PI/Al_2O_3/GF绝缘复合材料的耐热性能与热氧老化性能研究

王立京[1],刘志勇[2],王玉军[3]*,戴 勋[3]

(1.国网北京市电力公司,北京 100000;2.石家庄铁道大学土木学院,河北 石家庄 050043;
3.中联五洲工程咨询有限公司,北京 100000)

摘 要:为得到综合性能优异的聚酰亚胺(PI),采用氧化铝(Al_2O_3)与玻璃纤维(GF)制备PI复合材料,对其性能展开系统研究。结果表明:Al_2O_3和GF均能提高复合材料拉伸强度、绝缘性能、耐热性能和热氧老化性能。复合材料要获得最优拉伸强度,Al_2O_3和GF的最佳质量分数分别为5%和10%。Al_2O_3和GF均可提高复合材料体积电阻率(ρ_v)、热变形温度(HDT)和热分解温度,降低介电损耗(tan δ)和线膨胀系数(CTE),而Al_2O_3对绝缘性能和热稳定性的影响更显著。Al_2O_3和GF均可提高复合材料热氧老化性能。Al_2O_3与GF的协同作用对复合材料综合性能提高效果更好。与PI相比,拉伸强度、ρ_v和HDT分别提升46.1%、530.8%、10.8%,tan δ降低33.8%~37.5%,CTE降低49.1%,热分解温度和热氧老化后拉伸强度保留率大幅提高,绝缘性能降低幅度显著减小。

关键词:聚酰亚胺;Al_2O_3;玻璃纤维;耐热性能;热氧老化性能

中图分类号:TQ323.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0055-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.010

Study on Thermal Resistance and Thermal-oxidative Aging Resistance of PI/Al_2O_3/GF Insulation Composites

WANG Lijing[1], LIU Zhiyong[2], WANG Yujun[3]*, DAI Qing[3]

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100000, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Zhonglian Wuzhou Engineering Consulting Co. , Ltd. , Beijing 100000, China)

Abstract: To obtain polyimide (PI) with excellent comprehensive properties, PI composites were prepared using alumina (Al_2O_3) and glass fiber (GF), and their properties were systematically investigated. The results showed that both Al_2O_3 and GF could improve the tensile strength, insulation, thermal resistance, and thermal-oxidative aging resistance of the composites. To achieve the optimal tensile strength, the optimal mass fraction of Al_2O_3 and the optimal mass fraction of GF were 5% and 10%, respectively. Both Al_2O_3 and GF increased the volume resistivity (ρ_v), heat deflection temperature (HDT), and thermal decomposition temperature of the composites, while reducing the dielectric loss (tan δ) and coefficient of thermal expansion (CTE). Among them, Al_2O_3 exhibited more pronounced effect on insulation and thermal stability. Both Al_2O_3 and GF enhanced the thermal-oxidative aging resistance of the composites. The synergistic effect of Al_2O_3 and GF exhibited to better overall performance improvement of the composites. Compared with PI, the tensile strength, ρ_v and HDT of the PI/Al_2O_3/GF composite were increased by 46.1%, 530.8%, 10.8%, respectively, the tan δ was reduced by 33.8%~37.5%, CTE was decreased by 49.1%, the thermal decomposition temperature and retention rate of tensile strength after thermal oxidation aging were significantly improved, while the degradation of insulation was markedly suppressed.

Keywords: PI; Al_2O_3; GF; Thermal resistance ; Thermal-oxidative aging resistance

聚酰亚胺(PI)凭借其优异的绝缘性、良好的热稳定性及化学稳定性等,成为机械化工、电子电气工业、新能源、航空航天等领域的关键材料,如柔性电路板的基底材料、航空航天领域耐高温部件的绝缘涂层等[1-3]。电子器件微型化、集成化的发展对器件的耐热性能和耐热氧老化等要求越来越高[4-5]。而纯PI存在力学性能较差[6-7]、热膨胀系

收稿日期Submitted date 2025-08-23;修回日期Revised date 2025-09-24;录用日期Accepted date 2025-10-28

*联系人,WL1232025@163.com

引用本文:王立京,刘志勇,王玉军,等.PI/Al_2O_3/GF绝缘复合材料的耐热性能与热氧老化性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):55-60.

Citation:WANG L J, LIU Z Y, WANG Y J, et al. Study on thermal resistance and thermal-oxidative aging resistance of PI/Al_2O_3/GF insulation composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 55-60.

