

纳米坡缕石润滑油添加剂对灰铸铁 HT200 摩擦磨损性能的影响

Influence of Nano-palygorskite Lubricant Additive on Friction and Wear Properties of HT200 Friction Components

杨 绿, 周元康, 李 屹, 朱湘宁, 张勇杰
(贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550003)

YANG Lu, ZHOU Yuan-kang, LI Yi, ZHU Xiang-ning, ZHANG Yong-jie
(College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

摘要: 制备坡缕石纳米粒子添加到 150N 基础油的润滑油体系, 在 MMU-10G 摩擦磨损试验机上分别对该纳米粒子润滑油体系和纯 150N 基础油, 在混合润滑条件下的铸铁 HT200 试样对摩时的摩擦磨损性能进行研究, 并用 SEM 和金相显微镜对磨损表面进行观察和分析, 借助 EDX 测定试样表面成分的变化, 探讨摩擦磨损性能变化的机理。结果表明: 自制备的用 KH550 硅烷偶联剂球磨修饰的坡缕石纳米粒子在基础油中分散性良好, 在该润滑剂润滑条件下对摩的试样表面生成了自修复膜层, 其磨损量明显减小, 失重量下降约 25.2%, 平均摩擦系数下降约 32.3%。

关键词: 纳米坡缕石; 润滑油添加剂; 摩擦磨损性能; 自修复

中图分类号: TH117.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)04-0094-05

Abstract: The palygorskite nanoparticles were prepared, and the palygorskite nanoparticles were mixed in base oil 150N as lubricant additive. The friction/wear properties of HT200 friction components lubricated with pure 150N base oil and the lubricant with palygorskite nanoparticles additive were investigated on the MMU-10G abrasive wear tester. The analysis of worn surfaces employed SEM and metallographic microscope. Meanwhile, the mechanism which causes the change of friction/wear properties of HT200 lubricated with different lubricants was discussed, the elemental compositions of the worn surfaces were characterized by EDX. The results show that the palygorskite nanoparticles modified with KH550 during ball milling have fine dispersing. The lubricant with nano-palygorskite additive causes the self-repairing film formation of worn surface, and the wear mass loss of HT200 friction components decreases observably as high as 25.2%, the friction coefficient declines about 32.3%.

Key words: nano-palygorskite; lubricant additive; friction and wear property; self-repairing

机械摩擦副的摩擦及其磨损将导致大量的能源损失和零部件失效, 据估计全世界大约有 1/2~1/3 的能源以各种形式消耗在摩擦上, 80% 零件损坏是由于各种形式的磨损引起的^[1]。因此, 如何减少摩擦消耗并提高机械和零件的使用寿命是摩擦学研究领域共同关心的问题之一。在 20 世纪 80 年代, 研究人员将纳米微粒作为添加剂用于油品中, 以提高机械摩擦副抗磨性和减摩性^[2]。研究表明^[3-6] 软金属及其氧化物纳米颗粒作为润滑剂添加剂可以起到减磨、抗磨和极压作用的效果。在摩擦副工作过程中, 纳米添加剂中的某些元素同金属摩擦副表面相互作用形成化学反应膜及纳米材料的沉积膜, 二者共同作用, 从而有效地改善了润滑剂的摩擦学性能^[7]。近年来, 最引人关注的润滑

添加剂是一种蛇纹石羟基硅酸镁矿物, 它作为金属磨损自修复技术(Auto-Restoration Technology of wear of metals, ART)的主体材料, 用于机械设备的摩擦副, 有明显的抗磨和原位自修复效果^[8]。国内研究人员也对蛇纹石微粉作为润滑油添加剂展开了研究^[9, 10], 但添加剂是微粉级的颗粒而非纳米材料。

坡缕石是一种羟基硅酸镁矿物, 分子式为: $Mg_5(H_2O)_4[Si_4O_{10}]_2(OH)_2$, 目前, 关于坡缕石纳米材料作为润滑油添加剂的研究报道较少。本工作针对纳米坡缕石(简称纳米 P)自修复和摩擦学性能进行了研究。考察纳米 P 作为润滑添加剂在常用的机械摩擦副材料 HT200 试样中的减摩性和耐磨性, 并对其影响机制进行了分析。

1 实验

1.1 纳米 P 材料及其润滑剂的制备

1.1.1 主要原材料、试剂及实验仪器

坡缕石: 贵州大方产出; 偶联剂: KH550 化学纯, 市售; 基础润滑油: 150N, 市售; 80-2 电动离心机; SF120 粉碎机; QM-4H 行星式球磨机; JEM-2000FX II 透射电镜; XS-HD 干燥箱。

