石墨烯改性聚烯烃导电复合材料的制备与电力电缆屏蔽层电磁屏蔽性能优化研究

厍永明,冯梦梦

(河南工业和信息化职业学院,河南 焦作 454000)

摘　要:针对传统电力电缆金属屏蔽层质量大、易腐蚀、成本高以及现有屏蔽材料的电磁屏蔽效能不足、工况稳定性差等问题,研究以低密度聚乙烯与乙烯-乙酸乙烯共聚物为聚烯烃基体,采用熔融共混法制备石墨烯改性导电复合材料。实验对比传统一步法与优化分步加料法,引入马来酸酐接枝聚乙烯(PE-*g*-MAH)作为相容剂,调控石墨烯掺量,以期提升复合材料电磁屏蔽效能。研究测试优化后复合材料的体积电阻率、电磁屏蔽效能等关键指标,制备实际电缆样品,验证其在电力电缆屏蔽层中的适配性。结果表明,将石墨烯质量分数优化至5%,结合PE-*g*-MAH相容剂预分散工艺,复合材料的体积电阻率降至1.2×10^3 Ω·cm,1 000 MHz处的电磁屏蔽效能达到36.5 dB,较未优化体系提升40%以上。在1 000次弯曲循环和1 000 h湿热老化后,屏蔽效能保留率分别为94%和92%,力学与耐候性能可满足电缆敷设需求。复合材料在电力电缆屏蔽层中具有良好的应用前景。研究为导电塑料替代传统金属屏蔽材料提供技术支撑。

关键词:石墨烯改性聚烯烃;导电复合材料;电力电缆屏蔽层;电磁屏蔽

中图分类号:TQ327　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)08-0107-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.019

Study on Preparation of Graphene Modified Polyolefin Conductive Composites and Optimization of Electromagnetic Shielding Performance of Power Cable Shielding Layer

SHE Yongming, FENG Mengmeng

(Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: To address the issues of conventional metal shielding layers for power cables, such as high mass, easy corrosion, high cost, as well as the insufficient electromagnetic shielding effectiveness and poor stability under operating conditions of existing shielding materials, the study employed low-density polyethylene and ethylene-vinyl acetate copolymer as the polyolefin matrix to prepare graphene-modified conductive composites via melt blending. The conventional one-step method and an optimized stepwise feeding method were experimentally compared. Maleic anhydride-grafted polyethylene (PE-*g*-MAH) was introduced as a compatibilizer, and the graphene loading was adjusted to enhance the electromagnetic shielding effectiveness of the composites. Key parameters of the optimized composites, including volume resistivity and electromagnetic shielding effectiveness, were evaluated. Actual cable samples were fabricated to verify the applicability of the composites in power cable shielding layers. The results indicated that with an optimized graphene mass fraction of 5% combined with the pre-dispersion process using PE-*g*-MAH as a compatibilizer, the volume resistivity of the composite decreased to 1.2×10^3 Ω·cm, and the electromagnetic shielding effectiveness reached 36.5 dB at 1 000 MHz, representing an improvement of over 40% compared with the unoptimized system. After 1 000 bending cycles and 1 000 h of hygrothermal aging, the shielding effectiveness retention rates were 94% and 92%, respectively, demonstrating that the mechanical and weather resistance properties meet the requirements for cable installation. The composite exhibited promising application prospects in power cable shielding layers. The study provides

收稿日期 Submitted date 2026-01-25;修回日期 Revised date 2026-02-19;录用日期 Accepted date 2026-03-11

基金项目:2026年河南省软科学研究项目(262400410526)

联系人,148032846@qq.com

引用本文:厍永明,冯梦梦.石墨烯改性聚烯烃导电复合材料的制备与电力电缆屏蔽层电磁屏蔽性能优化研究[J].塑料科技,2026,54(8):107-112.

Citation: SHE Y M, FENG M M. Study on preparation of graphene modified polyolefin conductive composites and optimization of electromagnetic shielding performance of power cable shielding layer[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 107-112.

technical support for the replacement of traditional metal shielding materials with conductive plastics.

