

文章编号 1004-924X(2017)09-2413-08

基于挤压-剪切模式的高转矩磁流变离合器设计与实验

王鸿云^{1*}, 毕成², 赵爽¹, 阚君武¹, 高春甫¹, 贺新升¹

(1. 浙江师范大学工学院, 浙江 金华 321004;

2. 浙江飞亚电梯有限公司技术部, 浙江 金华 321002)

摘要: 本文设计了一种基于挤压-剪切混合模式磁流变离合器, 建立了用于测试其传动性能的实验装置。首先, 介绍了磁流变离合器的工作原理; 接着, 利用 ANSYS 有限元仿真分析软件分析了磁路的磁感应强度分布特性; 最后, 搭建了磁流变离合器的传动性能实验测试装置, 测试了磁流变离合器的静态传动性能和动态响应特性。实验结果表明: 转速对磁流变离合器的转矩影响不明显, 而电流和挤压应力对磁流变离合器转矩的影响比较大, 转矩随电流及挤压应力的增加而增加; 在 1.0 A 的电流和 40 r/min 的转速下, 挤压应力为 150 kPa 时, 挤剪式磁流变离合器的转矩可达到 146 Nm, 比剪切模式下的磁流变离合器转矩提高了约 6.6 倍; 响应时间常数先随电流(电流小于 0.6 A)的增加而减小, 而后受电流影响不明显; 响应时间随挤压应力和转速的增加而下降; 总体接合响应时间在 77 ms 以内。所研制的基于挤压-剪切混合模式的磁流变离合器传动性能良好, 控制灵敏。

关键词: 磁流变液; 离合器; 挤剪式; 转矩; 响应时间

中图分类号: TH123 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2413

Design and experiment of high-torque MR clutch in compression-shear mode

WANG Hong-yun^{1,2*}, BI Cheng², ZHAO Shuang¹, KAN Jun-wu¹, GAO Chun-fu¹, HE Xin-sheng¹

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Technique Department Zhejiang Feiya Elevator Co. Ltd, Jinhua 321002, China)

* Corresponding author, E-mail: emmawhy@zjnu.cn

Abstract: A kind of magnetorheological (MR) clutch in compression-shear mode was designed and an experiment device was fabricated to test its transmission performance. Firstly, working principle of MR clutch was introduced. Secondly, distribution characteristic of magnetic flux intensity of magnetic circuit was analyzed with ANSYS finite elements analysis software. Finally, experiment testing device was established to test static transmission performance and dynamic response characteristics of MR clutch. Experiment result indicates that influence of rotational speed on torque of MR clutch is not obvious, while influence of current and normal stress on torque of MR clutch is great. Moreover, the torque increases with increase of current and normal stress; torque of MR clutch in compression-shear mode can reach 146 Nm, increasing by about 6.6 times than that in only model of shearing when normal stress is 150 kPa under current of 1.0 A and rotational speed of 40r/min; response time

收稿日期: 2017-03-09; 修订日期: 2017-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51205367); 浙江省科技计划资助项目(No. 2014C31090); 浙江省自然科学基金项目(No. LY15E050009, No. LY14E050006); 浙江省博士后资助项目(No. BSH1302017)

constant decreases with increase of the current (current is less than 0.6 A), later current influence is not obvious; response time decreases with increase of normal stress and rotational speed; overall connection response time is within 77 ms. Transmission performance of the developed MR clutch in compression-shear mode is well and control is sensitive.

Key words: magnetorheological fluid; clutch; compression-shear mode; torque; response time

1 引言

磁流变液是一种具有良好发展前景和工程应用价值的新型智能材料。在外磁场作用下可实现瞬间(毫秒级)可逆变化,使得磁流变液在阻尼器/减震器、离合器/制动器和光学抛光等多种机械结构^[1-3]上有广泛的应用前景。磁流变(Magnetorheological, MR)离合器是通过控制外加磁场实现主/从动件结合、分离,甚至可实现转矩传递的无级变化控制,可用作农业机械/汽车自动变速箱/各种机械精密张力等的控制系统。与传统电磁/磁粉/摩擦式离合器相比,磁流变离合器具有无磨损、响应快及结构简单等优势^[4-7],引起了国内外大量学者的研究兴趣。

