电场影响铁磁流体摩擦系数的试验研究[1)]

朱润生 张建斌 王之珊
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院)

摘 要 通过试验研究了处于边界润滑状态下钢-钢摩擦副在铁磁流体及加有添加剂的铁磁流体中的摩擦特性,特别是在电场作用下摩擦系数的变化情况. 在销-盘试验机上进行的试验表明:加有添加剂的铁磁流体在不同方向的直流电流作用下,其摩擦系数变化的幅度最大可达到 23 %. 因此得到了一种在边界润滑状态下摩擦系数可控的新型润滑介质. 这样就可能通过外加电场的手段实现摩擦系数的主动控制,达到减摩、节能的目的.

关键词 铁磁流体; 摩擦系数; 电场; 边界润滑
分类号 TH 117.1

外加电场能够显著地影响特定条件下处于干摩擦或边界润滑状态下的滑动摩擦系数,人们很早就注意到了这一现象[1,2]. 国内外一些学者对这一问题进行了较为细致的研究[2~10]. 山本好夫、翟文杰等进行了干接触金属摩擦副的自生电势以及外加抵销自生电势的电压使摩擦系数降低的试验研究[2~5]. 而木村好次等研究了作为新型润滑剂的向列相液晶在电场作用下摩擦系数降低 25 % 的有趣现象[9]. 从事这方面研究的意义在于:由试验而总结出的电场改变摩擦系数的作用机理能够从一个侧面反映摩擦的本质,并通过外加电场等手段来改变摩擦系数,达到减摩、控制阻尼和稳定摩擦系数的目的.

在边界润滑状态下,由于摩擦问题所特有的复杂性以及缺乏现成的摩擦可控的润滑材料,研究外加电场改变摩擦系数的文献很少. 本文对电场作用下边界润滑状态下的滑动摩擦特性进行了试验研究,获得了一些有价值的结论,并得到了迄今为止较为理想的摩擦可控的润滑材料.

1 试验装置与测试原理

试验装置与测试原理见图 1.

试验在自制的可加直流或交流电场的销-盘式摩擦磨损试验机上进行. 该试验机可实现 0.04 ~24 m/s 的线速度,施加的垂直载荷 0~200 N;摩擦力测量范围 0~24 N;分辨率 0.009 8 N. 摩擦副的接触形式可为面接触和点接触,本试验中采用

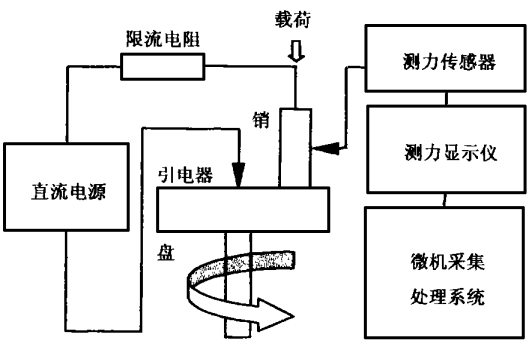


图 1 试验装置与测试原理图

面接触形式. 根据本研究的特殊要求,设计研制了与试验相配的电路,通过接触良好的引电器在销和盘之间可分别施加交、直流电压以及交、直流电流. 当销子的摩擦表面没有绝缘层时,摩擦副间可施加正反两方向 0~2 A 大小的直流电流和各种波形、大小的交流电流;当销子表面喷涂绝缘层后摩擦副间可施加正反两方向的直流电压或各种波形的交流电压.

试验中用微机数据采集系统采集由测力传感器测得的摩擦力数据,采样时间 5 s,采样间隔 60 s. 采集后的数据经过处理可得到摩擦系数及其受电场作用后的变化量等信息.

2 试验用润滑剂及试件

本文研究了润滑情况下直流电流对摩擦系数的影响. 试验中采用的润滑剂和添加剂见表 1.

试验中采用的销和盘的材料均为 GCr15 轴承

收稿日期: 1998-05-18 第一作者 男 35 岁 博士生 100083 北京
1) 国家自然科学基金(59675030)资助项目

钢,表面硬度为 HRC58;初始表面粗糙度 R_a = 0.01μm. 具体尺寸见图2. 两表面用3.5μm的氧化铝研磨剂进行研磨,加工完毕后用洁净的毡布抛光,并用丙酮仔细清洗,以最大限度地除去表面杂质.

