电缆保护管用HDPE/AMWs复合材料的制备与性能研究

张振宇[1],韩绪鹏[1],贝慧婷[2]*

(1.广西电力职业技术学院,广西 南宁 530299;2.广西建设职业技术学院土木工程学院,广西 南宁 530007)

摘　要:为改善高密度聚乙烯(HDPE)电缆保护管的性能并推动人造岗石废渣(AMWs)的高值化利用,采用熔融共混与注塑成型制备HDPE基复合材料,系统表征其微观结构、结晶行为、力学性能、热变形及电气绝缘性能。结果表明:AMWs表面的有机层可作为异相成核位点,显著调控HDPE结晶。当填料添加量为50 phr时,HDPE/AMWs复合材料的结晶度高达88.5%,拉伸强度为23.3 MPa,高于同添加量下的$CaCO_3$体系。在热性能方面,中低添加量时AMWs体系热变形性能更优。当填料添加量为70 phr时,$CaCO_3$体系热变形温度升至91.3 ℃,弯曲模量达2 341 MPa,表现出更优的耐高温变形能力与刚性。在电性能方面,当填料添加量为70 phr时,两类材料的体积电阻率均高于1.60×10^{13} Ω·m,击穿场强稳定在22 kV/mm,满足电缆保护管绝缘要求。AMWs可通过诱导结晶提升材料拉伸强度与中低添加量下的热稳定性,并保持良好绝缘性,具有替代$CaCO_3$制备高性能电缆保护管材料的潜力。

关键词:岗石废渣;碳酸钙;高密度聚乙烯;电缆保护管;电气性能

中图分类号:TQ325.1;TB332　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)08-0101-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.018

Preparation and Properties Study of HDPE/AMWs Composites for Cable Protection Pipes

ZHANG Zhenyu[1], HAN Xupeng[1], BEI Huiting[2]*

(1. Guangxi Electrical Polytechnic Institute, Nanning 530299, China; 2. School of Civil Engineering Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning 530007, China)

Abstract: To improve the performance of high-density polyethylene (HDPE) cable protection pipes and promote the high-value utilization of artificial marble waste residues (AMWs), HDPE-based composites were prepared via melt blending and injection molding. The microstructure, crystallization behavior, mechanical properties, thermal deformation, and electrical insulation performance were systematically characterized. The results showed that the organic layer on the surface of AMWs could serve as heterogeneous nucleation sites, significantly regulating the crystallization of HDPE. At a filler loading of 50 phr, the HDPE/AMWs composites achieved a crystallinity as high as 88.5%, with a tensile strength of 23.3 MPa, which was higher than that of the $CaCO_3$ system at the same loading. In terms of thermal properties, the AMWs system exhibited better thermal deformation performance at low and medium filler loadings. At a filler loading of 70 phr, the $CaCO_3$ system showed a heat deflection temperature of 91.3 ℃ and a flexural modulus of 2 341 MPa, indicating superior resistance to high-temperature deformation and higher rigidity. Regarding electrical properties, both composite systems at a filler loading of 70 phr exhibited volume resistivities above 1.60×10^{13} Ω·m and stable breakdown strengths of around 22 kV/mm, meeting the insulation requirements for cable protection pipes. In conclusion, AMWs can enhance the tensile strength and thermal stability at low and medium filler loadings through induced crystallization, while maintaining good insulation performance. This demonstrates their potential to replace $CaCO_3$ in the preparation of high-performance cable protection pipe materials.

Keywords: AMWs; $CaCO_3$; HDPE; Cable protection pipe; Electrical properties

收稿日期 Submitted date 2025-12-28;修回日期 Revised date 2026-01-16;录用日期 Accepted date 2026-02-06

基金项目:2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1348);2024年度广西职业教育教学改革研究项目(GXGZJG2024B066)

*联系人,bay624@qq.com

引用本文:张振宇,韩绪鹏,贝慧婷.电缆保护管用HDPE/AMWs复合材料的制备与性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):101-106.

Citation: ZHANG Z Y, HAN X P, BEI H T. Preparation and properties study of HDPE/AMWs composites for cable protection pipes[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 101-106.

