线缆用透明阻燃PA/MH复合材料的性能研究

吕 远[1],杨兆文[2],陈婉芳[2],徐 曼[1]*,孙嘉敏[1]

(1.西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049;2.物产中大元通电缆有限公司,浙江 杭州 310000)

摘 要:为解决透明尼龙(PA)基体易燃、阻燃改性难以兼顾力学性能与光学性能的问题,采用熔融共混法,将氢氧化镁(MH)阻燃剂引入透明PA8061基体,系统研究PA/MH复合材料的微观结构、界面特性及MH对复合材料综合性能的影响。结果表明:引入纳米级MH(H2型)阻燃剂能够显著提升PA8061基体的阻燃性能,降低燃烧热释放速率,促进无定形炭层形成,同时提高其力学性能与透光度。通过调控MH的粒径尺寸发现,与微米级的MH(H1型)阻燃剂相比,H2型阻燃剂与PA8061形成的界面结合更强,在保持PA透明度和力学性能方面优势明显。研究为制备高性能透明阻燃PA材料提供参考。

关键词:透明尼龙;氢氧化镁阻燃剂;阻燃性能;透明性能;界面强度

中图分类号:TQ323.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0061-07

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.012

Study on Properties of Transparent Flame Retardant PA/MH Composites for Cable Application

LÜ Yuan[1], YANG Zhaowen[2], CHEN Wanfang[2], XU Man[1]*, SUN Jiamin[1]

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Zetastone Wire & Cable Co. , Ltd. , Hangzhou 310000, China)

Abstract: To address the flammability of the transparent nylon (PA) matrix and the difficulty of simultaneously achieving mechanical and optical performance in flame retardant modification, magnesium hydroxide (MH) flame retardants were incorporated into a transparent PA8061 matrix via melt blending. The microstructure, interfacial characteristics, and the effect of MH on the overall properties of the PA/MH composites were systematically investigated. The results showed that the introduction of nanoscale MH (H2) significantly improved the flame retardancy of the PA8061 matrix, reduced the heat release rate during combustion, promoted the formation of an amorphous char layer, and simultaneously enhanced its mechanical properties and light transmittance. By regulating the particle size of MH, it was found that, compared with microscale MH (H1), H2 formed a stronger interfacial bonding with PA8061, demonstrating clear advantages in maintaining the transparency and mechanical properties of PA. The study provides a reference for the preparation of high-performance transparent flame-retardant PA materials.

Key words: Transparent polyamide; MH flame retardant; Flame retardancy; Transparency; Interfacial strength

聚酰胺(PA)又称尼龙,具有优异的力学性能与化学稳定性[1-5],广泛应用于电子设备外壳、低压线缆绝缘层和护套层等领域[6-10]。线缆护套材料需要具备优异的力学性能与良好的阻燃性能,以满足使用安全要求。在医疗器械外壳、精密仪表盘等特殊应用场合,还要求PA具有较高的透光率,以便观察内部结构与运行状态[11]。然而,PA属于易燃材料,在燃烧过程中热释放速率(HRR)较高,火焰传播速率较快,同时释放大量有毒烟气,对环境和人体健康均构成潜在威胁[12-15]。因此,提高PA线缆的阻燃性能,是拓宽其高端化应用范围的必然要求。

透明PA具有良好的绝缘性能、热变形温度、自熄阻燃性、耐蠕变性、耐久性及透明度等特性[16-17],但如何同时兼顾透光性和阻燃性能仍面临技术挑战。目前,透明PA的阻燃改性途径主要分为两类。一是采用反应型阻燃剂,在

收稿日期Submitted date 2025-10-15;修回日期Revised date 2025-11-05;录用日期Accepted date 2025-11-24

*联系人,xumman@mail.xjtu.edu.cn

引用本文:吕远,杨兆文,陈婉芳,等.线缆用透明阻燃PA/MH复合材料的性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):61-67.

Citation:LÜ Y, YANG Z W, CHEN W F, et al. Study on properties of transparent flame retardant PA/MH composites for cable application[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 61-67.

PA聚合过程中引入阻燃基团，赋予材料本征阻燃性。该方法阻燃效率高且效果持久，但工艺复杂，成本较高，因此应用受限[18]。二是以PA为基体，采用熔融共混法，将填充型阻燃剂与PA基体复合，从而实现阻燃改性。该方法具有工艺简单、成本较低及适用范围广等优势。该方法已成为当前常用的改性手段之一[19-21]。填充型阻燃剂的加入通常会导致材料的力学性能与光学性能下降，因此需要合理选择阻燃剂并优化其用量[22]。