数较高、与金属基材匹配性差、易在冷热循环中产生界面开裂[8-9]、容易发生热氧老化等不足之处，造成结构破坏导致性能下降[10-11]。因此，为了提升PI的综合性能，对其进行改性成为当前材料领域的研究热点。目前，提升PI的性能主要分为无机粒子增强与纤维增强两类。引入纳米或微米级无机粒子(如SiO_2[12]、Al_2O_3[13]、TiO_2[14]、氮化硼[15]、石墨烯[16]等可以调控PI的热性能与电学性能。引入纤维，如碳纤维(CF)[17]、石英纤维(QF)[18]、玻璃纤维(GF)[19]和天然性能等[20]，可以提升PI的力学性能。CF增强虽能大幅提升力学性能，但其导电性会破坏PI的绝缘性；QF绝缘性优异，但成本远高于GF，难以规模化应用；无机粒子虽能降低热膨胀系数，但对力学性能提升有限[21-23]。库永恒等[24]研究PI/短切聚丙烯腈基碳纤维(PANCF)复合材料的性能。结果表明，改性PANCF提高了PI的储能模量和弹性，复合材料力学性能得到提高。刘少飞等[25]研究PI/QF复合材料的力学性能和介电性能。结果表明，复合材料具有优异的介电性能，QF提高了复合材料的弯曲性能、小应变下的抗压缩变形能力，但是材料的压缩强度仍有不足。卓俊添等[26]制备Al_2O_3/PI/Al_2O_3的三明治结构薄膜。结果表明，Al_2O_3降低了PI复合薄膜高温下的漏电流，提高了击穿强度。虽然针对PI改性的研究较多，但是同时用无机粒子和纤维增强PI的研究较少。本文提出Al_2O_3无机粒子与GF协同增强方案，在保持PI绝缘性的同时优化热性能和力学性能，旨在实现PI复合材料“绝缘性能不降低、综合性能大幅提升”的目标，为其在高端绝缘结构件中的应用提供支撑。

1 实验部分

1.1 主要原料

PI树脂粉末，工业级，苏州市森菲达化工有限公司；纳米$A1_2O_3$，DK-Al_2O_3-30，粒径30~50 nm，质量分数99.99%，北京德科岛金科技有限公司；GF，无碱，直径10 μm，长度3 mm，常州乐邦复合材料有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，EQUINOX-55，德国Bruker公司；电子拉力试验机，RGD-5，深圳市瑞格尔仪器有限公司；高阻仪，ZC-90D，上海精密仪器仪表有限公司；阻抗分析仪，Agilent-4294A，美国Agilent公司；热变形温度测试仪，HY(RW)-300HB，上海衡翼精密仪器有限公司；线膨胀系数测试仪，GCRPZ-1000，北京冠测精电仪器设备有限公司；热重分析仪(TG)，TGA55，美国TA公司；高温老化试验箱，BS-1000G，上海宝试检测设备有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，S3400N，日本日立公司。

1.3 样品制备

表1为PI复合材料的配方。将PI树脂放入真空干燥箱，80 ℃干燥4 h，真空度-0.08 MPa条件下去除吸附水分，防止热压时产生气泡。将纳米$A1_2O_3$和GF在105 ℃干燥箱中干燥4 h。将干燥后的PI树脂、纳米$A1_2O_3$和GF加入高速混合机中，先以500 r/min低速混合5 min，再以1 500 r/min高速混合20 min。将混合料均匀填入200 mm×200 mm的模具型腔中，用刮板刮平表面；再将模具放入热压机的上下压板之间，启动热压机，以5 ℃/min速率升温至150 ℃，预热10 min，使树脂初步软化。热压按“升压-固化-降温”过程进行。升压排气阶段温度维持在120~150 ℃，以1 MPa/min的速率缓慢加压至15 MPa，保压15 min；固化成型阶段以5 ℃/min的速率升温至250 ℃，同步加压至25 MPa，保温30 min；停止加热，保持压力至温度自然降至100 ℃，然后缓慢泄压至0 MPa，待温度降至室温后打开模具，取出成型后的复合材料，进行后续性能测试。

表1 PI复合材料的配方

Tab.1 Formula of PI composites 单位：%

样品	w(PI树脂)	w(Al_2O_3)	w(GF)
PI	100	0	0
PI/2%Al_2O_3	98	2	0
PI/5%Al_2O_3	95	5	0
PI/8%Al_2O_3	92	8	0
PI/5%Al_2O_3/5%GF	90	5	5
PI/5%Al_2O_3/10%GF	85	5	10
PI/5%Al_2O_3/15%GF	80	5	15

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪测定PI复合材料的吸收特征光谱，分辨率1 cm^{-1}，扫描次数32次，范围4 000~400 cm^{-1}。

拉伸强度测试：参考GB/T 1040.2—2022，样品尺寸170 mm×80 mm×2 mm，拉伸速率5 mm/min。

电学性能测试：参考GB/T 31838.2—2019测试体积电阻率(ρ_v)；参考GB/T 1409—2006测试介电损耗(tan δ)。测试环境温度23 ℃，相对湿度60%，测试电压1 000 V，样品尺寸100 mm×100 mm×2 mm。

