

改性蒙脱土增强无卤 EVA 热稳阻燃性能研究

田 申*, 柳琪琪, 安 华, 陈 侃, 崔永峰, 曹 征
(湖北能源集团西北新能源发展有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要:针对乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)热稳定性差、易燃的缺陷,以十八烷基季铵盐改性蒙脱土(OMMT)为无卤阻燃填料,采用熔融共混注塑成型制备不同 OMMT 含量的 EVA 基纳米复合材料,探究 OMMT 含量对复合材料微观结构、流变性能、力学、热稳定及阻燃性能的影响,揭示界面作用与阻燃机制。结果表明,OMMT 质量分数 $\leq 2\%$ 时在基体中纳米级均匀分散并形成插层结构,熔体黏度提升,力学性能与纯 EVA 相当,热稳定性与阻燃性能显著改善;OMMT 质量分数 $>2\%$ 时片层团聚,熔体黏度下降、力学性能劣化,但热稳定与阻燃性能仍保持优良。该材料可作为环保型电线电缆绝缘候选材料。

关键词: 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物;有机改性蒙脱土;纳米复合材料;热稳定性;阻燃性能

中图分类号: TQ323.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0309-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.050

Study on enhancing the thermal stability and flame retardancy of halogen-free EVA/modified montmorillonite nanocomposites

TIAN Shen*, LIU Qi-qi, AN Hua, CHEN Kan, CUI Yong-feng, CAO Zheng

(Hubei Energy Group Northwest New Energy Development Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) such as poor thermal stability and flammability, octadecyl quaternary ammonium salt-modified montmorillonite (OMMT) was used as halogen-free flame-retardant filler, and EVA-based nanocomposites with different OMMT contents were prepared by melt blending and injection molding. The effects of OMMT content on the microstructure, processing rheology, mechanical properties, thermal stability and flame retardancy of the composites were investigated, and the interfacial interaction and flame-retardant mechanism were revealed. The results show that when the mass fraction of OMMT is $\leq 2\%$, it disperses uniformly at the nanoscale in the matrix and forms an intercalated structure. The melt viscosity is improved, the mechanical properties are equivalent to pure EVA, and the thermal stability and flame retardancy are significantly enhanced. When the mass fraction of OMMT is $>2\%$, the lamellae agglomerate, resulting in the decrease of melt viscosity and deterioration of mechanical properties, while the thermal stability and flame retardancy remain excellent. This composite can be used as a candidate for environmentally friendly wire and cable insulation materials.

Key words: ethylene-vinyl acetate copolymer; organic modified montmorillonite; nanocomposites; thermal stability; flame retardancy

电线电缆是电力传输与信号传导的核心部件,广泛应用于电力电网、新能源电站、轨道交通等领域,其绝缘材料性能直接决定电力系统的安全性。电缆长期处于密闭复杂环境,易受温度、机械应力、局部放电等影响,绝缘层易发生热氧老化、热降解,引发绝缘失效、击穿甚至火灾,在光伏、风电等新能源场景中,绝缘失效常导致全站停机,造成重大经济损失^[1]。当前中低压电缆绝缘以聚乙烯、交联聚乙烯、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)等聚烯烃材料为主,这类材料加工性与绝缘性优良,但热降解温度低、易燃且燃烧易熔滴,难以满足高温与高防火要求场景^[2]。EVA 因含极性醋酸乙烯酯基团,柔韧

性、耐低温性与填料相容性优于聚乙烯与交联聚乙烯,同时保持低介电损耗、高体积电阻率优势,是电缆绝缘与护套的常用材料^[3]。

EVA 分子链中酯基使其热稳定性较差,高温下易发生脱乙酰化与主链降解,且易燃、熔滴严重,需进行阻燃改性^[4]。现有 EVA 阻燃剂中,卤系阻燃剂效率高但燃烧释放有毒腐蚀性气体,受环保法规限制;磷系无卤阻燃剂与基体相容性差,高添加量劣化力学与加工性能;氢氧化镁、氢氧化铝等无机氢氧化物虽环境友好,但填充量通常 $\geq 60\%$ 才能满足阻燃要求,严重损害材料柔韧性^[5]。层状硅酸盐为新型无卤阻燃填料,二维纳米片层可形成多

