

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413404

基于磁流变液的光束定向器密封机理与实验研究*

申玉瑞, 王其雨, 彭来, 华德正, 刘新华

(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要: 光束定向器是光学系统的核心组件, 其内部光路传输通道的气体密封性对系统整体性能具有决定性作用。为解决传统填料密封易磨损、弛豫性显著的问题, 设计了一种基于磁流变液的光束定向器密封结构, 并研究了磁流变密封技术的工作原理及其理论模型。首先, 针对光束定向器大直径密封的特定需求, 设计永磁体阵列式、抗离心型的磁流变密封结构。其次, 开展微观磁流变液流变特性观测实验, 分析微观尺度下磁流变密封机理; 同时, 开展基于流变仪的宏观流变特性测试, 拟合基于磁-温复合场的磁流变液屈服模型, 并进一步建立了修正磁流变密封耐压方程与摩擦力矩模型。最后, 搭建光束定向器光路磁流变密封的等效实验平台, 开展不同温度条件、淋雨及盐雾模拟工况下的耐压测试实验和摩擦力矩测试实验。实验结果表明, 磁流变密封结构能够充分满足光束定向器光路密封的要求, 所构建的修正模型能有效反映温度对磁流变密封性能的影响, 为光束定向器轴系光路密封技术的革新提供了重要的理论依据与实践指导。

关键词: 光束定向器; 磁流变密封; 微观密封机理; 密封理论模型修正

中图分类号: TH69 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

Mechanism and experimental study of beam director sealing based on magnetorheological fluid

Shen Yurui, Wang Qiyu, Peng Lai, Hua Dezheng, Liu Xinhua

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The beam director is the core component of the optical system, and the gas sealing of the internal optical transmission channel plays a decisive role in the overall performance of the system. To address the issues of easy wear and significant relaxation in traditional packing seals, this paper designs a beam director sealing structure based on magnetorheological fluid and studies the working principle and theoretical model of magnetorheological fluid sealing (MRFS) technology. Firstly, a MRFS structure with permanent magnet array and anti-centrifugal type is designed to meet the specific requirements of large diameter seal of beam directors. Secondly, the observation experiment of the rheological properties of the micro-magnetorheological fluid is carried out to analyze the mechanism of MRFS at the micro-scale. At the same time, the macroscopic rheological properties are tested based on rheometer, the yield model of magnetorheological fluid based on magnetorheological complex field is fitted, and the modified MRFS pressure resistance formula and friction moment model are further established. Finally, the equivalent experimental platform of the MRFS of the optical path of the beam director is built, and the pressure resistance test and friction torque test were carried out under different temperature conditions, rain and salt spray simulation conditions. The experimental results show that the MRFS can fully meet the requirements of the optical path seal of the beam director, and the modified model can effectively reflect the influence of temperature on the performance of MRFS. It provides an important theoretical basis and practical guidance for the innovation of the optical path seal technology of the beam director shafting.

Keywords: beam director; magnetorheological fluid sealing; microscopic sealing mechanism; revision of sealing theory model

收稿日期: 2024-10-24 Received Date: 2024-10-24

* 基金项目: 国家自然科学基金(52405081, 51975568)、江苏省自然科学基金(BK20231066)、中国矿业大学研究生创新计划(2023WLKXJ085)、中央高校基本科研业务费专项(2023XSCX025)、江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX23_2670)项目资助

0 引言

光束定向器作为光学系统的关键组件,扮演着定向光束控制、传输与聚焦的关键角色,广泛应用于激光武器、光电吊舱、光束扫描和激光雷达等领域^[1-4]。良好的光路密封是光学系统正常运行的前提,对于保障定向光束的能量传输效率和传输精度起着至关重要的作用。现阶段光束定向器的光路密封多采用镜面晶体、正压气动^[5]等窗口密封方式,以及O型密封圈、唇型密封等填料密封方式来实现。

对于窗口密封而言,在激光照射下由于晶体材料受热不均,晶体窗口会发生变形,导致激光光束产生畸变;尽管气动窗口不存在摩擦磨损以及受热不均影响光束定向器性能的问题,但其打开出射窗口的工作方式^[6],无法实现灰尘微粒或水蒸气的完全隔绝。传统的填料密封在盐雾和高温等特殊环境下,易发生老化和腐蚀,从而导致密封失效^[7]。在关键旋转密封位置,如方位轴、俯仰轴等轴系,还会存在轴系间摩擦力矩大、转动精度低的问题。此外摩擦磨损也会导致填料微粒进入光路传输通道,污染内部气体,进而影响光束定向器的性能。

磁流变密封^[8]是一种非接触密封技术,其核心原理是基于磁流变液的流变特性^[9-10],通过磁路设计,将磁流变液束缚在密封位置,形成类似O型密封圈结构,从而达到密封效果。Li团队^[11-14]对大直径大间隙密封场景进行了系统研究,设计了大直径薄壁密封结构、柔性极靴密封结构和多磁源密封结构,极大拓展了磁流变密封的应用场景。Matuszewski等^[15]将磁流变密封与传统离心密封方式进行了对比分析,证明了磁流变密封的不可替代性和独特优势。相较于传统密封技术,磁流变密封具有无摩擦、无磨损、长寿命和低维护成本等显著优势,广泛应用于真空密封^[16-17]、航天航空^[18]、煤矿^[19]、石油化工^[20]领域。

在密封原理及其理论模型研究中,Chen等^[21]设计了一种适用转轴的磁流变密封结构,研究了密封间隙、齿形和注入量对密封能力的影响规律。Li等^[22]研究了不同表面粗糙度下磁流变液对密封副磨损机理的影响,证明了粗糙度影响密封间隙中颗粒的运动模式。Zhang等^[23]研究了密封场景下流场、温度场和磁场三场耦合作用下,磁流变液膜的温升机理,建立了一种基于Couette流的磁流变液密封膜温升分析方法。Zhao等^[24]根据磁流变液的磁流变特性,推导了磁流变密封的耐压值方程,证明了密封压力与磁流变液的屈服应力、密封间隙的长度和高度有关。

目前,虽然磁流变密封技术的研究取得了一定的成果,但是对于光束定向器等大直径密封(密封直径 $>100\text{ mm}$)^[25]应用场景的研究仍需要进一步拓展。此外,对于磁流变密封理论的分析多集中于极齿形状、磁源

数量等结构参数对磁流变密封性能的影响,鲜有考虑温度、磁场等外部因素对磁流变液以及磁流变密封性能的影响。

因此本文基于光束定向器轴系光路的密封特点,通过磁流变液智能材料,设计了一种抗离心式的大直径密封结构。从微观角度出发,分析磁流变液在非均匀磁场下的颗粒运动行为;开展不同外部温度、磁场和转速下的宏观流变特性测试,建立了磁流变密封的修正耐压方程与修正摩擦力矩模型。搭建光束定向器轴系光路密封等效实验台,开展多工况下的密封性能测试实验。