高密度聚乙烯(HDPE)因优异的耐化学腐蚀性、良好的绝缘性能及较高的机械强度，被广泛应用于电缆护套、电缆保护管及流体输送管道等领域[1-2]。尤其在电力电缆系统中，HDPE保护管对电缆的物理防护和长期安全运行至关重要[3]。然而，HDPE存在刚性不足、成本较高且在户外长期使用中易发生紫外线老化等问题，限制其在苛刻环境下的应用寿命[4-5]。为改善HDPE的综合性能并降低成本，填充改性是有效的技术途径之一[6-7]。

近年来，在固废资源化利用与高性能聚合物复合材料开发的双重推动下，人造岗石废渣(AMWs)作为一种具有“无机核-有机壳”结构的新型复合填料受到广泛关注[8-10]。AMWs虽成本低廉，但成分复杂，如何实现高附加值资源化利用一直是行业内面临的挑战，目前其应用仍主要局限于水泥、混凝土等传统建材领域[11-12]，因此需要拓展新的高附加值应用渠道。相较于传统碳酸钙($CaCO_3$)填料，AMWs表面的有机残留层可提供更好的界面相容性，尤其有利于改善与聚烯烃等疏水性基体的结合性，从而在保持填料增强效果的同时提升复合材料的综合性能[13-14]。目前，针对HDPE/AMWs复合材料的研究多集中于静态力学性能与加工性能。LU等[15]采用钛酸酯偶联剂处理AMWs，发现制备的HDPE/AMWs复合材料力学性能优于$CaCO_3$填充体系。冼学权等[16]对比研究AMWs与普通重钙粉(HC)填充HDPE复合材料的性能，发现AMWs填充体系具有更优的界面相容性和力学性能，AMWs复合体系的黏度及模量更低，加工流动性更好，AMWs可作为高效填料替代传统HC。然而，现有研究多集中于力学与加工性能，关于AMWs在电缆保护管绝缘等领域的研究报道较少，尤其缺乏对其热变形行为、结晶特性及电气绝缘性能等服役性能的系统评估，难以全面判断其在高性能电缆保护管中的应用潜力。

因此，本研究通过熔融共混法制备不同添加量(30、50、70 phr)的HDPE/AMWs及HDPE/$CaCO_3$复合材料体系，探索AMWs在电缆保护管中的应用潜力。填料用量的设置旨在兼顾工程材料对刚性、耐热性及低成本的需求，通过宽范围填充梯度揭示两类填料对HDPE性能的影响规律与临界点，尤其是高填充下的界面与性能演变。研究系统表征了复合材料的微观结构、结晶行为、力学性能、热稳定性及电气绝缘性能，以评估AMWs替代传统$CaCO_3$制备高性能电缆保护管材料的可行性，从而为AMWs的高附加值资源化利用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

HDPE，5000S，颗粒料，中国石油天然气股份有限公司大庆石化分公司；AMWs，工业品，中值粒径(D_{50})为11.28 μm，桂林市华美石材有限公司；$CaCO_3$，工业品，D_{50}为11.42 μm，广西中缅越泰新材料科技有限公司；硬脂酸，分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱，DGX-9073B，上海福玛实验设备有限公司；高速混合机，SHR-10A，张家港伟诺塑料科技有限公司；同向双螺杆挤出机，CJWH-35-44D，常州金纬智能化工装备有限公司；伺服节能注塑机，MA1600III/SE，海天塑机集团有限公司；电子万能力学试验机，C44，美特斯工业系统(中国)有限公司；摆锤式冲击试验机，ZBC8400-A，美特斯工业系统(中国)有限公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，NicoletiS-380，美国热电公司；扫描电子显微镜(SEM)，S-3400N，HITACHI日立(中国)有限公司；X射线衍射仪(XRD)，Ultima IV，日本Rigaku公司；差示扫描量热仪(DSC)，Q20，美国TA公司；热变形、维卡软化点温度测试仪，HSY-1633A，上海颀高仪器有限公司；双电测四探针测试仪，RTS-9，广州四探针科技有限公司；电压击穿试验仪，HCDJC-100KV，北京华测试验仪器有限公司。

1.3 样品制备

实验前，对AMWs与$CaCO_3$填料进行表面活化预处理。通过电热恒温鼓风干燥箱将AMWs或$CaCO_3$填料于105 ℃下干燥24 h，在110 ℃、5 000 r/min的高速混合机中搅拌至100 ℃，加入占填料质量1%的硬脂酸，反应15 min，得到改性AMWs或$CaCO_3$填料。以100 phr HDPE为基体，分别与30、50、70 phr预处理的AMWs或$CaCO_3$在高速混合机中室温预混10 min。将混合物转移至温度区间为185~215 ℃、主机螺杆转速为200 r/min、喂料速率为15 r/min的同向双螺杆挤出机中熔融挤出，经水冷切粒得到HDPE/AMWs或HDPE/$CaCO_3$复合材料的母粒，按“填料-添加量”格式命名(如AMWs-30、$CaCO_3$-50)。将母粒于103 ℃鼓风干燥箱中干燥至含水率符合要求，在料筒温度190~210 ℃、模具温度40 ℃的注塑机中成型，制得测试所需标准样条。

