电除尘免伴热用聚氨酯/石墨烯量子点复合储热膜的制备及性能研究

王 巍,米 甜

(国家能源集团永州发电有限公司,湖南 永州 425909)

摘 要:为解决电除尘系统在低温环境下伴热能耗高的问题,文章以聚氨酯(PU)为基体、石墨烯量子点(GQDs)为改性剂,采用溶液共混-流延成膜法制备PU/GQDs复合储热膜,研究GQDs添加量对复合膜结构与性能的影响。结果表明:GQDs在PU基体中能够均匀分散并形成导电-导热协同网络,使复合膜具备快速升温与稳定储热的特性。随着GQDs添加量的增加,复合膜导热性与热稳定性显著提升。当GQDs添加量为1.0~2.0 phr时,PU/GQDs复合储热膜表现出最佳电-热转换效率。PU/GQDs复合储热膜在低温环境电除尘免伴热系统中具有良好的应用前景。

关键词:聚氨酯;石墨烯量子点;复合储热膜;电加热性能;节能材料

中图分类号:TQ323.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0093-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.017

Study on Preparation and Properties of Polyurethane/Graphene Quantum Dot Composite Thermal Storage Films for Heat-tracing-free Electrostatic Precipitator

WANG Wei, MI Tian

(China Energy Yongzhou Power Generation Co. , Ltd. , Yongzhou 425909, China)

Abstract: To address the issue of high heat-tracing energy consumption in electrostatic precipitator systems under low-temperature environments, the study employed polyurethane (PU) as the matrix and graphene quantum dots (GQDs) as the modifier to prepare PU/GQDs composite thermal storage films via a solution blending-casting method. The effects of GQDs addition on the structure and properties of the composite films were investigated. The results showed that GQDs could be uniformly dispersed in the PU matrix and form a conductive-thermal conductive synergistic network, endowing the composite films with rapid heating and stable thermal storage characteristics. With increasing GQDs addition, the thermal conductivity and thermal stability of the composite films were significantly enhanced. When the GQDs addition was in the range of 1.0~2.0 phr, the PU/GQDs composite thermal storage films exhibited optimal electro-thermal conversion efficiency. The PU/GQDs composite thermal storage films demonstrate promising application prospects in low-temperature heat-tracing-free system for electrostatic precipitators.

Keywords: PU; GQDs; Composite thermal storage film; Electric heating performance; Energy saving materials

电除尘器广泛用于火电、冶金、垃圾焚烧等行业的颗粒物控制[1],在低温工况条件下,电除尘器容易出现粉尘比电阻异常、冷端结露与二次扬尘等问题,导致收集效率下降,增加系统的伴热能耗与维护负担[2-3]。WANG等[4]研究温度对静电除尘器放电电压、空气密度与捕集效率的耦合影响,证明温度是影响不同电极配置静电除尘器效率的关键因素。为缓解低温运行带来的效率下降与能耗攀升问题,需要借助辅助手段对电除尘器进行热管理与保温优化,而兼具柔性与可设计性的聚合物基储热材料为此提供了可行路径。聚氨酯(PU)具有优异的柔韧性、成膜性与配方可设计性,在柔性基体中占据主导[5-6],然而其热稳定性与导热/导电性不足,限制其在电-热协同场景中的应用[7-8]。当环境温度达到90 ℃或更高时,PU的机械性能会迅速恶化,亟须引入纳米填料构建功能性网络,改善其耐热性能[9]。

石墨烯家族纳米碳材料(含片、点、泡沫等)是一类理

收稿日期Submitted date 2025-09-23;修回日期Revised date 2025-10-20;录用日期Accepted date 2025-11-26

基金项目:国家能源集团科技创新项目(E316300075)

联系人,19974686283@163.com

引用本文:王巍,米甜.电除尘免伴热用聚氨酯/石墨烯量子点复合储热膜的制备及性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):93-97.

Citation: WANG W, MI T. Study on preparation and properties of polyurethane/graphene quantum dot composite thermal storage films for heat-tracing-free electrostatic precipitator[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 93-97.

