

磁流变胶泥流变学特性测试装置研究*

叶宇浩, 廖昌荣, 孙凌逸, 谢磊

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室智能结构中心 重庆 400044)

摘要:现有的商用磁流变仪不能满足磁流变胶泥高剪切率和高剪切应力测试的要求,对比设计了密闭圆筒剪切模式的磁流变胶泥流变特性测试装置。在完成总体结构设计的基础上,建立了剪切通道励磁磁路的分析模型,得出了剪切通道磁场强度与励磁电流的关系,并进行了有限元仿真验证。考虑转子与外筒存在倾斜,建立了磁流变胶泥转矩传递的力学模型,得到了转子与外筒倾斜角度与传递转矩误差的理论关系。完成了测量装置样机的制作,开展了磁流变胶泥流变学特性测试,在低剪切率下测量装置测试结果与安东帕流变仪测试结果能较好吻合。研究表明,测试装置能够实现 $25\ 000\ \text{s}^{-1}$ 的高剪切率和 $200\ \text{kPa}$ 的高剪切应力测试。

关键词:磁流变胶泥;剪切率;剪切应力;流变学特性;测试装置

中图分类号: TH873 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Study on testing device for rheological properties of magneto-rheological glues

Ye Yuhao, Liao Changrong, Sun Lingyi, Xie Lei

(Key Lab of Opto-electronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The existing commercial rheometer cannot satisfy the demand of the high shear rate and stress data of Magneto-rheological glue. To solve this problem, a testing device with airtight cylinder shear mode is designed to measure the parameters of Magneto-rheological Glues in this study. Based on the overall structural design, the relationship of the exciting current and the magnetic field is obtained by establishing the analytical model of magnetic circuit in shear channel. The relationship is verified by the finite element simulation. Considering the tilt between the rotor and outer cylinder, the torque transmission mechanical model is proposed to get the theoretical relationship between the incline angle and the error of torque transmission. The prototype of testing device is fabricated and the tests for Magneto-rheological glue are executed. The experimental data by testing device agree with those by Anton Paar rheometer at the low shear rates. It shows that the test device can reach the measurement with high shear rate of $25\ 000\ \text{s}^{-1}$ and high shear stress of $200\ \text{kPa}$.

Keywords: magneto-rheological glue; shear rate; shear stress; rheological properties; testing device

0 引言

在外加磁场下,磁流变材料内部可磁化微粒的分布发生改变从而实现其流变学性能快速、连续、可逆的控制^[1]。作为最具代表性的磁流变材料,磁流变液(magneto-rheological fluid, MRF),能够在毫秒量级时间内由牛顿流体变成半固态体,在汽车悬架、建筑隔振等领域得到了广泛的应用,但其悬浮稳定性较差以及剪切屈服应力较小的缺陷也限制了磁流变液的应用与发展。近年来,基于聚硅氧烷载体的新型磁流变液(为了区别于传

统的磁流变液,称该类材料为磁流变胶泥(magneto-rheological glue, MRG)^[2-3]的出现得到了广泛的关注,凭借其载体零场粘度大和剪切稀化特性很好地解决了悬浮项稳定性差和剪切屈服应力较小的问题,在汽车碰撞缓冲和武器后坐缓冲等高速缓冲领域有广阔的应用前景。磁流变胶泥的流变学特性表现为在不同磁场下剪切速率和剪切应力的关系。在冲击隔离场合,磁流变胶泥在磁场作用下的高剪切应力和高剪切速率的流变学特性关系到缓冲装置设计。近年来,在磁流变液流变仪研究中取得了重要进展,常建等人^[4]研制了一种旋转圆盘式的磁流变液流变特性测量装置,完成了 $300\ \text{s}^{-1}$ 的样品测试;

廖昌荣等人^[5]根据磁流变材料的特性,介绍了对磁流变材料流变特性检测的方法和原理;吴森等人^[6]针对非牛顿流体研究了一种加压管式流变测试系统,为磁流变材料流变特性测量提供了一种新的思路;Chatzistamou V. C.^[7]设计一种流道管道垂直于电磁铁磁场的流变仪,实现对速率、密度、温度、压力差和磁感应强度的测量;关于高剪切率流变仪的研究,美国马里兰大学 Becnel A. C. 等人^[8]采用同轴圆筒结构作为测量腔的结构,完成能达到 25 000 s⁻¹剪切率的磁流变仪的设计。上述研究表明:传统磁流变仪不能满足对样品高剪切速率和高剪切应力测试的要求,这一需求受到学者们的广泛关注,现有的商业流变仪不能很好地实现对磁流变胶泥材料的流变特性的测量。因此研制出能适用于磁流变胶泥的流变特性测量装置具有重要的实用价值。

