

文章编号 1004-924X(2011)04-0850-07

磁场作用下磁流变液的挤压与拉伸特性

王鸿云,高春甫,阚君武,李泳鲜,王 笑
(浙江师范大学 工学院,浙江 金华 321004)

摘要:为研究磁流变液在不同磁场作用下的挤压与拉伸力学性能,建立了用于测试磁流变液挤压与拉伸特性的实验装置,并通过 ANSYS/Multiphysics 对此实验装置磁路的磁感应强度分布进行了仿真分析。利用此装置研究了磁流变液在不同外加磁场强度下的挤压和拉伸特性,并建立了拉伸屈服应力与剪切屈服应力之间的关系。挤压实验表明,磁流变液在挤压应变约为 0.15 时具有最小的压缩弹性模量;当挤压应变大于 0.15 时,挤压应力和挤压弹性模量与挤压应变表现为指数关系,且指数随着外加磁场的增大呈上升趋势。拉伸屈服应力约为剪切屈服应力的 4 倍,据此计算得到的剪切屈服应变角在 $13.8 \sim 16.9^\circ$,验证了物理模型对磁流变液剪切应力描述的合理性。

关键词:磁流变液;挤压应力;拉伸屈服应力;剪切屈服应变角

中图分类号: TB381 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0850

Compressive and tensile characteristics of magnetorheological fluid under magnetic fields

WANG Hong-yun, GAO Chun-fu, KAN Jun-wu, LI Yong-xian, WANG Xiao

(College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: The compressive and tensile characteristics of Magnetorheological(MR) fluid were investigated with a magnetic field. A experiment setup was designed and fabricated to test the compressive and tensile properties and the magnetic behavior of the equipment was analysed by using the ANSYS/Multiphysics. The compressive and tensile resistance of the MR fluid was then measured for different field strengths, and the relation between tensile yield stress and shear yield stress for the same magnetic field was developed. The compressing tests show that the MR fluid has a smaller compressive modulus when a compressive strain is about 0.15. The compressive stress and compressive modulus have an exponential relationship with the compressive strain when they are higher than 0.15. Moreover, the exponent increases with the enhancement of the applied magnetic field. The tensile yield stress is about four times of shear yield stress. According to the results above, The shear yield angle is calculated to be $13.8 - 16.9^\circ$. Obtained results prove the retentionability of the physical model for describing the sheere stress of MR fluid.

Key words: MR fluids; compressive stress; tensile yield stress; shear yield angle

收稿日期:2010-11-11;修订日期:2011-01-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075371);浙江省科技攻关重点项目(No. 2006C21067);浙江省教育厅资助项目(No. Y201016596)

1 引言

磁流变液是当前智能材料研究的一个重要分支。在外加磁场作用下,磁流变液可在固体与液态之间进行毫秒(ms)级快速可逆转化,其黏度保持连续无级变化,可实现实时主动控制且耗能极小。这一优良特性使得磁流变系统能够成为电气控制与机械系统之间简单、安静而且响应迅速的中间装置,而它独特的磁流变效应和良好的流变性能,使其可广泛应用于智能阻尼器、减震器、离合器、光学抛光和研磨等多种机械结构^[1-6]。常见磁流变器件通常是根椐磁流变液的剪切应力在不同磁场作用下的变化来设计的,而磁流变液剪切强度(50~100 kPa)偏低是阻碍磁流变液技术发展的瓶颈,目前,人们正在试图寻找磁流变液的其他高力学性能输出的工作方式。

近年来,人们将注意力转向磁流变液的挤压特性的研究,研究结果表明磁流变液挤压强度比剪切强度要高一个数量级以上^[7-8]。根据磁流变液挤压效应设计的阻尼器件^[9-10],阻尼力确有较大提高。在对磁流变液挤压阻尼器的研究中,通常是对磁流变液施加交变激振,测试其挤压应力。此时,磁流变液产生的阻尼力主要来自自动压效应,即阻尼力是由挤压强度和拉伸强度共同产生的,而不仅仅是挤压强度。