大多数学者研究的磁流变离合器(筒式和盘式)是利用剪切模式设计的^[8-15],而由于磁流变液剪切屈服应力较低(50~100 kPa)^[16],导致所设计的磁流变离合器传递转矩较小,无法满足工业需求。如美国 Lampe 等人研制了圆盘式磁流变离合器,其最大传递转矩为 10 Nm^[8];王灵教授研制的圆盘式磁流变离合器转矩为 13 Nm^[15]。挤压与剪切是磁流变液的不同工作模式,在单纯的剪切模式下很难提高其剪切屈服应力。文献^[17-22]的研究结果表明磁流变液的挤压强度比剪切强度高很多。本课题组研究发现在同样的间隙和磁场下,使磁流变液先工作于挤压模式后变为剪切模式,得到的静态屈服应力比采用单纯剪切模式提高近 30 倍^[20-22]。这说明将挤压与剪切模式相结合可提高磁流变器件的力学性能。

本文根据磁流变液在挤压-剪切混合模式下的性能特点,对挤压-剪切混合模式下(简称挤压式)磁流变离合器进行探索性研究。本文研究可为高力学性能磁流变传动装置的设计和有效控制提供理论依据。

2 挤压式磁流变离合器设计

2.1 工作原理

挤压式磁流变离合器是利用磁流变液挤压增

强效应设计的一种磁流变传动装置^[18,20],其工作原理示意图如图 1 所示。当线圈不通电时,磁流变液是 Newton 流体,离合器主/从动件处于分离状态;当线圈通电时,磁流变液在磁场作用下被磁化为链状结构,是 Bingham 流体,同时利用挤压螺栓带动挤压盘(定子)对类固相磁流变液施加一定挤压力,使其被挤紧而与转子接合,此时磁流变离合器处于接合状态。本文为了研究方便,将从动件固定,此时磁流变离合器即为磁流变制动器。所设计的挤压式磁流变样机主要技术参数如表 1 所示。

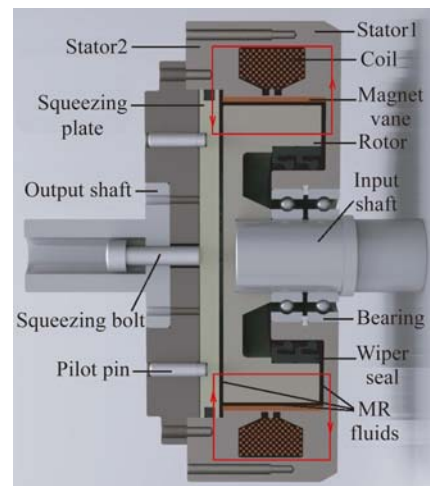


图 1 磁流变离合器原理示意图

Fig. 1 Sketch of designed MR clutch

表 1 样机主要技术参数

Tab. 1 Main specifications of prototype

技术参数	数值
总高度/mm	191
总宽度/mm	67
磁流变液工作间隙/mm	2
线圈匝数/匝	550
磁流变液剪切屈服应力(1.0 T)/kPa	55
最大转矩(1 A, 150 kPa)/Nm	146

2.2 磁路设计与有限元分析

充满转子和定子间空隙的磁流变液为工作磁流变液,为使磁流变液在磁场下形成链状结构,磁力线要垂直穿过工作磁流变液。为形成封闭磁路,挤压盘、转子、定子均采用纯铁材料,而且在非工作磁流变液与定子之间应放置隔磁环。铁心上的线圈匝数为 550 匝,线径为 0.771 mm。用 ANSYS/Multiphysics 对磁感应强度在磁流变液中的磁场分布进行分析,磁感应强度为轴对称分布模型,如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