1.1.2 纳米 P 及其润滑剂的制备过程

将坡缕石原矿, 用 SF120 粉碎机粉碎至 70 目, 按照文献[11]的方法进行离心提纯并脱水、洗涤、干燥, 经过 XRD 检测纯度可达到 96.9%^[12]。制得的坡缕石矿物粉放入 QM-4H 行星式球磨机玛瑙罐内球磨纳米化: 先干磨 40h, 再加入适量酒精和用于纳米 P 表面修饰的偶联剂 KH550, 湿磨 36h, 最后经烘干制得纳米 P 粉末^[13]。

将纳米 P 粉末添加到 150N 基础油中, 配置成质量比 2% 的润滑油体系, 经超声分散 30min 制成实验油样, 简称 PAO, 并用 TEM 观察纳米 P 的分散状况; 未添加坡缕石的纯 150N 基础油样简称 BO。

1.2 摩擦磨损实验

1.2.1 摩擦试样材料、试样尺寸及主要设备仪器

上下试样材料均为 HT200。上试样是动试样, 摩擦面为环状, 内外径分别为 $\phi 20\text{mm}$, $\phi 25.6\text{mm}$; 下试样为静试样, 圆饼状 $\phi 41\text{mm} \times 6\text{mm}$, 上下试样对摩的摩擦面原始粗糙度 $R_a 0.8$ 。采用 MMU-10G 摩擦磨损试验机; AR224CN 电子天平, 分辨率 0.1mg。

1.2.2 摩擦磨损实验过程

(1) 实验条件: 试样正压力 200N, 主轴转速 419r/min, 平均线速度为 0.561m/s, 混合润滑。摩擦实验时间 40h。上下摩擦试样工作位置如图 1 所示。

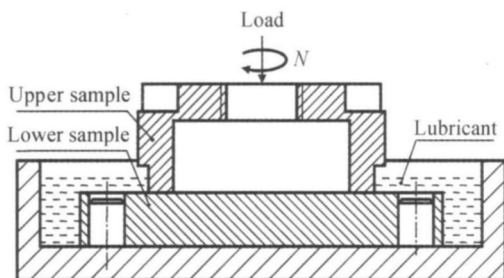


图 1 摩擦磨损测试试样工作示意图

Fig. 1 Working diagrammatic sketch of samples for friction and wear test

将 HT200 试样分为两组, 分别依次在装有 BO 和 PAO 油池中进行条件相同的摩擦磨损对比实验, 然后考察二者的减摩、抗磨和自修复性能, BO 和 PAO 中

进行的摩擦试样分别称为 B 和 PA 试样。

(2) 操作过程: 根据设备的力矩传感器连续记录摩擦系数随运行时间的变化图谱, 将每 400min 内的摩擦系数平均值作为示值点建立摩擦系数变化曲线。

每运行 5h 将 B 或 PA 下试样卸下, 用脱脂剂除油后, 用酒精超声清洗 10min, 在清洁环境下风干, 再在感量为 0.1mg 的电子天平上称量, 计算试件的失重。摩擦后, 采用 XJL-03 金相显微镜和 EPM A-1600 电子探针分别对试样宏观磨痕和微区形貌进行表征, 表面成分采用 EDX 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 纳米 P 在 150N 中的分散状态

坡缕石经过球磨纳米化后, 其颗粒尺寸完全能满足润滑油所含固相颗粒直径小于 0.5 μm 标准的要求^[2], 但纳米粒子极易团聚, 团聚颗粒尺寸往往超出该标准, 限制了纳米材料在润滑剂中的应用, 因此, 纳米粒子的表面修饰等反团聚措施十分重要。

采用球磨坡缕石纳米化过程当中加入 KH550 偶联剂, 边球磨边对粒子表面修饰的“在线修饰”方法。该 P 纳米粒子在基础油 150N 中的分散情况如图 2(a) 所示; 与传统的手工混合修饰的 P 纳米粒子(见图 2(b))相比, 分散性要好得多。