想的纳米填料，在聚合物基体中具有较低的渗流阈值，能够显著提升电导率与热扩散系数，从而实现焦耳热效应驱动的快速升温和高效热管理。与片状石墨烯纳米碳材料相比，石墨烯量子点(GQDs)具有更小的粒径、更高的比表面积及更活跃的表面含氧官能团[10-11]。这些特性既有利于GQDs在PU中均匀分散，起到稳定界面的作用，也可在较低的低添加量下构建以隧穿/跳跃主导的导电通路与微/纳米热桥，从而同步改善复合材料的电导率、热导率与韧性。SEIBERT等[12]将GQDs掺入环氧树脂，通过界面作用调控其热-电传输通道，显著提高了环氧树脂的热导率与力学韧性。SCHNEIDER等[13]研究发现，添加GQDs显著提升环氧树脂的热导率。GQDs在热塑性与热固性聚合物中均具有良好的热-电-力学综合改性效果，是一类极具潜力的多功能纳米填料[14]。

本文以PU为基体、GQDs为改性剂，采用溶液共混-流延法制备PU/GQDs复合储热膜，研究GQDs添加量对PU/GQDs复合储热膜多尺度性能的影响，探索PU/GQDs复合储热膜在电热储能与热管理领域的应用潜力。

1 实验部分

1.1 主要原料

PU，固含量50%，W-9002，巴斯夫(中国)有限公司；GQDs，质量分数≥99%，粒径3~5 nm，中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所；N，N-二甲基甲酰胺(DMF)，分析纯，质量分数≥99.5%，国药集团化学试剂有限公司；乙醇，分析纯，质量分数≥99.7%，成都科隆化学品有限公司。

1.2 仪器与设备

电子万能试验机，CMT6104，深圳市新三思材料检测有限公司；稳态平板导热系数测试仪，TC3000E，西安夏溪电子科技有限公司；红外热像仪，FLIR E95，美国FLIR Systems；热重分析仪(TG)，TGA 5500，美国TA仪器公司；高阻计，ZC36，上海市嘉定区计量仪器厂；超声波清洗仪，KQ-300VDE，昆山市超声仪器有限公司；磁力搅拌加热器，DF-101S，巩义市予华仪器有限责任公司；真空干燥箱，DZF-6020，上海精宏实验设备有限公司；流延刮膜机，AFA-II，上海奥法美嘉生物科技有限公司。

1.3 样品制备

配制10 g/L的GQDs分散液，溶剂为DMF，超声分散30 min。称取20 g固含量为50%的PU (PU固体质量为10 g)，加入DMF中，在60 ℃条件下磁力搅拌30 min，使其完全溶解，然后加入GQDs分散液中，继续搅拌3 h，获得均匀稳定的PU/GQDs复合溶液。将PU/GQDs复合溶液流延于乙醇清洗过的洁净玻璃板上，控制膜厚约为0.5 mm，在80 ℃条件下真空干燥12 h，除去溶剂。冷却后脱模，获得柔性致密的PU/GQDs复合储热膜。样品在室温下平衡48 h。表1为PU/GQDs复合储热膜的配方。按照表1配方制得GQDs添加量分别为0、0.5、1.0、2.0、3.0 phr (以100 phr PU固体为基准)的复合储热膜，样品命名分别为PU、GQDs-0.5、GQDs-1.0、GQDs-2.0和GQDs-3.0。

表1 PU/GQDs复合储热膜的配方

Tab.1 Formula of PU/GQDs composite thermal storage films

样品	$m_{\text{PU固体}}$/g	m_{GQDs}/g	$V_{\text{GQDs分散液}}$/mL	V_{DMF}/mL
PU	10	0	0	80
GQDs-0.5	10	0.05	5	75
GQDs-1.0	10	0.10	10	70
GQDs-2.0	10	0.20	20	60
GQDs-3.0	10	0.30	30	50

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：按照GB/T 1040.2—2022进行测试。样品裁切为50 mm×10 mm条状，厚度约0.5 mm。在(23±2) ℃、相对湿度(50±5)%条件下平衡24 h。采用电子万能试验机，以50 mm/min的拉伸速率测试拉伸强度、断裂伸长率及弹性模量。平行测试5次，取平均值。

导热性能测试：按照GB/T 10294—2008，采用稳态平板热流计法测试导热系数。样品厚度为(0.5±0.05) mm，测试温差为20 ℃，热面温度为40 ℃。平行测试3次，取平均值。