收稿日期:2026-04-17;修回日期:2026-06-29

基金项目:西北新能源公司神木鸿天光伏场站项目(NBWL202500065)

作者简介:田申(1990-),男,本科,工程师,研究方向为新能源发电及新能源电站运维技术,通讯联系人,tianshennew@163.com。

重物理阻隔,低添加量即可高效阻燃,燃烧无有毒烟雾释放,符合环保趋势。蒙脱土(MMT)来源广、成本低、绝缘性好,层间可交换阳离子易通过有机改性扩大层间距,提升与聚合物相容性,便于分子链插入形成插层纳米结构,在提升热稳与阻燃的同时,对基体力学与加工性能影响较小,是EVA电缆绝缘材料的理想改性填料^[6]。

现有研究已证实蒙脱土可改善聚烯烃材料的热稳定性与阻燃性,但针对EVA电缆绝缘专用的无卤纳米阻燃体系,关于十八烷基季铵盐改性蒙脱土(OMMT)添加量对微观分散、流变行为、力学、热稳、阻燃协同影响的系统研究仍不充分,低添加量下性能最优配比与界面作用机制尚不明确。为此,本研究以钠基蒙脱土为原料,经十八烷基季铵盐插层改性制备OMMT,采用熔融共混注塑成型制备不同OMMT含量的复合材料,系统表征微观结构、加工流变、力学、热稳定及阻燃性能,揭示界面作用与阻燃机理,确定最优添加量,为高性能无卤环保电缆绝缘材料开发提供实验与理论支撑。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

钠基蒙脱土(Na-MMT,层间距1.21 nm,纯度 $\geq 95\%$)购于浙江阳光公司,十八烷基三甲基氯化铵(OTAC,分析纯,纯度 $\geq 98\%$)购于国药集团,乙烯-醋酸乙烯酯共聚物[EVA18-3,醋酸乙烯酯(VA)质量分数18%,熔体流动速率3 g/10 min(190℃/2.16 kg)]购于北京有机化工厂,无水乙醇、丙酮、去离子水等均为分析纯,市售。

1.2 实验过程

改性蒙脱土OMMT制备:首先,称取20 g Na-MMT置于1 000 mL三口烧瓶中,加入500 mL去离子水,60℃、800 r/min恒温磁力搅拌条件下分散2 h,超声脱气30 min得到蒙脱土水分散液。然后,按蒙脱土层间阳离子交换容量(100 mmol/100 g)的1.2倍计量称取OTAC,将其溶解于200 mL无水乙醇与去离子水的混合液(体积比1:1)中,搅拌至完全溶解,得到季铵盐插层剂溶液。进一步将插层剂溶液缓慢滴加至蒙脱土水分散液中,继续在60℃、800 r/min条件下恒温搅拌反应8 h后,将混合液冷却至室温,以8 000 r/min高速离心15 min,弃去上清液,用丙酮反复洗涤沉淀3~4次,直至用0.1 mol/L AgNO₃溶液检测洗涤液无Cl⁻析出。最后,将洗涤后的沉淀物置于80℃真空干燥箱中干燥

12 h,研磨过200目标准筛,得到白色粉末状的有机改性蒙脱土(OMMT),密封保存备用。

OMMT/EVA纳米复合材料的制备:如图1所示,首先将EVA18-3颗粒、OMMT粉末分别置于80℃真空干燥箱中干燥12 h,按预设质量配比(OMMT质量分数分别为0%、1%、2%、3%、4%、5%)准确称取干燥后的EVA和OMMT,置于高速混合机中,在3 000 r/min条件下混合5 min得到预混料。然后,将预混料加入HAAKE微型双螺杆流变仪中,设置加工参数为机筒温度一区160℃、二区170℃、三区180℃、机头温度180℃,双螺杆转速50 r/min,熔体停留时间10 min,得到均匀的OMMT/EVA复合熔体。将流变仪中熔融共混后的复合熔体直接注入配套的微型注塑模具中,注塑压力80 MPa,保压时间30 s,模具温度40℃,冷却定型后开模,得到标准样条,所有样条置于23℃、相对湿度50%的标准环境中静置24 h后,进行性能测试。