1.4 性能测试与表征

SEM测试：对样品的冲击断面进行喷金处理，使用扫描电子显微镜观察样品的微观形貌。

拉伸性能测试：按GB/T 1040.1—2025进行测试，试件为170 mm×20 mm×4 mm的哑铃形试件，窄部宽度为10 mm，优选厚度为4 mm，测试速度为50 mm/min。

弯曲性能测试：按GB/T 9341—2008进行测试，试件尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，跨距为64 mm，测试速度为2 mm/min。

冲击性能测试：按GB/T 1843—2008进行测试，采用缺口冲击模式，试件尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，冲击能量为5.5 J，冲击速度为2.9 m/s。

热变形温度(HDT)测试：按GB/T 1634.1—2025，使用热变形、维卡软化点温度测试仪测试试样的热变形温度。

DSC测试：在氮气气氛下，以10 ℃/min的速率从40 ℃加热至180 ℃，再降温至40 ℃；再以10 ℃/min的速

率升温至180 ℃，保温5 min，再降温至40 ℃，记录样品的熔融-结晶曲线，据此计算样品的结晶度(X_c)[17]。

FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪对样品化学结构进行分析，波数范围为4 000~400 cm^{-1}。

XRD测试：采用X射线衍射仪对样品的晶体结构进行分析，工作电压为40 kV，工作电流为40 mA，扫描速率为10 (°)/min，扫描范围为10°~45°。

体积电阻率测试：按GB/T 31838.2—2019进行测试。

交流击穿电压测试：按GB/T 1408.1—2016进行测试，试样厚度为2.9 mm，升压速率为2 kV/s。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的断面形貌分析

界面相互作用对聚烯烃/无机填料共混物的结构和性能起着决定性作用[18-19]。图1为复合材料冲击断面的SEM照片。从图1可以看出，两种填料在HDPE基体中的分散状态、界面结合及断裂形貌均呈现显著差异。在$CaCO_3$体系中，填料的分散状态与断面形貌随添加量变化而演变。当$CaCO_3$添加量为30 phr时，部分$CaCO_3$颗粒与基体间存在界面脱黏及微米级间隙，断面呈现明显的韧性断裂特征，表面粗糙并可见韧窝结构[16,20]。当$CaCO_3$添加量为50 phr时，填料分散趋于均匀，界面结合更为连续，断面平整度提高，韧性断裂形貌仍可见，但不如30 phr显著。而在70 phr高添加量下，填料出现局部堆积，断面整体较为平整，韧性特征明显减弱，表现出更为脆性的断裂模式[21]。对于AMWs填充体系，填料在基体中分散较为均匀，但在所有添加量下均可见其与基体界面处存在明显空隙与脱黏现象，此类缺陷随添加量的增加更为显著。AMWs体系的冲击断面在各添加量下均表现出较高的平整度，未出现明显的韧性断裂形貌。

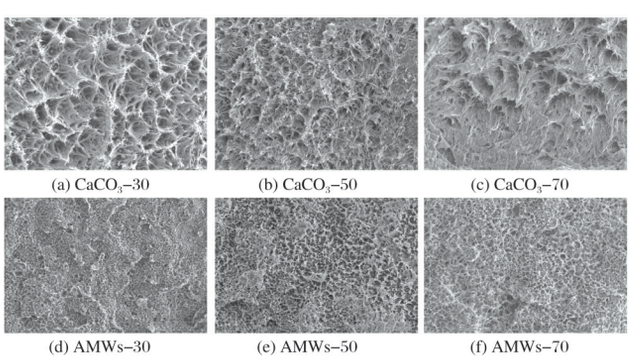
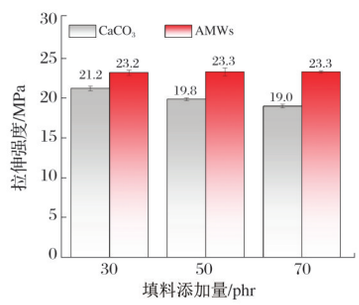