电加热性能测试：将复合膜连接铜电极，通以10 V的恒压直流电，利用红外热像仪实时记录温度变化曲线。温升速率由曲线初始线性段斜率计算，响应时间定义为样品温度从25 ℃升至60 ℃所需时间。

TG测试：采用热重分析仪在氮气氛下进行测试，升温速率为10 ℃/min，从30 ℃升至800 ℃。依据失重曲线读取初始分解温度($t_{5\%}$)、最大失重速率温度($t_{\max}$)及在800 ℃时的残炭率。

电加热循环稳定性测试：样品在10 V电压下重复50次加热-冷却循环，升温至稳态后自然冷却至室温为1个循环。测试后比较稳态温度与响应时间变化率，以评估循环稳定性。

电阻率与电导率测试：体积电阻率(ρ_v)采用高阻计四探针法测定，所有样品厚度一致。电导率(σ)为ρ_v的倒数。

2 结果与讨论

2.1 PU/GQDs复合储热膜的力学性能分析

表2为PU/GQDs复合储热膜的力学性能。从表2可以看出，与未掺入GQDs的PU相比，掺入少量的GQDs(≤1.0 phr)能够显著提升PU的拉伸强度与弹性模量，体现出“增强-刚化”的典型特征。这与碳基纳米填料在聚合物中通过刚性填料承载、应力传递与链段限域实现增强的普适规律一致。即当填料添加量处于适中范围时，片/点状碳材料可构建高效的应力传递网络有效抑制链段滑移与空穴萌生，从而提高材料的拉伸强度与弹性模量，但随之带来的链段运动受限会使断裂伸长率下降。这主要是由于添加适量GQDs时，石墨烯类纳米材料分散较均匀，可通过与聚合物基体形成氢键或π-π相互作用[15]，增强界面结合并促进应力传递；添加量过高时，纳米材料易团聚，产生应力集中，使增强效果减弱，甚至导致性能下降。

当掺入2.0~3.0 phr的GQDs时，虽然弹性模量因整体刚性与微观限域增强而持续上升，但拉伸强度与断裂伸长率转而下降。其原因主要包括：(1)团聚导致的应力集中与微裂纹萌发；(2)界面缺陷使载荷传递效率降低；(3)超过“有效网络”窗口后，填料间相互作用优先于填料-基体作用，破坏连续相完整性。这种“低含量增强、过量劣化”的行为常与渗流/准渗流阈值附近的结构转变相关。中低添加量形成均匀分散的承载网络，进一步提高添加量则因团聚与孔隙诱发强度折减[16]。

表2 PU/GQDs复合储热膜的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of PU/GQDs composite thermal storage films

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa
PU	24.8±0.6	615±18.0	28.4±1.2
GQDs-0.5	29.6±0.8	598±21.0	33.1±1.0
GQDs-1.0	34.3±0.5	575±16.0	38.9±1.3
GQDs-2.0	31.7±0.9	541±19.0	41.2±1.1
GQDs-3.0	27.9±0.7	492±15.0	45.6±1.4

2.2 PU/GQDs复合储热膜的导热系数分析

图1为PU/GQDs复合储热膜的导热系数。从图1可以看出，当GQDs的添加量为0.5 phr时，GQDs-0.5的导热系数从0.218 W/(m·K)上升至0.254 W/(m·K)，提升约16.5%。其原因是GQDs具有较高的本征热导率、极小的尺寸及较大的比表面积，有利于其在PU基体内形成热传导通道或减少界面热阻，从而增强整体热导。GQDs较传统片状石墨烯更易在弹性基体中实现均匀分散，从而有效形成热传导通道。当GQDs的添加量为2.0 phr时，GQDs-2.0的导热系数最高，为0.312 W/(m·K)；当GQDs的添加量为3.0 phr时，GQDs-3.0的导热系数反而略有下降。这主要是由于填料-填料和填料-基体的界面处可能形成热散射中心，降低整体热导率。在PU/GQDs复合材料中，当GQDs添加量超过一定阈值，热导率提升幅度趋缓或出现下降。