Keywords: Graphene modified polyolefin; Conductive composites; Shielding layer of power cable; Electromagnetic shielding

电力电缆作为电能传输与分配的“血管”,其运行的安全可靠性直接关乎国家能源安全与社会经济命脉。在现代挤包绝缘高压直流和交流电缆体系中,半导电屏蔽层厚度虽薄,但扮演着重要角色。随着电压等级的不断攀升,电缆对屏蔽材料的电导率稳定性、表面光洁度以及加工流变性提出更为严苛的要求[1-2]。

近年来,具有单原子层厚度、高载流子迁移率和机械强度的石墨烯为突破传统屏蔽材料的瓶颈提供了新思路。JOVANOVIĆ 等[3]综述了石墨烯及其复合材料在电磁屏蔽领域的应用,指出其独特的二维层状结构能够有效构建高效的电子传输网络与电磁波反射界面。CHHETRI 等[4]研究进一步证实,构建三维石墨烯网络结构可显著提升聚合物复合材料的电磁干扰屏蔽效能。目前,学术界已对石墨烯改性基体材料展开研究。例如,徐云慧等[5]在丁腈橡胶中引入石墨烯与乙炔炭黑,实现导电性能与力学性能的协同提升。吴宜峰等[6]制备的石墨烯/导电炭黑橡胶材料在支座应用中表现出优异的力学阻尼与导电稳定性。安长胜等[7]则探究环氧树脂/石墨烯复合体系的负温度系数(NTC)效应,证实微观网络结构对电热特性的调控作用。此外,在涂层与建筑材料领域,逄博等[8]与梁政显等[9]也分别验证石墨烯在提升水性环氧涂层及水泥基复合材料导电与压敏性能方面的潜力。

尽管石墨烯改性复合材料的研究成果丰富,但由于石墨烯比表面积较大、范德华力较强,在熔融热塑性聚烯烃中容易发生不可逆的层层堆叠与团聚,难以形成均匀的导电网络[10]。同时,石墨烯表面的化学惰性导致其与非极性聚烯烃基体界面结合力弱,在外力拉伸或热老化作用下易发生界面脱黏,不仅阻断导电通路,还会导致屏蔽效能大幅衰减[11]。因此,本研究针对传统炭黑屏蔽料的局限性及纳米复合材料的加工难题,提出一种基于界面相容剂改性与工艺优化的制备策略。研究选用低密度聚乙烯(LDPE)与乙烯-乙酸乙烯共聚物(EVA)作为共混基体,以兼顾材料的绝缘特性与极性润湿能力,引入马来酸酐接枝聚乙烯(PE-*g*-MAH)作为界面相容剂,利用其酸酐基团的锚定作用改善石墨烯与基体的界面结合。文章旨在为开发新型轻质、高可靠性的电力电缆屏蔽材料提供参考,推动导电塑料在替代传统金属屏蔽层方面的工程化进程。

1 实验部分

1.1 主要原料

LDPE,2426H,中国石化扬子石油化工有限公司;EVA,UE631,台湾聚合化学品股份有限公司;石墨烯纳米片(GNP),SE1233,常州第六元素材料科技股份有限公司;PE-*g*-MAH,KT-12A,沈阳科通塑胶有限公司;过氧化二异丙苯(DCP),质量分数≥99%,上海阿达玛斯试剂有限公司;抗氧剂,1010,工业级,德国巴斯夫集团。

1.2 仪器与设备

转矩流变仪,HAAKE PolyLab QC,美国赛默飞世尔科技公司;平板硫化机,XLB-D 350×350,湖州宏德机械有限公司;真空干燥箱,DZF-6050,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;缺口制样机,C-1,承德市金建检测仪器有限公司;冷场发射扫描电子显微镜,SU8010,日本日立高新技术公司;电子万能试验机,Z005,德国 Zwick Roell 公司;高阻计,6517B,美国吉时利仪器公司;数字万用表,2000,美国吉时利仪器公司;矢量网络分析仪,E5061B,美国是德科技公司。

1.3 样品制备

实验前,将 LDPE 和 EVA 基体树脂于 60 ℃真空干燥箱中干燥 12 h,GNP 于 80 ℃真空干燥箱中干燥 24 h。为对比工艺与相容剂的改性效果,分别采用传统一步法和优化的分步加料法制备复合材料。