图1 复合材料冲击断面的SEM照片

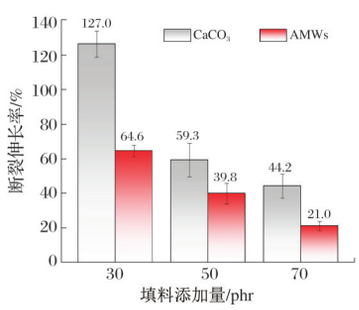
Fig.1 SEM images of impact fracture surfaces of composites

2.2 复合材料的力学性能分析

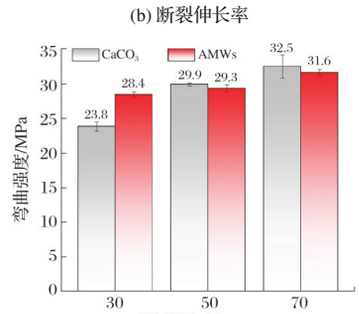
图2为复合材料的拉伸性能和弯曲性能。从图2a可以看出，随着填料添加量的增加，$CaCO_3$体系的拉伸强度由21.2 MPa逐渐下降至19.0 MPa，降幅约为10.4%；与之相比，AMWs体系的拉伸强度始终保持在23.2 MPa附近，并在50 phr时达到最高值，表现出更优的界面结合与增强效应。原因是AMWs在基体中分散均匀，界面结合相对完整，有助于其在拉伸过程中有效传递应力。从图2b可以看出，两种体系的断裂伸长率均随填料添加量的增加而显著下降。在相同添加量下，AMWs体系的断裂伸长率始终低于$CaCO_3$体系。AMWs添加量为70 phr时，断裂伸长率为21.0%，较$CaCO_3$体系的44.2%降低52.5%。结合SEM结果，AMWs体系界面处普遍存在的空隙与脱黏结构约束了基体的塑性变形，导致其在宏观上表现出更高的脆性倾向。从图2c可以看出，填料添加量从30 phr增至70 phr时，$CaCO_3$体系的弯曲强度从23.8 MPa提高至32.5 MPa，增幅约36.6%；AMWs体系的弯曲强度从28.4 MPa增至31.6 MPa，增幅约11.3%。弯曲模量也呈现类似上升趋势。从图2d可以看出，在30 phr添加量下，AMWs体系具有更高的弯曲强度(28.4 MPa)和更低的弯曲模量，表明在该条件下复合材料兼具良好承载能力与适度柔韧性。当添加量增至50 phr和70 phr时，两体系弯曲强度逐渐接近，但$CaCO_3$体系在70 phr时的弯曲模量达2 341 MPa，显著高于AMWs体系(1 650 MPa)，表明$CaCO_3$在较高添加量下刚性更为突出。这一结果与SEM中观察到的$CaCO_3$在高添加量下填料堆积增强刚性的形貌特征相呼应，说明$CaCO_3$在超高填充时更易形成刚性网络。



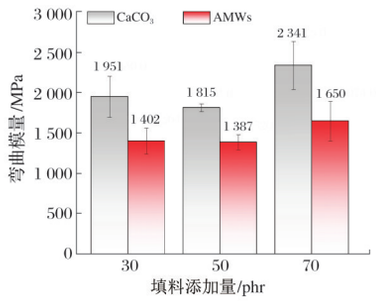
(a) 拉伸强度



(b) 断裂伸长率



(c) 弯曲强度



(d) 弯曲模量

图 2　复合材料的拉伸性能和弯曲性能

Fig.2 Tensile properties and flexural properties of composites

图 3 为复合材料的缺口冲击性能。从图 3 可以看出，填料的种类和添加量对复合材料的冲击韧性影响显著。随着填料添加量从 30 phr 增至 70 phr，AMWs 体系的缺口冲击强度从 10.3 kJ/m^2 持续下降至 5.3 kJ/m^2，降幅约 48.5%。相比之下，$CaCO_3$ 体系在 50 phr 时缺口冲击强度最高，达到 25.0 kJ/m^2。在相同添加量下，AMWs 体系的缺口冲击强度始终低于 $CaCO_3$ 体系，尤其在 30 phr 和 50 phr 时，仅为 $CaCO_3$ 体系的一半左右。SEM 断面分析为此提供了直接解释。AMWs 体系断面平整，缺乏明显韧性断裂形貌，说明其在冲击载荷下易发生脆性断裂；$CaCO_3$ 体系在 30 phr 和 50 phr 时表现出韧性断裂特征，尤其是 50 phr 时填料分散均匀，界面结合较好，有利于应力分散与能量吸收，因此冲击韧性较高。当添加量为 70 phr 时，$CaCO_3$ 填料堆积增多，断面趋于平整，冲击韧性也随之下降。结果表明：冲击性能不仅受填料-基体界面性质影响，也与填料分散状态及应力传递机制密切相关。

