

温度对线性和交联聚酰亚胺摩擦磨损性能的影响*

丛培红 李同生** 刘旭军 张绪寿 薛群基

(中国科学院兰州化物所固体润滑开放实验室 兰州 730000)

李家泽

(中国科学院化学研究所 北京 100080)

摘 要 用栓-盘式磨损试验机考察了环境温度对线型(YS-20)和交联(KH-304)聚酰亚胺摩擦磨损特性的影响. 试验结果表明: 在不同温度下, 两种聚酰亚胺摩擦系数随滑动时间的变化, YS-20 是先增大, 继而降低, 最后趋于稳定; 而 KH-304 是先降低, 然后趋于稳定. 对于摩擦系数的稳定值, 随温度的升高, YS-20 呈先升高后下降的趋势, KH-304 呈先降低后稳定的趋势. 两者的磨损均随温度的升高而升高, 在同一温度下, KH-304 的磨损大于 YS-20. 结合扫描电镜(SEM)和傅立叶红外(FTIR)的观察分析, 作者认为温度影响聚酰亚胺摩擦磨损性能的原因, 对 YS-20 主要为摩擦表面层物理状态发生了由玻璃态、高弹态到粘流态的变化, 对 KH-304 则为摩擦表面层发生的化学变化.

关键词 聚酰亚胺, 温度, 线型, 交联, 摩擦学特性, 表面分析

聚酰亚胺(PI)具有优异的机械性能和耐热性, 已被广泛应用于航空航天、兵器、电子电器及其它精密机械等高技术领域. 对 PI 摩擦磨损性能, 美国宇航局的 Fusaro^[1~3]研究得较为系统, 他的研究结果表明: 线型 PI 的磨损率高于交联 PI; 当温度高于 40℃ 时, PI 发生高摩擦磨损到低摩擦磨损的转变. 但 Jones、Eiss 和 Sliney^[4,5]等的试验结果则不相同. 鉴于以上事实, 本研究着重考察了温度对一种线型和一种交联 PI 摩擦磨损性能的影响, 并结合扫描电镜(SEM)和傅立叶红外(FTIR)的观察分析结果, 探讨了 PI 在摩擦过程中发生的物理状态和化学变化及对不同类型 PI 摩擦磨损的作用机制, 以期深化对 PI 摩擦学性能的认识.

1 实验部分

试验用 PI 是上海合成树脂研究所生产的 YS-20 线型热塑性 PI 和中国科学院化学所生产的 KH-304 交联型热固性 PI. 图 1 为两种 PI 的化学结构式. 试样采用热压模塑成型工艺制备.

摩擦磨损试验在玄武三号栓-盘式高温磨损试验机上进行, 图 2 为该试验机摩擦部位的示意图. 栓为 PI 试样($\phi 5\text{mm} \times 18\text{mm}$), 摩擦表面粗糙度 $R_a = 0.31\mu\text{m}$; 对偶为不锈钢盘(1Cr18Ni9Ti $\phi 45\text{mm} \times 10\text{mm}$), 表面粗糙度 $R_a = 0.45\mu\text{m}$. 试验前, 栓及盘用丙酮超声波清洗, 自然晾干. 试验条件为: 速度 0.39m/s, 负荷 39.2N, 摩擦时间 120min. 实验数据为 3 次以上重复结果的平均值.

* 1997-07-27 收稿, 1998-03-14 修稿; ** 通讯联系人

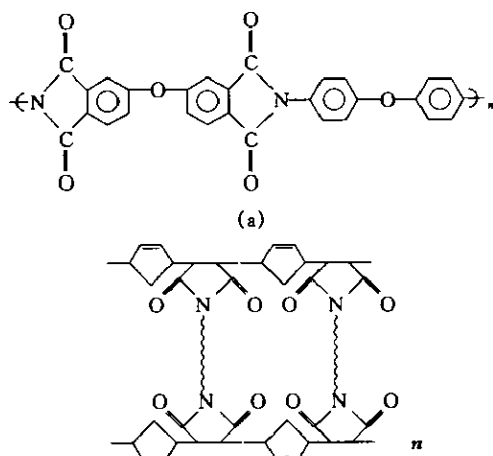


Fig.1 Chemical structure of PIs used in this study

(a) Chemical structure of the linear PI(YS-20);

(b) Chemical structure of the crosslinked PI(KH-304)