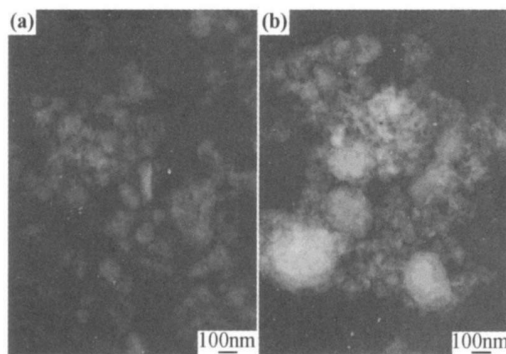


图 2 两种不同修饰方法的纳米坡缕石的分散状况

(a) 在球磨纳米化过程中修饰; (b) 手工混合搅拌修饰

Fig. 2 TEM micrographs of nanor palygorskite samples modified with different methods

(a) modified in ball milling; (b) modified by hand milling

可见, 本研究所采用的坡缕石纳米粒子“在线修饰”的方法, 可获得良好的分散效果。

2.2 试样在 BO、PAO 体系中磨损量和摩擦系数

在 BO 与 PAO 润滑下, 相对应的 B 与 PA 下试样的磨损失重量与摩擦实验时间的关系如图 3 所示。

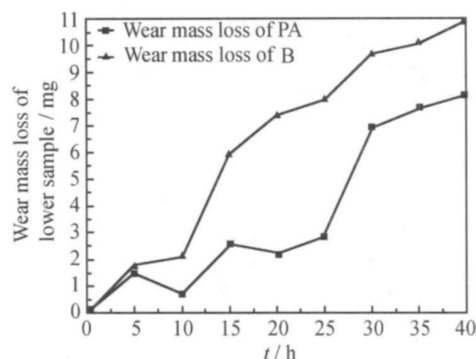


图3 下试样在不同润滑剂作用下的失重曲线

Fig. 3 Wear mass loss of lower samples with different lubricants

从图3中看出,经过40h磨损实验后,PA试样总失重为8.13mg;而B试样失重10.87mg。PA摩擦试样最终磨损失重量降低25.2%;PA试样与B试样在20h时,失重量相差最大,达到70.1%;表明PAO润滑剂显著降低了HT200摩擦副的磨损量。

图3还显示PA试样在运行25h之内的失重量及其增幅相当小,甚至出现负磨损的情况,仅在运行25~30h区间内,失重量增加较大。而B试样在运行初期15h以内磨损失重量增加很快,并一直随时间单调增加的趋势,到中后期磨损失重量稍趋于平缓。

图4为B与PA试样的摩擦系数随对摩时间的变化规律。PA试样的摩擦系数始终保持在0.044附近区域,没有明显的单调加或减的变化趋势,全区间平均值为0.044。而B试样在开始运行至1200min(20h)摩擦系数从0.091高位连续下降至0.056左右,然后保持该数值基本不变。

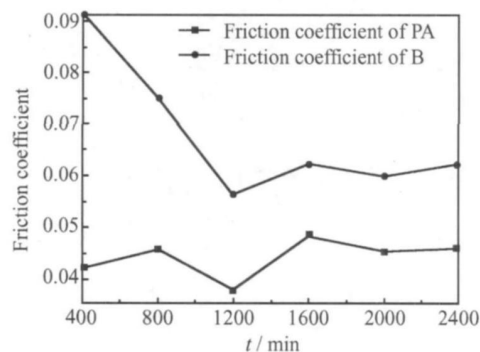


图4 摩擦系数-时间曲线

Fig. 4 Friction coefficients and time curves of PA and B

2.3 结果分析

2.3.1 磨损及其机制

图3为B试样磨损失重量随时间单调增加,在对摩的前期15h以内磨损量较大,而后期磨损量增加趋于缓和,且基本为线性变化。B试样由于没有任何自

修复的外来条件,前期主要为磨合阶段。如图5所示的原始表面粗糙峰被迅速磨去,呈现磨损率较高的“磨合阶段”特征。初磨合10h左右,试样磨合脱落的硬质点增多,使摩擦区的磨料磨损加重,导致磨损失重显著增加,之后由于粗糙峰被磨平,粗糙度下降而变光滑,如图6(a)所示,磨损率有所下降,此时处于稳定磨损阶段。比较图6可以看出,PA试样表面摩擦划痕浅于B试样,磨粒磨损相对较轻。可能是PA表面自修复层硬度较高,抵御磨粒犁沟能力增强所致。