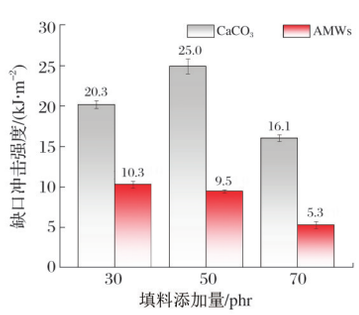


图 3　复合材料的缺口冲击性能

Fig.3 Notched impact strength of composites

2.3　复合材料的热变形行为分析

图 4 为复合材料的 HDT。从图 4 可以看出，两种体系的 HDT 均随填料添加量的增加而逐步升高，表明填料的加入可有效提升复合材料的热稳定性。在 30 phr 和 50 phr 添加量下，AMWs 体系的 HDT(分别为 54.2 ℃和 59.8 ℃)优于对应的 $CaCO_3$ 体系(53.2 ℃和 56.9 ℃)。但当添加量增至 70 phr 时，$CaCO_3$ 体系的 HDT 显著提升至 91.3 ℃，反超 AMWs 体系(85.3 ℃)。在中、低水平填充条件下，AMWs 对基体热稳定性的改善效果更优；在高水平填充条件下，$CaCO_3$ 体系表现出更高的耐热变形能力。

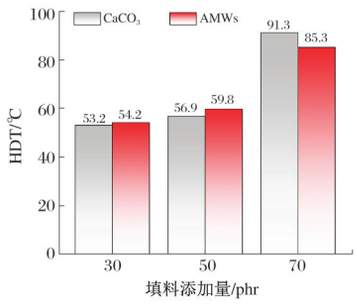
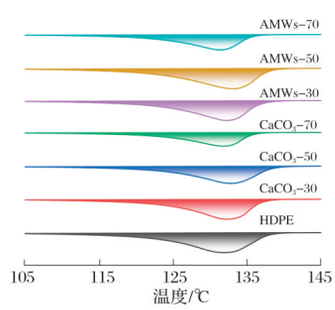


图 4　复合材料的 HDT

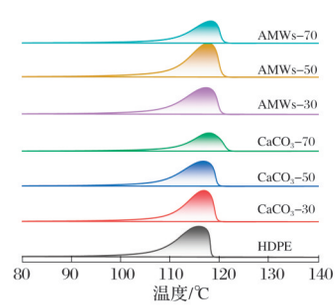
Fig.4 HDT of composites

2.4　复合材料的结晶特性分析

图 5 和表 1 分别为 HDPE 及复合材料的 DSC 曲线和熔融-结晶参数。从图 5 和表 1 可以看出，填料的引入显著改变了 HDPE 基体的结晶过程。随着填料添加量的增加，复合材料的熔融温度(t_m)保持稳定，但结晶温度(t_c)较 HDPE (115.82 ℃)有所提高，表明填料起到异相成核作用[22]。X_c 随填料种类和添加量呈现规律性变化。当填料添加量为 30 phr 时，两种填料的引入均提升 X_c。当填料添加量为 50 phr 时，AMWs 体系的 X_c 高达 88.5%，显著超过 $CaCO_3$ 体系(74.3%)。主要得益于其表面有机包覆层对 HDPE 分子链排列的强诱导作用。当填料添加量达到 70 phr 时，过量的填料可能产生空间位阻，导致两体系的 X_c 均出现回落。适量 AMWs 填料能够更有效地提升基体的 X_c。这一结果为材料优异静态力学性能提供了内在的结构依据。



(a) 熔融曲线



(b) 结晶曲线

图 5　HDPE 及复合材料的 DSC 曲线

Fig.5 DSC curves of HDPE and composites

图 6 为 HDPE、$CaCO_3$-70 和 AMWs-70 的 XRD 谱图。从图 6 可以看出，HDPE 与 $CaCO_3$-70 在 21.5° 和 23.8° 附近的特征衍射峰峰位一致，分别对应 HDPE 的(110)与(200)

