

· 研究论文 ·

侧链含萘酰亚胺聚硅氧烷的制备及其与高岭土协同阻燃聚碳酸酯研究

雷森浩^{1,2} 刘杰^{3*} 唐涛^{1,2*}

(¹中国科学技术大学应用化学与工程学院 合肥 230026)

(中国科学院长春应用化学研究所 ²高分子科学与技术全国重点实验室 ³高分子材料工程实验室 长春 130022)

摘要 为应对全氟和多氟烷基物质(PFAS)管控趋严及薄壁阻燃聚碳酸酯(PC)的低热低烟无卤化需求,本文设计合成了一种侧链含萘酰亚胺官能团的聚硅氧烷(PSNI),并将其与高岭土(Kaolin)复配,制备了系列PC/PSNI/Kaolin复合材料,系统研究了复配比例对材料热稳定性、阻燃性能及力学性能的影响.结果表明,PSNI与高岭土具有良好的协同阻燃效果,PSNI与高岭土的总添加量为10 wt%,质量比为1:1时,PC/5%PSNI/5%Kaolin的极限氧指数(LOI)提高至43.7%,1.6 mm厚样品可通过UL-94 V-0级别.与纯PC相比,峰值热释放速率(pHRR)、峰值烟释放速率(pSPR)、总热释放量(THR)和总烟生成量(TSP)分别降低56%、42%、25%和57%.PSNI与高岭土通过化学交联成炭与物理阻隔的协同机制,促进形成高质量炭层,有效阻隔了热量和烟气的传递.

关键词 聚碳酸酯;聚硅氧烷;高岭土;低热低烟

引用: 雷森浩,刘杰,唐涛.侧链含萘酰亚胺聚硅氧烷的制备及其与高岭土协同阻燃聚碳酸酯研究.高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26149.

Citation: Lei, S. H.; Liu, J.; Tang, T. Preparation of naphthalimide-containing polysiloxane and its synergistic flame retardancy with kaolin in polycarbonate. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26149.

聚碳酸酯(PC)在电子电气、新能源汽车和航空航天等领域的应用日益广泛,但其在薄壁制件中的易燃性及燃烧时伴随的高热释放、高烟释放问题,严重制约了其在高集成度、密闭空间场景下的安全使用^[1-3].研究表明,聚合物材料火灾危害中,约70%的伤亡源于高温有毒烟气导致的窒息与能见度丧失,而热释放速率(HRR)的急剧升高则是引发轰燃与二次热失控的关键因素^[4,5].因此,在实现薄壁阻燃的基础上,同步降低材料燃烧过程中的热释放与烟释放,已成为评价阻燃材料综合安全性能的核心指标^[6,7].

目前薄壁阻燃PC通常需要添加含氟的阻燃剂或者抗滴落剂来达到比较理想的薄壁阻燃效果.Sun等^[8]以磷腈-三嗪双碱磺酸盐化合物(CPNS)、硅氧烷、聚四氟乙烯和PETs为原料,通过磷、硅、氟三种阻燃元素的协同作用,制备了薄壁阻燃PC复合材料.当CPNS添加量为0.1 wt%时,复合材料峰值热释放速率(pHRR)降低16.89%,1.6 mm厚样品通过了UL-94 V-0级阻燃测试.Zhang等^[9]采用对苯二磺酸二钾盐(KSP)与三种苯基聚硅氧烷(P4、OPS和L-PPSQ)复配,并引入聚四氟乙烯,成功制备了PC/KSP复合材料.该体系可达UL-

黄葆同先生和冯之榴先生诞辰105周年纪念专辑;2026-04-30收稿,2026-05-27录用,
基金项目:国家自然科学基金(基金号52373064).

* 通信联系人, E-mail: liujie@ciac.ac.cn; ttang@ciac.ac.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26149; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7649

网络出版.

94 V-0级(1.6 mm), 且pHRR降幅高达45%. Huang等^[10]构建了聚硅氧烷与全氟磺酸盐复合阻燃体系, 并协同大分子成炭剂酚醛树脂对PC板材进行改性. 该体系可使PC材料通过0.4 mm厚度的UL-94 V-0级测试. 但PFAS具有持久性、生物累积性和毒性, 在人体内可能引发免疫抑制、内分泌紊乱及致癌风险^[11,12]. 在全球PFAS管控趋严的背景下, 目前很多商品存在产业合规压力, 传统的含氟体系难以同时满足薄壁阻燃与环保要求, 且无法有效的降低材料的热释放和烟释放.

有机硅阻燃剂(尤其是聚硅氧烷类)主要为凝聚相阻燃机理, 因其独特的Si-O-Si主链结构, 在燃烧过程中可在材料表面形成富含SiO₂的陶瓷化保护层, 也可以与基体交联形成含硅炭层^[13]. 由于PC本身具有一定的成炭能力, 在添加聚硅氧烷后, 可以对自身其炭层进行加强, 形成良好的物理屏障, 有效阻隔热量与氧气传递, 显著降低pHRR和峰值烟释放速率(pSPR)^[14,15]. 在本课题组之前的工作中, 采用硼酸和八甲基环四硅氧烷合成了聚硼硅氧烷(PBS), 当PBS添加量为2 wt%时即可使PC通过UL-94的V-0等级(3.2 mm), 极限氧指(LOI)提升至31.2%, pHRR和pSRP分别降低63%和46%^[16]. 然而, 单独使用聚硅氧烷时, 阻燃效率有限, 往往难以达到薄壁制品(<1.6 mm)的UL-94 V-0级阻燃要求, 且单纯增加聚硅氧烷的添加量对于阻燃性能的提升没有明显的帮助, 需要与其他类型阻燃剂协效来实现PC复合材料阻燃性能的进一步提升, 而引入气相阻燃难免会带来烟雾释放的增加. 所以本课题组后续工作又将PBS与酚醛树脂(LPR)复配, 制备了PC/PBS/LPR复合材料, 在PBS和LPR总添加量为10 wt%、质量比为3:1时, 该样品的pHRR、pSPR、总热释放(THR)和总烟生成(TSP)分别降低76%、64%、49%和65%, LPR的原位成炭作用使复合材料的阻燃性能进一步大幅提升^[17]. 从以上工作可以看出, 通过寻找合适的协效剂来进一步加强PC/聚硅氧烷体系的凝聚相阻燃能力是一个很好的选择. 高岭土作为典型的铝硅酸盐矿物填料, 其片层结构可在燃烧过程中构筑物理阻隔屏障, 抑制热量回传与挥发物逸出; 同时, 高岭土表面的活性铝、硅位点有可能促进PC自身的异构化和Fries重排. 两者复配后, 聚硅氧烷在高温下形成的硅氧烷网络可与无机矿物填料生成更致密的硅酸盐

陶瓷层, 显著提升炭层的阻隔效果和热稳定性, 更有效地抑制燃烧过程中的传质与传热, 从而实现热释放和烟释放的同步降低^[18-20]. 本工作设计合成了含脲酰亚胺结构的聚硅氧烷(PSNI), 并将其与高岭土复配, 制备了PC/PSNI/Kaolin复合材料, 系统研究了PSNI和高岭土比例对PC/PSNI/Kaolin复合材料热稳定性、阻燃性能和缺口冲击强度的影响规律. 在此基础上, 研究了PSNI和高岭土的协同阻燃机制.

1 实验部分

1.1 主要原料

聚碳酸酯(PC, M7027BF), 三菱化学; 八甲基环四硅氧烷、四氢呋喃, 上海泰坦科技股份有限公司; 3-氨基丙基甲基二乙氧基硅烷、1,8-萘二甲酸酐, 上海阿拉丁生物科技股份有限公司; 四甲基氢氧化铵五水合物, 北京伊诺凯有限公司; 二甲基亚砜, 西陇科学股份有限公司; 高岭土(Kaolin), 内蒙古天之娇高岭土有限公司.