常用阻燃剂包括卤素系阻燃剂和金属氢氧化物阻燃剂。卤素系阻燃剂在燃烧过程中可能释放有害气体，因此其应用范围受到限制[23]。金属氢氧化物阻燃剂主要包括氢氧化镁(MH)和氢氧化铝(ATH)，二者均属于无机添加型阻燃剂，兼具环保、低烟及无毒等优势，在燃烧时不会产生大量腐蚀性或有毒气体[24]。与ATH相比，MH的分解温度更高，与PA的相容性更好，分解能力更强，阻燃效率更高[25]。相较于传统无卤阻燃剂，纳米级MH凭借小尺寸效应，在低添加量下即可实现阻燃效果，对材料的力学性能和透光性能影响较小[26-27]。

共聚透明PA8061凭借优异的透光性已获得广泛应用。本文以PA8061为基体、MH为阻燃剂，采用熔融共混法制备PA/MH复合材料，系统研究其力学性能、光学性能及阻燃性能。

1 实验部分

1.1 主要原料

透明PA，PA8061，美国杜邦公司；微米级MH阻燃剂(H1型)，H1611，常州市乐环商贸公司；纳米级MH阻燃剂(H2型)，VK-MHT01，杭州万景新材料有限公司。

1.2 仪器与设备

扫描电子显微镜(SEM)，VE-9800S，日本KEYENCE公司；电子万能试验机，CMT4505，美国INSTRON公司；紫外可见近红外分光光度计，UV-3600，日本SHIMADZU公司；紫外可见近红外分光光度计，PEL950，珀金埃尔默企业管理有限公司；热重分析仪(TG)，TG /SDTA 851，瑞士METTLER TOLEDO公司；锥形量热仪，CONE FTT 0242，英国FTT公司；激光拉曼光谱仪，INVIAREFLEX，英国雷尼绍公司；转矩流变仪，RM200C，哈尔滨哈普电气技术有限责任公司。

1.3 样品制备

表1为PA和PA/MH复合材料的配方。将PA8061于80 ℃条件下干燥12 h。称取PA8061，缓慢均匀地放入流变仪中，设定流变仪温度为180 ℃，进料速率为10 r/min。调节流变仪转速为30 r/min，加工5 min，加入MH阻燃剂，待转矩再次稳定后，使混合料熔融共混并成型。记录各样品稳定转矩，以定性反映材料黏度及阻燃剂与PA基体的界面作用强度。

将熔融共混所得试样剪裁成块，置于压片模具中，于180 ℃预热5 min。在170 ℃、15 MPa下加热加压10 min，样品上下覆盖聚四氟乙烯膜，水冷3 min，脱模后于25 ℃烘箱中保存。

表1 PA/MH复合材料的配方

Tab.1 Formula of PA/MH composites 单位：phr

试样	添加量		
	PA8061	H1型阻燃剂	H2型阻燃剂
PA8061	100	0	0
PA/H1 100∶20	100	20	0
PA/H1 100∶30	100	30	0
PA/H1 100∶40	100	40	0
PA/H2 100∶20	100	0	20
PA/H2 100∶30	100	0	30
PA/H2 100∶40	100	0	40

1.4 性能测试与表征

SEM测试：试样经低温液氮脆断、喷金后，采用扫描电子显微镜观察断面样貌。

拉伸性能测试：按照GB/T 1040.3—2006进行测试，样品尺寸为120 mm×25 mm×1 mm，哑铃形，拉伸速率为100 mm/min。

透光度测试：按照GB/T 2410—2008进行测试，测量范围为200~800 nm。在380~750 nm可见范围内，物质对光的吸收能力越强，其透光度越低[28]。复合材料的透光度与材料组成、微观结构、厚度及光的波长密切相关[28-29]。透光度的计算公式为：

$$T=\frac{I_t}{I_0}\times 100\% \quad (1)$$

式(1)中：T为透光度，%；I_t为透射光强，W；I_0为入射光强，W。

反射率测试：测量范围为200~800 nm。反射率与材料内部结构密切相关[30]，填料颗粒引起的光散射是复合材料内部光强度下降的主要原因[31]。根据复合材料反射率的变化规律，可更全面地揭示MH的粒径和添加量对材料透明性能的作用机制。

TG分析：在N_2氛围下，以10 ℃/min的速率从室温升至800 ℃，进行TG分析。

锥形量热测试：按照ANSI/ASTM D6113—2010进行测试，热辐射为30 kW/m^2，热场温度为668 ℃，测试材料的热释放速率(HRR)和总热释放量(THR)。

残炭结构测试：采用扫描电子显微镜观察锥形量热测试后样品的残炭结构。

拉曼光谱分析：采用激光拉曼光谱仪对残炭进行测试，测试激光波长为785 nm，测量范围为600~2 000 cm^{-1}。

2 结果与讨论

2.1 PA/MH混合料的流变行为分析

图1为MH对PA/MH混合料稳定转矩的影响。从图1可以看出，MH的引入提高了混合料的稳定转矩，即复合材

料的熔体黏度增大，转矩随着MH填充量的增加而增大。在MH添加量相同的条件下，PA/H2的稳定转矩高于PA/H1。其原因在于H2型阻燃剂与PA8061基体间的界面作用更强，限制了熔体中分子链的运动，导致复合材料的熔体流动性降低[32]。

