复合材料学报 第30卷 第4期 8月 2013年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 30 No. 4 August 2013

文章编号：1000-3851(2013)04-0059-07

空心微珠-碳纤维共混改性聚酰亚胺复合材料的摩擦学性能

黄伟九*，叶 峰，赵 远，王选伦
（重庆理工大学 材料科学与工程学院，重庆 400054）

摘 要： 通过模压成型制备了碳纤维与空心微珠共混改性的聚酰亚胺复合材料，采用MRH-3型摩擦磨损试验机研究了空心微珠含量、滑动速度及载荷对复合材料摩擦学性能的影响，并对其磨损形貌及机制进行了分析。结果表明：空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料摩擦学性能优于其单独填充的聚酰亚胺基复合材料；空心微珠含量对共混改性的复合材料摩擦系数影响不大，但其磨损率随着空心微珠含量的增加先减小后增大；15%空心微珠—10%碳纤维(质量分数)共混增强的复合材料的减摩耐磨性能最佳；随着滑动速度提高，空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的摩擦系数下降，磨损率增大；空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料摩擦系数随着载荷增加先下降后上升，而磨损率则随着载荷增加而增大；空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺的主要磨损机制在较低载荷时为磨粒磨损，在较高载荷时为粘着磨损和磨粒磨损。

关键词： 聚酰亚胺；碳纤维；空心微珠；复合材料；摩擦学性能
中图分类号： TB332；TH117.1 **文献标志码：** A

Tribological properties of cenosphere and carbon fiber reinforced polyimide composites

HUANG Weijiu*, YE Feng, ZHAO Yuan, WANG Xuanlun
(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Polyimide (PI) composites reinforced by cenosphere and carbon fiber (CF) were prepared by compression molding. The effects of load, sliding speed and content of cenosphere on tribological performances of the composites were evaluated on MRH-3 ring-on-block wear tester, and the wear morphology and mechanism were also analyzed. The results show that carbon fiber and cenosphere have the synergistic effect on the tribological properties of cenosphere-carbon fiber/polyimide composites; the tribological properties of the composite filled by cenosphere and carbon fiber were superior than those filled by single incorporation of cenosphere or carbon fiber. The content of cenosphere has little impact on the friction coefficient of cenosphere-carbon fiber/polyimide composites, but the wear rate declines with the increase of load and then improves. The 15% cenosphere-10% carbon fiber(mass fraction)/polyimide composite exhibits the lowest friction coefficient and wear rate. As an increase of the sliding speed, the friction coefficient of the composites decreases and the wear rate increases. The friction coefficient of the composite declines with the increase of load and then rises, but the wear rate increases with the increase of load. It is found that the main wear mechanism of the cenosphere-carbon fiber/polyimide is abrasive wear in the case of lower load, and shifts to the adhesive wear and abrasion while under higher load.

Keywords: polyimide; carbon fiber; cenosphere; composite; tribological performance

聚酰亚胺具有优良的热稳定性、力学性能以及抗辐射和耐溶剂性能，而且在高温、高压和高速等极限环境下具有优异的减摩抗磨性能，是一类优良的适于极端和特殊工况领域摩擦系统的基体材料[1-2]。但纯聚酰亚胺的抗拉、抗压强度较低，不宜单独作为摩擦材料，而加入增强纤维或无机填料后可得到力学性能和摩擦学性能优异的聚酰亚胺基复合材料[3]。许多学者研究了纤维和填料特性及其

收到初稿日期： 2012-09-04；**收到修改稿日期：** 2012-12-03；**网络出版时间：** 2013-01-18 11:50:40
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130118.1150.015.html
DOI： CNKI：11-1801/TB. 20130118.1150.015
基金项目： 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110828)
通讯作者： 黄伟九，博士，教授，主要从事材料摩擦学及功能材料研究 E-mail：hwj_surfacegroup@cqut.edu.cn

