

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.018

# 不同条件下聚酰胺6复合材料的摩擦磨损性能

王利俊, 游一兰, 贺国文, 叶媛, 肖阳

(湖南城市学院材料与化学工程学院材料系, 湖南益阳 413000)

**摘要:** 为探究聚酰胺6 (PA6)在不同工况条件下的摩擦磨损性能,采用MMX-2型摩擦磨损试验机研究了水润滑和油润滑条件下纳米二氧化硅(nano-SiO<sub>2</sub>)含量、载荷、转速对PA6摩擦磨损性能的影响规律。结果表明:载荷为60 N,转速200 r/min的条件下,nano-SiO<sub>2</sub>能降低PA6的摩擦系数和质量磨损率,且同等条件下,油润滑时具有更好的摩擦磨损性能。考察了载荷和转速对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>(质量分数为5%)复合材料摩擦磨损性能的影响,结果表明,水润滑条件下:摩擦系数随载荷和转速的增大先减小后增大,质量磨损率随载荷增大先增大后减小、随转速增大却先减小后增大,磨损机理表现为黏着磨损和磨粒磨损。油润滑条件下:摩擦系数受载荷影响不大、随转速的增大先减小后增大,质量磨损率随载荷增大而降低、随转速增大而增大,摩擦表面以犁沟分布为主,属犁沟磨损机制。

**关键词:** 聚酰胺6; 摩擦磨损; 水润滑; 油润滑; 载荷; 转速

**中图分类号:** TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0110-06

## Tribological Properties of Polyamide 6 Composites under Different Conditions

Wang Lijun, You Yilan, He Guowen, Ye Yuan, Xiao Yang

(Department of Materials, College of Materials and Chemistry Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract :** In order to investigate the tribological properties of polyamide 6 (PA6) under different working conditions, the effects of nano-SiO<sub>2</sub> content, load and rotation speed on the tribological properties of PA6 under water lubrication and oil lubrication were studied by MMX-2 friction and wear testing machine. The results show that the friction coefficient and mass wear rate of PA6 are reduced by adding nano-SiO<sub>2</sub> under load of 60 N and rotation speed of 200 r/min, and better friction and wear performance are achieved when lubricated by oil under the same conditions. The effects of load and rotation speed on the tribological properties of PA6/nano-SiO<sub>2</sub> composites (mass fraction of nano-SiO<sub>2</sub> is 5 wt%) were investigated. The results show that under the condition of water lubrication, the friction coefficient decreases firstly and then increases with the increase of load and rotation speed, and the mass wear rate increases firstly and then decreases with the increase of load, but decreases firstly and then increases with increasing the rotation speed and the wear mechanism is adhesive wear and abrasive wear. Under the condition of oil lubrication, the friction coefficient is not affected by the load, and decreases firstly and then increases with increasing the rotation speed. The mass wear rate decreases at higher load and increases at higher rotation speed. Furrow wear is the main tribological mechanism subjected to oil lubrication.

**Keywords :** polyamide 6 ; friction and wear ; water lubrication ; oil lubrication ; load ; rotation speed

聚合物自润滑材料如聚酰胺(PA)、聚四氟乙烯(PTFE)、超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)、聚酰亚胺(PI)、聚醚醚酮(PEEK)等广泛应用于摩擦材料领域。研究表明,在聚合物基体材料中添加纤维、微纳米无机颗粒等可使基体材料的承载能力提高,从而耐

磨性得以改善,其中填料含量、填料组合对聚合物摩擦磨损性能起到关键性作用。如:适量的纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>能阻碍聚酰胺6(PA6)向对偶件的转移,提高耐磨性,在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数为10%时耐磨性最佳<sup>[1]</sup>;玻璃纤维(GF)、滑石粉、石墨和PTFE可以协同提高

**基金项目:** 湖南省教育厅优秀青年项目(19B108),湖南省自然科学基金项目(2019JJ50029)

**通信作者:** 游一兰,副教授/博士,主要研究方向为聚合物改性及其复合材料

**收稿日期:** 2023-03-01

**引用格式:** 王利俊,游一兰,贺国文,等.不同条件下聚酰胺6复合材料的摩擦磨损性能[J].工程塑料应用,2023,51(5):110-115,152.

Wang Lijun, You Yilan, He Guowen, et al. Tribological properties of polyamide 6 composites under different conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 110-115, 152.

