

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311269

一种磁流变液性能测试用的凹字型 磁路结构设计与研究^{*}

李治澎, 解明利

(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要:剪切屈服应力是反映磁流变液流变特性的主要参数之一,稳定可控的磁场直接影响磁流变液剪切屈服应力的测量精度,因此磁场设计是否合理对磁流变液的流变性能测试具有重要的影响。针对外置式线圈产生的磁场强度较低且存在漏磁现象、对称式线圈中磁流变液装载不便导致测量过程持续性差等问题,设计了一种凹字型磁路,通过调整线圈位置来改变磁场结构,使磁力线垂直穿过磁流变液流动方向,同时可拆卸的组合式磁路设计在保证磁场强度需要的前提下实现了磁流变液的连续性测量。此外,还分析了不同电流下的磁场强度分布规律,并基于优化的磁路开展了磁流变液剪切屈服应力等力学性能参数的测试。与主流标准测试仪器相比,具有凹字型磁路结构的磁流变液测试系统所测得的剪切屈服应力平均相对偏差值约为10%,重复误差在6.34%以内,说明该磁路结构是磁流变测试中磁场装置设计的一种可行方法。

关键词:磁流变液;磁场装置;凹字型磁路结构;流变测试

中图分类号: TH82 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Design and research of concave magnetic circuit structure for magnetorheological fluid performance test

Li Zhipeng, Xie Mingli

(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Shear yield stress is one of the main parameters reflecting the rheological characteristics of the magnetorheological fluid. The stable and controllable magnetic field directly affects the measurement accuracy of magnetorheological fluid shear yield stress. Therefore, the reasonability of magnetic field design has an important impact on the rheological performance test of magnetorheological fluid. In this article, a concave magnetic circuit is designed to change the magnetic field structure by adjusting the position of the coil. The magnetic field lines pass perpendicular through the flow direction of the magnetorheological fluid, and the detachable combined magnetic circuit design realizes the continuous measurement of magnetorheological fluid under the premise of ensuring the magnetic field strength. In addition, the distribution of magnetic field strength under different currents is analyzed, and mechanical properties such as shear yield stress of magnetorheological fluid are tested based on the optimized magnetic circuit. Compared with the mainstream standard test instruments, the average relative deviation value of shear yield stress measured by the magnetorheological fluid test system with concave magnetic circuit structure is about 10%, and the repeat error is within 6.34%. Results indicate that the magnetic circuit structure is a feasible method for the design of magnetic field devices in magnetorheological test.

Keywords: magnetorheological fluid; magnetic field devices; concave magnetic circuit structure; rheological testing

0 引言

磁流变液(magnetorheological fluids, MRF)在磁场作

用下具有液固转变的流变特性^[1],其表观粘度会发生显著变化^[2],转变为具有一定屈服强度的粘塑性固体。基于此特性研发的磁流变器件具有易于控制、响应速度快和能量损耗低等特点,在结构减振、生物医疗、机械传动、

收稿日期:2023-04-05 Received Date: 2023-04-05

^{*} 基金项目:河北省研究生创新项目(CXZZBS2022130)资助

精密加工等领域具有广阔的应用前景^[3-12]。剪切屈服应力是描述流变特性的主要参数之一,表征着磁流变液的粘塑性特性。稳定可控的磁场对于准确测量剪切屈服应力具有重要意义,直接影响磁流变测试装置的测量精度。因此,合理的磁路设计对于准确测量磁流变液的各项性能参数至关重要。

目前,各国学者在磁流变液性能测试装置的磁路结构设计方面做了大量的研究工作^[13-16],应用最广泛的磁路结构主要有 3 种。1) 外置式线圈,将线圈缠绕在磁流变液测量区的外侧,通过调节磁路气隙和线圈电流大小来改变磁场强度,如 Spaggiari 等^[17]设计的一种与液压系统耦合的复合型磁路,整体形状呈现 C 型,铜线圈缠绕在磁芯上使得磁力线沿着磁芯垂直穿过磁芯缺口处的磁流变液。该装置的特点是线圈安装方便。实验研究表明,该结构生成的磁场能涵盖流变流体从零到饱和区的整个应用范围,整体测区的场测量值与 FEMM 比较,误差控制在 5% 以内。2) 中心对称式线圈,即线圈对称分布在磁流变液的外侧,这种磁路特点是磁流变液处于线圈的中间位置,产生的磁场垂直穿过磁流变液流动方向,如文献^[18-20]设计的上下圆盘式的磁场结构,磁流变液位于上下圆盘之间,线圈对称分布在磁流变液外侧,磁场主要由励磁线圈通电产生,再通过周围的导磁材料形成闭合磁路。张玉鲁等^[19]应用此结构设计的圆盘式 MRF 制动器,给出了该磁场结构下的饱和磁化电流的边界值,通过改变激励电流使得制动器最大输出力矩从 200 N·m 提高到 237.2 N·m。此种结构也是目前应用较为常见的形式,其优点是线圈产生的磁场损耗较小,不易漏磁同时可以产生较均匀的磁场。Chen 等^[21]介绍了类似结构的平行圆盘流变仪,通过高阶光谱分析工具实现了对流变仪动态特性的采集。3) 偏置式线圈,即线圈的中心位于在磁流变液中心的上方或者下方,如 Wu 等^[22]设计的磁流变液位于线圈下方的双磁路结构,两路磁场方向均垂直穿过磁流变液流动方向,实现了工作磁场的均匀性,实验测试表明这种测量装置具有较高的磁流变液屈服应力测试精度和重复性。

总体来看,上述方案各有优点,但也有不足。外置式线圈的样品测量区域距离线圈较远,使得磁流变液处的磁场强度不高且存在漏磁的问题;中心对称式线圈与偏置式线圈存在同样的问题,由于磁流变液和剪切圆盘被磁芯包裹住导致操作空间狭小,存在磁流变液装载不便、清洗困难和测量过程持续性差等问题。因此本文在传统的磁流变测试装置的磁路结构设计分析的基础上,提出了一种凹字型磁路,采用分体式磁场控制技术保证磁场强度和均匀性的同时改善样品测量的连续性,提高磁流变液测试系统的效率,为磁流变液性能测试系统的磁路设计提供一定的参考。

1 磁路结构设计

磁路结构设计是磁流变液特性测试系统研究的重要组成部分,合理的磁路结构和均匀可控的磁场对磁流变仪性能有着直接影响。磁路设计包括磁路结构选取、磁路参数优化、励磁线圈匝数计算等内容。