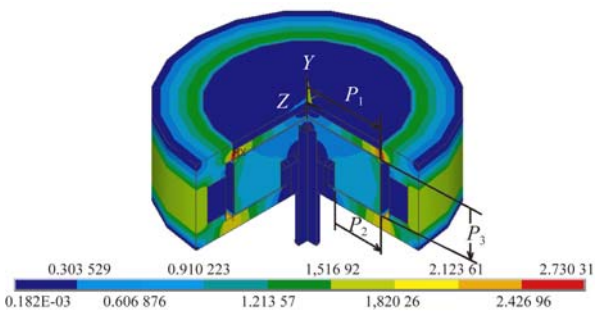


图 2 磁感应强度三维分布图

Fig. 2 3-D distribution of magnetic flux density in MR clutch

为了观察磁流变液内部的磁感应强度分布情况,在磁流变液区域中部沿径向做了一条观察路径,如图 3 所示,磁感应强度与路径 P_1 , P_2 及 P_3 的关系如图 4~6 所示。从图 3~6 中可以看出磁感应强度随路径变化的趋势,磁力线的走向及分布是正确合理的。由图 4 可以看出,沿径向在 0~52 mm 时磁感应强度沿路径 P_1 缓慢增加到 0.479 T,然后急剧增加。而图 5 显示,磁感应强度随位移(在 0~5.7 mm 范围)增加呈直线上升趋势,然后(在 5.7~26.6 mm 范围)基本保持不变,最后随位移(在 26.6~38 mm 范围)增加又呈上升趋势,但比第一阶段增加缓慢。在路径 P_1 的 52~65 mm 区间(图 4 中)和路径 P_2 的 5.7~38 mm(图 5 中)区间时磁感应强度较理想。在工作区域 P_1 和 P_2 ,磁流变液的磁感应强度平均值分别为 0.479 T 和 0.743 T(线圈中的直流电流为 1.5 A,初始间隙为 2 mm)。图 6 显示磁感应强度在主要区域(3.6~4 mm 区间)很微弱,故 P_3 处的磁流变液为非工作区域,不做讨论。

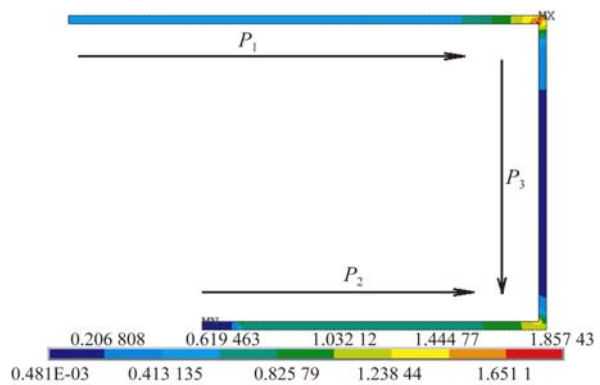


图 3 磁感应强度在磁流变液中的分布
Fig. 3 Distribution of magnetic flux density in MR fluid

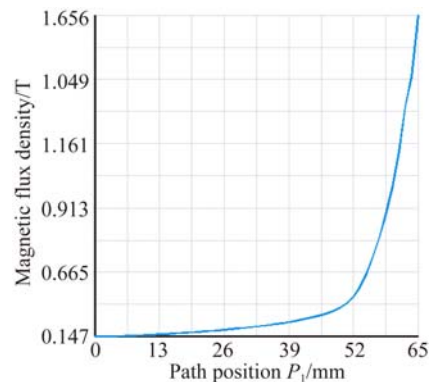


图 4 磁感应强度与路径 P_1 关系
Fig. 4 Magnetic flux density varies with path P_1

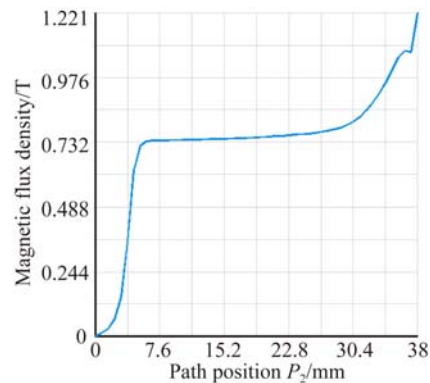


图 5 磁感应强度与路径 P_2 的关系
Fig. 5 Magnetic flux density varies with path P_2

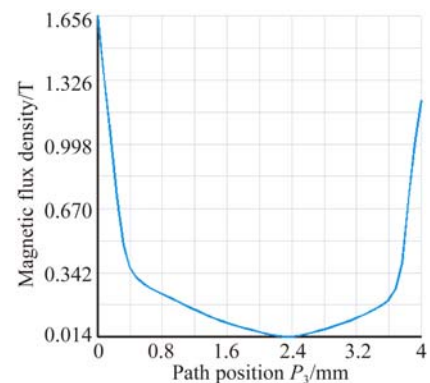


图 6 磁感应强度与路径 P_3
Fig. 6 Magnetic flux density varies with path P_3

3 实验原理和实验装置

为了检验、评价所设计挤压-剪切式磁流变离合器的传动性能,研究电流、挤压力和转速对磁流变离合器传动性能的影响规律,对研制的挤剪式磁流变离合器样机进行了传动性能试验研究。磁流变离合器实物照片如图 7 所示,测试系统的结构示意图如图 8 所示。试验时先给线圈通入电流,然后对磁流变液施加挤压力,再通过交流电机驱动转子。挤压力可通过压力传感器(TJP-3)测出,则挤压力为:

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

式中: F 为挤压力; S 为挤压盘的面积。

磁流变离合器的转矩和挤压应变分别由转矩传感器(TJN-1)和位移传感器(500DC-SE)测出。挤压力、位移和转矩传感器并行接入到一体式数据采集与分析仪(AVANT-MI-7008I)进行数据采集与分析。实验中使用的磁流变液(宁波杉工结构监测与控制工程有限公司生产)型号为SG-MRF2035,磁流变液的体积百分数为 35%。

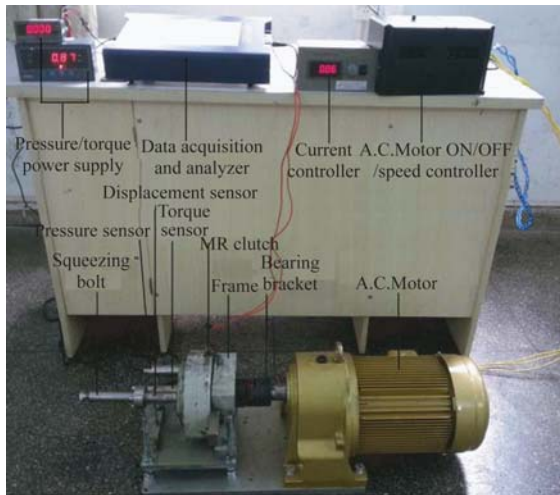


图 7 磁流变离合器测试装置
Fig. 7 Test device of MR clutch

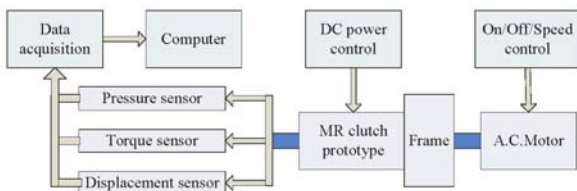


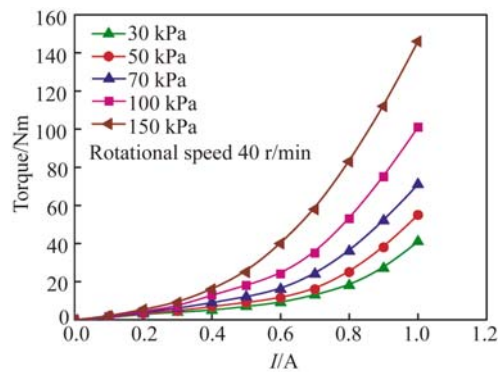
图 8 磁流变离合器测试系统简图
Fig. 8 Sketch of MR clutch test system

4 实验测试结果分析

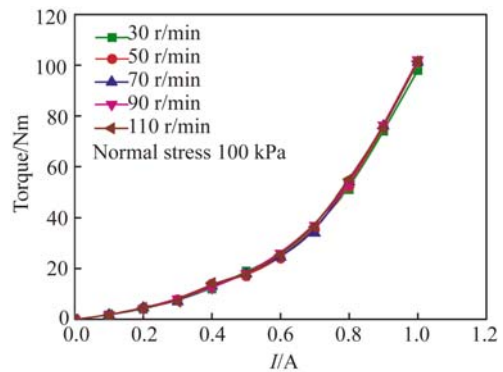
4.1 挤剪式磁流变离合器静态输出特性

4.1.1 电流对转矩的影响

每次测试过程中转速和挤压应力始终保持恒定。经过多次测试,得出不同挤压应力(30, 50, 70, 100, 150 kPa)和不同转速(30, 50, 70, 90, 110 r/min)下的磁流变离合器转矩-电流关系曲线,如图 9 所示。从图 9 可以看出,随电流的增加,磁流变离合器转矩可以分为二个阶段。第一阶段,转矩随电流(0~0.6 A)的增加缓慢增加,在挤压应力为 100 kPa 的条件下,当电流为 0.2 A 时,转矩为 4.5 Nm;当电流为 0.5 A 时,转矩为 18.1 Nm。第二阶段,转矩随电流(0.6~1.0 A)增加而成直线上升。同样在挤压应力为 100 kPa 的条件下,当电流为 0.6 A 时,转矩为 23.9 Nm;当电流为 1.0 A 时,转矩为 101.2 Nm。这是因为随着电流的增大,磁场强度增强,磁流变液的剪切屈服应力增大,从而使磁流变离合器转矩增大。