耐热性能测试：参考GB/T 1634.2—2019测试热变形温度(HDT)，载荷为0.45 MPa，升温速率为120 ℃/h，样品尺寸为127.0 mm×12.7 mm×3.2 mm，测试环境温度23 ℃，相对湿度50%。参考GB/T 1036—2008测试线膨胀系数(CTE)，温度范围30~200 ℃，升温速率5 ℃/min，样品尺寸50 mm×10 mm×2 mm。采用热重分析仪测试热稳定性，氮气环境，升温速率为10 ℃/min。

热氧老化实验：在250 ℃条件下对PI复合材料进行1、6、24 h高温热氧老化处理，然后测试拉伸强度和电学性能，同时对试样进行FTIR分析和SEM分析。

SEM分析：先将复合材料置于液氮中脆断，再真空喷金处理，观察其微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 PI复合材料的FTIR分析

图1为PI复合材料的FTIR谱图。从图1可以看出，在1 775、1 710、1 498、1 364 cm^{-1}处有明显的PI红外吸收特征峰，1 775、1 710 cm^{-1}处分别对应酰亚胺环上的碳氧键

(C═O)的不对称和对称伸缩振动，1 498 cm^{-1}处对应苯环上碳碳键(C═C)伸缩振动，1 364 cm^{-1}处对应碳氮键(C═N)的伸缩振动[27]。PI/5%Al_2O_3和PI/5%Al_2O_3/10%GF主要的FTIR吸收峰与PI没有明显区别，这说明Al_2O_3和GF的引入没有改变原始PI的分子结构。其微小区别在于：PI/5%Al_2O_3在751 cm^{-1}和832 cm^{-1}处出现新的吸收峰，PI/5%Al_2O_3/10%GF在445 cm^{-1}和1 081 cm^{-1}处出现新的吸收峰，原PI在799 cm^{-1}处吸收峰变宽、变强。这是因为751 cm^{-1}和832 cm^{-1}处对应A1—O键的伸缩振动吸收峰，而445、799、1 081 cm^{-1}处分别对应GF中Si—O弯曲振动、Si—O—Si对称伸缩振动和Si—O—Si反对称伸缩振动[28-29]。

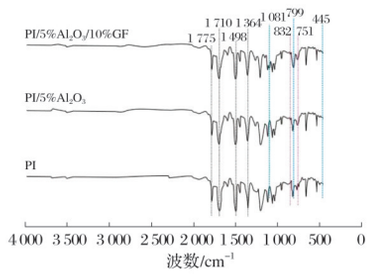


图1 PI复合材料的FTIR谱图
Fig.1 FTIR spectra of PI composites

2.2 PI复合材料的拉伸强度分析

图2为PI复合材料的拉伸强度。从图2可以看出，PI拉伸强度为88.1 MPa。加入Al_2O_3后，PI复合材料拉伸强度先增大后减小。当Al_2O_3的质量分数为5%时，达到最大值96.3 MPa，比PI提高9.3%。这是因为纳米Al_2O_3可通过“粒子增强效应”增强PI内部结构且分散应力，提高了复合材料拉伸强度。而适量Al_2O_3能够形成完整的增强网络且分散均匀，过量Al_2O_3会造成基体缺陷，削弱了Al_2O_3的增强作用。Al_2O_3的质量分数为5%时，分散性较好且增强作用达到最大，因此其对材料的拉伸强度提高效果最显著。同时加入GF后，PI复合材料拉伸强度进一步提升。随着GF含量的增加，提升效果先增大后降低。当Al_2O_3的质量分数为5%、GF的质量比为10%时，拉伸强度提升至最大值128.7 MPa，比PI提高46.1%，比PI/5%Al_2O_3提高33.6%。这说明GF显著提升了材料的拉伸强度。这是由于在PI体系中同时加入Al_2O_3和GF时，复合体系在受到外界载荷时可以通过PI和Al_2O_3将载荷有效地传递给GF，起到增强的效果。同时，GF在复合材料体系中起到锚固作用，不仅能够形成网络整体增强、增韧，还能够抑制裂纹扩展，因此GF能够进一步提升拉伸强度[30-31]。过量GF不利于均匀分散，会造成PI基体缺陷，进而导致力学性能下降。GF的质量分数为10%时，可在分散性与增强效果之间取得最佳平衡，因此其拉伸强度最高。因此，为制备具有优异拉伸强度的PI复合材料，加入Al_2O_3的最佳质量分数为5%，加入GF的最优质量分数为10%。为保证复合材料在具有优异拉伸强度的同时获得最优的综合性能，后面主要对PI/5%Al_2O_3和PI/5%Al_2O_3/10%GF进行性能研究。

