

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.06.018

树脂含量对聚酰亚胺树脂基复合材料摩擦学性能的影响

王文华, 黄志江, 郑亚杰, 杨成刚, 吴集思

(南昌航空大学航空制造工程学院, 焊接工程系, 南昌 330063)

摘要:为明确树脂含量对复合材料摩擦学性能的影响,采用粉末冶金法成功制备了二硫化钨(WS_2)与碳化硅(SiC)协同改性增强含铜聚酰亚胺(PI)树脂基复合材料。利用X射线衍射仪、扫描电子显微镜、万能力学性能试验机、摩擦磨损试验机等手段探究了PI树脂含量对复合材料微观组织、物理力学性能、摩擦磨损性能及磨损机制的作用行为。结果表明,材料制备过程中仅存在树脂基体固化烧结,并未与增强相发生化学反应,从而确保各相充分发挥其性能。同时,发现PI树脂含量对复合材料显微组织存在显著影响,由 WS_2 与SiC形成的“核-壳”结构从高树脂含量下较大的扁平状转变成低树脂含量下的类球状及细小扁平状结构;且复合材料的致密度及显微硬度均随PI树脂含量的降低而呈现先增大后减小的趋势,压缩强度则呈上升趋势。PI树脂基复合材料的磨损率及平均摩擦系数随PI树脂含量的降低呈现出先减少后增加的趋势,当PI树脂质量分数为50%时复合材料获得了最低的摩擦系数(0.42)和磨损率[$0.89 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$]。随着PI树脂含量的减少,复合材料的磨损机制由磨粒磨损转变为疲劳磨损,最后转变为严重的磨粒磨损。

关键词:聚酰亚胺树脂;复合材料;摩擦磨损性能;磨损机制;“核-壳”结构

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)06-0109-07

Effects of Resin Content on Tribological Properties of Polyimide Resin Matrix Composites

Wang Wenhua, Huang Zhijiang, Zheng Yajie, Yang Chenggang, Wu Jisi

(Department of Welding Engineering, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Aviation University, Nanchang 330063, China)

Abstract : In order to clarify the influences of resin content on the tribological properties of composites, polyimide (PI) resin-based composites containing copper modified by tungsten disulfide (WS_2) and silicon carbide (SiC) were successfully prepared by powder metallurgy method. The effects of PI resin content on the microstructure, physical and mechanical properties, friction and wear properties and wear mechanism of the composites were investigated by using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, universal mechanical performance testing machine, friction and wear testing machine. The results indicate that the resin only undergoes solidification and sintering without any other chemical reactions with other reinforcement phases during the preparation process, ensuring that each phase can utilize its properties fully. Meanwhile, it is found that the resin content has a significant impact on the microstructure of its composites, the "core-shell" structure formed by WS_2 and SiC transforms from a large flat structure with high resin content to a spherical and fine flat structure with low resin content. The density and hardness of the composites show a trend of first increasing and then decreasing with the decrease of PI resin content, while the compressive strength shows an upward trend. The wear rate and average friction coefficient of the PI resin matrix composites show a trend of decreasing first and then increasing with the decrease of PI resin content. When the PI resin content is 50 wt%, the friction coefficient and wear rate of the composite achieve the minimum values of 0.42 and $0.89 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, respectively. The wear mechanism of the composites changes from abrasive wear to fatigue wear and then to severe abrasive wear as the resin content decreases.

Keywords : polyimide resin ; composite ; friction and wear properties ; wear mechanism ; "core-shell" structure

基金项目: 江西省重点研发一般计划项目(20202BBE53001)

通信作者: 吴集思, 讲师, 博士, 研究方向为树脂基复合材料、摩擦磨损材料

收稿日期: 2023-03-07

引用格式: 王文华, 黄志江, 郑亚杰, 等. 树脂含量对聚酰亚胺树脂基复合材料摩擦学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6): 109-115, 134.

Wang Wenhua, Huang Zhijiang, Zheng Yajie, et al. Effects of resin content on tribological properties of polyimide resin matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6): 109-115, 134.