表 1 试验所用润滑材料及其基本性能

润滑介质	饱和磁化强度 /(10^3A/m)	动力粘度 /(Pa·s)	密度 /(10^3kg/m^3)
BH-1 铁磁流体	35.5(25 ℃)	0.02(25 ℃)	1.11(25 ℃)
MT-10 添加剂	—	0.22(25 ℃)	1.06(15.6 ℃)

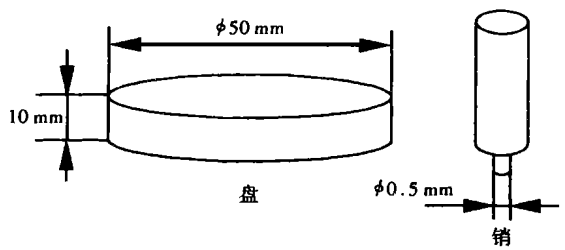
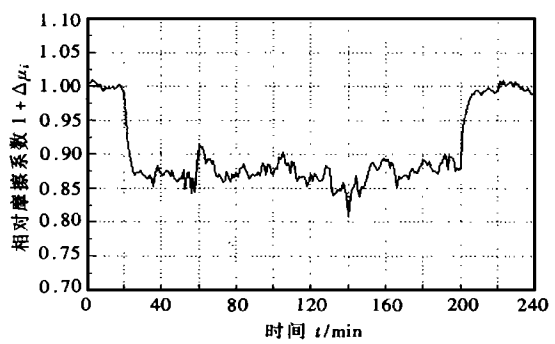


图 2 试验所用试件

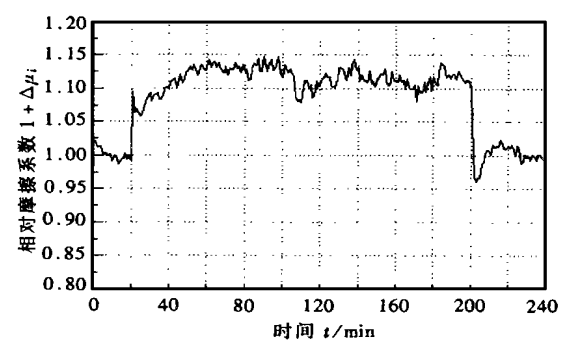
3 试验结果与讨论

铁磁流体广泛应用于动、静态密封和流体润滑等方面. 但在外加电场作用下的摩擦特性研究目前尚未见到研究报道. BH-1 型铁磁流体用于边界润滑时效果并不理想,其摩擦系数在 0.17 左右,这与其基液的粘度过低有关,但外加电流对其摩擦系数的影响不仅比其它流体明显而且其变化的规律性较强,特别是加入添加剂 MT-10 之后,其效果更强.

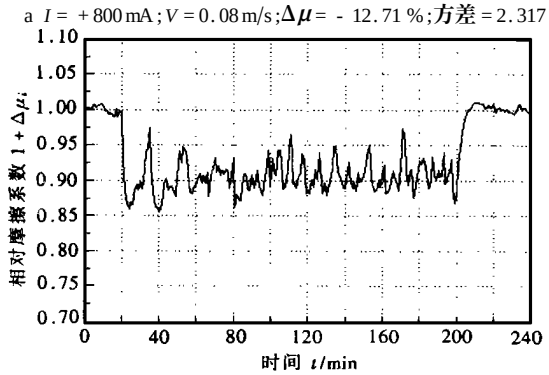
典型的试验结果如图3所示. 试验条件为:面



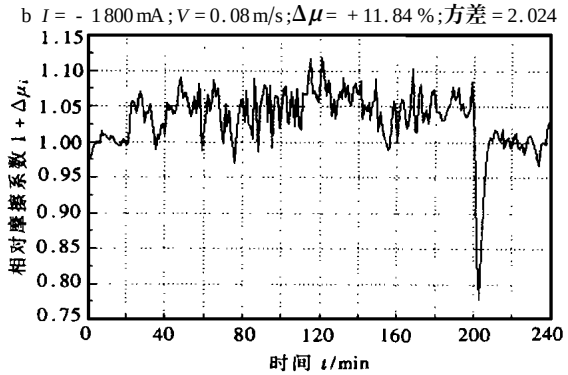
a I = +800 mA; V = 0.08 m/s; $\Delta\mu$ = -12.71 %; 方差 = 2.317



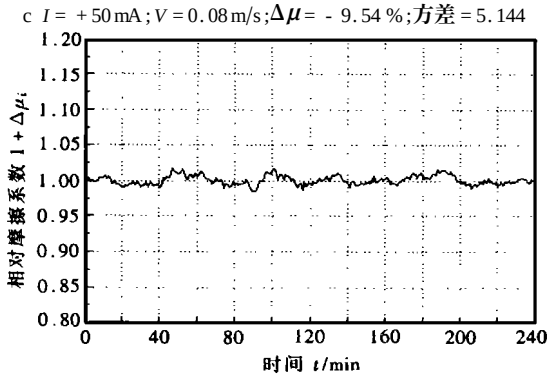
b I = -1800 mA; V = 0.08 m/s; $\Delta\mu$ = +11.84 %; 方差 = 2.024