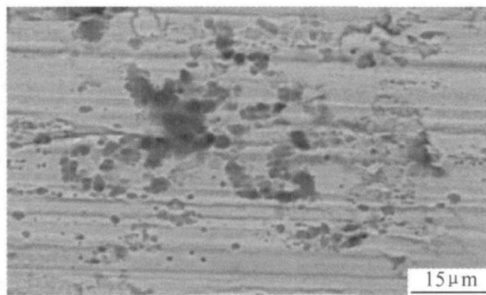


图5 HT200 原始表面形貌

Fig. 5 Primary surface of HT200 sample

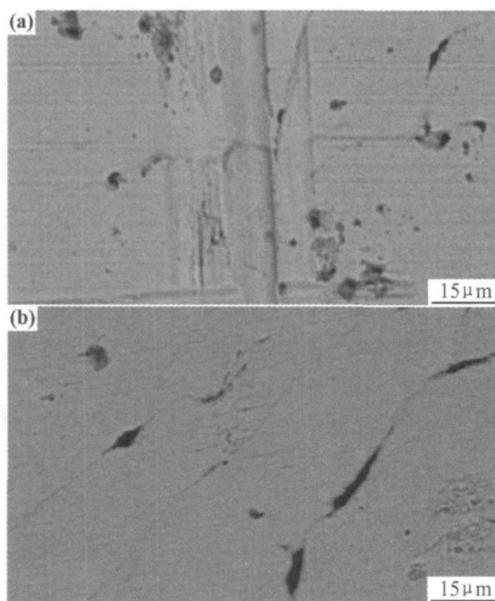


图6 B试样(a)和PA试样(b)摩擦表面SEM

Fig. 6 SEM micrographs of worn surfaces of B sample (a) and PA sample (b)

PA试样在对摩的前25h,磨损失重增量很小,这是由于PAO润滑体系中存在纳米P,其滚动效应以及对粗糙的波谷的填补和自修复膜层的逐步形成,使磨合过程的材料损失减小而造成的。甚至在某些阶段发生修复强于磨损的“负磨损”现象。但都会达到与工况相适应的最优粗糙度^[1],PA试样磨合到某阶段(25h),表面粗糙峰被磨脱落的同时使附着的自修复

层牵连脱落,形成较大的材料磨损失重量。其后进入稳定的磨损阶段,是自修复膜形成增重与磨损失重达到动态平衡的阶段,故该阶段磨损率小于无自修复能

力的 B 试样,且磨损率稳定。

图 7 为 B、PA 试样对摩终了的光学显微照片。从图 7 中可以看到 B 和 PA 试样表面尽管都存在对摩的

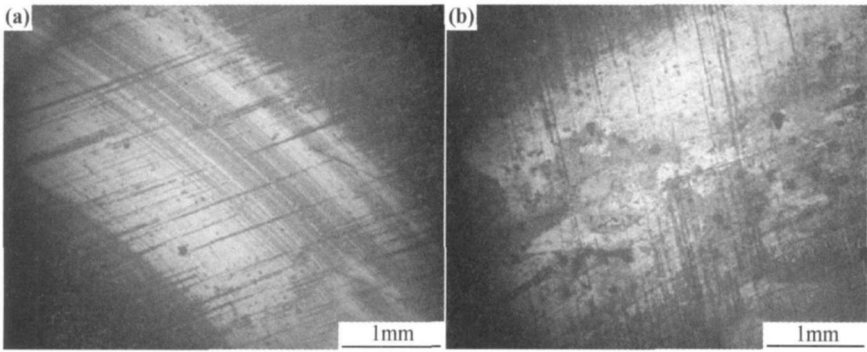


图 7 B 试样(a)与 PA 试样(b)摩擦面显微照片(40h)
Fig. 7 Worn surface micrographs of B (a) and PA sample (b) (40h)

犁沟划痕,均属于磨粒磨损类型,但摩擦表面形貌存在特征差异: B 试样:(1)摩擦方向上的对摩划痕多而密、纹路尖锐,沟痕较深;(2)与摩擦运行垂直方向的试样原始磨削纹路也非常清楚,没有任何沉积物覆盖的迹象;(3)摩擦区域与非摩擦区域之间界线清晰、尖锐,说明摩擦区域磨损较重,导致立体感强。PA 试样:摩擦运行方向的划痕较平整,说明被磨粒,硬质点犁沟较弱,磨损较轻;与摩擦运行垂直方向的原始磨削加工的痕路较模糊,且摩擦区表面呈局部的不同颜色区域,白色区是不连续的覆盖物沉积所致;另外,摩擦区与非摩擦区界线较模糊,表明界线处存在附着物。