表 1 为 GNP 改性聚烯烃导电复合材料的配方。未优化工艺(传统一步法,对应 S-5-U)中,将按配方称量的 LDPE、EVA、GNP、交联剂及抗氧剂(不含 PE-*g*-MAH 相容剂)一并加入转矩流变仪中,在 115 ℃、转速为 60 r/min 的条件下熔融混炼 10 min。优化工艺(分步加料法,对应 S-0 至 S-7 试样)的操作步骤为:先将 LDPE、EVA 与 PE-*g*-MAH 相容剂加入转矩流变仪,在温度 115 ℃、转速为 60 r/min 条件下,熔融共混 3 min,使相容剂在剪切作用下均匀分散并附着于树脂相;随后分批加入定量的 GNP,继续混炼 5 min,借助强剪切力促进 GNP 片层剥离与均匀分散;最后加入交联剂 DCP 与抗氧剂 1010,继续混炼 2 min 后出料(总混炼时间保持为 10 min)。将两种工艺所得物料粉碎,使用平板硫化机配合不锈钢模具,在 175 ℃、15 MPa 条件下热压 15 min,随后冷压脱模,制备得到不同规格的复合材料试样。所有试样在测试前均置于标准实验室环境[(23±2) ℃,相对湿度(50±5)%]下调节 24 h。

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,拉伸速率 50 mm/min。样品为哑铃形试样,标距 25 mm,宽度 4 mm,厚度 1 mm。每组试样不少于 5 个,结果取平均值。

SEM 表征:将样品液氮脆断,进行表面喷金处理,在 5 kV 加速电压下观察样品断面结构[12-14]。

体积电阻率测试:按照 GB/T 31838.2—2019 及 ASTM

D257—2014进行测试，分别采用四探针法及6517B高阻计三电极法进行测定[15-16]。

电磁屏蔽效能测试：按照ASTM D4935—2018进行测试，频率范围30~1 500 MHz[17-18]。

表1 GNP改性聚烯烃导电复合材料的配方

Tab.1 Formula of GNP modified polyolefin conductive composites

样品编号	m_{LDPE}/m_{EVA}	w_{GNP}/%	添加量/phr			工艺类型
			PE-*g*-MAH	DCP	抗氧剂	
纯LDPE/EVA基体	80/20	0	0	2	0.3	传统一步法
S-5-U(对照组)	80/20	5	0	2	0.3	传统一步法
S-0	80/20	0	5	2	0.3	优化分步法
S-1	80/20	1	5	2	0.3	优化分步法
S-3	80/20	3	5	2	0.3	优化分步法
S-5	80/20	5	5	2	0.3	优化分步法
S-7	80/20	7	5	2	0.3	优化分步法

注：w_{GNP}为GNP占复合材料总质量的质量分数，PE-*g*-MAH、DCP及抗氧剂添加量为基于100 phr基体树脂(LDPE+EVA)的份数。

介电特性测试：介电测试采用宽频介电阻抗谱仪，在室温及1 Hz~1 MHz频率范围内进行，样品为直径20 mm、厚度1 mm的圆片，测试前对样品进行喷金处理以消除接触电阻，测试电压为1 V。

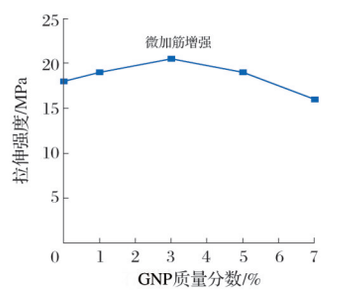
工况稳定性测试：按照GB/T 2423.50—2025进行测试，将尺寸为100 mm×10 mm×2 mm的长条形试样进行1 000次弯曲循环，弯曲半径设为试样厚度的10倍。另取同等厚度的圆片与长条形试样，在85 ℃、相对湿度85%环境中进行1 000 h湿热老化试验，以此评估材料的耐候性。

2 结果与讨论

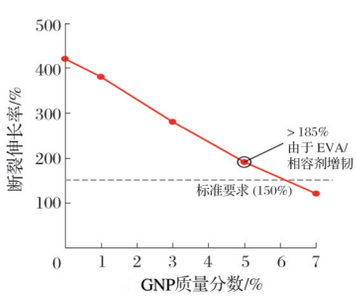
2.1 复合材料的力学性能分析

电力电缆的屏蔽层材料除应具有足够的力学强度，以承受制造过程中的挤出牵引力，还应具有足够的柔韧性，以适应电缆的卷绕和敷设。通常情况下，高硬度无机填料(GNP)的加入会破坏聚合物基体的连续性，使材料变脆。研究拟通过引入弹性体EVA及界面相容剂PE-*g*-MAH来解决这一问题。