1.1 磁路结构选取

1) 磁路结构原理

本文提出的凹字型磁路结构如图 1 所示。该磁路结构由导磁罩、上下圆盘、导磁底座、线圈、气隙以及圆盘间隙组成。线圈通电在竖直方向上产生垂直磁流变液表面的均匀磁场,同时缩短了导磁罩和上圆盘的气隙来减少漏磁。此外,下置对称式线圈给予工作台更大的操作空间,有利于导磁罩安装和拆卸,进而方便装载磁流变液和清洗工作台。其基本工作原理是:环形励磁线圈安装在磁流变液的下方,线圈通电产生稳定均匀的磁场,由导磁罩、气隙、上圆盘、圆盘间隙(盛放 MRF)、下圆盘、导磁底座形成闭合回路,总体磁路形状类似“凹”字型。磁场强度的大小由内部软件和外部电流源控制,温度由导磁罩内部的循环热流和温控底板调节,底部安装的各类传感器用于实时监测磁感应强度、温度等参数,磁场主要性能指标参数如表 1 所示。此磁路结构既可以保证较高的磁场强度,又具有漏磁少和均匀性好等优点,同时便于装载样品和清洗维护,提高了测试系统的工作效率。

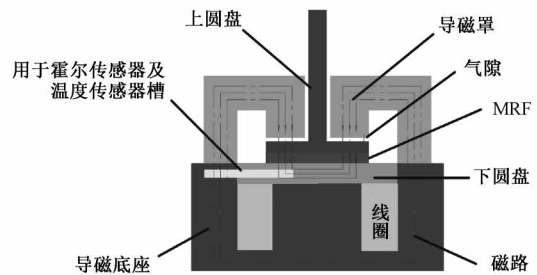


图 1 磁路结构原理

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic circuit structure

表 1 磁场主要性能指标参数

Table 1 The main performance index parameters of the magnetic field

参数	数值
最大设计磁场/T	1
温度范围/℃	20~70
最大输入电流/A	2
电源类型	直流电

2) 磁路结构选取

实验需要强度可控的强磁场发生装置,由于电磁铁具有磁性大小可调、磁极方向可变以及响应速度快等特点,因此选定电磁铁作为磁场发生装置。电磁铁包括铁芯和外部的导电螺线管,磁化后的铁芯可以增强线圈产生的磁场强度,因此,当线圈匝数不变的条件下,选择高导磁率和低矫顽力的铁芯对于增大场强有着重要作用。应用较为广泛的高导磁材料有纯铁、铁硅合金以及各种软磁铁氧体等,因为纯铁饱和磁化强度高以及加工性能好,所以选用纯铁作为导磁罩、上下圆盘以及导磁底座材料,磁路三维结构如图2所示。

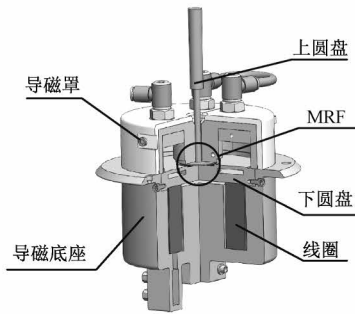


图2 新型磁路结构

Fig. 2 Diagram of the new magnetic circuit structure

1.2 磁路参数优化

在磁路参数优化设计中,首先要确定励磁线圈的大小,其中励磁线圈的高度 l_c 、半径 r 等参数的初值跟线圈的磁感应强度有着直接关系,因此建立线圈中一点的磁感应强度数学模型是非常有必要的。如图3所示,以线圈中心点为坐标原点建立坐标系,以最外层线圈为例进行分析,线圈内任意一点 P 处的磁感应强度可视为由面内分布的线电流源在点 P 处产生的磁场叠加,在面内半径为 r 处取一长度为 dl 的线电流微元,设其内电流值为 i ,该线电流微元产生的空间磁场如图4所示。

$$dH = \frac{Ni}{l_c} dl \quad (1)$$

式中: N 为励磁线圈匝数; i 为电流强度; l_c 为励磁线圈高度。

任意一点 P 的磁场强度为:

$$dH = \frac{r^2}{2q^3} \frac{Ni}{l_c} dl \quad (2)$$

$$\text{其中, } q = \frac{r}{\sin\beta}; dl = \frac{q}{\sin\beta} d\beta \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$dH = \frac{Ni}{2l_c} \sin\beta d\beta \quad (4)$$

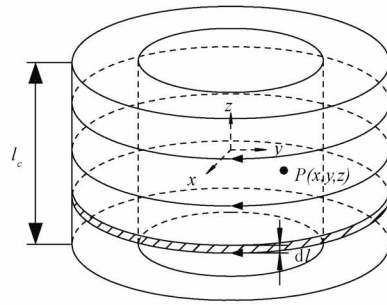


图3 线圈产生的磁场模型

Fig. 3 Model of the magnetic field generated by the coil

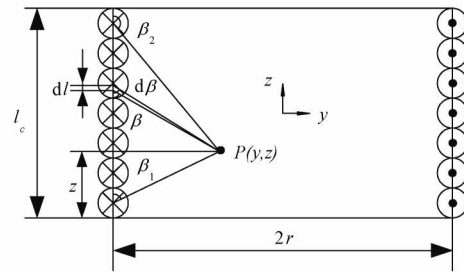


图4 线圈内任意一点 P 的磁场强度

Fig. 4 The magnetic field strength of P in the coil

通过积分得点 P 处的总磁场强度 H :

$$H = \frac{Ni}{2l_c} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin\beta d\beta = \frac{Ni}{2l_c} (\cos\beta_1 - \cos\beta_2) = \frac{Ni}{2l_c} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \frac{l_c - z}{\sqrt{r^2 + (l_c - z)^2}} \right) \quad (5)$$

式中: β_1, β_2 表示任意一点 P 与励磁线圈两端夹角。

则此点 P 的磁感应强度 B :

$$B = \frac{\mu Ni}{2l_c} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \frac{l_c - z}{\sqrt{r^2 + (l_c - z)^2}} \right) \quad (6)$$

设 $N \in (100, 10\ 000)$, $i = 2\text{ A}$, $B = 1\text{ T}$, $z \in (-l_c/2, l_c/2)$, 最终通过计算并结合实际情况取线圈高度 $l_c = 75\text{ mm}$, 半径 $r = 60\text{ mm}$ 。

为了对关键磁路参数进行优化,需要建立励磁线圈在磁路中产生的场强分布数学模型,然后基于线圈高度、半径对关键磁路参数进行优化选取。在磁路轴对称且磁场静态的前提下,只考虑磁路结构一半的模型,同时为了方便运算对模型作了简化处理并划分为10个区域,建立了二维模型如图5所示。其中,需要优化的磁路参数包括各区域导磁柱的半径 r_α ($\alpha = 1, 3, 5, 6, 8$),各区域导磁柱的厚度 b_β ($\beta = 1, 3, 8$)以及各区域导磁筒的厚度 h_γ ($\gamma = 2, 7$)。

为建立励磁线圈的电流与磁场强度关系,由安培环路定律可得:

$$Ni = \sum_{n=1}^8 H_n L_n + H_{\text{MRF}} L_{\text{MRF}} \quad (7)$$

式中: N 为励磁线圈总匝数; i 为电流强度; H_n 为磁场装置各磁路的平均磁场强度; H_{MRF} 为线圈在磁流变液处产生的平均磁场强度; L_n 为各区域磁路的有效长度; L_{MRF} 为磁流变液的有效长度。