1 磁流变密封结构设计

1.1 磁流变密封原理

磁流变密封工作原理如图1所示,磁流变密封结构主要由5个关键部件组成,分别为磁流变液、旋转轴、永磁体、极靴和极靴末端的极齿。

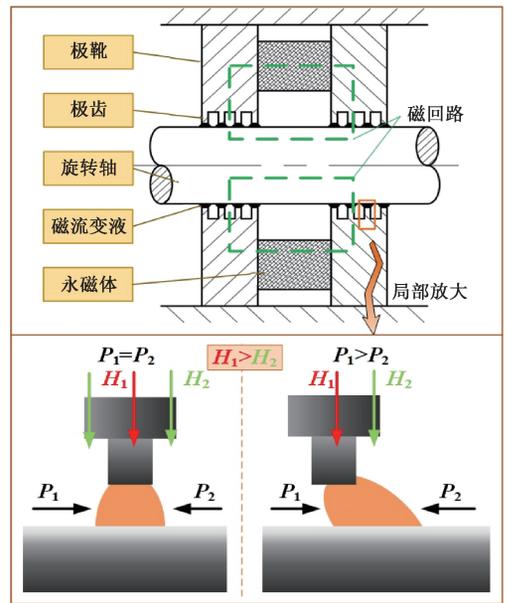


图1 磁流变密封工作原理

Fig. 1 Working principle of MRFS

其中永磁体作为磁源产生磁场,旋转轴、极靴和极齿结构起到导磁和聚磁作用,通过结构和材料磁导率的变化将磁场集中在极齿末端,即极齿与转轴之间的密封间隙。密封间隙处的高梯度磁场将磁流变液吸附住,实现对密封间隙的有效填充,从而起到密封作用。当磁流变液两侧的压力相等($P_1 = P_2$)时,磁流变液被吸附在极齿正下方,此时磁流变液两侧均受到磁场 H_2 的磁化,因此磁流变液表面没有形成磁压;当一侧压力增加($P_1 > P_2$),磁流变液在压差的作用下向低压侧移动,此时磁流变液表面一侧由磁场 H_1 磁化,另一侧由磁场 H_2 磁化,因此在磁

流变液表面产生磁压。此外磁流变液屈服应力的存在使得磁流变液在被向低压侧推动时产生反作用力。因此,磁压和屈服产生反作用力之和即为磁流变密封的密封压差。

1.2 光束定向器磁流变密封结构设计

目前,光束定向器的光路密封大都采用 O 型密封圈密封,其结构如图 2 所示。图中“1”表示 轴承座;“2”表示 轴承压板;“3”表示 预紧垫圈;“4”表示 轴承;“5”表示 橡胶密封圈;“6”表示 转轴;“7”表示 光路通道。该处运动轴系共有 3 处密封,其中 2 处为静密封、1 处为动密封。填料密封在动密封中存在老化失效、摩擦力矩大、易污染气体等缺点,因此在原有结构的基础上,设计磁流变液密封结构代替原方案中的 O 型密封圈动密封。

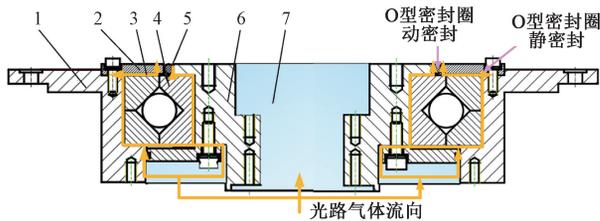
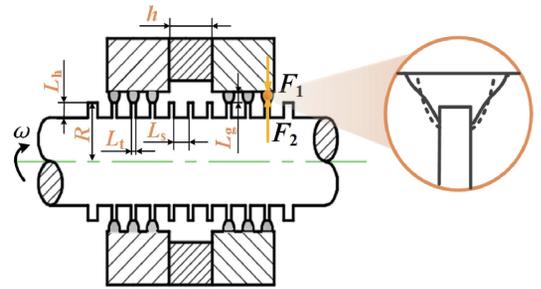


图 2 光束定向器光路常规密封方案

Fig. 2 Conventional sealing scheme of beam director optical path

传统的磁流变密封结构中,转轴直径通常不超过 30 mm,而光束定向器中的光路通道直径往往 >100 mm。大直径磁环的充磁效果较差,会导致磁场在旋转轴向上分布不均,从而导致密封能力的下降,且成本较高;此外,光束定向器通常需要超过 30°/s 的跟踪角速度,这使得磁流变液要承受较大的离心作用,这也会造成密封性能的下降。

因此采用旋转轴上加工极齿的抗离心磁流变密封结构,如图 3(a) 所示。传统的磁流变密封结构中,极齿对磁流变液的磁吸引力 F_1 方向与磁流变液所受离心力 F_2 方向相同,使磁流变液更加趋向远离轴的方向运动,从而导致密封能力下降;抗离心磁流变密封结构如图 3(b) 所示,其中磁吸引力 F_1 与离心力 F_2 方向相反,可以有效抵消离心力对密封能力的衰减。



(b) 抗离心磁流变密封结构
(b) Anti-centrifugal MRFS structure

图 3 磁流变密封结构

Fig. 3 Structure of MRFS

磁流变密封失效往往是从远离极齿一侧开始,该处磁场强度更小,在外部压差作用下,最先形成泄漏通道。因此传统结构下磁流变液在离心力作用下会使磁流变液与非极齿表面的接触面积变小,更容易发生泄漏;抗离心磁流变密封结构中,在离心力的作用下,磁流变液与非极齿表面的接触面积反而变大,能够有效抵消离心力对密封的负面作用。

对光束定向器光学通道气密性的具体技术指标如表 1 所示,设计新型光束定向器光路磁流变密封结构如图 4(a) 所示,磁源选择圆形阵列排列的圆柱永磁体如图 4(b) 所示。图 4 中“1”表示轴承座;“2”表示端盖;“3”表示套筒;“4”表示极靴;“5”表示磁源;“6”表示转轴;“7”表示轴承;“8”表示光路通道;“9”表示圆柱永磁体。所设计磁流变密封结构的密封直径为 103 mm,密封间隙为 0.3 mm,密封级数为 8。此外,光束定向器磁流变密封结构的存在,使得在光路气体流向上的设计长度与原有结构相比增加了 35 mm。但是相对于光束定向器内部 9 000 mm 的传输距离而言,其对于光路传输效率的降低可以忽略不计。磁流变密封结构各参数如表 2 所示。

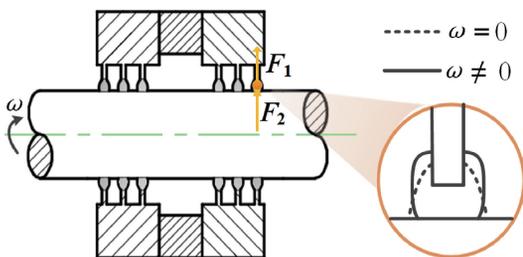
表 1 光束定向器密封要求

Table 1 Sealing requirements for beam director

参数	数值
密封压力/MPa	0.1~0.15
适应温度(舱内)/°C	0~60
降雨(1 h)/(mm·h ⁻¹)	20
盐雾/(mg·m ⁻³)	2.5
扭矩/(N·m)	<10