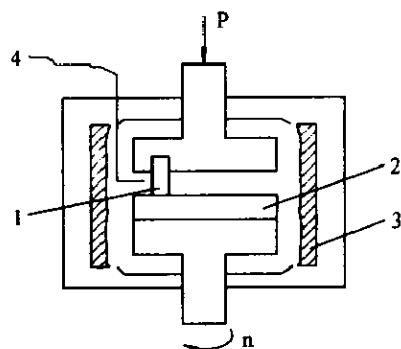


Fig.2 Schematic diagram of friction specimens of the high-temperature pin-on-disc wear tester

1. Pin specimen; 2. Disc specimen;
3. Electric furnace; 4. Thermocouple

形貌观察采用 JEM-1200EX/9100EDAX 分析电镜(JEOL 公司)、EPM810 型扫描电子显微镜(日本岛津公司),在观察前对试样溅射一层金膜.利用 FTS-165 型傅立叶红外分析仪(Bio-Rad 公司),用反射红外方法对摩擦表面进行分析.

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损特性

图 3a、3b 分别为不同固定环境温度下 YS-20 和 KH-304 的摩擦系数随滑动时间的变化.由图 3a 可见,随滑动时间的增加,YS-20 的摩擦系数出现最大值,并随着环境温度的升高,YS-20 出现摩擦系数最大值的时间缩短,即出现摩擦系数稳定值的摩擦行程缩短.由图 3b 可见,随滑动时间的增加和环境温度的升高,KH-304 的摩擦系数均呈降低趋势.

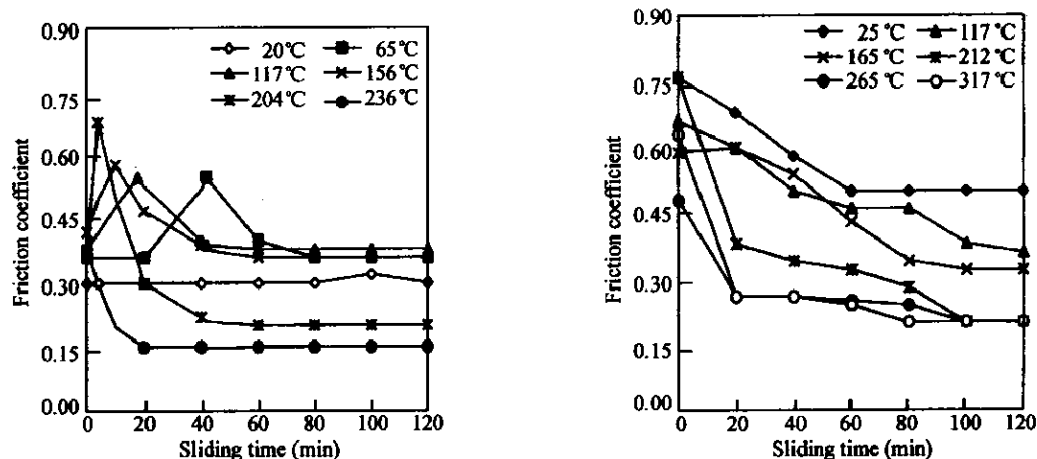


Fig.3 Friction coefficient of PIs as a function of sliding time under different ambient temperatures

Speed 0.39m/s, Load 39.2N; a. YS-20, b. KH-304

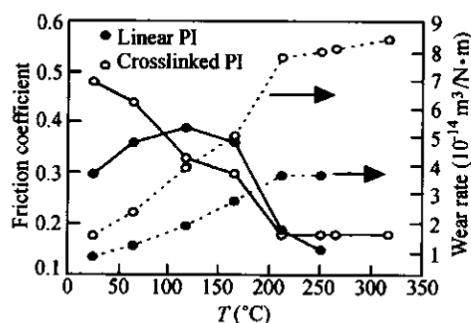


Fig. 4 Stable values of friction coefficient of PIs as a function of ambient temperature
Speed 0.39m/s, Load 39.2N

图4示出了在各个环境温度下,两种PI的摩擦系数稳定值和磨损率随环境温度的变化.由图可见,二者的摩擦系数稳定值的变化趋势也是不同的.室温下,YS-20的摩擦系数为0.30;此后随着温度的升高而上升,在85~155℃时为0.37~0.39;然后随温度的升高而下降,250℃时降低至0.16.从室温到200℃,KH-304的摩擦系数随着温度的升高而下降(室温时为0.48,200℃时为0.18),200℃以上时稳定在0.18.YS-20和KH-304的磨损率均随温度的升高而不断增大,并在高于200℃后趋于平稳.在同一温度下,KH-

304的磨损高于YS-20,并且随温度的升高,这种差别越来越明显.

众所周知,聚合物是热的不良导体,摩擦热在表面的蓄积会引起聚合物摩擦表面层的物理状态和化学结构的变化,从而影响材料的摩擦学特性.为此,本工作从以下几个方面入手,探讨了两种化学结构不同的PI在摩擦过程中发生的物理和化学变化.

