

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.04

曳引电梯磁流制动器的磁流变液摩擦学性能分析

陈 郴^{a,b}, 李雨铮^{a,b}, 黄 惠^{a,b}, 陈凯峰^a, 陈淑梅^{a,b}

(福州大学 a. 机械工程及自动化学院; b. 流体动力与电液智能控制福建省高校重点实验室, 福州 350108)

摘要: 由于磁流变液存在颗粒自磨损以及颗粒与磁流变制动器工作壁面的摩擦问题, 会影响电梯磁流变制动器的制动效果, 因此对磁流变液的摩擦学性能进行分析非常关键。通过以石墨、油脂作为添加剂, 制备 4 种硅油基磁流变液。利用四球摩擦试验机模拟磁流变液在电梯传动装置中的运行工况, 记录摩擦系数的变化, 并用影像显微镜观察和测量磨斑大小。通过流变仪测量磁流变液在摩擦实验前后流变性能的变化, 分析磁流变液在装置中的摩擦磨损对其性能的影响。结果表明: 添加剂在一定程度上对磁流变液具有减摩作用, 摩擦后的流变性能均有所增大; 所配制的编号 3 磁流变液具有低零场黏度、高磁致剪切应力、较好的稳定性, 是适用于曳引电梯磁流变制动器中的磁流变液。

关键词: 电梯; 石墨; 油脂; 磁流变液; 摩擦系数; 磨斑直径

中图分类号: TH-117.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)06-131-10

Analysis on the tribological properties of MRF for traction elevator magnetorheological brake

CHEN Chen^{a,b}, LI Yuzheng^{a,b}, HUANG Hui^{a,b}, CHEN Kaifeng^a, CHEN Shumei^{a,b}

(a. School of Mechanical Engineering and Automation; b. Key Laboratory of Fluid Power and Intelligent Electro-Hydraulic Control, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China)

Abstract: Due to the particle self-wear and friction between particles and the working wall of magnetorheological (MR) brake, the braking effect of MR brake will be affected. Therefore, it is very important to analyze the tribological performance of MR fluid. In this study, four kinds of MR fluid (MRF) were prepared with graphite and grease of silicone fluid as extra additives. First, the working condition of MRF in elevator transmission device was simulated by four-ball test machine. The friction coefficient changing of MRF was recorded, and the size of wear scar was observed and measured by image microscope. Then, by measuring the changes of the rheological properties of MRF before and after the friction experiment with rheometer, the influence of friction and wear on performance of the MRF in the

收稿日期: 2020-12-28 **网络出版日期:** 2021-04-12

基金项目: 科技部国家重点研发计划子课题(2019YFB2005103); 福建省自然科学基金面上项目(2020J01452); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JT180025; JAT190007)。

Supported by Subproject of National Key Research and Development Program of Ministry of Science and Technology (2019YFB2005103), General Program of Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J01452), and Educational Research Project for Young and Middle-aged Teachers of Fujian Provincial Education Department(JT180025; JAT190007).

作者简介: 陈郴(1995—), 女, 福州大学硕士研究生, 主要从事磁流变液材料性能研究。

通信作者: 李雨铮(1991—), 男, 福州大学副教授, 硕士生导师, (E-mail)liyzz@fzu.edu.cn。

device was analyzed. The experimental results show that the additive can reduce the friction of MRF to a certain extent, and the rheological properties increase after friction. The prepared MRF number 3 has low zero-field viscosity, high yield shear stress, and good stability, suitable for the MRF of traction elevator brake.

Keywords: elevator; graphite; grease; MR fluid; friction coefficient; wear scar diameter

磁流变液是一种能量消耗少,无环境污染的智能材料,其流变效应使其具有毫秒级响应时间和良好的实时可控性,并能应用于由外加磁场控制的器件^[1-3]。其中磁流变制动装置是一种较为理想的动力制动器件,该技术为电梯曳引制动装置性能改善与优化提供了新的思路。然而,磁流变液中磁性颗粒存在的摩擦磨损,导致摩擦系数不断增大的问题也不可忽视。磁流变液在制动过程中引起运动部件的磨损直接关系到器件密封问题,且内部磁性颗粒的自磨损决定了磁流变液的使用寿命^[4]。因此,磁流变液摩擦性能成为影响磁流变液器件发展和应用的关键因素。目前国内外学者主要通过对磁流变液组成中的分散相与添加剂以及磁流变液边界润滑接触条件进行研究,分析磁流变液的摩擦磨损特性。

磁流变液中的分散相为磁性颗粒,作为比较坚硬的成分对磁流变液的摩擦磨损起到重要的作用。胡志德等^[5]研究不同类型羰基铁粉的磁流变液摩擦性,通过利用四球摩擦磨损试验机进行实验发现,含磷化型羰基铁粉在硅油基和矿物油磁流变液中都表现出优异的摩擦性能。Song 等^[6-7]研究颗粒含量和磁场对磁流变液摩擦学行为的影响,发现在无磁场的作用下,颗粒含量高的磁流变液的摩擦磨损性能比颗粒含量低的差,而在磁场作用下则效果相反。Upadhyay^[8]研究了片状磁性颗粒磁流变液摩擦学,发现颗粒表面的磨损颗粒在片状颗粒之间起润滑作用,减少颗粒间的摩擦。

同时,在磁流变液中加入添加剂对其摩擦性也具有一定的影响。其中文献^[9-10]通过加入添加剂对磁流变液进行改性,发现改进型磁流变液在高负荷、低滑动速度下的润滑效果优于普通型,表现出更好的摩擦学性能。胡志德等^[11-12]选择高岭土和纳米二氧化硅作为触变剂,制备磁流变液,发现纳米二氧化硅在磁流变液中的抗磨性能优于高岭土。杨健健等^[13]以不同粒径的二氧化硅作为触变剂,制备磁流变液,发现含有平均粒径为 100 nm 的二氧化硅粒子的磁流变液有良好的摩擦性能。还有不少学者研究磁流变液在边界润滑接触条件下的磨损特性,Sohn 等^[14]使用销盘式摩擦试验机,发现铝铜销的磨损率比钢销大。Zhang 等^[15-16]研究磁流变液在不同涂层表面的摩擦特性,结果表明,类金刚石摩擦系数大于聚四氟乙烯。