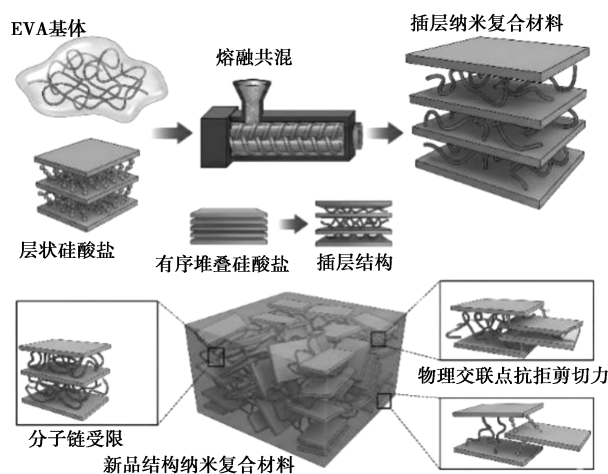


图1 OMMT/EVA复合材料的制备示意图与作用机理

1.3 性能测试

流变性能测试:将干燥后的EVA及OMMT/EVA预混料加入HAAKE微型流变仪中,在180℃、50 r/min条件下熔融塑化5 min,待熔体稳定后,调节剪切速率从50 s⁻¹逐步增加至500 s⁻¹,利用流变仪回路中的压力传感器和扭矩传感器实时记录熔体的剪切应力和表观黏度,绘制熔融黏度-剪切速率曲线,每个样品平行测试3次,取平均值。

力学性能测试:依据GB/T 1040.2—2006,采用电子万能拉力机测试样品的拉伸性能,测试条件为:室温23℃,拉伸速率10 mm/min,标距50 mm。每个配比测试10个标准哑铃形样条,自动记录样品的最大拉伸强度和断裂伸长率,去除异常值后取平均值,

表征材料的韧性和刚性。

热稳定性测试:采用同步热重分析仪(STA)在空气气氛下测试样品的热降解行为,测试条件为:样品质量 5~8 mg,氧化铝坩埚,温度范围室温~550℃,升温速率 10℃/min,空气流速 50 mL/min,记录热重(TG)曲线和微商热重(DTG)曲线,得到样品的初始分解温度($T_{5\%}$,质量损失 5%时的温度)、最大失重速率温度($T_{\max}$)和 550℃时的残炭率,表征材料的热稳定性。

动态力学性能测试:采用动态力学热分析仪(DMA)以双悬臂夹具模式测试样品的动态力学性能,测试条件为:试样尺寸 15 mm×12 mm×2 mm,振动频率 1 Hz,升温速率 2℃/min,测试温度范围 50~100℃,静态力 1 N,动态力 0.5 N,记录损耗因子($\tan\delta$)-温度曲线,得到样品的玻璃化转变温度(T_g , $\tan\delta$ 峰值对应的温度),分析蒙脱土与 EVA 基体的界面相互作用。

阻燃性能测试:依据 GB/T 2408—2021 的垂直燃烧法,采用垂直燃烧测定仪测试样品的阻燃性能,测试条件为:试样尺寸 120 mm×13 mm×2 mm,酒精灯火焰高度 20 mm,施焰时间 10 s,记录样品的余焰时间、是否有熔滴及熔滴是否引燃下方脱脂棉(距离试样下端 300 mm),每个配比测试 5 个样条,按标准评定其阻燃等级(V-0、V-1、无级)。

2 结果与讨论

2.1 OMMT/EVA 复合材料的微结构与性质

图 2 为纯 EVA 和不同 OMMT 质量分数的 OMMT/EVA 复合材料断面扫描电子显微镜(SEM)图,可以看到纯 EVA 的 SEM 断面形貌整体表现为平整、光滑的均相结构[图 2(a)],断面无任何凸起颗粒、絮状团聚体及孔隙缺陷,呈现出聚烯烃类聚合物典型的纯基体断面特征。当 OMMT 质量分数为 1% 和 2% 时[图 2(b)、(c)],OMMT/EVA 复合材料的断面相较于纯 EVA 呈现出均匀的微粗糙化形貌,无肉眼可辨的 OMMT 团聚体,仅能观察到少量片层状微小凸起,该凸起为均匀分散的蒙脱土纳米片层。这一形貌特征表明,经十八烷基季铵盐有机改性后的蒙脱土片层在 EVA 基体中实现了良好的纳米级剥离与分散,蒙脱土片层与 EVA 聚合物基体之间形成了紧密的界面结合,界面处无明显的间隙、微孔洞等界面缺陷,说明有机改性有效提升了蒙脱土与非极性 EVA 基体的相容性,低含量 OMMT 可与 EVA 基体形成均匀的复合体系。当 OMMT 质量分数增至 3%