1.3 磁场仿真实验

为验证所设计磁流变密封结构的磁力学特性,本文利用 COMSOL 建立阵列永磁体的仿真模型。轴和极靴选择磁导率较高的 2Cr13,轴承座和套筒为 405 不锈钢,



(a) 传统磁流变密封结构
(a) Traditional MRFS structure

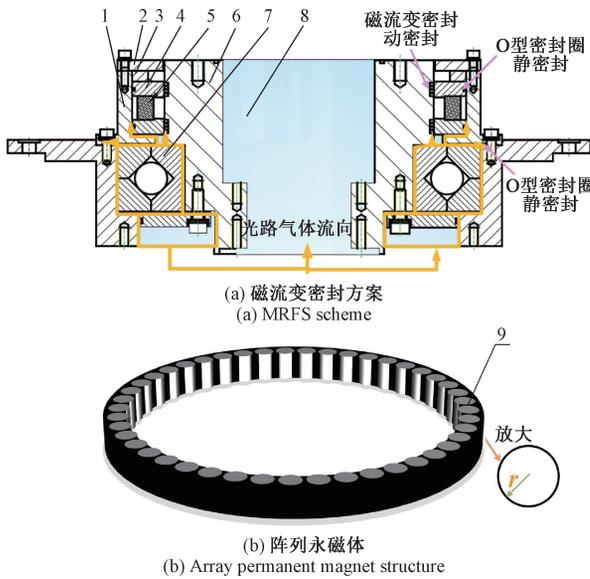


图4 光束定向器光路磁流变密封方案
Fig. 4 MRFS scheme of beam director optical path

表2 磁流变密封结构参数

Table 2 Sealing requirements for beam director

结构参数	数值	结构参数	数值
密封半径 R/mm	51.5	齿高 L_h/mm	3
密封间隙 L_g/mm	0.3	齿槽宽 L_s/mm	3
齿宽 L_t/mm	1	密封级数 N	8
圆柱永磁体半径 r/mm	3.5	圆柱永磁体高度 h/mm	10
圆柱永磁体个数	45		

磁源为钕铁硼 N35。因为磁流变液的磁导率与空气相差不多,为了方便计算,在仿真时将磁流变液区域也视为空气域。网格划分采用 COMSOL 软件内置的基于物理场自适应网格,网格精度为中等。

磁通密度云图如图 5 所示,密封结构中磁通密度主要集中于极齿机构,无明显漏磁,说明结构设计合理。为了定量分析所设计结构的磁力学性能,取一条沿轴向、紧贴极靴、横穿密封间隙的路径直线,对该直线上的磁场进行仿真分析,结果如图 6 所示。密封间隙处最大磁场为 1.24 T,大于磁流变液的磁饱和强度,满足使用要求。

2 磁流变密封理论分析

2.1 磁流变密封原理

1) 微观荧光成像实验

为进一步探索磁流变液的流变特性,设计基于荧光标定的磁流变液观测实验,观察不同体积分数磁流变液在非均匀磁场作用下磁性颗粒的微结构演变。在荧光显

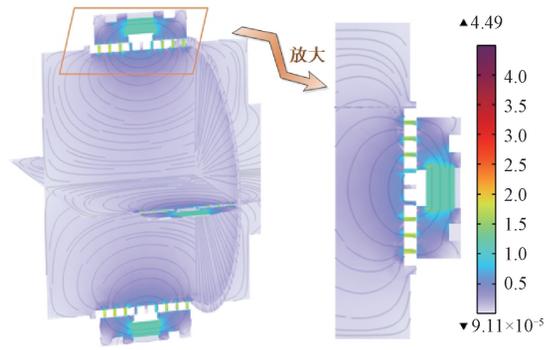


图5 磁通密度

Fig. 5 Cloud map of magnetic flux density

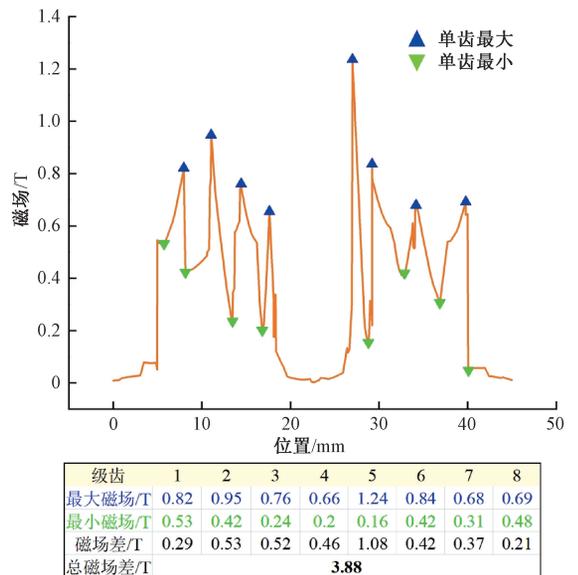


图6 密封间隙磁场强度

Fig. 6 Magnetic field strength at seal gap

像实验中,首先在颗粒表面结合 Alex 488 染料,随后再观测前对磁流变液样品进行充分振荡再分散,在尼康 Nikon ECLIPSE Ti 系列倒置显微镜中进行成像观测。图 7 所示为微观尺度下磁流变液在非均匀磁场作用下的流变现象,无磁场状态下磁性颗粒随机分布在基载液中;施加磁场后磁性颗粒迅速沿磁场方向呈链状排布;随后,在梯度磁场的作用下,磁性颗粒整体向磁场更大的方向移动。

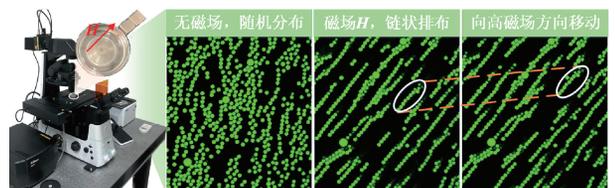


图7 磁流变液微观流变特性

Fig. 7 Micro-rheological properties of MRF

体积分数 0.05%、0.1%、0.2% 的磁流变液在外部磁场作用下的微观结构如图 8 所示。随着磁流变液浓度(颗粒体积分数)的增大,在外部磁场作用下,其微观结构经历了从简单排链、长单排链、长多排链的变化,当浓度进一步增大,会逐渐出现柱状、网状结构。

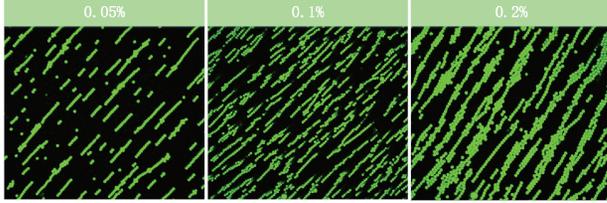


图 8 不同体积分数下的磁流变液微观结构

Fig.8 Microstructure of MRF with different volume fractions

综上,这种梯度磁场、浓度、结构的映射变化意味着磁场梯度越高,磁性颗粒浓度更高,其微观结构越趋向于复杂网状结构,在密封中更不容易发生破裂,进一步验证了本文所提抗离心磁流变密封结构的正确性。

2) 微观密封机理

从微观角度利用磁偶极子理论对磁流变密封理论加以解释。结合磁流变液的固-液两相结构特征以及在磁场作用下的成链机制,可知磁性颗粒在外加磁场下承受的作用力主要有磁力、排斥力、范德华力、粘性阻力、布朗力、重力和浮力。由于范德华力、布朗力、重力和浮力远远小于磁力、排斥力、和粘性阻力^[26],因此在计算过程中,仅考虑磁力 F_m 、排斥力 F_r 、和粘性阻力 F_v 。

