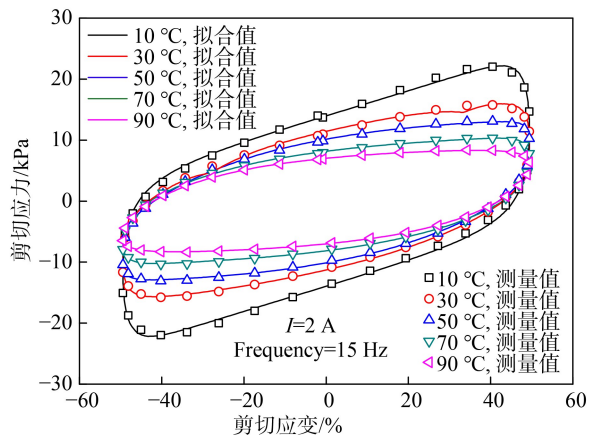


图 10 实验与模型比较

Figure 10 Comparison between experiment and model

据个数。图 10 所示迟滞回线对应的 RMSE 值如表 3 所示。

表 3 预测应力与实验应力之间的均方根误差值

Table 3 RMSE values between predicted stress and experimental stress

温度	10 ℃	30 ℃	50 ℃	70 ℃	90 ℃
均方根误差	1.0167	0.6234	0.3904	0.1898	0.2026

由图 10 可以看出,在试验条件下(电流为 2 A,频率为 15 Hz,幅值为 50%),粘弹塑性模型在所有温度下都能较好地捕获到磁流变胶的迟滞回线,这在表 3 中可以清楚地反映出来。此外,该模型在较高温度下具有更准确的预测能力。因此,粘弹塑性模型可以满足控制分析的需要。

3 结论

本研究通过机械搅拌器、真空机制备了含 60% 羰基铁颗粒的聚氨酯基磁流变胶。并通过流变仪在振荡剪切模式下测量了制备的磁流变胶在不同温度下的流变行为。其中温度采取从 10~90 ℃,间隔 20 ℃的均匀布置。实验结果表明:在不同电流条件下,磁流变胶的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 均随温度的升高而波动。损耗因子 $\tan\delta = G''/G'$ 在没有加载电流的情况下,随剪切应变增大而增大;当电流施加并进一步增大时,损耗因子随剪切应变先增大后减小。在研究温度对磁流变凝胶阻尼和刚度特性的影响实验中,提取了不同温度下频率分别为 0.1、5 和 15 Hz、振幅分别为 10%和 50%的正弦应变信号激发的磁滞回线。结果表明,温度对磁流变凝胶的阻尼和刚度有显著影响,随着温度的升高,羰基铁颗粒的饱和磁化强度降低,导致阻尼和刚度都在不断减小。最后,采用粘弹塑性模型预测了不同温度下的应力-应变迟滞回线,其均方根误差基本控制在 1 以内,这证明所提供的模型可以对 10~90 ℃宽温度范围下的应力-应变关系提供准确的估计。

参考文献:

[1] Li, R.; Gou, X.; Li, X. Y.; Yang, P. A.; Feng, D.; Tang, X. L. Study on the magnetic field-dependent rolling friction coefficient compensation of magnetorheological elastomer-copper ball friction pair with wet interfaces. *Adv. Eng. Mater.*, **2022**, 24(1), 2100632.

[2] 仇俊, 罗一平, 骆佼, 王莹, 苏志彬. 磁流变液数值模拟研究综述. *高分子通报*, **2021**, (10), 44-50.

[3] Xu, Y. G.; Gong, X. L.; Xuan, S. H.; Zhang, W.; Fan, Y. C. A high-performance magnetorheological material: preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties. *Soft Matter*, **2011**, 7(11), 5246-5254.

[4] 黄兆阁, 李长宇, 孟祥坤, 雍占福. 频率与温度对不同橡胶基磁流变弹性体的影响. *功能材料*, **2019**, 50(12), 12085-12088.

[5] Díez, A. G.; Tubio, C. R.; Etxebarria, J. G.; Lanceros-Mendez, S. Magnetorheological elastomer-based materials and devices: state of the art and future perspectives. *Adv. Eng. Mater.*, **2021**, 23(6), 2170023.

[6] 韩祎, 董龙雷, 唐攀涛. 非高斯随机路面下八轮重型车辆悬架的减振控制方法研究. *机械科学与技术*, **2022**, 8(1), 36-44.

[7] Wang, M. K.; Chen, Z. B.; Wereley, N. M. Magnetorheological damper design to improve vibration mitigation under a volume constraint. *Smart Mater. Struct.*, **2019**, 28(11), 114003.

[8] 吕宏展, 梁锡昌, 王家序, 陈文胜, 谢光辉. 新型稳定磁流变体材料: 磁胶的性能实验研究. *材料科学与工艺*, **2011**, 19(1), 139-143.

[9] Le-Duc, T.; Ho-Huu, V.; Nguyen-Thoi, T.; Nguyen-Quoc, H. A new design approach based on differential evolution algorithm for geometric optimization of magnetorheological brakes. *Smart Mater. Struct.*, **2016**, 25(12), 125020.

[10] Ichwan, B.; Mazlan, S. A.; Imaduddin, F.; Ubaidillah, Koga, T.; Idris, M. H. Development of a modular MR valve using meandering flow path structure. *Smart Mater. Struct.*, **2016**, 25(3), 037001.