时[图 2(d)],复合材料断面的微观形貌发生明显变化,开始出现少量尺寸约 1~5 μm 的絮状 OMMT 团聚体,蒙脱土片层的纳米级分散均匀性显著下降,且团聚体与 EVA 基体的界面处出现微小孔隙。当 OMMT 质量分数达到 4%、5% 时[图 2(e)、(f)],复合材料断面的团聚现象进一步加剧,其中 5% OMMT 试样断面可见大量尺寸大于 5 μm 的块状团聚体,团聚体呈现出明显的聚集堆叠特征;同时团聚体与 EVA 基体之间的界面分离现象十分显著,形成了清晰的相界面和大量的孔隙缺陷,基体与填料的界面结合力大幅下降。这表明过量 OMMT 的添加已超出熔融共混工艺的有效分散范围,大量蒙脱土片层无法被 EVA 基体充分浸润、剥离,最终形成大尺寸块状团聚,成为复合体系中的结构缺陷点。

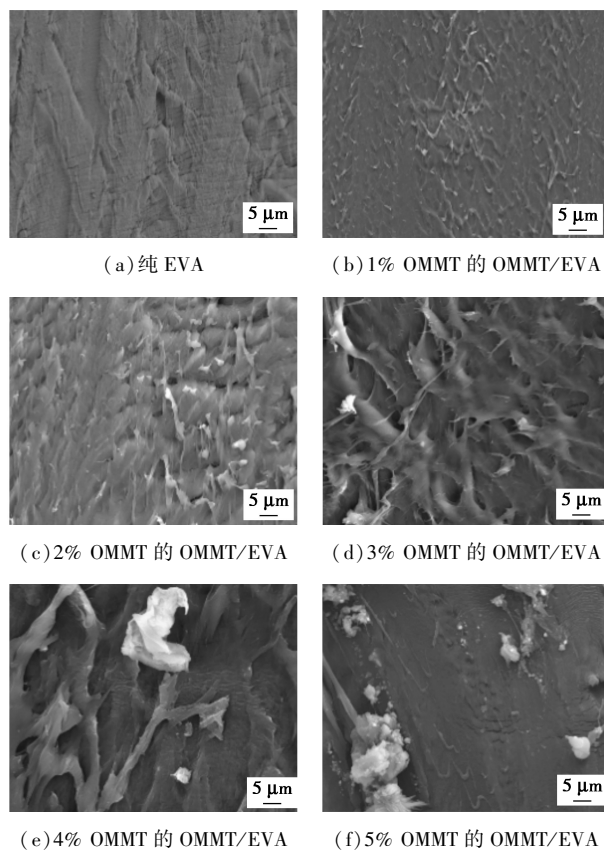
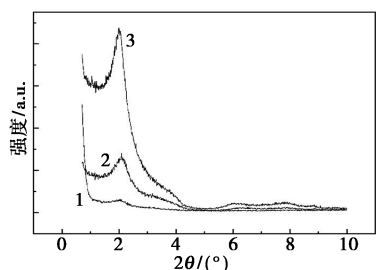


图 2 SEM 断面图

OMMT 在聚合物基体中的晶相结构可通过 XRD 技术进行表征与判别^[7],其中蒙脱土的片层间距可根据其特征 $d(001)$ 衍射峰的出峰位置,通过布拉格方程精准计算得出。图 3 为不同 OMMT 质量分数下 OMMT/EVA 纳米复合材料的 XRD 谱图,从图中可清晰观察到,所有复合试样均在 $2\theta \approx 2^\circ$ 处出现特征衍射峰,经计算对应 OMMT 的片层间距约为 4.1 nm,相较于未改性钠基蒙脱土(Na-MMT,原始