1.2 PSNI的制备

将29.7 g八甲基环四硅氧烷和19.1 g的3-氨基丙基甲基二乙氧基硅烷加入反应器中搅拌均匀, 然后加入3.6 g水、0.025 g四甲基氢氧化铵五水合物和0.5 g二甲亚砜. 在100 °C下搅拌反应4 h, 然后减压蒸馏除去乙醇. 将温度升至120 °C, 继续搅拌反应24 h, 反应结束后将温度升至160 °C, 减压条件下反应1 h, 使催化剂失活并除去未反应的原料及低分子量产物. 冷却后放入真空烘箱120 °C烘干12 h, 得到中间产物氨基丙基聚硅氧烷(PSN). 将41.3 g制得的PSN溶于300 mL四氢呋喃中, 搅拌加入19.8 g的1,8-萘二甲酸酐, 在80 °C下搅拌回流12 h, 减压旋蒸除去溶剂得到侧链含脲亚胺结构的聚硅氧烷(PSNI).

1.3 PC/PSNI/Kaolin复合材料的制备

将PC、PSNI和高岭土在100 °C的真空烘箱中烘干12 h, 然后在扭矩流变仪中熔融共混, 在240 °C下, 60 r/min熔融共混1.5 min, 然后在100 r/min熔融共混5 min, 得到阻燃PC复合材料. 通过平板硫化仪将获得的样品先在240 °C熔融热压15 min, 后在室温下冷压3 min, 得到成型样品. 具体组成见表1.

1.4 测试与表征

采用KBr压片法, 在Invenio-R红外光谱仪

Table 1 Composition of PC composites.

Samples	PC (wt%)	PSNI (wt%)	Kaolin (wt%)
PC	100.0	0.0	0.0
PC/10%Kaolin	90.0	0.0	10.0
PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin	90.0	2.5	7.5
PC/5%PSNI/5%Kaolin	90.0	5.0	5.0
PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin	90.0	7.5	2.5
PC/10%PSNI	90.0	10.0	0.0

(美国 Perkin Elmer 公司)上测试傅里叶红外光谱 (FTIR), 扫描范围 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$, 扫描次数 128 次, 分辨率 4 cm^{-1} , 对分子结构进行测试. 采用热重分析法 (TGA/DTG, TA STD Q600, 美国 Perkin Elmer 公司), 在氮气气氛下, 由室温升高到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 对样品进行热稳定性测试. 使用 JL-CZF-5 立式燃烧试验机 (南京市分析化工仪器厂) 测试样品的 UL-94 垂直燃烧等级, 测试标准 ASTM D3801, 样品尺寸为 $130\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$. 样品的 LOI 在 HC-2C 氧指数测定仪 (南京市分析化工仪器厂) 上进行测试, 测试标准 ASTM D2863-09, 样品尺寸为 $130\text{ mm} \times 6.5\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$. 使用锥形量热仪 (icone, 东莞市三本精密仪器有限公司) 在 $50\text{ kW}/\text{m}^2$ 的辐射热通量下进行测试, 测试标准 ISO 5660-1, 样品尺寸 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$. 通过燃烧系统中消耗的氧气来确定净热量的释放. 采用场发射扫描电子显微镜 (SEM, ZEISS sigma300, 日本电子

株式会社) 观察 PC 复合材料锥形量热测试后的残炭形貌, 观察前在样品表面溅射镀金. 采用裂解气相色谱-质谱仪 (Py-GC/MS, Agilent 5975/CDS 1500, 美国安捷伦科技有限公司) 对 PC 复合材料的气相裂解产物进行分析. 裂解过程在裂解炉中进行, 裂解温度 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, 载气为氦气. 之后用 HP-5 色谱柱 (美国安捷伦科技有限公司) 分离气体产物并进入质谱仪. 采用 JJ-20 记忆式冲击试验机 (长春市智能仪器设备公司) 测试 PC 复合材料的悬臂梁缺口冲击强度, 测试标准 GB/T 1843—2008, 样品尺寸为 $80\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 缺口为 V 型.

2 结果与讨论

2.1 PSNI 的结构表征

通过核磁共振氢谱 ($^1\text{H-NMR}$) 和 FTIR 对 PSN 及 PSNI 的化学结构进行了表征. 图 1(b) 和 1(c) 中 $\delta=0.00$ 处特征峰对应于 $\text{Si}-\text{CH}_3$, 证明形成了主链为交替 $\text{Si}-\text{O}$ 结构的聚硅氧烷^[21]. 图 1(b) 中 $\delta=1.40$ 特征峰表明 $-\text{NH}_2$ 结构被引入至聚硅氧烷链中. 在图 1(d) 中, 由于 $\text{Si}-\text{O}$ 结构在主链中的重复, 在 $900\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 范围内出现对应 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 结构宽峰. 图 1(d) 中 2966 和 1257 cm^{-1} 的吸收峰及图 1(b) 和 1(c) 中 $\delta=2.61$ 、 1.25 和 0.45 处的特征峰证明成功引入了一 $(\text{CH}_2)_3-$ 结构^[22]. FTIR 和 $^1\text{H-NMR}$ 测试结果表明成功合成了 PSN. 当 PSN 进一步与 1,8-萘二甲酸酐反应, $^1\text{H-NMR}$ 谱图中首先观察到 $\delta=1.40$ 处 $-\text{NH}_2$ 的特征峰消失, 同时在 $\delta=$

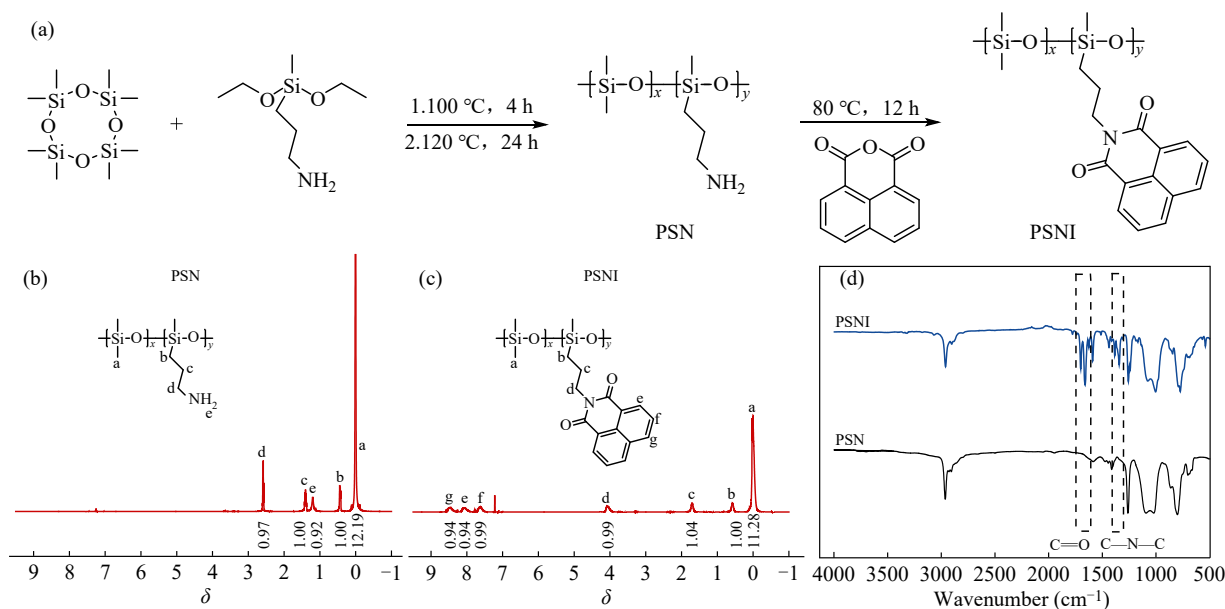


Fig. 1 (a) Synthesis route to PSNI; $^1\text{H-NMR}$ spectra of (b) PSN and (c) PSNI; (d) FTIR spectra of PSN and PSNI.

7.67~8.47处出现芳香结构的特征峰. FTIR谱图中观察到1699和1650 cm^{-1} 处出现了酰亚胺和羰基的伸缩振动特征峰, 在1340和1384 cm^{-1} 处出现C—N—C的伸缩振动特征峰. 以上结果表明通过两步反应成功合成了侧链酰亚胺官能化的聚硅氧烷.