1 测试装置工作原理与总体设计

如图 1 所示,通过剪切方法实现流变学特性测试的常见方式有 4 种。a 模式为两平行板流动、b 模式为同轴圆筒环缝中的环形流动^[9]、c 模式为粗管或毛细管的流动、d 模式为平行平板旋转剪切流动。各模式测量的优劣性如表 1 所示。

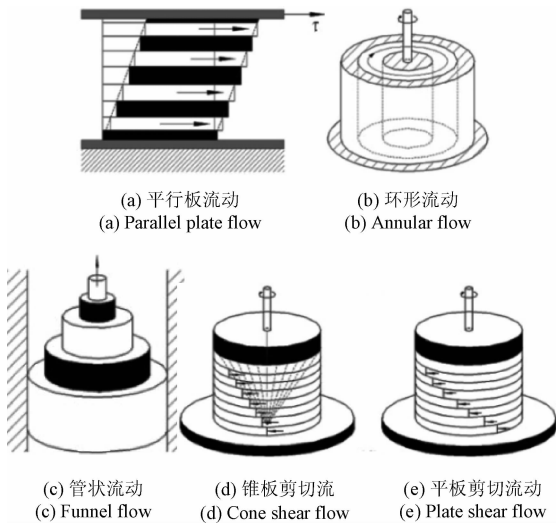


图 1 测试流变学特性剪切方法

Fig. 1 Shear mode for test rheological properties of fluid

表 1 各模式测量的优劣性

Table 1 The characteristics of each mode

| 模式 | 结构难易 | 磁场施加 | 密封性 | 测量范围 |
|----|------|------|-----|------|
| a | 难 | 难 | 好 | 中 |
| b | 易 | 易 | 中 | 高 |
| c | 难 | 难 | 好 | 高 |
| d | 易 | 易 | 差 | 低 |

对于磁流变胶泥流变学特性的测试需要重点考虑以下要求:磁场方向垂直于流动方向且分布均匀、测量范围宽、操作简单、结构易于实现与拆卸等。c 模式和 d 模式都存在难以施加垂直于流动方向上的均匀磁场,a 模式也不适用于长时间的连续测量;e 模式虽然应用普遍,但在进行较高剪切速率测量时被测样品易受离心作用而被甩出测量腔(因此只适用于低剪切率测试);b 模式采用同轴圆筒结构,由于其结构的对称性,能较好地实现磁场的垂直施加和均匀性要求,同时旋转方式能够满足连续测量。因此,b 模式更适用于对磁流变胶泥流变学特性的测试。

同轴圆筒模式的测量装置结构如图 2 所示,剪切流动发生在同心间隙之间。对测量腔进行密封,防止样品由于威森伯格效应随旋转轴脱离测量腔,致使磁流变胶泥样品充满整个测量腔间隙。转子为工字形,剪切间隙位于转子上端与下端的两个环形间隙,线圈产生的磁场垂直穿过工字形转子的上下两个剪切间隙,转子中部的间隙宽度较大,且不受磁场作用。在环形间隙上下方都设置较大空隙,充满磁流变胶泥且不受磁场控制,保证了被测样品不易因离心等因素溢出。

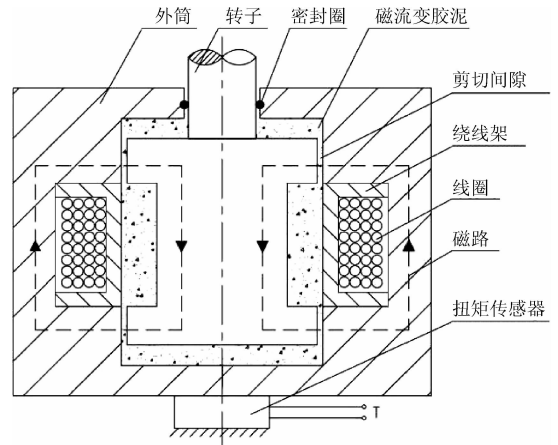


图 2 测量腔结构

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement cavity

MRG 测试装置原理如图 3 所示,上位机控制伺服电机驱动器控制电机转速,从而改变剪切速率。控制线圈电流大小产生不同强度的磁场,并通过所设计磁路作用在磁流变胶泥上,使被测胶泥产生不同的流变特性。测量腔内转子通过转动实现对磁流变胶泥的剪切作用。扭矩传感器通过连接在测量腔外壳底端实时获得测量腔扭矩值,上位机通过采集卡采得实际的扭矩数据。上位机通过预先设定的程序对转子转速、励磁电流大小以及测量腔的扭矩值进行相应的模型计算,得到在不同磁场强度下,磁流变胶泥的剪切速率与剪切应力的关系,完成对被测样品流变特性的测量。