综上所述,纳米 P 润滑剂自修复层的形成,使 HT200 的磨损得到补偿,以及自修复层的抗磨粒磨损性能高于材料本身,均对 PA 试样的耐磨性提高做出贡献。

2.3.2 表面 EDX 分析

图 8 是原始 HT200 试样, B 和 PA 试样摩擦后表面元素 EDX 分析结果。经 EDX 分析,摩擦表面元素原子分数如表 1 所示。从表 1 可以看出,原始的 HT200 试样与摩擦后 B 试样中不含 Mg 元素。摩擦运行后的 PA 试样与 B 以及原始试样对比,摩擦表面的 Si, Mg 含量提高, Fe 含量下降。这是由于 PAO 润滑剂中含有 Si, Mg 为特征元素的坡缕石纳米材料,在摩擦过程中参与了摩擦表面的复杂反应所致,也是纳米 P 参与 PA 表面自修复层生成的证据之一。由于 HT200 材料中 Si 的含量及其变动范围较大,表 1 中的 Si 含量增加尚不能严格证明属自修复所引起,但 Mg 的增加和 Fe 含量下降,充分证明了坡缕石成分与 PA 试样表面的 Fe 发生了复杂的作用形成了自修复

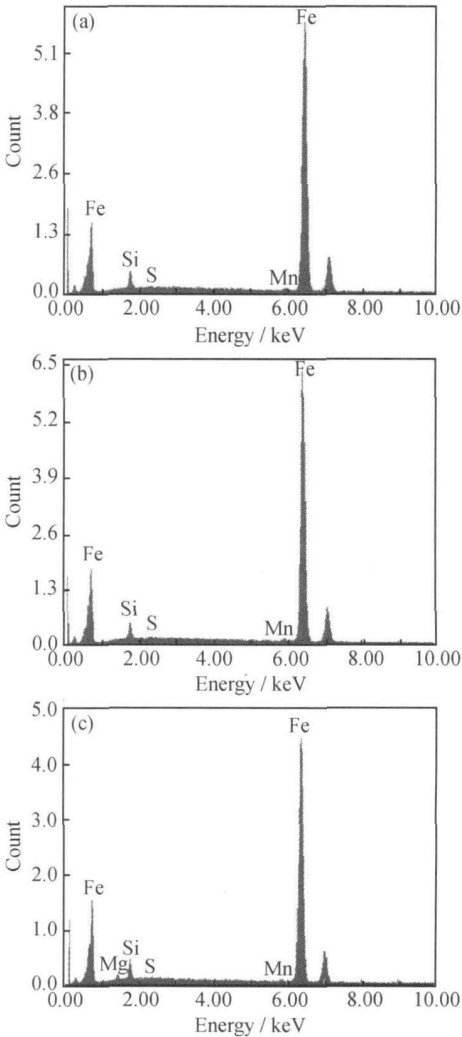


图 8 HT200 试样表面元素 EDX 分析
(a) 试样原始表面; (b) B 试样摩擦表面; (c) PA 试样摩擦表面
Fig. 8 EDX analysis of surface elements for HT 200 samples
(a) primary surface; (b) worn surface of B sample;
(c) worn surface of PA sample

渗透层。结合图 3 显示的 PA 试样失重量显著低于 B 试样和图 7 的摩擦区宏观形貌分析, 进一步证明了 PAO 对 HT200 摩擦副的自修复效用, 至少是一种软修复^[2]。

表 1 摩擦表面各主要元素原子分数(%)

Table 1 Elemental atom fraction of the worn surfaces with different lubricants(%)

Element	Mg	Si	S	Mn	Fe
Primary surface	0	5.47	0.24	0.56	93.72
B sample	0	5.24	0.13	0.75	93.89
PA sample	0.23	6.06	0.10	0.56	93.06

2.3.3 减摩性分析

图 4 中 B 试样在对摩 20h 之内摩擦系数从 0.091 降到 0.056, 而后保持该数值平稳运行, 这是典型粗糙表面的磨合阶段与稳定磨损阶段的摩擦系数变化特征。其规律是: 运行 20h 后摩擦表面粗糙峰被磨平, 达到优化的粗糙度, 谷峰间的机械啮合切向阻力较快下降使摩擦系数明显衰减, 且趋于平稳, 进入稳定阶段。从图 4 看到 B 试样摩擦系数趋于平稳的拐点(20h)与图 3 中 B 试样磨损趋于平稳的拐点(15h)比较接近, 说明 15~20h 之间是 B 试样由磨合向稳定磨损过渡的时间段, B 试样服从一般金属材料的摩擦磨损的阶段特征。