(a)不同的挤压力
(a) Under different normal stresses



(b)不同的转速
(b) Under different rotational speeds

图 9 转矩和电流关系

Fig. 9 Relationship of torque and applied current under different normal stresses and different rotational speeds

4.1.2 挤压应力对转矩的影响

在转速为 40 r/min、挤压应力分别为 30, 50, 70, 100, 150 kPa 时,转矩与电流的关系如图 9(a)所示。从图 9(a)可以看出,转矩随着挤压应力的增加而增加,当电流为 0.8 A 及挤压应力分别为 30 和 150 kPa 时,转矩分别为 18.3 和 83.1 Nm。图 10 显示出上述两种模式下,磁流变离合器转矩比较结果。在挤剪模式下,当转速为 40 r/min、电流为 1 A、挤压应力为 150 kPa 时,转矩为 146 Nm;而仅在剪切模式下(无挤压应力)的转矩为 22 Nm。前者转矩较后者提高了约 6.6 倍。胡红生等人^[15]研制的基于剪切模式的磁流变离合器,在主/从动盘直径为 94 cm、电流为 2 A 时,输出转矩为 13 Nm。本文挤压式磁流变离合器主/从动盘直径为 129 cm,在挤压应力为 150 kPa、电流为 1 A 的情况下,输出转矩可以达到 146 Nm 与其相比,转矩提高了约 11 倍。

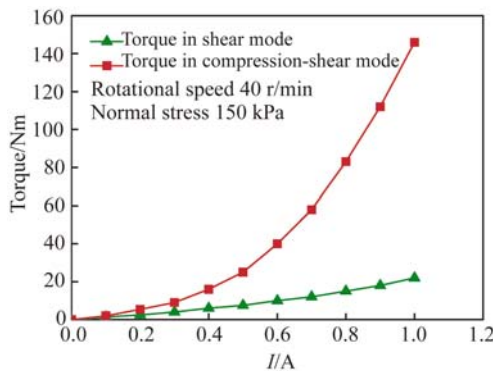


图 10 挤剪式和剪切模式下转矩传递比较

Fig. 10 Torque in compression-shear and in shear modes

对上述结果进行分析可知,磁流变液的力学性能受其微观结构的影响强烈。在此基础上,本文对不同条件下磁流变液的粒子链进行分析,如图 11 所示。在无外加磁场时,磁流变液呈自由状态,如图 11(a)所示;在磁场作用下,磁流变液呈链状结构(通链/断链/自由链等),如图 11(b)所示;当对磁流变液施加剪切力时,可使得一些断链/自由链等得到修复,如图 11(c)所示;而挤压过程可使磁流变液由链状结构变为更加稳健的体心立方或粗柱状结构^[19],如图 11(d)所示。挤压不仅增加了磁流变液的体积百分比浓度,还增大了链末端与极板的接触面积。这种微观结构的加强必然导致力学性能的增强,宏观上表现为磁流变液抗剪应力增强,且输入电流越大,磁场越强,