2.2 PC复合材料的热稳定性

通过TGA/DTG测试研究了PC、PSNI、高岭土和PC复合材料的热稳定性, 图2(a)和图2(b)为不同样品的TGA和DTG曲线, 图2(c)为 $\tan\delta$ 曲线. 样品的玻璃化转变温度(T_g)、初始分解温度($T_{5\%}$)、最大热分解温度(T_{\max})及在700 $^{\circ}\text{C}$ 的残炭率的理论值和实际值列于表2中. 从表2可以看出, 复合材料的 T_g 基本不变表明对于PC的阻燃改性并未影响PC的耐热使用温度. 纯PC的 $T_{d,5\%}$ 和 T_{\max} 分别为479和517 $^{\circ}\text{C}$, 700 $^{\circ}\text{C}$ 残炭率为25.2%. 相比之下, PSNI的热稳定性较差($T_{d,5\%}=395$ $^{\circ}\text{C}$, 残炭率7.9%), 这是因为聚硅氧烷主链在高温下易发生解聚反应生成挥发性环状低聚物. 高岭土在测试温度范围内几乎不分解(残炭率99.8%). 将PSNI引入PC基体后, 复合材料的热稳定性显著下降. 随着PSNI含量由0%增至10%, $T_{5\%}$ 从479 $^{\circ}\text{C}$ 降至445 $^{\circ}\text{C}$, 降幅达34 $^{\circ}\text{C}$; T_{\max} 也由517 $^{\circ}\text{C}$ 降至510 $^{\circ}\text{C}$. 残炭率为26.2%, 高于计算值23.5%. 这表明PSNI的提前分解所产生的分解产物可能引发PC分子链的断裂, 且聚硅氧烷中的Si—O单元可能与PC碳酸酯基团发生相互作用, 促进酯交换或解聚反应, 同时也促进了PC的成炭.

在PC中加入10 wt%的高岭土后, PC/10%Kaolin的 $T_{5\%}$ 略有降低(470 $^{\circ}\text{C}$), 但残炭率显著提高至33.2%, 考虑到高岭土本身极高的热稳定性, 其主要起到物理阻隔的作用, 没有促进PC的成炭. 高岭土对PC/PSNI体系具有显著的稳定作用. 当PSNI/高岭土配比为2.5%/7.5%时, 复

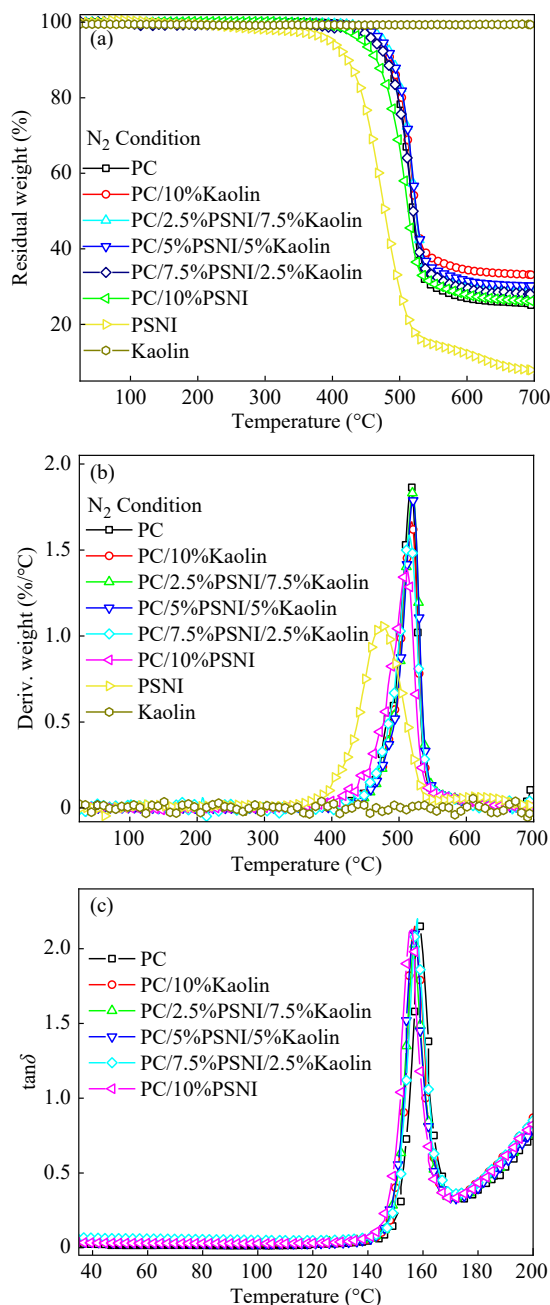


Fig. 2 (a) TGA and (b) DTG curves of PC, PSNI, Kaolin and composites under nitrogen atmosphere; (c) $\tan\delta$ curves obtained from DMA tests.

Table 2 Detailed data on the thermal stability of PC, PSNI, Kaolin and composites.

Sample	$T_{d,5\%}$ ($^{\circ}\text{C}$)	T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	Residue at 700 $^{\circ}\text{C}$ (%)	Theoretically estimated value of residue (%)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
PC	479	517	25.2	—	159
PC/10%Kaolin	470	518	33.2	32.7	157
PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin	476	520	29.1	30.4	157
PC/5%PSNI/5%Kaolin	467	519	30.0	28.1	157
PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin	462	515	27.9	25.8	158
PC/10%PSNI	445	510	26.2	23.5	156
PSNI	395	466	7.9	—	—
Kaolin	—	—	99.8	—	—

合材料 $T_{5\%}$ 回升至476 °C, 接近纯PC水平; T_{\max} 达到520 °C, 为所有样品最高值, 较PC/10%PSNI分别提高了31和10 °C. 然而, 随着PSNI占比进一步提高($\geq 5\%$), $T_{d,5\%}$ 有所下降. PC/10%PSNI的热稳定性降低在燃烧时有利于促进PC的提前降解成炭. 残炭率分析表明, 复配体系的实测值与理论估算值基本吻合. 以上结果表明复配体系中各组分(PC、PSNI、高岭土)在高温热降解过程中基本保持独立分解, 但高岭土的物理屏障和层间吸附作用抑制了PSNI对PC热降解的影响.

2.3 PC复合材料的阻燃性能

采用LOI和UL-94进一步评估了PC及其复合材料的阻燃性能(表3). 纯PC的LOI为27.5%, UL-94等级为V-2且燃烧过程中伴有熔滴, 表明其固有阻燃性能有限. 单独加入10%高岭土后, LOI提高至38.2%, 但UL-94等级仍为V-2, 且熔滴现象未得到抑制, 说明高岭土虽然有一定的物理阻隔作用, 但无法有效抑制燃烧过程中的熔融滴落. PSNI的引入显著提升了PC的阻燃性能. PC/10%PSNI的LOI提高至42.3%, UL-94达到V-0级且无熔滴. PSNI与高岭土复配后, 随PSNI占比提高, LOI呈先升后降趋势(PC/5%PSNI/5%Kaolin最高, 43.7%), 但所有复配体系均保持V-0级且无熔滴. 这一结果表明PSNI与高岭土

具有良好的协同阻燃效应.

锥形量热仪可模拟真实火灾场景, 是评价材料火安全性能的重要手段. 图3为PC及复合材料的热释放速率(HRR)、总热释放(THR)、烟释放速率(SPR)和总烟生成量(TSP)曲线, 相关数据列于表4. 点燃时间(TTI)反映了材料的热稳定性及抗点燃能力. 纯PC的TTI为97 s, 热稳定性优异. 单独添加10%高岭土后, TTI略降至92 s, 表明高岭土对PC热稳定性的负面影响较小. PSNI的引入显著缩短了复合材料的TTI, PC/10%PSNI的TTI仅为46 s, 这与TGA的结果一致, 说明PSNI的提前分解降低了材料的抗点燃能力. 引入高岭土后, 复配体系的TTI明显回升, 且随高岭土含量增加有轻微递增趋势, 表明高岭土有效抑制了PSNI对PC热降解的引发作用. HRR和THR是影响火灾严重程度的关键参数. 纯PC的pHRR和THR分别为594 kW/m²和66.8 MJ/m², 燃烧剧烈. 加入10%高岭土后, pHRR降至441 kW/m², THR降至61.7 MJ/m², 相比PC分别降低了26%和8%. PC/10%PSNI的pHRR进一步降至347 kW/m², 相比PC降低了42%, 但THR与纯PC相近, 这是由于PSNI具有促进PC提前降解成炭的作用, 形成的膨胀型炭层起到了隔热、隔氧以及抑制可燃挥发物逸出的物理屏障作用, 从而有效延缓了

Table 3 UL-94 and LOI results of PC and PC composites.