PA6的耐磨性<sup>[2]</sup>;在聚丙烯酰胺(PAM)中加入 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,可降低摩擦系数和磨损量,加入9%以上的PTFE能进一步降低高 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填充PAM的摩擦系数和磨损量<sup>[3]</sup>。碳纤维(CF)和二硫化钼( $\text{MoS}_2$ )共同填充水性PI时,二者比例对摩擦学性能有很大影响,当填料总质量分数为15%,CF质量分数占3%时,摩擦学性能最佳<sup>[4]</sup>,CF和 $\text{MoS}_2$ 对降低PE-UHMW的磨损同样具有协同作用<sup>[5]</sup>。在聚醚砜酮(PPEsk)中加入少量纳米 $\text{TiO}_2$ 可明显提高其耐磨性,当体积分数大于2.5%时,耐磨性改善不随含量明显变化<sup>[6]</sup>。邵鑫等<sup>[7]</sup>发现,在干摩擦条件下,200 N,200 r/min时,纳米 $\text{SiO}_2$ 为20%时,PPEsk的摩擦学性能最好。汪怀远等<sup>[8]</sup>发现15%的CF和GF改善PTFE在腐蚀环境中耐磨性效果最佳,可分别提高耐磨性4.4和7.7倍。

材料的摩擦磨损性能不仅与材料的固有属性相关,也显著依赖于摩擦系统的工况条件,如载荷、转速、温度、润滑介质等。如:环氧(EP)树脂在干摩擦、水润滑、液体石蜡润滑下,磨损率差距很大,干摩擦时比石蜡润滑时大两个数量级<sup>[9]</sup>。水润滑时,聚酰胺66/聚苯硫醚(PPS)共混物的摩擦系数比干摩擦时低,但是水的存在加大了PPS的磨损<sup>[10]</sup>。徐海燕等<sup>[11]</sup>研究火焰喷涂聚酰胺1010涂层在不同载荷下的摩擦磨损性能发现,涂层的摩擦系数随载荷增大先增加,而后趋于平稳,超过200 N时有所增加,继续增大载荷,摩擦系数又有降低,结果表明摩擦系数的大小与转移膜的形态有关。

材料的摩擦磨损性能受内外因素的影响,不同材料都有其适用的摩擦系统。因此,笔者系统研究了填料含量、润滑条件、载荷、转速对PA6摩擦磨损性能的影响,为材料的工程应用提供数据支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PA6:YH优级,湖南岳化化工股份有限公司;  
nano- $\text{SiO}_2$ :20 nm,江苏天行新材料有限公司;  
硅烷偶联剂KH550:有效物质含量99%,东莞市康锦新材料科技有限公司;  
润滑油:100#,上海哈斯太特种润滑油有限公司。

### 1.2 仪器及设备

高速混合机:SHR-10 A型,张家港格兰机械有限公司;  
电热鼓风干燥箱:101-1AB型,天津市泰斯特仪

器有限公司;

双螺杆挤出机:SHJ-20型,南京杰恩特机电有限公司;

注塑机:KD-1080型,宁波市金星塑料机械有限公司;

冲击试验机:XJJUD-50型,承德市大加仪器有限公司;

电子万能试验机:WOW-100 C型,上海华龙测试仪器股份有限公司;

摩擦磨损实验机:MMX-2型,山东保航机械设备制造厂;

扫描电子显微镜(SEM):EM-30AX+型,韩国COXEM公司。

### 1.3 试样制备

(1) nano- $\text{SiO}_2$ 的表面改性处理。

将nano- $\text{SiO}_2$ 加入高速混合机中,再加入用乙醇稀释的相当于改性材料总质量1%的KH550,高速搅拌10 min,再置于80 °C的干燥箱中干燥4 h。