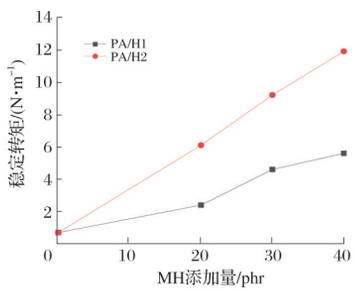
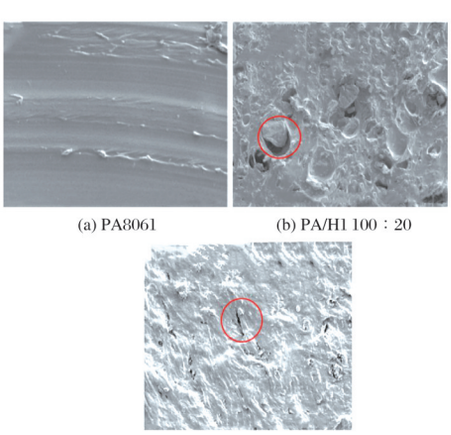


图1 MH对PA/MH混合料稳定转矩的影响

Fig.1 Effect of MH on stable torque of PA/MH blends

2.2 PA/MH复合材料的SEM分析

图2为PA/MH复合材料的SEM照片。从图2可以看出，未添加MH阻燃剂的PA8061断面相对光滑平整，呈现典型的韧性断裂特征。在PA/H1 100∶20样品中，微米级MH颗粒在PA8061基体中分散不均并出现团聚现象，断面可见大量MH颗粒脱落形成的大尺寸孔洞，部分颗粒裸露于表面。其原因在于微米级MH与PA8061基体间界面结合力较弱，在断裂过程中，颗粒易从基体脱落，形成界面缺陷并诱发应力集中。PA/H2 100∶20样品的断面更为光滑致密，孔洞数量显著减少且尺寸更小，表明纳米MH在PA8061基体中分散更为均匀。这得益于纳米MH的小尺寸效应和高比表面积，有利于其与PA8061基体形成更强的作用力。



(a) PA8061 (b) PA/H1 100∶20

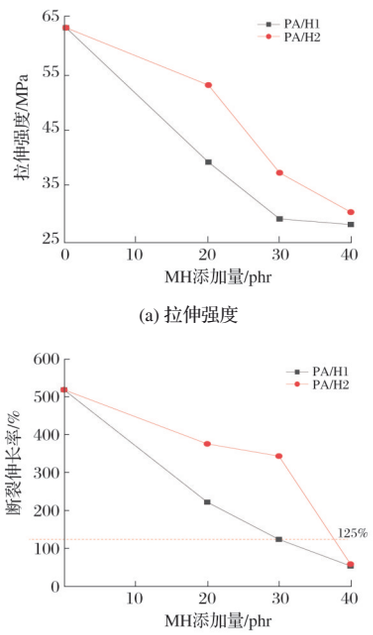
(c) PA/H2 100∶20

图2 PA/MH复合材料的SEM照片(1 000×)

Fig.2 SEM images of PA/MH composites (1 000×)

2.3 PA/MH复合材料的力学性能分析

图3为PA/MH复合材料的力学性能。从图3可以看出，相较于PA8061，PA/MH复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均随着MH添加量的增加而显著降低。原因是MH作为刚性无机填料，阻碍了PA分子链的自由活动，增大了分子链间距，降低了链间缠结程度。此外，阻燃剂的粒径和界面状态对力学性能均具有决定性作用。H1型阻燃剂与基体的界面结合力较弱，在受力时易脱落形成应力集中点，加速微裂纹扩展，因而对力学性能的劣化更明显；H2型阻燃剂则凭借高比表面积和更均匀的分散性，与PA8061形成更强的界面结合，可有效传递应力并抑制微裂纹产生。因此，在相同添加量下，PA/H2的拉伸强度和断裂伸长率均优于PA/H1。



(a) 拉伸强度

(b) 断裂伸长率

图3 PA/MH复合材料的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of PA/MH composites

参考GB/T 19666—2005对阻燃护套料力学性能的要求(拉伸强度≥9 MPa，断裂伸长率≥125%)，所有复合材料的拉伸强度均满足标准要求。当H1的添加量为20、30 phr时，PA/H1的断裂伸长率接近125%的标准限值；当H2的添加量为20、30 phr时，PA/H2的断裂伸长率依然能保持在标准要求以上，表现出更优异的力学性能，在制备兼顾阻燃性能与力学性能的透明PA材料方面具有显著优势。

