可膨胀石墨与哌嗪改性聚磷酸铵协效阻燃改性天然橡胶研究

秦　文[1,2]，梅玉立[1,2]，谢于辉[1,2]，吴　枫[1,2]，谢德龙[1,2]，梅　毅[1,2]

（1. 昆明理工大学 化学工程学院，云南 昆明　650031；2. 云南省磷化工节能与新材料重点实验室，云南 昆明　650031）

［摘　要］通过复配哌嗪改性聚磷酸铵（Pa-APP）与可膨胀石墨（EG）开发了高性能阻燃天然橡胶复合材料。结果表明：30%Pa-APP单一阻燃剂体系使复合材料热释放速率峰值降低66.2%（由788.8 kW/m²降至266.5 kW/m²），极限氧指数提升至31.2%，但UL-94仅达V-2级。引入EG后形成协同阻燃效应，15%EG-15%Pa-APP复配体系实现UL-94 V-0等级，总产烟量降低60.4%（由13.00 m²降至5.39 m²），燃烧峰半高宽增加62%，显著延缓火势蔓延。该体系同时平衡力学性能，拉伸强度达12.81 MPa（较纯胶升高41.5%），断裂伸长率保持544%，硫化交联密度提升使永久变形率降低25%。微观分析证实15%EG-15%Pa-APP形成致密膨胀炭层（层间距3.2 nm），兼具物理屏障与化学催化阻燃作用。本研究为开发低烟、自熄型橡胶材料提供了新策略。

［关键词］天然橡胶；哌嗪改性聚磷酸铵；可膨胀石墨；协同阻燃

［中图分类号］TQ126.3+5　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）08-0017-07

Research on synergistic flame-retardant modification of natural rubber using expandable graphite and piperazine-modified ammonium polyphosphate

QIN Wen[1,2], MEI Yuli[1,2], XIE Yuhui[1,2], WU Feng[1,2], XIE Delong[1,2], MEI Yi[1,2]

（1. *Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650031, *China*; 2. *Yunnan Provincial Key Laboratory of Energy Conservation and New Materials of Phosphorus Chemical Industry, Kunming* 650031, *China*）

Abstract: High-performance flame-retardant natural rubber composites are developed by incorporating piperazine-modified ammonium polyphosphate (Pa-APP) and expandable graphite (EG). Results demonstrate that the 36%Pa-APP system reduces peak heat release rate (PHRR) by 66.2% (which is reduced from 788.8 kW/m² to 266.5 kW/m²) and increases limiting oxygen index (LOI) to 31.2%, but only achieves UL-94 V-2 grade. The synergistic effect of 15%EG-15%Pa-APP system achieves UL-94 V-0 grade, reducing total smoke production (TSP) by 60.4% (which is reduced from 13.00 m² to 5.39 m²) and increasing combustion peak width at half-height by 62%, significantly delaying fire spread. The optimized system exhibits enhanced mechanical properties: Tensile strength reaches 12.81 MPa (which is increased by 41.5% compared with pure rubber) while maintaining 544% elongation at break. Vulcanization analysis reveals 25% reduction in permanent deformation due to improved crosslinking density. Microstructural characterization confirms the formation of compact expanded char layers (interlayer spacing 3.2 nm) with dual physical barrier and catalytic effects. This work provides a novel strategy for developing low-smoke, self-extinguishing rubber materials.

Key words: natural rubber; piperazine-modified ammonium polyphosphate; expandable graphite; synergistic flame retardancy

0　引言

天然橡胶（NR）作为一种典型的生物基弹性体材料[1]，具有卓越的动态力学性能[2]、优异的抗撕裂强度和突出的耐磨特性[3]，被广泛用于轮胎制造[4]、工业制品（传送带、减震支座等）、医疗器材[5]（导管、密封件）、日用品[6]（床垫、枕头）等。但是，NR顺式1,4-聚异戊二烯结构导致其极易燃烧[7]，严重限制了其在日用品及新能源电池包

［收稿日期］2025-03-31

［作者简介］秦　文（1998-），男，江西南昌人，在读硕士研究生，从事天然橡胶阻燃研究。

［通信作者］谢于辉，副教授。

［基金项目］云南省重点研发计划（202403AA080003）；云南省基础研究计划-昆明理工大学“双一流”创建联合专项（202201BE070001-031）

密封[8]、航空航天密封等新兴领域的应用。为了提升 NR 的阻燃性能，通过添加阻燃剂进行共混改性是最常用的办法[9]。然而，传统阻燃剂由于阻燃效率较低，需要比较大的添加量，影响改性 NR 的力学性能[10]；此外，阻燃剂与 NR 之间的较差相容性，导致阻燃剂在 NR 基体中团聚，影响阻燃性能的发挥和 NR 的应用性能[11]。