聚酰亚胺(PI)树脂具有优异的耐热性^[1-3]、良好的自润滑性^[4]和耐磨性^[5]及高的化学稳定性^[6],已被广泛用作复合材料的基体。此外,PI在封装材料^[7]、结构件材料^[8]、隔热材料^[9]、摩擦材料^[10]、绝缘材料^[11]等材料领域发挥着重要作用。然而纯PI树脂作为摩擦材料时其摩擦系数不可进行调控且在长时间滑动摩擦过程中会发生咬边等现象,这大大限制了其工业应用^[12],尤其是针对现今安防摄像头底座材料,需要其具有一定范围的摩擦系数(介于0.3和0.5之间)及高的耐磨性。为扩大PI树脂适用范围并延长其使用寿命,通常对PI树脂进行增强相填充^[13]或改变复合材料的填料成分,以提高其摩擦磨损性能。

大量科研工作者对PI的摩擦磨损性能进行了广泛研究。陈霖霖等^[14]采用不同特性玻璃质刚性填料填充改性热塑性PI(TPI),并测定了干摩擦、水润滑和油润滑条件下材料的摩擦磨损性能,结果表明,复合材料的磨损率随着填料尺寸的增加而减小。李珍莲等^[15]采用粉末冶金法制备了纳米碳酸钙(CaCO_3)和石墨复合填充PI润滑材料,结果表明,纳米 CaCO_3 和石墨复合填充后,二者存在协同效应,减摩抗磨能力显著提高。众所周知,铜(Cu)因其优异的导热与导电性被广泛地应用在摩擦材料中^[16]。尹宇航等^[17]也采用热压烧结法成功制备了笼形聚倍半硅氧烷(POSS)及二氧化硅(SiO_2)、碳纳米管(CNTs)和Cu粉协同改性PI复合材料,并对其高温摩擦学性能进行了着重表征,结果表明,改性配方为3% POSS,3% SiO_2 ,0.5% CNTs和3% Cu粉(均为质量分数)的复合材料综合性能最优,在高温下的摩擦性能表现最佳,200 °C时材料的磨损率降低了19.3%。与此同时,笔者所在课题组还采用粉末冶金法成功制备了二硫化钨(WS_2)和碳化硅(SiC)协同改性PI/Cu复合材料,并重点研究了 WS_2 与 SiC 比例对复合材料摩擦磨损性能的影响,发现当 WS_2 与 SiC 质量比为5:3时,复合材料的摩擦磨损性能最好^[18]。由此可知,通过改变填料种类及含量可实现PI基复合材料摩擦系数的可调及耐磨性的提高。然而PI树脂作为基体相,起到将其它部分均匀、牢固地黏结在一起的重要作用,其含量对复合材料的摩擦磨损性能同样存在显著影响^[19-20]。

鉴于PI树脂基复合材料的研究已在许多行业及领域取得了不错的进展^[21],而PI含量对PI基复合材料的摩擦磨损性能的鲜有报道。笔者以亚微米

级 WS_2 和 SiC 为增强相颗粒,Cu粉为填料,在先前研究的基础上,采用粉末冶金的方法制备了PI树脂基复合材料,着重研究了同一增强相含量下树脂含量对PI树脂基复合材料摩擦磨损的影响,并探究了树脂含量的改变对树脂基复合材料磨损机制的影响。探索复合材料摩擦系数可控及耐磨性提高的方法,以期将此复合材料应用于监控摄像头底座等产品。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PI粉末:平均粒径(D_{50})=35 μm ,纯度为99%,武汉泰格斯科技发展有限公司;

电解Cu粉: D_{50} =30 μm ,纯度为99.7%,江西硕邦新材料科技有限公司;

WS_2 粉末: D_{50} =0.6 μm ,纯度为99.9%,上海麦克林生化科技有限公司;

SiC 粉末: D_{50} =0.6 μm ,纯度为99%,浙江曼粒纳米科技公司。

1.2 主要仪器及设备

行星球磨机:XQM-0.44型,上海新诺仪器设备有限公司;

液压机:YL41-40T型,滕州市大正液压设备有限公司;

箱式电阻炉: SX3-14-10型,北京中兴伟业仪器有限公司;

X射线衍射(XRD)仪: D8ADVANCE-A25型,德国Bruker公司;

钨灯丝扫描电子显微镜(SEM): Phenom-XL型,上海飞纳科学仪器有限公司;

X射线光电子能谱(XPS)仪: Axis Ultra DLD型,英国Kratos公司;

数显维氏硬度计: HVS-1000型,上海研润光机科技有限公司;

电子万能试验机: KD-112型,岛津企业管理(中国)有限公司;

摩擦磨损试验机(销-盘式): CSM型,上海安东帕商贸有限公司。

1.3 试样制备

按表1试验配方准确称取原料粉末于混料罐中并加入球料比为2:1的氧化锆混料珠,将其放置在行星球磨机上以转速为100 r/min混料24 h;随后将混合均匀的混合粉进行105 °C干燥处理,待粉末干

