

一种新型摩擦材料在水润滑下的摩擦学性能研究

周子涵,何福善,郑开魁,高诚辉,林有希,江威

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

摘要:采用环块式摩擦磨损实验研究了一种新型摩擦材料在水润滑状态下不同载荷与转速对试样摩擦学性能的影响,并对比干摩擦条件下的摩擦学性能变化,借助磨损表面形貌观察分析其磨损机理。实验结果表明:水润滑条件下,摩擦系数随着载荷的增大而减小,随着转速的提高先增加后减小;磨损率随着载荷与转速的提高都减小。相同载荷与转速下,干摩擦时磨损机理以磨粒磨损和黏着磨损为主,而水润滑条件下水形成边界润滑,磨损机理以磨粒磨损和轻微的黏着磨损为主;水润滑条件下摩擦系数和磨损率均低于干摩擦,主要是由于水起到了润滑和冷却的作用,阻止了转移膜的形成,并在材料表面形成水膜起到了边界润滑的作用。

关键词:水润滑;摩擦材料;摩擦学性能;稀土

中图分类号:TH117.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)01-0004-04

Tribological Properties of New Friction Material Under Water Lubrication

ZHOU Zihan, HE Fushan, ZHENG Kaikui, GAO Chenghui, LIN Youxi, JIANG Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In this paper, the effects of different loads and rotation speeds on the tribological performance of a new type of friction material under water lubrication conditions are studied by ring-block friction and wear tests, and the tribological performance is compared with one under the dry-friction conditions. The wear mechanism is analyzed and observed by the wear surface morphology. The experimental results show that under the condition of water lubrication, the friction coefficient decreases with the increase of the load, and increases first and then decreases with the increase of the rotational speed; the wear rate decreases with the increase of the load and the rotational speed. Under the same load and speed, the wear mechanism of the dry friction is mainly abrasive wear and adhesive wear, while the boundary lubrication is formed under the water lubrication conditions. The wear mechanism is mainly abrasive wear and slight adhesive wear; the friction coefficient and the wear rate under water lubrication condition are lower than ones under the dry friction. It is mainly because of the action the water which is used as lubrication and cooling, thus preventing the formation of the transfer film and forming a water film on the surface of the material to function as a boundary lubrication.

Keywords: water lubrication; friction composite; tribological performance; rare earth

0 引言

摩擦材料广泛应用于交通运输设备和工业设备的制动系统。制动系统应具有较好的安全性、智能性、环保性以及机械设备的操作舒适性^[1]。为达到以上要求,摩擦材料应具有适当大小且稳定的摩擦系数、良好的导热性、耐热性和耐磨性。在特殊工况下工作时,摩擦材料应对水、油或制动液的吸收性差^[2]。据统计,全国每年发生的交通事故有三成是因刹车失灵造成的。雨雪天气导致刹车片湿滑,高速公路连续长下坡、大车重载超载等导致刹车片过热,都是导致刹车失灵的主要原因。因此有必要研究水润滑状态下载荷、转速对摩擦材料的摩擦学性能影响。葛毅成等^[3]研究了不同载荷下干摩擦和水润滑状态对C/C复合材料摩擦磨损特性的影响。El-Tayeb等^[4-5]研究了不同载荷下水喷雾对刹车片材料的摩擦磨损性能

影响。贾均红等^[6]研究了不同载荷下碳纤维增强聚醚醚酮复合材料在水润滑下的摩擦学行为。韩晓明等^[7]通过湿润模拟雨雪天气,研究了不同速度下水分对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响。BLAU等^[8]对速度对商业卡车盘式制动摩擦材料的性能影响作了实验性研究。这些研究都表明转速、载荷、干摩擦或是水润滑都对复合材料的摩擦学性能有影响。

稀土化合物作为高温润滑剂、抗磨涂层添加剂添加到材料中,能够很好地改善高温摩擦磨损性能。课题组前期研究了稀土溶液改性竹纤维对制动材料力学与摩擦学性能的影响,发现经稀土溶液的改性提高了竹纤维与树脂基体的界面黏结性和竹纤维的耐热性能,从而改善竹纤维增强材料的硬度、冲击强度、高温摩擦系数及其稳定性^[9];还研究了稀土化合物改性树脂基体对制动材料摩擦学性能的影响,发现稀土化合物的加入提高了制动材料的摩擦因数,减小制动材料对载荷和转速的敏感性,起到了稳定