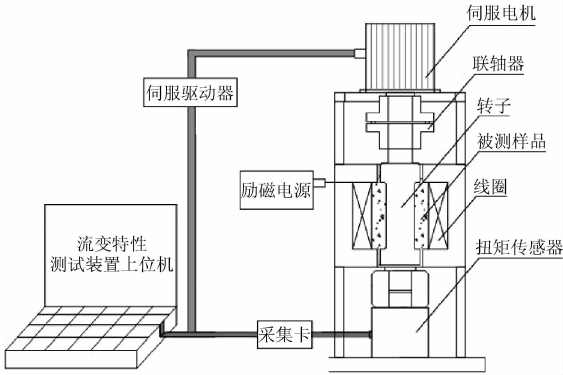


图3 MRG测试装置原理

Fig.3 Schematic diagram of MRG testing device

由文献[10]经推导可知被测样品的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 与测量腔转子转速 n (r/min)的关系为:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi n(R+h)}{30h} \quad (1)$$

式中: r 和 R 分别为剪切通道的内外径, h 为间隙的宽度。测量腔外筒扭矩 T 与当前剪切速率下被测样品的剪切应力 τ 的关系:

$$\tau = \frac{T(R^2+r^2)}{8\pi LR^2 r^2 \cdot CI} \quad (2)$$

式中: L 为单个环形通道的高度, CI 为磁流变胶泥与极板表面滑移、上下端面传递转矩和中间段传递转矩作用等的修正因子。通过当前的转子转速以及测得的扭矩值即可计算得到被测样品在某剪切速率下的剪切应力值。

2 测量装置磁路模型与有限元验证

由磁流变效应可知,作用在磁流变材料上的磁场方向必须垂直于磁流变材料的流动方向。针对所设计的测量装置,磁感线必须为转动的径向方向并穿过磁流变胶泥,还需要保证磁路各个部分的磁感应强度不能达到饱和。选择电工纯铁作为导磁材料,采用硬铝作为非导磁材料。磁路如图4所示,其中虚线为磁场方向,剪切环形间隙位于测量腔外筒与工字形转子之间,磁场正好垂直于其流动方向,工字形设计能够更好地约束磁感线的走向,避免出现转角处磁感线过于密集的状况。线圈绕制在由硬铝制成的不导磁绕线架上,避免磁感线直接通过绕线架而不经测量环形间隙。

由磁路欧姆定律可得磁路中磁通量:

$$\phi = \frac{NI}{R_m} \quad (3)$$

式中: N 为线圈的匝数, I 为电流的大小。而磁阻 R_m 由磁路的尺寸、材料的磁导率及几何形状等因素决定,计算公式为:

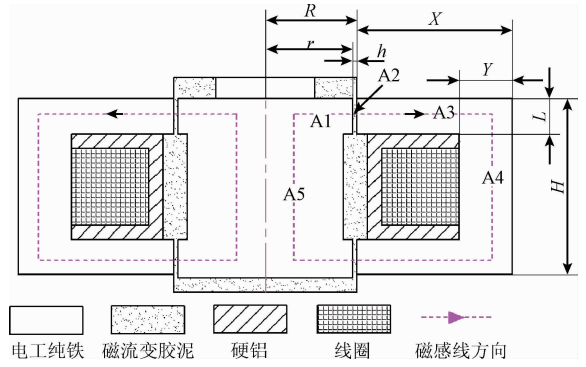


图4 磁路模型示意图

Fig.4 Schematic model of magnetic circuit

$$R_m = \frac{L_i}{\mu S_i} \quad (4)$$

式中: L_i 为磁路长度, S_i 为磁路的横截面积, μ 是材料的磁导率。

各结构参数及符号表示方式如图4所示,忽略漏磁、连接气隙处空气等因素,将图4中磁路区域分成A1~A5五个区域:对每个区域分别求磁阻可得:

$$R_1 = \frac{\ln(R-h) - \ln(0.5r)}{2\pi L \mu_s} \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{\ln(R) - \ln(R-h)}{2\pi L \mu_g} \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{\ln(R+X-Y) - \ln(R)}{2\pi L \mu_s} \quad (7)$$