表面处理对聚酰亚胺基复合材料性能的影响[4-9]。陈震霖等研究了填料特性(玻璃纤维、玻璃纤维粉和玻璃微珠)对聚酰亚胺基复合材料摩擦学性能的影响。发现，大尺寸填料与基体的界面面积和结合强度大于小尺寸填料，其磨损率比小尺度填料的材料低[4]。高鑫等[5]研究了复合处理碳纤维增强聚酰亚胺复合材料力学性能。发现，碳纤维经浓 HNO_3 处理后比表面积增加 144.2%，碳纤维表面沟壑加深，有聚酰亚胺层包覆在其表面，且碳纤维耐热性能提高。经过包覆处理后碳纤维/聚酰亚胺复合材料的拉伸强度比未处理的提高 11.34%，弹性模量提高 109.2%，弯曲强度提高 18.78%，冲击强度提高 74.15%。Wang 等[6]研究了短切碳纤维、石墨和纳米 Si_3N_4 对聚酰亚胺摩擦磨损行为的影响。结果表明，碳纤维和石墨单独填充聚酰亚胺时能改善其减摩抗磨性能，而纳米 Si_3N_4 单独填充时则对其抗磨性能有负面影响；三种物质具有协同效应，当其共同填充聚酰亚胺时摩擦学性能最优。同时发现，低含量的碳纤维填充聚酰亚胺可起到减摩作用，但含量过低时增强效果不明显，而纤维含量过高则会导致纤维从基体中脱离增多从而增大磨损[10]。

空心微珠是一种中空、硬质的新型无机材料，主要成分是 SiO_2 和 Al_2O_3。具有孔隙率低、填充量高、保温隔热、耐火防水、防辐射、耐腐蚀、自润滑、绝缘、无毒性等诸多优点[11-13]；同时空心微珠作为填料可避免像加入不规则形状或带有棱角粒料所造成的降低复合材料力学性能的应力集中现象，用于高分子材料的改性已取得良好的效果[12]，并且价格相对低廉；因而在建材，化学化工、机械制造等众多领域展示了广阔的应用前景。

目前对碳纤维与空心微珠共混改性的聚酰亚胺基复合材料研究的文献报道尚少，本文作者选用10%碳纤维与不同含量空心微珠共混填充聚酰亚胺制备新的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料，考察了共混改性复合材料的摩擦学性能和机制，以期获得价廉质优的新型聚酰亚胺基复合材料，为该复合材料在工程领域的应用提供理论依据和参考。

1　实验材料及方法

1.1　原料及试样制备

聚酰亚胺模塑粉由沁阳天益化工公司提供，为淡黄色粉末状固体，玻璃化温度(T_g)为 220 ℃。碳纤维由华碳复合材料公司提供，单丝直径为 7 μm，单丝长度为 3 mm。空心微珠由深圳微纳超细材料公司提供，其组成(质量分数)为 55% ～ 65% SiO_2，26% ～ 35% Al_2O_3，1% ～ 5% Fe_2O_3，0.5% ～ 2% TiO_2，1.5% ～ 6% MgO(CaO、Na_2O、K_2O)，0.01% ～ 2% C，平均粒径为 5 μm，堆积密度 1.2 g/cm^3。KH560 硅烷偶联剂由上海晶纯试剂公司提供。无水乙醇和脱模剂均为市售。

将质量分数为无机填料 1%的 KH560 硅烷偶联剂用无水乙醇稀释，并与空心微珠混合，用电动搅拌机搅拌 30 min 至均匀，之后在超声波振荡仪中振荡分散 30 min，烘干至恒重，研磨过筛。将碳纤维和空心微珠与聚酰亚胺模塑粉混合搅拌均匀，其中碳纤维质量分数为 10%，保持恒定，空心微珠的质量分数分别为 5%、10%、15%和 20%。将混好的粉料加入金属模具，以 20 MPa 预压 2 次，每次 10 min，连续升温至 340 ℃，保温保压 2 h；降至室温卸压开模，得到空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料模压件，试样经机加工后，用 800# 水砂纸打磨表面至表面粗糙度 R_a 为 0.2 μm。图 1 为碳纤维和空心微珠在聚酰亚胺中分布的照片(空心微珠的填充量为 10%)。可以看出，碳纤维和空心微珠在聚酰亚胺中的分布比较均匀。

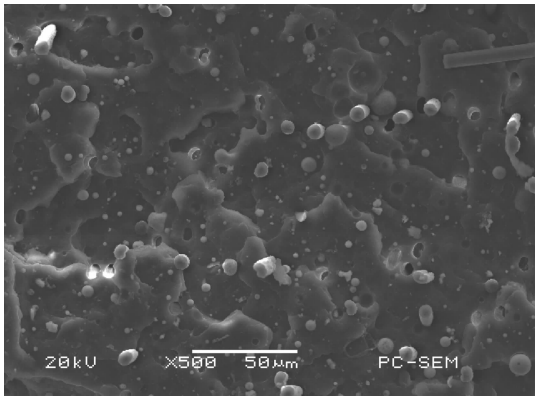


图 1　空心微珠和碳纤维在聚酰亚胺中的分布
(10%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺，横断面)
Fig. 1　Distribution of carbon fiber and cenosphere in polyimide
(10% cenosphere - 10% carbon fiber/polyimide composite, cross section)