Sample	LOI (%)	UL-94 (1.6 mm)			
		t_1 (s)	t_2 (s)	Dripping	Rating
PC	27.5	18.1±3.5	6.1±1.9	Yes	V-2
PC/10%Kaolin	38.2	11.5±4.1	3.5±2.6	Yes	V-2
PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin	39.0	1.5±0.9	4.1±2.5	No	V-0
PC/5%PSNI/5%Kaolin	43.7	2.1±0.5	6.2±1.8	No	V-0
PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin	41.6	1.9±1.1	5.5±3.4	No	V-0
PC/10%PSNI	42.3	1.2±0.8	5.1±2.1	No	V-0

Table 4 Data of cone calorimeter test for PC and PC composites.

Sample	TTI (s)	pHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	pSPR (m ² /s)	TSP (m ²)	pCOP (g/s)	FPI (m ² ·s/kW)	CY ^a (wt%)
PC	97	594	66.8	0.19	17.1	0.014	0.163	21.9
PC/10%Kaolin	92	441	61.7	0.15	16.2	0.009	0.209	29.2
PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin	65	233	56.9	0.09	12.5	0.007	0.279	–
PC/5%PSNI/5%Kaolin	67	261	50.4	0.11	7.4	0.008	0.257	38.2
PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin	69	346	60.0	0.12	13.1	0.009	0.199	–
PC/10%PSNI	46	347	66.7	0.12	13.6	0.011	0.133	24.0

^aData loss was caused by physical interference of the intumescent char layer with the apparatus.

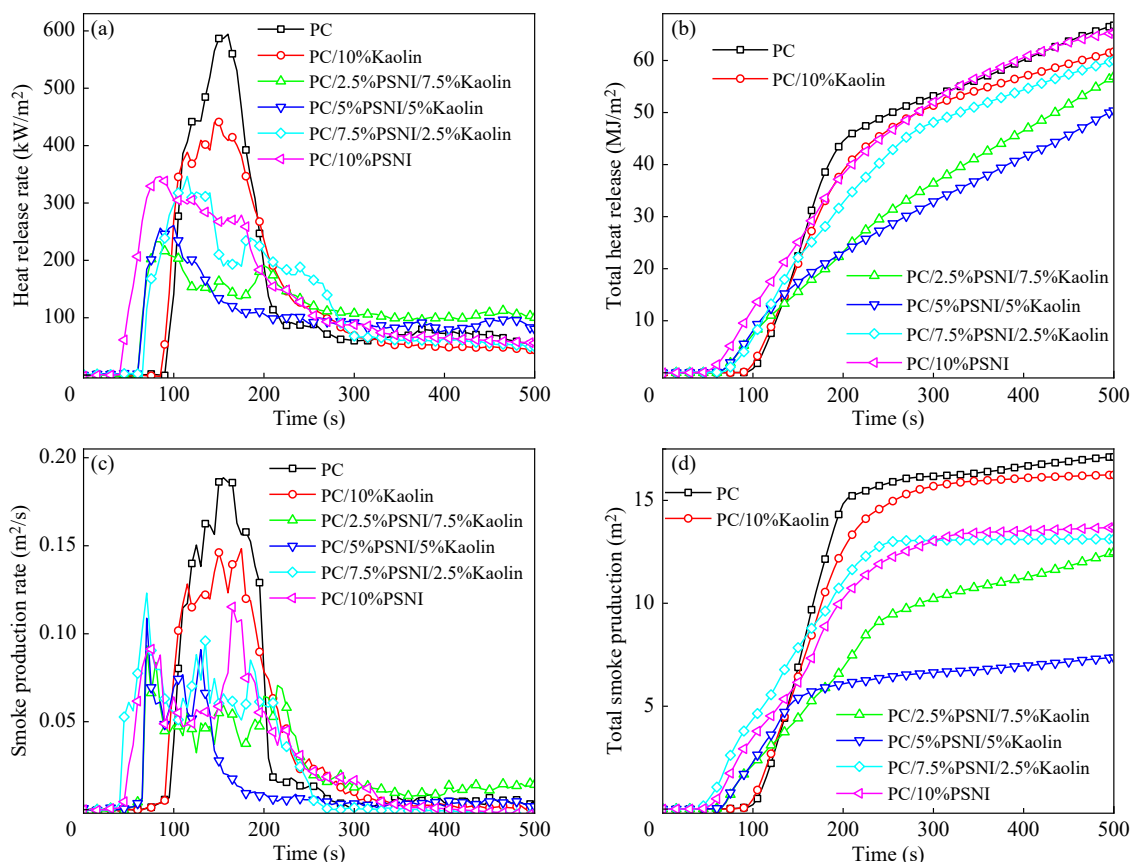


Fig. 3 (a) HRR, (b) THR, (c) SPR and (d) TSP curves of PC and its composites obtained on cone calorimeter.

热量反馈至凝聚相的速率, 降低了燃烧强度, 但是燃烧后残炭率并未明显增加, 表明大部分聚合物最终仍转化为可燃气体并完全燃烧. 对于 PSNI/Kaolin 复配体系, 可以看到 3 种不同复配比例的复合材料其热释放均低于单独添加 PSNI 或高岭土的复合材料. PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin 的 pHRR 达到了最低的 233 kW/m^2 , 较纯 PC 降低了 61%, THR 为 56.9 MJ/m^2 , 较纯 PC 降低了 15%. PC/5%PSNI/5%Kaolin 的 pHRR 为 261 kW/m^2 , 较纯 PC 降低了 56%, 而 THR 仅为 50.4 MJ/m^2 , 较纯 PC 显著降低 25%, 是该系列中 THR 最低的样品. PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin 的 pHRR 为 346 kW/m^2 , 降低 42%, 与 PC/10%PSNI 相当. 上述结果表明 PSNI 与高岭土在抑制热释放方面具有显著协同效应. 这是由于单独添加 PSNI 时, 虽可在材料表面形成膨胀型炭层, 但该炭层结构相对疏松、强度不足, 难以在长时间高温辐照下维持结构完整性. 从图 3(a) 可以看出, 除 PC/5%PSNI/5%Kaolin 外, 其余复合材料的 HRR 曲线在主峰之后均出现了明显的肩峰或二次热释放峰, 表明燃烧后期炭层发生破裂, 内部蓄积的挥发性降解产物突破

屏障再次进入气相燃烧, 导致二次燃烧现象, 因而无法有效降低 THR. 相比之下, PC/5%PSNI/5%Kaolin 的 HRR 曲线呈现典型的单峰特征, 说明当 PSNI 与高岭土以适宜比例复配时, 高岭土颗粒在炭层中起到了无机增强骨架的作用, 促进了结构更为致密、机械强度更高的膨胀型炭层的形成. 该致密炭层能够在整个燃烧过程中持续有效地阻隔热量反馈与氧气扩散, 抑制挥发性降解产物向气相逸出, 显著提升了阻燃效率.