根据磁通连续性原理:

$$\mu_{\text{MRF}} H_{\text{MRF}} A_{\text{MRF}} = \mu_n H_n A_n \quad (8)$$

式中: μ_n 为各磁路相对磁导率; μ_{MRF} 为磁流变液相对磁导率; A_{MRF} 、 A_n 为磁流变液及磁路各区域的等效截面积。

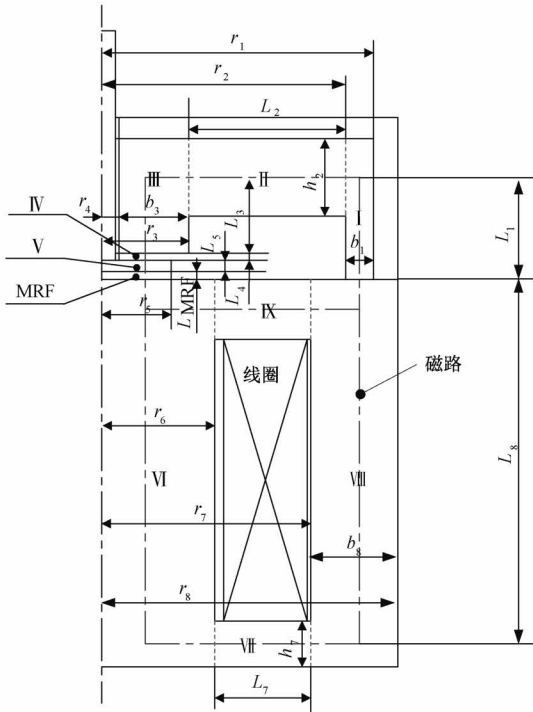


图5 磁路结构简图

Fig. 5 Diagram of the magnetic circuit structure

联立式(7)和(8)得:

$$H_{\text{MRF}} = \frac{Ni}{L_{\text{MRF}} + \mu_{\text{MRF}} A_{\text{MRF}} \sum_{n=1}^{10} \frac{L_n}{\mu_n A_n}} \quad (9)$$

由于上下导磁柱尺寸相同,将其底面圆形转换成矩形,式(9)可以简化为:

$$H_{\text{MRF}} = Ni / \{ L_{\text{MRF}} + \mu_{\text{MRF}} A_{\text{MRF}} [L_1 / \mu_1 \pi (2r_1 b_1 - b_1^2)] + (1 / \mu_2 h_2) + [L_3 / \mu_3 \pi (2r_3 b_3 - b_3^2)] + [L_4 / \mu_4 \pi (2r_4 b_4 - b_4^2)] + (L_5 / \mu_5 \pi r_5^2) + (L_6 / \mu_6 \pi r_6^2) + [2 / (1 / \mu_7 h_7)] + [L_8 / \mu_8 \pi (2r_8 b_8 - b_8^2)] \} \} \quad (10)$$

式中: r_n 为各区域导磁柱的半径; b_n 为各区域导磁柱的厚度; h_n 为各区域导磁筒的厚度。

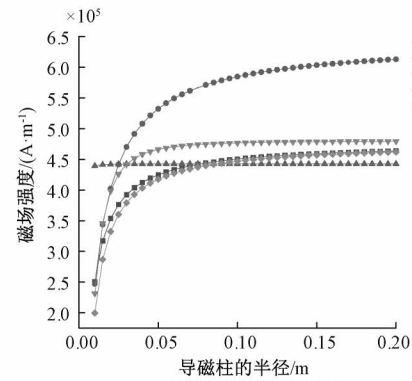
由式(10)可知,在磁流变液选定的情况下, μ_{MRF} 、 A_{MRF} 、 L_{MRF} 定值;在 N 、 i 一定时,线圈在磁流变液处产生

的磁场强度 H_{MRF} 与 μ_n 、 r_n 、 b_n 以及 h_n 有关;当各磁路的相对导磁率 μ_n 越大,线圈产生的磁场强度 H_{MRF} 越大,因此磁路材料选用高导磁率的纯铁。

为了得到一定匝数 N 及电流 i 条件下最大的磁场强度,基于模型式(10)采用了拟牛顿法进行优化设计。拟牛顿法是求解非线性优化问题的最有效方法,它改善了牛顿法每次需求解复杂的 Hessian 矩阵的逆矩阵的缺陷,使用正定矩阵来近似 Hessian 矩阵的逆,大大简化了运算的复杂程度。选择模型式(10)作为目标函数, r_n 、 b_n 、 h_n 作为主要设计变量, L_n 作为协同变量进行设计。

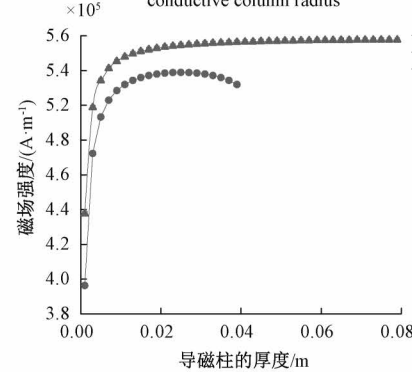
采用拟牛顿法分析当其他各个参数不变时单一变量对磁场强度的影响,得到励磁线圈在磁流变液处产生的磁场强度 H_{MRF} 与各区域导磁柱的半径 r_n 、各区域导磁柱的厚度 b_n 以及各区域导磁筒的厚度 h_n 的曲线,如图6所示。

由图6(a)~(c)可知,随着导磁柱半径、导磁柱厚度以及导磁筒厚度的增大,线圈产生的磁场强度先显著增大后趋于稳定。经过算法寻优求得,当 $r_1 = 0.078 \text{ m}$, $r_3 = 0.025 \text{ m}$, $r_5 = 0.020 \text{ m}$, $r_6 = 0.028 \text{ m}$, $r_8 = 0.085 \text{ m}$, $b_1 = 0.008 \text{ m}$, $b_3 = 0.019 \text{ m}$, $b_8 = 0.020 \text{ m}$, $h_2 = 0.022 \text{ m}$, $h_7 = 0.015 \text{ m}$ 时,励磁线圈在磁流变液测量点处产生的磁场强度 H_{MRF} 最大。分析其原因在于随着导磁柱厚度和半



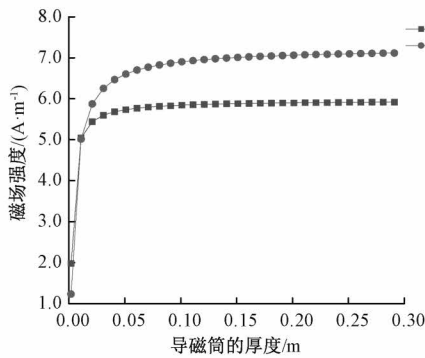
(a) 导磁柱半径的影响规律

(a) The influence law of the magnetic conductive column radius



(b) 导磁柱厚度的影响规律

(b) The influence law of the magnetic conductive column thickness



(c) 导磁筒厚度的影响规律

(c) The influence law of the magnetic conductive cylinder thickness

图6 关键磁路参数对磁流变液处的磁场强度影响

Fig.6 Effect of key magnetic circuit parameters on magnetic field strength at the location of magnetorheological fluid