1.2　试验方法

使用 MRH-3 环-块摩擦磨损试验机测试复合材料的摩擦学性能，其中试环为 CrWMn 淬火钢环，其尺寸为 Φ49 mm×12.7 mm，表面粗糙度 R_a 为 0.27 μm，硬度为 HRC59～HRC62；试块为空心

微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料，摩擦副接触形式为线接触。试验条件：载荷 200～450 N，转速为 400 r/min(相当于滑动速度 1.03 m/s)和 600 r/min，室温，干摩擦，试验时间 10 min。摩擦系数由试验机自动记录，采用精密电子天平(精度为 0.1 mg)测定空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料磨损质量损失，并以单位滑动距离内的磨损质量作为磨损率，试验结果均为 3 次的平均值。复合材料拉伸强度用 MT6104 电子拉伸试验机按 GB/T 1040－2006[14] 测试，硬度用 A－200 型布(洛、维)氏硬度计测定试样的维氏硬度。用 JSM－6460LV 扫描电子显微镜观察磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺力学性能

表 1 为聚酰亚胺及空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的硬度和拉伸强度数据。可知，与纯聚酰亚胺相比，添加 15%空心微珠的空心微珠/聚酰亚胺复合材料拉伸强度下降了 16.7%，而硬度提高了 8.6%。这是由于空心微珠为高模量的硬质材料，可在一定程度上提高复合材料的硬度，却不能进行拉伸；尽管其在填充聚酰亚胺之前经过偶联处理，但黏性的聚酰亚胺树脂与刚性的空心微珠之间的结合强度不够高，因此在受到拉伸时两者容易脱落，导致拉伸强度下降。由于碳纤维具有很高的比强度和比模量，而且纤维之间有一定的相互缠绕，因此可在一定程度上提高聚酰亚胺的抗拉强度和硬度。当碳纤维与空心微珠共混增强聚酰亚胺时，空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的硬度大于聚酰亚胺基体和空心微珠/聚酰亚胺，但较碳纤维/复合材料硬度低，且复合材料的硬度随着空心微珠含量增加平缓下降。这主要是空心微珠的比强度和比模量低于碳纤维，因此对聚酰亚胺基体硬度的提升效果没有碳纤维明显，且随着空心微珠填充量增加，两相界面的缺陷增加，基体的连续性降低，支撑负荷的基体减少，导致硬度下降。空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的拉伸强度也随空心微珠含量增加而降低，但其随空心微珠含量增加的变化趋势与复合材料硬度的变化趋势有较大区别。当空心微珠的含量从 0 增加至 15%时，空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的拉伸强度从 93.1 MPa 降至 80.2 MPa，下降了 14%；但当空心微珠含量增至 20%时，复合材料的拉伸强度显著下降，仅为 58.2 MPa，较仅添加 10%碳纤维的复合材料下降了37.5%。分析认为：尽管空心微珠的硬度比碳纤维低，但添加一定量的空心微珠作为强化相可有效填充碳纤维和聚酰亚胺树脂的孔隙，因此共混增强的复合材料拉伸强度降低不明显；但随着空心微珠填充量增加，空心微珠在基体中的分散均匀性明显变差，部分空心微珠之间由于无树脂粘结而出现团聚现象，进而导致复合材料内部微裂纹等缺陷增加，材料脆性增大；当受到拉应力作用时，微裂纹迅速扩展而导致材料破坏[15]，因此空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料中空心微珠含量过高，复合材料的拉伸强度下降幅度显著增大。

表 1 空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical property of cenosphere－carbon fiber/polyimide composites

Codes	Composites	Hardness/GPa	Tensile strength/MPa
A	Pure PI	0.315	78.1
B	PI＋15%Cenosphere	0.342	65.9
C	PI＋10%CF	0.464	93.1
D	PI＋10%CF＋5%Cenosphere	0.413	88.6
E	PI＋10%CF＋10%Cenosphere	0.384	85.4
F	PI＋10%CF＋15%Cenosphere	0.374	80.2
G	PI＋10%CF＋20%Cenosphere	0.362	58.2

Note：PI—Polyimide；CF—Carbon fiber.