燥完成后将其加入到模具中,并采用液压机对其进行模压成型,成型条件为轴向压制压力 200 MPa、保压时间 30 s,获得复合材料生坯;最后采用箱式电阻炉对生坯材料进行固化烧结,烧结制度为以 10 °C/min 的升温速率将温度由室温升至 170 °C 并保温 30 min,保温结束后以同样的升温速率将温度升至 250 °C,保温 90 min,固化完成后即随炉冷却至室温得到 PI 树脂基复合材料。同时,依据复合材料中 PI 含量将复合材料分别编为 A,B,C,D。

表 1 PI 树脂基复合材料各组分质量分数 %

编号	PI 粉末	电解 Cu 粉	SiC 粉末	WS ₂ 粉末
A	60	20	12.5	7.5
B	55	25	12.5	7.5
C	50	30	12.5	7.5
D	45	35	12.5	7.5

1.4 测试与表征

利用 XRD 仪对复合材料的物相组成进行测定;同时,采用钨灯丝 SEM 对复合材料的显微组织、磨损后材料表面形貌进行分析;采用 XPS 仪对试样的磨损表面进行成分测定;此外,使用数显维氏硬度计对复合材料的显微硬度进行表征,试验载荷为 0.98 N,保压时间为 15 s,并对同一试样进行随机测试 5 次取平均值为其硬度;并采用线切割机将试样切割成大小为 4 mm×4 mm×4 mm 的立方小块,随即放入电子万能试验机进行压缩性能测试,加载速率为 0.5 mm/min。

采用摩擦磨损试验机(销-盘式)对复合材料的摩擦磨损性能进行测定,复合材料试样大小为 3 mm×3 mm×3 mm,所有试样的接触面积为 9 mm²,对偶材料为显微硬度 126 HB (布氏硬度)的 CuZn10 合金盘。测试前复合材料及对偶盘表面均需使用砂纸抛光及有机溶剂清洗,以提高所测试验数据的可靠性。试验条件为大气条件、载荷 7 N、转速 1 m/s、滑动摩擦距离 5 km,通过摩擦磨损仪实时收集滑动摩擦过程中材料的摩擦系数,其基本计算公式为:

$$\mu = \frac{Q}{P} = \frac{T}{RP} \quad (1)$$

式(1)中, μ 为摩擦系数; Q 为摩擦力(N); P 为试样所承受的垂直载荷(N); T 为摩擦力矩(N·m); R 为对磨盘半径(m)。

同时,采用电子分析天平对试验前后试样的质量进行测定,并计算其磨损率,计算公式为:

$$v = \frac{\Delta m}{\rho PS} \quad (2)$$

式(2)中, v 为磨损率[cm³/(N·m)]; Δm 为复合材料测试前后的质量损失(g); ρ 为复合材料密度(g/cm³); S 为测试滑动距离(m)。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的物相组成

图 1 为复合材料 D 的 XRD 图谱。由图 1 可显著观察到试样由 3 种物相组成:Cu (PDF # 85-1326), WS₂ (PDF # 08-0237) 和 SiC (PDF # 39-1196);在图谱中并未发现其它物相的存在,可知复合材料在制备过程中没有其它杂质进入及试样烧结中并没有新的物相形成,这表明烧结后的复合材料能良好保留各物相组成,从而能够较好地发挥各物相的特性,进而提高复合材料的综合性能。同时,对比 Cu 的 3 个强衍射峰强度而言,WS₂ 和 SiC 的特征衍射峰均较低。这可归因于试样中 Cu 含量较高且颗粒粒径较大、晶型结构较为完整,从而导致其特征衍射峰强度较高。