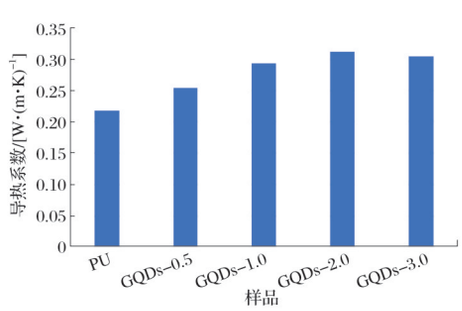


图1 PU/GQDs复合储热膜的导热系数

Fig.1 Thermal conductivity of PU/GQDs composite thermal storage films

2.3 PU/GQDs复合储热膜的电加热响应时间分析

图2为PU/GQDs复合储热膜电加热温度随时间的变化的曲线。从图2可以看出，与未掺入GQDs的PU相比，当GQDs添加量为2.0 phr时，GQDs-2.0曲线初始上升段的斜率增大，稳态温度升高，达到目标温升(Δt=40 ℃)的响应时间显著缩短。这一趋势与碳基导电/导热网络在聚合物基体中逐步搭建、接近电学渗流阈值后可实现更高电/热转换效率的机理一致[17]。

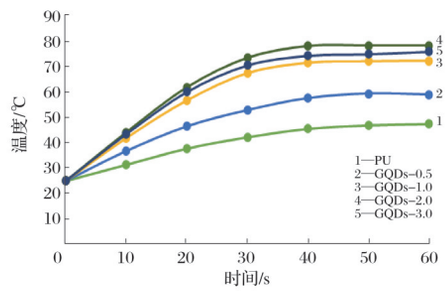


图2 PU/GQDs复合储热膜电加热温度随时间的变化曲线

Fig.2 Temperature variation curves with time of PU/GQDs composite thermal storage films under electric heating

表3为PU/GQDs复合储热膜的电加热响应参数。从表3可以看出，未掺入GQDs时，PU的升温速率为0.65 ℃/s，响应时间为62.00 s；掺入0.1 phr的GQDs时，GQDs-1.0的升温速率提升至1.12 ℃/s，响应时间缩短至34.80 s；掺入0.2 phr的GQDs时，GQDs-2.0升温速率提升至1.18 ℃/s、响应时间缩短至31.60 s，稳态温度最高为78.40 ℃；掺入0.3 phr的GQDs时，GQDs-3.0的稳态温度降低，响应时间延长。过量的GQDs易产生团聚与界面缺陷，导致局部电流密度不均与界面热阻上升，从而削弱电/热耦合效率[18]。此外，GQDs具备π共轭结构和较高的比表面积，在添加量适中时，更易在PU中形成连续、均匀的电子隧穿与导热微/纳米热桥网络，从而有效降低体积电阻与界面热阻，提高温升速率。然而，当GQDs的添加量较高时，填料间的相互作用逐渐增强并诱发团聚现象，一方面会破坏载流通道连续性，另一方面能够削弱载热能力，最终使复合材料的曲线平台温度与响应优势回落至较低水平[19]。

表3 PU/GQDs复合储热膜的电加热响应参数

Tab.3 Electric heating response parameters of PU/GQDs composite thermal storage films

样品	稳态温度 (10 V)/℃	升温速率/ (℃·s^{-1})	响应时间 (Δt=40 ℃)/s
PU	47.50	0.65	62.00
GQDs-0.5	58.90	0.88	45.50
GQDs-1.0	72.30	1.12	34.80
GQDs-2.0	78.40	1.18	31.60
GQDs-3.0	76.90	1.07	36.40

注：响应时间为样品在10 V电压下，自初始温度升高40 ℃所需的时间；升温速率由线性拟合初始段斜率得到。

2.4 PU/GQDs复合储热膜的TG分析

图3为PU/GQDs复合储热膜的TG曲线，表4为PU/GQDs复合储热膜的热分解特征参数。从图3可以看出，所有样品在250~350 ℃与380~500 ℃出现两步失重。前