(2)复合材料的制备。

将改性后的nano- $\text{SiO}_2$ 和PA6高速混合后经双螺杆挤出机挤出造粒,其中nano- $\text{SiO}_2$ 的质量分数分别为1%,3%,5%,7%,9%,挤出机各区温度依次为240,245,255,255,255 °C,机头温度245 °C;后注射成型测试样条,注塑机参数设置为:一区255 °C、二区260 °C、三区260 °C、四区255 °C、射嘴255 °C、注射压力45 MPa、保压时间8 s、冷却时间3 s。

### 1.4 测试与表征

采用电子万能试验机,按照GB/T 1040-2006测试样品的拉伸强度,拉伸速度为10 mm/min。

按照GB/T1043-2008,采用简支梁摆锤冲击试验机在室温条件下测试材料的冲击性能。

按照GB/T3960-2016,采用摩擦磨损试验机进行摩擦磨损性能测试,测试样条尺寸为6 mm×7 mm×30 mm。

对摩擦磨损试验后样品摩擦表面喷金处理,采用SEM对摩擦表面进行微观形貌分析,放大倍数为200倍。

## 2 结果与讨论

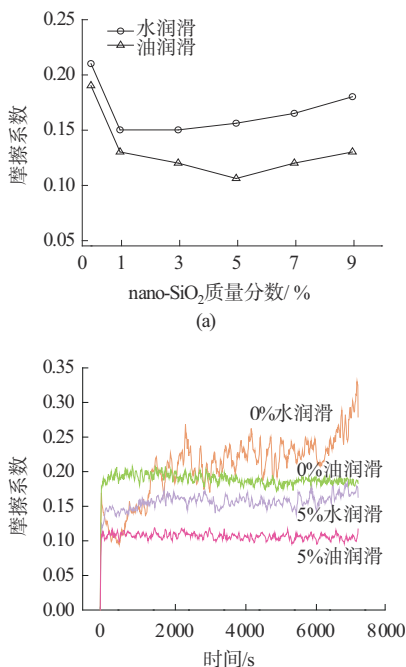
### 2.1 润滑条件及 nano- $\text{SiO}_2$ 含量对 PA6/nano- $\text{SiO}_2$ 复合材料摩擦磨损性能的影响

在载荷为60 N,转速200 r/min的条件下,对复合材料在水润滑、油润滑条件下进行了摩擦磨损性

能测试。

### (1) 摩擦系数。

图1为PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料在不同润滑条件下的摩擦系数。从图1可以看出,在水润滑条件下,纯PA6的平均摩擦系数最大,为0.21,加入nano-SiO<sub>2</sub>后复合材料的平均摩擦系数降低,但随含量变化不明显,在nano-SiO<sub>2</sub>质量分数为1%,3%时,材料的摩擦系数为0.15,比PA6降低了29%。水润滑条件下,纯PA6的摩擦系数随时间波动很大,摩擦不稳定,这可能是PA6的吸水率大,水润滑条件下,在摩擦热作用下,PA6发生水解,分子量降低、材料软化、强度降低、摩擦系数随时间而增大。加入nano-SiO<sub>2</sub>后,摩擦稳定性明显增强,随时间波动很小,nano-SiO<sub>2</sub>在摩擦过程中发生化学反应,生成Si(OH)<sub>4</sub>,分子间脱水后继而形成硅酸溶胶,在摩擦界面起到阻止水侵入PA6基体的作用。同时Si—OH使水容易吸附到材料表面,形成润滑膜,从而降低摩擦系数,提高摩擦稳定性<sup>[12]</sup>。



a—摩擦系数随nano-SiO<sub>2</sub>质量分数的变化;b—摩擦系数-时间图  
图1 PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料在不同润滑条件下的摩擦系数

从图1可以看出,在油润滑条件下,纯PA6的平均摩擦系数为0.19,加入了nano-SiO<sub>2</sub>的复合材料的摩擦系数都比纯PA6要小,nano-SiO<sub>2</sub>质量分数为5%时,平均摩擦系数最低,为0.11,比纯PA6下降了42%。且组成相同的材料,油润滑条件下摩擦系数都比水润滑小,PPS轴承材料也得到了类似结果<sup>[13]</sup>。