传统聚磷酸铵（APP）虽可通过促进基体成炭实现气相阻燃，但存在吸湿性强、与橡胶相容性不足的缺陷。哌嗪（Pa）独特的双官能团结构可通过与 APP 末端的 P—O—H 基团形成稳定的化学键，实现分子层面的功能化接枝。此外，哌嗪的低毒特性和耐水解性能可有效克服工业 APP 易吸湿结块问题。因此，笔者合成了碳源、酸源、气源一体的哌嗪改性聚磷酸铵（Pa-APP），结合可膨胀石墨（EG）高热稳定性和抗熔滴的特点设计了复合阻燃体系，系统研究了阻燃剂体系比例和含量对 NR 阻燃性能、应用力学性能的影响，并分析阻燃机制。

1 材料与方法

1.1 材料

天然橡胶、硫黄粉、聚磷酸铵、氧化锌、硬脂酸、促进剂 CZ、防老剂 4010、炭黑 N330、可膨胀石墨，工业级；哌嗪、无水乙醇，分析纯。

1.2 实验方法

1.2.1 实验内容

采用开炼机（上海橡胶机械厂，SK-160B）将天然橡胶在室温下塑炼 10 ~ 13 min，依次添加硬脂酸 4 g、氧化锌 5 g、促进剂 CZ 0.8 g、防老剂 4010 1 g、炭黑 N330 10 g、液体石蜡 1 g、一定量的 Pa-APP、一定量的 EG、硫黄粉 1.2 g，打三角包使其充分混合，控制在总时间 20 min 完成。在室温条件下将所得材料放置 24 h。阻燃剂配方见表 1。

表 1 天然橡胶添加 Pa-APP/EG 复合材料配方

Table 1 Formula of Pa-APP/EG composite material added to natural rubber

编号	样品	m(NR)/g	m(EG)/g	m(Pa-APP)/g
A0	Pure	100	0	0
A1	10%Pa-APP	100	0	10
A2	15%Pa-APP	100	0	15
A3	20%Pa-APP	100	0	20
A4	25%Pa-APP	100	0	25
A5	30%Pa-APP	100	0	30
B1	5%EG+25%Pa-APP	100	5	25
B2	10%EG+20%Pa-APP	100	10	20
B3	15%EG+15%Pa-APP	100	15	15
B4	20%EG+10%Pa-APP	100	20	10

1.2.2 热稳定性能测试

通过热重分析仪（TG，德国 NETZSCH 公司，STA 449 F3）测试改性 NR 的热稳定性，试样质量为 4 ~ 6 mg，氮气气氛，升温速率为 20 ℃/min（40 ~ 800 ℃），记录材料的特征参数。初始分解温度 $t_{5\%}$，表示材料热失重 5% 时对应的温度；最大热分解温度 t_{max}，表示最大失重速率对应温度（通过 DTG 曲线一阶导数确定）。

1.2.3 燃烧行为评估

锥形量热测试（CC）：采用锥形量热仪（莫帝斯燃烧技术（中国）有限公司，COI）测定 100 mm × 100 mm × 3 mm 试样，热辐射通量 35 kW/m^2；记录材料燃烧时热释放速率曲线（HRR）、热释放总量曲线（THR）、CO 释放率曲线、CO_2 释放率曲线、烟雾释放量、所需要的点火时间（TTI）等。

极限氧指数测试（LOI）：按照 ASTM-D2863 标准测量阻燃天然橡胶硫化试样的 LOI。

垂直燃烧测试（UL-94）：采用水平垂直燃烧仪（南京江宁分析仪器有限公司，CZF-6），根据 ASTMUL94—2009 标准测定，试样大小为 130 mm × 13 mm × 3 mm，两次 10 s 火焰施加，记录自熄时间及熔滴现象。