晶面[23]，表明 $CaCO_3$ 的加入未改变基体的晶格参数。然而，AMWs-70 对应的衍射峰发生明显右移，意味着其晶面间距缩小，晶体结构中产生微应变。这一结果与DSC分析中AMWs体系 X_c 显著提高的结论相互印证。AMWs表面有机包覆层与HDPE分子链之间的强相互作用不仅提供有效的异相成核位点，导致 t_c 升高，还在结晶过程中持续诱导和约束链段堆砌，从而形成更完善但内应力更高的晶体结构。这种“受约束结晶”导致的紧密晶格，从微观层面上直接解释了AMWs复合材料宏观上“高强低韧”的力学特性。

表1 HDPE及复合材料的熔融-结晶参数

Tab.1 Melting-crystallization parameters of HDPE and composites

样品	t_m/℃	H_m/(J·g^{-1})	t_c/℃	H_c/(J·g^{-1})	X_c/%
HDPE	131.84	183.5	115.82	169.90	62.6
$CaCO_3$-30	132.33	151.5	116.85	144.80	67.2
$CaCO_3$-50	132.82	145.2	116.72	140.80	74.3
$CaCO_3$-70	131.80	102.2	117.86	97.87	59.6
AMWs-30	132.30	152.3	117.26	149.70	67.6
AMWs-50	133.13	173.0	117.69	170.70	88.5
AMWs-70	131.38	110.1	118.23	108.10	64.2

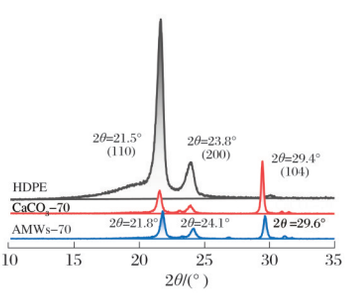


图6 HDPE、$CaCO_3$-70和AMWs-70的XRD谱图

Fig.6 XRD patterns of HDPE, $CaCO_3$-70 and AMWs-70

2.5 复合材料的FTIR分析

图7为HDPE、$CaCO_3$-70和AMWs-70的FTIR谱图。从图7可以看出，HDPE在2 914、2 847、1 471、717 cm^{-1}处分别出现归属于亚甲基(—CH_2—)不对称伸缩振动、对称伸缩振动、变角振动及面内摇摆振动的特征吸收峰，符合聚乙烯的典型红外特征[24-26]。两种填充体系在上述位置均保留相应吸收峰，$CaCO_3$-70与AMWs-70样品均在1 742、1 421、875 cm^{-1}处呈现明显的吸收峰，分别对应 $CaCO_3$ 中的C═O伸缩振动、C—O反对称伸缩振动及 CO_3^{2-} 面外变形振动[27-28]，证实复合材料中存在 $CaCO_3$ 组分。无论是 $CaCO_3$ 还是AMWs填料均未对HDPE基体的化学结构造成显著影响。

2.6 复合材料的绝缘性能分析

图8为复合材料的体积电阻率。从图8可以看出，随着填料含量从30 phr增加至70 phr，两种复合材料体系的体积电阻率均逐渐升高，说明无机填料的引入有助于改善HDPE基体的绝缘性能。在相同添加量下，$CaCO_3$ 体系的体积电阻率始终高于AMWs体系。当填料添加量为70 phr时，$CaCO_3$ 体系的体积电阻率为 1.91×10^{13} Ω·m，而AMWs体系为 1.60×10^{13} Ω·m。主要是因为 $CaCO_3$ 本身为绝缘性优良的无机填料，其在基体中的均匀分散有助于形成更完整的阻隔结构；而AMWs填料表面含有有机包覆层，可能引入一定的极性成分或界面态，从而对载流子迁移产生轻微促进作用，导致电阻率略低。尽管如此，所有复合材料的体积电阻率均维持在 10^{13} Ω·m数量级，均满足电缆保护管对绝缘性能的基本使用要求。