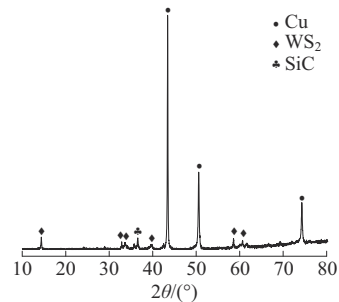
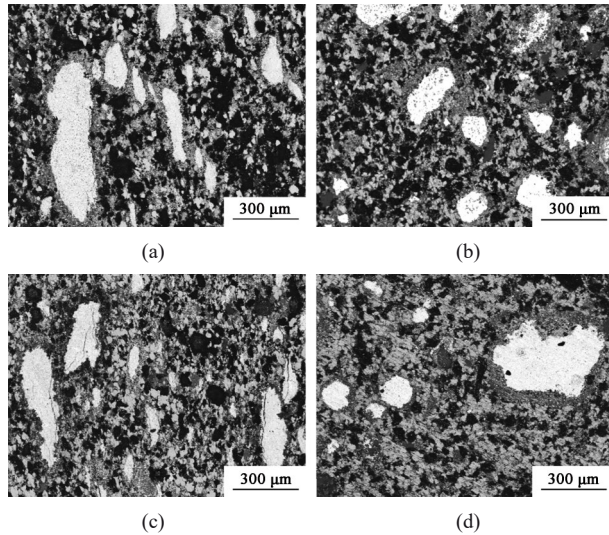


图 1 复合材料 D 的 XRD 图谱

2.2 复合材料的微观结构

图 2 为复合材料 A,B,C,D 的表面形貌 SEM 背散射图(BSE)。依据 BSE 成像原理及树脂基复合材料所含组元特性可知,图中亮色区域为 WS₂,白色为电解 Cu,灰色为 SiC,黑色为 PI 树脂。由图 2 可观察到,PI 树脂含量对复合材料的显微组织形貌具有显著影响。当树脂含量较高(质量分数 60%)时,由团聚的 WS₂ 为“核”和 SiC 为“壳”组成的“核-壳”结构呈扁平状分布在复合材料的基体中(如图 2a 所示)。这可归因于所用 WS₂ 颗粒为 600 nm,细小的颗粒易发生团聚,从而形成了“核”,SiC 颗粒表面硅易与 PI 树脂相关基团结合从而形成了“壳”。随着树脂含量的降低(如图 2b、图 2c 和图 2d 所示),复合材料中分散的白色 Cu 区域逐渐增多,黑色 PI 树脂区域面积不断减少;且由 WS₂ 和 SiC 形成的“核-壳”结构也

由较大的扁平状转变为细小的扁平状及类球形结构。其主要原因为随着树脂含量的降低,复合材料中Cu相不断提高,且较低的树脂含量降低了固化时的空间阻力,减少了亚微米级 WS_2 颗粒成“核”阻力。由此可知,PI树脂含量对复合材料的显微组织形貌存在显著影响,结构的改变将影响复合材料的摩擦磨损性能。



PI质量分数:a—60%; b—55%; c—50%; d—45%

图2 不同PI树脂含量的复合材料微观形貌

2.3 复合材料的物理力学性能

为明确复合材料A,B,C,D的相关物理性能,对其进行了密度测定及致密度计算,并将相关结果列于图3。由图3可知,随着PI树脂含量的降低及Cu含量的增加,复合材料的密度在不断提升。这是因为PI树脂与Cu的密度相差较大,相同体积条件下PI树脂的质量远小于Cu的质量;随着PI树脂含量的降低,复合材料单位体积中金属Cu相体积增加,因而材料整体质量增加,从而整体密度升高。同时,对复合材料致密度进行计算,可发现复合材料致密度随着树脂含量的增加呈现出先增加后较少的趋势,在PI树脂质量分数为50%时复合材料致密度最大。众所周知,粉末冶金制得的复合材料并非完全密实,在相与相之间,存在许多的孔隙。当PI树脂质量分数为60%时,复合材料的致密度最低为80.44%,这是因为填料树脂含量较多,固化烧制时树脂体积会有一定的缩小从而出现孔隙。当PI树脂质量分数降低至50%时,复合材料的致密度达到最大值(88.59%),这可能是因为Cu颗粒密度较大,压制生坯时可增加其紧实度。随着PI树脂质量分数继续降低至45%,复合材料的致密度又开始下

降。这可归因于Cu颗粒相对PI树脂力学性能好,切变模量大,可压缩性较PI树脂差,它们或者分布在PI树脂表面,或者嵌入PI树脂粉末颗粒内部。以这两种形式存在的颗粒都会对压型过程构成阻碍作用。所以,复合材料试样的孔隙率也随之增大,致密度下降。