磁性颗粒沿着磁场方向形成的结构越稳健,对外则表现为磁流变离合器转矩越大。

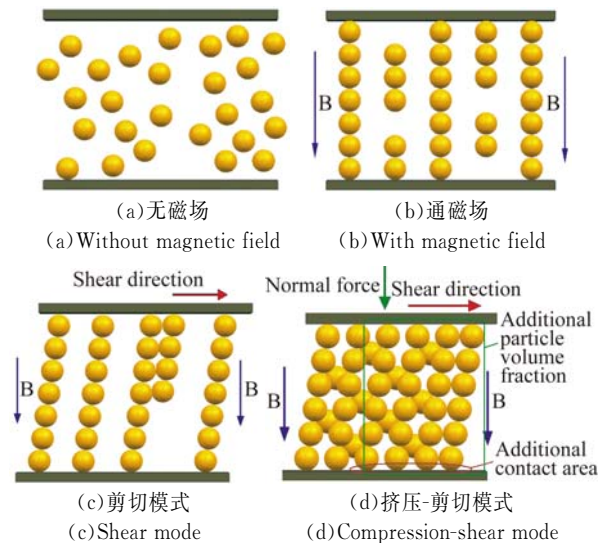


图 11 不同条件下磁流变液的粒子链结构

Fig. 11 Particle chains of MR fluid under different circumstances

4.1.3 转速对转矩的影响

在转速分别取为 30, 50, 70, 90 和 110 r/min 时,转矩与电流的关系如图 9(b)所示。从图 9(b)可以看出,几种转速下的曲线近似重合,说明转速对转矩的影响并不明显。在挤压应力为 100 kPa 时,分别输入 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1.0 A 的电流,得到的转矩-转速关系曲线,如图 12 所示。由图 12 可知,当电流为 1.0 A 的情况下,转速从 30 r/min 增加到 110 r/min 时,传递转矩从 98 Nm 增加到 101.4 Nm,增长率为 3.35%,与文献^[16]的研究结果吻合的比较好。

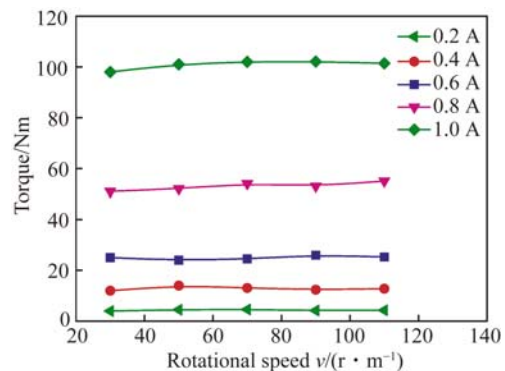


图 12 转矩与转速关系

Fig. 12 Torque versus rotational speed curves under different input currents

4.2 挤剪式磁流变离合器接合稳定性分析

接合稳定性是衡量磁流变离合器性能的一个重要指标。它是指磁流变离合器接合时转矩对时间的响应,即磁流变离合器转矩的上升响应时间。响应时间的快慢决定了磁流变离合器稳定性的好坏。

在转速为 40 r/min、挤压应力为 100 kPa 的条件下,给励磁线圈施加不同的瞬间阶跃电流时,挤剪式磁流变离合器的接合特性曲线如图 13 所示。按幂函数关系回归得到的时间常数与电流的关系如图 14 所示。可以看出,电流在 0.2~0.6 A 时,时间常数随电流的增加而迅速下降,但当电流大于 0.6 A 时,时间常数受外加电流的影响较小,总体响应时间常数在 77 ms 以内。根据不同挤压力和转速条件下获得的磁流变离合器动态响应测试曲线,按幂函数关系回归得到的时间常数与挤压应力关系及时间常数与转速的关系分别如图 15 和 16 所示。从图 15 可以看出,响应时间随挤压应力的增加而下降。将得到的实验结果进行拟合后发现,时间常数与挤压应力的 1.7 次方成正比。由于磁流变液中磁性颗粒间存在相互作用,在磁场作用下,磁性颗粒被磁化为链状结构,如图 11(b)所示,剪切过程其实就是链结构的破坏和重新形成的动态平衡过程^[19]。实验结果显示挤压可加快这种动态平衡过程。挤压可修复链结构的弱点,增大链末端的接触面积,使其快速形成更加稳健的体心立方结构。