这是由于nano-SiO<sub>2</sub>与PA6大分子形成物理交联,在摩擦的过程中承受着主要的应力,使得磨损下来的细小磨屑微粉作为转移膜,阻止树脂基体变形及黏着磨损,脱落的nano-SiO<sub>2</sub>在此时分散在油中充当着润滑剂的作用,因此在油润滑条件下摩擦系数随时间变化很小,非常稳定。当浓度提高,纳米粒子容易团聚分散不均匀,粒子在摩擦界面形成了磨粒,故而使复合材料的摩擦系数开始增大。

### (2) 质量磨损率。

图2为PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料在不同润滑条件下的质量磨损率。如图2所示,在水润滑条件下,纯PA6的质量磨损率最大为0.160%,加入nano-SiO<sub>2</sub>后PA6复合材料的质量磨损率先减少,nano-SiO<sub>2</sub>质量分数为5%时质量磨损率最低。一方面是因为nano-SiO<sub>2</sub>有较好的导热性,加入PA6中后,减少了摩擦热在试样表面的聚集,使PA6基体受热软化倾向降低,磨损减少。另一方面是因为nano-SiO<sub>2</sub>在滑动过程中阻碍基体向摩擦副转移,从而降低了复合材料的磨损率。纳米填料含量高时,磨损反而增大,Jayanthi等<sup>[14]</sup>研究纳米TiC对EP树脂的摩擦磨损性能的影响也得到了类似结果,这是因为高含量纳米颗粒团聚的可能性增大。

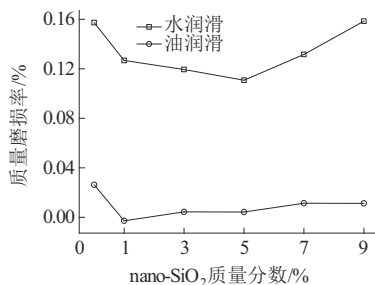


图2 PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料在不同润滑条件下的质量磨损率

在油润滑条件下,nano-SiO<sub>2</sub>的加入可以一定程度地减少复合材料的磨损程度。在nano-SiO<sub>2</sub>质量分数为1%时,检测不到质量磨损,含量增大时,质量磨损率稍有增大,但都低于0.02%,这可能是摩擦过程中复合材料的摩擦表面附着一层稳定的油膜,摩擦阻力小,摩擦系数低,从而质量损失少。

比较两种润滑条件下的质量磨损率,可以看出,组成相同的复合材料的质量磨损率在水润滑时都比油润滑时大,这可能是因为水润滑时,材料吸水导致抗犁削能力减弱,从而材料从表面削落,造成了质量损失;而油润滑时,摩擦系数低,材料表面强度没有因为吸水、摩擦热的大量聚集而导致降

低,故质量磨损率低。同时,摩擦过程中油分子可能脱氢形成C基层<sup>[15]</sup>,协同油膜起到润滑作用,提高摩擦性能。

## 2.2 不同润滑条件下载荷和转速对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料摩擦磨损性能的影响

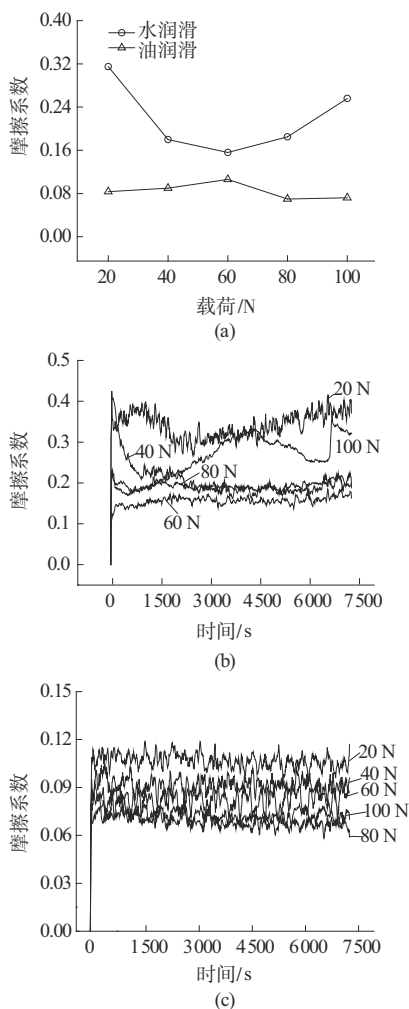
聚合物复合材料的摩擦磨损性能与工况条件息息相关,本节讨论两种润滑条件下,60 N和200 r/min时具有较好性能的5%的 nano-SiO<sub>2</sub>改性PA6复合材料在不同转速和载荷下的摩擦磨损性能,改变载荷时,转速固定为200 r/min;改变转速时,载荷固定为60 N。