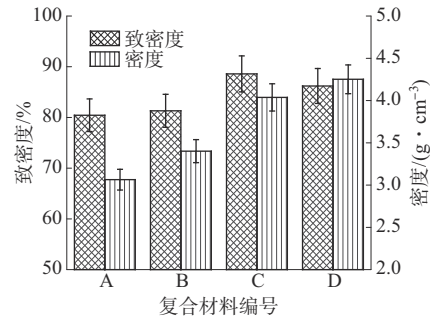


图3 复合材料A,B,C,D的致密度和密度

此外,对复合材料A,B,C,D的显微硬度和压缩性能进行了表征,具体结果如图4所示。由图4可知,复合材料的显微硬度与其致密度具有相似的规律,即随着PI树脂含量的降低,复合材料的显微硬度呈现先增大后减小的趋势。其中,PI树脂质量分数为50%时复合材料显微硬度获得了最大值,为50.9 HV(维氏硬度)。这是因为测试材料显微硬度时压头进入材料表面后,周围材料受挤压力作用而向材料孔隙处移动,最终压头进入深度增加,故复合材料的显微硬度与其致密度间存在显著的效应关系。同时,由图4可知,复合材料压缩强度随PI树脂含量减小而逐渐变大。当PI树脂质量分数为60%时,复合材料的压缩强度仅为81.1 MPa;当树脂质量分数降低到55%时,复合材料的压缩强度迅速提升至118.4 MPa;而随着树脂质量分数降低至45%时,复合材料的压缩强度缓慢升至130.7 MPa。这可归因于树脂含量较高时复合材料致密度较低,材料中存在较多孔洞;当试样受到压应力时裂纹易在孔隙处萌生,并沿着界面结合薄弱处快速扩展,

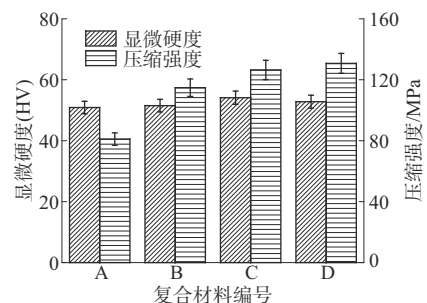


图4 复合材料A,B,C,D的显微硬度及压缩强度

最终试样发生损坏;当树脂含量进一步降低时,复合材料中扁平状“核-壳”结构转变成类球形结构,降低了裂纹扩展的速率,从而进一步提高了复合材料的压缩强度。综上所述,PI树脂含量变化对复合材料致密度、显微硬度及压缩强度的大小均产生显著影响。

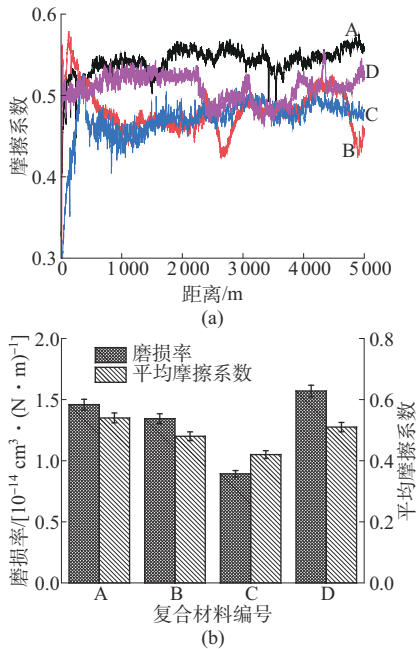
2.4 复合材料的摩擦磨损性能

通过对复合材料 A, B, C, D 与 CuZn10 合金盘在 7 N 的载荷、1 m/s 的转速、5 km 的滑动距离下进行对偶摩擦,获得了所对应的摩擦曲线、平均摩擦系数及磨损率,结果如图 5 和表 2 所示。由图 5a 复合材料的摩擦曲线可得,4 种复合材料的摩擦曲线均包含一个较短的磨合期和一个长期的稳定期;并由图 5b 发现,随着复合材料中 PI 树脂质量分数由 60% 降低至 50%,复合材料的平均摩擦系数随之由 0.54 降低至 0.42;且随着树脂质量分数进一步降低至 45% 时,材料平均摩擦系数增加至 0.51。同时,还可发现各复合材料稳定期波动存在较大差异,对其波动进行方差计算并列于表 2,可知 PI 树脂含量较高(质量分数 60%)时材料摩擦系数波动最大(平

均方差为 42.8×10^{-4}),PI 树脂质量分数为 50% 时,复合材料的摩擦系数波动平均方差低至 7.0×10^{-4} 。此外,对复合材料磨损率进行分析,由图 5b 可清晰观察到复合材料的磨损率与其平均摩擦系数具有相似的变化趋势,其中 PI 树脂质量分数为 50% 时复合材料获得了最低的磨损率 [$0.89 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$]。