以上研究证明了分散相与添加剂及边界润滑接触条件均会对磁流变液的摩擦磨损特性产生影响,并在这方面取得了一定的成果。其中利用材料涂层改变边界接触条件与颗粒改性成本较高,改变颗粒形状及大小会在一定程度上使磁流变液效应减少,而添加剂种类丰富,通过选用不同的添加剂可以避免以上两种方法出现的问题,并具有不同的减摩效果。

电梯制动装置采用磁流变液作为工作介质,需要具备以下特征:明显的磁流变效应、良好的物理稳定性、化学稳定性与摩擦学性能。目前,所使用的磁流变液摩擦学性能并不能良好地满足使用条件,需要配制适用于曳引电梯制动装置的磁流变液,同时能在长时间工作时保持材料性能的稳定。通过使用添加剂能有效提高摩擦学性能,以往研究尚未在磁流变液中分别添加石墨和油脂,对其流变性能进行对比分析,并模拟磁流变液在曳引电梯制动装置中的工作状态进行摩擦实验测试,对其摩擦性能进行对比分析。因此,笔者通过选择具有良好性价比的石墨和油脂作为添加剂,配制不同比例添加剂的磁流变液,利用四球摩擦试验机模拟电梯正常运行的工况下,记录摩擦系数变化,同时采用影像显微镜观测磨斑大小,分析磁流变液的摩擦磨损特性,并对摩擦前后磁流变液的性能进行分析,探究石墨和油脂添加剂对磁流变液的摩擦学性能的影响,以及摩擦磨损对磁流变液的流变性能的影响,为磁流变液的选用提供依据。

1 实 验

1.1 磁流变液材料准备

以体积分数为 35%,型号为 GH-MRF-350 的磁流变液作为编号 1,其性能参数如表 1 所示,具有良好的

耐磨性和使用寿命,满足磁流变液在模拟电梯工况下的摩擦实验需求。在编号 1 为基础的条件下,添加不同配比的石墨及油脂,如表 2 所示,利用颗粒均质仪对其进行搅拌混合分散,制备不同磁流变液。

表 1 GH-MRF-350 磁流变液的性能参数
Table 1 Performance parameters of GH-MRF-350

磁性颗粒	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.8 T 磁感应强度下 剪切应力/kPa	零磁场黏度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	工作温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
羰基铁粉	3.05	70.27	310.5	-30~150	0.25~1.06

表 2 磁流变液额外添加剂成分
Table 2 Additive composition of MRF

编号	添加剂类型	添加剂质量分数/%
1	无	0.0
2	油脂	0.5
3	石墨	0.5
4	石墨	1.0

1.2 实验测试方法

在进行摩擦测试前,采用安东帕公司里具有磁流变模块的 MCR-302 流变仪设备,如图 1(a)为 MCR-302 流变仪测试主机,图 1(b)为流变仪测试模块结构图,对不同样品磁流变液进行性能测试。在温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,剪切速率 400 s^{-1} ,磁场强度范围在 $0\sim 0.8\text{ T}$ 的条件下,测试磁流变液的剪切应力 τ 与磁感应强度 B 之间的关系。在温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,磁场强度 0 T ,剪切速率范围在 $0\sim 400\text{ s}^{-1}$ 的条件下,测试磁流变液的黏度与剪切速率之间的关系。

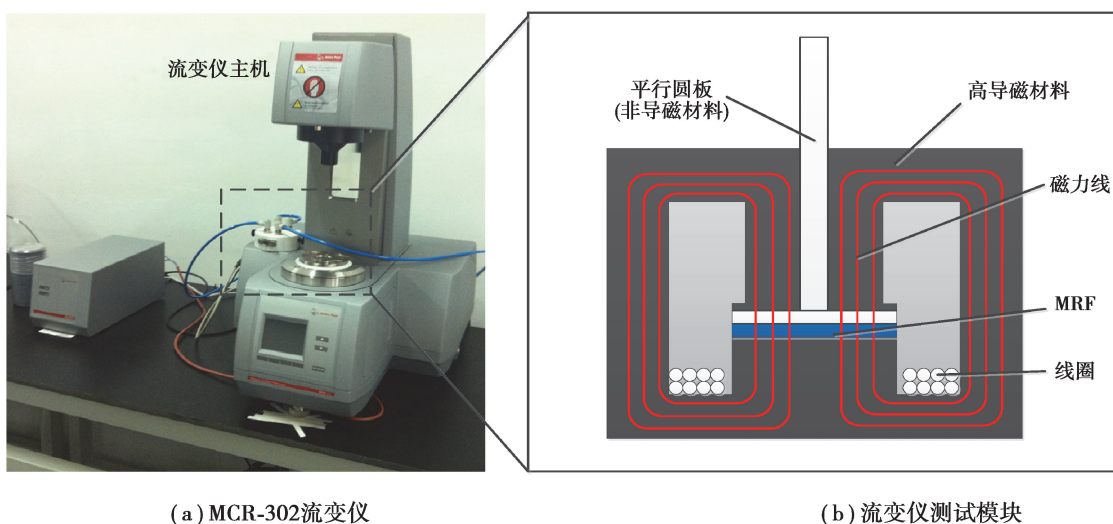


图 1 流变仪及其测试模块图
Fig. 1 Rheometer and the test module diagram

其次,采用厦门天机自动化有限公司生产的多功能四球摩擦磨损试验机(型号 MS-10A),使用直径大小为 12.7 mm ,硬度为 HRC58-62 的 GCr15 标准试球,对不同磁流变液进行摩擦实验测试。如图 2 所示,其中图 2(a)为天机四球摩擦试验机的四球摩擦模块;图 2(b)为四球摩擦试验机结构原理图,由底部 3 个固定试

