

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.002

含氟阻燃透明聚碳酸酯材料的制备及性能

王玉刚¹,张淇^{2,3},吴笑^{2,4},杨瑞程^{2,3},钱立军²

(1.中石化燕山石化聚碳酸酯有限公司,北京 102501; 2.北京工商大学轻工科学与工程学院,北京 100048;
3.北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083; 4.北京玻璃钢复合材料有限公司,北京 102101)

摘要:为了获得具有良好阻燃性、透明性及热老化稳定性的聚碳酸酯(PC)材料,将聚四氟乙烯(PTFE)和八苯基倍半硅氧烷(OPS)分别加入含全氟丁基磺酸钾(PPFBS)的PC中制备了含氟阻燃透明PC复合材料,研究了PTFE/PPFBS和OPS/PPFBS对PC阻燃和物理力学性能的影响规律及量效关系,探究了热老化处理对PC复合材料阻燃性能的影响。结果表明,PTFE和OPS的引入提高了PC材料的阻燃性能,添加质量分数0.1%PTFE和OPS的PC复合材料均可在垂直燃烧测试中达到UL94V-0级,添加质量分数0.2%的PTFE和OPS后,PC复合材料的极限氧指数分别达到了40.6%和42.2%。与PTFE相比,添加OPS的PC复合材料表现出更好的透明性。PTFE和OPS的引入对PC复合材料拉伸强度的影响较小;当PTFE和OPS质量分数分别为0.2%和0.1%时,PC复合材料可以保持较好的韧性。热老化处理后添加PTFE和OPS的PC复合材料在垂直燃烧测试中均可达到UL94V-0级;热老化处理后的锥形量热法测试结果表明OPS与PPFBS可以更好地发挥协同阻燃作用,有效抑制PC材料的热释放,提高残炭率。具有优异阻燃性和热老化稳定性的含氟透明PC复合材料在高端制造业领域具有广阔的应用前景。

关键词:八苯基倍半硅氧烷;全氟丁基磺酸钾;阻燃;热老化;聚碳酸酯

中图分类号:TQ322.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2024)09-0009-06

Preparation and properties of fluorine-containing flame retardant transparent polycarbonate

WANG Yugang¹, ZHANG Qi^{2,3}, WU Xiao^{2,4}, YANG Ruicheng^{2,3}, QIAN Lijun²

(1. Sinopec Yanshan Petrochemical Polycarbonate Co., Ltd., Beijing 102501, China; 2. College of Light Industry Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Beijing Composite Materials Co., Ltd., Beijing 102101, China)

Abstract: To obtain polycarbonate (PC) materials with good flame retardancy, transparency and thermal aging stability, polytetrafluoroethylene (PTFE) and octaphenyl silsesquioxane (OPS) were added into PC containing potassium perfluorobutylsulfonate (PPFBS) to prepare fluorine-containing flame-retardant transparent PC composites. The effects of PTFE/PPFBS and OPS/PPFBS on the flame retardant, physical and mechanical properties of PC were studied, and the dose-effect relationship was explored. The effect of thermal aging treatment on the flame retardancy of PC composites was also investigated. The results show that the introduction of PTFE and OPS improve the flame retardancy of PC materials. The PC composites with 0.1 wt% PTFE or OPS can reach the UL 94 V-0 rating in vertical combustion tests. The limiting oxygen index of PC composites with 0.2 wt% PTFE or OPS can reach 40.6% and 42.2%, respectively. Compared with the composite with PTFE, the PC composite with OPS shows better transparency. The addition of PTFE or OPS has little effect on the tensile strength of PC composites. The PC composites with 0.2 wt% PTFE or 0.1 wt% OPS can maintain good toughness. The PC composites with PTFE or OPS after thermal aging treatment can reach UL 94 V-0 rating in the vertical combustion test. The results of cone calorimetry tests after thermal aging treatment show that OPS and PPFBS can better play a synergistic flame retardant effect, effectively inhibiting the heat release of PC materials and improving the char residue yield. Fluorine-containing transparent PC composites with excellent flame retardancy and thermal aging stability have broad application prospects in high-end manufacturing industry.

Keywords: octaphenyl silsesquioxane; potassium perfluorobutylsulfonate; flame retardant; thermal aging; polycarbonate

基金项目:国家自然科学基金项目(22005009)

通信作者:吴笑,理学博士,研究方向为阻燃高分子材料

收稿日期:2024-06-18

引用格式:王玉刚,张淇,吴笑,等.含氟阻燃透明聚碳酸酯材料的制备及性能[J].工程塑料应用,2024,52(9):9-14.

WANG Yugang, ZHANG Qi, WU Xiao, et al. Preparation and properties of fluorine-containing flame retardant transparent polycarbonate[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 9-14.