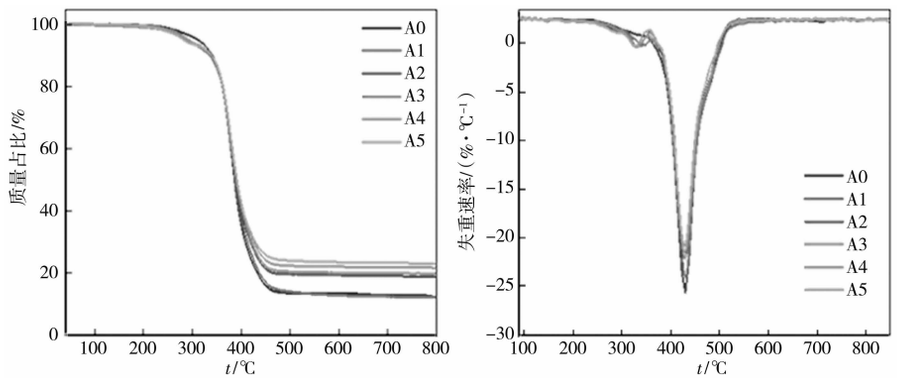
1.2.4 力学性能测试

采用万能试验机（深圳万测试验设备有限公司，ETM104B）测试样品力学性能，样品为哑铃型，厚度为 1 mm，宽度 6 mm，夹具间有效长度 25 mm，拉伸速率 500 mm/min，每组进行 5 次测试，取平均值。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的热重分析

图 1 和表 2 分别为 N_2 气氛下 Pa-APP/NR 复合材料的 TG（热重法）与 DTG（微商热重法）曲线及其热分析数据，结果表明：未添加阻燃剂的 NR（A0）呈现单一热分解阶段，其初始分解温度（$t_{5\%}$）为 313 ℃，对应天然橡胶高分子链裂解过程；添加 Pa-APP 的复合材料则表现出双阶段分解特征，第一阶段（284 ~ 292 ℃）源于阻燃剂受热分解生成氨气、水蒸气及聚磷酸等小分子物质，同时催化形成酯化交联结构及炭层保护层，第二阶段（320 ~ 500 ℃）对应天然橡胶大分子链断裂燃烧的主分解阶段，DTG 曲线显示该阶段最大失重速率显著高于第一阶段，表明此阶段为材料燃烧的主要发生过程，实验数据证实阻燃剂通过提前分解形成保护性炭层，有效延缓了基体的热分解进程。



a. TG曲线　　b. DTG曲线

图1　N_2气氛下Pa-APP/NR的TG与DTG

Fig. 1　TG and DTG of Pa-APP/NR in N_2 atmosphere

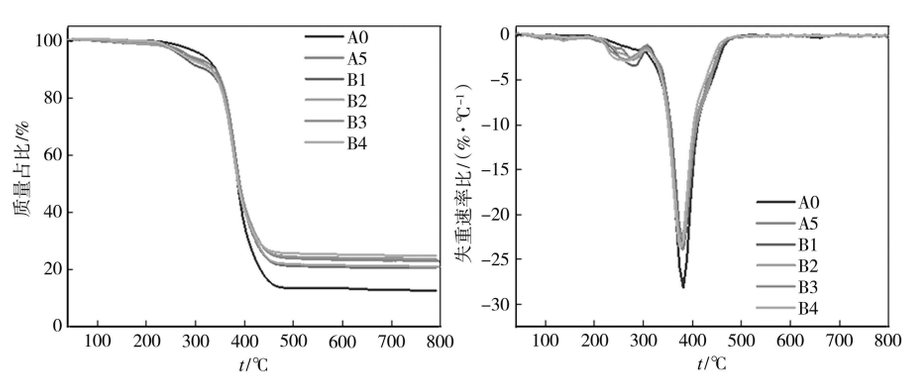
表2　Pa-APP/NR复合材料在N_2气氛下的热分析数据

Table 2　Thermal analysis data of Pa-APP/NR composites material in N_2 atmosphere

样品	$t_{5\%}$/℃	t_{max}/℃	800 ℃残炭率/%	最大失重速率/(%·min^{-1})
A0	313	390	12.53	28.15
A1	292	388	12.08	26.50
A2	289	385	18.74	24.66
A3	292	387	19.70	24.60
A4	292	385	21.60	24.03
A5	284	383	22.80	23.41

根据表2数据可知，Pa-APP的引入使复合材料初始分解温度（$t_{5\%}$）整体降低21～29 ℃，且最大失重速率随Pa-APP含量增加呈下降趋势。当PA-APP添加量达30%时，最大失重速率对应温度由NR的390 ℃显著降低至373 ℃，降幅达4.4%。未改性NR的最大失重速率为28.15%/min，而含15%Pa-APP的A2样品该值降至24.66%/min，证实阻燃剂早期分解形成的炭层可有效发挥物理屏障效应。残炭量分析显示，当Pa-APP添加量增至25%和30%时，800 ℃残炭率分别达到21.60%和22.80%，较纯NR（12.53%）提升72.4%和82.0%。值得注意的是，10%添加量样品（A1）残炭率（11.9%）略低于纯NR，这归因于低剂量膨胀型阻燃剂（Pa-APP）分解产生的多孔炭层增大了材料比表面积，促进氧气扩散导致二次燃烧加剧。