径的增加导致导磁柱磁阻增大,同等磁场强度下所需的线圈匝数更多,反馈回来的磁感应强度更大,当导磁柱的厚度和半径增大到一定程度时磁场强度接近峰值,继续增大厚度和半径使得导磁柱磁阻急剧增加,磁场强度增长速度出现拐点,最终趋于稳定。

1.3 励磁线圈匝数计算

为了计算励磁线圈的匝数,采用安培环路定律和磁路欧姆定律联立求解,可以得到磁路中励磁线圈匝数与磁场强度之间的关系,再计算各区域磁阻的大小,最终可以求出需要的线圈匝数。假设磁场强度沿着闭合回线切线方向且其大小处处相等,同时,闭合回线所包围的各电流是由电流为 i 的 N 匝线圈提供,则安培环路定律表达式写成:

$$HL = Ni \quad (11)$$

式中: H 为磁场强度; i 为电流; L 为闭合回线。

将磁导率关系 $H = B/\mu$ 和磁路的欧姆定律 $\Phi = \int B \cdot S = BS$ 代入式(11),则有:

$$Ni = \frac{B}{\mu} L = \Phi \frac{L}{\mu S} \quad (12)$$

令:

$$R_{mi} = \frac{L}{\mu S} \quad (13)$$

则:

$$Ni = \Phi R_{mi} = \sum_{i=1}^9 BSR_{mi} \quad (14)$$

式中: R_{mi} 为各区域的磁阻; L 为磁路有效长度; S 为磁路横向截面积。

考虑到磁流变液剪切旋转系统的磁路结构中心对称,计算时只选取其中半部分模型,磁路结构简图如图5所示。首先求出各个区域的磁阻,然后进行叠加求解得

出总磁阻。

$$R_m = \sum_{i=1}^9 R_{mi} \quad (15)$$

式中: R_m 为总磁阻; R_{mi} 为各区域的磁阻。

将式(15)代入式(14)可得:

$$Ni = BS_m R_m \quad (16)$$

式中: S_m 为圆盘的有效工作面积; N 为励磁线圈匝数。

由式(16)可知,要想求出线圈匝数,首先应求出磁路的总磁阻和圆盘有效面积。 L_1 为区域 I 的有效长度, L_3 为区域 III 的有效长度, L_4 为上圆盘与导磁罩的气隙厚度, L_5 为上圆盘的厚度, L_{MRF} 为待测的磁流变液样品厚度, L_8 为区域 VIII 的有效长度。磁路各尺寸参数如表2所示。

表2 磁路各尺寸参数表

Table 2 Parameters of each size of the magnetic circuit

mm			
参数	数值	参数	数值
L_1	40	r_1	78
L_2	45	r_2	70
L_3	35	r_3	25
L_4	1	r_4	6
L_5	2	r_5	20
L_{MRF}	2	r_6	28
L_7	37	r_7	65
L_8	100	r_8	85

对于区域 I, $L=L_1$, $\mu=\mu_0\mu_r$, $S=\pi(R_1^2-R_2^2)$, 其中 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$, 工业纯铁的相对导磁率 $\mu_r=2\ 000$, 磁流变液的相对导磁率 $\mu_{MRF}=5$, 则区域 I 的磁阻为:

$$R_{m1} = \frac{L_1}{\mu_0\mu_r\pi(r_1^2-r_2^2)} \quad (17)$$

同理,区域 II 到区域 IX 磁阻分别为:

$$R_{m2} = \frac{2L_2}{\mu_0\mu_r\pi(r_2+r_3)h_2} \quad (18)$$

$$R_{m3} = \frac{L_3}{\mu_0\mu_r\pi(r_3^2-r_4^2)} \quad (19)$$

$$R_{m4} = \frac{L_4}{\mu_0\pi(r_{MRF}^2-r_4^2)} \quad (20)$$

$$R_{m5} = \frac{L_5}{\mu_0\mu_r\pi r_{MRF}^2} \quad (21)$$

$$R_{MRF} = \frac{L_{MRF}}{\mu_0\mu_{MRF}\pi r_{MRF}^2} \quad (22)$$

$$R_{m6} = \frac{L_8}{\mu_0\mu_r\pi r_6^2} \quad (23)$$

$$R_{m7} = \frac{2L_7}{\mu_0 \mu_r \pi (r_7 + r_6) h_7} \quad (24)$$

$$R_{m8} = \frac{L_8}{\mu_0 \mu_r \pi (r_8^2 - r_7^2)} \quad (25)$$

$$R_{m9} = R_{m7}$$

则磁路总磁阻为:

$$R_m = \sum_{i=1}^9 R_{mi} + R_{MRF} = 1.4438 \times 10^6 (1H^{-1})$$

由式(16)可计算出所需的线圈匝数为:

$$Ni = BS_m R_m = B \pi R_{MRF}^2 R_m$$

可以看出,磁路中大部分磁阻集中在上圆盘与导磁罩的气隙之间。根据设计要求,取磁感应强度 $B=1\text{ T}$,励磁线圈通入的最大电流取 2 A ,磁路总磁阻 1.4438×10^6 ,则励磁线圈需要匝数约为 908 匝,由于励磁线圈产生的磁场有一部分在传递过程中损耗以及部分散失到空气中,最终取线圈匝数为 $1\ 050$ 匝。

2 磁路仿真分析

为了验证磁路结构设计的合理性,应用 ANSYS Electronics Desktop 软件对磁路结构进行仿真分析。为了提高运算速度对模型进行了简化,模型主要保留导磁底座、导磁罩、上下圆盘以及线圈 5 个部分,而把连接螺钉、循环液、橡胶软管、控温槽等部分省略。

在搭建好的模型基础上,根据磁流变液的材料特性,将 $B-H$ 曲线数值导入到模型材料库中并添加给磁流变液,导磁底座、导磁罩、上下圆盘的材料选用工业纯铁,激励线圈的材料选用铜导线,模型的其他区域为空气。

首先,网格划分是磁场结构仿真分析中重要的一环,网格的数目和大小会直接影响仿真结果的精度。本文采用了 ANSYS Electronics Desktop 软件对模型进行网格划分。为了节省计算时间,同时确保结果的准确性,本文采用四面体结构进行网格划分,网格最大单元为 2.8 mm ,最小为 1.6 mm ,如图 7 所示。