层间距 1.21 nm) 实现了显著扩大, 这一结果直接证实 EVA 分子链已成功插入 OMMT 的片层之间, 在基体中形成了典型的插层型纳米复合结构。同时可发现, 随着复合材料中 OMMT 添加量的逐步增加, $2\theta \approx 2^\circ$ 处的特征衍射峰呈现出明显的宽化趋势, 且衍射峰大角度一侧的肩峰强度随 OMMT 含量增加逐渐升高。衍射峰宽化可归因于 OMMT 片层在 EVA 基体中的分散存在非均匀性, 并非所有 OMMT 片层都能与 EVA 分子链充分结合形成完全的插层结构^[8]; 而大角度侧肩峰的逐步增强, 是体系中部分未被充分剥离、仍保持原始堆叠状态的 OMMT 片层的特征衍射贡献, 表明随着 OMMT 添加量的增加, 片层间的范德华力引发局部团聚现象, 未插层的 OMMT 片层占比有所提升。



1—EVA+1%; 2—EVA+2%; 3—EVA+3%

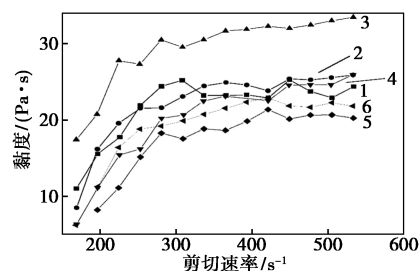
图3 OMMT 质量分数下 OMMT/EVA 的 X 射线衍射图

2.2 蒙脱土/EVA 复合材料的物化性能

绝大多数的聚合物是通过熔融挤出方法进行加工, 故聚合物的熔融黏度是加工性能的重要指标之一。理想流体(如水)的形变是不可逆的。流动时, 改变其位置。形变的能量一般以热的形式耗散于周围环境中, 当外力除去后, 流体不能恢复原来的位置。对于理想的固体(如钢、弹簧)在外力作用下呈弹性形变, 位置发生变化。当外力撤除后, 回复于原有的位置。然而, 大多数材料既不是牛顿流体, 亦不是完全的弹性体。它们表现出弹性和黏性, 因而称为黏弹性流体。聚合物的分子链在自由状态下一般是卷曲的, 但在外力作用下流动时, 分子链不仅发生了相对位移, 而且分子链还会舒展开, 构象发生变化, 产生形变。体系的黏度则取决于分子的排列。

图4显示 EVA 及其纳米复合材料在 180℃ 的条件下, 其熔融黏度随剪切速率的变化曲线。结果发现, 在剪切速率从 170 s^{-1} 增加到 300 s^{-1} 时, 每个样品的熔融黏度都随剪切速率增加而增大; 当剪切速率大于 300 s^{-1} 时, 熔融黏度随着剪切速率增加而基本保持不变。所有样品的熔体均表现出明显的剪切

变稀特征, 归属于假塑性流体。这是 EVA 的长链分子结构在高剪切下发生取向和解缠结的必然结果^[9]。随着 OMMT 含量从 0% 增加到 2%, 复合材料的熔体黏度上升; 但随着 OMMT 含量继续增加, 熔体黏度开始下降。在 OMMT 含量低于 2% 时, 绝大多数有机化改性的 OMMT 能够均匀分散在 EVA 基体中, 其片层通过物理缠结、氢键等作用, 形成贯穿整个体系的网络结构, 从而使得 EVA 分子链段运动受阻^[10]。进而在熔融共混过程中, 使得 EVA 基体的分子链段不易随着螺杆剪切方向发生取向, 故熔融黏度显著上升。因此, OMMT 含量小于 2% 的 OMMT/EVA 纳米复合材料, 相对于纯 EVA 的熔融黏度更大。当 OMMT 含量变多的时候, 熔融共混方法无法完全有效剥离 OMMT 片层, 使得片层之间发生团聚, 这些 OMMT 团聚微粒在 EVA 基体中滑动, 宏观表现为 OMMT/EVA 复合材料熔融黏度下降。