由于磁场作用下的磁流变液具有瞬时固态-液态可逆转换的特性,因此在准静态下,可将磁流变液当成固体来研究,考察其固态的晶格和挤压/拉伸力学性能。对于前者,Tao等人对磁流变液在磁场作用下的排列结构进行了大量的理论和实验研究,认为体心立方结构能量最低,是磁流变液中比较稳定的结构^[11]。对于磁场作用下磁流变液的挤压和拉伸性能报道很少,而将磁流变液作为准固体这个性质来研究其挤压和拉伸特性对学术研究和工程应用都是非常有意义的。本文构建了测试磁流变液挤压和拉伸特性的实验设备,对磁流变液的准静态挤压和拉伸性能进行了实验研究,并与其剪切性能进行了比较。

2 磁路设计

磁路设计的主要目标是为了让大部分磁力线穿过磁流变液且形成均匀磁场。磁流变液由铜制的容器盛装,容器底部为下圆盘,上圆盘和下圆盘的材料均为纯铁,以便和线圈铁心等形成磁回路。为了在磁流变液中产生均匀的磁场,在铜制容器的两侧对称放置两个铁心线圈并使其串联,铁心直径为65 mm,高度为65 mm。每个铁心上线圈匝数为1 300匝,线径为0.991 mm,电流密度限定在 5.85 A/mm^2 之内。磁流变液(SG MRF2035)和电磁纯铁(DT6)的磁感应曲线如图1所示。用ANSYS/Multiphysics对磁流变液中产生的磁感应强度进行磁场分析,整个实验装置的磁感应强度分布如图2所示。为了观察磁流变

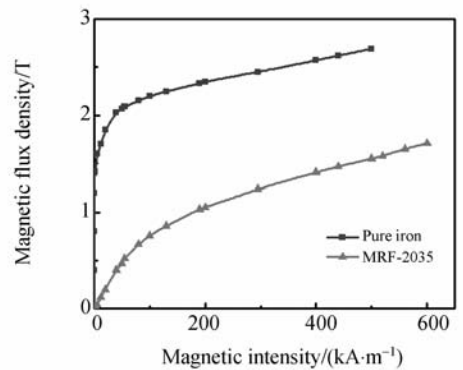


图1 磁流变液和纯铁的磁感应曲线

Fig. 1 Magnetic induction curves for MRF-2035 and pure iron

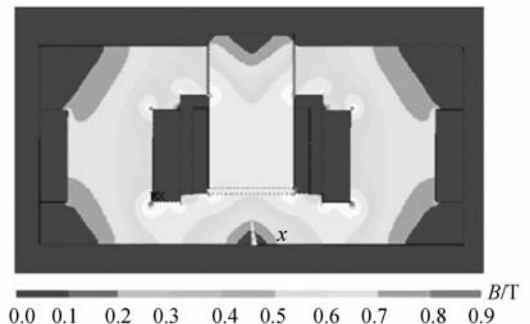


图2 实验装置的磁感应强度分布图

Fig. 2 Distribution of magnetic flux density

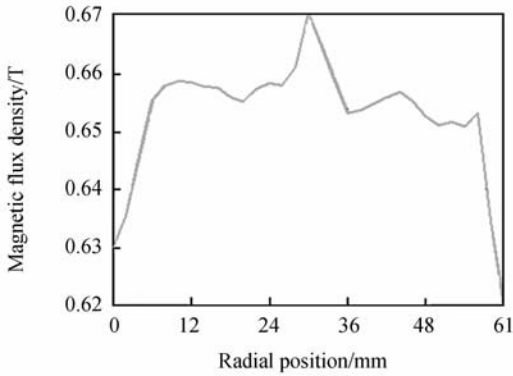


图 3 磁感应强度沿路径变化曲线

Fig. 3 Magnetic flux density changed with radius

液内部的磁感应强度分布,在磁流变液中部沿径向做了一条观察路径,沿着该路径从左到右,磁感应强度沿路径变化如图 3 所示。得到的磁感应强度平均值为 0.645 T,此时线圈中的直流电流为 2.5 A,初始间隙为 2.5 mm。由图 3 中可以看出,在路径 0~61 mm,6.1~56.5 mm 区间磁感应强度比较理想。