基于磁偶极子理论模型^[27],颗粒被磁化后的磁矩 m 表达式为:

$$m = \frac{4}{3} \pi r_a^3 \chi H \quad (1)$$

式中: r_a 为磁性颗粒半径; χ 为磁化率; H 为外部磁场强度。

在外部磁场的作用下,任意磁性颗粒 i 受到周围颗粒的综合磁力可表示为:

$$F_i^m = \sum_{j \neq i} \left[\frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^5} (m_i \cdot m_j - 5m_{ir}m_{jr}) r_{ij} + \frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^4} (m_{ir}m_i + m_{jr}m_j) \right] \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; r_{ij} 为磁性颗粒 i 以及磁性颗粒 j 两者中心连线的矢量; m_{ir} 、 m_{jr} 代表了 m_i 和 m_j 沿着中心连线矢量 r_{ij} 方向上的分量大小。

假设 θ_{ij} 是两磁性颗粒 i 和 j 中心线与磁场方向的夹角,结合式 (1)、(2),磁力可表示为:

$$F_i^m = \sum_{j \neq i} \frac{4\pi\mu_0\chi^2 H^2 r_a^6}{3r_{ij}^4} \cdot [(1 - 5\cos^2\theta_{ij})r_{ij} + 2\cos\theta_{ij}z] \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为两颗粒之间的相对位置单位矢量; z 为磁场单位矢量。

磁流变液内的磁性颗粒之间由于磁畴方向的不同将产生相互排斥力。此时,磁性粒子 i 所受到来自其他粒子的排斥力可表示为:

$$F_i^R = \sum_{j \neq i} F_0 \frac{3\mu_0 m^2}{32\pi r_a^4} \exp\left[-\beta\left(\frac{r_{ij}}{2r_a} - 1\right)r_{ij}\right] \quad (4)$$

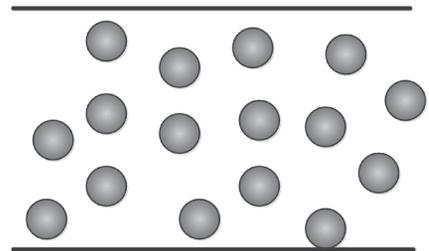
式中: F_0 为排斥力变量; β 为材料的固有参数; m 为磁矩 m 的模。

假设磁性颗粒是半径为 r_a 的规则球体,根据 Stokes 阻力公式^[28],磁性粒子 i 所受到的粘性阻力可表示为:

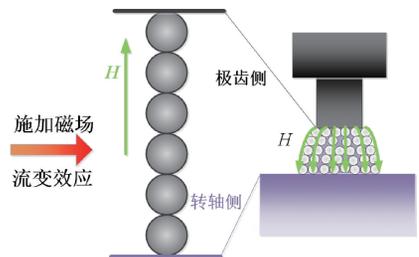
$$F_i^v = -2\pi r_a \eta_0 \mathbf{u} \quad (5)$$

式中: η_0 为基液的动力粘度; \mathbf{u} 为颗粒的速度矢量。

在无磁场状态下,磁性颗粒随机分布在基载液中,如图 9(a) 所示。当施加磁场后,在磁场的作用下磁性颗粒被磁化,沿磁场方向成链状排布;此时磁流变液被吸附在密封间隙中,起到密封效果,如图 9(b) 所示。当发生剪切运动时,磁性颗粒链发生倾斜,颗粒间距增大,颗粒间作用力 F_m 急剧减小;此时对应于旋转运动(或压差增大),磁流变液被推动剪切,颗粒间作用力的减小、结构致密性的下降会导致密封能力的下降,如图 9(c) 所示。高压差/剪切下的磁流变液密封如图 9(d) 所示,当剪切运动(压差)进一步增大,颗粒间距增大到彼此无法吸引成链,颗粒链发生断裂;由磁性颗粒受力分析可知,颗粒间作用力主要为磁力,因此颗粒链断裂位置多为磁场较小的位置,即远离极齿的一侧;当断裂颗粒链的数量到达一定占比,磁流变液无法完全阻塞密封间隙,密封失效。

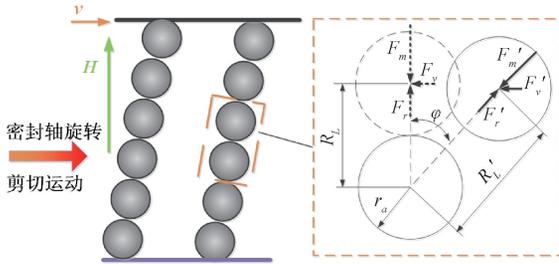


(a) 无磁场作用下的磁性颗粒
(a) Magnetic particles without a magnetic field



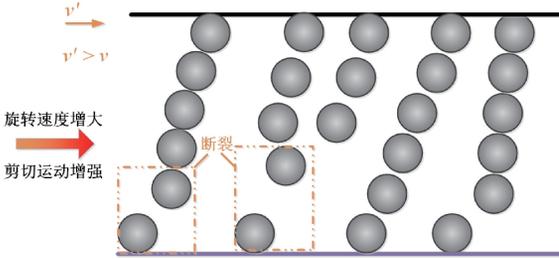
(b) 无压差磁流变液静密封

(b) Magnetorheological fluid static seal without pressure difference



(c) 低压差/剪切下的磁流变液密封

(c) Magnetorheological fluid seal under low differential pressure/shear



(d) 高压差/剪切下的磁流变液密封

(d) Magnetorheological fluid seal under high differential pressure/shear

图9 微观密封原理

Fig. 9 Micro-sealing principle

2.2 宏观密封理论模型

1) 磁流变密封耐压方程

由磁流变液伯努利方程^[29],假设极齿附近磁流变液均处于磁饱和状态,得到单个极齿的密封耐压值为:

$$\Delta P_i = P_1 - P_2 = \mu_0(H_1 - H_2)M_s = M_s \Delta B_i \quad (6)$$

式中: H_1 和 H_2 分别为密封间隙处的最大和最小磁场强度; ΔB_i 为单个极齿处最大和最小磁感应强度的差值; M_s 为磁性液体饱和磁化强度。

磁流体在密封间隙内总的耐压值为各极齿耐压值之和:

$$\Delta P_1 = \sum_{i=1}^N M_s \Delta B_i \quad (7)$$

磁流变液的磁性颗粒为微米级,常态下表现为牛顿流体。当在外磁场的作用下时,呈现出 Bingham 体特性,此状态下会产生较大的屈服强度。据 Bingham 塑性流体模型,当磁流变液所受压力大于其产生的剪切屈服应力 ΔP_τ 时,它才会流动。其中:

$$\Delta P_\tau = 2L_i \tau_y / L_g \quad (8)$$

式中: L_g 为密封间隙; L_i 为极齿的齿宽; τ_y 为磁流变液在密封间隙处的最小屈服应力。

因此在 N 个极齿下,非牛顿流体状态的磁流变液由屈服应力产生的耐压能力为^[30]:

$$\Delta P_2 = N \Delta P_\tau = 2NL_i \tau_y / L_g \quad (9)$$

因此,结合式(7)和(9),得到磁流变液密封的耐压方程如下:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \sum_{i=1}^N M_s \Delta B_i + 2NL_i \tau_y / L_g \quad (10)$$