2.2 复合材料的摩擦学性能

图 2 为不同填充物对聚酰亚胺基复合材料摩擦学性能的影响。从图 2(a)可以看出，无论是空心微珠和碳纤维单独填充还是其共混填充形成的复合材料，其摩擦系数均小于聚酰亚胺的摩擦系数；且空心微珠与碳纤维共混增强聚酰亚胺的复合材料摩擦系数比其单独填充的复合材料摩擦系数小，但空心微珠含量变化对复合材料摩擦系数的影响不大。随着滑动速度的提高，复合材料的摩擦系数下降。由图 2(b)可以看出，空心微珠和碳纤维共混增强的复合材料磨损率低于它们单独填充的复合材料，且复合材料的磨损率随空心微珠含量的提高先减小后变大，本研究中 15%空心微珠－10%碳纤维共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的耐磨性能最佳；同时随着滑动速度提高，复合材料的磨损率增大，但共混增强复合材料的磨损率随滑动速度增加而提高的幅度明显小于聚酰亚胺以及碳纤维或

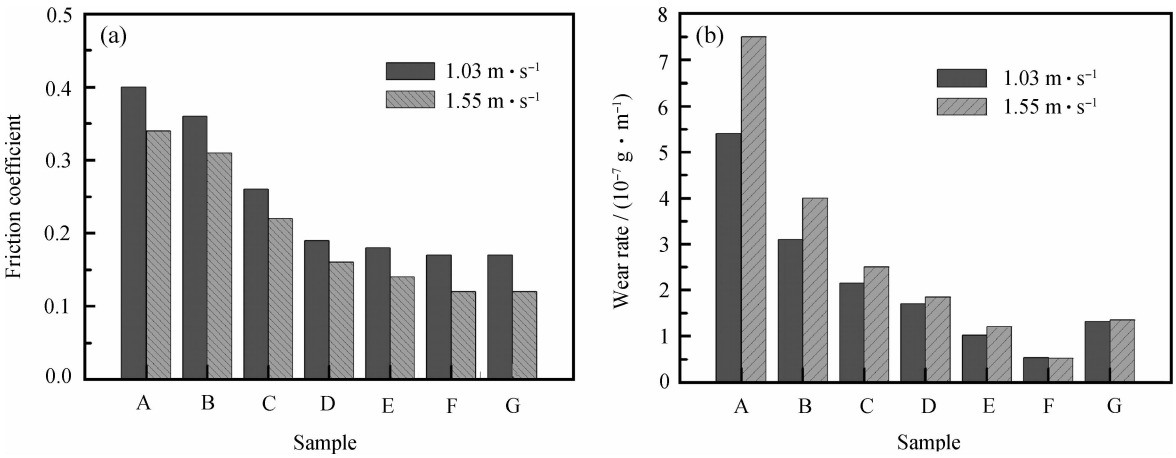


图 2　空心微珠含量对空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料摩擦学性能的影响(300 N)

Fig. 2　Effect of different fillers on the tribological properties of cenosphere - carbon fiber/polyimide composites(300 N)

空心微珠单独增强的复合材料。上述试验现象说明碳纤维和空心微珠在改善聚酰亚胺摩擦学性能上具有协同效应，共混改性的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料具有摩擦系数小、磨损率低的特点，且耐磨性能受摩擦热的影响较小。分析认为：碳纤维硬度远高于聚酰亚胺基体，而空心微珠能有效填充碳纤维和聚酰亚胺基体的缝隙，它们共同在聚酰亚胺基体中充当支撑点的作用，承载外部负荷；在一定的载荷和滑动速度范围内，其承载作用能阻断犁沟的扩展及聚酰亚胺的塑性变形，阻止磨粒的嵌入和切削，从而提高聚酰亚胺体系的耐磨性。同时摩擦过程中由于球形的空心微珠在摩擦副之间能起到类似滚珠轴承的作用，改变了摩擦副的运动模式，使摩擦系数有效降低[11]；因此添加适量的空心微珠能有效改善空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的减摩抗磨性能。随着空心微珠含量增加，其在聚酰亚胺基体中的分散性变差，影响了基体的连续性，在摩擦力的作用下，空心微珠的聚集体以及与基体粘结不牢的碳纤维和空心微珠很容易从复合材料表层拔出或脱落，从而使复合材料抗磨性能降低。

图 3 为聚酰亚胺、15%空心微珠/聚酰亚胺、10%碳纤维/聚酰亚胺和 15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺四种材料在不同载荷时的磨损率。可以发现，随着载荷增加，四种材料的磨损率均提高，但磨损率随载荷变化的增加幅度因材料不同而有所差异；碳纤维和/或空心微珠增强的聚酰亚胺复合材料磨损率均低于聚酰亚胺的磨损率，且碳纤维和空心微珠共混增强的空心微珠-碳纤