基金项目:自然科学基金资助项目(51875106)

第一作者简介:周子涵(1992—),男,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为摩擦学。

摩擦因数的作用;稀土的加入还使树脂与其他填料更牢固地黏合在一起,使材料黏着磨损得到有效抑制,改善了材料表面的磨损状况^[10]。在此基础上,本实验采用模拟实验方法研究水润滑条件下制动载荷、转速对稀土改性摩擦材料摩擦学性能的影响规律,对比了干摩擦条件下材料的摩擦磨损行为,并分析其机理。

1 实验材料与方法

本试验选择制动摩擦材料配方(质量分数)为:14%的稀土氧化物、18%的改性树脂、14%的增强纤维、54%的摩擦性能调节剂。将称重后的复合材料倒入 JF810S 型混料机中充分搅拌均匀。利用 Y32-63 四柱液压机进行热压成型,热压成型温度为 160℃~200℃,压力为 8 MPa~10 MPa,保压 5 min~10 min。在 JF980S 型热处理箱内进行热处理,在 30 min 内升温至 100℃~200℃,保温 12 h 后随炉冷却。采用 MMS-2A 微机控制摩擦试验机进行环块式摩擦性能测试。试样尺寸为 6 mm×7 mm×30 mm 的长方体,对偶件为材质 HT250 的圆环,实验条件:滑动速度为 300 r/min~500 r/min,载荷为 200 N~400 N。实验开始前先磨合 5 min,再进行试验测试,实验时间为 100 min。以每分钟 60~70 滴的速度滴注蒸馏水到对偶环上实现水润滑。滑动接触摩擦副的示意图如图 1 所示。

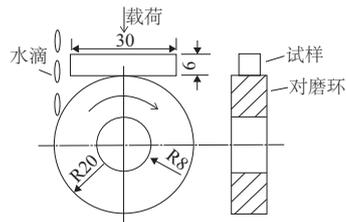


图1 滑动接触摩擦副的示意图

具体磨损率计算参考文献[11],对每个样本进行了3次重复测试以尽量减少误差。本实验采用 Phenom Pro 台式扫描电子显微镜观察试样表面磨损形貌。

2 结果与讨论

2.1 水润滑条件下载荷与转速对摩擦学性能影响

分别以载荷和转速作为单因素实验变量,实验得出水润滑条件下摩擦系数随载荷和转速的变化如图2所示。

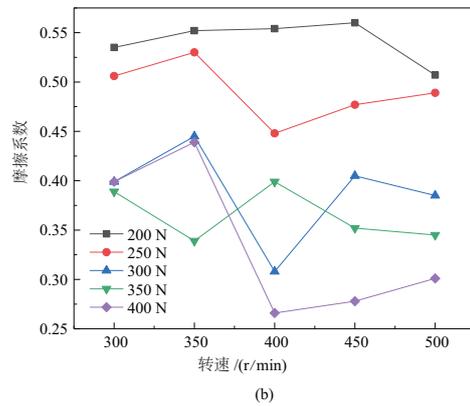
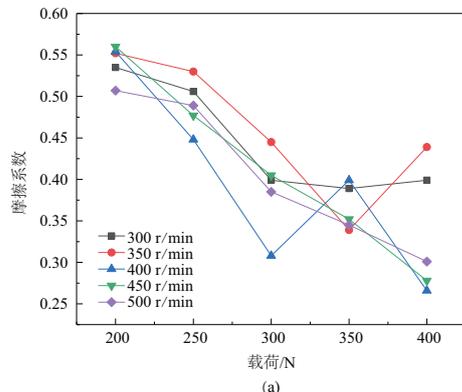


图2 水润滑状态下载荷、转速对摩擦系数的影响

由图2(a)可以看出,随着载荷增大,摩擦系数普遍呈下降的趋势。载荷在 200 N~300 N 时,随着载荷的增加摩擦系数有明显下降。载荷在 300 N~400 N 时,转速为 400 r/min 和 350 r/min 的试样摩擦系数上下波动,转速为 300 r/min、450 r/min、500 r/min 的试样摩擦系数降低趋势减缓。这是因为载荷增大导致温度升高使材料产生了热衰退。由图2(b)可以看出,水润滑条件下,载荷为 200 N、250 N、350 N 时,转速对摩擦系数没有明显的影响。载荷为 300 N 和 400 N 时,摩擦系数随着转速的增大上下波动。