烟生成是评价材料火安全性能的另一重要指标. 从图 3(c)、3(d) 和表 4 可以看出, 纯 PC 的 pSPR 和 TSP 分别为 $0.19 \text{ m}^2/\text{s}$ 和 17.1 m^2 . PC/10%Kaolin 的 pSPR 降至 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$, 但 TSP (16.2 m^2) 降低不明显, 表明其没有抑烟作用. PC/10%PSNI 的 pSPR 和 TSP 分别为 $0.12 \text{ m}^2/\text{s}$ 和 13.6 m^2 , 与 PC 相比也降低不多. 复配体系中, PC/5%PSNI/5%Kaolin 的 TSP 达到了最低的 7.4 m^2 , 较纯 PC 降低了 57%, pSPR 为 $0.11 \text{ m}^2/\text{s}$, 降低 42%. PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin 的燃烧烟雾主要是由于芳香族降解产物通过脱氢缩合、芳构化以及稠环反应产生, 而 PC/5%PSNI/5%Kaolin 所形成的致密炭层有效的限

制了芳香族降解产物的扩散，从而使烟雾释放大幅降低。

火灾性能指数(FPI = TTI/pHRR)是评价材料火灾安全性的综合指标，FPI值越高，表明材料火灾安全性越高。纯PC的FPI为 $0.163 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{kW}$ 。PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin的FPI最高($0.279 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{kW}$)，较纯PC提高了42%，表明该复合材料具有最佳的火灾安全性。PC/5%PSNI/5%Kaolin的FPI为 $0.257 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{kW}$ ，也较纯PC显著提高。虽然复配体系的TTI较纯PC有所缩短，但pHRR的大幅降低使得FPI整体提高，表明炭层的快速形成有效抑制了火焰的进一步发展。

峰值CO释放速率(pCOP)反映了材料燃烧时产生有毒气体的程度。纯PC的pCOP为 0.014 g/s 。复配体系的pCOP均明显降低，PC/5%PSNI/5%Kaolin和PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin的pCOP最低($0.007 \sim 0.008 \text{ g/s}$)，较纯PC降低了43%~50%，表明协同阻燃体系可有效降低火灾中的毒性气体释放，减少对人员的危害。

残炭率(CY)直接反映了燃烧过程中滞留于凝聚相、未挥发进入气相燃烧的有机物比例，是表征凝聚相阻燃效能的核心指标之一。为进一步定量评价PSNI与高岭土在凝聚相的协同阻燃效应，对锥形量热测试后部分样品的残炭率进行了对比分析。实验结果表明，纯PC的残炭率仅为21.9%；单独添加10 wt%高岭土后，复合材料的

残炭率提升至29.2%；单独添加10 wt% PSNI后，残炭率为24.0%。经过计算，PC/5%PSNI/5%Kaolin复配体系的理论残炭率为26.6%，而其实际残炭率高达38.2%，显著高于其理论残炭率。上述结果表明，PSNI与高岭土在凝聚相并非独立发挥作用，而是存在显著的协同成炭效应。

2.4 PC复合材料的阻燃机理

图4为PC及其复合材料锥形量热测试后残炭的数码照片和SEM图像。纯PC燃烧后残炭量少且结构松散，表面存在大量孔洞，无法有效保护内部基体，导致持续燃烧。PC/10%Kaolin的形貌更加完整，但炭层表面仍有明显孔洞，炭层结构不致密。PC/10%PSNI的残炭表面孔洞减少，形成了较为连续的炭层，但膨胀程度有限，且炭层的抗氧化能力不足。对于PSNI/Kaolin复配体系，残炭形貌呈现显著差异。PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin和PC/5%PSNI/5%Kaolin形成了明显的膨胀炭层，且测试结束后仍保持较为完整的形貌。这是由于PSNI本身具有形成膨胀型炭层的能力，在加入高岭土后，其可以作为成炭的无机骨架稳定PSNI交联形成的膨胀炭层，同时增加了其抗氧化能力，避免了在燃烧过程中因为炭层破损而出现的二次热释放峰，使阻燃性能进一步提升。SEM图像显示，复配体系的炭层更加致密完整。这种结构可有效阻隔外部热量向内部传递，同时限制内部降解产物和烟气的释放。

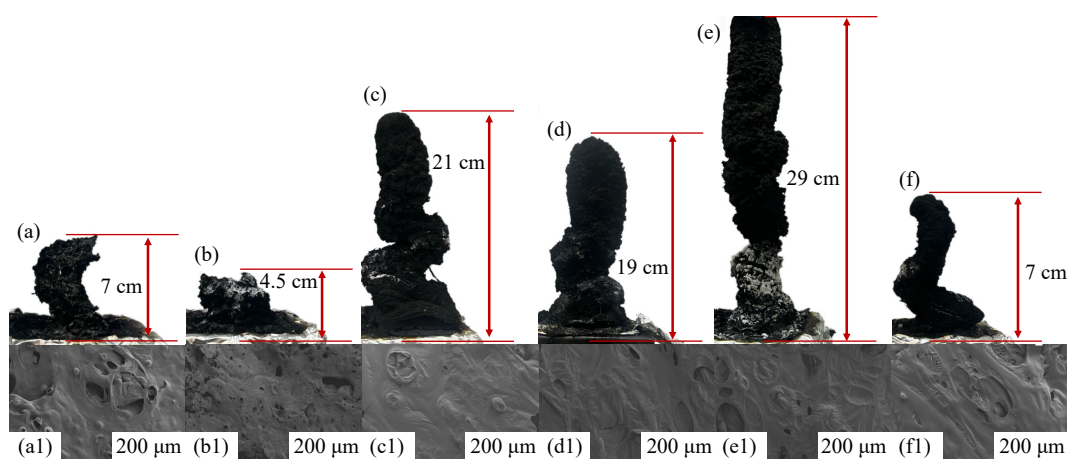


Fig. 4 Digital photos and SEM images of char residues from PC (a, a1), PC/10%Kaolin (b, b1), PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin (c, c1), PC/5%PSNI/5%Kaolin (d, d1), PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin (e, e1) and PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin (f, f1) after the cone calorimeter test.

图5为PC及其复合材料在锥形量热测试后残炭的FTIR谱图。与纯PC残炭相比，PSNI/Kaolin

复配体系残炭在 1095 cm^{-1} 附近出现了明显的特征峰，主要为PSNI和高岭土的Si—O—Si特征

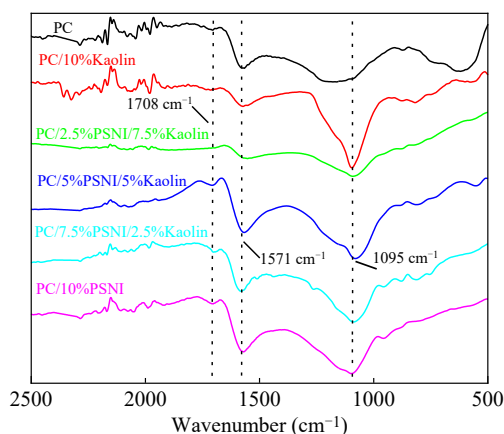


Fig. 5 FTIR spectra of the char residue for PC and its composites.

峰,表明PSNI中的硅元素参与了凝聚相成炭,形成了含硅炭层.随着PSNI含量增加,在 1571 cm^{-1} 处 $\text{C}=\text{C}$ 峰强度增加,说明PSNI促进了芳环结构的形成;同时 1708 cm^{-1} 处羧酰亚胺 $\text{C}=\text{O}$ 的峰强度也逐步增强,证明部分羧酰亚胺侧基在高温下会保留在炭层中^[23,24].

采用Py-GC/MS对PC及复合材料在 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的裂解产物进行分析,图6为PC及其复合材料的裂解产物的GC图谱,表5列出了裂解产物的结构和相对含量.从表5可以看出,纯PC的主要裂解产物为单酚类化合物(如对异丙基苯酚、对叔丁基苯酚等)和双酚A及其衍生物.表6进一步统计了复合材料裂解产物中单酚类和双酚类降解产物的相对含量.加入10%高岭土后,PC/10%Kaolin的单酚/双酚比值(3.47)与纯PC(3.24)相近,说明高岭土对PC的裂解路径影响较小,主要发挥物理阻隔作用.加入PSNI后,裂解产物

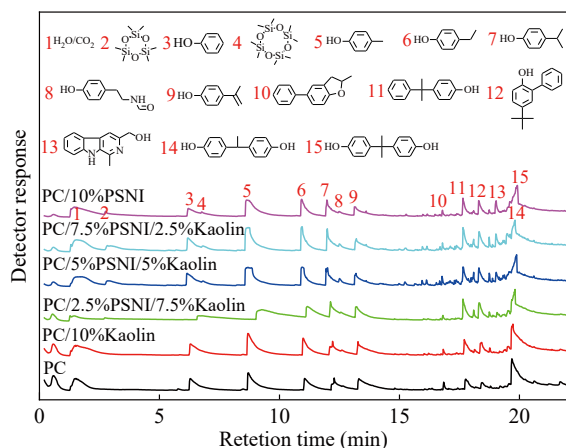
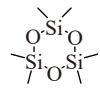

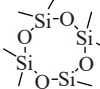
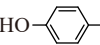
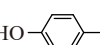
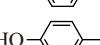
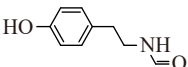
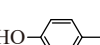
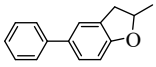
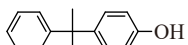
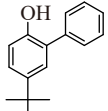
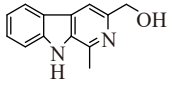
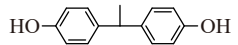
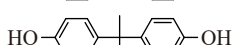


Fig. 6 GC spectra from Py-GC/MS for the pyrolysis products of PC and its composites.