2.5 复合材料的磨损表面形貌

图 6 为复合材料 A, B, C, D 经摩擦后的磨损表面显微形貌,可发现不同试样的磨损表面形貌存在显著差异。由图 6a 和图 6b 可知,当 PI 树脂含量较高(质量分数为 60% 和 55%)时磨损表面存在着大量的磨屑和与滑动方向平行的犁削沟槽。这可归因于高树脂含量下复合材料中 WS_2 润滑相及软质 Cu 相不易从基体中转移至摩擦界面处,从而不能有效润滑摩擦界面,同时硬质相 SiC 被良好固定于材料基体中并反复犁削材料表面,从而在材料表面形成了大量的犁沟。大量犁沟的形成加大材料摩擦系数的同时增加了材料摩擦系数的波动性,且增加了材料的磨损率,其与材料平均摩擦系数、摩擦系数波动性和磨损率间存在显著的对对应关系。此时材料的磨损机制以磨粒磨损为主,黏着磨损为辅。随着 PI 树脂质量分数降低至 50%,由图 6c 可观察到试样磨损表面高度平整,表面被润滑转移层均匀覆盖,颗粒剥落现象不明显,犁沟较浅且少。这是因为随着 PI 树脂含量的降低, WS_2 润滑相受正向挤压力转移至摩擦界面处并受反复摩擦剪切力而发生层间剥离,进而铺展复合材料摩擦界面处;同时,具有塑性较好的 Cu 相易发生延展与 WS_2 颗粒和 SiC

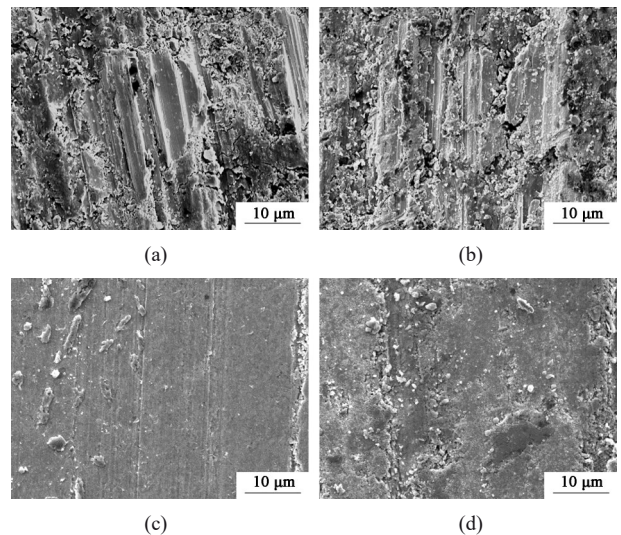


a—摩擦系数曲线; b—磨损率及平均摩擦系数

图 5 复合材料 A, B, C, D 的摩擦磨损性能

表 2 复合材料 A, B, C, D 的平均摩擦系数、平均方差和磨损率

编号	平均摩擦系数	平均方差	磨损率/[$\text{cm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$]
A	0.54	42.8×10^{-4}	1.46×10^{-14}
B	0.48	18.1×10^{-4}	1.34×10^{-14}
C	0.42	7.0×10^{-4}	0.89×10^{-14}
D	0.51	11.7×10^{-4}	1.57×10^{-14}



PI 质量分数: a—60%; b—55%; c—50%; d—45%

图 6 不同 PI 树脂含量的复合材料磨损表面显微形貌

颗粒发生混合,从而在材料磨损表面形成了一种机械混合层,提高了相互摩擦的材料的接触平稳性,大幅提高了复合材料的摩擦磨损性能。此时材料的磨损机制以疲劳磨损为主。当PI树脂质量分数进一步减少到45%时,复合材料磨损表面出现较浅的犁沟,并出现了塑性变形区(如图6d所示)。这是由于树脂含量降低至一定条件下更多的 WS_2 颗粒被转移至摩擦界面处,并受反复摩擦热作用而发生氧化形成了硬度较高的氧化物(WO_x),这些硬质颗粒犁削磨损表面,在磨损表面留下较浅的犁沟;且含量过高的Cu颗粒受反复摩擦力作用下更易发生塑性变形,进而加大了塑性变形区面积。此时,复合材料的磨损机制以磨粒磨损为主,以疲劳磨损为辅。由以上分析可知,随着PI树脂含量的减少,复合材料的磨损机制由原始的磨粒磨损,转变为疲劳磨损,而后转变成严重的磨粒磨损。