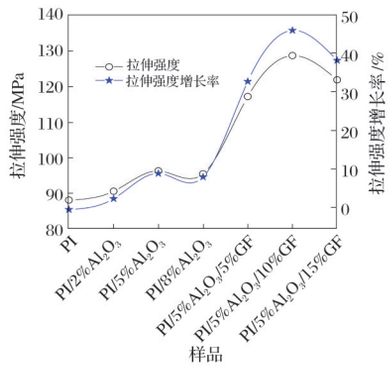


图2 PI复合材料的拉伸强度
Fig.2 Tensile strength of PI composites

2.3 PI复合材料的电学性能分析

图3为PI复合材料的ρ_v。从图3可以看出，PI的ρ_v为1.3×10^{16} Ω·cm，PI/5%Al_2O_3的ρ_v为8.1×10^{16} Ω·cm，是PI的6.2倍；PI/5%Al_2O_3/10%GF的ρ_v为8.2×10^{16} Ω·cm，比PI提高530.8%，比PI/5%Al_2O_3仅提高1.2%，说明GF对复合材料的ρ_v影响较小。图4为PI复合材料的tan δ。从图4可以看出，PI的tan δ为0.006 5~0.013 6，PI/5%Al_2O_3的tan δ为0.004 6~0.009 4，比PI降低27.5%~32.8%；PI/5%Al_2O_3/10%GF的tan δ为0.004 1~0.008 5，比PI降低33.8%~37.5%。这说明加入Al_2O_3时，PI复合材料的tan δ显著低于PI，继续加入GF后，tan δ继续降低，但降低幅度较小。由于Al_2O_3具有优异的绝缘性能，tan δ比较低，同时加入Al_2O_3减少了复合材料体系内部缺陷，因此提高了复合材料的ρ_v，降低了tan δ。而GF与PI的ρ_v相差不大，因此加入GF对复合材料ρ_v和tan δ的影响较小[32-34]。总之，加入Al_2O_3或GF后，复合材料绝缘性提高，Al_2O_3对复合材料绝缘性能提高效果更显著。

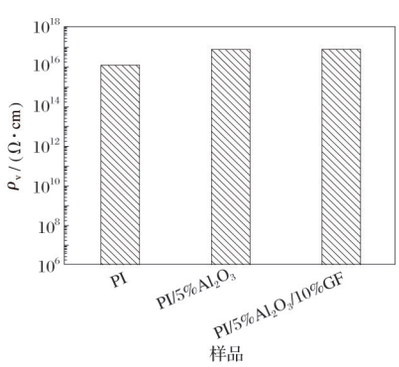


图3 PI复合材料的ρ_v
Fig.3 ρ_v of PI composites

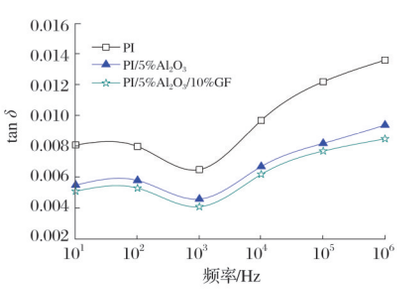


图4 PI复合材料的tan δ
Fig.4 tan δ of PI composites

2.4 PI复合材料的耐热性能分析

图5为PI复合材料的HDT。从图5可以看出，PI的HDT为268 ℃。PI/5%Al_2O_3的HDT升至289 ℃，比PI提升7.8%。原因是纳米Al_2O_3粒子与PI基体界面结合后，阻碍PI分子链在高温下的滑移与松弛，从而提高材料的抗热变形能力。PI/5%Al_2O_3/10%GF的HDT升至297 ℃，比PI提升10.8%，说明GF对HDT提升效果更为显著。这是由于GF本身具有优异的耐高温性，且在复合材料中呈三维网状分布，可作为“骨架”支撑整个材料结构，能够有效抵抗高温下的外力变形[31]。

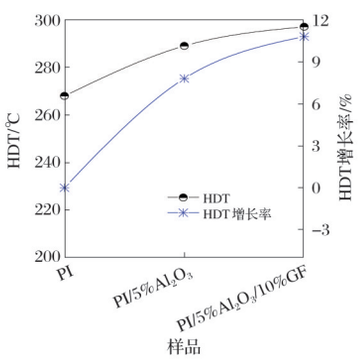


图5 PI复合材料的HDT

Fig.5 HDT of PI composites

图6为PI复合材料的CTE。从图6可以看出，PI在30~200 ℃范围内的CTE为55×10^{-6}/℃。PI/5%Al_2O_3的CTE降至51×10^{-6}/℃，比PI降低7.3%。这是因为Al_2O_3的CTE远低于PI，且粒子与PI基体间的界面作用可限制分子链的自由热膨胀，从而降低复合材料整体的CTE。GF与Al_2O_3协同作用可进一步降低PI复合材料的CTE，PI/5%Al_2O_3/10%GF的CTE降至28×10^{-6}/℃，比PI降低49.1%。这是因为GF的CTE也比PI更低。另外，从微观机制看，纤维呈线性分布，可通过“物理约束”限制PI分子链与Al_2O_3粒子的热膨胀，从而实现CTE的大幅降低[31,35]。