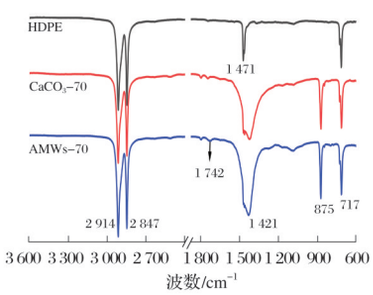


图7 HDPE、$CaCO_3$-70和AMWs-70的FTIR谱图

Fig.7 FTIR spectra of HDPE, $CaCO_3$-70 and AMWs-70

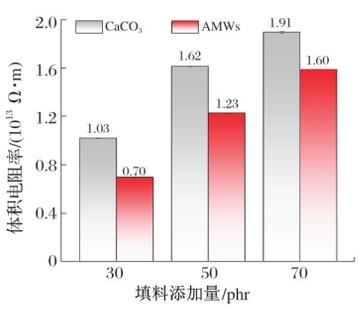


图8 复合材料的体积电阻率

Fig.8 Volume resistivity of composites

图9为复合材料的击穿场强。从图9可以看出，在30 phr与70 phr添加量下，$CaCO_3$ 与AMWs两种体系复合材料的击穿场强接近，均稳定在22 kV/mm附近，且未随填料添加量的增加发生显著变化。当添加量为30 phr时，$CaCO_3$ 体系的击穿场强为22.1 kV/mm，AMWs体系的击穿场强为21.7 kV/mm；当添加量为70 phr时，两种体系的击穿场强分别为22.1 kV/mm和22.2 kV/mm。结果表明：在本研究涉及的填充范围内，填料种类与添加量对复合材料本征绝缘强度的提升作用已趋于饱和。该结果反映出两种填料均能较好地维持HDPE基体的绝缘结构完整性，未因大量填料的引入而形成贯穿性导电通道或明显结构缺陷。尽管AMWs含有一定有机包覆层，但AMWs体系击穿性能与 $CaCO_3$ 体系相当，并未出现明显劣化。该材料具有可靠的绝缘特性，能满足电缆保护管对击穿场强的使用要求。

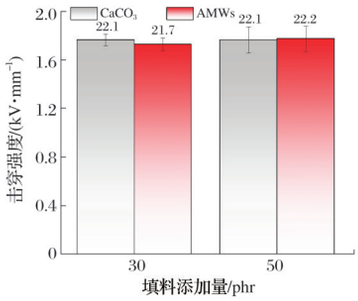


图9 复合材料的交流击穿场强

Fig.9 AC breakdown field strength of composites

3 结论

AMWs独特的“有机-无机”复合结构能够有效调控HDPE的结晶行为。其表面有机包覆层作为强效异相成核位点，显著提升基体的X_c并诱导形成内应力较高的致密晶体结构，使AMWs复合材料呈现典型的“高强低韧”特征。在相同添加量下，AMWs体系拉伸强度均优于$CaCO_3$体系，但断裂伸长率与冲击强度较低。AMWs与传统$CaCO_3$填充体系在力学性能上呈现互补特征。$CaCO_3$体系在50 phr时缺口冲击强度最高，在70 phr时弯曲模量与热变形温度显著提升，体现出在高填充下的刚性增强效应。AMWs体系则在30~50 phr范围内表现出更均衡的强度-模量协同性和更高的热稳定性，综合性能更为协调。两种复合材料均满足电缆保护管对电绝缘性能的基本要求。AMWs体系电性能略低于$CaCO_3$体系，主要源于其表面有机包覆层可能引入的极性成分与界面态，对载流子迁移有轻微促进作用。尽管如此，其绝缘性能仍完全满足电缆保护管使用标准，且AMWs作为工业固废，在降低原料成本与促进资源化利用方面具有显著优势。

作为一种具有“有机壳-无机核”复合结构的工业固废，AMWs能够诱导HDPE结晶，改善材料的拉伸强度与弯曲强度，保持可靠的绝缘性能，在电缆保护管领域展现出替代传统$CaCO_3$填料的潜力。本研究能够发挥AMWs的成本优势，也为解决其成分复杂、处理困难这一固废难题提供了高值化利用的新途径。

参考文献

[1] 赵玉环. 纳米SiO_2增强HDPE复合材料的力学性能和耐热性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(2): 40-43.

[2] 张雄, 冯光伟. HDPE管在高速铁路电力电缆过轨管中的应用[J]. 铁路技术创新, 2025(5): 100-104.

[3] 曹张然, 孟翔, 马桂宁. 高压电缆用膨胀型阻燃聚乙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(3): 25-28.

[4] 葛铁军, 刘义, 朱诚实. HDPE电缆绝缘护套料的耐环境应力开裂性改性研究[J]. 沈阳化工学院学报, 2003, 17(2): 123-125.