### (1) 载荷的影响。

载荷对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料的摩擦系数的影响如图3所示。水润滑下,材料的摩擦系数在0.18到0.32之间,随着载荷的增大先减小后稍有增大,在60 N时最低。水润滑时,在载荷20 N和100

N时,摩擦稳定性较差,而在40,60,80 N时摩擦系数稳定。这可能是因为是在载荷低时,摩擦过程中纳米颗粒起到磨粒的作用,载荷增大,对脱落的磨粒的碾压作用增强,进而嵌入转移膜或摩擦表面或分散在润滑水膜中,从而降低摩擦系数。载荷增大到100 N时,犁削作用增大,可能磨屑增大,材料表面不平整度增加,摩擦系数又增加,稳定性降低。另外载荷增大,温升增加,材料的力学强度降低、承载能力下降,并且水分蒸发,导致水膜不连续、润滑效果变差<sup>[16]</sup>,因此摩擦系数增大。油润滑条件下,材料在不同载荷下摩擦系数都是很低的,且随着载荷变化,复合材料的摩擦系数变化不大,都在0.07到0.11之间,具有很低的摩擦系数,且摩擦系数都较稳定。

载荷对复合材料质量磨损率的影响如图4所示。在水润滑条件下,随着载荷的增大,质量磨损率先增大后减小,与摩擦系数的变化规律正好相反。这可能与材料的黏附与转移有关,在低载荷下,随着载荷增大,材料向对偶黏着转移增多,造成摩擦面的摩擦质量损失增加,但是摩擦变成了转移膜和复合材料的摩擦,因而摩擦系数降低。超过60 N后,材料的质量摩擦量随载荷的增加而降低,这可能是因为形成的磨屑又碾压回摩擦表面,但造成表面平整度降低、粗糙度增加,故摩擦系数又稍有增大。油润滑条件下,质量磨损率很低,都不高于0.05%,有随载荷增加而降低的趋势,这可能是因为材料的摩擦系数很低造成的。



a—摩擦系数-载荷图;b—水润滑摩擦系数-时间图;  
c—油润滑摩擦系数-时间图

图3 载荷对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料摩擦系数的影响

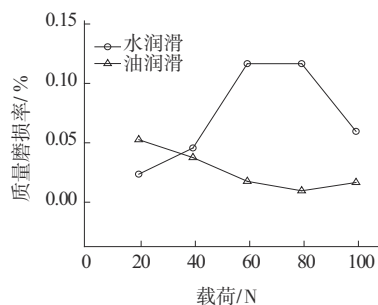
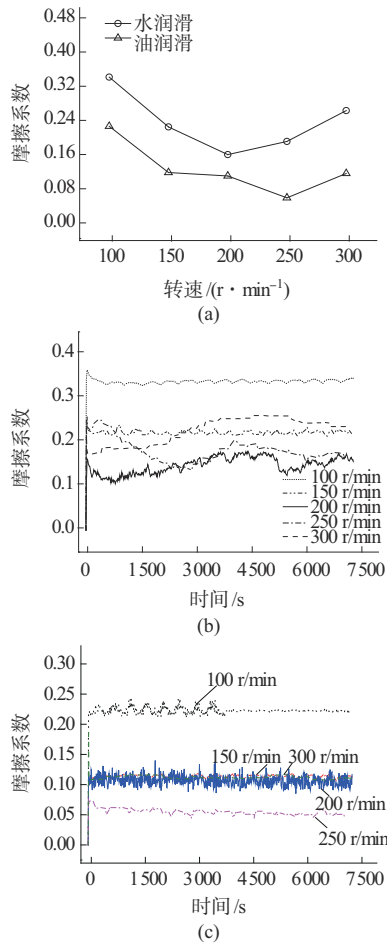