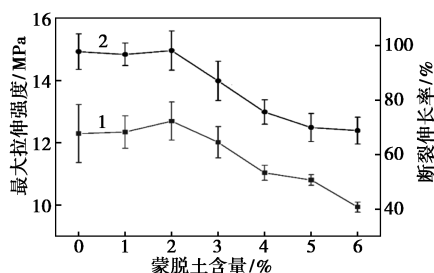


1—EVA; 2—EVA+1%; 3—EVA+2%; 4—EVA+3%;
5—EVA+4%; 6—EVA+5%

图4 EVA 及 OMMT/EVA 纳米复合材料的熔融黏度与剪切速率的关系

EVA 及其 OMMT/EVA 复合纳米材料的标准样品力学性能如图5所示。力学结果显示, 当 OMMT 含量由 0 增加到 2% 时, 断裂伸长率和最大拉伸强度基本不变; 当 OMMT 含量大于 2% 时, OMMT/EVA 复合纳米材料断裂伸长率和最大拉伸强度随 OMMT 含量增加而下降。具体而言, 当 OMMT 含量达到 5% 时, OMMT/EVA 复合纳米材料最大拉伸强度较纯 EVA 下降约 10%, 而断裂伸长率较纯 EVA 下降约 25%, 材料逐渐由韧性向脆性转变。这与 XRD 结果和熔融黏度结果是一致的。XRD 显示, 当 OMMT 含量超过 2% 时, 有肩峰形成, 表明片层未能有效剥离。在 OMMT 含量低于 2% 时, 熔融黏度随 OMMT 含量的增加而上升, 也反映了填料网络相互缠结, 片层分离较好。作为一种典型的二维纳米材料, OMMT 具有高比表面积, 理论上能够有效增强聚合物基体的力学性能。然而, 在低含量条件下, OMMT 片层分散均匀, 由于界面区体积比有限, 仅具有一定的力学

增强程度。但当 OMMT 含量达到 3% 以上时,大量片层发生团聚,OMMT 的纳米填充变成了微米填充,从而令 OMMT/EVA 复合材料的力学性能劣化。这种团聚体不仅破坏了基体的连续性,形成了应力集中点,引发早期裂纹萌生,而且由于片层间缺乏界面粘结,无法有效承担和传递外部载荷,导致增强效应丧失,甚至产生片层滑移和缺陷强化副作用,最终造成整体力学性能的明显劣化。

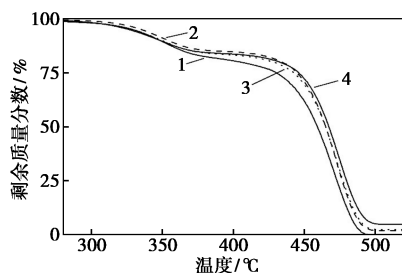


1—最大拉伸强度;2—断裂伸长率

图 5 EVA 及 OMMT/EVA 纳米复合材料的力学性能

2.3 蒙脱土/EVA 复合材料的热稳阻燃性能

图 6 显示了 EVA 以及 OMMT/EVA 纳米复合材料在空气气氛下的热重曲线。研究发现,EVA 及 OMMT/EVA 纳米复合材料的热降解分为 2 个阶段进行。第 1 步是脱乙酰化反应,释放出乙酸;第 2 步是主链降解,对于纯 EVA 而言,在空气中的 2 个降解步骤均发生在较低温度,其初始分解温度约为 300℃,最大失重速率温度分别位于 335℃ 和 450℃ 附近;而 OMMT/EVA 纳米复合材料在 2 个降解阶段上,其降解温度均明显高于纯 EVA 的降解温度,其初始分解温度和最大失重速率温度分别向高温方向偏移了 5~10℃ 和 10~15℃。此外,在 500℃ 以上的残留率由纯 EVA 的不足 1% 显著提升至 5%~8%,表明 OMMT 促进了催化成炭作用。这可以归因于 OMMT 片层在 EVA 基体中分散所产生的屏障效应,OMMT 片层形成了迷宫路径,不仅阻碍了氧气