PA 试样由于磨合阶段的纳米 P 颗粒在摩擦面上的滚动效应及其对粗糙峰谷的填补作用, 减小了峰点的啮合切向阻力, 摩擦系数明显处于较低值。磨合中由于自修复层的形成, 该膜层间的摩擦系数小于 HT200 材料的摩擦系数, 故磨合阶段前后的摩擦系数变化不明显, 一直保持明显小于 B 试样摩擦系数的水平。由此可知, PA 初期的减摩是纳米粒子的滚动和填补效应起主要作用, 中后期减摩性是摩擦系数较低自修复膜层影响起主导作用。

另外从图 6 可看出最终摩擦表面中 PA 形貌的平整度和摩擦划痕均好于 B, 这既是自修复膜层的效用, 也是摩擦系数下降、减摩性提高的原因。

3 结论

(1) 用 KH550 偶联剂球磨修饰的纳米坡缕石, 在 150N 基础油中具有良好的分散性。

(2) 添加了质量分数为 2% 的纳米坡缕石粉末的润滑油显著降低了 HT200 摩擦副的磨损量; 总磨损量减小了 25.2%, 经过磨损失重对比分析、表面成分分析和摩擦面形貌分析, 这是由于表面生成了含坡缕

石特征元素的自修复膜层所起的作用。

(3) 纳米坡缕石润滑油使 PA 试样在稳定摩擦阶段摩擦系数比纯基础油润滑的 B 试样下降约 32.3%, 且没有明显的磨合阶段特征, 主要是由于初期磨合阶段纳米粒子在摩擦表面的滚动效应和后来的自修复膜生成引起的。B 试样显示了明显的磨合的摩擦系数变化特征, 符合普通材料的摩擦磨损规律。

(4) 纳米 P 添加的润滑油能使 HT200 试样磨合阶段磨损量减小, 又能降低正常磨损阶段的磨损率, 从两方面提高了材料的磨损寿命。

参考文献

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [2] 乔玉林. 纳米微粒的润滑和自修复技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] XUE Q J, LIU W M, ZHANG Z J. Friction and wear properties of a surface modified TiO₂ nanoparticle as an additive in liquid paraffin[J]. Wear, 1997, 213(1-2): 29-32.
- [4] DONG J X, HU Z S. A study of the antiwear and friction reducing properties of the lubricant additive, nanometer zinc borate[J]. Tribology International, 1998, 31(5): 219-223.
- [5] 沃恒洲, 胡坤龙, 胡献国. 纳米二硫化钼作为 15W/40 柴油机油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(1): 33-37.
- [6] 王晓丽, 徐滨士, 许一, 等. 纳米铜润滑油添加剂的摩擦磨损特性及其机理研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 127(3): 235-239.
- [7] 党鸿辛, 赵彦保, 张治军. 纳米颗粒添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(2): 185-187.
- [8] 周平安. 金属磨损自修复材料的功能特点和应用前景[J]. 中国表面工程, 2004, 17(1): 39-41.
- [9] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油脂中的应用[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 265-267.
- [10] 郭延宝, 徐滨士, 马世宁, 等. 羟基硅酸盐润滑油添加剂对 45# 钢/球墨铸铁摩擦副摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(6): 512-515.
- [11] 王佳佳, 王满力, 周元康. 贵州坡缕石矿的分离提纯及其改性 PF 的耐热性[J]. 贵州化工, 2009, 33(6): 5-7.
- [12] 周元康, 郑忠恒, 李屹, 等. 贵州坡缕石矿物纳米的干式制备及其在酚醛树脂中的分散状态表征[J]. 贵州工业大学学报, 2006, 35(6): 5-9.
- [13] 周元康, 张大斌, 曾立宏, 等. 坡缕石纳米/酚醛树脂的制备及其摩擦材料的性能[J]. 润滑与密封, 2008, 33(4): 47-50.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50965004); 贵州省教育厅自然科学基金资助项目(黔教科 2007014)

收稿日期: 2009-02-14; 修订日期: 2010-01-14

作者简介: 杨绿(1980—), 男, 讲师, 博士研究生, 目前主要从事摩擦磨损方面的研究, 联系地址: 贵州省贵阳市贵工路 6 号贵州大学蔡家关校区机械工程学院(550003), E-mail: green_yang@126.com