图4 不同润滑条件下PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料质量磨损率随载荷的变化

### (2) 转速的影响。

转速对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料摩擦系数的影响如图5所示。由图5可知,随着转速的增大,复合材料的摩擦系数都是先减小后增大,水润滑时在200 r/min时摩擦系数最低,油润滑时在250 r/min时最低。转速增大,摩擦热增加,材料表面熔融增加,黏流态的材料起到润滑作用,摩擦系数降低,但是

转速超过某一值后,摩擦温升过高,材料与对磨件的实际接触面积增大,从而导致摩擦系数增大。不同转速下摩擦系数随时间的变化显示:该测试条件下,复合材料的摩擦几乎没有磨合期;在水润滑时,摩擦系数随时间波动大,转速大时,波动更明显。油润滑时,摩擦系数随转速的增大稳定性增强。



a—摩擦系数-转速图;b—水润滑摩擦系数-时间图;  
c—油润滑摩擦系数-时间图

图5 转速对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料摩擦系数的影响

转速对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料质量磨损率的影响如图6所示。水润滑时随转速的增大,复合材料的质量磨损率先减小,在250  $r/min$ 时最低,随后

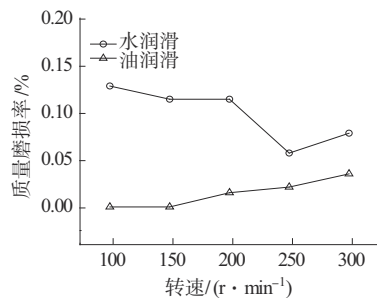
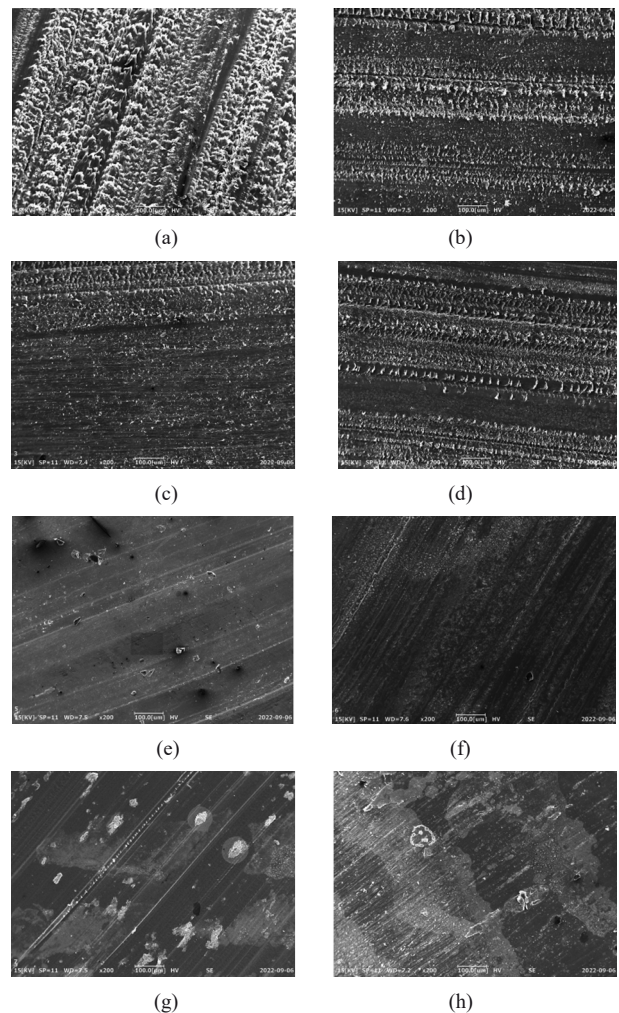