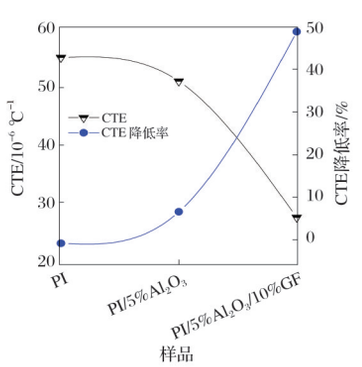


图6 PI复合材料的CTE

Fig.6 CTE of PI composites

图7为PI复合材料的TG曲线。从图7可以看出，PI失重5%时的温度($t_{5\%}$)为557 ℃，失重10%时的温度($t_{10\%}$)为588 ℃。PI/5%Al_2O_3的$t_{5\%}$为589 ℃，比PI提高32 ℃；$t_{10\%}$为627 ℃，比PI提高39 ℃。PI/5%Al_2O_3/10%GF的$t_{5\%}$为592 ℃，比PI提高35 ℃；$t_{10\%}$为629 ℃，比PI提高41 ℃。这说明在加入Al_2O_3和GF后，PI复合材料的热稳定性显著提高，热分解温度不断增大，Al_2O_3对热稳定性提高的效果更显著。而GF对热稳定性提高效果较小，PI/5%Al_2O_3/10%GF的$t_{5\%}$和$t_{10\%}$仅比PI/5%Al_2O_3提高3 ℃和2 ℃。这是因为Al_2O_3具有比GF更高的热稳定性。

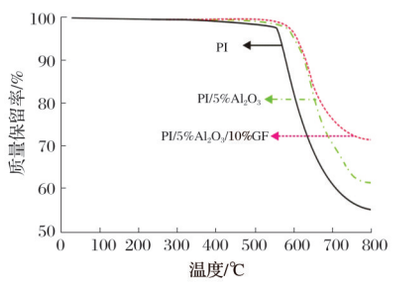


图7 PI复合材料的TG曲线

Fig.7 TG curves of PI composites

2.5 PI复合材料热氧老化性能分析

图8为PI复合材料热氧老化后的拉伸强度保留率。从图8可以看出，经过250 ℃的热氧老化处理，复合材料的拉伸强度随着热氧老化时间的延长呈现降低趋势。PI的降低幅度最大，PI/5%Al_2O_3/10%GF的降低幅度最小。氧化时间分别为1、6、24 h时，PI拉伸强度保留率分别为70.5%、63.2%和43.1%，PI/5%Al_2O_3拉伸强度保留率分别为75.6%、70.9%和64.2%，PI/5%Al_2O_3/10%GF拉伸强度保留率分别达到78.8%、76.9%和70.7%。这说明Al_2O_3和GF均能抑制复合材料热氧老化后力学性能的降低，GF效果显著。这是因为热氧老化破坏了PI的内部结构，而Al_2O_3具有较高热稳定性和抗氧化性，Al_2O_3的加入能够在PI中形成一层由纳米氧化物组成的保护层，且Al—O键的断裂能高于PI分子中C—C、C—N键的断裂能，因此可提高复合材料的耐热氧老化性能，更好地保持复合材料力学性能。加入GF后，其纤维结构使复合材料成为一个网络整体，提高了复合材料力学性能，因此PI/5%Al_2O_3/10%GF拉伸强度保留率最高。

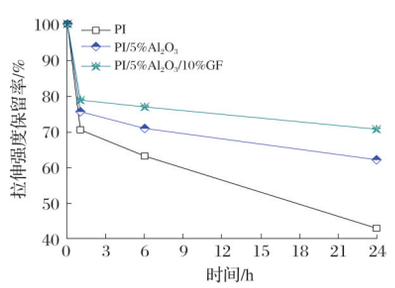


图8 PI复合材料热氧老化后的拉伸强度保留率

Fig.8 Retention rate of tensile strength of PI composites after thermal oxidation aging

在250 ℃下进行不同时间的热氧老化处理，研究其对PI复合材料的ρ_v和10^3 Hz下tan δ的影响。图9和图10分别为PI复合材料热氧老化后的ρ_v和的tan δ。从图9和