[11] Dohmen, E.; Boisly, M.; Borin, D.; Kästner, M.; Ulbricht, V.; Gude, M.; Hufenbach, W.; Heinrich, G.; Odenbach, S. Advancing towards polyurethane-based magnetorheological composites. *Adv. Eng. Mater.*, **2014**, 16(10), 1270-1275.

[12] Zhang, G.; Wang, H. X.; Qing, O. Y.; Wang, J. Numerical analysis of multiphysical field for independent three-stage magnetorheological damper of double rod during recoil process of artillery. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, **2019**, 233(14), 4960-4979.

[13] 苏志彬, 罗一平, 王莹, 骆佼, 李玉青. 磁流变弹

- 性体力学性能研究综述. 高分子通报, **2021**, (9), 48-53.
- [14] Wang, D. M.; Zi, B.; Zeng, Y. S.; Qian, S.; Qian, J. Simulation and experiment on transient temperature field of a magnetorheological clutch for vehicle application. *Smart Mater. Struct.*, **2017**, 26(9), 095020.
- [15] Ahmad Khairi, M. H.; Mazlan, S. A.; Ubaidillah, Choi, S. B.; Abdul Aziz, S. A.; Mohamad, N.; Hapipi, N. M.; Nordin, N. Role of additives in enhancing the rheological properties of magnetorheological solids: a review. *Adv. Eng. Mater.*, **2019**, 21(3), 1800696.
- [16] Li, W. H.; Zhou, Y.; Tian, T. F. Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading. *Rheol. Acta*, **2010**, 49(7), 733-740.
- [17] Aziz, S. A. A.; Mazlan, S. A.; Ismail, N. I. N.; Ubaidillah, U.; Choi, S. B.; Ahmad Khairi, M. H.; Yunus, N. A. Effects of multiwall carbon nanotubes on viscoelastic properties of magnetorheological elastomers. *Smart Mater. Struct.*, **2016**, 25(7), 077001.
- [18] 王成, 王目凯, 于东, 陈照波, 闫辉. 磁流变冲击缓冲系统最优广义宾汉数控制. 振动与冲击, **2022**, 41(16), 1-9.
- [19] Li, W. H.; Du, H. J.; Chen, G.; Yeo, S. H.; Guo, N. Q. Nonlinear viscoelastic properties of MR fluids under large-amplitude-oscillatory-shear. *Rheol. Acta*, **2003**, 42(3), 280-286.
- [20] Mohamad, N.; Mazlan, S. A.; Ubaidillah, Choi, S. B.; Imaduddin, F.; Abdul Aziz, S. A. The field-dependent viscoelastic and transient responses of plate-like carbonyl iron particle based magnetorheological greases. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **2019**, 30(5), 788-797.
- [21] Zhang, G.; Wang, H. X.; Wang, J.; Zheng, J. J.; Ouyang, Q. Dynamic rheological properties of polyurethane-based magnetorheological gels studied using oscillation shear tests. *RSC Adv.*, **2019**, 9(18), 10124-10134.
- [22] 贺俊智, 郭霞, 李冬冬, 张欢, 赵宁, 徐坚, 迟海. 磁流变弹性体的研究进展. 高分子通报, **2018**, (5), 21-27.
- [23] Kou, Y.; Jin, K.; Xu, L. Q.; Zheng, X. J. A viscoelastic constitutive model for magneto-mechanical coupling of magnetorheological elastomers. *Smart Mater. Struct.*, **2017**, 26(11), 115017.
- [24] Poojary, U. R.; Gangadharan, K. V. Integer and fractional order-based viscoelastic constitutive modeling to predict the frequency and magnetic field-induced properties of magnetorheological elastomer. *J. Vib. Acoust.*, **2018**, 140(4), 041007.
- [25] Zhang, G.; Li, Y. C.; Wang, H. X.; Wang, J. Rheological properties of polyurethane-based magnetorheological gels. *Front. Mater.*, **2019**, 6, 56.
- [26] 郭秋月, 王炆, 欧阳青. 不同比表面积 SiO₂ 对磁流变液流变特性和沉降稳定性的影响. 机械工程材料, **2018**, 42(10), 8-12.
- [27] Duong, H. T. T.; Burford, R. P. Effect of foam density, oil viscosity, and temperature on oil sorption behavior of polyurethane. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2006**, 99(1), 360-367.
- [28] Li, H. P.; Jönkkäri, I.; Sarlin, E.; Chen, F. Temperature effects and temperature-dependent constitutive model of magnetorheological fluids. *Rheol. Acta*, **2021**, 60(11), 719-728.
- [29] Wan, Y. X.; Xiong, Y. P.; Zhang, S. M. Temperature dependent dynamic mechanical properties of Magnetorheological elastomers; experiment and modeling. *Compos. Struct.*, **2018**, 202, 768-773.
- [30] Ashrafizadeh, H.; Mertiny, P.; McDonald, A. Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance of polyurethane elastomers. *Wear*, **2016**, 368-369, 26-38.
- [31] Wang, D. M.; Zi, B.; Zeng, Y. S.; Hou, Y. F.; Meng, Q. R. Temperature-dependent material properties of the components of magnetorheological fluids. *J. Mater. Sci.*, **2014**, 49(24), 8459-8470.
- [32] 阎秋生, 蔡志航, 潘继生. 磁流变变间隙动压平坦化加工力特性研究. 机械工程学报, **2022**, 11(2), 1-11.