2.4 PA/MH复合材料的光学性能分析

图4为PA/MH复合材料的透光度。从图4可以看出，在可见光波段内，PA/MH复合材料均具有透光性，透光率随着MH添加量的增加而逐渐降低。其原因在于MH的引入增加了材料内部的光散射中心，当MH的添加量升高时，MH颗粒更易团聚，阻碍了光在PA8061基体中的传播。在相同添加量下，PA/H2的透光率显著高于PA/H1。原因是H2型阻燃剂的平均粒径(80 nm)小于可见光波长，散射效应较弱，对光波影响较小，更有利于保持材料的透明性能；而H1型阻燃剂的平均粒径较大(2 μm)，散射效应显著增强，导致材料的透光率降低。

表2为400、500、600 nm下PA/MH复合材料的透光度。从表2可以看出，PA8061在所有波段内的透光度均大

于50%，表明PA8061具有良好的透光性。在400 nm和600 nm波长下，PA/MH复合材料的透光度均随MH添加量的增加而降低，且在400 nm处的下降幅度明显大于600 nm处的下降幅度，表明MH粒子对短波长光的散射作用更强。H2型阻燃剂凭借小尺寸效应，对透光度影响较小。根据Rayleigh散射理论[33]，复合材料透光性随着粉体粒径增大而降低，当粒径小于可见光波长时，光线几乎无损透过。

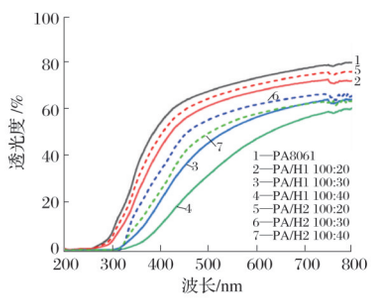


图4 PA/MH复合材料的透光度

Fig.4 Transmittance of PA/MH composites

表2 400、500、600 nm下PA/MH复合材料的透光度

Tab.2 Transmittance of PA/MH composites at 400, 500, 600 nm

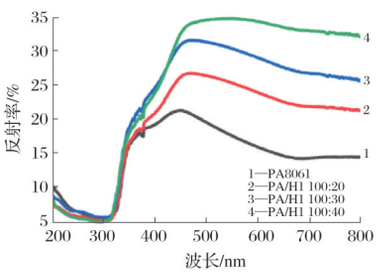
单位：%

试样	$T_{400\ nm}$	$T_{500\ nm}$	$T_{600\ nm}$
PA8061	53.84	67.29	72.96
PA/H1 100∶20	43.20	61.14	67.35
PA/H1 100∶30	20.94	45.51	56.35
PA/H1 100∶40	10.81	31.86	47.21
PA/H2 100∶20	47.29	65.38	70.11
PA/H2 100∶30	33.59	55.23	61.67
PA/H2 100∶40	25.19	49.57	57.79

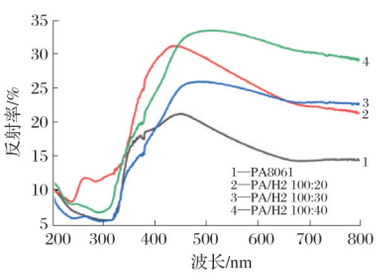
图5为PA/MH复合材料的反射率。从图5可以看出，MH的加入显著提高了复合材料的反射率。所有样品的反射率在波长约300 nm处达到最小值，随着波长的继续增加，反射率呈先增大后减小的趋势。在波长>500 nm阶段，PA/MH复合材料的反射率差异与MH添加量的相关性更为明显。随着H1型阻燃剂添加量的增加，复合材料的反射率整体逐步升高，表明高含量H1型阻燃剂粒子增强了材料的内部散射。在PA/H2复合材料中，MH添加量对反射率的影响更为复杂。PA/H2 100∶20的反射率变化幅度较大，可能是局部纳米粒子二次团聚导致散射能力增强所致。

2.5 PA/MH复合材料的TG分析

图6为PA/MH复合材料的TG曲线，表3为PA/MH复合材料的TG数据。从图6可以看出，随着MH添加量的增加，复合材料在800 ℃下的总残留率逐渐增加。原因是MH受热分解生成的MgO具有高强度和高耐热性，可作为稳定残留物保留。总残留率是聚合物残炭和MH分解生成的MgO的总和。为了评估MH对PA8061基体本身成炭性能的影响，根据MH分解反应[$Mg(OH)_2 \rightarrow MgO+H_2O$]的化学计量比(理论残留MgO质量≈0.691×初始MH质量)，计算聚合物的理论残炭率(即总残留率减去理论MgO残留率的差除以初始PA质量分数)，结果也列于表3中。从表3可以看出，两种粒径的MH对聚合物理论残炭率的影响呈现出显著差异。H1型阻燃剂的加入在一定程度上提高了聚合物的理论残炭率，表明其可促进PA基体在热解过程中炭化。H2型阻燃剂的加入反而显著降低了聚合物的理论残炭率，在添加量为30 phr时，理论残炭率接近0。