图10可以看出，随着热氧老化时间的延长，PI热氧老化后的ρ_v显著降低，tan δ显著升高，说明热氧老化降低了PI的绝缘性能。加入Al_2O_3或GF后，PI复合材料的绝缘性能降低幅度明显减小，加入Al_2O_3后显著抑制热氧老化，加入GF后继续抑制热氧老化。这是因为热氧老化造成了PI的氧化和结构破坏。加入Al_2O_3后，其高耐热性和形成的保护层抑制了复合材料热氧老化；加入GF后，GF自身耐热性能较高，GF形成的网络结构提高了复合材料的结构稳定性。因此，加入Al_2O_3或GF后，复合材料热氧老化后的绝缘性能降低幅度不断减小。

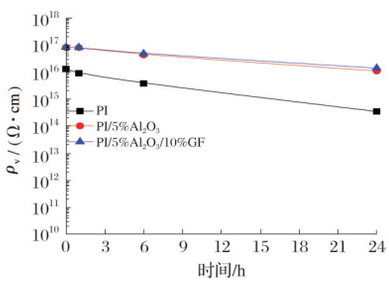


图9 PI复合材料热氧老化后的ρ_v

Fig.9 ρ_v of PI composites after thermal oxidation aging

为了进一步剖析复合材料热氧老化后性能变化的原因，对PI复合材料进行FTIR检测，分析其成分变化。图11为PI复合材料热氧老化后的FTIR谱图。从图11a可以看出，随着热氧老化时间的延长，PI的吸收特征峰不断减弱，尤其是1 498 cm^{-1}和1 364 cm^{-1}等处对应的吸收峰减弱，说明PI发生了降解，结构遭到破坏。这是因为热氧老化导致化学键的断裂，这也是导致材料拉伸强度下降的直接原因，而且化学键的断裂造成分子破坏，进而导致材料结构破坏，从而劣化了PI的绝缘性能[36-37]。从图11b可以看出，PI/5%Al_2O_3的FTIR谱图中吸收特征峰减弱程度变弱，说明Al_2O_3抑制了PI的热氧老化。从图11c可以看出，加入GF后，PI/5%Al_2O_3/10%GF的FTIR谱图中吸收特征峰减弱程度更小，说明Al_2O_3和GF的协同作用对提高复合材料的耐热氧老化效果更好[31,38]。

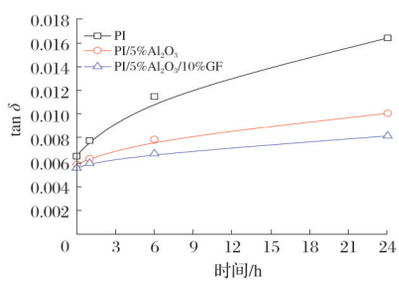


图10 PI复合材料热氧老化后的tan δ

Fig.10 tan δ of PI composites after thermal oxidation aging

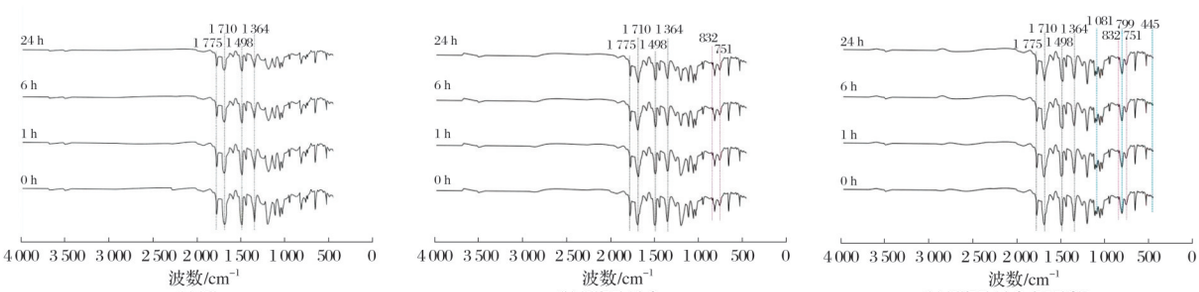


图11 PI复合材料热氧老化后的FTIR谱图

Fig.11 FTIR spectra of PI composites after thermal oxidation aging

对PI复合材料热氧老化0 h和24 h后的断面微观形貌进行观察，图12为PI复合材料热氧老化0 h和24 h后的SEM照片(2 000×)。从图12a~图12c可以看出，未进行热氧老化时，PI、PI/5%Al_2O_3和PI/5%Al_2O_3/10%GF的断面均较为完整，其中PI/5%Al_2O_3/10%GF的断面出现部分GF被拔出的孔洞。从图12d~图12f可以看出，热氧老化24 h后，PI内部出现明显的大孔洞等缺陷，这是热氧老化破坏PI的分子结构所致。在热氧老化过程中，部分基团与氧气反应生成气体，分子降解和气体逸出会形成孔隙或孔洞[36]。加入Al_2O_3后，PI复合材料微观结构破坏程度减弱，断面出现均匀且较小的孔洞，这是因为PI分子的热氧老化分解遭到抑制。继续加入GF，断面出现的孔洞数量进一步减少，孔洞尺寸也更小。这得益于GF在基体中的分散与桥接作用，不仅能够较好地维持复合材料体系的结构完整性，同时也能在一定程度上抑制PI分子分解[31]。