分别以载荷和转速作为单因素实验变量实验得出水润滑条件下磨损率随载荷和转速的变化如图3所示。

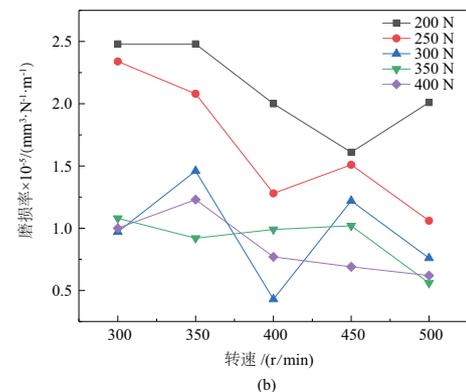
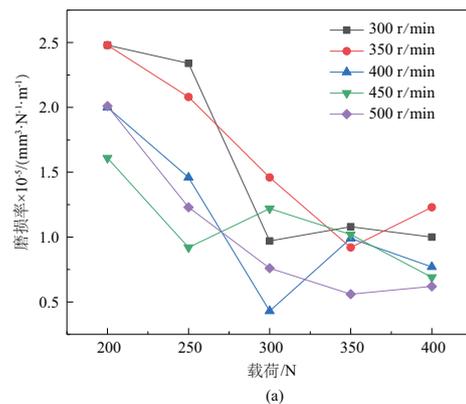


图3 水润滑状态下载荷、转速对磨损率的影响

由图3(a)可以看出,试样磨损率随着载荷的增大整体呈现下降趋势,尤其在载荷 200 N~300 N 之间,试样磨

损率波动较大。载荷为 300 N~400 N, 试样磨损率波动无明显规律, 波动幅度较小。由图 3(b) 可以看出, 随着转速增大, 磨损率整体呈下降的趋势。载荷为 200 N、250 N、300 N 的试样磨损率波动幅度较大, 载荷为 350 N 和 400 N 的试样随着转速增大, 磨损率波动较小。

2.2 磨损机制分析

选取 200 N + 300 r/min、400 N + 300 r/min 和 200 N + 500 r/min 3 组试样对比不同载荷与转速下水润滑条件下摩擦磨损行为, 其磨损表面形貌 SEM 如图 4 所示。上方为 200 倍表面形貌图, 下方为 2000 倍背散射图。

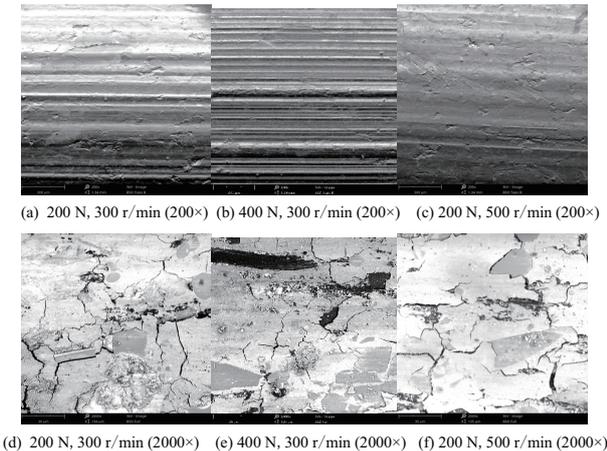


图 4 水润滑条件下不同载荷, 不同转速磨损试验后的试样 SEM 图

由图 4(a) 可以看出, 载荷低时表面犁削磨损程度低, 这主要是因为试样摩擦表面与对偶环真实接触面积少。由图 4(b) 可以看出, 载荷增加至 400 N 时犁沟的深度和密度增加, 这主要因为试样与对偶环接触面积增加, 加剧了犁削磨损和磨粒磨损。对比图 4(d)、图 4(e) 可以看出高载荷下出现了明显的黏着剥落。剥落的磨屑在摩擦表面形成膜, 减少试样与水和对偶环的接触面积, 所以水在对磨过程中对试样表面裂纹的挤压减少, 降低了疲劳剥落导致摩擦系数磨损率下降。