球以及夹头上的旋转试球组成,磁流变液填充在其间隙中,通过旋转夹头上的试球进行实验。

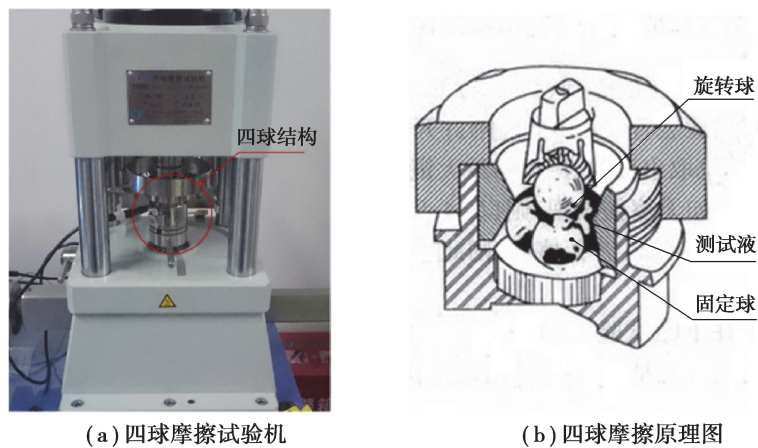


图 2 四球摩擦磨损试验机

Fig. 2 Four ball friction and wear tester

实验 1 采用恒载荷测试方式模拟电梯正常运行的工况,磁流变电梯曳引传动装置正常工作为“零速抱闸”。根据国家标准《电梯制造与安装安全规范》,选择某公司额定载重量为 320 kg 的曳引电梯作为制动装置的设计根据。设定工作温度为 40 °C,电梯曳引轮的直径大小为 0.6 m,电梯速度为 1 m/s,在曳引电梯系统中忽略其他因素影响,通过以上参数利用线速度计算,电梯曳引轮转速为 0.531 m/s。所设计的磁流变制动器制动圆筒直径大小为 100 mm,则电梯在运行中磁流变液的线速度为 0.167 m/s。根据四球摩擦试验机使用标准钢球直径为 12.7 mm,则选择试验机的转速大小为 1 600 r/min,将恒载荷测试时长设置为 360 min,并根据电梯正常运行时需要静制动力矩大致为 11.88 N·m^[17],选用施加固定载荷大小为 100 N。在摩擦过程中,记录摩擦系数随时间的变化曲线。实验 2 采用变载荷测试方式模拟磁流变液在受到不同电流下产生的磁致剪切应力的工况。选择载荷在 200,300,400,500,600 N 共 5 个载荷阶段,各试验时长为 60 min,转动球转速 1 600 r/min,并且记录摩擦系数随时间的变化曲线。每次实验完成后,利用影像显微镜观察钢球磨斑直径大小,并用石油醚清洗试球摩擦表面,进行下一次实验。

磁流变液经过摩擦实验 1 之后,在 MCR302 流变仪相同的实验条件下进行性能测试,对摩擦前后的流变性能进行对比分析。

2 结果与讨论

2.1 磁流变液摩擦实验结果

通过摩擦实验 1 测试,选取同一个位置的钢球,采用高倍影像显微镜进行观测,拍摄到各个编号的磁流变液,在 100 N 的作用力下摩擦后的试球磨斑直径,如图 3 所示。从图 3 中试球磨斑全貌可以看出,磨痕遍布整个磨斑,密布于沟槽之间的细小颗粒即为羰基铁颗粒。由此可知,羰基铁粉是磁流变液摩擦过程的主要成分,主要表现在对摩擦表面上的磨粒磨损。摩擦的机理为犁沟效应,当硬金属的粗糙峰镶入在软金属上后,在滑动的过程中推挤软金属,使之塑性流动并犁出一条条的沟槽。其中编号 1 磁流变液磨斑直径为 0.453 mm,编号 2 磁流变液的磨斑直径是 0.398 mm,编号 3 磁流变液的磨斑直径是 0.409 mm,编号 4 为 0.433 mm。可以看出,在摩擦力不大的作用下,有添加额外添加剂的磁流变液磨斑直径都相对减小,其中编号 2 减小了 12%,编号 3 和编号 4 分别减小了 9%与 4%。由此可以得出,加入添加剂后对磁流变液的磨损具有改善的作用。

图 4 是在载荷 100 N 作用下,并进行多次实验求均的磁流变液的摩擦系数及拟合曲线。由图 4(a)可以看出,4 种磁流变液的摩擦系数随着时间变化,没有发生明显的骤变。由此可知,模拟电梯正常运行情况,即在施加 100 N 的恒定载荷实验下,尽管进行长期运转,磁流变液摩擦系数仍十分稳定。如图 4(b)所示,添加了添加剂的编号 2、编号 3、编号 4 磁流变液摩擦系数,在初始阶段都比编号 1 大,主要由于磁流变液中添加

剂混合不均匀导致,但随着测试的进行,编号 1 磁流变液的摩擦系数不断增大,而随测试时间添加剂不断混合均匀的编号 2、编号 3、编号 4 磁流变液摩擦系数呈减小趋势。据此可得,加入添加剂的磁流变液摩擦系数得到一定程度的改善。