聚碳酸酯(PC)是指分子链中含碳酸酯基的聚合物,其具有高透明性、良好的耐热性、优异的抗冲击性等优点,在电子电器、包装、建筑建材等领域被广泛使用^[1-3]。同大部分高分子材料一样,纯PC的阻燃性能较差,在UL 94垂直燃烧测试中仅能达到V-2级,并且燃烧过程中会产生大量熔滴,极易造成二次燃烧,因此在使用前必须进行阻燃功能化处理^[4-5]。添加阻燃剂是提高聚合物材料阻燃性能最直接有效的途径。卤系阻燃剂具有与树脂基体相容性好、阻燃效率高等优点,目前一些品种仍被广泛应用于制备阻燃PC材料^[6-8]。

全氟丁基磺酸钾(PPFBS)是一种含氟阻燃剂,当其质量分数仅为0.1%时PC材料即可在UL 94垂直燃烧(3.2 mm)测试中达到V-0级,但要满足更高的阻燃性能要求则需要与其他阻燃剂复配使用^[9]。通常将PPFBS与硅系、磷系阻燃剂复配可以提高PC树脂的热稳定性,有效提升复合材料的阻燃性能^[10-11]。Dang等^[12]将PPFBS与聚二甲基硅氧烷(PDMS)复配后用于阻燃PC。研究发现,添加质量分数0.2%的PPFBS和PDMS后PC材料可以在UL 94垂直燃烧(1.6 mm)测试中达到V-0级,并且不会对PC材料的力学性能造成明显影响。Tran等^[13]使用PPFBS与石墨烯纳米片(GNP)制备了阻燃复合材料,发现与单独使用PPFBS和GNP相比,二者同时使用可以改善添加剂的分散性,提高材料的阻燃性能。目前,添加PPFBS的PC材料存在的问题是引入硅系、磷系阻燃剂虽然可以提高PC的阻燃性,但会造成PC透明性和其他物理力学性能的下降;另外,在经历热老化试验后,PC材料的阻燃性能会明显下降,这极大限制了PC在具有较高耐热要求领域的应用^[14]。聚四氟乙烯(PTFE)作为抗滴落剂可以防止熔滴滴落,减少阻燃剂的用量;八苯基倍半硅氧烷(OPS)作为硅系阻燃剂可以有效提高PC基体的成炭性,从而赋予材料良好的阻燃性能。目前使用PTFE和OPS分别与PPFBS协效阻燃PC的研究较少见于相关文献报道。

笔者将PTFE和OPS分别加入含PPFBS的PC中制备了含氟阻燃透明PC复合材料,研究了PTFE/PPFBS和OPS/PPFBS对PC阻燃和物理机械性能的影响规律和量效关系,探究了热老化处理对PC复合材料阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC:含质量分数0.1%的PPFBS,北京中石化燕山石化聚碳酸酯有限公司;

PTFE:FR-1102,东莞云飞扬塑化科技有限公司;

OPS:化学纯,广州一新科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:SY-6217-ZB-20/40,东莞市世研精密仪器有限公司;

平板硫化仪:SY-6210-B-50T,东莞市世研精密仪器有限公司;

立式注塑机:V30,东莞市台富机械有限公司;

极限氧指数(LOI)仪:300800,英国Concept仪器公司;

水平/垂直燃烧试验箱:FTT0802,英国Fire Technology Test公司;

透光度/雾度测定仪:WGT-S,上海精密科学仪器有限公司;

电子万能试验机:CMT6104,美特斯工业系统(中国)有限公司;

复合式冲击试验机:XJF-5,承德市金建检测仪器有限公司;

锥形量热仪:FTT0007,英国Fire Technology Test公司。

1.3 试样制备

按照表1中的配方(之前的研究表明,持续提高PTFE的用量对PC复合材料阻燃性能的提升效果并不明显,因此选择含质量分数0.1%和0.2%PTFE的PC复合材料进行研究),利用双螺杆挤出机将PC,PTFE,OPS充分混合后在熔融状态下进行挤出,风冷后将PC复合材料使用造粒机切割造粒。双螺杆挤出机各个区间的温度分别为230,260,270,265,260℃,模头温度为250℃;进料器螺杆转速为13 r/min,螺杆转速为160 r/min。使用塑化温度为285℃、注射压力为6.5 MPa的立式注塑机将PC复合材料制成用于LOI及UL 94垂直燃烧、拉伸、冲击强度测试的标准试样。使用平板硫化仪制作锥形量热测试所需标准样条,其中平板硫化仪的上下板温度设定为275℃,预热时间设定为2 min,保压时间设定为3 min,保压压力设定为10 MPa。另外,阻燃PC复合材料热氧老化处理条件为在70℃下于烘

箱中放置 168 h。

表 1 阻燃 PC 复合材料的配方(质量分数)