$$R_4 = \frac{H-L}{\pi \mu_s [(R+X)^2 - (R+X-Y)^2]} \quad (8)$$

$$R_5 = \frac{H-L}{\pi r^2 \mu_s} \quad (9)$$

式中: μ_s 为磁路电工纯铁材料的磁导率, μ_g 为测试间隙处样品的磁导率。根据对称结构得到磁路的总磁阻为:

$$R_m = 2R_1 + 2R_2 + 2R_3 + R_4 + R_5 \quad (10)$$

每个区域的磁感应强度为:

$$B_i = \frac{\phi_i}{S_i} \quad (11)$$

将磁路结构各参数、励磁电流大小 I 和匝数 N 代入式(3)并联方式(10)、(11)即可得到环形通道间隙处的磁感应强度值^[11]。

使用ANSYS软件对模型进行不同电流下的磁场仿真,得到了线圈电流与环形间隙处磁感应强度的关系。对比理论计算与仿真的结果,如图5所示,理论与仿真结果吻合较好,一定程度上反映了理论模型计算的正确性。在电流达到0.3 A时,间隙处的磁感应强度已达到0.9 T,能够满足测量装置在测量时对磁感应强度的需求。误差主要是由于理论建模时进行一定简化所导致的。图6所示为电流0.2 A时的磁感应强度仿真结果,

磁感应强度达到了 0.55 T,且分布均匀,同时磁路中没有出现磁饱和现象,验证了结构设计的合理性。由样品的磁导率可得间隙处的磁场强度,对仿真得到的电流 $I(A)$ 与磁场强度 $H(A/m)$ 的离散点进行多项式拟合,得到:

$$H = 40\ 680I^6 - 406\ 700I^5 + 1\ 530\ 000I^4 - 2\ 538\ 000I^3 + 1\ 274\ 000I^2 + 1\ 237\ 000I - 10\ 680 \quad (12)$$

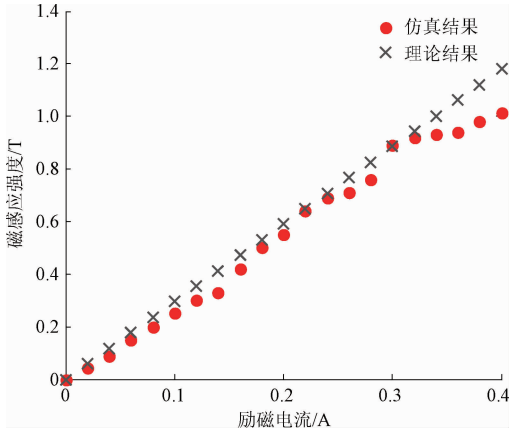


图5 理论模型与仿真结果对比

Fig.5 Comparison of theoretical model and simulation

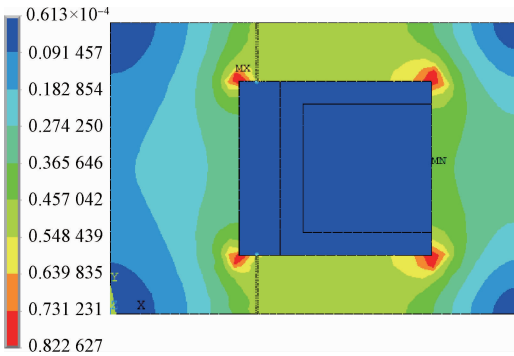


图6 ANSYS 仿真结果

Fig.6 Result of ANSYS simulation

3 转矩传递模型分析

测腔内的流体流动可简化为两同轴圆柱面间的流动。由文献[12]可知,两个同轴旋转圆柱面间的流道内柱面的剪切应力为:

$$\tau'_{r\varphi} = 2\eta \frac{(\Omega_1 - \Omega_2)R^2}{R^2 - r^2} \quad (13)$$

式中: η 为流体粘度, R 为外筒半径, r 为内筒半径, Ω_1 为内筒转速, Ω_2 为外筒转速等于 0。 L 为单个环形通道高度,得到外筒所受的总力矩为:

$$M = 2\pi R^2 2L\tau'_{r\varphi} = \frac{8\pi\eta\Omega_1 R^2 r^2 L}{R^2 - r^2} \quad (14)$$

测量腔内的转子在安装过程中不可能做到和外筒保

持完全的同轴,同轴度偏差将会对转矩的传递以及磁场的大小分布产生一定的影响。由于间隙宽度远小于磁路的长度,同轴度偏差对磁场的影响可忽略不计,在这里只考虑对转矩传递的影响。