图1为复合材料的力学性能。从图1a可以看出，随着GNP掺量的增加，复合材料的拉伸强度呈现先略微上升后下降的趋势。当GNP质量分数为1%~3%时，拉伸强度出现小幅提升。这是由于GNP的高比强度和二维片层结构在基体中起到类似“微加筋”的增强作用。然而，GNP质量分数超过5%后，拉伸强度转而下降。从图1b可以看出，随着GNP掺量的增加，断裂伸长率呈单调递减趋势。但即便在5%的较高质量分数下，复合材料的断裂伸长率仍保持在185%以上，高于电力电缆屏蔽料标准要求的150%。其原因在于两方面：(1) EVA组分提供良好的柔韧性基础；(2) PE-*g*-MAH中的酸酐基团与GNP表面的微量含氧基团或缺陷点发生物理锚定或化学键合，增强界面黏结力，从而抑制拉伸过程中微裂纹在界面的早期萌生与扩展。



(a) 拉伸强度



(b) 断裂伸长率

图1 复合材料的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of composites

2.2 复合材料的SEM分析

图2为复合材料的断面SEM照片。从图2a可以看出，纯LDPE/EVA基体断面较为平整，呈现典型的韧性断裂特征，无明显相分离，表明LDPE与EVA在熔融状态下相容性良好。从图2b可以看出，对照组S-5-U中GNP片层发生严重的堆叠团聚，形成尺寸超过20 μm的大颗粒团聚体，且因界面结合力较弱，断面出现明显的“脱黏”空洞。从图2c可以看出，优化工艺试样S-5中GNP片层呈现出良好的剥离状态，均匀分散于聚合物基体，未见大尺寸团聚。对比图2b与图2c可以看出工艺优化的显著效果。进一步放大观察该S-5试样的局部细节，从图2d可以看出，GNP片层表面被一层聚合物基体紧密包裹，界面层较为模糊。上述结果证实PE-*g*-MAH成功改善非极性聚乙烯分子链

与极性GNP表面之间的润湿性。

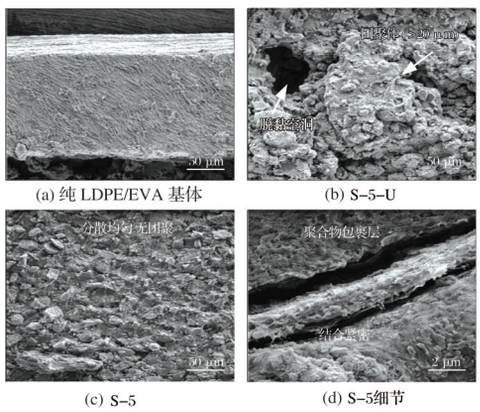


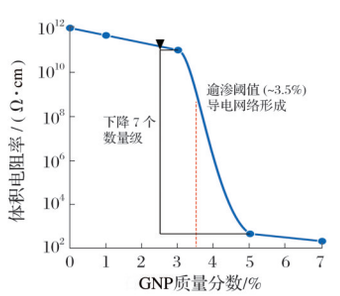
图2 复合材料断面的SEM照片

Fig.2 SEM images of cross section of composites

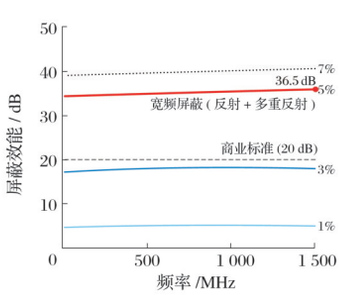
2.3 复合材料的电磁屏蔽性能分析

2.3.1 GNP掺量对屏蔽性能的影响

图3为复合材料的导电与屏蔽性能。从图3a可以看出，材料的导电行为呈现典型的“逾渗”特征。当GNP质量分数低于3%时，体积电阻率下降缓慢，说明导电填料尚未形成连续网络。当GNP质量分数在3%~5%区间时，体积电阻率呈指数级下降，跌幅达7个数量级，表明此时GNP片层在基体中相互搭接，形成连续的三维导电网络，逾渗阈值约为3.5%。当GNP质量分数继续增加至7%时，体积电阻率下降趋于平缓，进入导电饱和区。从图3b可以看出，随着GNP掺量的增加，全频段屏蔽效能显著提升。在GNP质量分数为5%时，复合材料在1 000 MHz处的屏蔽效能达到36.5 dB，高于商业应用通常要求的20 dB标准(即阻隔99%的电磁波)。