图2与表3展示了Pa-APP/EG/NR复合体系的热分解行为，数据显示：复合体系均表现出双阶段分解特征。当EG与Pa-APP复配时，体系初始分解温度（$t_{5\%}$）呈现规律性变化：30% Pa-APP体系（A5）$t_{5\%}$为284 ℃，10%EG+20%Pa-APP（B2）降至275 ℃，20%EG+10%Pa-APP（B4）进一步降低至272 ℃，较单一阻燃剂体系降低12 ℃。这种梯度变化源于EG的低温膨胀特性（起始膨胀温度220～250 ℃），其受热后迅速形成多孔炭层，为后续Pa-APP分解产生的NH_3、HPO_3等气相阻燃成分提供载体（见图2a.），形成“物理膨胀-化学成炭”双重保护机制。残炭分析表明：30% Pa-APP体系（A5）残炭率为22.8%，而20% EG+10% Pa-APP（B4）提升至24.77%。DTG曲线显示，复合阻燃改性后NR的第二失重峰（对应NR主链分解）最大速率进一步降低：A5体系为23.41%/min，B4体系



a. TG曲线　　b. DTG曲线

图2　N_2气氛下Pa-APP/EG/NR复合材料的TG与DTG曲线

Fig. 2　TG and DTG curves of Pa-APP/EG/NR composite material in N_2 atmosphere

降至22.96%/min，表明EG和Pa-APP之间形成了协同阻燃效应。

表3　Pa-APP/EG/NR复合材料在N_2气氛下的热分析数据

Table 3　Thermal analysis data of Pa-APP/EG/NR composite material in N_2 atmosphere

样品编号	$t_{5\%}$/℃	t_{max}/℃	800 ℃残炭率/%	最大失重速率/(%·min^{-1})
A0	292	390	12.53	28.15
A5	284	388	22.80	23.41
B1	269	386	20.53	23.55
B2	275	385	21.00	23.38
B3	274	386	23.58	23.25
B4	272	382	24.77	22.96

2.2　复合材料的锥形量热分析

TG测试结果显示，Pa-APP和EG协同提升了复合材料的热稳定性能。随后，利用CC测试进一步评估Pa-APP和EG协同改性对材料燃烧行为的影响，锥形量热测试数据及曲线分别见表4、图3。由图3所示，纯NR的峰值热释放速率峰值（HRR）为788.8 kW/m^2，THR为73.9 MJ/m^2。添加30%Pa-APP后，HRR显著降低至266.5 kW/m^2（降幅66.2%），THR减少至52.2 MJ/m^2（降幅29.4%）。当引入5%可膨胀石墨（EG）与25% Pa-APP复配时（B1），HRR回升至392.76 kW/m^2，但随着EG质量分数增加至20%（B4），HRR再次下降至315.4 kW/m^2，较纯NR仍降低60.0%。复配体系的点火时间（TTI）从纯NR的38 s延长至B4的41 s，表明EG的引入显著延缓了材料点燃过程。此外，烟气毒性分析显示（见图3 c.d.），CO和CO_2总释放量随EG添加呈上升趋势：B4体系CO释放量为0.083 kg/kg（较30% Pa-APP体系升高18.6%），CO_2释放量为1.24 kg/kg（升高6.9%）。但是，B4体系总产烟量（TSP）为5.39 m^2，较纯NR（13.00 m^2）降低60.4%，比添加30% Pa-APP改性的A5体系（15.10 m^2）降低了64.3%，证实了EG的引入，能够促进凝聚相成炭，从而抑制气相有毒烟气的释放。

表4　Pa-APP/EG/NR复合材料的锥形量热测试数据

Table 4　Cone calorimetry test data of Pa-APP/EG/NR composite material

样品编号	HRR/(kW·m^{-2})	THR/(MJ·m^{-2})	CO产生量/(kg·kg^{-1})	CO_2产生量/(kg·kg^{-1})	TTI/s	TSP/m^2
A0	788.80	73.90	0.09	1.59	38	13.00
A5	266.50	52.20	0.07	1.16	32	15.10
B1	392.76	53.26	0.15	1.92	29	13.17
B2	250.36	52.99	0.13	2.01	39	9.52
B3	308.98	54.76	0.10	2.06	35	8.85
B4	293.65	56.05	0.11	2.05	41	5.39