Tab. 1 Formulas of flame retardant PC composites (mass fraction)

Samples	PC (containing 0.1% PPFBS)	OPS	PTFE	%	
PC	100.0				
0.1%PTFE/PC	99.9		0.1		
0.2%PTFE/PC	99.8		0.2		
0.1%OPS/PC	99.9	0.1			
0.2%OPS/PC	99.8	0.2			
0.3%OPS/PC	99.7	0.3			

1.4 测试与表征

LOI 测试:根据 ASTM D2863-2000 在 LOI 仪中进行测试,试样尺寸为 130.0 mm×6.5 mm×3.2 mm。

UL 94 垂直燃烧测试:根据 ASTM D3801-2019 在水平/垂直燃烧试验箱中进行测试,试样尺寸为 130.0 mm×13.0 mm×3.2 mm。

透明性测试:在透光度/雾度测定仪上对试样进行透明性测试,试样尺寸为 100.0 mm×100.0 mm×3.0 mm,每个试样测 5 个点,测试结果取其平均值。

拉伸性能测试:根据 GB/T 1040.2-2006 在电子万能试验机上进行测试,拉伸速率为 20 mm/min,试样尺寸为 150.0 mm×10.0 mm×4.0 mm。

冲击性能测试:根据 GB/T 35513.2-2017 在复合冲击试验机上进行缺口冲击强度测试,摆锤能量为 2 J,试样尺寸为 80.0 mm×10.0 mm×4.0 mm。

锥形量热法测试:根据 ISO 5660-1-2002 在锥形量热仪上进行燃烧测试,外部热辐射强度为 50 kW/m²,试样尺寸为 100.0 mm×100.0 mm×3.0 mm。

2 结果与讨论

2.1 阻燃 PC 复合材料的 LOI 和 UL 94 测试结果分析

LOI 和 UL 94 垂直燃烧测试可以用于评估阻燃 PC 样品的可燃性^[15]。添加 PTFE 和 OPS 的阻燃 PC 复合材料的 LOI 和 UL 94 测试结果见表 2。

由表 2 可以看到,添加质量分数 0.1% 的 PPFBS 后 PC 材料的 LOI 值为 38.3%,并且在 UL 94 测试中可以达到 V-0 级。在阻燃剂总质量分数低于 0.4% 时,添加 PTFE 和 OPS 的 PC 复合材料均能达到 UL 94 V-0 级。对于 PTFE/PPFBS 体系,随着 PTFE 添加量的提高,PC 复合材料的 LOI 值逐渐上升,当 PTFE 的质量分数为 0.2% 时 PC 复合材料的 LOI 值达到了 40.6%,UL 94 阻燃等级为 V-0 级。对于 OPS/PPFBS 体系,PC 复合材料的 LOI 值随着 OPS

表 2 阻燃 PC 复合材料的 LOI 和 UL 94 测试结果

Tab. 2 Results of flame retardant PC composites in LOI and UL 94 tests

Samples	LOI/%	UL 94 (3.2 mm)			
		After-flame time		Rating	Dripping
		\bar{t}_1/s	\bar{t}_2/s		
PC	38.3	1.0	5.6	V-0	No
0.1%PTFE/PC	39.5	0.7	2.9	V-0	No
0.2%PTFE/PC	40.6	0.4	1.1	V-0	No
0.1%OPS/PC	41.7	0.9	4.2	V-0	No
0.2%OPS/PC	42.2	0.6	2.8	V-0	No
0.3%OPS/PC	40.4	0.7	3.0	V-0	No

Notes: \bar{t}_1 is the time when the flame goes out after burning the product for 10 s; \bar{t}_2 is the time when the flame goes out after burning the product again for 10 s after \bar{t}_1 .

添加量的提高呈现先上升后下降的趋势,含有 0.2% 的 OPS 和 0.1% 的 PPFBS 的 PC 复合材料的 LOI 值最高,达到 42.2%。这些结果表明 PTFE 和 OPS 的加入均可以提高含 PPFBS 的 PC 材料的阻燃性,并且与 PTFE 相比,OPS 与 PPFBS 可以发挥更好的协同阻燃作用,从而赋予 PC 复合材料更优异的阻燃性能。

2.2 阻燃 PC 复合材料的透明性分析

通过透光度/雾度测试仪研究了不同添加量的 PTFE 和 OPS 对含 PPFBS 的 PC 复合材料透明性的影响,结果见表 3。

表 3 阻燃 PC 复合材料的透光度与雾度测试结果

Tab. 3 Results of transmittance and haze test of flame retardant PC composites

Samples	Transmittance/%	Haze/%
PC	83.2	34.0
0.1%PTFE/PC	67.0	48.9
0.2%PTFE/PC	63.5	59.6
0.1%OPS/PC	74.2	43.0
0.2%OPS/PC	66.8	56.6
0.3%OPS/PC	64.9	48.8