其次,设置磁路的边界条件,由于磁路的电磁仿真需要创建一定范围的求解区域,区域以外的范围没有磁力线穿过,因此磁路的区域边界选用 Neumann 边界条件,并且磁矢量方向平行于边界,而磁路各区域的交界面基本都有磁力线穿过,因此选用 Natural 边界条件。最后,对磁路模型施加电流激励,电流激励的大小等于线圈输入电流与线圈总匝数的乘积,其中匝数选用 1.3 节的 $1\ 050$ 匝。在匝数不变的情况下,分别选取 0.2 、 0.6 、 1.2 、 2.0 A 等 4 种不同的电流下的磁场进行了仿真分析,计算后的磁感应分布如图 8~11 所示,相应地,在不同输入电流条件下得到的场强均值以及磁流变液测量区的峰值如表 3 所示。

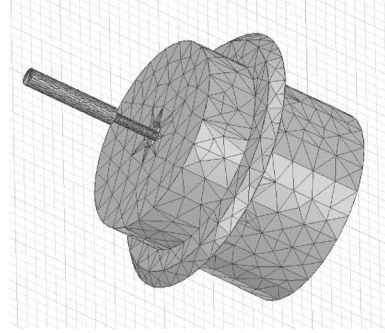


图 7 磁路结构有限元剖分网格

Fig. 7 Finite element mesh generation of magnetic circuit structure

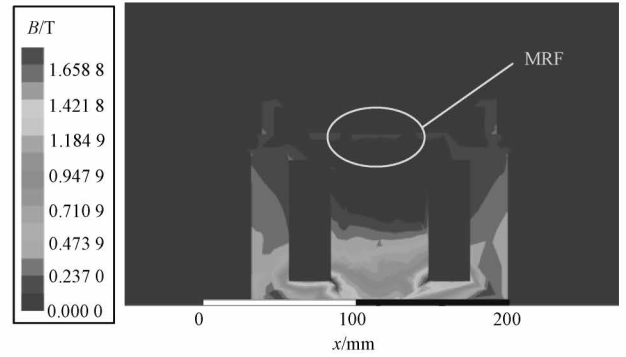


图 8 磁感应强度分布 ($I=0.2\text{ A}$)

Fig. 8 Distribution of magnetic induction intensity ($I=0.2\text{ A}$)

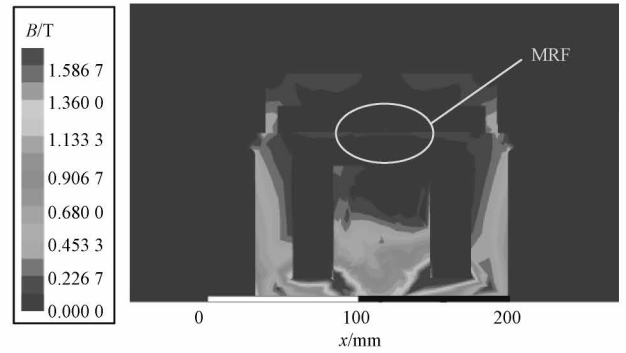


图 9 磁感应强度分布 ($I=0.6\text{ A}$)

Fig. 9 Distribution of magnetic induction intensity ($I=0.6\text{ A}$)

从磁感应强度分布云图可以得到,在仿真模型面与面的交界处,尤其是导磁底座的内表面交界处磁感应强度显著变化,产生此现象的原因是导磁底座内表面的方向发生急剧变化,导致面交界处的磁力线过于集中,磁力线分布不再均匀。导磁底座内部的磁感应强度整体呈现沿磁场底座由下而上逐步递减的趋势,线圈的下表面磁场最强,上圆盘轴的四周磁场最弱。

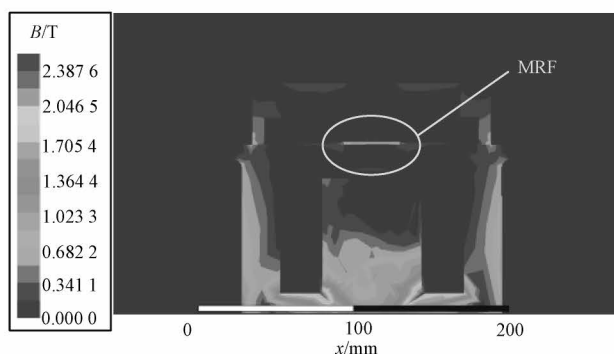
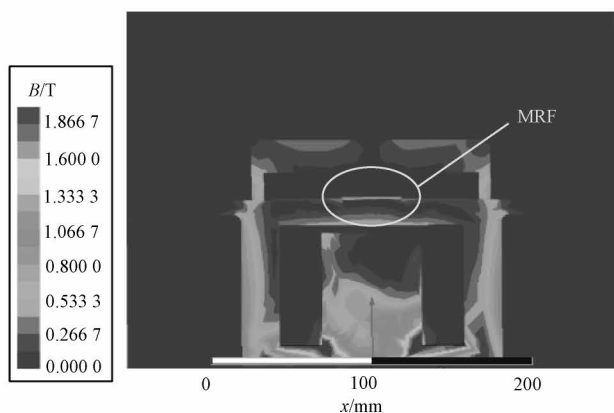
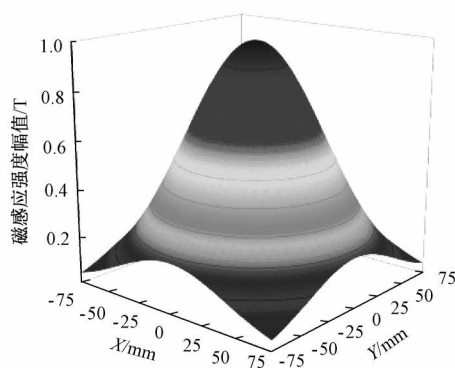
图 10 磁感应强度分布 ($I = 1.2 \text{ A}$)Fig. 10 Distribution of magnetic induction intensity ($I = 1.2 \text{ A}$)图 11 磁感应强度分布 ($I = 2 \text{ A}$)Fig. 11 Distribution of magnetic induction intensity ($I = 2 \text{ A}$)

表 3 不同电流输入的磁场仿真结果

Table 3 Magnetic field simulation results under different current inputs

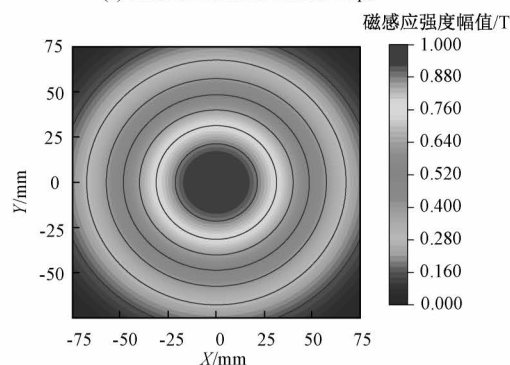
序号	输入电流 I/A	场强均值 B/T	场强峰值/ T
1	0.2	0.1	0.15
2	0.6	0.2	0.45
3	1.2	0.4	0.72
4	2	0.6	0.97