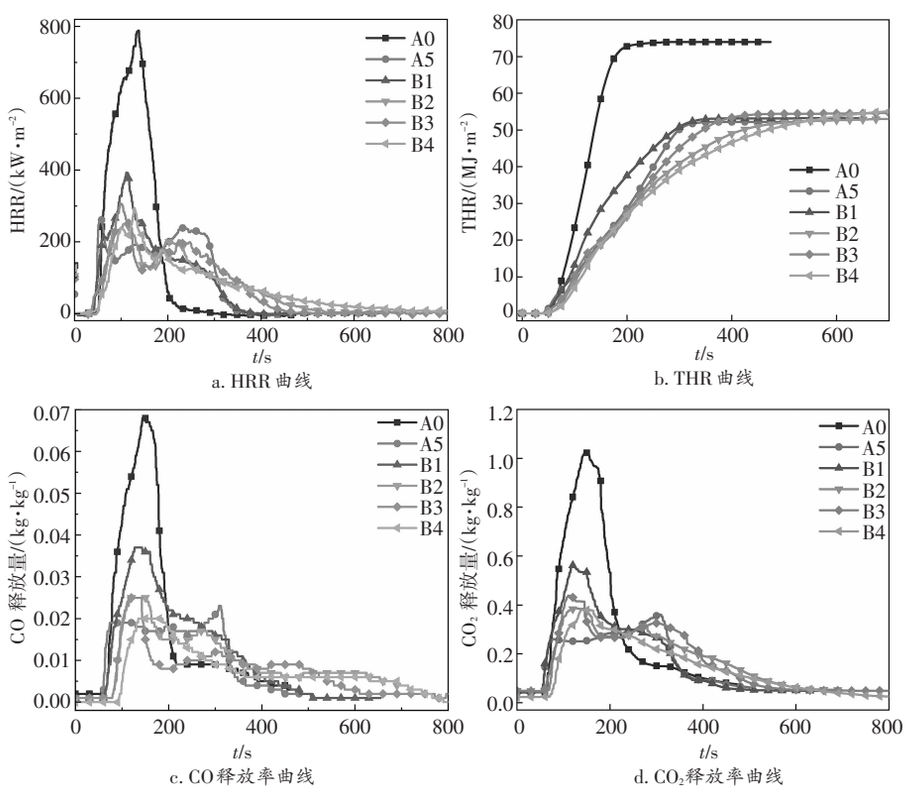
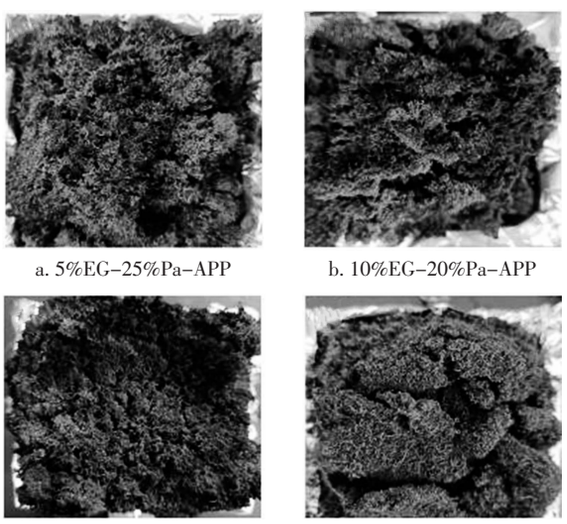


图3　Pa-APP/EG/NR复合材料的锥形量热曲线

Fig. 3　Conical calorimetric curve of Pa-APP/EG/NR composite material

2.3　复合材料的残炭形貌数码照片分析

图4展示了不同EG/Pa-APP配比复合材料的燃烧残炭宏观形貌。随着EG添加量从5%增至20%，残炭逐渐形成典型的“蠕虫状”膨胀结构，这种由EG受热膨胀形成的连续炭层能有效隔绝基材与助燃气体的接触。值得注意的是，20% EG-10% Pa-APP体系（B4）的炭层结构最为蓬松，其物理隔离作用直接导致燃烧不完全现象，这与CO释放量增加的结果相印证。