2.2 磨损表面形貌观察

图5示出了在不同温度下摩擦时,YS-20和KH-304磨痕形貌的SEM照片.由照片

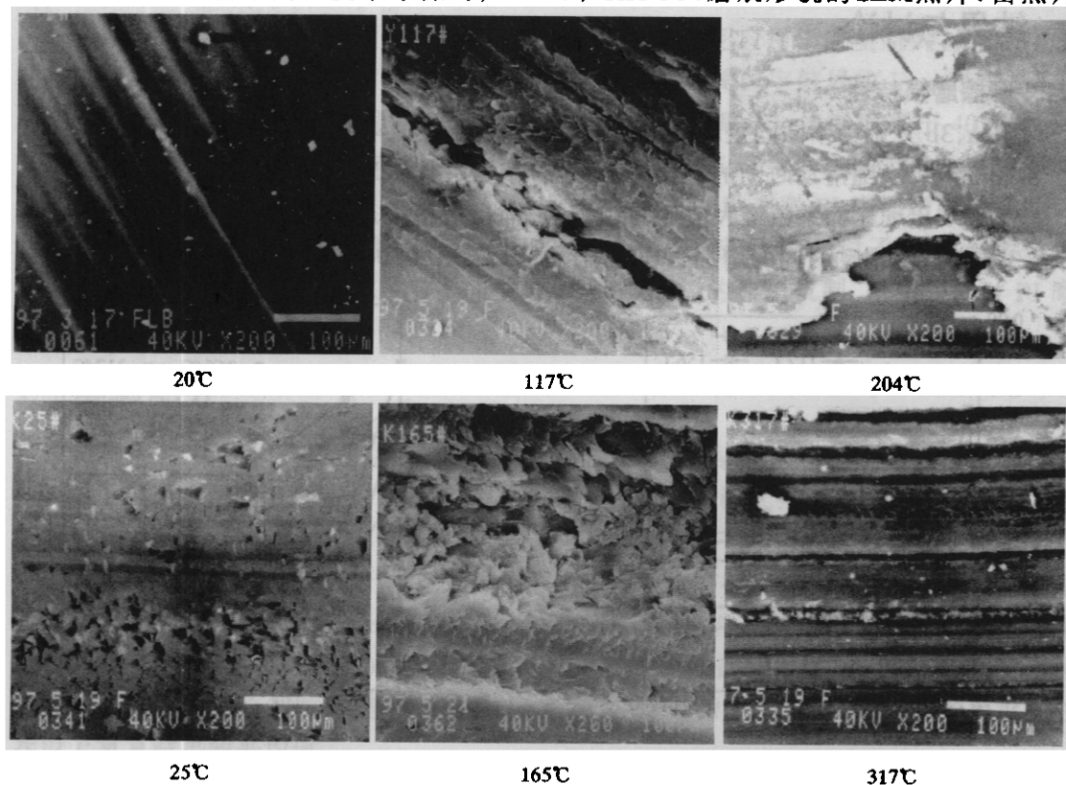


Fig. 5 SEM photomicrograph of wear surface PIs after friction 120min

可观察到,20℃时 YS-20 摩擦表面出现犁耕沟槽,117℃时,摩擦表面的犁耕沟槽变宽且深;204℃下,摩擦表面相对较光滑,但出现沿滑动方向拉出的、覆盖在摩擦表面上的大块磨屑.这一结果说明在温度高于 200℃时,YS-20 摩擦表面出现了可塑性流动的软化层,发生了物理状态的变化.KH-304 在 25℃时,摩擦表面布满不规则形状的磨斑;165℃和 317℃下,摩擦表面变得粗糙并出现较深的犁耕沟槽.而对 KH-304 却未观察到软化现象.

2.3 磨屑形貌观察

图 6 为不同温度下,YS-20 和 KH-304 磨屑形貌的 SEM 照片.由照片可以观察到,随温度的升高,YS-20 磨屑的大小及形状发生了很大的变化,20℃时为细微颗粒,117℃时为较大的块状磨屑,204℃时为细长的纤维状磨屑.这一结果进一步表明了,不同环境温度下,YS-20 摩擦表面所处的物理状态是不同的^[6].而 KH-304 在不同的温度下摩擦时,其磨屑的形貌基本为大小不同的片状,没有明显的差别.这一结果说明了其磨损机理未发生大的变化,这同时说明了在不同温度下摩擦时,KH-304 摩擦表面物理状态的变化对其摩擦学性能影响不大.