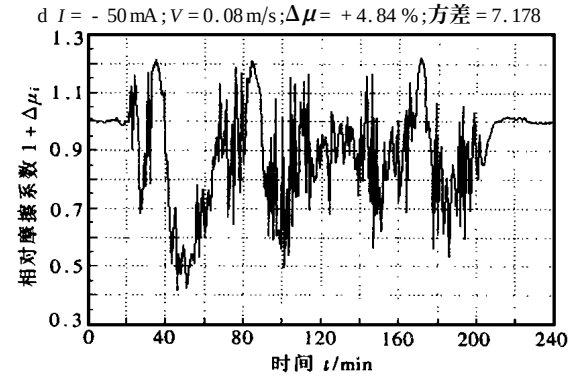
c I = +50 mA; V = 0.08 m/s; $\Delta\mu$ = -9.54 %; 方差 = 5.144



d I = -50 mA; V = 0.08 m/s; $\Delta\mu$ = +4.84 %; 方差 = 7.178



e I = 0 mA; V = 0.057 m/s; $\Delta\mu$ = +0.18 %; 方差 = 0.520



f I = -10 mA; V = 0.057 m/s; $\Delta\mu$ = -13.15 %; 方差 = 408.420

图 3 加入 7 %MT-10 的 BH-1 型铁磁流体在电场作用下摩擦系数发生的变化

接触;载荷为 4.9 N;压力为 24.96 MPa;线速度 0.057 m/s或 0.08 m/s;室温 20～23.5 ℃.

每次试验时先运转 20 min,以获得稳定的初始值,然后施加电流运转 180 min,最后断开电流再运转 20 min,这样完成一个试验循环共需 220 min,计算机共采集 220 个摩擦力数据.设开始的 20 min 测得的摩擦力的平均值为 F_m,第 i min 测得的摩擦力为 F_i $(1 \leq i \leq 220)$,则这时摩擦系数的变化率 $\Delta\mu_i$ 为

$$\Delta\mu_i = \frac{F_i - F_m}{F_m} \times 100\ \%$$

设施加电流后第 k min 摩擦力的数值基本上保持稳定$(1 \leq k \leq 180$,经大量试验发现 k 取 3～8 较合适),则该次试验循环摩擦系数的平均变化率 $\Delta\mu$ 为

$$\Delta\mu = \frac{\sum_{i=k+20}^{200} \Delta\mu_i}{180 - k}$$

对于一组特定的试验条件(确定的添加剂浓度、电流强度和电流方向、线速度、载荷等),进行 4 个试验循环,取其平均值作为该条件下摩擦系数的平均变化率 $\Delta\mu_m$.

在图 3 中纵坐标表示相对摩擦系数 $1 + \Delta\mu_i$.从试验结果得出的总的规律是:没有电流作用时,摩擦系数自始至终保持恒定,见图 3e;当施加正向电流(处于固定状态的销子接正极,旋转的盘接负极)时,摩擦系数总是有规律地减小,见图 3a;施加反向电流时,摩擦系数总是有规律地增大,见图 3b.不论施加电流方向如何,摩擦系数都能够较快地变化到一个稳定的值,去掉电流后又都能在较短的时间内基本恢复到初始值.摩擦系数的平均变化率 $\Delta\mu_m$ 与添加剂 MT-10 的质量分数、电流强度和方向、线速度以及载荷的大小等因素有关.

从图 4 可以看出 2 种不同滑动线速度时电流强度对摩擦系数变化率的影响.在正电流作用下,随电流强度从小变大,摩擦系数降低的幅度 $\Delta\mu_m$ 也不断增大.在小电流作用下,摩擦系数不很稳定,典型情况如图 3c 所示,此时 $\Delta\mu$ 的方差比较大,一般都大于 4.电流为 1 A 左右时,$\Delta\mu_m$ 达到其最大值 - 12.5 %左右,这种情况下数值稳定,方差一般小于 4.电流强度继续增大,摩擦系数降低幅度反而减小,由图 4 可清楚地看出这一趋势.负电流作用时,摩擦系数总是增大,但同样数值的电流强度摩擦系数的变化率不如正电流那么大,$\Delta\mu_m$ 的最大值为 + 10 %.小的负电流同样引起摩擦系数的不稳定,而且其波动程度比正向电流更大,如图 3c 和图 3d 所示,电流为 + 50 mA 时,$\Delta\mu$ 的方差为5.144,而电流为 - 50 mA 时,方差为 7.178.电流过小,比如 10 mA,则 $\Delta\mu$ 极不稳定,典型情况如图 3f 所示,这时 $\Delta\mu$ 的方差大于 400.线速度提高后,正电流作用下 $\Delta\mu_m$ 的变化不大,负电流时 $\Delta\mu_m$ 增大,说明提高线速度有加强负电流对摩擦系数影响的作用.