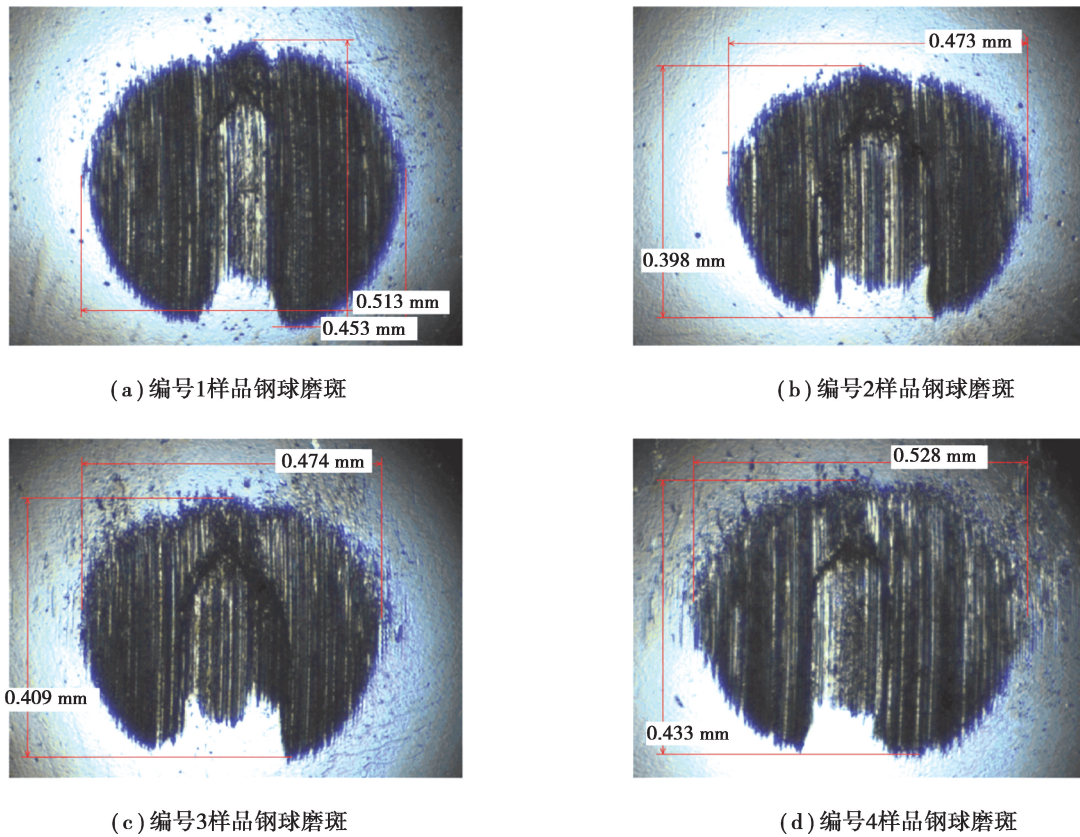


图 3 钢球磨斑图(实验 1)

Fig. 3 Wear pattern of steel ball (Experiment one)

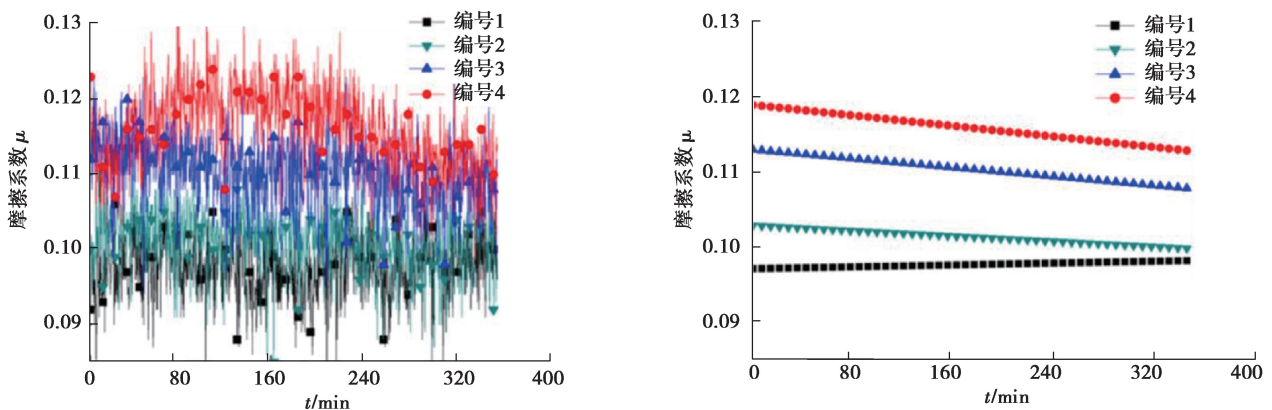


图 4 摩擦系数和拟合曲线(实验 1)

Fig. 4 Friction coefficient and the fitting curves (Experiment one)

通过摩擦实验 2 测试,选取同一个位置的钢球,采用高倍影像显微镜进行观测,拍摄到各个编号的磁流变液,在变载荷的作用下试球的磨斑直径,如图 5 所示。通过施加不同载荷实验,测得各个样品试球磨斑直径分别为 1.275,0.980,1.056,1.202 mm。对比实验 1 的测试结果,实验 2 在测试时间更少的情况下,试球磨斑直径增大,可知是由于施加的载荷作用增大导致。在 4 个磁流变液试球磨斑直径对比中,编号 2 磁流变液

磨斑直径相比编号 1 磁流变液的磨斑直径减小了 23%，编号 3 和编号 4 磁流变液磨斑直径分别减小 17% 与 6%。实验结果表明，添加剂能在一定程度上提高磁流变液的耐磨性，其中油脂效果最好，且添加少量石墨的编号 3 材料要比编号 4 的效果好。