者主要与PU软段(聚醚/聚酯)链段裂解有关,后者对应硬段与交联结构的分解,这与PU的典型热分解路径一致[20]。从图3和表4可以看出,加入GQDs后,TG曲线整体向高温区移动,残炭率提高,说明PU的热稳定性与耐热炭化能力得到显著增强。当GQDs添加量为0.5~2.0 phr时,$t_{5\%}$和t_{max}得到提高。其原因在于片/点状碳材料降低了热量与小分子裂解产物的扩散速率[21]。此外,GQDs表面含氧官能团与PU中的—NH—和—C═O形成氢键或偶极-π相互作用,提高了链段限域与能垒,推迟热裂解[22]。在800 ℃时,GQDs-1.0的残炭率为6.8%,GQDs-2.0的残炭率为7.4%,表明GQDs促使基体形成了更致密的炭层,进而降低后续失重速率。混合碳填料或石墨烯类填料可以促进炭结构生成,抑制气体外逸,从而增强材料的热稳定性[23]。当GQDs的添加量为3.0 phr时,$t_{5\%}$、t_{max}和残炭率均略低于GQDs-2.0。这主要是由于填料-填料作用占主导,有效界面面积下降,出现微孔与裂纹,削弱了阻隔与成炭的完整性[24]。

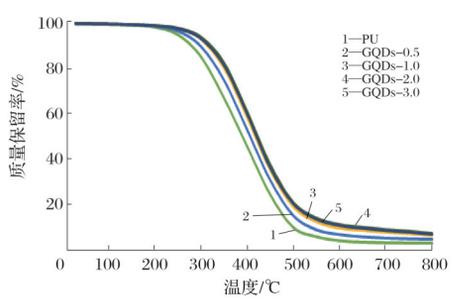


图3 PU/GQDs复合储热膜的TG曲线

Fig.3 TG curves of PU/GQDs composite thermal storage films

2.5 PU/GQDs复合储热膜的电加热循环稳定性分析

表5为PU/GQDs复合储热膜的电加热循环稳定性参数。从表5可以看出,在10 V通电加热条件下,各样品完成50次升温-降温循环后,稳态温度下降幅度与响应时间延长幅度存在明显差异。未掺入GQDs时,PU经过50次循环后稳态温度为42.8 ℃,稳态温度为90.1%;GQDs-0.5、GQDs-1.0和GQDs-2.0的稳态温度分别为94.4%、95.7%和95.7%。PU的第50次响应时间为70.3 s,延长率约为13.4%;GQDs-1.0和GQDs-2.0的延长率仅为5.2%和4.7%。其原因是GQDs在PU基体中形成导电网络,使通电时的焦耳热成为主热源。在循环过程中,如果该网络结构被破坏,会导致电热功率下降、升温速率变慢,从而降低稳态温度。填料间以及填料-基体之间的界面滑移、疲劳裂纹、热胀冷缩累积效应是影响长期电热性能的关键因素[25]。此外,GQDs表面富含氧官能团,可与PU的—NH—和—C═O基团形成氢键或偶极-π相互作用,从而增强填料-基体界面黏结力。界面黏结力的增强有利于限制循环过程中的微裂纹形成与界面脱黏,从而维护复合膜内部的导电/导热结构[26]。继续提高GQDs的添加量至3.0 phr,GQDs-3.0的初次响应性能进一步提升,其循环后稳态温度低于GQDs-1.0及GQDs-2.0。其原因可能在于高添加量下GQDs容易团聚,导致导电网络局部密度异常、循环中应力集中加速损伤,从而削弱长期稳定性。

表4 PU/GQDs复合储热膜的热分解特征参数

Tab.4 Thermal decomposition characteristic parameters of PU/GQDs composite thermal storage films

样品	$t_{5\%}$/℃	t_{max}/℃	残炭率(800 ℃)/%
PU	284.6	421.3	3.2
GQDs-0.5	298.7	430.9	5.1
GQDs-1.0	312.8	438.6	6.8
GQDs-2.0	316.2	442.1	7.4
GQDs-3.0	312.0	437.2	7.1

表5 PU/GQDs复合储热膜的电加热循环稳定性参数

Tab.5 Electric heating cycling stability parameters of PU/GQDs composite thermal storage films

样品	初次稳态温度/℃	第50次稳态温度/℃	稳态温度/%	初次响应时间/s	第50次响应时间/s
PU	47.5	42.8	90.1	62.0	70.3
GQDs-0.5	58.9	55.6	94.4	45.5	49.1
GQDs-1.0	72.3	69.2	95.7	34.8	36.6
GQDs-2.0	78.4	75.0	95.7	31.6	33.1
GQDs-3.0	76.9	71.3	92.7	36.4	39.5