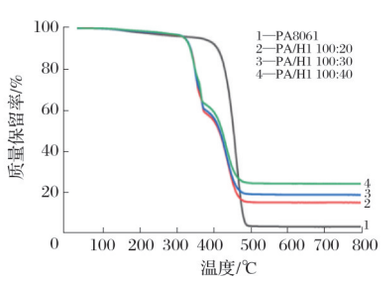
(a) PA/MH1



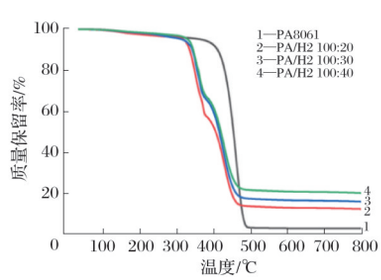
(b) PA/MH2

图5 PA/MH复合材料的反射率

Fig.5 Reflectivity of PA/MH composites



(a) PA/MH1



(b) PA/MH2

图6 PA/MH复合材料的TG曲线

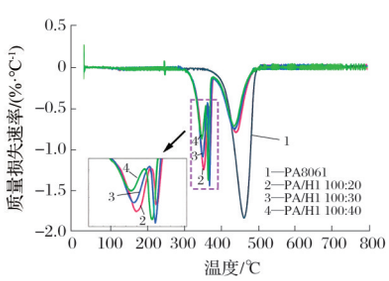
Fig.6 TG curves of PA/MH composites

表3 PA/MH复合材料的TG数据

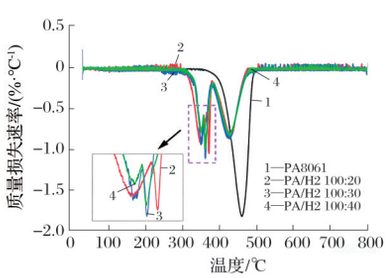
Tab.3 TG data of PA/MH composites

试样	总残留率/%	理论残炭率/%	峰值温度/℃
PA8061	2.74	2.74	452.31
PA/H1 100∶20	14.60	3.70	340.17
PA/H1 100∶30	18.32	3.07	343.55
PA/H1 100∶40	23.79	5.65	344.01
PA/H2 100∶20	12.20	0.82	350.02
PA/H2 100∶30	15.77	≈0	351.13
PA/H2 100∶40	20.00	0.35	350.72

图7为PA/MH复合材料的DTG曲线。从图7可以看出，与PA8061在452.31 ℃处的单一快速分解峰相比，PA/MH复合材料的分解速率显著降低，DTG曲线呈现两个失重峰。第一个失重峰位于340 ℃附近(对应表3中的峰值温度)，由MH分解吸热所致，该过程可有效降低材料的表面温度，减缓聚合物分解。从图7a与图7b可以看出，PA/H1第一个峰的峰值质量变化速率的绝对值大于PA/H2。第二个失重峰对应PA8061基体的主分解，所有PA/MH复合材料的主分解峰峰值温度均低于纯PA8061的452.31 ℃，第二个DTG峰值均在-0.8 %/℃左右，表明H2型阻燃剂因具有高比表面积和高活性，可能改变PA8061的热解路径，促进聚合物链在较低温度下分解与挥发，这与TG测试中计算所得理论残炭率的结论一致。而H1型阻燃剂则更多起到物理阻隔和促进基体成炭的作用。



(a) PA/MH1



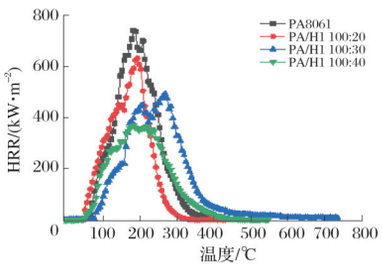
(b) PA/MH2

图7 PA/MH复合材料的DTG曲线

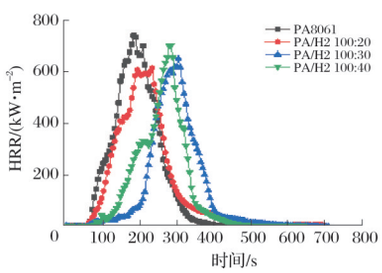
Fig.7 DTG curves of PA/MH composites

2.6 PA/MH复合材料的锥形量热测试分析

图8为PA/MH复合材料的HRR曲线，表4为PA/MH复合材料的锥形量热测试关键参数。从图8可以看出，PA8061燃烧剧烈，HRR曲线陡峭，峰值热释放速率(PHRR)为742.1 kW/m²。加入MH阻燃剂后，PA/MH复合材料的阻燃性能显著改善，HRR和PHRR均下降。其原因在于MH在燃烧过程中受热分解，脱水吸热，降低了材料的表面温度。同时，形成的MgO隔热层阻碍了热量传导，隔绝了聚合物内部与热源及可燃气体的接触。