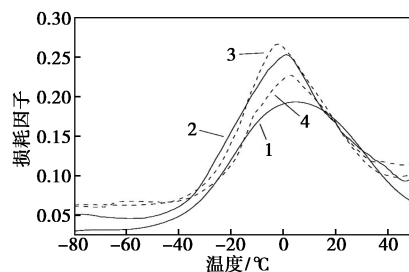


1—EVA;2—EVA+1%;3—EVA+2%;4—EVA+3%

图 6 EVA 及 OMMT/EVA 复合材料的热重结果

和热量的传递,更重要的是显著降低了降解产物(如乙酸、烃类挥发物)的气相扩散速率,从而提高了降解活化能。因此,OMMT 的加入有效增强了 EVA 材料的热稳定性,拓宽了其在高温环境下的服役性能。

动态力学分析能够准确测定玻璃化转变温度,同时提供聚合物材料微观结构信息。图 7 所示为 EVA 及其纳米复合材料的损耗因子($\tan\delta$)随温度变化的曲线。纯 EVA 的损耗因子峰值在 0℃ 附近,对应于该样品的玻璃化转变温度。对于 OMMT/EVA 纳米复合材料,其玻璃化转变温度与纯 EVA 基本重合,这表明 OMMT 的加入未明显改变 EVA 基体的玻璃化转变温度。同时,OMMT/EVA 纳米复合材料的损耗因子的峰值呈现先升高后降低的趋势。当 OMMT 含量从 0% 增加到 2% 时,OMMT/EVA 损耗因子峰值增大,表明样品对外界正弦力的能量耗散增加,意味着 OMMT 片层在 EVA 基体中分散良好,形成了大量的片层-聚合物界面。界面区域的聚合物分子链松弛行为与本体不同,可能产生额外的界面松弛。随着 OMMT 含量继续增加,OMMT/EVA 片层之间发生轻微团聚,使得损耗因子峰值变小,但仍高于 EVA。相对于纯 EVA,所有 OMMT/EVA 纳米复合材料的玻璃化转变区明显变宽,特别是低温侧(-40℃ 至 0℃ 区间)曲线斜率更平缓。这证实了界面相的形成,即 OMMT 片层附近的 EVA 分子链运动受限,形成了有别于 EVA 本体聚合物的松弛区域。损耗因子峰分布变宽可以归结于受限链段与自由链段的协同松弛导致整体的玻璃化转变区扩展,这是 OMMT/EVA 纳米复合材料特有的异质性表现。随着 OMMT 含量由 1% 增至 3%,峰宽化程度增加,表明 OMMT 片层与聚合物界面相互作用增强。



1—EVA;2—EVA+1%;3—EVA+2%;4—EVA+3%

图 7 动态力学分析得到的 EVA 及 OMMT/EVA 复合材料的损耗因子与温度曲线

因此,OMMT 的引入主要通过界面效应改变 EVA 的动态力学性能:一方面通过片层阻隔和吸附作用限制分子链的运动;另一方面通过形成界面相

令玻璃化转变区变宽。2%左右的 OMMT 含量形成的界面相互作用最强,这与前文中的力学性能结果与 XRD 结果是相符的。这种“受限分子运动”的特性与热重测试中观察到热稳定性提升具有内在的一致性。

利用垂直燃烧法对各样品进行检测的结果如表 1 所示。可以发现相较于易燃的 EVA(垂直燃烧测试中出现严重熔滴滴落且火焰迅速蔓延至夹具,余焰时间长达 60 s 以上,无法自熄,评级为无级),添加 OMMT 之后的 OMMT/EVA 复合材料均具有了阻燃性能,且 OMMT 含量越高,其点火后的余焰燃烧时间越短。具体而言,当 OMMT 含量为 1% 时,OMMT/EVA 复合材料余焰时间缩短至 19 s,基本无熔滴滴落,达到 V-1 级;当含量为 2% 时,OMMT/EVA 复合材料余焰时间缩短到 10 s,且无燃烧滴落物引燃下方脱脂棉,达到 V-0 级,当 OMMT 含量继续增加,5 次点燃测试中,OMMT/EVA 复合材料总余焰时间均小于 10 s,且无滴落,均达到 V-0 级。

表 1 OMMT/EVA 纳米复合材料的阻燃性能

样品	阻燃等级	余焰时间/s	是否有熔滴
EVA+1%	V-1	19	否
EVA+2%	V-0	10	否
EVA+3%	V-0	7	否
EVA+4%	V-0	3	否
EVA+5%	V-0	1	否