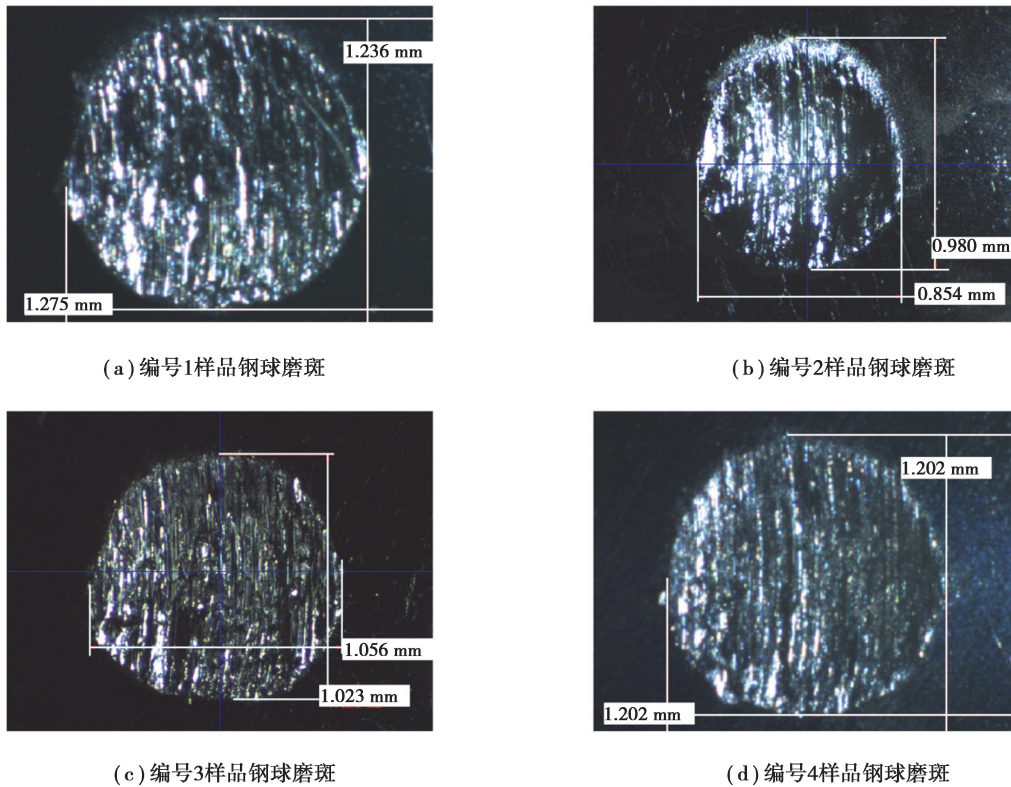


图 5 钢球磨斑图(实验 2)

Fig. 5 Wear pattern of steel ball (Experiment two)

如图 6 为实验 2 进行多次求均的摩擦系数变化曲线以及各阶段拟合曲线。按照施加载荷从 200 N 开始，每阶段进行实验 60 min，依次叠加 100 N 的载荷进行实验。从图 6 中可以得到，编号 1 磁流变液在试验 140 min 时，摩擦系数产生骤变进而停止实验，编号 3 磁流变液在 240 min 产生骤变进而停止实验，编号 4 则在 230 min 停止实验，而编号 2 磁流变液未出现突变现象。实验结果表明，磁性固体颗粒和添加剂参与了磁流变材料在器件中的摩擦磨损过程，添加剂能使磁流变液具有更稳定的摩擦系数，并在一定程度上能增加磁流变液的润滑性。

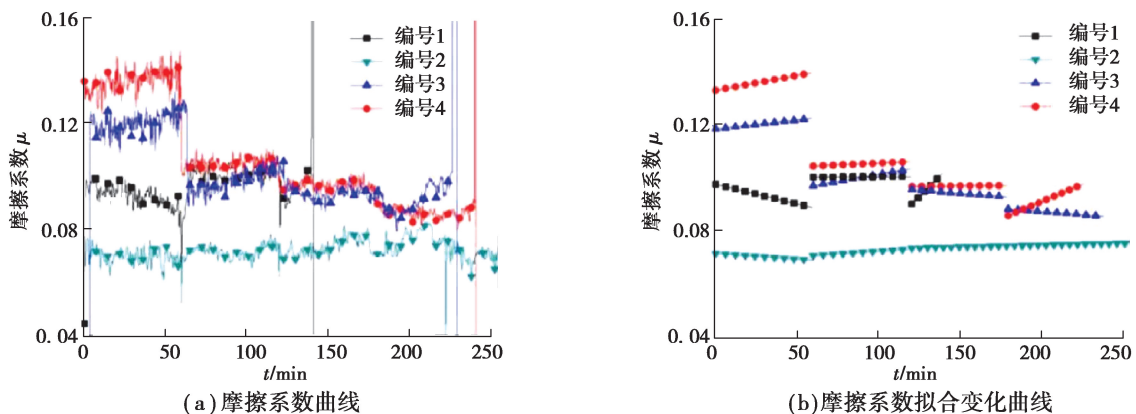


图 6 摩擦系数曲线和拟合曲线(实验 2)

Fig. 6 Friction coefficient and the segmented fitting curves (Experiment two)

由实验 1 与实验 2 的结果可以发现,在恒载荷摩擦作用下,磁流变液的摩擦系数相对稳定,钢球磨斑直径差异较小,即说明在电梯长期正常运行工况下,磁流变液在电梯“零速抱闸”制动时的摩擦磨损未表现出有明显差异,使用添加剂的磁流变液具有相对较小的磨斑直径,且摩擦系数呈减小趋势,使磁流变液制动器性能更稳定。在变载荷摩擦作用下,磁流变液的摩擦系数随载荷变化发生变动,但使用添加剂的磁流变液具有更优良的润滑性与耐磨性,在曳引电梯磁流变制动器中,则能有效提高制动器的使用寿命。其中油脂的作用效果最好,且添加 0.5% 石墨的编号 3 磁流变液相比添加 1% 石墨的效果要好。

2.2 磁流变液性能测试结果

在进行摩擦测试前,不同磁流变液性能曲线如图 7 所示。其中图 7(a)是磁流变液剪切应力 τ 与磁感应强度 B 之间的关系,发现加入添加剂后,在 0.8 T 的磁场条件作用下,编号 2 的剪切屈服应力比编号 1 磁流变液降低了 17%,并具有磁饱和趋势,而编号 3、编号 4 剪切屈服应力分别增加了 13% 和 23%,说明增加一定的石墨含量能有效增大磁流变液的剪切应力。图 7(b)是黏度与剪切速率之间的关系,发现加入不同添加剂后,编号 2 在剪切速率为 400 s^{-1} 时,零场黏度下降成 $254.4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,而编号 3、编号 4 在剪切速率低速时均有所增大,在高速剪切时变化不大。通过测试对比,有油脂添加剂的磁流变液磁致剪切应力减小,零场黏度也减小,而有石墨添加剂的磁流变液磁致剪切应力增大,零场黏度总体变化不明显。