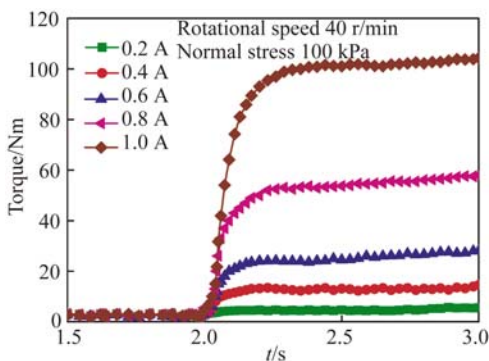


图 13 磁流变离合器接合特性

Fig. 13 Connection characteristics of MR clutch

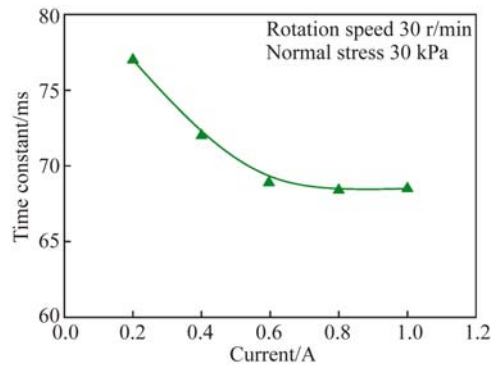


图 14 磁流变离合器接合时间与电流关系

Fig. 14 Connection time versus current curve for MR clutch

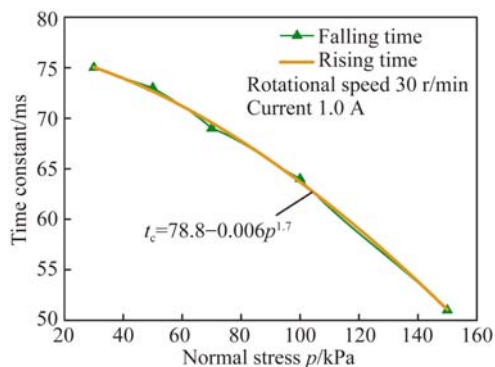


图 15 磁流变离合器响应时间常数与挤压应力关系

Fig. 15 Relationship between time constant and normal stress for MR clutch

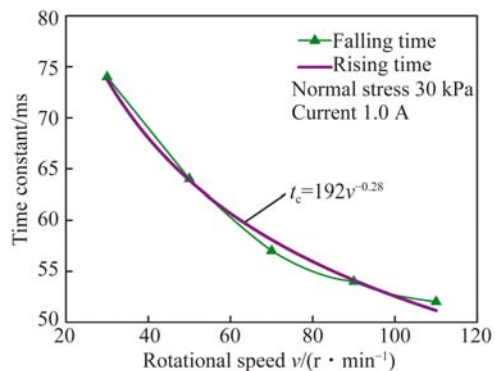


图 16 磁流变离合器响应时间常数与转速关系

Fig. 16 Relationship between time constant and rotational speed for MR clutch

由图 16 可知,转速越高,即剪切速率越高,响应越快,这一结论与其它研究人员的分析及实验结果相一致^[24-25]。理论分析表明,在磁流变离合器中磁流变液存在屈服应变的情况下,剪切应变达到屈服应变时,磁流变液的剪切应力就达到屈服应力

值,即剪切应力达到最大值。此时磁性颗粒之间的横向作用也最强。同时磁性颗粒链结构的破坏和重构过程会达到一个相对平衡状态。转速越高,达到这种动态平衡状态用时越短。由此可知随着转速的增加磁流变液的剪切应力升高的也越快。将得到的实验结果做拟合可得,时间常数与转速的 0.28 次方成正比。图15和图16中的拟合曲线不同,说明挤压应力和转速对响应时间的影响程度不同,即链结构的破坏和重新形成的动态平衡过程的机理不同。

5 结 论

本文研究了一种挤剪式磁流变离合器,并设

计制作了其传动性能的测试实验装置。对磁流变离合器的转矩及动态响应时间的影响因素进行了研究。研究发现,转速的变化对磁流变离合器的转矩影响不大,而电流和挤压应力对磁流变离合器的传递转矩影响比较大;转矩随电流及挤压应力的增加而增加;在 1.0 A 电流、 40 r/min 转速、 150 kPa 挤压应力下,挤剪式磁流变离合器转矩可达到 146 Nm ,比剪切模式下的转矩(22 Nm)提高了约 6.6 倍。磁流变离合器的接合响应时间在电流小于 0.6 A 时随电流的增加而减小,但当电流大于 0.6 A 时受电流的影响较小;响应时间随挤压应力和转速的增加而下降;总体响应时间常数在 77 ms 以内,磁流变离合器有快速的动态响应性能。

参考文献:

- [1] 马然,朱思洪,梁林,等. 磁流变减振器建模与试验[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4):135-141.
MA R, ZHU S H, LIANG L, *et al.*. Modelling and testing of magnetorheological damper [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(4):135-141. (in Chinese)
- [2] 潘公宇,杨海,徐腾跃,等. 磁流变液阻尼器试验与建模研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6):36-40.
PAN G Y, YANG H, XU T Y, *et al.*. Tests and modeling for magneto-rheological (MR) dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(6):36-40. (in Chinese)
- [3] 王鸿云,高春甫,阚君武,等. 磁场作用下磁流变液的挤压与拉伸特性[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4):850-856.
WANG H Y, GAO CH F, KAN J W, *et al.*. Compressive and tensile characteristics of magnetorheological fluid under magnetic fields [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):850-856. (in Chinese)
- [4] 陈德民,张宏,蔡青格,等. 车用磁流变离合器设计与性能实验[J]. 机械强度, 2016, 38(1):49-53.
CHEN D M, ZHANG H, CAI Q G, *et al.*. Design and performance test of automotive magneto-rheological fluid clutch [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2016, 38(1):49-53. (in Chinese)
- [5] 李龙响,郑立功,邓伟杰,等. 应用四轴联动磁流变机床加工曲面[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10):2819-2826.
LI L X, ZHENG L G, DENG W J, *et al.*. Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):2819-2826. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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, PENG X Q, *et al.*. Magnetorheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1859-1864. (in Chinese)
- [8] LAMPE D, THESS A, DOTZAUER C. MRF clutch design considerations and performance [C]. *The 6th International Conference on New Actuators*. Bremen, Germany, 1998, 449-452.
- [9] KAVLICOGLU B, GORDANINEJAD F, EVRENSEL C A, *et al.*. A high-torque magnetorheological fluid clutch [C]. *Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, 2002: 1-8.
- [10] KIKUCHI T, ODA K, YAMAGUCHI S, *et al.*. Leg-robot with MR clutch to realize virtual spastic movements [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(15):1523-1529.
- [11] KIM E S, CHOI S B, PARK Y G, *et al.*. Temperature control of an automotive engine cooling

- system utilizing a magneto-rheological fan clutch [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2010, 19(10):1-10.
- [12] KIELAN P, KOWOL P, PILCH Z. Conception of the electronic controlled magnetorheological clutch [J]. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, 2011, 87(3):93-95.
- [13] 徐国梁, 陈镛, 江万权, 等. 径向自加压磁流变液离合器, 中国:CN1331389[P], 2002.
XU G L, CHEN Q, JIANG W Q, *et al.*. The MRF clutch of radial pressure, China:CN1331389 [P], 2002. (in Chinese)
- [14] 邹刚. 杯状磁流变液离合器的性能测试与优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
ZOU G. *The performance testing and design of magneto-rheological fluid clutch* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 胡红生, 王灵, 崔亮, 等. 磁流变风扇离合器结构与可控性分析[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(3):342-346.
HU H SH, WANG J, CUI L, *et al.*. Structure design and controllability analysis of magnetorheological fan clutch [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science)*, 2010, 34(3):342-346. (in Chinese)
- [16] WANG D M, TIAN Z Z, MENG Q R, *et al.*. Development of a novel two-layer multiplate magnetorheological clutch for high-power applications [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8):1-13.
- [17] ZHANG X Z, GONG X L, ZHANG P Q. Study on the mechanism of the squeeze-strengthen effect in magnetorheological fluids [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(4): 2359-2364.
- [18] TANG X L, ZHANG X Z, TAO R. Structure-enhanced yield strength of MR fluids [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(5):2634-2638.
- [19] TAO R. Super-strong magnetorheological fluids [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, 13:979-999.
- [20] WANG H Y, BI CH, KAN J W, *et al.*. The mechanical property of magnetorheological fluid under compression, elongation, and shearing [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(7):811-816.
- [21] 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)
- [22] KIKUCHI T, IKEDA K, OTSUKI K, *et al.*. Compact MR fluid clutch device for human-friendly actuator [J]. *J. Phys.:Conf. Ser.*, 2009, 149:012059.
- [23] Lord Corporation 2003 Magneto-Rheological(MR) Overview [EB]. [http://lord.com/products-and-solutions/magnetorheological-\(mr\).xml](http://lord.com/products-and-solutions/magnetorheological-(mr).xml).
- [24] CHEN K K, TIAN Y, SHAN L, *et al.*. Transient response of sheared magnetic powder excited by a stepwise magnetic field and its comparison with ER and MR fluids[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2013, 22(11):097001.
- [25] KAVLICOGLU N C, KAVLICOGLU B M, LIU Y M, *et al.*. Response time and performance of a high-torque magneto-rheological fluid limited slip differential clutch[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2007, 16(1):149-159.

作者简介:



王鸿云(1976—),女,吉林长岭人,博士,副教授,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,主要从事磁流变液性能、磁流变离合器及磁流变抛光等方面的研究。E-mail:emmawhy@zjnu.cn



毕成(1974—),男,吉林梅河口人,高级工程师,2013年于浙江工业大学获得硕士学位,主要从事智能材料与智能电梯方面的研究。E-mail: bcbicheng@163.com