(a) 体积电阻率



(b) 屏蔽效能

图3 复合材料的导电与屏蔽性能

Fig.3 Conductive and shielding properties of composites

2.3.2 优化前后电磁屏蔽效能的对比

为量化评估本研究提出的“分步加料+相容剂改性”工艺的优越性，选取GNP质量分数为5%的试样，对比优化工艺(S-5)与传统一步法(S-5-U)工艺在低频(100 MHz)、中频(500 MHz)和高频(1 000 MHz) 3个代表性频点的屏蔽效能。表2为优化前后复合材料屏蔽效能对比。从表2可以看出，优化后的复合材料在各频段的屏蔽效能均较传统工艺提升40%以上。这一提升主要归因于两方面：其一，分步加料与高剪切工艺有效剥离GNP，增加单位体积内的有效导电粒子数量；其二，良好的分散性避免团聚体造成的“死区”，在基体内部构建更为致密且均匀的导电通路，从而增强对电磁波的反射与吸收能力。

表2 优化前后复合材料屏蔽效能对比

Tab.2 Comparison of shielding effectiveness of composites before and after optimization

频率/MHz	屏蔽效能/dB		屏蔽效能提升幅度/%
	S-5-U	S-5	
100	22.4	33.1	47.80
500	24.1	35.2	46.10
1 000	25.8	36.5	41.50

2.4 复合材料的介电特性分析

对于高压电缆半导电屏蔽材料，内部导电网络的构建不仅决定电磁屏蔽效能，还会显著影响材料的介电响应。图4为纯LDPE/EVA基体和S-5复合材料的介电特性。从图4可以看出，GNP的加入使复合材料的介电常数(ε')较纯LDPE/EVA基体显著提高。这一现象主要归因于GNP与聚合物基体之间电导率差异较大，在交变电场作用下，载流子在相界面处大量聚集，产生“麦克斯韦-瓦格纳”(MW)界面极化效应。同时，GNP自身良好的导电性也为界面极化提供充足的自由电子。这种高介电特性有利于在实际电缆屏蔽层中更有效地吸收和耗散电磁波能量，同时能够有效均化电缆内部的非均匀电场，缓解局部场强集中，进而提升电缆整体的运行可靠性。

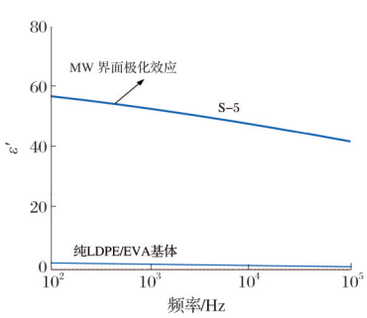


图4 纯LDPE/EVA基体和S-5复合材料的介电特性

Fig.4 Dielectric properties of pure LDPE/EVA matrix and S-5 composites

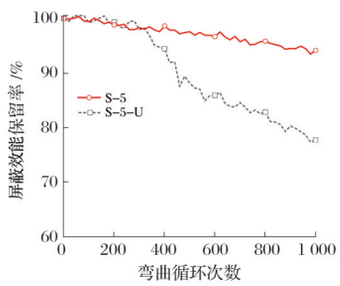
2.5 复合材料的工况稳定性和综合性能分析

2.5.1 工况稳定性

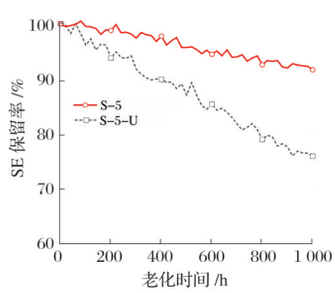
图5为弯曲疲劳与湿热老化后复合材料的屏蔽效能。从图5a可以看出，数据点呈现典型的实验离散特征。未优化试样S-5-U在前期的300次循环内屏蔽效能维持较好，之后出现明显衰减，1 000次循环后屏蔽效能保留率降至约78%。其原因在于相容剂的缺失使GNP与聚烯烃基体界面结合力较弱，在反复弯曲应力下发生不可逆的界面剥离，使导电通路断裂。相比之下，优化后的S-5试样在测试中虽有微小数值波动，但总体保持较高的稳定性，1 000次循环后屏蔽效能保留率稳定在94%左右。这表明PE-*g*-MAH的引入在无机填料与有机基体间构建了强韧的分子锚定结构，有效抑制疲劳微裂纹的萌生与扩展。从图5b可以看出，随着老化时间的延长，未优化试样S-5-U的屏蔽效能呈单调下降趋势，1 000 h后屏蔽效能保留率约为75%，表明水蒸气分子已渗入基体内部引起溶胀，破坏导电网络接触点。而优化后的S-5试样在长达1 000 h的测试周期中，数据点始终在92%以上的高位区间浮动，屏蔽效能保留率仅下降约8%。其原因在于两方面：一是优化的加工工艺促进GNP片层的层状取向，形成致密的“迷宫效应”，延长水氧渗透路径；二是良好的界面结合减少微观空隙，有效阻隔湿热环境对内部导电网络的侵蚀。