3 实验装置及方法

磁流变液的挤压和拉伸实验装置简图如图 4 所示。装置中设置下圆盘的直径为 61 mm,上圆盘的直径为 60 mm,间隙为 0.5 mm 以允许部分磁流变液在挤压过程中溢出。挤压实验中两圆盘初始间隙为 2.5 mm,然后下圆盘向上进给 1 mm。拉伸实验中,两极板初始间隙为 2.5 mm,然后下圆盘向下进给 5.5 mm。实验步骤均为:在未加磁场时,调整下圆盘到初始位置;在上下圆盘间加上磁场;使下圆盘运动到终点位置并测试此过程中作用在下圆盘上的力;关掉电源,使下圆盘回到初始位置。下圆盘以 0.68 mm/s 的速度进给,这可以看作是“准静态”的加载过程。

作用在下圆盘上的挤压力或拉伸力可以由拉力传感器测出,挤压或拉伸过程中的应力为:

$$\tau = F/S, \quad (1)$$

式中: F 为挤压力或拉伸力; S 为上圆柱的面积。

由于挤压或拉伸过程中力传感器会发生弹性变形,因此在磁流变液的挤压或拉伸应变为:

$$\gamma = \frac{\Delta h - F/k}{h_0}, \quad (2)$$

式中: Δh 为下圆柱向上或向下移动的位移; k 为

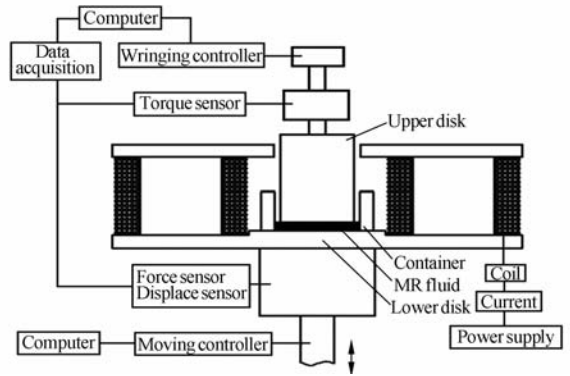


图 4 挤压、拉伸和剪切实验装置简图

Fig. 4 Sketch of compression, elongation and shearing test system

拉压力传感器的弹性系数; h_0 为下圆柱与上圆柱之间的初始间隙。

挤压模数可以由下面的公式计算出:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau$ 为对应于压应变的变化量 $\Delta\gamma$ 的压应力的改变量。

为了研究拉伸与剪切强度的关系,在此实验装置上也同时进行了剪切实验。剪切实验中,先调整两圆盘间的初始间隙为 0.5 mm,在上下圆盘间加上磁场,磁流变液在两个相对旋转的平行圆盘间被剪切,通过串联在旋转驱动轴上的转矩传感器测试其剪切应力。在剪切实验中,剪切速率为 $0 \sim 48 \text{ s}^{-1}$ 。重复实验,调整电流大小,初始间隙不变。

磁流变液的剪切屈服应力 τ_y 可以表示为:

$$\tau_y = \frac{3}{2\pi R^3} \left(T - \frac{1}{2h} \pi R^4 \eta_0 \cdot \Delta\omega \right). \quad (4)$$

式中: R 为上圆柱半径; h 为两圆柱之间的工作间隙; $\Delta\omega$ 为上、下圆柱的转速差,即旋转电机的角频率。

磁流变液的挤压和拉伸应力由型号为 BK-2FB 的拉压传感器测量,应变由型号为 500DC-SE 的位移传感器测量,剪切应力由型号为 AKC-17B 转矩传感器测量后处理得到。拉压力、位移和转矩传感器并行接入到 USB-1608FS 型数据采集卡后连到计算机的数据采集系统。