图6 转速对PA6/nano-SiO<sub>2</sub>复合材料质量磨损量的影响

增大到300  $r/min$ 时又有增大。转速为300  $r/min$ 时,摩擦表面温升增加,基体转移增多,且可能因为聚合物基体的黏度增加而使得其和对偶的附着增强,从而磨损增大。而在油润滑时,随着转速的增大,材料的质量磨损率很低,有稍微增大的趋势,300  $r/min$ 时仅为0.035%。

### 2.3 摩擦磨损机理分析

图7为PA6及PA6/nano-SiO<sub>2</sub> (质量分数为5%)在不同条件下的磨损表面形貌SEM图。由图7a~图7d可以看出,在油润滑条件下,磨损表面以犁沟分布为主,纯PA6属于犁沟磨损机制,犁沟多且深,伴有塑性变形,如图7a所示。加入nano-SiO<sub>2</sub>后,材



油润滑条件:a—PA6,60 N,200  $r/min$ ;b—PA6/nano-SiO<sub>2</sub>,60 N,200  $r/min$ ;c—PA6/nano-SiO<sub>2</sub>,100 N,200  $r/min$ ;d—PA6/nano-SiO<sub>2</sub>,60 N,300  $r/min$   
水润滑条件:e—PA6,60 N,200  $r/min$ ;f—PA6/nano-SiO<sub>2</sub>,60 N,200  $r/min$ ;g—PA6/nano-SiO<sub>2</sub>,100 N,200  $r/min$ ;h—PA6/nano-SiO<sub>2</sub>,60 N,300  $r/min$

图7 PA6复合材料的磨损表面形貌SEM图

料没有明显的塑性变形,只有少量浅犁沟,nano-SiO<sub>2</sub>提高了PA6的力学性能,提高了抗犁削能力,改善了摩擦磨损性能。载荷从60 N增大到100 N、转速从200 r/min增大到300 r/min,材料的磨损形貌仍然是以犁沟为主,但划痕更轻微。图7e~图7h为水润滑条件下的磨损形貌:如图7e所示,纯PA6的磨损表面存在划痕和磨损碎屑,碎屑起到磨粒的作用,磨损机理主要为黏着磨损和磨粒磨损。加入nano-SiO<sub>2</sub>后,材料表面的磨屑明显减少,磨损表面存在少量凹坑和犁沟,可能nano-SiO<sub>2</sub>减少了PA6的黏着和转移。载荷和转速增大,材料表面磨屑增多,并被碾压嵌入材料表面,高载荷下,材料发生塑性变形,致使表面材料分离,黏着转移增多。在高转速时,材料表面发生热应力软化,磨损加剧。

### 3 结论

(1) 在载荷为60 N,转速200 r/min条件下,nano-SiO<sub>2</sub>的加入降低了PA6的摩擦系数和质量磨损率,水润滑条件下,摩擦系数随nano-SiO<sub>2</sub>含量变化不大,油润滑条件下,摩擦系数随nano-SiO<sub>2</sub>质量分数增大先减小后增大,在nano-SiO<sub>2</sub>为5%时最低,为0.11。油润滑条件下PA6复合材料的质量磨损率随nano-SiO<sub>2</sub>含量变化不大,都低于0.02%;水润滑条件下PA6复合材料质量磨损率随nano-SiO<sub>2</sub>质量分数增大先减小后增大,在nano-SiO<sub>2</sub>为5%时最低。

(2) nano-SiO<sub>2</sub>质量分数为5%时,载荷增大:PA6复合材料的摩擦系数在水润滑条件下先减小后增大,而油润滑条件下摩擦系数变化不大,质量磨损率在水润滑条件下先增大后减小,油润滑条件下一直降低;转速增大:两种润滑条件下,PA6复合材料摩擦系数都是先减小后增大,质量磨损率在水润滑条件下先减小后增大,在油润滑条件下随转速增大而增大。