2.6 磨损表面XPS分析

为进一步探明PI树脂含量对复合材料磨损机制改变原因,采用XPS分析法对其磨损表面进行元素分析,结果如图7所示。由图7可清晰看出,复合材料中PI树脂含量较高(质量分数为60%和55%)时未发现明显的W 4f峰,但有相对较小的S 2p峰,其结合能为162.4 eV,经查询得知其对应化合物为硫系金属化合物,由此可知磨损表面含有微量的 WS_2 。当PI树脂含量进一步降低时,复合材料C和D的磨损表面均发现了显著的W 4f峰和S 2p峰,且随着树脂含量的降低,两峰强度具有增强趋势。为明确各复合材料磨损表面的 WS_2 体积分数,需将XPS检测出的各元素原子百分数乘以其对应的相对原子质量从而获得 WS_2 的质量分数,进一步将其质量分数转化成体积分数,以便与树脂基体含量进行对比,所得结果见表3。由表3可知,随着复合材料中PI树脂含量的降低,材料磨损表面 WS_2 体积分数则随之增加。在PI树脂质量分数为50%时,复合材料表面 WS_2 体积分数高达10.8%,其高于基体的体积分数7.5%。这表明在材料滑动摩擦过程中, WS_2 发生了显著的富集,富集在摩擦界面处的 WS_2 能够有效降低材料的摩擦系数和磨损率。但随着PI树脂含量进一步降低时,更多的 WS_2 将转移至摩擦界面处,同时受反复的摩擦热作用而发生氧化,生成了硬度较大的 WO_x 颗粒,从而犁削材料表面,进而复合材料的摩擦系数增大及磨损率升高。基于以上分析,

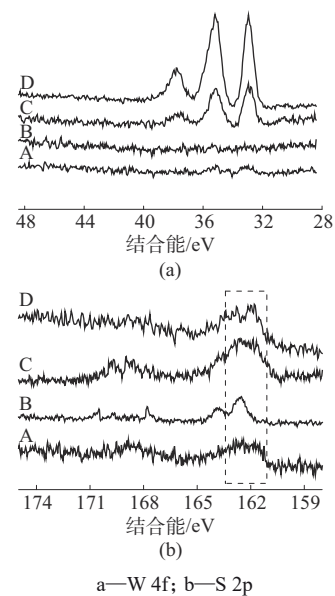


图7 复合材料A,B,C,D的磨损表面XPS分析

表3 复合材料磨损表面的 WS_2 体积分数随PI树脂含量改变的变化

编号	PI树脂质量分数/%	WS_2 的体积分数/%
A	60	0
B	55	2.3
C	50	10.8
D	45	18.6

当树脂质量分数为50%时复合材料获得了最佳的摩擦磨损性能。

3 结论

(1) PI树脂含量对PI树脂基复合材料的显微组织有着明显影响。随着树脂含量的减少,复合材料中由 WS_2 与SiC形成的“核-壳”结构,从较大的扁平状转变成为细小的扁平状和类球状。

(2) PI树脂基复合材料中Cu的相对含量随树脂含量的减少而增多。PI树脂质量分数为50%时,复合材料的致密度与显微硬度均达到最大值,分别为88.59%与50.9 HV,且两者均随树脂含量的减少呈现出先增加后减少的趋势。

(3) 随着复合材料中树脂含量的减少,复合材料孔隙率降低,材料中“核-壳”结构发生转变,这减少了裂纹的萌生也降低了裂纹的扩展速率,致使复合材料压缩强度不断增强,当PI树脂质量分数为45%时,复合材料压缩强度达到最大值,为130.7 MPa。

(4) PI树脂质量分数为50%时PI树脂基复合材料的摩擦磨损性能最佳,其中平均摩擦系数获得最小值为0.42,磨损率也达到最低,为 $0.89 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(5) 随着PI树脂含量的减少,树脂基复合材料的