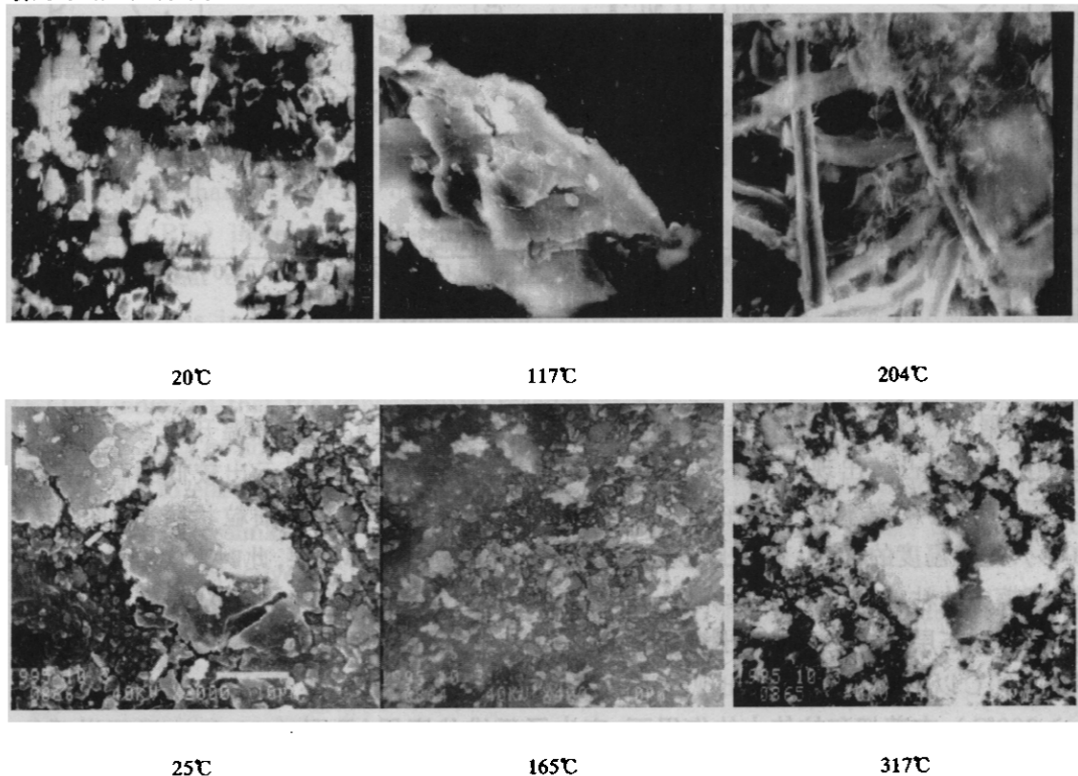


Fig. 6 SEM photomicrograph of debris of PIs after friction 120min

2.4 磨损表面的红外分析

图 7 为两种类型 PI 本体和不同温度下试验后磨痕表面红外分析谱图.由图可见,不同温度下 YS-20 磨痕的红外谱图之间无明显差别,但他们却与本体的红外谱图不完全相同;不同温度下 KH-304 磨痕的红外谱图之间及与本体相比均有很大的不同.这一分析表明,在不同温度下摩擦,YS-20 和 KH-304 表面均发生了化学反应,其中 KH-304 表面分子

结构的变化较为显著. YS-20 的反应物不随温度升高而改变, 而 KH-304 则随温度变化反应物始终在改变. 联系两种 PI 在不同温度下的摩擦行为(见图 3)及磨痕和磨屑的 SEM 分析, 可以判断在不同温度下摩擦时, YS-20 主要发生了物理状态的变化, 并影响其摩擦磨损行为, 而 KH-304 发生的化学结构变化是影响其摩擦磨损特性的主要因素. 至于不同温度下摩擦时, YS-20 和 KH-304 发生的化学反应还有待于进一步深入.