由图 4(a)、图 4(c) 分析比较可以看出, 低载荷下转速提高, 使得表面更为光滑, 犁沟减少深度变浅。虽然转速使表面温度升高, 但是水有降温的作用, 并且由于转速的提高, 水在试样表面与对偶环之间形成了更稳定的水膜^[12] 造成边界润滑, 故摩擦系数磨损率降低。由图 4(d)、图 4(f) 可以看出, 高转速下试样表面裂纹减少, 磨粒磨损和疲劳剥落都减轻了。

2.3 材料在水润滑和干摩擦条件下摩擦性能测试对比实验

取载荷 400 N 转速 300 r/min 干摩擦和水润滑实验数据进行对比, 进一步分析水润滑条件下摩擦学行为特点, 其实验结果如表 1 所示。由表 1 可知, 试样在水润滑状态下摩擦系数为 0.399, 低于干摩擦状态下 0.51, 这是因为试样表面形成了水膜, 起到了边界润滑的作用^[13]。水润滑状态下试样的磨损率为 $1.00 \times 10^{-5} (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$, 也

明显低于干摩擦下 $2.91 \times 10^{-5} (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$, 这是因为水可以起到润滑和冷却的作用, 降低试样表面温度, 减轻试样表面因高温引起的塑性变形和剥落^[14-15]。

表 1 干摩擦和水润滑下的摩擦系数和磨损率 (400 N, 300 r/min)

润滑条件	摩擦系数 μ	磨损率 $\times 10^{-5} / (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
干摩擦	0.510	2.91
水润滑	0.399	1.00

图 5 所示为试样在 400 N 载荷和 300 r/min 转速下在干摩擦和水润滑条件下磨损后的 SEM 图。上方为 200 倍表面形貌图, 下方为 2000 倍背散射图。

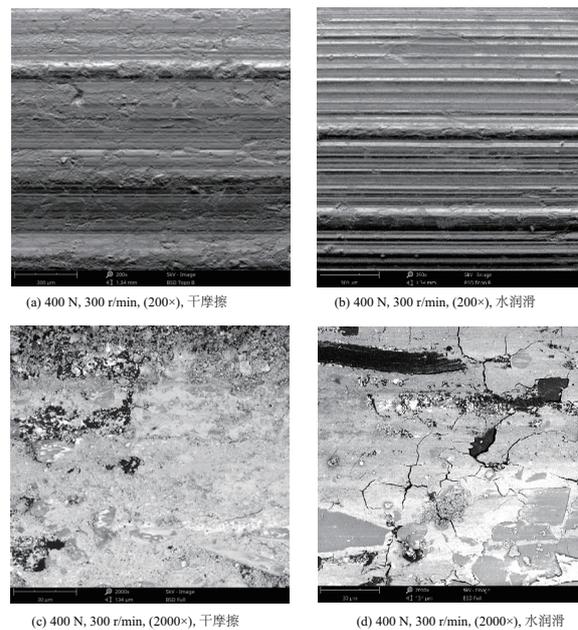


图 5 相同工况条件 (400 N, 300 r/min) 干摩擦和水润滑的 SEM 图

由图 5(a)、图 5(b) 对比分析可以看出, 干摩擦条件下试样表面较为平滑, 仅有轻微的犁沟形成。水润滑条件下的试样划痕密度较大, 犁沟较深, 犁削作用明显。但表面较为平整, 凹坑较少。无论干摩擦还是水润滑条件下表面都较为平整, 结合课题组前期研究可以认为经稀土化合物改性过的竹纤维和树脂基体在干摩擦和水润滑条件下都有较好的界面结合性。由图 5(c) 可以看出, 干摩擦条件下的试样表面粗糙, 出现了局部的磨料剥落, 并且剥落的颗粒被挤压形成塑性流动与对偶环表面转移形成转移膜, 产生了黏着磨损, 导致摩擦系数较高且试样磨损率较大。由图 5(d) 可以看出水润滑条件下试样表面平整, 但可能受水的冲刷出现了龟裂。由于水带走了一部分颗粒, 所以表面磨粒较少, 塑性流动减轻, 因此摩擦系数相对较低。试样的磨损率降低一方面是由于水渗入表面的龟裂或空洞内, 以其静压作用破坏了表面膜, 阻断了转移膜的形成; 另外一方面, 水的冷却作用也减小了试样因摩擦热产生的塑性流动和黏着以及水膜形成边界润滑阻断了转