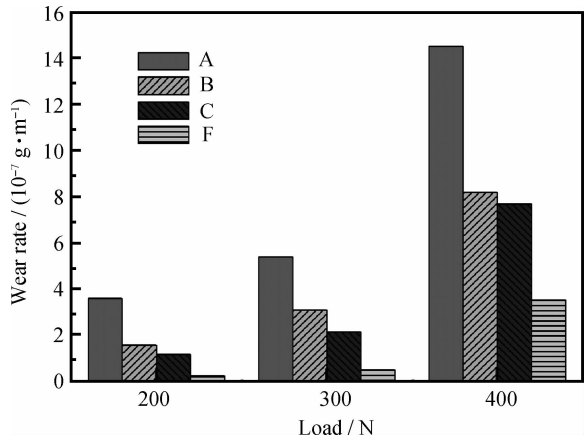


图 3　空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺磨损率随载荷的变化柱状图

Fig. 3　Bar graph of variations of wear rate of cenosphere - carbon fiber/polyimide composites with load

维/聚酰亚胺复合材料磨损率较低，这进一步说明碳纤维和空心微珠在改善聚酰亚胺摩擦学性能上具有协同效应。分析认为：随着载荷增加，摩擦副的真实接触面积提高，在摩擦接触区产生的摩擦热也随之增加，由于聚酰亚胺是热的不良导体，致使摩擦热在摩擦表面积聚，使摩擦表面温度升高，试样表面层变软，且在摩擦过程发生塑性变形，导致磨损率显著提高。由于碳纤维和空心微珠具有较高的强度和刚度、良好的导热性和自润滑性能，有助于摩擦接触区热量的传导或散发，使摩擦区温度增加幅度减小，同时也有助于聚酰亚胺向对偶件表面转移，生成薄而连续均匀的转移膜，减轻犁削、撕裂及其他非黏性磨损，使材料耐磨性提高[16]。图 4 为 15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺复合材料的摩擦系数和磨损率随载

荷的变化曲线。可见，摩擦系数随载荷的增加先下降后上升，而磨损率随载荷增加单调增加且在载荷大于 350 N 时磨损率增加的速率增大。分析认为：由于载荷增加，复合材料摩擦表面温度上升，剪切强度下降，导致摩擦系数降低，但磨损率呈增加趋势；随着载荷的进一步增加，摩擦表面温度持续升高，尤其当摩擦表面温度超过一定数值后就会导致摩擦表面塑性变形和粘着加剧，使摩擦系数和磨损率呈上升趋势。

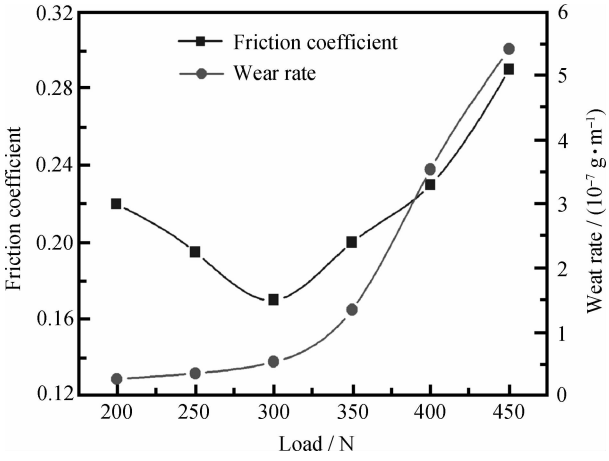


图 4　15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺的摩擦系数和磨损率随载荷的变化曲线

Fig. 4　Variation curves of friction coefficient and wear rate of 15% cenosphere-10% carbon fiber/polyimide composite with load

2.3　磨损表面形貌分析

图 5 为聚酰亚胺磨损表面 SEM 照片。可见，纯聚酰亚胺试样磨损表面有许多凹凸状的隆起和小坑，有明显的塑性变形特征；存在较多的片状撕裂和脱落的磨屑，说明摩擦表面发生了强烈粘着，同时局部应力集中使摩擦面产生微裂纹，微裂纹在摩擦过程中贯穿后使表面层形成脱落，因此疲劳磨损和粘着磨损是聚酰亚胺的主要磨损机制。图 6 为 15%空心微珠/聚酰亚胺、10%碳纤维/聚酰亚胺和 15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺的磨损表面 SEM 照片。由图 6(a)、6(b)可以发现，在 200 N 时，15%空心微珠/聚酰亚胺复合材料的摩擦表面较光滑，表面有一些与运动方向一致的犁沟及经碾压破碎的空心微珠，因此在 200 N 时磨粒磨损是主要的磨损机制；而在 400 N 时复合材料的磨损表面出现了较多的片状撕裂，