中出现了含氮杂环化合物(编号13),表明PSNI的酰亚胺结构参与了PC的裂解过程.单酚类降解产物主要是通过双酚类二次断裂或Fries重排形成的邻羟基二苯甲酮结构进一步断裂生成^[25,26],由于PC与PC/10%PSNI的双酚类降解产物含量相当,所以推测单酚类降解产物的降低应该主要与Fries重排有关,羧酰亚胺侧基的引入增强了空间位阻效应,阻碍了Fries重排所需的分子内六元环过渡态形成,所以随着PSNI含量的增加,单酚类产物含量呈现下降的趋势.双酚类降解产物主要是在碳酸酯键断裂后,通过分子内酯交换/回咬生成.随着PSNI含量的增加双酚类降解产物出现了先减少后增加的趋势,PC/5%PSNI/5%Kaolin的双酚类降解产物含量达到最低.这归因于PSNI与高岭土协同作用,PSNI在高温下生成的活性硅醇($\text{Si}-\text{OH}$)或自由基可以与PC降解产生的酚羟基末端或者碳酸酯基发生交联反应,使主链的断裂一回咬路径得到抑制,以及将原本会通过挥发释放的酚类结构片段固定到交联网络中,同时高岭土片层的物理阻隔与吸附作用延长了裂解产物在凝聚相的停留时间,为裂解产物交联成炭提供了必要条件.

基于上述实验结果,推测了PC/PSNI/Kaolin复合材料的阻燃机理.PSNI/高岭土体系主要为凝聚相阻燃机理,PSNI在高温下提前解聚,使PC在更低的温度下开始降解,有利于凝聚相炭层的早期构筑,而高岭土的引入抑制了PSNI对PC热降解的过度引发,防止了基体的过早分解.部分羧酰亚胺侧基在高温下与PC降解产生的芳香族碎片发生缩合,形成交联的芳香炭网络,增加了炭层的致密性;同时 $\text{Si}-\text{O}$ 主链解聚—重排形成的硅氧烷陶瓷化网络,与芳环炭层互穿增强.在加入高岭土后,其主要发挥物理阻隔和骨架支撑作用,其片层结构在燃烧过程中构筑物理屏障,抑制热量回传与挥发物逸出.高岭土的层状片层作为“模板”或“骨架”,固定了PSNI裂解产生的含硅片段和低分子量芳香化合物,抑制了环状硅氧烷低聚物及小分子芳香物的挥发,使炭层更加致密、连续且热稳定性更高,防止了炭层高温下进一步的氧化和结构坍塌,维持炭层的完整性(避免HRR的二次峰).二者在凝聚相形成了“化学交联网络+物理层状阻隔”的复合炭层结构,实现了 $1+1>2$ 的协同效应.

Table 5 Table Composition of the main degradation products from PC and its composites obtained by Py-GC/MS.

Number	Structure	1 ^a	2 ^b	3 ^c	4 ^d	5 ^e	6 ^f
1	H ₂ O, CO ₂	14.1	15.4	4.3	13.0	12.8	14.5
2		0	0	0.9	3.0	3.6	2.3
3	HO- 	11.7	11.6	7.8	9.0	7.2	5.7
4		0	0	0	2.6	2.6	2.8
5	HO- 	15.6	17.5	24.4	16.7	16.7	17.0
6	HO- 	9.8	10.1	13.1	10.0	9.7	8.8
7	HO- 	6.1	6.1	9.0	7.5	7.5	7.2
8	HO- 	2.3	2.6	3.5	2.1	3.1	2.8
9	HO- 	12.5	9.6	8.3	7.1	6.4	6.9
10		1.1	0.7	0.4	0.8	0.6	0.4
11		4.4	4.1	5.7	6.5	6.7	5.5
12		2.4	3.6	5.0	4.4	4.3	3.6
13		0	0	0.97	3.0	1.8	2.3
14	HO- 	0	0	0	2.3	3.9	2.7
15	HO- 	20.0	18.8	16.5	11.9	13.2	17.5

^a PC; ^b PC/10Kaolin; ^c PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin; ^d PC/5%PSNI/5%Kaolin; ^e PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin; ^f PC/10%PSNI.

Table 6 The relative content of monophenolics and bisphenols obtained by Py-GC/MS.

Sample	Relative content (%)			
	Monophenolics	Bisphenols	Monophenolics/bisphenols	Cyclic siloxane oligomers
PC	64.8	20.0	3.24	0
PC/10Kaolin	65.2	18.8	3.47	0
PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin	76.4	16.5	4.63	0.9
PC/5%PSNI/5%Kaolin	63.3	14.2	4.46	5.5
PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin	61.6	17.1	3.60	6.2
PC/10%PSNI	57.5	20.3	2.83	5.1

2.5 PC复合材料的机械性能

图7为PC及其复合材料的机械性能曲线,具体数据如表7所示,系统考察了PC及其复合材料的机械性能.单独添加10 wt% Kaolin后,PC复合材料的缺口冲击强度由72 kJ/m²显著提升至93 kJ/m²,增幅达29.2%;拉伸强度由63 MPa小幅

提高至66 MPa,断裂伸长率由126%降至99%,弯曲强度由99 MPa增至103 MPa,弯曲模量由2463 MPa提升至2628 MPa.这表明适量高岭土可在一定程度上增强PC的刚性与韧性.

而单独添加PSNI时,材料的强度和模量均出现降低表明PSNI对PC的刚性和缺口冲击韧性

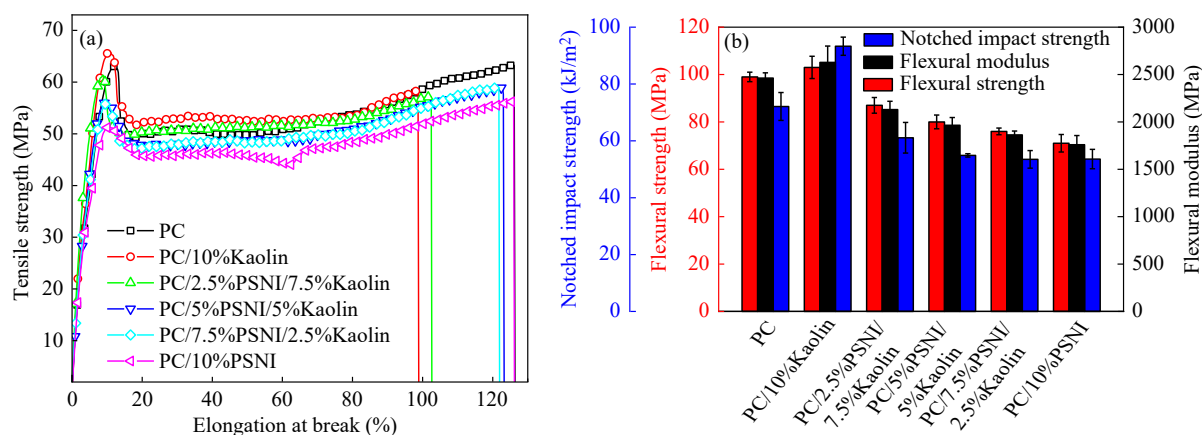


Fig. 7 Mechanical properties of PC and its composites: (a) Tensile properties; (b) Impact and flexural properties.