[5] 申朋龙, 倪爱清, 王继辉, 等. 膨胀阻燃高密度聚乙烯抗紫外老化改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(8): 110-117.

[6] 李文莲, 王正祥, 谢安全. 滑石粉/碳酸钙增强增韧高密度聚乙烯的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 35-38.

[7] KHERICI S, BENOUALI D, NOUREDINE C. The effects of calcium carbonate filler on HDPE pipe[J]. Advances in Science and Technology Research Journal, 2022, 16(3): 213-218.

[8] 李洋舟, 陈珍明, 方亮, 等. PLA/人造岗石废渣复合材料的制备及其性能[J]. 塑料工业, 2022, 50(2): 122-126.

[9] 张振宇, 韩绪鹏, 李家丞, 等. 硅烷偶联剂改性人造岗石废渣对PVC电缆料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 153-160.

[10] 易洋, 陈珍明, 唐文. PLLA/PCL/人造岗石废渣复合膜的熔融结晶研究[J]. 广东化工, 2025, 52(18): 64-68.

[11] ZHU Y, WANG Z M, CHEN Z M, et al. High value-added utilization of artificial marble wastes and potential applications in biodegradable sustainable packaging[J]. Composites Science and Technology, 2022, 229: 109682.

[12] 瞿金为, 陈珍明, 翁小影, 等. 人造岗石废渣综合利用技术进展[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(3): 539-548.

[13] CHEN H J, HE H, TIAN S H, et al. Recycling of waste artificial marble powder in HDPE-wood composites[J]. Polymer Composites, 2018, 39 (7): 2347-2355.

[14] HUANG X, GUO Q Q, ZHOU P, et al. Poly(vinyl alcohol)/artificial marble wastes composites with improved melt processability and mechanical properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 182: 107628.

[15] LU H L, CHEN K Y, YANG X, et al. Use of titanate to improve interfacial interaction and mechanical properties of polyethylene/artificial marble wastes composites[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2021, 27(1): 137-146.

[16] 冼学权, 杜芳黎, 黄华林, 等. HDPE/AGR复合材料与HDPE/HC复合材料的性能对比[J]. 塑料科技, 2021, 49(8): 20-24.

[17] 袁淑胜, 韩小旭, 王添闻, 等. DSC在塑料粒料中的鉴别应用[J]. 塑料科技, 2025, 53(9): 83-89.

[18] 王鑫, 蒋敏, 陈思月, 等. 聚丙烯复合材料界面增强的研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 127-131.

[19] YU K, YE G L, ZHANG J, et al. Facet engineering boosts interfacial compatibility of inorganic-polymer composites[J]. Advanced Science, 2024, 11(41): 2405175.

[20] LIU W Y, YI S M, LIU Z L, et al. Sol-gel silica modified recovered lignin particles and its application as blend with HDPE[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115842.

[21] 刘忠林, 刘婉玉, 冼学权, 等. HDPE/硅烷偶联剂改性木质素复合材料的性能研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(6): 1-5.

[22] 刘宣伯, 陆赵峻, 苏萃, 等. 接枝共聚物对乙烯-乙烯醇共聚物/聚乙烯共混物结构及性能的影响[J]. 石油化工, 2024, 53(2): 188-194.

[23] 谭妍妍, 尚晓煜, 谢锦辉, 等. 高密度聚乙烯/硅烷偶联剂改性硫酸钙晶须复合材料的制备与性能[J]. 精细化工, 2023, 40(5): 1035-1047.

[24] 徐元媛, 周子轩, 常美玲, 等. 聚乙烯分子结构长波近红外-中红外光谱研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2023, 21(6): 69-74.

[25] 刘哲, 刘爱民, 马嘉, 等. 聚乙烯管材料的结构组成及结晶性能[J]. 弹性体, 2023, 33(6): 56-60.

[26] 张孝彦, 陈鸿运. 聚乙烯/多壁碳纳米管复合材料的制备及性能[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2023, 35(4): 44-48.

[27] LEE J, YEASMIN S, JUNG J H, et al. Preparation and characterization of thermal-insulating microporous breathable Al/LLDPE/$CaCO_3$ composite films[J]. Materials, 2023, 16(12): 4230.

[28] 王晨屹, 王亚豪, 安晓阳, 等. 绿色精细有机合成实验中重要无机盐结构研究: 以碳酸钙分子为例[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(4): 152-160.