2) 磁流变密封摩擦力矩模型

磁流变密封中,磁流变液填充在转轴和极靴之间,运动时需要克服绕轴旋转的摩擦力。单个极齿下摩擦力矩模型轴向截图如图10所示。

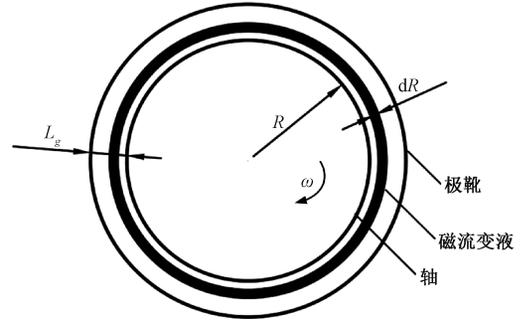


图10 磁流变密封摩擦力矩轴向截面

Fig. 10 Axial cross-sectional view of the friction torque in MRFS

其旋转摩擦力矩为:

$$T = 2\pi R^2 \cdot \tau \cdot L_i \quad (11)$$

式中: R 为旋转轴半径; τ 为剪切屈服应力; L_i 为单个极齿下磁流变液产生摩擦力矩的有效长度,即极齿宽度。

当旋转轴转速为 ω ,密封间隙为 L_g 时,对间隙中磁流变液取一微元 dR ,则任意一点的剪切应变率为:

$$\dot{\gamma} = R \frac{d\omega}{dR} \quad (12)$$

磁流变液在磁场状态下是典型的非牛顿流体,其剪切屈服应力可通过 Bingham 模型描述^[31]:

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (13)$$

式中: τ 为剪切屈服应力; τ_y 为磁流变液的屈服应力; η 为磁流变液的塑性粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

联立式(11)~(13),可得:

$$\eta d\omega = \left(\frac{T}{2\pi r^3 L_i} - \frac{\tau_y}{R} \right) dR \quad (14)$$

两边同时积分可得:

$$\int_{\omega}^{\omega} \eta d\omega = \int_R^{R+L_g} \left(\frac{T}{2\pi r^3 L_i} - \frac{\tau_y}{r} \right) dR \quad (15)$$

则 N 个极齿下,磁流变密封旋转摩擦力矩为:

$$T = N \frac{4\pi L_i R^2 (R + L_g)^2}{R^2 - (R + L_g)^2} \left[\tau_y \ln \frac{R + L_g}{R} - \eta \omega \right] \quad (16)$$

2.3 修正磁流变密封理论模型

对于磁流变密封耐压方程以及摩擦力矩的计算通常基于某一温度、某一特定磁场下的屈服应力,而在磁流变密封结构中,磁流变液屈服应力很大程度上受磁场和温度的双重影响。此外,而现阶段对于磁流变液屈服应力

的描述多为磁场的拟合公式,没有考虑温度的影响。因此,开展基于安东帕流变仪的流变特性实验,屈服应力实验结果如图 11 所示。

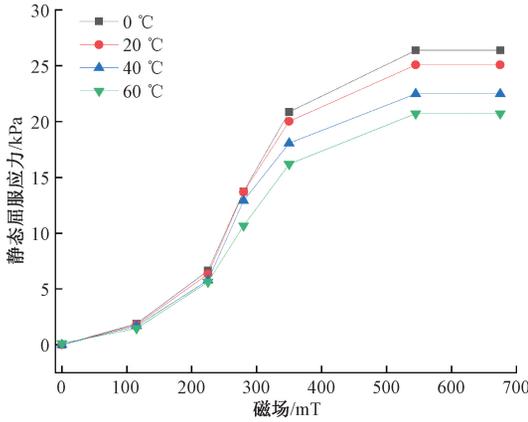


图 11 不同温度下的磁流变液屈服应力特性

Fig. 11 Yield stress of MRF at different temperatures

当磁场 > 545 mT 时,磁流变液达到磁饱和和状态,屈服应力不再变化。因此采用分段函数,通过二元非线性回归模型,拟合磁流变液屈服特性如下:

$$\tau_y = \tau(B, T) = \begin{cases} 0.016B^{1.1863} \cdot e^{-0.0047T}, & B \leq 545 \text{ mT} \\ 28.2 \cdot e^{-0.0047T}, & B > 545 \text{ mT} \end{cases} \quad (17)$$

式中: B 为磁流变液外部磁场的磁通密度; T 为温度, $0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$ 。

联立式 (10) 和 (17), 可得考虑磁场和温度影响的修正磁流变密封耐压方程如下:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N M_s \Delta B_i + 0.064 4NL_i B^{1.1863} \cdot e^{-0.0047T} / L_g \quad (18)$$

联立式 (16) 和 (17), 可得考虑磁场和温度影响的修正磁流变密封摩擦力矩模型如下:

$$T = N \frac{4\pi L_i R^2 (R + L_g)^2}{(R + L_g)^2 - R^2} \cdot \left[0.016B^{1.1863} \cdot e^{-0.0047T} \ln \frac{R + L_g}{R} + \eta\omega \right] \quad (19)$$

3 实验测试

3.1 实验台搭建及实验设置

为验证所设计磁流变密封结构的密封性能和动态摩擦力矩变化情况,搭建光束定向器光路磁流变密封等效实验台如图 12 所示。实验平台主要由磁流变密封结构、压力控制系统(气源、控压设备)、扭矩测量系统、伺服电机和上位机组成。实验中使用的磁流变液粘度为 $2.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,磁饱和强度为 27.215 kA/m 。为验证所构建修

正模型的准确度,设计并开展不同温度、不同转速下的耐压值测试实验和摩擦力矩实验。此外,为验证磁流变密封技术在光路密封领域的应用可靠性,设计并开展模拟淋雨条件和盐雾条件下的耐压值测试实验和摩擦力矩测试实验。



图 12 磁流变密封等效实验台

Fig. 12 MRFS equivalent test bench

3.2 耐压值测试实验

首先定义耐压值测量方法如下:使用压力控制系统对磁流变密封结构内空腔的压力进行精确控制,逐级加压(每次加压 10 kPa);每次达到设定压力后,控压设备自动停止供气,观察压力变化;当听到“噗”的一声(此时磁流变液密封环被冲破,压力迅速下降),记录当前压力值;拆开设备清洗后重新装配测试,重复测量 3 次,取其平均值为磁流变密封结构的耐压值。

随后将磁流变密封结构放置在高低温恒温箱中分别进行 0°C 、 20°C 、 40°C 和 60°C 的 1 h 保温,在恒温箱中按照上述方法进行耐压值的测量。最后为验证磁流变密封的多场景适用性,保持工作温度为 20°C ,分别在喷雾实验台淋雨条件下 (20 mm/h ,持续 1 h) 和盐雾试验台 (2.5 mg/m^3) 中进行耐压值测试。