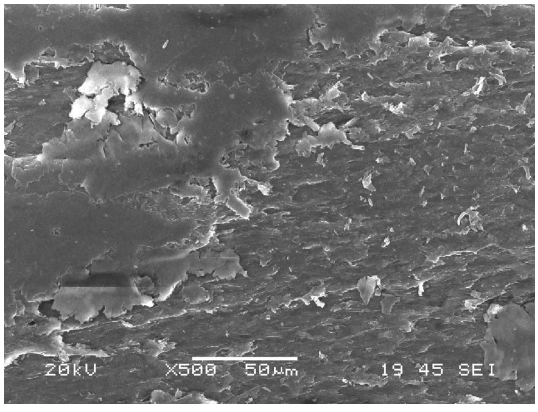
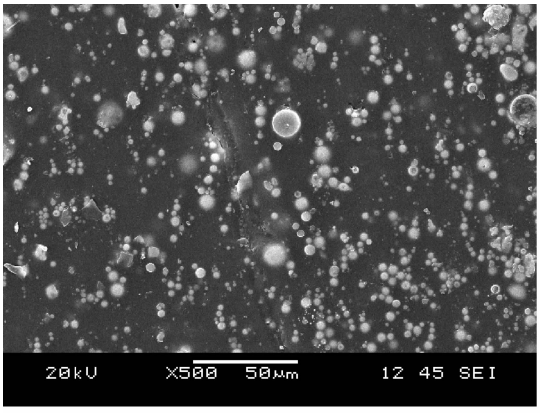


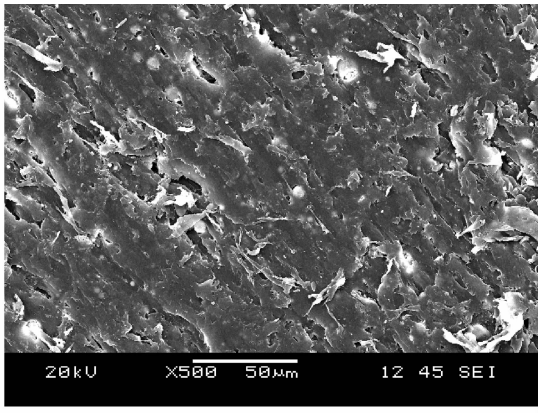
图 5　聚酰亚胺磨损表面形貌的 SEM 照片(200 N)

Fig. 5　SEM photograph of worn surface morphology of pure polyimide (200 N)

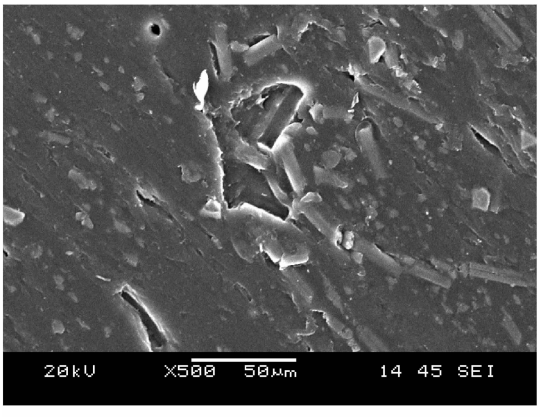
一些磨碎或完整的空心微珠裸露在表面或被埋在基体中，这是在法向载荷与切向摩擦力的共同作用下，摩擦表面产生疲劳裂纹，之后裂纹沿着颗粒的边界萌生和扩展，最终导致空心微珠随基体的整体脱落或破碎，而成为磨屑；粘着磨损和疲劳磨损是 15%空心微珠/聚酰亚胺复合材料的主要磨损机制。由图6(c)和 6(d)可发现，在 200 N 时磨损表面整体比较平整，有一些碳纤维拔脱后形成的空洞、磨损断裂的碳纤维碎片及碎片刮擦复合材料表面形成的犁沟，因此粘着磨损和磨粒磨损是 10%碳纤维/聚酰亚胺的主要磨损机制；而在 400 N 时磨损表面由于摩擦挤压作用呈波纹状，有明显的塑性变形特征，拔出和断裂的碳纤维附着在磨损表面或埋在基体的浅表层，碳纤维与聚酰亚胺基体之间有明显间隙，因此疲劳磨损是 10%碳纤维/聚酰亚胺的主要磨损机制。由图 6(e)可以发现，在 200 N 时 15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺复合材料的磨损表面总体较光滑，但有少量碳纤维与空心微珠在摩擦时断裂、刮擦和被碾压造成的小颗粒及片状剥落物以及与运动方向一致的犁沟，磨损机制主要表现为磨粒磨损。图 6(f)表明，在 400 N 时 15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺复合材料磨损表面上有部分碳纤维被拔出，有空心微珠受到碾压形成的碎屑以及在磨损表面形成的犁沟和划痕，部分区域由于粘着效应而出现表层剥落迹象，表明在较高载荷时 15%空心微珠-10%碳纤维/聚酰亚胺复合材料的磨损机制主要表现为粘着磨损和磨粒磨损。