(a) PA/H1



(b) PA/H2

图8 PA/MH复合材料的HRR曲线

Fig.8 HRR curves of PA/MH composites

表4 PA/MH复合材料的锥形量热测试关键参数

Tab.4 Key parameters of cone calorimetric test of PA/MH composites

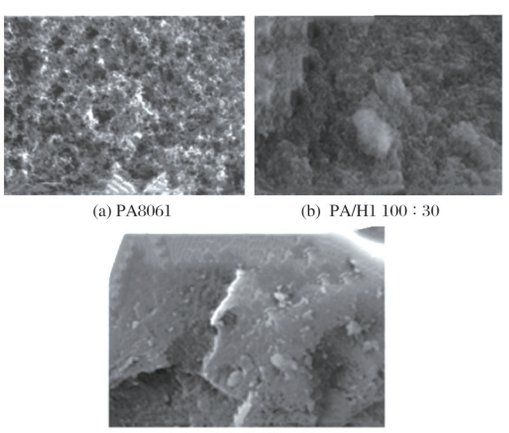
试样	PHRR/(kW·m⁻²)	THR/(MJ·m⁻²)
PA8061	742.1	98.2
PA/H1 100∶20	633.1	76.0
PA/H1 100∶30	492.7	90.4
PA/H1 100∶40	369.3	69.2
PA/H2 100∶20	616.4	93.2
PA/H2 100∶30	653.4	82.6
PA/H2 100∶40	704.3	80.8

从图8a和表4可以看出，随着H1型阻燃剂添加量的增加，PHRR显著下降，表明微米MH在降低总热释放方面更有效率。从图8b可以看出，添加H2型阻燃剂后，HRR曲线上升沿明显变缓，表明H2型阻燃剂能够有效延缓燃烧发展。PA8061的THR高达98.2 MJ/m²，添加MH阻燃剂后，PA/MH复合材料的THR均有所降低。其中，H1型阻燃剂的抑制作用尤为明显，在H1型阻燃剂添加量为40 phr时，复合材料的THR降至69.2 MJ/m²，较PA8061降低近30%。H2型阻燃剂也降低了复合材料的THR，但其降低幅度小于H1型阻燃剂，这可能与二者热解行为不同有关。

H1型阻燃剂促进了PA8061基体成炭，聚合物理论残炭率更高，形成的“MgO+聚合物炭”复合层更致密，物理隔热效果更强，导致PHRR和THR更低。H2型阻燃剂凭借高比表面积和均匀分散，使其在燃烧初期更高效地通过分解吸热和释放水蒸气稀释可燃气体，从而延缓初始燃烧速率。

2.7 PA/MH复合材料的残炭分析

图9为PA/MH复合材料残炭的SEM照片。从图9可以看出，PA8061燃烧后的炭层呈现松散多孔的棉絮状结构，表明其燃烧充分，阻燃性能较差。添加MH后，PA/MH复合材料可观察到分层次的炭层结构。对比PA/H1 100∶30与PA/H2 100∶30两组试样，均可见表面分散有MH分解形成的MgO颗粒及较平滑的隔层，该隔层即为隔热性较强的MgO外壳。结合前文断面SEM形貌分析，PA/H2因在基体中分散更均匀，理论上能够形成更完整、连续的MgO隔热层，而PA/H1因初始分散不均且与基体结合较弱，其隔热层连续性相对较差。



(a) PA8061　(b) PA/H1 100∶30　(c) PA/H2 100∶30

图9 PA/MH复合材料残炭的SEM照片(10 000×)

Fig.9 SEM images of carbon residue of PA/MH composites (10 000×)

图10为PA/MH复合材料残炭的拉曼光谱。在拉曼光谱中，约1 300 cm^{-1}处的D峰代表石墨晶体中的无序组分，即非晶态碳；约1 580 cm^{-1}处的G峰代表有序的石墨晶体组分[34]。两者峰面积强度比为I_D/I_G，表征碳材料的无定形结构占比，即无序化程度。I_D/I_G越大，炭层无序化程度越高，其结构越蓬松，热屏蔽效率与阻燃性能越好[34-35]。从图10可以看出，未添加阻燃剂MH的PA8061的残炭I_D/I_G仅为1.52，表明其炭层结构相对有序，石墨化程度较高，这与锥形量热测试中较差的阻燃性能一致。与PA8061相比，添加MH的PA/MH复合材料残炭的I_D/I_G均有不同程度的提高，表明MH的加入能够显著促进PA8061基体在燃烧时形成更高比例的无定形炭，从而构筑起更加致密高效的隔热层，有效提升炭层的热屏蔽能力。在相同MH添加量下，PA/H2复合材料残炭的I_D/I_G均高于PA/H1复合材料。其原因在于燃烧过程中H2型阻燃剂的比表面积更高，在基体中分散更均匀，催化活性更高，参与反应更充分，能够更高效地促进PA8061基体热解形成高热屏蔽效率的无定形炭，从而更有利于隔绝热量和可燃气体的传递。