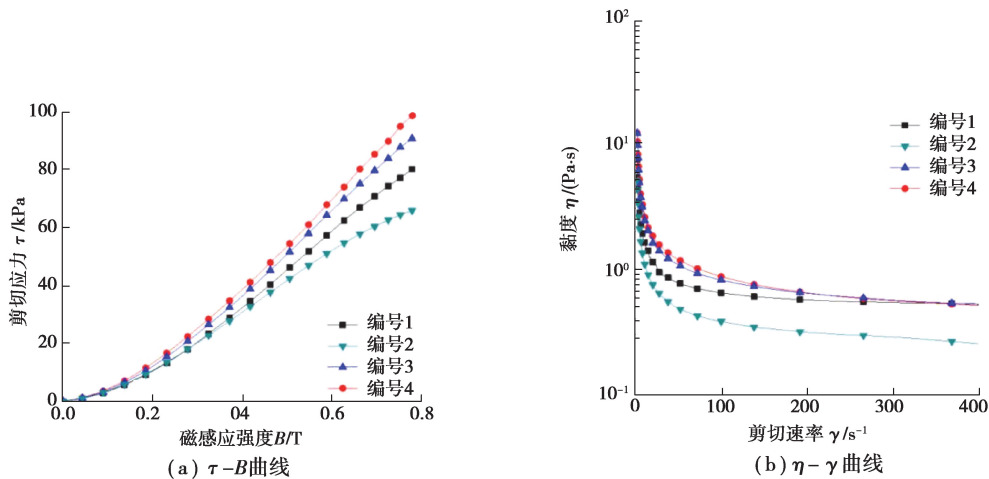


图 7 不同磁流变液性能曲线

Fig. 7 Performance curves of MRF with different additives

经过摩擦实验 1 测试后,对磁流变液进行剪切性能测试,并将测试前后的数据进行对比分析。从图 8 中可以看出,摩擦过后各编号的磁流变液在低磁场强度时,磁流变液剪切应力变化较小,而在高磁场强度时,增大较为明显。根据现有理论分析^[18-20],磁流变液的剪切屈服应力与颗粒粒径及颗粒磁化率成正相关,颗粒粒径与磁化率越大,磁流变液的剪切屈服应力越大,反之则会相反。当颗粒磨损严重时,颗粒粒径减小起主要作用,导致磁流变液剪切屈服应力变小,当颗粒轻微磨损时,磨损破坏颗粒表面包覆起主要作用,提高磁化率,会使磁流变液剪切屈服应力增大。摩擦后,如图 8 所示,磁流变液剪切应力增大,表明磁流变液经过摩擦磨损后,颗粒磨损破坏颗粒表面包覆起主要作用,提高颗粒磁化率。编号 1 磁流变液在 0.8 T 的磁场条件作用下,磁致剪切应力达到了 99 kPa,相比测试前增大了 23%;编号 2 磁流变液,在磁场条件为 0.8 T 的作用下,磁致剪切应力达到了 85 kPa,相比测试前增大了 36%,比测试前编号 1 磁流变液的磁致剪切应力稍大;编号 3 和编号 4 的磁流变液在磁场强度为 0.8 T 时,未进行摩擦测试前,其磁致剪切应力相对编号 1 增大明显,而在摩擦后剪切性能相比测试前增大 13% 和 15%,分别达到了 100.9 kPa 和 115.2 kPa。

经过摩擦实验 1 后,对磁流变液的黏度进行测试,并将测试前后的数据进行对比分析。从图 9 可以看出,摩擦过后各编号的磁流变液在低剪切速率时,黏度有所增大,而在高剪切速率时,增大较为明显,总体上摩擦后会使得磁流变液的黏度增大。根据现有理论分析^[21],磁流变液的零场黏度与磁性颗粒体积分数成正相关,随着颗粒体积分数的增大而增大。磁流变液经过磨损后,磁性颗粒的自磨损对颗粒体积分数不会有较大

的影响,而磁性颗粒与壁面的磨损,会使壁面磨损的碎屑脱落至载体液中,使颗粒体积分数增大,从而也会使磁流变液的零场黏度增大。其中编号 1、3、4 的磁流变液在剪切速率为 400 s^{-1} 时,黏度值处在 $1\sim 1.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 之间,为相对稳定的阶段,而编号 2 磁流变液具有较低的黏度。