移膜的形成。结合图 5(c)、图 5(d)可以看出,稀土改性试样磨损表面虽然出现了黏着剥落,但面积都较小,即使水润滑条件下出现了裂纹但也并未导致基体过多的剥落,可以推测在水润滑条件下稀土化合物的作用与在干摩擦条件下相同,都起到了提高竹纤维和基体的界面结合性以及抑制材料黏着剥落的作用。

3 结语

1) 水润滑条件下,稀土改性摩擦材料随着载荷增大,摩擦系数和磨损率普遍呈下降的趋势。这主要是由于载荷增加并促进试样与对偶环接触表面稳定摩擦膜的形成,减少了水在对磨过程中对试样表面裂纹的挤压,降低了疲劳剥落导致摩擦系数和磨损率下降;随着转速的增大,摩擦系数没有明显变化,但磨损率整体上呈下降的趋势。这主要是由于转速的增加试样表面形成稳定的水膜造成边界润滑,试样表面裂纹减少磨粒磨损和疲劳剥落都减轻,所以磨损率有所降低。

2) 与干摩擦相比,摩擦材料在水润滑状态下摩擦系数与磨损率都出现了较大的降低。这主要是由于水起到了冲刷和冷却的作用,阻止了转移膜的形成,并在材料表面形成水膜起到了边界润滑的作用。稀土化合物的加入使摩擦材料在水润滑和干摩擦条件下表面都较平整,黏着剥落较少,起到了提高竹纤维和基体的界面结合性及抑制材料黏着剥落的作用。

参考文献:

- [1] XIAO X, YIN Y, BAO J, et al. Review on the friction and wear of brake materials [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(5):1-10.
- [2] CHAN D, STACHOWIAK G W. Review of automotive brake friction materials[J]. *Proc IMechE, Part D, Automobile Engineering*, 2004, 218(9): 953-966.
- [3] 葛毅成,易茂中,黄伯云,等. 润滑状态对 C/C 复合材料摩擦磨损特性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(8): 1405-1409.
- [4] El-Tayeb N S M, LIEW K W. Effect of water spray on friction and wear behaviour of noncommercial and commercial brake pad materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208:135-144.
- [5] El-Tayeb N S M, LIEW K W. On the dry and wet sliding performance of potentially new frictional brake pad materials for automotive industry [J]. *Wear*, 2009, 266:275-287.
- [6] 贾均红,陈建敏,周惠娣,等. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料在水润滑下的摩擦学行为 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2005, 21(2):208-212.
- [7] 韩晓明,高飞,宋宝楹,等. 水分对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响 [J]. *大连交通大学学报*, 2010, 31(2):38-40.
- [8] BLAU P J, MCLAUGHLIN J C. Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake materials [J]. *Tribology International*, 2003, 36:709-715.
- [9] 郑开魁,高诚辉,何福善,等. 稀土溶液改性对竹纤维增强制动材料力学与摩擦学性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(8):147-154.
- [10] 林娇,高诚辉,郑开魁,等. 稀土增强树脂基摩擦材料的摩擦磨损性能研究 [J]. *润滑与密封*, 2018, 43(4): 53-56.
- [11] PENG C, WANG T, WANG Q. Sensitivity of friction materials to load and speed under dry sliding and water lubricated conditions [J]. *Tribology Transactions*, 2015(2):1-31.
- [12] GER M D, HOU K H, WANG L M, et al. The friction and wear of Ni-P-PTFE composite deposits under water lubrication [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, 77:755-764.
- [13] WU J, CHENG X H. The tribological properties of kevlar pulp reinforced epoxy composites under dry sliding and water lubricated condition [J]. *Wear*, 2006, 261:1293-1297.
- [14] JIA Junhong, CHEN Jianmin, ZHOU Huidi, et al. Comparative investigation on the wear and transfer behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites under dry sliding and water lubrication [J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65: 1139-1147.
- [15] JIA J H, ZHOU H D, GAO S Q, et al. A comparative investigation of the friction and wear behavior of polyimide composite under dry sliding and water-lubricated condition [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 356:48-53.

收稿日期:2019-02-22