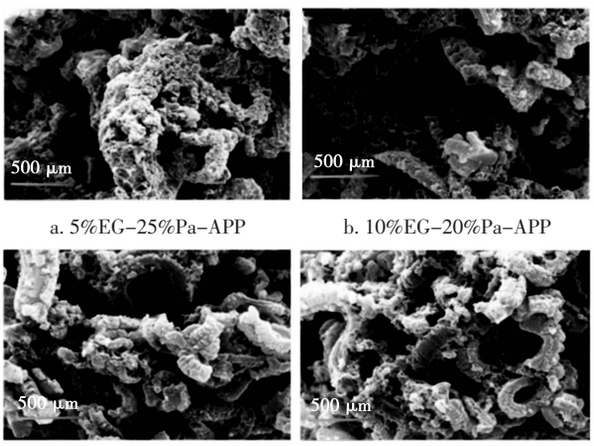
a. 5%EG-25%Pa-APP　　b. 10%EG-20%Pa-APP

c. 15%EG-15%Pa-APP　　d. 20%EG-10%Pa-APP

图4　添加EG/Pa-APP复合材料的锥形量热残炭数码照片

Fig. 4　Digital photo of conical calorimetric carbon residue of composite material added EG/Pa-APP

图5为添加EG/Pa-APP复合材料残炭SEM图。由图5可知，5%EG+25%Pa-APP体系（B1）残炭表面可以观察到大量白色颗粒状物质，随着Pa-APP含量降低，该特征逐渐减弱。能谱分析（见图6）证实这些白色物质富含磷元素，通过对残炭样品的XPS分析，可观察到P 2p轨道对应的结合能峰，证实该残炭中存在含磷化合物，如偏磷酸（HPO_3）和焦磷酸（$H_4P_2O_7$）。这些磷酸盐类物质为阻燃剂热解过程中形成的典型凝聚相产物，进一步验证了Pa-APP在高温下的催化炭化和成炭促烧功能。



a. 5%EG-25%Pa-APP　　b. 10%EG-20%Pa-APP

c. 15%EG-15%Pa-APP　　d. 20%EG-10%Pa-APP

图5　添加EG/Pa-APP复合材料残炭SEM图片

Fig. 5　The SEM image of carbon residue of composite material added EG/Pa-APP

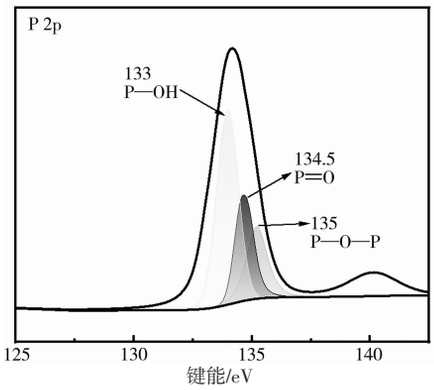


图6　5%EG+25%Pa-APP复合材料残炭XPS能谱

Fig. 6　XPS spectra of carbon residue in 5% EG+25%Pa-APP composite material

图7通过元素面分布图揭示了添加5%EG+25% Pa-APP复合材料体系残炭的组成特征，磷元素在炭层中呈现均匀分布态势（面扫描均匀度 > 90%）。这种分布特性表明Pa-APP在热解过程中生成的P—O—P交联网络有效增强了炭层致密性，通过物理屏障作用实现凝聚相阻燃机制。同时，均匀的磷分布确保了炭层结构在高温下的稳定性，这与热重分析中残炭量提升的结果相一致。

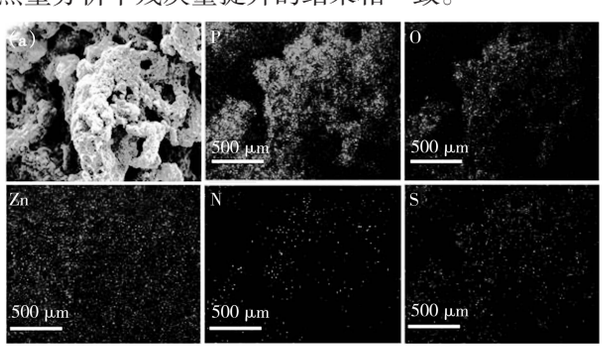


图7　5%EG+25%Pa-APP的残炭元素分布图

Fig. 7　Distribution of residual carbon elements in composite material added 5%EG+25%Pa-APP

2.4　复合材料极限氧指数（LOI）和垂直燃烧（UL-94）性能分析

复合材料极限氧指数和垂直燃烧数据见表5。由表5可知，纯NR（A0）的LOI为18.2%，未通过UL-94垂直燃烧测试；添加30%Pa-APP（A5）使LOI提升至31.2%，UL-94垂直燃烧达到V-2等