对不同电流下 MRF 处的磁感应强度分布图进行比较可以得出,随着励磁电流的增大,MRF 测量区的磁感应强度逐渐增大。由聚焦磁场分布如图 12 所示,可以看出,线圈产生的磁场呈现出中心最强、四周较弱的特点,中心处的磁流变液磁场分布较均匀且磁感应强度较大,下圆盘边缘的磁场较弱,磁场强度大小基本围绕 MRF 向四周逐渐减弱。这是由于 MRF 的导磁率远大于上圆盘和周围空气的导磁率,因此磁力线方向基本上沿着垂直于磁流变液的表面。



(a) 三维等高图

(a) Three-dimensional contour maps



(b) 二维等高图

(b) Two-dimensional contour maps

图 12 聚焦磁场分布 ($I = 2 \text{ A}$)Fig. 12 Focused magnetic field distribution ($I = 2 \text{ A}$)

此外,通过仿真分析和多次实验测量取平均值得出,磁流变液装载位置处在不同电流下对应的磁感应强度变化规律如图 13 所示。由图 13 可知,随着电流的增加,场域内的磁感应强度呈对数增大,磁场强度变化率随着电流增加逐渐变小,这一规律和采用特斯拉计在样机(图 14)上的检测结果相似,不同之处在于磁场理论值要高于实际值,并且理论与实际的差值随着输入电流增大

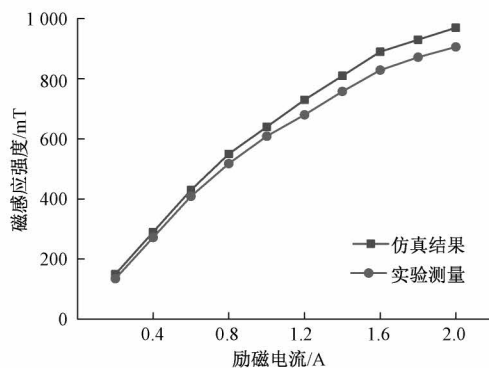


图 13 磁感应强度和励磁电流关系

Fig. 13 Relationship between magnetic induction intensity and excitation current

而逐步扩大,当电流达到最大值时,线圈产生的磁感应强度为 0.97 T 左右,与设计值 1 T 相差不大,验证了新型磁路设计的合理性。

3 实验与分析

根据计算结果及仿真分析,将设计的新型磁路结构集成到自制的磁流变液性能测试系统上,如图 14 所示。利用试验样机对配制的磁流变液样品性能进行了实验测试,主要包括剪切应力、剪切屈服应力及粘度等力学性能参数。

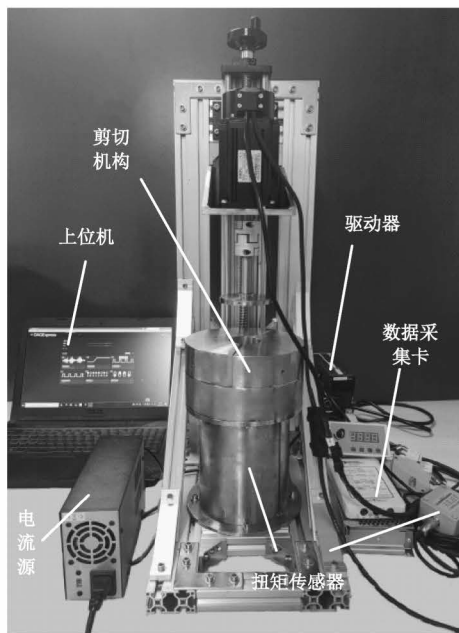


图 14 MRF 测试系统样机

Fig. 14 MRF test system prototype

3.1 剪切应力与剪切速率的关系

为了研究不同剪切速率下磁流变液剪切应力的变化规律,实验室配置了主要成分如表 4 所示的磁流变液样品。

表 4 磁流变液样品的主要成分
Table 4 Main components of magnetorheological liquid samples

样品成分	含量/%
羰基铁粉	10
硅油	88
硬脂酸	2

首先,在相同磁感应强度的条件下,测试了不同剪切速率时的剪切应力;其次,改变输入电流在不同磁感应强

度条件下,多次测量,得到不同磁场强度下剪切应力与剪切速率的关系,如图 15 所示。

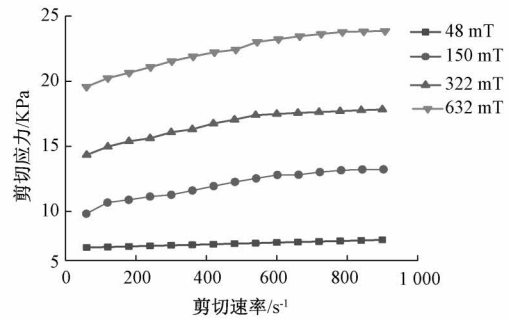


图 15 剪切应力与剪切速率关系

Fig. 15 Relationship between shear stress and shear rate

从图 15 可以看出,在不同磁场强度条件下,剪切速率与剪切应力呈现相似的变化规律。当剪切速率较低时,MRF 的剪切应力有显著变化;当剪切速率较高时,MRF 的剪切应力基本保持不变。根据 Bingham 粘塑性模型^[1]可知,剪切应力是剪切屈服应力和表观粘度与剪切速率乘积之和,在低剪切速率时,剪切速率增加,粘度基本不变,因而剪切应力增加;在剪切速率较高时,MRF 发生剪切稀化现象,但是粘度与剪切速率的乘积相对一定,因此剪切应力无明显变化。

3.2 剪切屈服应力与磁感应强度的关系

为了测量剪切屈服应力等参数,需要测量同一剪切速率下不同磁场强度对应剪切应力,对测量结果进行曲线拟合,然后根据 Bingham 粘塑性模型,可以得到磁流变液的剪切屈服应力与磁感应强度的关系式。同时,为了验证测试结果的可靠性,在测试条件不变的前提下,利用 Anton Paar 公司生产的 MCR301 型流变仪,对相同浓度的磁流变液进行了测试,MRF 剪切屈服应力对比曲线如图 16 所示。

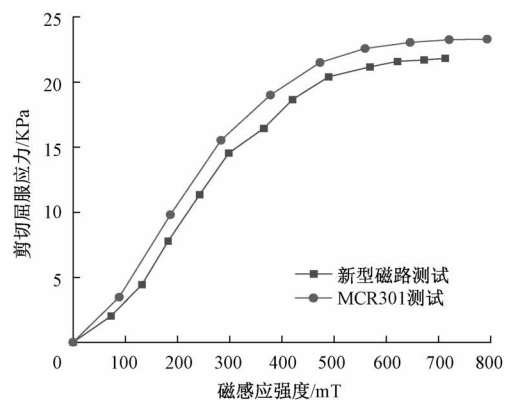


图 16 剪切屈服应力与磁感应强度关系

Fig. 16 Relationship between shear yield stress and magnetic induction intensity

从图 16 可以得出,随着磁感应强度的提高,具有新型磁路结构的 MRF 测试系统和 MCR301 测试的 MRF 剪切屈服应力的变化规律近似。在磁感应强度较小时, MRF 剪切屈服应力随着磁感应强度的提高显著增加,说明此时磁流变液流变性能较好;随着磁感应强度继续增大, MRF 剪切屈服应力也逐渐增大,在磁感应强度较大时, MRF 剪切屈服应力基本保持不变,说明磁流变液此时接近磁饱和状态。整体看来,在相同的测试条件下,具有新型磁路结构的 MRF 测试系统测试的剪切屈服应力小于 MCR301 测试的结果。