如图 7(a) 所示,当同轴度出现角度 α 偏差时,式(13)中的 R 将不再是常数。用平行于转子底面的截面截取转子的剪切间隙通道,截面将转子外表面截为圆,将外筒内表面截为椭圆,两圆且不同心,如图 7(b) 所示。

截面上的圆心偏差为:

$$\Delta x = l \tan \alpha \quad (15)$$

式中: l 为截面到转子顶面的距离。外筒内表面被截成的椭圆的长轴和短轴分别为:

$$a = R / \cos \alpha \quad b = R \quad (16)$$

设 A 点为椭圆圆心, B 点为转子截面圆心, D 为 AB 延长线与椭圆的交点, C 为椭圆上任意一点, θ 为线段 AC 与 AB 的夹角,根据椭圆的性质可得:

$$AC = \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \quad (17)$$

线段 BC 的长度即为式(13)中的 R ,用 R' 表示 BC 的长度,则根据余弦定理得:

$$R' = \sqrt{\Delta x^2 + AC^2 - 2\Delta x AC \cos \theta} \quad (18)$$

设 BC 与 DB 的夹角为 φ , 则角 φ 与角 θ 的关系由余弦定理得:

$$\varphi = \theta + \arccos\left(\frac{r^2 + R'^2 - \Delta x^2}{2rR'}\right) \quad (19)$$

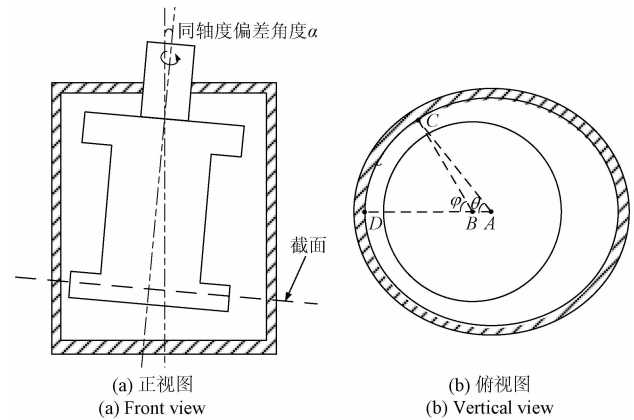


图7 同轴度偏差示意图

Fig.7 Schematic diagram of the coaxiality deviation

由于同轴度偏差较小, φ 可在计算时近似等于 θ 。设单个通道高度为 L ,将式(15)~(18)代入式(13),再通过对 l 和 φ 进行积分得到同轴出现偏差时的力矩,近似等于:

$$M' \approx \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{2\eta\Omega_1 R'^2 r^2}{R'^2 - r^2} d\theta dl + \int_{H-L}^H \int_0^{2\pi} \frac{2\eta\Omega_1 R'^2 r^2}{R'^2 - r^2} d\theta dl \quad (20)$$

式中: H 为转子总高度, R' 是 l 和 θ 的函数。与此同时,

当同轴度偏差角度超过一定大小时,转子和外筒内壁会发生接触,这时同轴度最大的偏差角度为:

$$\alpha_{\max} = \arcsin\left(\frac{R}{\sqrt{r^2 + H^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + H^2}}\right) \quad (21)$$

取间隙宽度为 0.2 mm, 单个通道高度 $L = 10$ mm, 转子高度 $H = 50$ mm, 内径 $r = 25$ mm, 代入式(21)得到同轴度最大偏差角度为 0.23° 。用相对误差 $\delta = |M' - M|/M$ 来表示同轴度出现偏差时扭矩的变化情况, 将参数代入式(20)运算, 通过 MATLAB 计算得到在不同偏差角度下的相对误差如图 8 所示。测量的相对误差随偏差角度的增大呈类指数上升的趋势, 设定测量装置可接受的最大相对误差为 5%, 通过计算得到的相对误差可以得到同轴度偏差的最大角度, 针对本文设计的测量装置同轴度偏差的最大角度为 $\alpha_{\max} = 0.118^\circ$ 。要保证测量精度, 必须在装置安装过程中严格限制同轴度偏差角度不得超过 α_{\max} 。

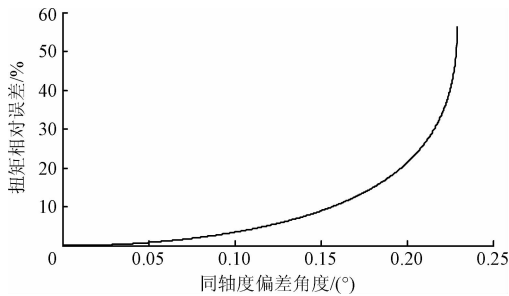


图 8 同轴偏心角度与相对误差的关系

Fig. 8 Relationship between coaxiality deviation degree and relative error

4 测试装置的制作与磁流变胶泥样品测试

根据理论研究, 完成对硬件电路器件的选择, 其中包括扭矩传感器、数据采集卡、励磁电源和电机及电机驱动器^[13]。上位机模块采用 PC 作为载体, 通过 USB 串口数据线与采集卡进行连接完成数据的读取, 运用 LabVIEW 软件编程进行数据读取、模型计算、显示、数据保存、电机控制及人机交互界面等环节的设计^[14-15]。