2.6 PU/GQDs复合储热膜的电阻率分析

表6为PU/GQDs复合储热膜的ρ_v和σ。从表6可以看出,未掺入GQDs时,PU的ρ_v高达4.21×10^6 Ω·m,表现为典型绝缘特性。当掺入GQDs后,PU/GQDs复合储热膜的ρ_v随GQDs添加量的增加而显著下降,呈现明显的渗流行为。当GQDs添加量提高至0.5 phr时,GQDs-0.5的ρ_v降至1.36×10^6 Ω·m;当GQDs添加量为1.0 phr时,GQDs-1.0的ρ_v骤降至5.2×10^5 Ω·m,σ显著提高,表明体系达到了导电渗流阈值。当GQDs的添加量增加至2.0 phr时,GQDs-2.0的ρ_v为4.7×10^5 Ω·m;当GQDs添加量为3.0 phr时,GQDs-3.0的ρ_v出现轻微回升,为5.8×10^5 Ω·m,表明过量填料可能引发团聚及局部导电通道断裂。这主要是由于GQDs具有sp^2共轭结构与高比表面积,易在基体内通过近接触与电子隧穿/跳跃传导形成连续导电通路。当颗粒间距降至数纳米量级时,体系跨过渗流阈值,电导率急剧提升[27]。同时,PU含—NH—和—C═O等极性基团,GQDs表面含氧官能团,二者在界面区形成偶极层与界面极化,可在外电场下增强载流子迁移,提升低频电导[28]。当掺入3.0 phr的GQDs

时，GQDs-3.0的ρ_v略有回升。其原因在于团聚与界面缺陷导致通路不连续，局部电流密度不均[29]。

表6 PU/GQDs复合储热膜的ρ_v和σ

Tab. 6 ρ_v and σ of PU/GQDs composite thermal storage films

样品	ρ_v/(10^6 Ω·m)	σ/(10^{-7} S·m^{-1})
PU	4.21	0.024
GQDs-0.5	1.36	0.074
GQDs-1.0	0.52	0.192
GQDs-2.0	0.47	0.213
GQDs-3.0	0.58	0.172

3 结论

本研究采用溶液共混-流延成膜法成功制备PU/GQDs复合储热膜。结果表明：适量GQDs的引入可显著改善PU膜的导热性、电加热性能及热稳定性。掺入2.0 phr的GQDs时，PU/GQDs复合储热膜的综合性能最佳。与未掺入GQDs的PU相比，GQDs-2.0的导热系数、升温速率、稳态温度、初始分解温度和残炭率均显著提高，响应时间显著缩短，表明GQDs的掺入能够增强PU的热稳定性。电加热循环测试证明复合膜具有优异的稳定性和可重复性。研究为开发电除尘设备免伴热节能材料和低能耗环保材料提供参考。

参考文献

[1] 陶亮, 吴坤鑫. 燃煤电厂静电除尘电源装置节能降耗技术研究[J]. 节能, 2024, 43(10): 76-78

[2] 周鹏飞, 陈志炜, 汪卫章, 等. 烧结机头除尘器能效与减污降碳对比分析[J]. 工业安全与环保, 2025, 51(9): 99-103.

[3] 刘逸芸, 杨杰, 刘玺璞, 等. 煤质成分和烟温对电除尘器运行效率影响的实证研究[C]//中国环境科学学会2022年科学技术年会:环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 南昌: 中国环境科学学会环境工程分会,《工业建筑》杂志社有限公司, 2022.

[4] WANG N, NING L W, FU J, et al. Impact of temperature on electrostatic precipitator performance with varying electrode configurations[J]. ACS Omega, 2025, 10(21): 21473-21485.

[5] 谢有秀, 李逢春, 杨潇东, 等. 基于热塑性聚氨酯熔喷非织造材料的高性能柔性应变传感器[J]. 高分子学报, 2025, 56(7): 1203-1214.

[6] 郭楠, 苗威, 程玲玲, 等. 热塑性聚氨酯弹性体加强麻醉导管抗拉伸性能的试验研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(2): 127-131.

[7] 张海生, 田芳霖, 陈贵, 等. 用于软包装生物基聚氨酯胶黏剂的制备及耐水热性能研究[J]. 化工学报, 2026, 77(3): 1564-1576.

[8] 许富昌. 氢键型自修复聚氨酯复合材料的制备及其功能应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.

[9] LIU S H, SHEN M Y, KUAN C F, et al. Improving thermal stability of polyurethane through the addition of hyperbranched polysiloxane[J]. Polymers, 2019, 11(4): 697.