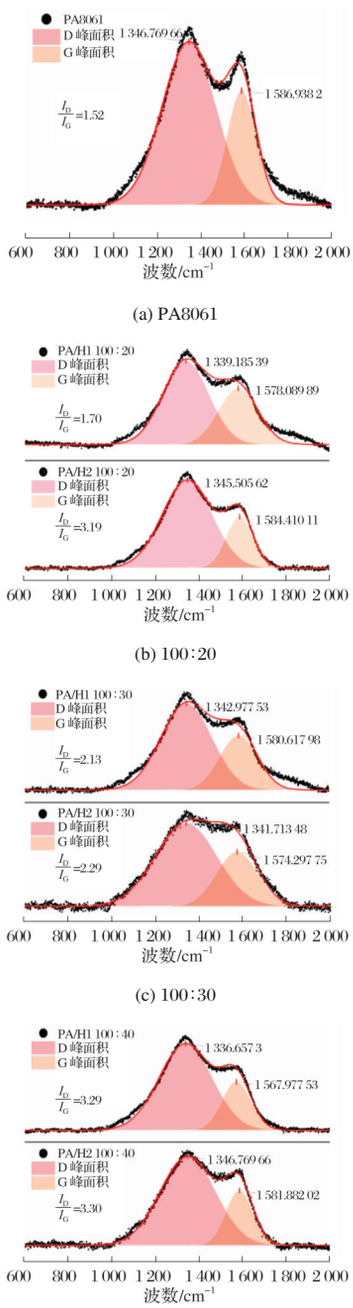


图10 PA/MH复合材料残炭的拉曼光谱

Fig.10 Raman spectra of carbon residue of PA/MH composites

3 结论

本研究以PA为基体、不同粒径和含量的MH为阻燃剂，通过熔融共混法制备PA/MH复合材料，系统研究其微观结构、界面特性及宏观性能。结果表明：复合结构与界面特性是影响材料宏观性能的关键。微米级H1型阻燃剂在PA8061基体中分散不均，界面结合力较弱；纳米级H2型阻燃剂分散更均匀，与基体形成了更强的界面作用。界面强度决定力学性能。H1型阻燃剂的弱界面易引发应力

集中，导致复合材料的力学性能显著降低。H2型阻燃剂的强界面有利于应力传递，在添加量为20 phr和30 phr时仍满足电缆护套的力学性能要求。粒径主导光学性能。MH阻燃剂的加入能够降低PA/MH复合材料的透光度。在相同添加量下，H2型阻燃剂因其粒径远小于可见光波长，光散射效应较弱，其对复合材料透光率的保持能力远优于H1型阻燃剂。复合结构与粒径协同影响阻燃机制。两种MH均可提升复合材料的阻燃性能，但提升机制不同。H1型阻燃剂的物理阻隔和促进基体成炭作用更强，在降低PHRR和THR方面更有效；H2型阻燃剂凭借其高比表面积和均匀分散，在延缓初始燃烧和催化形成高热屏蔽效率的无定形炭方面更优。因此，H2型阻燃剂在制备兼顾优异力学性能、高透明度和良好阻燃性的线缆用PA材料方面，展现出比H1型阻燃剂更优的综合性能。本研究为制备高性能透明阻燃PA材料提供参考。