为了更直观地说明新型 MRF 测试系统与 MCR301 测试结果的偏离程度,采用计算相同磁场强度下新型 MRF 测试系统与 MCR301 测试的剪切屈服应力相对偏差的方法来进行分析。根据图 16 的测试结果,选用同一磁感应强度下两种仪器测得的 MRF 剪切屈服应力,经过计算,当磁感应强度较小时,两者的相对偏差较大,最大约为 15.8%;当磁感应强度较小时,两者的相对偏差较小,最小约为 6.2%。

分析其主要原因为,在测试过程中 MCR301 的工作参数传递损耗较少,最终测得的磁流变液剪切屈服应力更贴近实际值。当输入电流较小时,系统测得的剪切屈服应力相对较小,因此传递损耗对测试的结果影响较大。相比之下,设计的新型磁路在磁感应强度较小时测得的剪切屈服应力更小。随着输入电流的增大,此时系统测得的剪切屈服应力也随之增大,传递损耗的影响逐渐减弱。

通过对比实验可以看出,机械加工水平和装配精度对系统的测试性能有着直接影响。此外,对两台流变仪器测得的剪切屈服应力相对偏差取平均值,求得的剪切屈服应力平均相对偏差值约为 10%。对比本文提到的 3 种磁路结构,Spaggiari 等^[17]设计的外置式线圈实验结果表明,实测的 MRF 屈服应力低于制造商的数值,平均差值约为 30%,偏差较大;文献[20]设计的中心对称式线圈在磁场较弱时装置测得的 MRF 剪切屈服应力的偏差较大,最大达到 23.9%;偏置式线圈^[22]测量装置测得的 MRF 剪切屈服应力相对于 MCR301 测得的剪切屈服应力误差较小,但是重复性精度方面,本文装置有所改善。

3.3 粘度与剪切速率的关系

零场粘度是磁流变液的流变特性参数之一,是流体流动时所表现的阻力。利用本测试系统对磁流变液的零场粘度进行测量,温度为室温,多次测量取平均值,得到零场粘度与剪切速率的关系如图 17 所示。从图 17 可以看出,当剪切速率较低时零场粘度下降较快,而在剪切速率较高时零场粘度基本保持不变。剪切过程中随着剪切速率的增加,磁流变液中的磁性颗粒受到剪切力的作用, MRF 分子间的作用力减小, MRF 发生剪切稀化现象,导致 MRF 零场粘度降低。

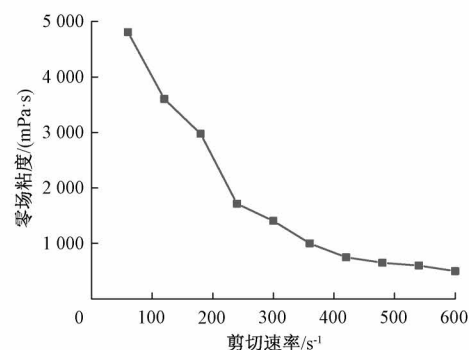


图 17 零场粘度与剪切速率关系

Fig. 17 Relationship between zero-field viscosity and shear rate

3.4 重复性实验

为了检验所设计的新型 MRF 测试系统的性能,对仪器的重复测量精度进行了检测。利用本文设计的新型 MRF 测试系统对相同浓度的磁流变液进行多次剪切屈服应力测试实验,测试温度为常温,最终得到磁流变液的剪切屈服应力与磁感应强度的重复性实验图,如图 18 所示。

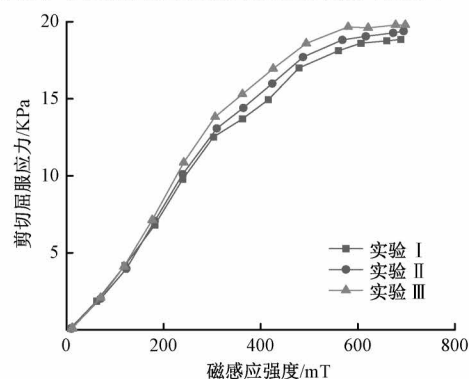


图 18 重复性实验

Fig. 18 Replicate experiment diagram

分析图 18 得出,3 次测量的剪切屈服应力与磁感应强度的关系曲线基本一致,说明此磁路的重复测量精度较好。

为了验证新型 MRF 测试系统的重复测量精度,采用计算重复误差的方式,系统的重复误差 δ 公式为:

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (26)$$

式中: σ 为标准差; $\bar{x}$ 为多次测量的平均值。

由于标准差可以较好的反映一组数据的离散程度,本研究采用标准差的方法来计算。该方法特点是计算简单,可以有效测算出数据的离散趋势。标准偏差的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (27)$$

式中: x_i 为每次测试的结果; n 为测量次数。

通过式 (26) 和 (27) 计算得到剪切屈服应力重复误差值,如表 5 所示,并绘制重复误差曲线,如图 19 所示。

表 5 剪切屈服应力重复误差参数表
Table 5 Shear yield stress repetition error parameters

B/mT	$\bar{\alpha}/\text{kPa}$	σ	$\delta/\%$
10	0.10	0.01	4.71
73	1.99	0.09	4.66
135	4.08	0.11	2.68
182	6.99	0.17	2.50
242	10.25	0.56	5.42
298	13.14	0.66	4.99
365	14.47	0.81	5.56
420	15.96	1.01	6.34
489	17.77	0.80	4.50
548	18.87	0.78	4.11
608	19.09	0.50	2.61
685	19.27	0.51	2.67
712	19.35	0.47	2.44

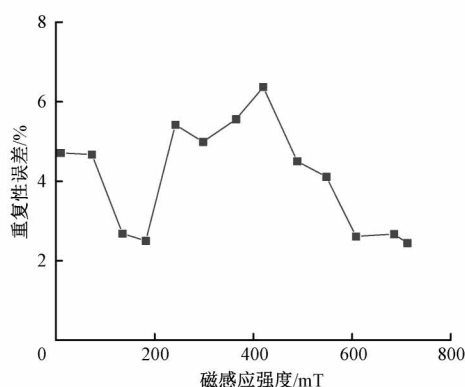


图 19 剪切屈服应力重复误差

Fig. 19 Repetitive error of shear yield stress

从表 5 可以看出,本文所设计的磁场的重复误差在 6.34% 以内,满足实验要求,对比文献 [22] 的 MRF 屈服应力测量装置最高 8.3% 的重复误差,表明了本文设计的凹字型磁路结构在重复测量精度方面的进步性。