基于设计理论, 完成对测量装置设计、加工及组装, 装置关键尺寸如表 2 所示。

表 2 MRG 测量装置的结构参数

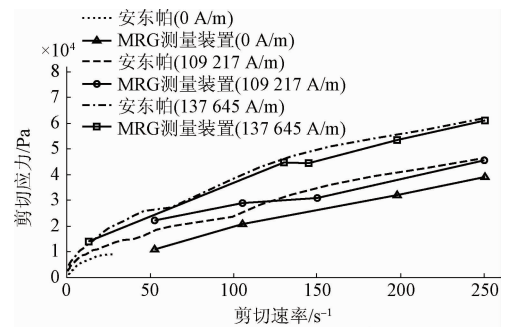
Table 2 The structure parameters of MRG testing device (mm)

| 关键结构参数 | 外筒内径 R | 转子半径 r | 转子高度 H | 单个间隙高度 L |
|--------|----------|----------|----------|------------|
| 尺寸 | 25.2 | 25 | 50 | 10 |

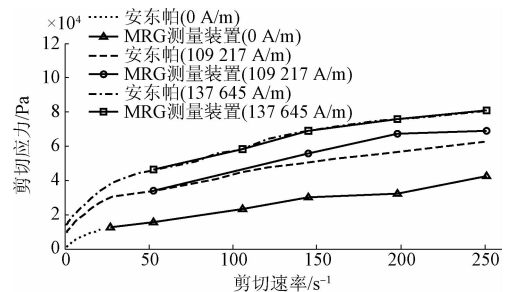
针对试验验证, 制备了 3 种不同浓度的磁流变胶泥, 铁磁颗粒质量分数为 20%、40% 和 60%, 其中胶泥粘度为 $200 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。将制备完成的磁流变胶泥分别由安东帕

MCR-301 流变仪和本测试装置进行低剪切率测试, 以对比装置测量的准确性。

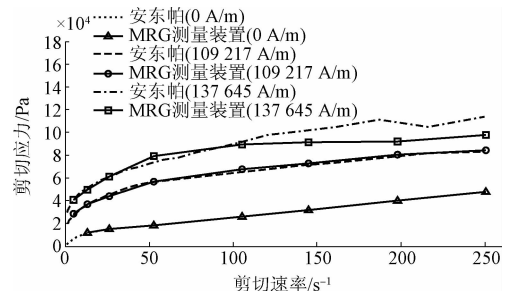
施加不同的励磁电流得到不同的磁场, 将磁流变胶泥在不同磁场下电机转速与测量腔外筒的扭矩值代入式(1)、(2)进行计算即可得到样品的流变特性曲线。由于前期装置在组装的过程中转子与外筒出现微小的不同轴, 同时测试腔上下有一定的缓冲空间, 因此转子的扭矩相关因子 CI 需要通过试验来标定, 通过试验取 $CI = 2.5 \sim 4$ 。由于安东帕 MCR-301 流变仪只能测量低剪切速率下的数据, 用本测量装置测得的低剪切速率的数据与之进行对比以验证装置。数据如图 9 所示, 测量数据吻合程度较好, 其中 20%、40%、60% 样品在安东帕流变仪零场下只有 20 s^{-1} 下的数据, 是由于零场下样品剪切应力太低导致其受离心作用甩出测量腔而出现测量数据出错。



(a) Magneto-rheological Glues with mass fraction of 20%



(b) Magneto-rheological Glues with mass fraction of 40%



(c) Magneto-rheological Glues with mass fraction of 60%

图 9 两种设备低剪切率下不同磁场环境和质量分数的测试数据对比

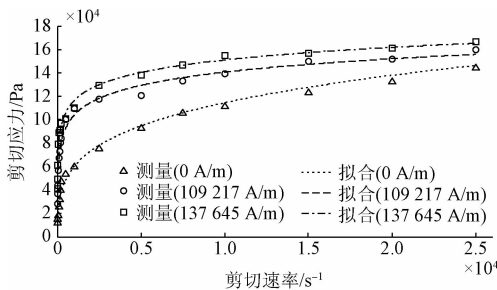
Fig. 9 Comparison of test data about two kinds of testing devices at low shear rate in different magnetic field intensity and different mass fraction