[10] 王津津, 伍素云, 刘水林, 等. 氮掺杂石墨烯量子点-NaBiO/BiOCl p-n异质结光催化剂的制备及可见光催化降解罗丹明B的性能研究[J]. 环境科学学报, 2026(2): 146-157.

[11] 吴景春, 王艺博, 石芳, 等. 改性石墨烯量子点聚表剂的制备及性能评价[J]. 石油化工, 2025, 54(11): 1601-1607.

[12] SEIBERT J R, KELEŞ Ö, WANG J, et al. Infusion of graphene quantum dots to modulate thermal conductivity and dynamic mechanical properties of polymers[J]. Polymer, 2019, 185: 121988.

[13] SCHNEIDER B, ORNAGHI H L Jr, MONTICELI F M, et al. Effect of the graphene quantum dot content on the thermal, dynamic-mechanical, and morphological properties of epoxy resin[J]. Polymers, 2023, 15 (23): 4531.

[14] KUMAR P, DHAND C, DWIVEDI N, et al. Graphene quantum dots: A contemporary perspective on scope, opportunities, and sustainability[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 111993.

[15] LEE S J, YOON S J, JEON I Y. Graphene/polymer nanocomposites: Preparation, mechanical properties, and application[J]. Polymers, 2022, 14(21): 4733.

[16] DE SOUZA BARNASKY R R, FRANKOWIAK J C, OPELT C V, et al. Percolation threshold and depression in properties of polymer nanocomposites[J]. Materials Research, 2022, 25: e20220137.

[17] POTTS J R, DREYER D R, BIELAWSKI C W, et al. Graphene-based polymer nanocomposites[J]. Polymer, 2011, 52(1): 5-25.

[18] SANIVADA U K, ESTEVES D, ARRUDA L M, et al. Joule-heating effect of thin films with carbon-based nanomaterials[J]. Materials, 2022, 15(12): 4323.

[19] LI A, ZHANG C, ZHANG Y F. Thermal conductivity of graphene-polymer composites: Mechanisms, properties, and applications[J]. Polymers, 2017, 9(9): 437.

[20] BARRA G, GUADAGNO L, RAIMONDO M, et al. A comprehensive review on the thermal stability assessment of polymers and composites for aeronautics and space applications[J]. Polymers, 2023, 15(18): 3786.

[21] LAWAL A T. Recent progress in graphene based polymer nanocomposites[J]. Cogent Chemistry, 2020, 6(1): 1833476.

[22] GOVINDARAJ P, SOKOLOVA A, SALIM N, et al. Distribution states of graphene in polymer nanocomposites: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 226: 109353.

[23] AKINYI C, IROH J O. Thermal decomposition and stability of hybrid graphene-clay/polyimide nanocomposites[J]. Polymers, 2023, 15 (2): 299.

[24] IRZMAŃSKA E, JURCZYK-KOWALSKA M, BOCZKOWSKA A, et al. Thermal analysis of polyurethane coatings modified with graphene and modification influence on mechanical properties of hybrid textile materials dedicated to personal protective equipment[J]. Coatings, 2025, 15(6): 705.

[25] MOYSEOWICZ A, MINTA D, GRYGLEWICZ G. Conductive polymer/graphene-based composites for next generation energy storage and sensing applications[J]. ChemElectroChem, 2023, 10(9): e202201145.

[26] CUI Y B, LIU L Y, SHI M N, et al. A review of advances in graphene quantum dots: From preparation and modification methods to application[J]. C: Journal of Carbon Research, 2024, 10(1): 7.

[27] LIANG S Q, WANG H C, TAO X. Conductive biomass films containing graphene oxide and cationic cellulose nanofibers for electric-heating applications[J]. Nanomaterials, 2021, 11(5): 1187.

[28] RAHAMAN M, ALDALBAHI A, GOVINDASAMI P, et al. A new insight in determining the percolation threshold of electrical conductivity for extrinsically conducting polymer composites through different sigmoidal models[J]. Polymers, 2017, 9(10): 527.

[29] JANG J U, NAM H E, SO S O, et al. Thermal percolation behavior in thermal conductivity of polymer nanocomposite with lateral size of graphene nanoplatelet[J]. Polymers, 2022, 14(2): 323.