这显示了 OMMT 的加入确实增强了 OMMT/EVA 复合材料的阻燃性能,且 OMMT 含量越高,OMMT/EVA 复合材料阻燃性越好。这种剂量依赖性表明,当 OMMT 含量达到或超过 2% 时,OMMT 片层在 EVA 基体中形成了有效的三维阻隔网络。层状硅酸盐的阻燃本质是利用其二维纳米片层结构在聚合物燃烧过程中构建物理阻隔屏障,同时通过表面酸性位点催化生成增强型碳层,并抑制熔滴,从而达到阻隔-隔氧-成炭-吸热的阻燃机理。在燃烧初期,分散的 OMMT 片层迁移至材料表面,与脱乙酰化生成的乙酸反应形成富硅-铝陶瓷化保护层;该层不仅隔绝了热量传导和氧气供给,还显著抑制了 EVA 基体的熔滴滴落行为,使燃烧模式由有焰燃烧转变为缓慢的无焰阴燃。此外 OMMT 片层表面的酸性位点 (Al—OH、Si—OH) 催化 EVA 主链脱氢交联,促进致密炭层的生成,该纳米复合炭层的热稳定性显著优于纯 EVA 的疏松炭渣。OMMT 对阻燃性能的提升与前文中增加 OMMT 含量可增强聚合物

热稳定性的结果也是一致的,即热分解温度的提高为炭层的早期形成提供了时间窗口,而残炭量的增加则为持续阻隔提供了物质基础,两者协同实现了材料在气态和凝聚态的双重阻燃作用。

3 结论

OMMT 质量分数 $\leq 2\%$ 时在 EVA 中纳米级均匀分散,形成插层结构,熔体黏度提升,力学性能与纯 EVA 相当,热稳、动态力学与阻燃性能协同最优;OMMT $> 2\%$ 时片层团聚,流变与力学性能下降,但热稳与阻燃仍保持优良。

OMMT 通过物理阻隔、催化成炭、抑熔滴实现高效无卤阻燃,2% 为综合性能最优添加量,复合材料兼具良好加工性、力学性能与优异热稳阻燃性,适用于电线电缆绝缘层。

本研究为 EVA 无卤纳米阻燃改性提供明确配比与机理支撑,后续可开展绝缘、耐老化等性能研究,推进工程化应用。

参考文献

- [1] 刘标,蔡会武,党智敏,等.共混型热塑性弹性体材料在电线电缆方面的研究进展[J].绝缘材料,2019,52(10):1-7.
- [2] 梁昌之,王新龙.常见协效阻燃剂的种类、机理及研究现状[J].塑料助剂,2025,(4):47-53.
- [3] 朱敏,张胜贺,朱长江,等.成炭型有机大分子/层状无机物复合成炭剂的制备及其应用研究[J].火灾科学,2022,31(4):233-243.
- [4] 张晓虹,高俊国,郭宁,等.纳米蒙脱土对聚乙烯击穿和电导特性的影响[J].高电压技术,2009,35(1):129-134.
- [5] 张晓虹,石泽祥,李琳,等.蒙脱土-SiO₂/低密度聚乙烯复合材料结晶行为及电树枝化特性[J].复合材料学报,2018,35(11):3034-3043.
- [6] 董芸滋,高娜,李秀峰,等.交联度对交联聚乙烯/有机化蒙脱土纳米复合材料拉伸性能和介电性能的影响[J].电工技术学报,2023,38(5):1154-1165.
- [7] Dintcheva N T, Al-Malaika S, Morici E. Novel organo-modifier for thermally-stable polymer-layered silicate nanocomposites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 122:88-101.
- [8] Delli E, Gkiliopoulos D, Bikiaris D N, et al. The effect of monmorillonite concentration on the properties of random polypropylene/monmorillonite nanocomposites[J]. Polymer, 2025, 343:129482.
- [9] Chen Z, Fang P, Wang H, et al. Property of ethylene vinyl acetate copolymer in melting processing[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 101(3):2022-2026.
- [10] Fu X L, Zhuang H, Reddy K R, et al. Novel composite polymer-amended bentonite for environmental containment: Hydraulic conductivity, chemical compatibility, enhanced rheology and polymer stability[J]. Construction and Building Materials, 2023, 378:131200. ■