将图 11 的仿真结果和表 1 的各参数数值,代入式 (18) 可得修正理论耐压值。不同工况下磁流变密封耐压值如表 3 所示,不同温度下,磁流变密封的修正理论耐压值和实验耐压值的变化趋势如图 13 所示。

由表 3 可知,随着温度的升高,磁流变密封的理论耐压值从 457 kPa 降低到 382 kPa ,实验耐压值从 400 kPa

表3 不同工况下磁流变密封耐压值

Table 3 Pressure withstand value of MRFS under different working conditions

工况	0℃	20℃	40℃	60℃	淋雨	盐雾
实验耐压值/kPa	400	380	350	300	360	380
修正理论耐压值/kPa	457	430	405	382		
误差/%	12.47	11.63	13.58	21.47		

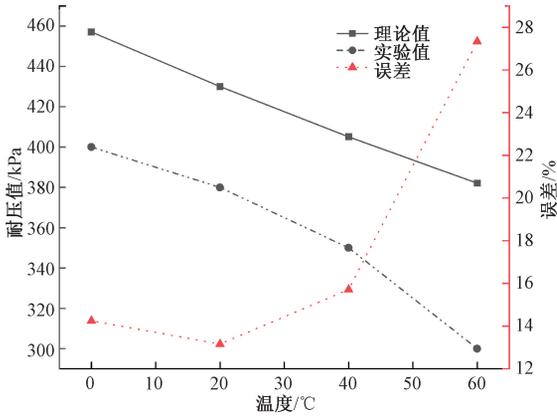


图13 不同温度下磁流变密封的理论及实验耐压值

Fig. 13 Pressure values of MRFS at different temperatures

降到300 kPa,密封能力衰减了25%;在0℃、20℃、40℃和60℃时实验值较理论值分别小了12.47%、11.63%、13.58%和21.47%;在工作温度20℃时,淋雨条件下耐压值从380 kPa降低到360 kPa,密封能力衰减了5.26%;盐雾条件下耐压值保持不变。

从图13可以看出,随着温度的升高,磁流变密封的理论耐压值和实验耐压值均逐渐降低,理论和实验在温度影响方面体现出了一致性;从理论值与实验值的误差分析来看,随着温度的升高误差表现出先减小后增大的趋势。

3.3 摩擦力矩测试实验

规定摩擦力矩测试方法如下:不注入磁流变液,测量空载下的摩擦力矩,拆装3次,取其平均值为磁流变密封

结构的空载摩擦力矩;注入磁流变液,装配完成后先顺时针旋转10圈,使磁流变液均匀分布在密封间隙中;打开扭矩传感器的上位机软件,先进行扭矩清零,随后对转矩信息进行采集;打开伺服电机的上位机软件,使磁流变密封旋转轴从转速25 r/min加速到转速100 r/min,每次转速增加25 r/min并保持10 s,扭矩传感器每隔1 s采集一次当前扭矩和速度信息。

与耐压值测试实验相同,分别开展不同温度条件、淋雨条件和盐雾条件下的摩擦力矩测试实验,实验结果如图14所示,记录摩擦力矩为空载摩擦力矩与磁流变摩擦力矩之和。

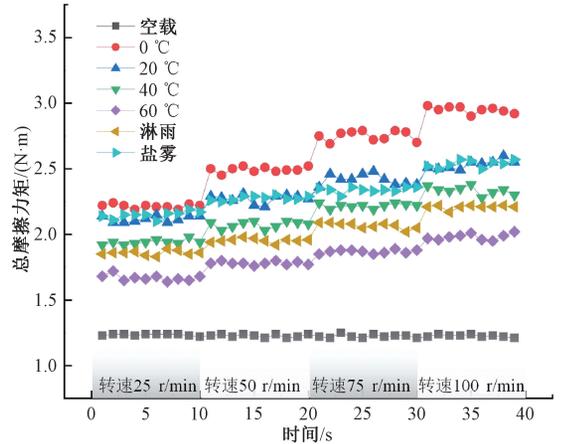


图14 多工况下摩擦力矩测试结果

Fig. 14 Test results of friction torque under multiple working conditions

从图14可以看出,磁流变密封的摩擦力矩随着转速的提高而增大,随着温度的升高而减小,相比较于20℃时的摩擦力矩,盐雾环境对摩擦力矩的影响较小,淋雨环境会导致摩擦力矩减小。

为方便对比理论与实验摩擦力矩,统计空载摩擦力矩与磁流变液摩擦力矩,并取其差值,如表4所示。将图11的仿真结果和表1的各参数数值,代入式(19)可得理论摩擦力矩数值如表4所示,不同转速下理论值与实验值误差随温度变化情况如图15所示。

表4 不同工况下磁流变密封摩擦力矩

Table 4 Friction torque of MRFS under different working conditions

转速 /(r·min ⁻¹)	扭矩/(N·m)														
	空载	0℃			20℃			40℃			60℃			淋雨	盐雾
		理论	实验	差值	理论	实验	差值	理论	实验	差值	理论	实验	差值		
25	1.017	0.987	0.03	0.949	0.889	0.06	0.886	0.712	0.174	0.828	0.441	0.387	0.631	0.920	
50	1.150	1.266	-0.116	1.082	1.044	0.038	1.019	0.845	0.174	0.961	0.553	0.408	0.726	1.048	
75	1.283	1.522	-0.239	1.215	1.189	0.026	1.152	0.99	0.162	1.094	0.641	0.453	0.839	1.112	
100	1.416	1.738	-0.322	1.348	1.305	0.043	1.285	1.106	0.179	1.227	0.753	0.474	0.981	1.310	

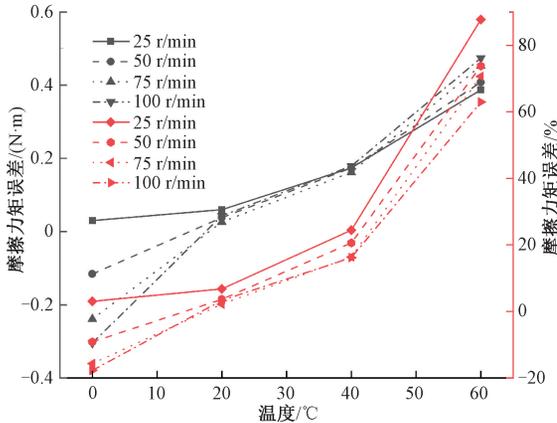


图15 摩擦力矩误差分析

Fig. 15 Error analysis of friction torque

由表4可知,随着转速的增大,在0°C、20°C、40°C、60°C、淋雨和盐雾条件下摩擦力矩实验值分别从0.987、0.889、0.712、0.441、0.631和0.920 N·m增大到1.738、1.305、1.106、0.753、0.981和1.310 N·m。转速每增加25 r/min,摩擦力矩实验值平均增大0.244、0.139、0.131、0.104、0.117和0.130 N·m。可见摩擦力矩的增大程度随着温度的升高而降低,也就是说温度越高,转速对摩擦力矩的影响程度越低。从表4和图15可以看出,摩擦力矩理论值与实验值的误差随温度的升高而先减小后增大,最小误差为0.026 N·m(20°C,75 r/min),比实验值高了2.19%,最大误差为0.474 N·m(60°C,100 r/min)。