参考文献

[1] 王忠强, 卢健体, 易庆锋, 等. 聚酰胺纳米复合材料的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(1): 91-95.
[2] 林华杰, 卢光明, 方奇, 等. 防霉阻燃尼龙材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 61-64.
[3] 王伟, 姜致言, 陈卓. 电子电气领域用无卤阻燃尼龙6的研究[J]. 当代化工研究, 2025(17): 182-184.
[4] FENG B T, YU S L, XIANG H X, et al. Current status and future trends for modification technology of flame retardant nylon 66[J]. Polymers, 2025, 17(8): 1074.
[5] 李德军, 杜悦, 周志峰, 等. 溴化丁基橡胶/聚酰胺热塑性硫化胶薄膜的制备与性能研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(2): 89-94.
[6] KRISHNA S, SREEDHAR I, PATEL C M. Molecular dynamics simulation of polyamide-based materials: A review[J]. Computational Materials Science, 2021, 200: 110853.
[7] 李伟光, 肖盼, 鹿中晖, 等. 尼龙12电缆护套料土壤埋藏试验[J]. 现代传输, 2022(4): 26-29.
[8] 陆正荣, 孙义兴, 张晓敏, 等. 尼龙护套电力电缆的机械防护性能[J]. 电线电缆, 2025, 68(6): 55-59.
[9] 种云胜, 王立岩, 别致, 等. 无卤阻燃玻纤增强尼龙复合材料研究进展[J]. 橡塑技术与装备, 2023, 49(1): 6-11.
[10] LIU M, QIU Y T, SHI Y Q, et al. Fabrication of flame retardant nylon 6 film composites with superior gas barrier property and puncture resistance[J]. Composites Communications, 2024, 47: 101883.
[11] 娄益波. 基于尼龙6的透明共聚尼龙的制备与性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2023.
[12] CUI M J, LI J, GAO Q, et al. A novel strategy to fabricate nylon 6 based flame retardant microfiber nonwoven fabric with durability [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 641: 128482.
[13] 钱伯章. 前景广阔的无卤阻燃尼龙[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(6): 141-143.
[14] LIU L J, YANG R J, XIA Z H, et al. Interfacial bonding flame retarded coating of nylon 6: Anti-dropping, self-extinguishment and water-proof[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 170: 106913.
[15] 赵泽文, 肖淑娟, 于守武. 尼龙无卤阻燃研究进展[J]. 塑料科技, 2018, 46(12): 128-132.
[16] 金汉强, 李曜, 贾凤. 透明尼龙的应用研究进展与展望[J]. 化工新型材料, 2023, 51(增刊1): 279-283.
[17] 彭栗妮. 高透明共聚尼龙6/66的制备及性能研究[J]. 合成纤维工业, 2025, 48(5): 38-42.
[18] 吕成, 周杰睿, 张华鹏, 等. 共聚阻燃尼龙材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(9): 25-28.
[19] 程宝发, 朱祥东, 何琪, 等. 无卤阻燃PA6复合材料的阻燃性能及热分解动力学研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(9): 5-9.
[20] 王文娟, 陈静静, 陈峙. 片状和颗粒状氢氧化镁对聚氯乙烯力学性能和阻燃性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(9): 111-115.
[21] GAO J C, WU Y D, LI J, et al. A review of the recent developments in flame-retardant nylon composites[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 9: 100297.
[22] 徐新文, 阮增, 尹昊琰, 等. 可交联磷氮化合物对EVA/MH复合材料阻燃与力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 20-25.
[23] 倪金平, 路丹, 郑振伟, 等. 透明尼龙PA6T/6I的黄变及透明性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(12): 62-65.
[24] 曾书航, 裴丰, 郭忠, 等. 氢氧化镁阻燃剂的制备及其在塑料领域中的应用研究进展[J]. 塑料科技, 2023, 51(6): 107-111.
[25] 陶君. 氢氧化镁粒径对阻燃聚乙烯复合材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2022, 50(10): 65-69.
[26] LAOUTID F, BONNAUD L, ALEXANDRE M, et al. New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2009, 63(3): 100-125.
[27] 余厚咏, 陈芸卉, 张云云, 等. 不同阻燃剂对尼龙材料加工改性的研究进展[J]. 纺织高校基础科学学报, 2024, 37(3): 22-29.
[28] 罗隆毅, 李建林, 王文志. 透明尼龙的研究进展[J]. 合成纤维工业, 2025, 48(5): 79-84.
[29] 孟庆华, 郭安儒, 张勇杰, 等. PS/PMMA复合材料的光散射[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2646-2650
[30] KANEKO Y, HAYASHI H, ISHII Y, et al. Refractive index change and thermo-optic effect in polydimethylsiloxane nanocomposites with oxide nanoparticles induced by proton beam writing[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 459: 94-97.
[31] ALOUI F, LECAMP L, LEBAUDY P, et al. Relationships between refractive index change and light scattering during photopolymerization of acrylic composite formulations[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(7): 1805-1809.
[32] WANG G, TAN H, LU C J, et al. Effect of core-shell nanocomposites on the mechanical properties and rheological behaviors of cement pastes[J]. RSC Advances, 2022, 12(14): 8310-8316.
[33] LI W Q, HU H Z, SU H M, et al. Numerical analysis on the optical force calculation in the rayleigh scattering regime[J]. Optical Review, 2021, 28(1): 1-7.
[34] WANG Y L, LI Z P, LI Y Y, et al. Spray-drying-assisted layer-by-layer assembly of alginate, 3-aminopropyltriethoxysilane, and magnesium hydroxide flame retardant and its catalytic graphitization in ethylene-vinyl acetate resin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(12): 10490-10500.
[35] SONG S Q, MA J J, CAO K, et al. Synthesis of a novel dicyclic silicon-/phosphorus hybrid and its performance on flame retardancy of epoxy resin[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 99: 43-52.