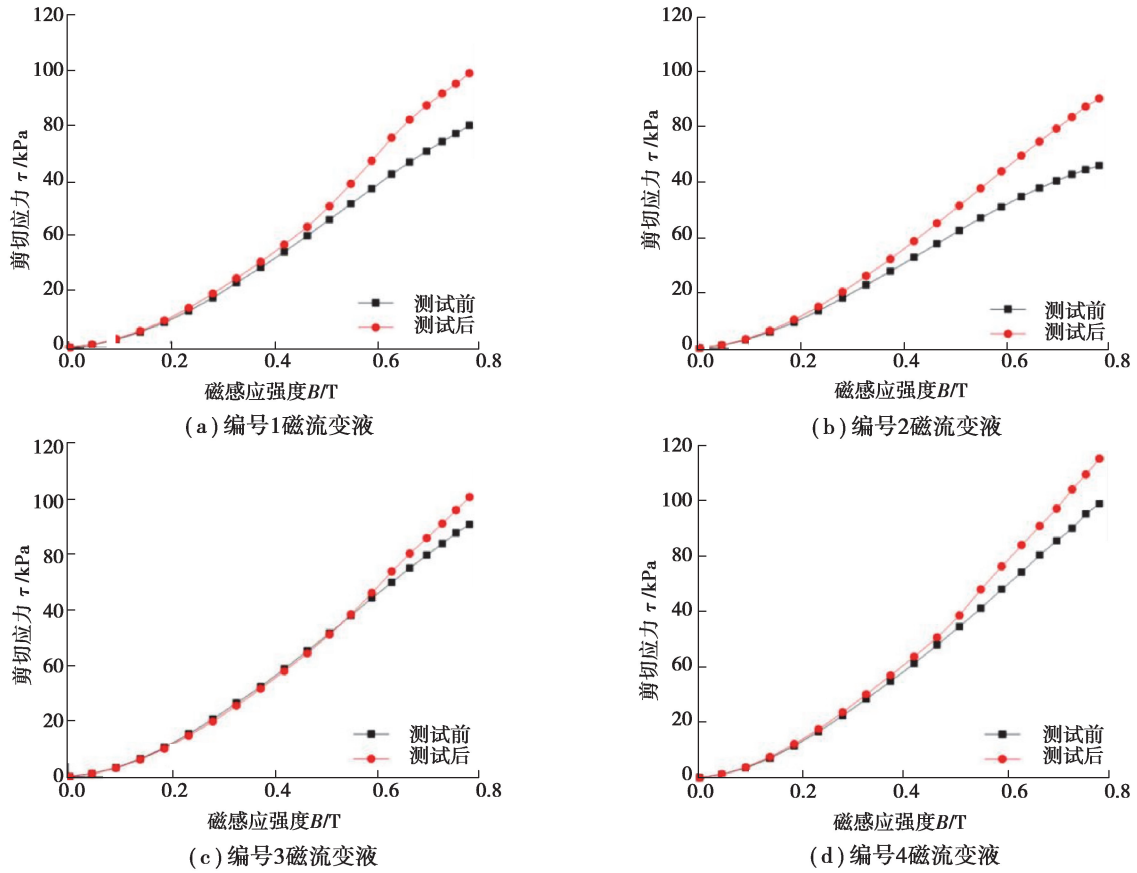
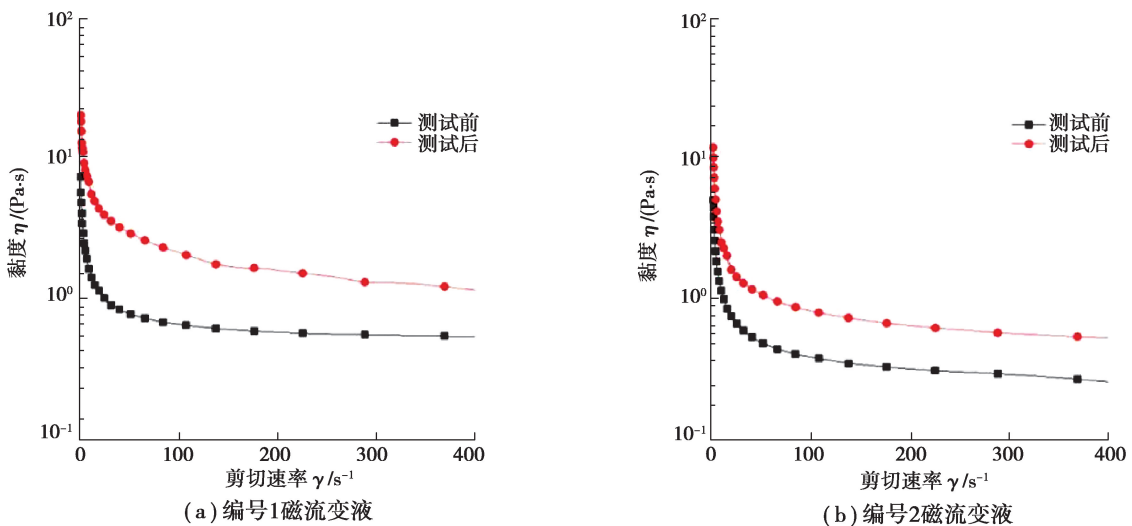


图 8 测试前后磁流变液剪切应力与磁感应强度关系曲线(实验 1)

Fig. 8 Shear yield stress of MRF versus magnetic before and after testing (Experiment one)



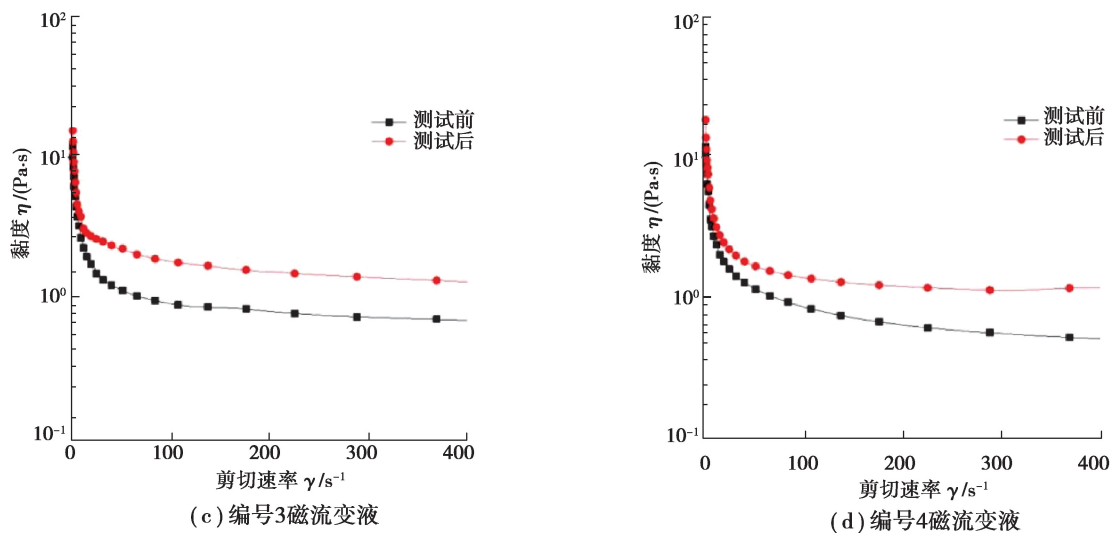


图9 测试前后剪切速率与黏度关系曲线(实验1)

Fig. 9 The zero-field viscosity of MRF before and after testing (Experiment one)

通过以上对磁流变液性能测试结果分析,不同的添加剂对磁流变液的流变性能的影响不同,有油脂添加剂的磁流变液磁致剪切应力减小,零场黏度也减小,而有石墨添加剂的能有效增大磁流变液磁致剪切应力,且使零场黏度的变化不明显,使磁流变液的性能更满足曳引电梯磁流变制动装置的需求。在摩擦实验进行后发现,磁流变液轻微磨损破坏颗粒表面包覆起主要的作用,提高颗粒磁化率,使4种磁流变液磁致剪切应力和零场黏度都有所增大,且颗粒的磨损会使颗粒的粒径减小,对磁流变液的沉降过程有一定的缓解作用。