(3) 油润滑条件下,PA6及复合材料属犁沟磨损机制,水润滑时,磨损机理以黏着磨损和磨粒磨损为主。

### 参考文献

- [1] 钟明强,孙莉,郭绍义.纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>增强PA6复合材料的摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,2004,24(2):148-151.  
Zhong Mingqiang, Sun Li, Guo Shaoyi. Friction and wear properties of PA6 composites filled with nanocrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. Tribology, 2004, 24(2): 148-151.
- [2] You Yilan, Liu Chenming, Li Duxin, et al. Tribological and flame retardant modification of polyamide-6 composite[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(1): 88-97.
- [3] 王刚,杨祖华,阎逢元,等.高填充Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-聚丙烯酰胺复合材料的摩擦学特性[J].高分子材料科学与工程,2005,21(1):199-202.  
Wang Gang, Yang Zuhua, Yan Fengyuan, et al. Tribological study of high content alumina filled polyacryamide composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2005, 21(1): 199-202.
- [4] 刘高尚,刘雅玄,黄国栋,等.碳纤维增强水性聚酰胺酰亚胺涂层摩擦学性能[J].塑料,2021,50(3):28-32.  
Liu Gaoshang, Liu Yaxuan, Huang Guodong, et al. Tribological properties of carbon fiber reinforced water-based polyamideimide composite coatings[J]. Plastics, 2021, 50(3): 28-32.
- [5] Zhen Jinming, Han Yunxiang, Zhu Lili, et al. MoS<sub>2</sub>/CF synergistic enhancement to improve the friction and wear properties of UHMWPE composites[J]. Tribology International, 2023, 179: 10 897-10 905.
- [6] 邵鑫,田军,刘维民,等.纳米TiO<sub>2</sub>填充聚醚砜酮复合材料的摩擦学性能[J].高分子材料科学与工程,2003,19(3):208-211.  
Shao Xin, Tian Jun, Liu Weimin, et al. Friction and wear properties of nanometer TiO<sub>2</sub> particle filled poly(phthalazine ether sulfone ketone) composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2003, 19(3): 208-211.
- [7] 邵鑫,田军,刘维民,等.纳米SiO<sub>2</sub>对聚醚砜酮复合材料摩擦学性能的影响[J].材料工程,2002,30(2):38-42.  
Shao Xin, Tian Jun, Liu Weimin, et al. Effect of nanometer SiO<sub>2</sub> particle on the friction and wear properties of poly (phthalazine ethersulfone ketone) composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2002, 30(2): 38-42.
- [8] 汪怀远,朱艳吉,冯新,等.腐蚀环境中纤维增强聚四氟乙烯复合材料的摩擦磨损性能研究[J].中国塑料,2009,23(9):59-62.  
Wang Huaiyuan, Zhu Yanji, Feng Xin, et al. Tribological behavior of fibers-reinforced PTFE composites in acid solution[J]. China Plastics, 2009, 23(9): 59-62.
- [9] 孟凡宁,邓春华.不同条件下环氧树脂的摩擦磨损性能研究[J].热固性树脂,2009,24(5):47-50.  
Meng Fanning, Deng Chunhua. Friction and wear properties of epoxy resin under different conditions[J]. Thermosetting Resin, 2009, 24(5): 47-50.
- [10] 陈兆彬,李同生,杨玉良,等.聚酰胺/聚苯硫醚共混物摩擦学性能研究--(II)水润滑[J].高分子材料科学与工程,2003,19(6):108-110.  
Chen Zhaobin, Li Tongsheng, Yang Yuliang, et al. Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blends--(II) water lubrication [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2003, 19(6): 108-110.
- [11] 徐海燕,周惠娣,陈建敏,等.火焰喷涂PA1010涂层的制备及其摩擦学性能研究[J].摩擦学学报,2004,24(4):313-317.  
Xu Haiyan, Zhou Huidi, Chen Jianmin, et al. Preparation and tribological behavior of flame-sprayed PA1010 coatings[J]. Tribology, 2004, 24(4): 313-317.

(下转第152页)