本实验中使用的磁流变液样品由宁波杉工结构监测与控制工程有限公司提供,磁流变液的体积百分数为 35%。

4 实验结果及分析

4.1 挤压实验

在不同磁感应强度作用下,磁流变液的挤压实验结果如图 5 和图 6 所示。图 5 为挤压应力与挤压应变的关系,图 6 为压缩弹性模量与挤压应变的关系。从两图中可以看到磁流变液的挤压应力的上升可以分为三个区域,在第一区域,挤压应力和压缩弹性模量随挤压应变的增加上升较快,但过程较短。在第二区域,随着挤压应变的增加,挤压应力不变,斜率接近为零。而压缩弹性模量却从最高值迅速下降到低谷,在应用磁感应强度为 100 mT,挤压应变为 0.025 时,压缩弹性模量可以高达 2.8 MPa,但当压应变达到 0.15 时,压缩弹性模量降低到 0.6 MPa。压缩弹性模量的下降表明了磁流变液在小应变下有较高的抗压强

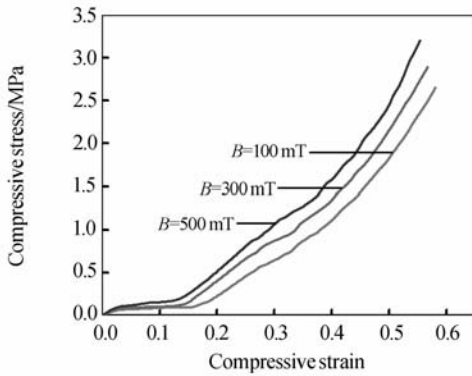


图 5 挤压应力与挤压应变的关系

Fig. 5 Compressive stress vs. compressive strain

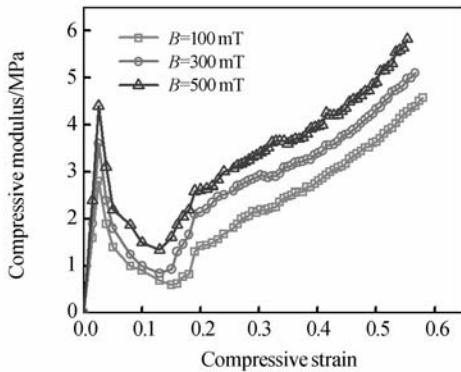


图 6 压缩弹性模量与挤压应变的关系

Fig. 6 Compressive modulus vs. compressive strain

度。在第三区域,挤压应力与压缩弹性模量随着挤压应变的增加而增加,而且随着磁感应强度的增强,曲线的斜率也不断增加。

上述结果可以理解成挤压过程使磁流变液的结构变致密,磁性颗粒间的距离减小,实质上是磁流变液的浓度增加。磁感应强度越强,磁性颗粒沿着磁场方向就会形成更加稳健的链状或柱状结构。而随着挤压应变的增大,颗粒间隙不断减小,致使磁感应强度本身也会增强。对挤压应力和压缩弹性模量与挤压应变在挤压应变大于 0.15 时各自的拟合曲线如图 7 和图 8 所示。以指数函数回归不同磁场强度下的挤压应力与挤压应变、压缩弹性模量与挤压应变曲线,得到指数随着外加磁感应强度的增大呈上升趋势。因此,磁感应强度的增大会使挤压应力和压缩弹性模量增强。