测量数据出现偏差的原因可能存在以下几点:首先是因为计算过程中电流与磁场的转换关系是由仿真得到,与实际通道内磁场强度存在一定的误差;其次,是由于本测量装置的励磁电源电流调节精度问题,导致测量腔内的磁场强度不能正好等于安东帕流变仪所能设置的磁场强度。最后是由于两种装置测量的方式不同,对磁流变胶泥的内部单链螺旋结构会产生不同的影响,从而导致测量得到的流变特性数据不同。

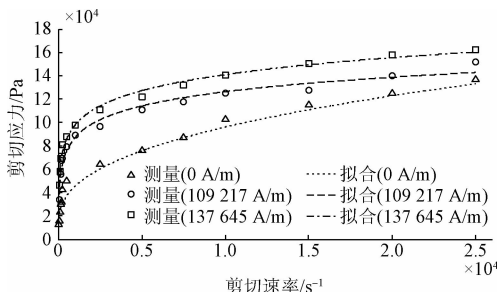
用MRG测试装置测量上述3种不同配比的磁流变胶泥在高剪切率下的流变特性数据,测试的剪切速率取从0~25 000 s⁻¹的18个点。理论上描述磁流变材料流变特性通常采用H-B本构模型,模型公式为:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0, & |\tau| < \tau_y \\ \tau = \text{sgn}(\dot{\gamma})\tau_y + k\dot{\gamma}^n, & |\tau| \geq \tau_y \end{cases} \quad (22)$$

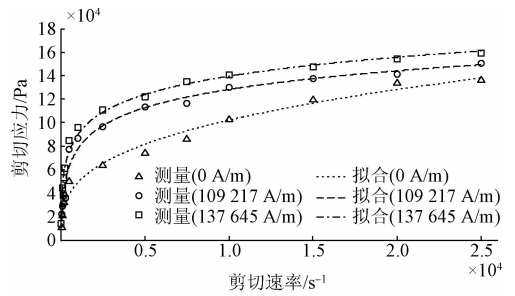
式中: τ_y 为剪切屈服应力, k 和 n 为模型参数。将测试数据进行H-B本构模型拟合。如图10所示,各个配比的磁流变胶泥的测试数据基本呈H-B本构模型的趋势,出现了较为明显的剪切稀化效应,说明测量的数据具有较好的准确性,有一定的参考价值,对磁流变胶泥的研究与应用有一定的指导意义。因此,结合上述分析,该测试装置的设计基本达到要求,能实现25000 s⁻¹剪切速率和近200 kPa剪切应力的测量。



(a) 质量分数为20%的磁流变胶泥
(a) Magneto-rheological Glues with mass fraction of 20%



(b) 质量分数为40%的磁流变胶泥
(b) Magneto-rheological Glues with mass fraction of 40%



(c) 质量分数为60%的磁流变胶泥
(c) Magneto-rheological Glues with mass fraction of 60%

图10 测试装置不同磁场强度和不同质量分数下测试数据对比

Fig. 10 Comparison of test data about tailor-made testing device in different magnetic field intensity and different mass fraction

5 结论

针对磁流变胶泥流变特性测试所要求的高剪切率和高剪切应力,作者研制了密闭同心圆筒剪切型测试装置,建立了磁路分析模型和有限元验证,分析了转子倾斜角对转矩传递的影响,制作了磁流变胶泥流变学特性测量装置样机,完成了不同质量分数的磁流变胶泥的流变学特性测试,并与安东帕流变仪测量数据对比,得出以下结论。

1) 设计采用的“工”字型同轴圆筒,能极大地避免测试过程中样品出现离心甩出的情况、以及流变特性数据波动过大的问题,使测试结果更加准确。磁路的理论分析与仿真结果吻合,磁场分布均匀且磁感线垂直穿过间隙,磁通量在电流为0.2 A时能够达到0.5 T左右,满足对磁场大小的要求。

2) 转子与外筒的同轴度偏差对测量结果的影响非常大,在安装时必须对转子与外筒的同轴度进行严格控制,确定了保证相对误差不超过5%时的最大允许偏差角。

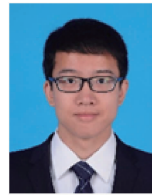
3) 实现最高剪切速率达25 000 s⁻¹和最大剪切应力达200 kPa的测量范围,低剪切率下的测试数据与安东帕流变仪测试数据吻合良好,误差主要来自转子与外筒同轴度的偏差以及间隙内磁场大小与理论值之间的偏差。