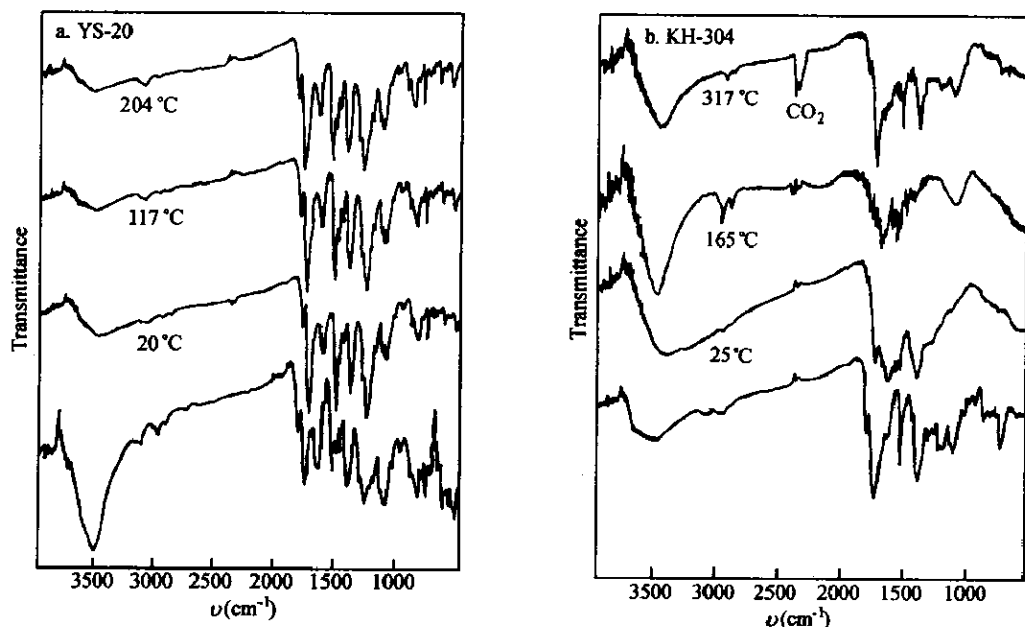


Fig. 7 FTIR spectra of bulks and worn surfaces of PIs

根据以上分析结果可以推测, 对 YS-20 来说, 在较低温度下, 摩擦温升使 YS-20 真实接触的表面微凸体出现高弹态, 表面层仍表现为玻璃态的性质, 显示出较低的摩擦系数(见图 4. 室温), 破坏仅发生在这些小的微凸体部分, 因而产生了细粒状磨屑(见图 6. 20°C). 随着温度的升高, 表面出现连续并具有一定厚度的高弹态层, 此时真实接触面积增大, 摩擦中的粘着项和犁削项均增大, 摩擦系数升高(见图 4. 85~155°C), 在摩擦力的作用下, 高弹态层与本体剥离而出现层状剥落, 产生了片状磨屑(见图 6. 117°C). 当温度升高到 200°C 以上时, 摩擦表面出现易流动的粘流层, 有助于摩擦系数的进一步降低(见图 4. >200°C), 在剪切和拉伸力的作用下, 产生了纤维状磨屑(见图 6. 204°C). 需要说明的是, 摩擦过程中产生的粘流层极薄, 因此磨损率的增大并不多.

REFERENCES

- 1 Fusaro R L. ASLE Trans, 1977, 20(1): 1~14
- 2 Fusaro R L. ASLE Trans, 1983, 26(2): 209~221
- 3 Fusaro R L, Hady W F. ASLE Trans, 1986, 29(2): 214~222
- 4 Jones J W, Eiss N S. Am Chem Soc, Div Polym Mater Sci Eng, 1984, 50: 147~151
- 5 Sliney H E. Lubr Eng, 1985, 41(10): 592~598

6 Cong P H, Li T S, Liu X J, et al. Tribology(摩擦学学报), 1997, 17(3):220~226

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF A CROSSLINKED AND A LINEAR POLYIMIDE

CONG Peihong, LI Tongsheng, LIU Xujun, ZHANG Xushou, XUE Qunji

(Lanzhou Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

LI Jiaze

(Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The effect of temperature on the friction-wear properties of a kind of liner Polyimide (YS-20) and a kind of crosslinked Polyimide (KH-304) was studied using a pin-on-disc wear tester. The test results showed that with sliding time increasing, friction coefficient of YS-20 increased to a maximum then decreased to steady value, but that of KH-304 decreased directly to steady value. For a steady value of friction coefficient, with temperature increasing, the friction coefficient of YS-20 increased to a maximum value then decreased, but that of KH-304 decreased directly to steady value. Wear rate of the both Polyimides (PIs) increased with temperature increasing. The wear rate of KH-304 was higher than that of YS-20 under the same temperature. Scanning Electron Micrograph (SEM) analysis indicated that with temperature elevating, debris of YS-20 appearances changed obviously, but that of KH-304 varied little. Fourier Transform infrared Spectrometer (FTIR) indicated that the tribochemical reaction of KH-304 occurred more obviously than that of YS-20. The analysis above suggest that the surface layer of the linear PI changed from glassy body, to elastomer and then to melting body. Tribochemical reaction occurred at the surface of the crosslinked PI, which effect the friction-wear properties of the linear PI and crosslinked PI respectively.

Key words Polyimide, Temperature, Linear, Crosslinked, Tribological properties, Surface analysis