2.5.2 综合性能

表3为优化后复合材料的综合性能。从表3可以看出，优化后复合材料的拉伸强度为14.2 MPa，断裂伸长率为188%，体积电阻率为1.2×10^3 Ω·cm，1 000 MHz频率下屏蔽效能为36.5 dB，老化后屏蔽效能保留率高达92%，均满足行业标准，表现出良好的工况稳定性能。



(a) 弯曲疲劳



(b) 湿热老化

图5 弯曲疲劳与湿热老化后复合材料的屏蔽效能

Fig.5 Shielding effectiveness of composites after bending fatigue and hygrothermal aging

表3 优化后复合材料的综合性能

Tab.3 Comprehensive properties of optimized composite

项目	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	体积电阻率/(Ω·cm)	屏蔽效能(1 000 MHz)/dB	老化后屏蔽效能保留率/%
测试结果	14.2	188	1.2×10^3	36.5	92
行业标准值	≥10.0	≥150	≤10^5	>20.0	—
评价	优异	合格	优异	高效	稳定

注：“—”表示无相关数据。

2.6 复合材料改性机制与综合优势分析

电力电缆金属屏蔽层在长期运行中易受腐蚀和机械损伤，接地故障频发[19-21]。研究人员多利用纳米填料实现屏蔽层功能化改性，例如，采用静电纺丝技术制备纳米纤维膜[22]或引入聚乙烯亚胺增强界面结合性能[23]。然而，前者机械强度不足，难以直接集成于电缆本体；后者因高吸湿性可能引发绝缘劣化风险。相比之下，本研究采用疏水且化学稳定的PE-*g*-MAH相容剂，兼顾力学性能与电磁屏蔽效能，通过熔融共混实现规模化加工适配性。

与现有的多层夹层结构复合材料[24]相比，本研究所采用的分步加料与高剪切共混工艺不仅实现GNP的高效剥离与均匀分散，还显著增强基体间的界面相容性，有效规避层间应力引发的界面不稳定问题。在抗老化与耐疲劳方面，相容剂与分步熔融工艺的协同优化发挥积极作用，这与现有导热绝缘聚乙烯电缆料的研究结论相吻合[25]。

3 结论

本研究基于界面相容剂改性与分步熔融共混工艺制备具有较高屏蔽效能和优良耐候性的LDPE/EVA/GNP导电复合材料。结果表明，相容剂PE-*g*-MAH配合分步加料工艺可以有效改善GNP在聚烯烃基体中的剥离程度与分散均匀性，进而在基体内部构建致密稳定的导电网络。当GNP质量分数为5%时，复合材料在1 000 MHz处的电磁屏蔽效能达36.5 dB，较传统工艺提升40%以上。同时，该材料兼具较好的力学韧性与工况稳定性，拉伸强度达14.2 MPa，断裂伸长率达188%，且在经历1 000次弯曲循环及1 000 h湿热老化后，屏蔽效能保留率分别为94%和92%。综上所述，该复合材料可以有效弥补传统金属屏蔽层的不足，满足实际电缆护层结构一体化挤出成型的加工要求，在大规模连续挤出工艺中具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 高磊, 洪宁宁, 吴仲孝. 磁悬浮轨道交通用特殊电缆的热老化性能研究[J]. 橡胶工业, 2025, 72(2): 131-137.

[2] 李亚莎, 陈董董, 章小彬, 等. 功能化石墨烯改性聚乙烯热力学特性的分子动力学模拟[J]. 原子与分子物理学报, 2023, 40(6): 85-94.