3.4 分析与讨论

1) 耐压值测试实验分析

随着温度的升高,磁流变密封的密封能力从400 kPa降低到300 kPa,衰减了25%,这主要归因于温升对永磁体和磁性颗粒的退磁作用,导致磁流变液屈服应力减小。淋雨环境使密封能力衰减了5.26%,这主要是部分磁流变液被外部水流冲刷掉。模拟盐雾环境对密封能力没有明显的影响。根据光束定向器设计手册中150 kPa的密封要求,尽管温度变化对密封能力的影响较大,各工况下所设计磁流变密封的最小耐压值为300 kPa,大于设计指标,能够满足光束定向器光路密封的基本要求。

本文所提磁流变密封结构在6种工况下的平均耐压值为361.6 kPa,密封级数为8,则单个极齿可密封的最大压力为45.2 kPa,与文献[29]中0.3 mm密封间隙下单个极齿50 kPa的密封压力相符。

2) 摩擦力矩测试实验分析

随着温度的升高,磁流变密封的摩擦力矩逐渐减小,这主要归因于温升对磁流变液屈服应力的衰减。随着转速的增大,磁流变密封的摩擦力矩逐渐增大,这主要归因于磁流变液剪切作用下的粘度行为。相比较

于20°C时磁流变密封的摩擦力矩,淋雨环境下其摩擦力矩略有下降,这也是主要归因于部分磁流变液被外部水流冲刷掉。模拟盐雾环境对其摩擦力矩基本没有影响。

在温度为0°C~60°C、转速为25~100 r/min的工作条件下,本文所设计磁流变密封结构的最大摩擦力矩为1.738 N·m,最大总摩擦力矩为2.966 N·m,远低于10 N·m的目标扭矩^[18],与文献[7]所设计密封结构的最大摩擦力矩相近(3 N·m)。

3) 理论与实验对比分析

将实验结果与理论计算结果进行对比可以发现:磁流变密封的实验值普遍小于理论值(最小误差11.63%,最大误差21.47%),这是因为理论模型建立在如下理想化的假设条件之下。

(1)在计算耐压值时认为磁流变液在密封间隙始终处于磁饱和状态,实际上单齿下的最小磁场仅有0.16 T,磁流变液并没有完全达到磁饱和状态,这会使实验值偏小。

(2)理论模型中认为极齿宽度之和为有效密封长度,实际上在极限压差的作用下,磁流变液被推出极齿正下方,与旋转轴的有效接触长度及有效密封长度是小于极齿之和的,这也会使实验值偏小。

(3)论模型建立在磁流变液注入量充足,装配后密封间隙均匀的条件下,然而实际装配时始终存在磁流变液存储在永磁体、极靴端面等位置的浪费现象,以及轴偏心导致的密封间隙增大的问题,均会使实验值偏小。

此外,无论是耐压值误差还是摩擦力矩误差,均随着温度的升高表现出先减小后增大的趋势,主要是如下3个原因导致的。

(1)首先是随着温度的升高,磁流变液屈服应力越来越小,密封结构中永磁体的磁性能也会衰减,因此实际密封能力会随温度上升而降低,这是导致误差大致呈增大趋势的主要原因。

(2)在拟合磁流变液屈服应力时,由于是近似拟合,各个温度下拟合公式和真实值的误差不尽相同,在0°C和20°C时误差最小,这也会导致误差随着温度的升高而逐渐增大。

(3)由于流变仪只有升温模块没有降温模块,测试0°C下磁流变液屈服应力时,是对磁流变液进行冰水预处理降温实现的,实际测试过程中的温度要略高于0°C,这导致0°C下的屈服应力理论值是偏大的,使得理论值与实验值的误差偏大。而20°C时磁流变液的测试结果则相对较准,此外该温度下磁流变密封的磁性能表现也最好,密封效果也最好。因此,理论值与实验值的误差在20°C时不增不减。

4 结 论

针对光束定向器内部光路通道的密封要求,设计了一种永磁体阵列式抗离心力的磁流变密封结构,展开了相关原理及理论分析,并对其进行了不同温度温、淋雨和盐雾条件下的实验测试,得到如下结论。

1) 设计了光束定向器光路传输通道的磁流变密封结构,在不同工作温度下,最大密封压力为 400 kPa,最小密封压力为 300 kPa,最大摩擦力矩为 1.738 N·m,在淋雨(20 mm/h,持续 1 h)及盐雾(2.5 mg/m³)条件下仍能保持 360 kPa 的密封压力,满足光束定向器光路密封的基本要求。

2) 进行了基于荧光标定的微观磁流变液流变特性观测实验,揭示了非均匀磁场及不同体积分数下的磁性颗粒行为模式,从微观角度解释了磁流变密封的基本原理。

3) 拟合基于磁-温复合场的磁流变液本构模型,建立了修正磁流变密封耐压方程与摩擦力矩模型,与实验值相比,理论耐压值的最小误差为 11.63%,摩擦力矩最小误差为 2.09%。

参考文献

- [1] 史添元,张兵,邓久强,等. 基于 Zynq 的光电跟踪系统在线辨识方法设计[J]. 电子测量技术, 2024,47(8): 21-29.
- SHI T Y, ZHANG B, DENG J Q, et al. Design of online identification method for electro-optical tracking system based on Zynq[J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(8): 21-29.
- [2] 杨云鹏,刘新楠,贾俊杰,等. 痕量 N₂O 气体检测中数字锁相放大器的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024,38(7): 116-122.
- YANG Y P, LIU X N, JIA J J, et al. Design of digital lock-in amplifier in trace N₂O gas detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(7): 116-122.
- [3] 邱启帆,程智,高豆豆,等. 基于准直激光的跟踪合作目标小范围二维姿态测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(5): 188-196.
- QIU Q F, CHENG ZH, GAO D D, et al. Research on the small-range two-dimensional attitude measurement method of tracked cooperative target based on collimating laser[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(5): 188-196.
- [4] 张喜,张鹏,刘鹏. 基于垂直约束的紧耦合激光惯性

SLAM 方法[J]. 国外电子测量技术, 2024,43(9): 1-7.

ZHANG X, ZHANG P, LIU P, et al. Tightly coupled LiDAR-inertial SLAM based on vertical constraint[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(9): 1-7.

- [5] 陈文韬,高云国,邵帅. 大口径宽波段激光发射通道的正压密封[J]. 光学精密工程, 2015,23(8): 2236-2242.

CHEN W T, GAO Y G, SHAO SH. Positive seal in large-diameter and wide-band laser emission pipe[J]. Optics and Precision Engineering, 2015,23(8): 2236-2242.

- [6] 刘旭堂,高云国,邵帅,等. 大口径宽波段高能激光发射窗口的设计与测试[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1834-1841.

LIU X T, GAO Y G, SHAO SH, et al. Design and test of launch window for large-caliber multi-band high power laser system[J]. Optics and Precision Engineering, 2014,22(7): 1834-1841.

- [7] 李冰. 激光传输通道磁流体密封结构研究[D]. 长春:中国科学院大学, 2021.

LI B. Research on magnetic fluid seal structure of laser transmission channel[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.

- [8] LI D C, LI Y W, LI Z X, et al. Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing[J]. Friction, 2023,11(10): 1771-1793.