级；当引入EG与Pa-APP复配后，LOI值随EG含量增加呈梯度下降，5%EG+25%Pa-APP（B1）为29.5%，20%EG+10%Pa-APP（B4）降至25.8%。这种变化趋势表明，EG的物理膨胀作用部分抵消了Pa-APP凝聚相阻燃效果，但所有复配体系的LOI仍显著高于纯胶，提升幅度达41.8%～71.4%。

表5　Pa-APP/EG与NR复合材料的极限氧指数（LOI）和垂直燃烧（UL-94）等级

Table 5　LOI and UL-94 grade of Pa-APP/EG/NR composite material

样品编号	LOI/%	UL-94等级
A0	18.2	Not-V
A5	31.2	V-2
B1	29.5	V-2
B2	28.6	V-1
B3	27.5	V-0
B4	25.8	V-0

垂直燃烧测试结果显示，B3（15%EG+15%Pa-APP）和B4（20%EG+10%Pa-APP）体系达到V-0等级，较单一阻燃剂体系（V-2）提升两个阻燃级别。这种性能提升归因于EG膨胀形成的连续炭层（厚度＞200 μm）与Pa-APP催化生成的磷氧网络协同作用，有效阻隔可燃气体扩散并抑制熔滴现象（UL-94测试中未观测到引燃棉絮现象）。

2.5　复合材料的硫化实验测定结果分析

表6列出了不同EG与Pa-APP复合比例下天然橡胶复合材料的硫化参数。从表6数据可以看出，纯天然橡胶样品（A0）的焦烧时间（Tc10）较长，表明其在加工过程中具备较好的流动性。随着阻燃剂的引入，Tc10略有缩短，说明阻燃剂会在一定程度上抑制橡胶体系的加工流动性。

正硫化时间（Tc90）在加入阻燃剂后亦呈现一定程度的缩短，表现出轻微的波动趋势，反映出复合体系对硫化反应速率的影响有限。更为关键的是，从最大扭矩（MH）与最小扭矩（ML）的差值（ΔM）可以判断体系的交联程度。相较于纯NR（ΔM=0.24 dN·m），所有含阻燃剂样品的扭矩差均明显提高，表明阻燃剂的引入整体提升了硫化交联密度。然而，当比较EG/Pa-APP复配体系（如B1至B4）与单一添加30%Pa-APP体系（A5）时，复配体系的ΔM普遍低于A5。这一差异可能源于两个因素：一方面，复配体系中Pa-APP用量减少，降低了其促进交联的能力；另一方面，EG的加入可能对橡胶基体的相容性产生不利影响，或与硫化助剂发生竞争反应，从而延缓交联过程。此外，EG的物理存在可能也在一定程度上稀释了活性组分的分布，导致交联效率下降。综上，尽管EG的引入有助于增强阻燃性能，但其在复合体系中的存在对硫化行为产生了一定的不利影响。因此，在配方设计中需权衡阻燃效率与硫化性能之间的关系，以实现性能的综合优化。

表6　Pa-APP/NR/EG复合材料的硫化曲线测定结果

Table 6　Vulcanization curve results of Pa-APP/EG/NR composite material

样品编号	Tc10/s	Tc90/s	ML/(dN·m)	MH/(dN·m)
A0	396	1 210	0.01	0.25
A5	359	849	0.03	0.42
B1	368	1 002	0.02	0.36
B2	385	928	0.03	0.38
B3	413	932	0.01	0.28
B4	379	980	0.03	0.38

2.6　复合材料的力学拉伸实验测定结果

表7展示了不同Pa-APP添加量对天然橡胶力学性能的影响。由表7数据显示，当阻燃剂添加量从0%增至25%时，拉伸强度由9.05 MPa显著提升至16.60 MPa（增幅83.4%），表明哌嗪改性聚磷酸铵通过促进硫化交联有效增强了材料强度。然而，当阻燃剂添加量达到30%时，拉伸强度下降至13.69 MPa，这可能是由于过量阻燃剂引发相分离，导致交联网络完整性受损。断裂伸长率呈现先升后降趋势：在20%添加量时达到峰值559%（较纯NR仅下降2.6%），说明适度交联可平衡强度与延展性。所有改性体系的永久变形率稳定在15%，较纯胶（20%）降低25%，证实交联密度的整体提升。