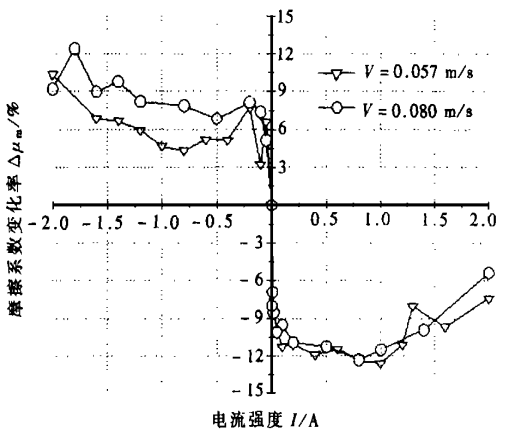


图 4　含 7 %MT-10 的 BH-1 铁磁流体的摩擦系数变化率 $\Delta\mu_m$ 与施加电流 I 的关系

4　结　论

从目前研究结果看 BH-1 型铁磁流体作为摩擦可控的润滑剂显示了突出的特点,其作用机理有待于进一步深入探讨.由目前的试验结果可得出如下结论:

1) 外加直流电流可使 BH-1 型铁磁流体的摩擦系数发生变化,特别是加入添加剂后效果更加明显.

2) 在外加电场作用下,含 7 %MT-10 的 BH-1 型铁磁流体其摩擦系数的变化趋势很有规律:正向电流使摩擦系数减小 5 %～13 %,负向电流使摩擦系数增大 5 %～10 %,而不加电流时摩擦系数无任何变化.

3) 由试验数据可以看出,在需要主动控制摩擦的场合,采用改变施加电流方向的方法可以使摩擦系数的变化率最大达到 23 %.这表明了用电控的方法改变机械运动副的摩擦是有应用前景的.

致谢　本文工作是在导师池长青教授具体指导下完成的,在此对他表示诚挚的感谢.

参 考 文 献

1 波斯特尼柯夫著. 摩擦和切削及润滑中的电物理和电化学现象. 张慈定译. 北京:国防工业出版社,1983

2 山本好夫,岩井邦昭. リングロツド型式乾燥摩耗における摩耗特性と诱起电压の关系:轴受钢とSUJ2と机械构造用钢S45Cの场合. Pureitingu to Kotingu,1989,9(1):26～31

3 翟文杰,陈仁际,齐毓霖. 用外加电压控制摩擦力的机理与技术 Ⅰ. 摩擦自生电势与摩擦力的相关性研究. 摩擦学学报,1996,16(1):1～5

4 翟文杰,陈仁际,齐毓霖. 用外加电压控制摩擦力的机理与技术 Ⅱ. 外加电压对摩擦力影响的研究. 摩擦学学报,1996,16(3):235～238

5 Csapo E, Zaidi H, Paulmier D. Influence of the electrical current on the graphite surface in an electrical sliding contact. Surface and Coatings Technology,1995,76-77(1～3): 421～424

6 山本雄二,八木纯一,日垣秀彦. 外加电场对摩擦磨损的影响. 日本机械学会论文集(C编),1991,57(540):2734～2739

7 Tung S C, Wang S S. In-situ electro-charging for friction reduction and wear resistant film formation. Tribo Trans,1991,34(4):479～488

8 Lavielle L. Electric field effect on the friction of a polyethylene-terpolymer film on a steel substrate. Wear,1994,176(1):89～93

9 Kimura Y, Nakano K, Kato T. Control of friction coefficient by applying electric fields across liquid crystal boundary films. Wear,1994,175(1-2):143～149

10 Zhu Y Y, Kelsall G H, Spikes H A. The influence of electrochemical potentials on the friction and wear of iron and iron oxides in aqueous system. Tribo Trans,1994,37(4):811～819

Experimental Investigation on Friction Coefficient of Ferromagnetic Flow with Applied Electric Fields

Zhu Runsheng Zhang Jianbin Wang Zhishan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Mechanical Engineering and Automation)

Abstract The frictional performance of steel-on-steel frictional pair under boundary lubrication with ferromagnetic flow added with additive and their friction coefficient by the action of applied electric fields are studied. The experimental results from the pin-on-disk tester show that the friction coefficient of ferromagnetic flow added with an additive can be changed by 23 percent by the action of oppositely directed applied direct currents, so a new type of lubricating agent with controllable friction coefficient under boundary lubrication is obtained. It is possible to control friction coefficient actively with applied electric fields in order to reduce friction and energy loss.

Key words ferromagnetic flow; friction coefficient; electric fields; boundary lubrication