磨损机制发生了改变,由原始的磨粒磨损转变为疲劳磨损,最后转变为严重的磨粒磨损。

参考文献

- [1] Vo T S, Vo T T B C. Surface characterization of polyimide and polyethylene terephthalate membranes toward plasma and UV treatments[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2022, 32(3):314–327.
- [2] Liaw D J, Wang K L, Huang Y C, et al. Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties and applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(7):907–974.
- [3] 刘仪,莫松,许晓洲,等.耐高温有机/无机杂化聚酰亚胺基树脂[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1):62–71.
Liu Yi, Mo Song, Xu Xiaozhou, et al. Organic/inorganic hybrid polyimide matrix resins with high temperature resistance[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1):62–71.
- [4] Ruan H, Zhang Q, Liao W Q, et al. Enhancing tribological, mechanical, and thermal properties of polyimide composites by the synergistic effect between graphene and ionic liquid[J]. *Materials & Design*, 2020, 189. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108527.
- [5] 谢璠,宁逗逗,黄吉振,等.芳纶沉析纤维-多巴胺/聚酰亚胺-酚醛树脂复合膜的力学及摩擦磨损性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(1):96–103.
Xie Fan, Ning Doudou, Huang Jizhen, et al. Mechanical and friction and wear properties of aramid fibril-polydopamine/polyimide-phenolic resin composite films[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1):96–103.
- [6] 耿真真,李红,杨敏,等.聚酰亚胺改性C/C复合材料的制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(1):186–191.
Geng Zhenzhen, Li Hong, Yang Min, et al. Preparation and properties of polyimide modified C/C composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(1):186–191.
- [7] 张杨,都诗瑶,孟美江,等.聚酰亚胺封装涂层中水的传输行为以及涂层对水阻滯能力的劣化机制研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(11):137–146.
Zhang Yang, Du Shiyao, Meng Meijiang, et al. Study on water transport behavior in polyimide packaging coating and its deterioration mechanism of blocking effect on water[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(11):137–146.
- [8] 杨峰,陈玉龙,罗旺,等. TG800碳纤维/聚酰亚胺树脂复合材料带翻边开口圆柱壳机匣件高温气动载荷下的承载性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(7):2 184–2 195.
Yang Feng, Chen Yulong, Luo Wang, et al. Load-bearing capability of TG800 carbon fiber/polyimide resin composite cylindrical casing with flange and window under high-temperature aerodynamic load[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(7): 2 184–2 195.
- [9] Gouzman I, Grossman E, Verker R, et al. Advances in polyimide-based materials for space applications[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18). DOI:10.1002/adma.201807738.
- [10] 黄伟九,叶峰,赵远,等.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[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(4):59–65.
Huang Weijiu, Ye Feng, Zhao Yuan, et al. Tribological properties of cenosphere and carbon fiber reinforced polyimide composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(4):59–65.
- [11] 陆健,邹国享,庄永兵,等.聚酰亚胺薄膜的介电性能调控研究进展[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(11):34–40.
Lu Jian, Zou Guoxiang, Zhuang Yongbing. Research progress in modulating dielectric properties of polyimide films[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(11):34–40.
- [12] 董凤霞,侯国梁,刘亮,等.稀土改性对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料在不同温度下摩擦学性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(2):148–154.
Dong Fengxia, Hou Guoliang, Liu Liang, et al. Effect of surface treatment on carbon fibre by rare earth on the tribological properties of carbon fiber reinforced polyimide composite at elevated temperatures[J]. *Tribology*, 2017, 37(2):148–154.
- [13] 俞亮. 稀土溶液改性PBO纤维增强聚酰亚胺复合材料界面作用机理及其摩擦学性能研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
Yu Liang. The research on interfacial functionary mechanism and tribological properties of rare earth solution modified PBO fiber reinforced polyimide composite[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [14] 陈震霖,朱鹏,王晓东,等.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, et al. Effects of properties of the fillers on the polyimide composite tribological behaviors[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(3):49–53.
- [15] 李珍莲,张新瑞,王廷梅,等.复合填充改性聚酰亚胺润滑材料的摩擦学性能[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(10):82–85, 97.
Li Zhenlian, Zhang Xinrui, Wang Tingmei, et al. Tribological properties of complex filled Polyimide lubricating composites[J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(10):82–85, 97.
- [16] 王立全,张向军,王素焕,等.高速列车用铜基粉末冶金摩擦材料摩擦性能的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(16):1–4.
Wang Liqun, Zhang Xiangjun, Wang Suhuan, et al. Research progress of friction properties of copper-based powder metallurgy friction material used for high speed train[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(16):1–4.
- [17] 尹宇航,赵盖,宋敬伏,等.多组分协同改性聚酰亚胺复合材料的高温摩擦学性能[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(12):5 699–5 710.
Yin Yuhang, Zhao Gai, Song Jingfu, et al. High temperature tribological properties of polyimide composites modified by multi-components[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(12): 5 699–5 710.