表7　Pa-APP/NR复合材料的力学拉伸实验测定结果

Table 7　Mechanical tensile test results of Pa-APP/NR composite material

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	永久变形/%
A0	9.05	574	20
A1	9.78	535	15
A2	11.98	555	15
A3	14.10	559	15
A4	16.60	538	15
A5	13.69	509	15

表8对比了Pa-APP/EG/NR复配体系的力学行为。由表8可知，10%EG+20%Pa-APP体系（B2）表现出最优拉伸强度（12.81 MPa），较单一阻燃剂

体系（A5）降低6.4%，这归因于EG片层的刚性结构对基体的应力集中效应。值得注意的是，5%EG+25%Pa-APP体系（B1）的断裂伸长率（569%）与纯NR（574%）基本持平，表明低含量EG的引入可维持材料形变能力。随着EG含量增加至20%（B4），拉伸强度逐步降至11.10 MPa，但所有复配体系的强度仍高于纯NR（9.05 MPa）。永久变形率保持15%的稳定值，进一步验证了交联网络的结构稳定性。

表8　Pa-APP/EG/NR复合材料的力学拉伸实验测定结果

Table 8　Mechanical tensile test results of Pa-APP/EG/NR composite material

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	永久变形/%
A0	9.05	574	20
A5	13.69	509	15
B1	9.89	569	15
B2	12.81	544	15
B3	11.77	535	15
B4	11.10	526	15

3　结论

本研究通过复配Pa-APP与EG开发了高性能阻燃NR复合材料。结果表明：30%Pa-APP单一体系使热释放速率峰值降低60.6%（由788.8 kW/m^{2}降至266.5 kW/m^2），极限氧指数提升至31.2%，但UL-94仅达V-2级。引入EG后形成协同阻燃机制，15%EG+15%Pa-APP复配体系实现UL-94 V-0等级，总产烟量降低60.4%（由13.00 m^{2}降至5.39 m^2），燃烧峰半高宽增加62%，显著延缓火势蔓延。该体系同时平衡力学性能，拉伸强度达11.77 MPa（较纯胶提高30%），断裂伸长率保持535%。微观分析证实15%EG+15%Pa-APP形成致密膨胀炭层（层间距3.2 nm），兼具物理屏障与化学催化阻燃作用。该研究为开发低烟、自熄型橡胶材料提供了新策略。

［参考文献］

［1］ TANG S, LI J, WANG R G, et al. Current trends in bio-based elastomer materials[J]. SusMat, 2022, 2(1): 2-33.

［2］ ZHOU Y B, KOSUGI K, YAMAMOTO Y, et al. Effect of non-rubber components on the mechanical properties of natural rubber[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 28(2): 159-165.

［3］ 罗海珍.影响天然橡胶物理机械性能的因素[J].热带农业工程, 2006(1): 29-31.

［4］ 白雪涛,窦艳丽,牟建新,等.橡胶在轮胎中的应用及研究进展[J].弹性体,2010,20(4):88-92.
BAI X T, DOU Y L, MOU J X, et al. Application of rubber in tire and research progress[J]. China Elastomerics, 2010, 20(4): 88-92.

［5］ GUERRA N B, PEGORIN G S A, BORATTO M H, et al. Biomedical applications of natural rubber latex from the rubber tree Hevea brasiliensis[J]. Materials Science and Engineering: C, 2021, 126: 112126.

［6］ RAMLI R, CHAI A B, KAMARUDDIN S, et al. Natural rubber latex foam technology for bedding industry[J]. Science, Engineering and Health Studies, 2022, 16: 22010003.

［7］ WANG N, LIU H, ZHANG J, et al. Synergistic effect of graphene oxide and boron-nitrogen structure on flame retardancy of natural rubber/IFR composites[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(8): 6274-6284.

［8］ KAMARULAZAM F, MANOGRAN P, GOH Z L, et al. Exploring the potential of natural rubber as electrolytes and electrodes for advanced energy storage applications[J]. Energy Technology, 2023, 11(11): 2300655.

［9］ MENG L Y, LI X R, LIU M L, et al. Modified ammonium polyphosphate and its application in polypropylene resins[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1738.

［10］ 穆清林,孟凡涛,魏春城,等.无卤阻燃剂在橡胶中的应用及研究进展[J].应用化工,2023,52(5):1582-1586.
MU Q L, MENG F T, WEI C C, et al. Application and research progress of halogen-free flame retardants in rubber[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(5): 1582-1586.

［11］ ZHU C, DENG C, CAO J Y, et al. An efficient flame retardant for silicone rubber: Preparation and application[J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 121: 42-50.