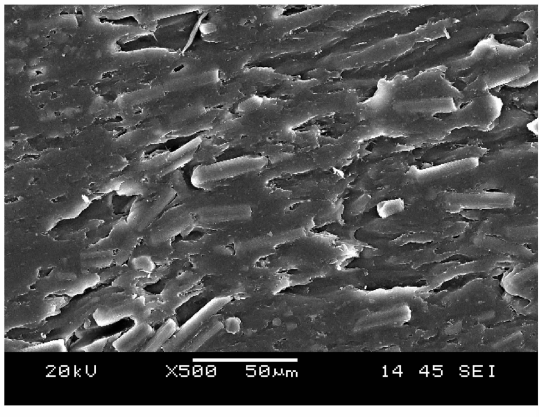
(a) 15% cenosphere/polyimide (200 N)



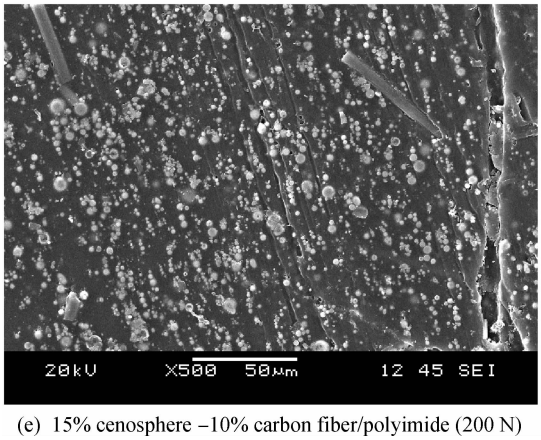
(b) 15% cenosphere/polyimide (400 N)



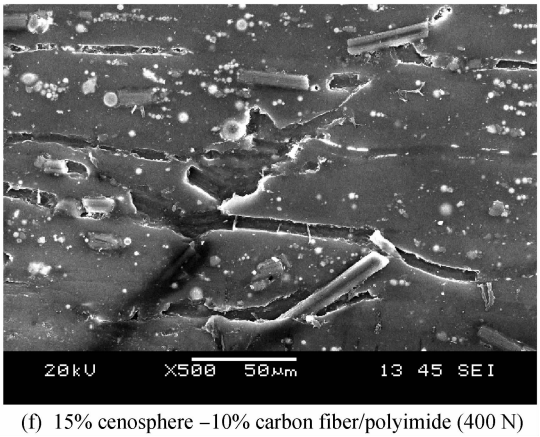
(c) 10% carbon fiber/polyimide (200 N)



(d) 10% carbon fiber/polyimide (400 N)



(e) 15% cenosphere –10% carbon fiber/polyimide (200 N)



(f) 15% cenosphere –10% carbon fiber/polyimide (400 N)

图 6　空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料磨损表面形貌的 SEM 照片

Fig. 6　SEM photographs of worn surface morphology of cenosphere - carbon fiber/polyimide composites

3　结　论

（1）碳纤维和空心微珠共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺复合材料的硬度大于聚酰亚胺基体和空心微珠单独增强的空心微珠/聚酰亚胺，但较碳纤维增强的碳纤维/聚酰亚胺复合材料硬度低。碳纤维和空心微珠共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺的硬度和拉伸强度均随空心微珠含量增加而降低，其中硬度呈稳步降低的趋势，而拉伸强度在空心微珠含量大于 15%时显著下降。

（2）碳纤维和/或空心微珠改性的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺的摩擦学性能优于聚酰亚胺，且空心微珠和碳纤维共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺摩擦学性能优于它们单独填充的复合材料；空心微珠的含量对其与碳纤维共混增强的聚酰亚胺的

摩擦系数影响不大，但复合材料的磨损率随空心微珠含量的提高先减小后增大，15%空心微珠-10%碳纤维共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺的减摩耐磨性能最佳；随着滑动速度提高，空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺的摩擦系数下降，磨损率增大；共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺摩擦系数随载荷的增加先下降后上升，而磨损率则随载荷的增加单调增加。

（3）聚酰亚胺的磨损机制主要为粘着磨损和疲劳磨损；碳纤维或空心微珠单独增强的碳纤维或空心微珠/聚酰亚胺主要磨损机制在较低载荷时为磨粒磨损或粘着磨损，在较高载荷时为粘着磨损和疲劳磨损；碳纤维和空心微珠共混增强的空心微珠-碳纤维/聚酰亚胺主要磨损机制在较低载荷时为磨粒磨损，在较高载荷时为粘着磨损和磨粒磨损。

参考文献：

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报，2007，24(1)：1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(1)：1-12.