3 结 论

以石墨和油脂2种添加剂,共配制了4种不同的磁流变液。通过四球摩擦试验机进行恒载荷与变载荷摩擦试验测试,并利用高倍影像显微镜观测试球表面磨斑,对在进行摩擦试验前后的磁流变液磁致剪切应力和零场黏度2种性能进行测量对比;总体实验结果表明,添加剂在一定程度上对磁流变液具有减摩作用,油脂的润滑性能比石墨的更好,但增加一定的石墨含量能有效增大磁流变液的剪切应力。在摩擦实验进行后发现,4种磁流变液的磁致剪切应力和零场黏度都有所增大,但有油脂添加剂的磁流变液的磁致剪切应力与零场黏度都比有石墨添加剂小。通过对4种磁流变液的摩擦及流变性能的对比分析后,发现编号3磁流变液具有更大的磁致剪切应力、较小的零场黏度、良好的稳定性,是适用于曳引电梯磁流变制动装置的磁流变液。

参考文献:

- [1] 谢磊. 基于高黏度线性聚硅氧烷的磁流变液流变特性及沉降机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Xie L, Synthesis and rheology of magnetorheological fluids based on high viscosity linear polysiloxane with focus on sedimentation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.(in Chinese)
- [2] 杨健健, 晏华, 代军, 等. 磁流变液材料的性能与应用综述[J]. 化工进展, 2017, 36(1): 247-260.
Yang J J, Yan H, Dai J, et al. A review on magnetorheological fluid: properties and applications[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(1): 247-260.(in Chinese)
- [3] Zhang J H, Xia S Q, Ye S G, et al. Experimental investigation on the noise reduction of an axial piston pump using free-layer damping material treatment[J]. Applied Acoustics, 2018, 139: 1-7.
- [4] 张进秋, 赵明媚, 姚军, 等. 磁流变液摩擦磨损特性研究进展概述[J]. 材料导报, 2018, 32(17): 2969-2975.
Zhang J Q, Zhao M M, Yao J, et al. The friction and wear properties of magnetorheological fluid: a survey[J]. Materials Review, 2018, 32(17): 2969-2975.(in Chinese)
- [5] 胡志德, 晏华, 陈淑莲, 等. 羰基铁粉类型及含量对磁流变液摩擦性能的影响[J]. 润滑与密封, 2012, 37(4): 24-28.

- Hu Z D, Yan H, Chen S L, et al. The effect on friction property of magnetorheological fluid based on different types and content of carbonyl iron[J]. *Lubrication Engineering*, 2012, 37(4):24-28.(in Chinese)
- [6] Song W L, Lee C H, Choi S B, et al. The effect of particle concentration and magnetic field on tribological behavior of magneto-rheological fluid[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314/315/316: 58-61.
- [7] Song W L, Choi S B, Choi J Y, et al. Wear and friction characteristics of magnetorheological fluid under magnetic field activation[J]. *Tribology Transactions*, 2011, 54(4): 616-624.
- [8] Upadhyay R V. Steady shear rheology and magnetic properties of flake-shaped iron particle-based MR fluid; before and after tribology study[J]. *Brazilian Journal of Physics*, 2019, 49(6): 820-828.
- [9] Lee C H, Lee D W, Choi J Y, et al. Tribological characteristics modification of magnetorheological fluid[J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(3): 031801.
- [10] Lee D W, Choi J Y, Cho M W, et al. Tribological characteristics in modified magneto-rheological fluid[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 110/111/112/113/114/115/116: 225-231.
- [11] 胡志德, 晏华, 王雪梅, 等. 触变剂对硅油基磁流变液摩擦磨损性能的影响[J]. *功能材料*, 2012, 43(5): 614-617.
Hu Z D, Yan H, Wang X M, et al. Effect of thixotropy on tribological properties of magnetorheological fluid[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(5): 614-617.(in Chinese)
- [12] 胡志德, 晏华, 包河彬, 等. 触变剂对矿物油基磁流变液摩擦磨损性能的影响[C]//2011中国功能材料科技与产业高层论坛论文集. 美国科研出版社, 2011.
Hu Z D, Yan H, Bao H B, et al. Effect of thixotropy on tribological properties of mineral oil-based magnetorheological fluid[C]//Proceedings of 2011 China Functional Materials Technology and Industry Forum (CFMTIF 2011). Scientific Research Publishing, 2011.(in Chinese)
- [13] 杨健健, 晏华, 王雪梅, 等. 不同粒径 SiO₂ 粒子对磁流变液性能的影响[J]. *功能材料*, 2014, 45(4):4095-4099.
Yang J J, Yan H, Wang X M, et al. The effect of SiO₂ particle size on the performance of magnetorheological fluids[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(4): 4095-4099.(in Chinese)
- [14] Sohn J W, Choi S B, Lee C H, et al. Wear characteristics of magnetorheological fluid under boundary lubrication[J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 79/80/81/82: 83-86.
- [15] Zhang P, Lee K H, Lee C H. Friction behavior of magnetorheological fluids with different material types and magnetic field strength [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(1): 84-90.
- [16] Zhang P, Lee K H, Lee C H. Friction characteristics of magneto-rheological fluid on DLC- and PTFE-coated surfaces[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017, 231(8): 1007-1015.
- [17] 陈凯峰. 带有自保护和散热的磁流变电梯制动装置研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
Chen K F. Research on magnetorheological elevator brake device with self-protection and heat dissipation[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.(in Chinese)
- [18] 何济洲, 缪贵玲. 两个磁偶极子间的相互作用[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 1996, 18(3):96-98.
He J Z, Miao G L. The interaction between two magnetic dipoles[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 1996, 18(3):96-98.(in Chinese)
- [19] 方生, 张培强. 旋转磁场作用下磁流变液颗粒运动及结构演化的模拟[J]. *化学物理学报*, 2001(5): 562-566.
Fang S, Zhang P Q. Simulation of the structure and the dynamics of the particles of MR fluids in rotating magnetic fields[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2001(5): 562-566.(in Chinese)
- [20] Peng X, Li H. Analysis of the magnetomechanical behavior of MRFs based on micromechanics incorporating a statistical approach[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(6): 2477-2485.
- [21] 田祖织. 磁流变液及其传动技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
Tian Z Z. Research on magnetorheological fluids and transmission technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.(in Chinese)