参考文献

[1] GINDER J. M. Behavior of magnetorheological fluids[J]. Mrs Bulletin, 2013, 23(8) :26-29.
[2] 谢磊,廖昌荣,周治江,等. 基于弹性胶泥的新型高性能

- 能可压缩磁流变液[J]. 材料研究学报, 2014, 28(11): 821-827.
- XIE L, LIAO CH R, ZHOU ZH J, et al. Novel high performance compressible Magneto-rheological fluids based on elastic cement[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(11): 821-827.
- [3] 王芳芳, 廖昌荣, 周治江, 等. 磁流变胶泥材料的磁控力学行为实验研究[J]. 功能材料, 2014, 45(23): 23095-23099.
- WANG F F, LIAO CH R, ZHOU ZH J, et al. Experimental investigation on magnetic-control mechanical behavior of magnetorheological elasticity cement [J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(23): 23095-23099.
- [4] 常建, 杨运民, 彭向和, 等. 一种磁流变液流变特性测试装置的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 354-357.
- CHANG J, YANG Y M, PENG X H, et al. Research on a magneto-rheological fluid rheological property testing device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4): 354-357.
- [5] 廖昌荣, 张红辉, 余森, 等. 磁流变液的流变特性检测方法研究与仪器研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 29(增刊3): 84-87.
- LIAO CH R, ZHANG H H, YU M, et al. Study on test methodology and instrument for rheological properties of magneto-rheological fluids [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 29(Suppl. 3): 84-87.
- [6] 吴森, 陈洁, 张娜, 等. 加压管式流变测试系统的设计[J]. 仪器仪表学报. 2008, 29(7): 1450-1454.
- WU M, CHEN J, ZHANG N, et al. Design of rheological test system with pressurized pipe flow [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(7): 1450-1454.
- [7] CHATZISTAMOU V C. Design and construction of a magneto-rheometer to determine the rheological properties of magnetorheological fluids for use in drilling applications [J]. Agh Drilling Oil Gas, 2012, 29(1): 109-114.
- [8] BECNEL A C, HU W, WERELEY N M. Measurement of magnetorheological fluid properties at shear rates of up to $25\ 000\ \text{s}^{-1}$ [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 3525-3528.
- [9] 宋和平, 侯二娜, 胡成全, 等. 基于 AVR 单片机的毛细管流变仪系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(2): 108-112.
- SONG H P, HOU E N, HU CH Q, et al. Design of capillary rheometer system based on AVR single chip microcomputer [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(2): 108-112.
- [10] MOONEY M. Explicit formulas for slip and fluidity [J]. Journal of Rheology, 1931, 2(2): 210-222.
- [11] 朱炜煦, 袁志勇, 童倩倩. 电磁力反馈中磁场特性分析与线圈姿态计算[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 590-597.
- ZHU W X, YUAN ZH Y, TONG Q Q. Coil magnetic field characteristics analysis and coil spatial pose calculation in magnetic haptic feedback [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 590-597.
- [12] 朗道. 流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 51-64.
- LANG D. Hydrodynamics [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2013: 51-64.
- [13] WANG CH, YU H Y, WU D Y. Volume fraction measurement of oil-water two-phase flow using a coaxial conductivity sensor [J]. Instrumentation, 2014(1): 49-58.
- [14] 程金光, 张荣福, 郁浩, 等. 基于 LabVIEW 的声音数据采集分析系统[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 94-98.
- CHENG J G, ZHANG R F, YU H, et al. The sound data acquisition and analysis system based on Labview [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2): 94-98.
- [15] 张素萍, 李朝强. 基于 MSComm 和队列技术的 LabVIEW 数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 86-91.
- ZHANG S P, LI ZH Q. Design of data gathering system of Labview based on MSComm and queue [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(6): 86-91.

作者简介



叶宇浩, 2014 年于南京邮电大学获得学士学位, 2017 年于重庆大学获得硕士学位, 现为华为技术有限公司职员, 主要研究方向为智能结构及系统的研究。

E-mail: msyyh@ qq. com

Ye Yuhao received his B. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2014, and M. Sc. degree from Chongqing University in 2017. Now he is an employee in Huawei Technologies Co. Ltd.. His main research interests include smart structure and system.



廖昌荣(通讯作者), 2001 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为磁流变材料及器件。

E-mail: crliao@ cqu. edu. cn

Liao Changrong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2001. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Chongqing University. His main research interests include magnetorheological material and device.