[2] Xie W，Pan W P，Chuang K C. Thermal characterization of PMR polyimides[J]. Thermochimica Acta，2001，367-368：143-153.

[3] 杨景锋，裴先强，王齐华，王廷梅. 二硫化钼/炭纤维对聚酰亚胺复合材料摩擦学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程，2010，26(8)：50-53.
Yang Jingfeng，Pei Xianqiang，Wang Qihua，Wang Tingmei. Effect of the incorporation of molybdenum disulfide and carbon fiber on the tribological properties of polyimide composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering，2010，26(8)：50-53.

[4] 陈震霖，朱　鹏，王晓东，黄　培. 填料特性对聚酰亚胺复合材料摩擦学性能的影响[J]. 复合材料学报，2006，23(3)：49-53.
Chen Zhenlin，Zhu Peng，Wang Xiaodong，Huang Pei. Effects of properties of the fillers on the polyimide composite tribological behaviors[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2006，23(3)：49-53.

[5] 高　鑫，宋艳江，王晓东，黄　培. 复合处理碳纤维增强聚酰亚胺复合材料力学性能[J]. 复合材料学报，2009，26(3)：50-54.
Gao Xin，Song Yanjiang，Wang Xiaodong，Huang Pei. Mechanical properties of compound modification carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(3)：50-54.

[6] Wang Qihua，Zhang Xinrui，Pei Xianqiang. Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites[J]. Materials & Design，2010，31(8)：3761-3768.

[7] Zhang Xinrui，Pei Xianqiang，Wang Qihua. Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO_2[J]. Materials & Design，2009，30(10)：4414-4420.

[8] Zhang Xinrui，Pei Xianqiang，Wang Qihua. The tribological properties of acid-and diamine-modified carbon fiber reinforced polyimide composites[J]. Materials Chemistry and Physics，2009，115(2/3)：825-830.

[9] Samyn P，Schoukens G. Thermochemical sliding interactions of short carbon fiber polyimide composites at high pv-conditions[J]. Materials Chemistry and Physics，2009，115(1)：185-195.

[10] 王晓东，王　筱，朱　鹏，黄　培. 碳纤维增强热塑性聚酰亚胺的力学性能和摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料，2005，29(11)：42-45.
Wang Xiaodong，Wang Xiao，Zhu Peng，Huang Pei. Mechanical properties and tribological performance of plastic polyimide reinforced by carbon fibers[J]. Materials for Mechanical Engineering，2005，29(11)：42-45.

[11] 崔　健，陈国需，赵立涛，周　骥，龚　斌. 表面修饰空心微珠作为润滑脂添加剂的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报，2010，30(6)：532-536.
Cui Jian，Chen Guoxu，Zhao Litao，Zhou Ji，Gong Bin. Surface-modified cenosphere as a lubricating additive in calcium complex grease[J]. Tribology，2010，30(6)：532-536.

[12] Chand N，Sharma P，Fahim M. Correlation of mechanical and tribological properties of organosilane modified cenosphere filled high density polyethylene[J]. Materials Science and Engineering A，2010，527(21/22)：5873-5878.

[13] Jha N，Badkul A，Mondal D P，Das S，Singh M. Sliding wear behaviour of aluminum syntactic foam：A comparison with Al-10 wt% SiC composites[J]. Tribology International，2011，44(3)：220-231.

[14] 国家合成树脂质量监督检验中心. GB/T 1040—2006 塑料拉伸性能的测定[S]. 北京：中国标准出版社，2007.
National Quality Supervision and Inspection Center of Synthetic Resin. GB/T 1040—2006 The determination of the tensile properties of plastics[S]. Beijing：China Standards Press，2007.

[15] 葛世荣，张德坤，朱　华，王军祥. 碳纤维增强尼龙1010的力学性能及其对摩擦磨损的影响[J]. 复合材料学报，2004，21(2)：99-104.
Ge Shirong，Zhang Dekun，Zhu Hua，Wang Junxiang. Mechanical properties and their influence on the friction and wear of the carbon fibers reinforced polyamide 1010[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(2)：99-104.

[16] Cai H，Yan F Y，Xue Q J. Investigation of tribological properties of polyimide/carbon nanotube nanocomposites[J]. Material Science and Engineering A，2004，364(1/2)：94-100.