产生了一定的削弱作用. 在复配体系中, 随着高岭土含量的增加, 材料的强度和模量整体呈上升趋势. 上述结果表明, 复配体系在实现优异阻燃性能的同时, 仍维持了可接受的机械性能水平, 展现出了良好的综合性能平衡.

图8为PC及其复合材料的脆断面和高岭土形貌的扫描电镜图像. 从图8(b)可以看出, 在加入高岭土后, 高岭土虽有少量的团聚现象, 但是整体在基体中均匀分布. 根据结果推测了缺口冲击强度变化的原因, 高岭土作为刚性粒子, 在冲击过程中可通过诱发银纹和剪切屈服消耗能量; 同时, 颗粒周围的应力集中效应促使裂纹发生偏

转和分支, 增加了断裂路径长度, 从而提高了材料的韧性^[27]. 而对于PSNI, 功能侧基脲酰亚胺为大刚性共轭结构, 牺牲了聚硅氧烷链段的柔顺性, 形成了粒径过小、刚性过高的分散相, 无法有效引发剪切带和银纹化, 反而成为应力集中点, 导致冲击性能下降. 图8(g)和8(h)为不同放大倍率下的高岭土形貌图片, 低倍下可见颗粒呈不规则碎屑状, 棱角分明, 粒径主要分布在1~5 μm , 颗粒间堆积致密并伴随大量亚微米细粉; 高倍下进一步显示残余片层结构, 厚度约100~300 nm, 片层表面粗糙并附着大量纳米级碎屑.

Table 7 The mechanical properties of PC and its composites.

Sample	Notched impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PC	72	63	126	99	2463
PC/10%Kaolin	93	66	99	103	2628
PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin	61	61	103	87	2130
PC/5%PSNI/5%Kaolin	55	59	123	80	1965
PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin	54	59	122	76	1863
PC/10%PSNI	54	56	126	71	1760

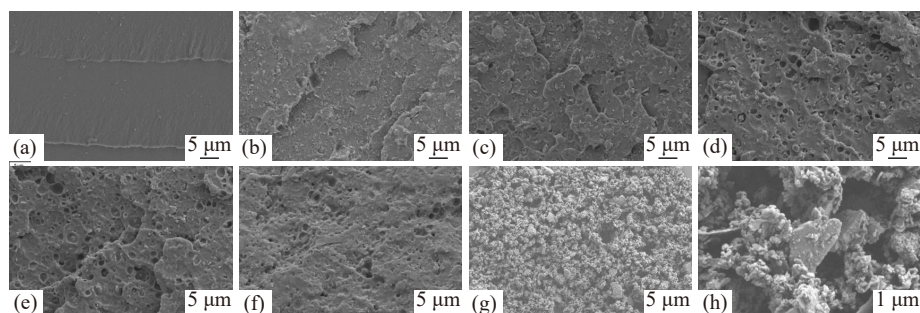


Fig. 8 SEM images of fracture surfaces in (a) PC, (b) PC/10%Kaolin, (c) PC/2.5%PSNI/7.5%Kaolin, (d) PC/5%PSNI/5%Kaolin, (e) PC/7.5%PSNI/2.5%Kaolin and (f) PC/10%PSNI; (g, h) SEM images of Kaolin.

3 结论

设计合成了一种侧链含萘酰亚胺结构的聚硅氧烷(PSNI),并将其与高岭土复配制备了低热低烟的薄壁阻燃PC复合材料.当PSNI与高岭土质量比为1:1、总添加量为10 wt%时,PC/5%PSNI/5%Kaolin表现出最优的协同阻燃效果:1.6 mm厚样品通过UL-94V-0级测试,LOI

达43.7%;与纯PC相比,pHRR、THR、pSPR和TSP分别降低56.1%、24.6%、42.1%和56.7%,FPI提高42%.机理研究表明,PSNI促进并参与PC的化学交联成炭,形成含氮含硅芳香炭层;高岭土作为无机骨架稳定膨胀炭层并增强其抗氧化性,二者协同构建了致密的硅酸盐-炭复合保护层,有效抑制了热量、烟气及有毒气体的释放.

REFERENCES

- 1 Mu, X. W.; Jin, Z. Y.; Chu, F. K.; Cai, W.; Zhu, Y. L.; Yu, B.; Song, L.; Hu, Y. High-performance flame-retardant polycarbonate composites: mechanisms investigation and fire-safety evaluation systems establishment. *Compos. Part B Eng.*, **2022**, 238, 109873.
- 2 Sun, Z. E.; Wang, X. H.; Wang, J. Study on fire characteristics of flame-retardant polycarbonate under low pressure. *Fire*, **2024**, 7(12), 461.
- 3 Wu, X. L.; Zhang, W. C.; Qin, Z. L.; Yang, R. J. Facile preparation of ladder aluminosilsesquioxanes with high flame retardancy for polycarbonate. *Polym. Degrad. Stab.*, **2024**, 222, 110694.
- 4 Hansen, A. S.; Hovde, P. J. Prediction of time to flashover in the ISO 9705 room corner test based on cone calorimeter test results. *Fire Mater.*, **2002**, 26(2), 77–86.
- 5 Park, Y.; Lee, Y.; Na, J.; Ryou, H. S. Numerical study on the effect of tunnel aspect ratio on evacuation with unsteady heat release rate due to fire in the case of two vehicles. *Energies*, **2019**, 12(1), 133.
- 6 Doley, P. M.; Yuen, A. C. Y.; Kabir, I.; Liu, L. Z.; Wang, C.; Chen, T. B. Y.; Yeoh, G. H. Thermal hazard and smoke toxicity assessment of building polymers incorporating TGA and FTIR: integrated cone calorimeter arrangement. *Fire*, **2022**, 5(5), 139.
- 7 Liu, Y. B.; Liu, Q.; Zhao, H.; Zhang, L.; Li, C. Z. A low smoke and high strength polycarbonate (bisphenol A)/acrylonitrile-butadiene-styrene with ternary flame-retardant system. *Chin. J. Chem. Eng.*, **2025**, 87, 345–356.
- 8 Sun, C. C.; Zhang, W.; Cui, Y. H.; Liu, D. Y. Synthesis of phosphazene-triazine bi-base sulfonate and its applications in flame-retardant modified polycarbonate. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2022**, 139(21), 52224.
- 9 Zhang, X. Y.; Zhang, Y. L.; Qiao, L.; Qin, Z. L.; Zhou, H. L.; Zhang, W. C.; He, J. Y.; Yang, R. J. Enhancing the flame retardancy of polycarbonate through the synergistic effect of 1,3-Benzenedisulfonate acid dipotassium salt and phenyl polysiloxanes. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, 141(41), e56071.
- 10 Huang, H.; Shi, Y.; Lv, G. P.; Liu, Y.; Wang, Q. Flame resistance and aging mechanism of flame retardant polycarbonate sheet containing linear phenolic resin charring agent. *Polym. Degrad. Stab.*, **2015**, 122, 139–145.
- 11 Fenton, S. E.; Ducatman, A.; Boobis, A.; DeWitt, J. C.; Lau, C.; Ng, C.; Smith, J. S.; Roberts, S. M. Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: current state of knowledge and strategies for informing future research. *Environ. Toxicol. Chem.*, **2020**, 40(3), 606–630.
- 12 Yeoh, C. S. L.; Alrazihi, L. A.; Wong, S. T.; Wong, S. F. Per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) and human health: a review of exposure routes and potential toxicities across the lifespan. *Environ. Toxicol. Chem.*, **2025**, 44(10), 2754–2786.
- 13 金子钰, 肖玉玲, 张紫璇, 牧小卫, 桂宙. PC/硅氧烷复合材料的阻燃抑烟机理研究. *火灾科学*, **2021**, 30(2), 80–91.
- 14 Shi, Y. X.; Li, G.; Qian, J. E.; Lu, J. F.; Pan, Q. H.; Song, Y. J.; Dong, H.; Wu, C. Hyperbranched polyborosiloxane as a multifunctional flame retardant for simultaneously enhancing fire safety, mechanical properties, and hydrophobicity of polycarbonate. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2026**, 203, 109606.
- 15 Zhang, J. F.; Liu, J.; Gu, W. W.; Sun, J.; Gu, X. Y.; Li, H. F.; Zhao, J. M.; Zhang, S. Preparation of flame-retardant and toughened polycarbonate via reactive blending of polyborosiloxane elastomer. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2024**, 187, 108505.
- 16 Zhu, Y.; Yu, R. H.; Wang, S. D.; Xing, H. P.; Qiu, J.; Liu, J.; Tang, T. Unexpected core-shell char from polycarbonate/polyborosiloxane composites and its application in improving flame retardancy. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 446, 136742.