[3] JOVANOVIĆ S, HUSKIĆ M, KEPIĆ D, et al. A review on graphene and graphene composites for application in electromagnetic shielding [J]. Graphene and 2D Materials, 2023, 8(3): 59-80.

[4] CHHETRI S, KUILA T. Polymer composites with 3D graphene architectures as high-performance EMI shielding materials: A review [J]. RSC Applied Polymers, 2024, 2(4): 507-533.

[5] 徐云慧, 王仕峰, 涂辉, 等. 导电石墨烯/乙炔炭黑/丁腈橡胶复合材料的制备与性能研究[J]. 高分子通报, 2024, 37(11): 1645-1653.

[6] 吴宜峰, 张啸天, 王浩, 等. 支座用石墨烯/导电炭黑橡胶材料的制备与性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(1): 44-49.

[7] 安长胜, 欧齐翔, 张昭, 等. 868环氧树脂/石墨烯复合导电聚合物的NTC效应研究[J]. 电子元件与材料, 2024, 43(8): 908-912.

[8] 逄博, 赵玲玲, 王宏, 等. 石墨烯/碳纳米管复合水性环氧水泥基导电涂层性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(11): 4212-4219.

[9] 梁政显, 夏海廷, 索玉霞, 等. 环境因素对氧化石墨烯水泥基复合材料导电、压敏性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊1): 52-63.

[10] 郭妙才, 赵大方, 鹿海军. 碳纳米管/石墨烯杂化碳纤维织物复合材料的力学、导电和雷击性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4487-4498.

[11] 秦予, 薛国明, 徐杰, 等. 石墨烯电热涂料的研发与应用进展[J]. 涂料工业, 2024, 54(12): 80-84.

[12] 何锦涛, 雷冬, 高子淇, 等. 混凝土界面过渡区力学性能测试方法研究进展[J]. 实验力学, 2022, 37(6): 805-820.

[13] 赵仁航, 李秦良, 王鹏, 等. 水性导电型石墨烯掺量对柔性聚氨酯基膜电热性能的影响[J]. 化工新型材料, 2025, 53(9): 77-84.

[14] 周建力, 任潇一, 张宜旭, 等. 基于扫描电镜原位高温疲劳测试方法研究[J]. 电子显微学报, 2021, 40(3): 215-220.

[15] ORASUGH J T, RAY S S. Functional and structural facts of effective electromagnetic interference shielding materials: A review[J]. ACS Omega, 2023, 8(9): 8134-8158.

[16] ZHENG S F, WANG Y Y, ZHU Y F, et al. Recent advances in structural design of conductive polymer composites for electromagnetic interference shielding[J]. Polymer Composites, 2024, 45(1): 43-76.

[17] MYLSAMY G, KRISHNASAMY P. Experimental investigation on electrical conductivity, dielectric properties, and EMI shielding effectiveness of NiP/graphene-coated natural fiber[J]. Journal of Electronic Materials, 2024, 53(2): 753-765.

[18] CLÉRICO P, PICHON L, MININGER X, et al. Assessment of broadband shielding effectiveness of composite panels for protective enclosures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(5): 1750-1757.

[19] 李忠磊, 赵宇彤, 韩涛, 等. 高压电缆半导电屏蔽材料研究进展与展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2341-2354.

[20] 李国倡, 魏艳慧, 雷清泉, 等. 高压电缆半导电屏蔽料关键问题及研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1271-1284.

[21] 李嘉伟, 贾海斌, 刘迅, 等. 氧化石墨烯/银/聚苯胺复合材料的制备及其在导电橡胶中的性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2025, 55(5): 74-80.

[22] 冯笑琳, 李旭明. 静电纺丝制备抗菌性聚乳酸纳米纤维膜的研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 176-180.

[23] 许耀铮, 江涛, 成娟, 等. 有机/无机耦合协同提高氧化石墨烯复合材料的阻燃和火灾预警性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(12): 6871-6881.

[24] WU J X, GAO Y T. High-performance electromagnetic shielding composite materials based on carbon nanotubes and sandwich laminate structures[J]. Polymer Composites, 2024, 45(15): 13639-13649.

[25] 周宏. 相容剂PE-g-GMA在导热绝缘聚乙烯电缆料中的作用研究[J]. 化学工程师, 2025, 39(3): 100-104.