- [9] DU T X, ZHAO P H, LIU Y T, et al. Balanced devil triangle: A satisfactory comprehensive performance magnetorheological fluids with cross-scale particles[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(4): 2311254.

- [10] 李佩,卢川,尹剑飞,等. 磁流变液响应时间检测方法及其装置研究[J]. 仪器仪表学报, 2023,44(11): 290-299.

LI P, LU CH, YIN J F, et al. Study on methodology and instrumentation of measurement of response time of magnetorheological fluids[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(11): 290-299.

- [11] LI D C, ZHANG H N, ZHANG ZH L. Study on magnetic fluid static seal of large gap[C]. Proceedings of the 7th China International Conference on High-Performance Ceramics (CICC 7), 2012: 1448-1454.

- [12] GUO Y Q, LI D C, ZANG G B, et al. Research on a

- large diameter magnetic fluid seal with thin-wall parts[J]. *Frontiers in Materials*, 2022,9: 932662.
- [13] LI Z X, LI SH X, WANG X, et al. Numerical simulation and experimental study on magnetorheological fluid seals with flexible pole pieces[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021,57(10):4600607.
- [14] YANG X L, ZHANG ZH L, LI D C. Numerical and experimental study of magnetic fluid seal with large sealing gap and multiple magnetic sources[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2013, 56(11): 2865-2869.
- [15] MATUSZEWSKI L, BELA P. New designs of magnetic fluid seals for reciprocating motion[J]. *Polish Maritime Research*, 2022,28(4):151-159.
- [16] 于文娟,李德才,李艳文,等. 真空镀膜机用小型磁性液体密封设计[J]. *北京交通大学学报*, 2021,45(5): 124-129.
- YU W J, LI D C, LI Y W, et al. Design of magnetic fluid seal of small vacuum coating machine[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021,45(5):124-129.
- [17] LIU S J, LI D C, HE X ZH, et al. Structure design study of vacuum magnetic fluid seal[J]. *Frontiers in Materials*, 2022,9: 932697.
- [18] 李冰,韩光宇,吴运寒. 激光传输通道动密封防尘结构设计[J]. *激光与红外*, 2021,51(9):1137-1142.
- LI B, HAN G Y, WU Y H. Design of dynamic sealed and dustproof structure of laser transmission channel[J]. *Laser & Infrared*, 2021,51(9):1137-1142.
- [19] 赵少迪,鲍久圣,徐浩,等. 矿用带式输送机承载托辊的磁性液体润滑与密封性能[J]. *机械工程学报*, 2021,57(21):211-219.
- ZHAO SH D, BAO J SH, XU H, et al. Magnetic fluid lubrication and sealing performance of mining belt conveyor roller[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021,57(21):211-219.
- [20] 蔡玉强,李德才,任旦元. 罗茨鼓风机磁性液体密封的研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(7): 897-901.
- CAI Y Q, LI D C, REN D Y. Magnetic fluid seal for roots blower[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015,35(7):897-901.
- [21] CHEN ZH D, YUAN W, SONG Z X, et al. Magnetic field simulation and experimental investigation of magnetic fluid seal based on rotating shaft[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023,582: 170978.
- [22] LI SH SH, XIU SH CH, SONG W L, et al. Research on the wear characteristics of magnetorheological fluid in sealing interface considering the interaction between surface roughness and magnetic particles[J]. *Tribology International*, 2023,185:108496.
- [23] ZHANG CH, ZHOU J F, MENG X N. Temperature rise of magnetorheological fluid sealing film in a spiral grooved mechanical[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2022,74(6):683-691.
- [24] ZHAO S H, SHENG Q, LIN S, et al. The model of seal mechanism for magnetic fluid and related experimental study[J]. *Mechanika*, 2016, 22(4):260-264.
- [25] ZHANG H N, LI D C, WANG Q L, et al. Theoretical analysis and experimental study on breakaway torque of large-diameter magnetic liquid seal at low temperature[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(4):695-700.
- [26] 王宁宁. 磁流变液传动系统动力传递机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- WANG N N. Research on power transfer mechanism of magnetorheological fluids transmission system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [27] HOANG T, TRUONG B. Effects of barnett magnetic dipole-dipole interaction on grain growth and destruction[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 955(1): 1-13.
- [28] QIU ZH, WANG G W. A blowup criterion for nonhomogeneous incompressible Navier-Stokes-Landau-Lifshitz system in 2-D[J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2023,46(2):2500-2516.
- [29] 陈立娜. 磁流变液密封结构设计及实验研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- CHEN L N. Design and experimental study of magnetorheological fluid seal structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [30] 王其雨,申玉瑞,金康,等. 光束定向器方位轴磁流变液密封的设计与优化[J]. *润滑与密封*, 2023,48(4): 127-135.
- WANG Q Y, SHEN Y R, JIN K, et al. Design and optimization of magnetorheological fluid seal for azimuth axis of beam director[J]. *Lubrication Engineering*, 2023,48(4):127-135.

- [31] 李治澎,解明利. 一种磁流变液性能测试用的凹字型磁路结构设计与研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7):62-73.

LI ZH P, XIE M L. Design and research of concave magnetic circuit structure for magnetorheological fluid performance test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7):62-73.

作者简介



申玉瑞,2019 年于青岛理工大学获得学士学位,现为中国矿业大学博士研究生,主要研究方向为磁流变液密封技术。

E-mail:yurui_shen@cumt.edu.cn

Shen Yurui received his B. Sc. degree from Qingdao University of Technology in 2019.

Now he is a Ph. D. candidate at China University of Mining and Technology. His main research interests include Magnetorheological fluid sealing technology.



王其雨,2021 年于中国矿业大学获得学士学位,现为中国矿业大学博士研究生,主要研究方向为磁流变材料制备技术。

E-mail:wangqiyu@cumt.edu.cn

Wang Qiyu received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in

2021. Now he is a Ph. D. candidate at China University of Mining and Technology. His main research interests include preparation technology of magnetorheological materials.



彭来,2020 年于徐州工程学院获得学士学位,现为中国矿业大学博士研究生,主要研究方向为磁流变液减振技术。

E-mail:penglai@cumt.edu.cn

Peng Lai received his B. Sc. degree from Xuzhou University of Technology in 2020. Now

he is a Ph. D. candidate at student in China University of Mining and Technology. His main research interest is magnetorheological fluid for vibration suppression.



华德正,2016 年于山东科技大学获得学士学位,2018 年于中国矿业大学获得硕士学位,2022 年于中国矿业大学获得博士学位,现为中国矿业大学讲师,主要研究方向为磁控机器人、胶囊机器人。

E-mail:hua_dezheng@cumt.edu.cn

Hua Dezheng received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2016, M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2018, and Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2022. Now he is a lecturer at China University of Mining and Technology. His main research interests include magnetron robots and capsule robots.



刘新华(通信作者),2003 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2009 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为中国矿业大学教授,主要研究方向为磁流变液智能器件及智能制造。

智能制造。

E-mail:liuxinhua@cumt.edu.cn

Liu Xinhua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2003, M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2005, and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2009. Now he is a professor at China University of Mining and Technology. His main research interests include magnetorheological fluid-based intelligent devices and intelligent manufacturing.