- 17 江惠, 刘杰, 张璐, 李三喜, 唐涛, 王松. 低烟低热薄壁阻燃聚碳酸酯材料的制备与性能. *复合材料学报*, **2024**, 41(10), 5423–5433.
- 18 岑茵, 吴俊, 王培涛, 许鸿基, 佟伟, 丁超. 薄壁阻燃聚碳酸酯的研究. *塑料工业*, **2018**, 46(4), 142–146.
- 19 Ren, S. B.; Xu, J. L.; Niu, L.; Yang, P. H. New polycarbonate-based composites with added inorganic particles (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , and ZrO_2): effects on mechanical strength and flame retardancy. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2026**, 143(8), e70079.
- 20 Tang, W. F.; Song, L. X.; Liu, F.; Dessie, W.; Qin, Z. D.; Zhang, S.; Gu, X. Y. Improving the flame retardancy and thermal stability of polypropylene composites *via* introducing glycine intercalated kaolinite compounds. *Appl. Clay Sci.*, **2022**, 217, 106411.
- 21 Fan, S.; Peng, B.; Yuan, R. C.; Wu, D. Q.; Wang, X. L.; Yu, J. Y.; Li, F. X. A novel Schiff base-containing branched polysiloxane as a self-crosslinking flame retardant for PA6 with low heat release and excellent anti-dripping performance. *Compos. Part B Eng.*, **2020**, 183, 107684.
- 22 Hu, H.; Wang, L. L.; Wang, L. L.; Li, L.; Feng, S. Y. Imine-functionalized polysiloxanes for supramolecular elastomers with tunable mechanical properties. *Polym. Chem.*, **2020**, 11(48), 7721–7728.
- 23 Asandulesa, M.; Hamciuc, C.; Pui, A.; Virilan, C.; Lisa, G.; Barzic, A. I.; Oprisan, B. Cobalt ferrite/polyetherimide composites as thermally stable materials for electromagnetic interference shielding uses. *Int. J. Mol. Sci.*, **2023**, 24(2), 999.
- 24 Grabchev, I.; Jordanova, A.; Vasileva-Tonkova, E.; Minkov, I. L. Sensing and microbiological activity of a new blue fluorescence polyamidoamine dendrimer modified with 1,8-naphthalimide units. *Molecules*, **2024**, 29(9), 1960.
- 25 Rivaton, A.; Mailhot, B.; Soulestin, J.; Varghese, H.; Gardette, J. L. Comparison of the photochemical and thermal degradation of bisphenol-a polycarbonate and trimethylcyclohexane-polycarbonate. *Polym. Degrad. Stab.*, **2002**, 75(1), 17–33.
- 26 Siddiqui, M. N.; Redhwi, H. H.; Antonakou, E. V.; Achilias, D. S. Pyrolysis mechanism and thermal degradation kinetics of poly(bisphenol A carbonate)-based polymers originating in waste electric and electronic equipment. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **2018**, 132, 123–133.
- 27 Jang, K. S. Mineral filler effect on the mechanics and flame retardancy of polycarbonate composites: talc and Kaolin. *E-Polymers*, **2016**, 16(5), 379–386.

Research Article

Preparation of Naphthalimide-containing Polysiloxane and Its Synergistic Flame Retardancy with Kaolin in Polycarbonate

Sen-hao Lei^{1,2}, Jie Liu^{3*}, Tao Tang^{1,2*}

¹School of Applied Chemistry and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

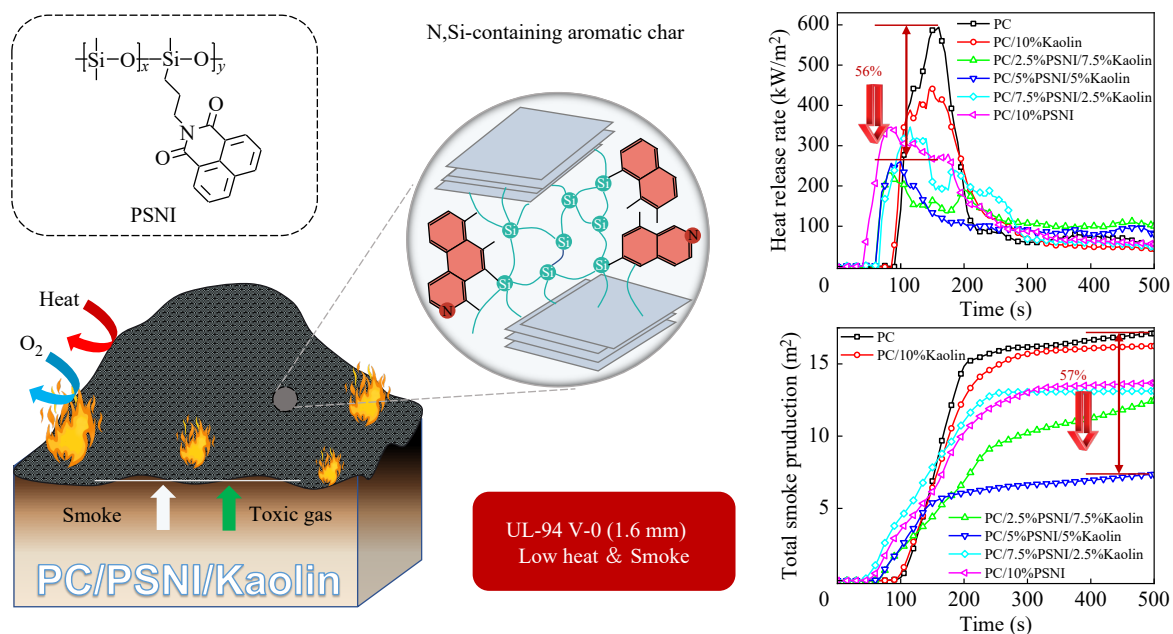
²State Key Laboratory of Polymer Science and Technology, ³Laboratory of Polymer Materials Engineering, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract In response to increasingly stringent regulations on per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and the demand for halogen-free thin-wall flame-retardant polycarbonate (PC) with low heat and smoke release, a naphthalimide-functionalized polysiloxane (PSNI) was designed and synthesized. PSNI was synergistically combined with kaolin to prepare a series of PC/PSNI/Kaolin composites, and the effects of the compounding ratios on thermal stability, flame retardancy, and mechanical properties were systematically investigated. The results demonstrated that PSNI and Kaolin exhibited a pronounced synergistic flame retardant effect. At a total loading of 10 wt% with a mass ratio of 1:1, the limiting oxygen index (LOI) of PC/5%PSNI/5%Kaolin increased to 43.7%, and the 1.6 mm thick specimen achieved a UL-94 V-0 rating. Compared with neat PC, the peak heat release rate (pHRR), peak smoke production rate (pSPR), total heat release (THR), and total smoke production

* Corresponding authors: Jie Liu, E-mail: liujie@ciac.ac.cn

Tao Tang, E-mail: ttang@ciac.ac.cn

(TSP) were reduced by 56%, 42%, 25%, and 57%, respectively. Through a synergistic mechanism involving chemical crosslinking/charring and physical barrier effects, PSNI and kaolin promoted the formation of a high-quality char layer, effectively suppressing the transfer of heat and smoke.



Keywords Polycarbonate; Polysiloxane; Kaolin; Low heat and low smoke