4 结 论

本文采用下置对称式线圈的结构设计了一种凹字型静态磁场,在保证磁场强度及均匀性要求的前提下使得磁流变液装载更加方便,改善了以往多次测量磁流变液需要连续拆卸装置导致测量连续性较差的问

题,提高了测试效率。研究表明,磁场各区域导磁柱厚度、导磁柱半径以及导磁筒厚度对磁场的强度大小均有影响。随着导磁柱厚度、导磁柱半径以及导磁筒厚度的增大,励磁线圈在 MRF 处产生的磁场强度先显著增大后逐渐趋于稳定。对设计的新型磁路结构进行了磁场仿真研究,结果表明随着线圈输入电流增大,MRF 处磁场分布均匀且磁感应强度逐渐增大,最大可达 0.97 T,满足实验测试要求。与 MCR301 流变仪测试结果进行对比分析,采用凹字形磁路结构的流变测试系统所测得样本的剪切屈服应力平均相对偏差约为 10%,重复误差在 6.34% 以内,说明基于凹字型的静态磁场装置满足磁路设计的要求,是磁流变性能测量装置中磁场结构设计的一种有效可行的方法。

参考文献

- [1] ANUPAMA A V, KUMARAN V, SAHOO B. Effect of magnetic dipolar interactions and size dispersity on the origin of steady state magnetomechanical response in bidisperse Mn-Zn ferrite spherical particle based magnetorheological fluids[J]. New Journal of Chemistry, 2019, 43(25): 9969-9979.
- [2] BRAMANTYA M A, TAKUMA H, KUROIWA J, et al. Ultrasonic investigation of the effect of volume fraction on the clustering structures of magneto-rheological fluids[J]. Materials Science Forum, 2010, 670: 198-206.
- [3] 高瞻, 宋爱国, 秦欢欢, 等. 蛇形磁路多片式磁流变液阻尼器设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 821-829.
GAO ZH, SONG AI G, QIN H H, et al. Design of multi-disc MRF damper with serpentine flux path[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 821-829.
- [4] MILECKI A, HAUKE M. Application of magnetorheological fluid in industrial shock absorbers [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 28: 528-541.
- [5] 李军强, 朱文正, 姜与, 等. 基于磁流变原理的变刚度驱动方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 97-104.
LI J Q, ZHU W ZH, JIANG Y, et al. Research on variable stiffness driving method based on magnetorheological principle [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2021, 42(3): 97-104.
- [6] 李凯权,代俊,常辉,等. 磁流变材料的应用综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 6-14.
- LI K Q, DAI J, CHANG H, et al. Review of magnetorheological materials application [J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(1): 6-14.
- [7] BICA I, LIU D Y, CHOI J H. Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(2): 394-406.
- [8] WANG P, HUANG J, WEI H S. Analysis of torque in magnetorheological rotary brake[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1268(239-242): 2297-2301.
- [9] LEE J W, HONG K P, CHO M W, et al. Polishing characteristics of optical glass using PMMA-coated carbonyl-iron-based magnetorheological fluid[J]. Smart Materials & Structures, 2015, 24(6): 065002.
- [10] BORBATH T, BICA D, POTENCZ I, et al. Magnetic nanofluids and magnetic composite fluids in rotating seal systems [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2010, 12(1): 012105.
- [11] 蔡世波,韦威, WAN W W,等. 基于磁流变液传动的柔顺关节研究:设计,仿真和实验(英文)[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 200-210.
- CAI SH B, WEI W, WAN W W, et al. Study on the compliant joint based on magnetorheological fluid transmission: Design, simulation and experiments [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 200-210.
- [12] 石楠楠,赵梓伊,杨敏,等. 磁流变夹具的薄壁件加工装夹性能分析与优化[J]. 制造技术与机床, 2022 (5): 159-163.
- SHI N N, ZHAO Z Y, YANG M, et al. Analysis and optimization of the clamping performance of thin-walled workpiece of magnetorheological fixture [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022 (5): 159-163.
- [13] SARASWATHAMMA K, JHA S, PARUCHURI V R. Rheological behaviour of magnetorheological polishing fluid for Si polishing[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 1478-1491.
- [14] SUN T, PENG X H, LI J Z, et al. Testing device and experimental investigation to influencing factors of magnetorheological fluid [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 43(3): 283-292.
- [15] XUAN T, LI J Y, LI B Z, et al. Effects of the non-uniform magnetic field on the shear stress and the microstructure of magnetorheological fluid[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 535: 168066.
- [16] 贺新升,任韶卿,高春甫,等. 非均匀磁场中磁流变液剪切应力实验与分析[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(2): 8-11.
- HE X SH, REN SH Q, GAO CH F, et al. Test and analysis on shear stress of magnetorheological fluid under non-uniform magnetic field [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2016, 47(2): 8-11.
- [17] SPAGGIARI A, DRAGON I. Effect of pressure on the flow properties of magnetorheological fluids[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(9): 091103.
- [18] 胡国良,钟芳. 磁场结构对径向流磁流变阀动态性能的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 411-420, 401.
- HU G L, ZHONG F. Influence of magnetic field structure on dynamic performance of radial magnetorheological valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 411-420, 401.
- [19] 张玉鲁,李兆松,梁彬. 圆盘式磁流变液制动器的设计与磁场仿真[J]. 汽车工程学报, 2018, 8(1): 54-60.
- ZHANG Y L, LI ZH S, LIANG B. Design and magnetic field simulation of disc type MRF brake [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(1): 54-60.
- [20] 任志胜. 磁流变特性测试技术与装置研究[D]. 宁波:宁波大学, 2012.
- REN ZH SH. Research on testing technology and device for magnetorheological fluids [D]. Ningbo: Ningbo University, 2012.
- [21] CHEN B S, JIANG J B, ZHANG F J. Studying on the magnetorheological fluids and its rheometer [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1273(230-232): 1396-1401.

- [22] WU X F, XIAO X M, TIAN Z Z, et al. Development of a double magnetic circuit yield stress measurement device for magnetorheological fluid [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28 (10): 1249-1259.

作者简介



李治澎, 2022 年于燕山大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为磁流变抛光, 机器人嵌入式系统。

E-mail: 1079456505@qq.com

Li Zhipeng received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2022. He is currently a M. Sc. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include

magnetorheological finishing and robot-embedded system.



解明利 (通信作者), 2023 年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学副研究员, 主要研究方向为磁流变抛光, 离子束抛光, 光电子器件的平坦化加工。

E-mail: xiemingli080201@163.com

Xie Mingli (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Yanshan University in 2023. He is currently an associate researcher at Yanshan University. His main research interests include magnetorheological finishing, ion beam polishing, and planarization processing of optoelectronic components.