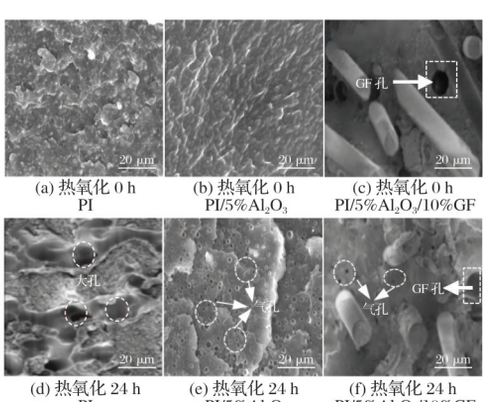


图12 PI复合材料热氧老化0 h和24 h后的SEM照片(2 000×)

Fig.12 SEM images of PI composites after 0 h and 24 h of thermal oxidation aging (2 000×)

3 结论

在力学性能方面，单独加入Al_2O_3的最优质量分数为

5%，PI/5%Al_2O_3拉伸强度较PI提升9.3%；加入GF的最优质量分数为10%，PI/5%Al_2O_3/10%GF拉伸强度较PI提升46.1%。这表明Al_2O_3能够小幅度地增强力学性能，而GF对力学性能有更高的提升效果。在电学性能方面，Al_2O_3和GF均能提升PI复合材料的绝缘性能，但是Al_2O_3提升效果更显著。在耐热性能方面，Al_2O_3能够提升PI复合材料的耐热性能。在添加5%的Al_2O_3基础上加入GF，可进一步提高PI复合材料耐热性能，与PI/5%Al_2O_3相比，继续大幅提升HDT，降低CTE，但是对$t_{5\%}$和$t_{10\%}$的提高幅度较小。在热氧老化性能方面，PI复合材料的拉伸强度随着热氧老化时间的延长而降低，其ρ_v和拉伸强度不断降低，tan δ不断升高。Al_2O_3或GF均能抑制复合材料的热氧老化，其中GF效果显著。Al_2O_3与GF协同作用对PI复合材料的综合性能提高效果更好，可在提升PI绝缘性能的同时显著提高其力学性能、耐热性能与耐热氧老化性能。与PI相比，PI/5%Al_2O_3/10%GF拉伸强度提升46.1%，ρ_v提升530.8%，tan δ降低33.8%~37.5%，HDT提高10.8%，CTE降低49.1%，$t_{5\%}$和$t_{10\%}$提高35 ℃和41 ℃，热氧老化后的拉伸强度保留率大幅提高，绝缘性能降低幅度显著减小。