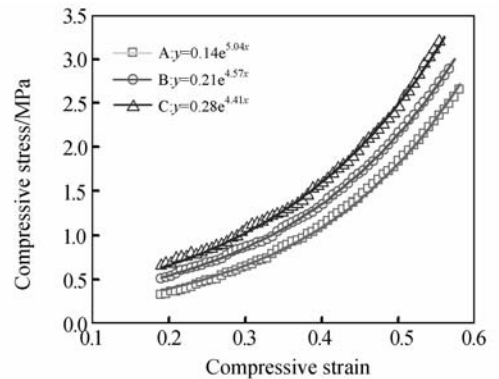


图 7 挤压应力与挤压应变关系

Fig. 7 Experimental and fitted compressive stress vs compressive strain

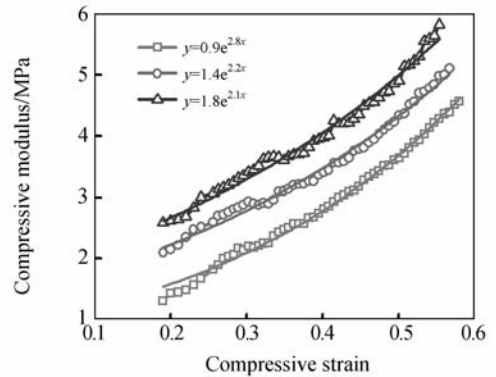


图 8 压缩模量与挤压应变关系

Fig. 8 Experimental and fitted compressive modulus vs. compressive strain

4.2 拉伸实验

磁场作用下磁流变液的拉伸应力与时间的关系如图 9 所示,拉伸应力与拉伸应变的关系如图 10 所示。从两图可以看出磁流变液在拉伸过程中拉伸应力的变化过程可以分为三个区域:第一区域,在拉伸应变值小于 0.023 时,拉伸应力随着拉伸应变呈线性急剧增加,这主要是由于力传感器发生的弹性变形引起的。第二区域,随着拉伸应变的增加,拉伸应力增加缓慢并逐步达到最大值—拉伸屈服应力,这个过程可以称之为磁流变液的屈服阶段。第三区域,随着拉伸应变的继续增加,拉伸应力缓慢降低到零,此过程可以称为屈服后磁流变液的黏连阶段。

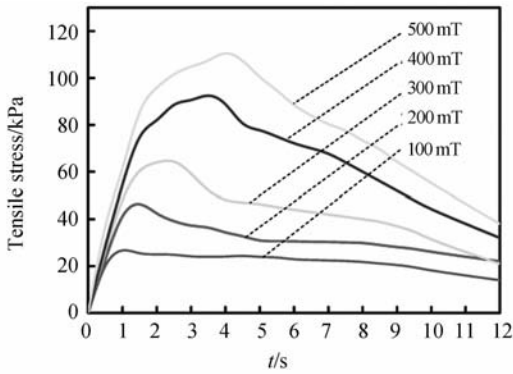


图 9 拉伸应力与时间的关系
Fig. 9 Tensile stress vs. time

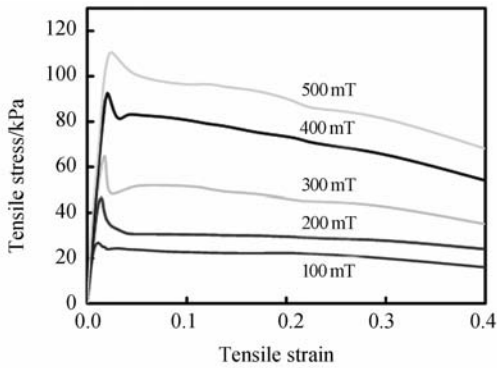


图 10 拉伸应力与拉伸应变的关系
Fig. 10 Tensile stress vs. tensile strain

为了建立拉伸与剪切强度之间的关系,将磁流变液在不同磁感应强度下的剪切屈服应力进行处理,得到剪切屈服应力与磁感应强度的关系如图 11 所示。以指数关系回归后,得到剪切屈服应

力与磁感应强度的 1.19 次方成正比,这一结果与 Ginder 等人^[12]报道的幂指数介于 1~2 之间吻合较好。

将磁流变液在不同磁感应强度下的拉伸屈服应力与剪切屈服应力进行比较,如图 11 所示。在外加磁场作用下,磁流变液的拉伸屈服应力是相同磁感应强度下的剪切屈服应力的约 4 倍。

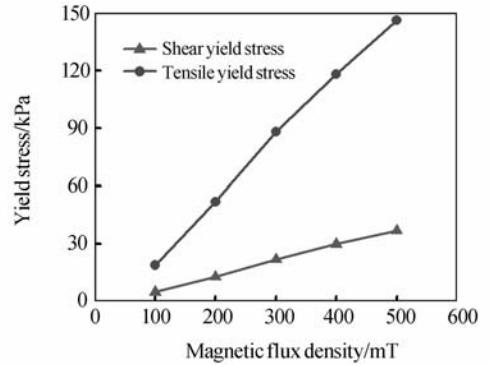


图 11 剪切屈服应力与拉伸屈服应力关系
Fig. 11 Tensile yield stress vs. shear yield stress

在对磁流变液剪切屈服应力的极化模型计算中,一般先计算单链或柱状结构沿磁场方向正对排列时的作用力,然后,针对剪切条件下颗粒中心连线与外加磁场方向成一定夹角($\theta < 25^\circ$),使用颗粒沿磁场方向吸引力的大小作为颗粒位错时吸引力大小来估算沿剪切方向上的力大小 F_s ,即:

$$F_s = F_0 \sin \theta, \tag{5}$$

式中: θ 为剪切屈服应变角, $\theta = \arctan \gamma$, γ 为磁流变液的剪切屈服应变。

为了证明此关系,有关学者试图从微观的角度直接测量两颗粒间的相互吸引力,但对于微米量级的两颗粒间的吸引力很难直接测量^[13-14]。拉伸屈服应力 τ_t 体现的是磁流变液中磁性颗粒之间沿着磁场方向上的相互作用力的宏观统计力学效应;剪切屈服应力 τ_s 体现的是磁流变液中的磁性颗粒沿着剪切方向上的相互作用力的宏观统计力学效应,剪切方向与磁场方向垂直。为了从宏观上得到磁流变液沿磁场方向上的力与沿剪切方向上的力的关系,本文根据大家普遍认同的公式(5),得到剪切屈服应力 τ_s 与拉伸屈服应力 τ_t 之间的关系,即:

$$\tau_s = \tau_t \sin \theta. \tag{6}$$

根据实验测试数据,按照公式(6)的关系,计算得

到 θ 在 $13.8 \sim 16.9^\circ$ 之间,这个结论与 Tao^[11,15] 等人测得的 $\theta \approx 14^\circ$ 相一致。这也说明磁流变液的拉伸屈服应力和剪切屈服应力之间通过剪切屈服应变角有较好的对应关系,从而从宏观上以实验结果验证了磁场方向上力与剪切方向上力之间的关系,直接验证了基于极化模型的磁流变液剪切应力的位错角度计算模型的正确性。

挤压过程实际使磁流变液的微观结构更加致密,增加了磁流变液的浓度,而拉伸和剪切过程使磁流变液的浓度并没有发生改变,所以不好与剪切过程或拉伸过程进行直接比较。不过根据磁流变液的各种力相互之间数量级大小关系,可以用剪切屈服应力来估计磁流变液的挤压应力。根据实验结果,磁流变液的剪切屈服应力远小于其挤压应力和拉伸屈服应力。如果将两种较大的力应用到磁流变器件中,磁流变液强度不足的限制就会被削弱。人们已经关注挤压应力的应用,并设计了利用磁流变液挤压效应的磁流变阻尼器。根据实验结果,利用磁流变液的挤压应力和拉伸应力来详细设计新的磁流变器件很有可能,这些新的磁流变液的

应用方式可以大大推动磁流变技术的发展。

5 结 论

本文提出了一种在外磁场作用下对磁流变液的挤压和拉伸过程测试的实验方法,并对磁流变液的挤压、拉伸和剪切特性进行了实验研究。挤压结果表明,挤压应力与挤压应变、挤压弹性模量与挤压应变的曲线可以划分为三个不同的区域。第一区域和第三区域挤压应力与挤压弹性模量各自随压应变的增大而增加。第二区域挤压应力随挤压应变的增加保持恒定不变,而挤压弹性模量却从最高值迅速下降到低谷;同时以指数函数回归不同磁场下的挤压应力与挤压应变、挤压弹性模量与挤压应变,结果表明指数前的系数随外加磁感应强度的增大呈上升趋势。拉伸屈服应力约为剪切屈服应力的4倍,实验得到的磁流变液的剪切屈服应变角度为 $13.8 \sim 16.9^\circ$ 。根据磁流变液的这些性质,可以设计利用磁流变液挤压应力和拉伸屈服应力的新的磁流变器件。

参考文献:

- [1] 麻建坐,贺建民,黄金. 圆筒式磁流变离合器传动特性分析[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2009(3):34-38.
MA J Z, HE J M, HUANG J. Analysis on transmission properties of a cylindrical magnetorheological clutch[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science)*, 2009(3): 34-38. (in Chinese)
- [2] 李军强,臧希喆,赵杰. 旋转式磁流变阻尼器优化设计与力学性能试验[J]. 机械工程学报, 2010,46(5):177-182.
LI J Q, ZANG X ZH, ZHAO J. Optimization design and mechanic characteristic experiment of the rotary magnetorheological damper[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010,46(5):177-182. (in Chinese)
- [3] 李志华,林阳,朱丰友,等. 圆筒式磁流变制动器结构与磁路耦合的优化设计[J]. 工程设计学报, 2009,16(4):261-265.
LI ZH H, LIN Y, ZHU F Y, et al.. Optimization design of structure and magnetic circuit for drum-type magnetorheological brake[J]. *Journal of Engineering Design*, 2009,16(4):261-265. (in Chinese)
- [4] 石峰,戴一帆,彭小强,等. 高精度光学表面磁流变修形[J]. 光学精密工程, 2009,17(8):1859-1864.
SHI F, DAI Y F, PEN G X Q, et al.. Magneto-rheological finishing for high-precision optical surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):1859-1864. (in Chinese)
- [5] 宋辞,戴一帆,彭小强,等. 光学镜面磁流变抛光的后置处理[J]. 光学精密工程, 2010,18(8):1715-1721.
SONG C, DAI Y F, PENG X Q, et al.. Post processing for magnetorheological finishing of optical mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(8):1715-1721. (in Chinese)
- [6] 王卓,吴宇列,戴一帆,等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. 光学精密工程, 2008,16(1):16-21.
WANG ZH, WU Y L, DAI Y F, et al.. Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):16-21. (in Chinese)
- [7] 王鸿云,郑惠强,李泳鲜. 基于挤压模式下磁流变液

- 力学行为的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4):848-851.
- WANG H Y, ZHENG H Q, LI Y X. Mechanical behavior of magnetorheological fluid under compression mode[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(4):848-851. (in chinese)
- [8] MAZLAN S A, EKREEM N B, OLABI A G. An investigation of the behaviour of magnetorheological fluids in compression mode[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1-3):780-785.
- [9] WANG J, FENG N, MENG G, *et al.*. Vibration control of rotor by squeeze film damper with magnetorheological fluid[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17:353-357.
- [10] CARMIGNANI C, FORTE P, RUSTIGHI E. Design of a novel magneto-rheological squeeze-film damper[J]. *Smart Material and Structure*, 2006, 15:164-170.
- [11] TAO R. Super-strong magnetorheological fluids [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, 13:979-999.
- [12] GINDER J M. Behavior of magnetorheological fluids[J]. *MRS Bulletin*, 1998, 23(8):26-29.
- [13] WINSLOW W M. Induced fibrillation of suspensions[J]. *Journal of Applied Physics*, 1949, 20:1137-1140.
- [14] WANG Y R, MEN S Q, *et al.*. The interaction between two spheres in silicone oil under an electric field[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 1999, 13:1767-1774.
- [15] TAO R. Structure and dynamics of bipolar fluids under strong shear [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 21:2186-2190.

作者简介:



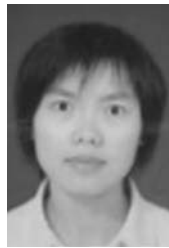
王鸿云(1976—),女,吉林长岭人,博士,讲师,2003年于东北林业大学获得硕士学位,2009年于同济大学获得博士学位,主要从事磁流变液材料及其器件方面的研究。E-mail: emmahwy@zjnu.cn



李永鲜(1950—),男,山西原平人,教授,硕士生导师,主要从事磁流变液应用、智能优化、稳健设计、车辆工程等方面的研究。E-mail: lyx3210@zjnu.edu.cn



高春甫(1965—),男,吉林公主岭人,博士,教授,主要从事数控及精密驱动技术方面的研究。E-mail: cfgao2007@zjnu.cn



王笑(1977—),女,浙江武义人,讲师,2000年于大连交通大学获得学士学位,2008年于浙江工业大学获得硕士学位,主要从事智能材料、液压传动方面的研究。E-mail: tianzhu213@zjnu.cn

通讯作者:



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,主要从事流体、压电液压马达及压电能量发电及能量收集等方面的研究。E-mail: jutkjw@yahoo.com.cn