参考文献

[1] 程致远, 陈维旺. 双胺共聚聚酰亚胺的热解过程及产物分析[J]. 塑料工业, 2025, 53(7): 165-171.
[2] 王晓旭, 宗立率, 张广胜, 等. 低介电高韧光敏聚酰亚胺树脂的合成固化及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(3): 1-9.
[3] 张岩, 李俊. 新能源汽车驱动电机用绝缘纸的特性研究[J]. 造纸科学与技术, 2025, 44(3): 25-28.
[4] 郝一帆, 董杰, 赵昕, 等. 含碳硼烷单元聚酰亚胺材料的制备及其耐热机制[J]. 复合材料学报, 2023, 40(1): 131-140.
[5] 袁成科, 冯永强, 刘婉婉, 等. 纳米二氧化锆改性聚酰亚胺薄膜的制备及性能[J]. 精细化工, 2023, 40(1): 44-49, 145.
[6] 王成江, 张可, 赵光辉, 等. 功能化石墨烯改性聚酰亚胺热力学性能模拟[J]. 塑料, 2025, 54(3): 84-91.
[7] 李轩, 明白, 刘福华, 等. 玄武岩纤维增强聚酰亚胺复合材料的往复摩擦磨损行为[J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(6): 991-998.
[8] 汪卓颖, 何兆洋, 丁兴成, 等. 具有更佳尺寸稳定性的含噁唑基团的聚酰亚胺薄膜材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(1): 145-150.
[9] 史恩台, 潘成, 胡程鹏. 低热膨胀系数聚酰亚胺薄膜的制备方法研究[J]. 辽宁化工, 2024, 53(2): 191-195.
[10] CONNELL J W, SMITH J G, HERGENROTHER P M. High temperature transfer molding resins: Preliminary composite properties of PETI-375[J]. SAMPE Symposium, 2004, 49(1): 11-20.
[11] 王静, 杨爽, 肖存勇, 等. 聚酰亚胺薄膜热氧老化稳定性研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(8): 155-164.
[12] 顾佳佳. 超透明聚酰亚胺-二氧化硅复合薄膜的制备与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2025.
[13] 吴洋, 俞娟, 黄培. 透明聚酰亚胺复合薄膜的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(5): 83-87.
[14] 谭艺鹏, 高航, 冯梓文, 等. 基于多维协同的聚合物基复合薄膜的高温储能性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(4): 1250-1256.
[15] 韩莹, 袁天舒, 张宇轩, 等. 立方氮化硼填充聚酰亚胺制备导热复合薄膜[J]. 绝缘材料, 2025, 58(6): 25-34.
[16] 陈可, 张琦, 王凯凤, 等. 聚酰亚胺复合薄膜性能研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(2): 96-100.
[17] 付善龙, 雷帅, 李军, 等. 航空用国产碳纤维/聚酰亚胺复合材料耐环境老化性能[J]. 热固性树脂, 2023, 38(4): 1-6.
[18] CHEN X F, LIU H T, JIANG R, et al. Study on the macro- and micro-mechanical properties of quartz fiber reinforced polyimide resin matrix composite after thermal aging[J]. Composite Structures, 2022, 292: 115666.
[19] 王敬. 耐高温聚酰亚胺气凝胶及其复合材料的构建与性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
[20] SANMAN S, MANJUNATH A, PRASHANTH K P, et al. An experimental study on two body abrasive wear behavior of natural fiber reinforced hybrid polymer matrix composites using Taguchi analysis[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 72: 2021-2026.
[21] 雷帅, 付善龙, 邢宇, 等. 碳纤维高温退浆处理对聚酰亚胺复合材料热老化的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(4): 132-140.
[22] 王雪蓉, 陈海玲, 王倩倩. 差示扫描量热法测定石英纤维/聚酰亚胺复合材料的导热系数[J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(3): 22-24.
[23] 李想. 用于聚酰亚胺基复合材料大分子硅烷偶联剂的制备与应用[D]. 济南: 济南大学, 2024.
[24] 库永恒, 胡润阁. 碳纤维复合聚酰亚胺输电线接续管套管的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(5): 76-79.
[25] 刘少飞, 徐鸿杰, 王占文, 等. 聚酰亚胺纤维/石英纤维混杂增强复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(8): 106-110.
[26] 卓俊添, 林铭浩, 张齐艳, 等. 热塑性聚酰亚胺/氧化铝三明治结构柔性电介质薄膜的设计制备及其高温介电储能性能[J]. 物理学报, 2024, 73(17): 238-248.
[27] 张明玉. 离子交换法制备聚酰亚胺/氧化铝复合薄膜及电晕老化机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
[28] 董德阳, 陆杭, 文博, 等. 二氧化硅/氧化铝填充对室温硫化硅橡胶涂层的加速老化影响研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(7): 129-135.
[29] 孔鹏, 彭周岗, 吴海兵. 玻璃纤维表面改性研究[J]. 合成树脂及塑料, 2025, 42(1): 47-50.
[30] BARZIC A I, DIACONU A D, CONDURACHE B C, et al. Assessment of optical and thermal properties of polyimide/metal oxide composites for photovoltaic uses[J]. Bulletin of Materials Science, 2023, 46(1): 18.
[31] 杨才冉, 徐广锐, 吕蔚. 玻纤增强热固性聚酰亚胺复合材料的制备及性能表征[J]. 上海化工, 2025, 50(3): 11-13.
[32] 彭蓉, 杨武霖, 符立才, 等. 低孔隙率阳极氧化铝膜的制备及其高绝缘特性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 964-970.
[33] 刘凯, 姜洪义, 曹泽琦, 等. 氧化铝填料对绝缘涂层导热性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1950-1957.
[34] 沈琪斌, 王波, 王海滨. 玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的绝缘性能和力学性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(7): 18-22.
[35] MORAMPUDI P, NAMALA K K, GAJJELA Y K, et al. Review on glass fiber reinforced polymer composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 314-319.
[36] LIN D L, LI R Y, LIU Y, et al. Clarifying the effect of moisture absorption and high-temperature thermal aging on structure and properties of polyimide film at molecular dynamic level[J]. Polymer, 2021, 214: 123251.
[37] 徐诗琴, 蔺道雷, 李闰月, 等. 聚酰亚胺薄膜老化过程中的结构与性能演变机理研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(9): 156-160.
[38] 范勇, 安军伟, 周宏, 等. 纳米氧化铝杂化聚酰亚胺薄膜的制备与性能研究[J]. 绝缘材料, 2007, 40(2): 1-3.