从表 3 可以看到,阻燃剂 PTFE 和 OPS 的引入均会使 PC 复合材料的透光度不同程度地下降,并且随着 PTFE 或 OPS 添加量的提高,PC 复合材料的透光度逐渐降低;当 PTFE 和 OPS 的质量分数分别为 0.2% 时,阻燃 PC 复合材料的透光度分别为 63.5% 和 66.8%,表明在相同添加量下,与 PTFE 相比,添加 OPS 的 PC 材料可以保持更好的透明性。此外,对于 PTFE/PPFBS 体系,随着 PTFE 添加量的提高,相应 PC 复合材料的雾度逐渐上升;而对于 OPS/PPFBS 体系,相应 PC 复合材料的雾度随着 OPS 添加量的增加先增大后减小。

2.3 阻燃PC复合材料的力学性能分析

为了获得PTFE/PPFBS和OPS/PPFBS对PC力学性能影响的量效关系,对阻燃PC复合材料的缺口冲击强度、拉伸强度和断裂伸长率进行了测试,结果见表4。缺口冲击强度直接反映了材料的抗冲击能力^[16]。从表4可以看到,含有PPFBS的PC复合材料的缺口冲击强度为17.2 kJ/m²。加入质量分数0.1%的PTFE和OPS都会造成PC复合材料的缺口冲击强度明显下降,不同的是PC复合材料的缺口冲击强度随着PTFE添加量的提高而上升,随着OPS添加量的提高逐渐下降。当PTFE和OPS在PC中的质量分数分别为0.2%和0.1%时,PC复合材料可以保持较高的缺口冲击强度。

表4 阻燃PC复合材料的力学性能测试结果

Samples	Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	Elongation at break/%	Tensile strength/MPa
PC	17.2	24.9	63.7
0.1%PTFE/PC	11.6	16.1	66.1
0.2%PTFE/PC	17.5	30.9	65.1
0.1%OPS/PC	13.7	24.4	64.9
0.2%OPS/PC	10.5	34.5	66.1
0.3%OPS/PC	8.1	34.7	66.4

断裂伸长率是反映材料韧性的重要指标之一^[17]。从表4可以看到,PTFE质量分数为0.1%时,相应PC复合材料的断裂伸长率低于仅添加PPFBS的PC,而OPS质量分数为0.1%时,相应PC复合材料的断裂伸长率与未加OPS时相差不大。随着阻燃剂添加量的提高,不论是PTFE/PPFBS还是OPS/PPFBS体系,相应PC复合材料的断裂伸长率均逐渐增加且高于仅添加PPFBS的材料,由此说明适量

表6 阻燃PC复合材料热老化处理后的锥形量热仪测试结果

Samples	TTI/s	pk-HRR/(kW·m ⁻²)	THR/(MJ·m ⁻²)	TSR/(m ² ·m ⁻²)	av-EHC/(MJ·kg ⁻¹)	av-COY/(kg·kg ⁻¹)	av-CO ₂ Y/(kg·kg ⁻¹)	R _{600s} /%
PC	48	490	103	3 030	28.3	0.15	2.57	9.9
0.1%PTFE/PC	49	506	105	3 090	29.0	0.15	2.59	10.0
0.1%OPS/PC	65	415	96	2 922	27.9	0.15	2.54	14.7

Notes: TTI is time to ignition; pk-HRR is peak heat release rate; THR is total heat release; TSR is total smoke rate; av-EHC is average effective heat of combustion; av-COY is average CO yield; av-CO₂Y is average CO₂ yield; R_{600s} is mass retention of samples after combustion.

阻燃PC复合材料热老化处理后的热释放速率(HRR)和总热释放量(THR)曲线如图1所示。由图1可以看到,热老化处理后含有PPFBS的PC复合材料在引燃后的140 s内剧烈燃烧,其HRR峰值(pk-

PTFE和OPS的引入有利于提高PC材料的韧性,其中,添加OPS的材料断裂伸长率更高。当OPS的质量分数从0.2%增加至0.3%时,PC复合材料的断裂伸长率仅提高了0.2%,说明继续增加阻燃剂OPS的用量对PC材料韧性的提升效果不明显。另外,添加PTFE和OPS的阻燃PC复合材料的拉伸强度相差不大,但均略高于仅添加PPFBS的PC复合材料。

2.4 热老化对PC复合材料阻燃性能的影响

通过UL 94垂直燃烧测试探究了热老化处理对PC复合材料阻燃性能的影响,结果见表5。可以看到添加质量分数0.1%的PPFBS的PC复合材料在热老化后能达到UL 94 V-2级,并且燃烧过程中有熔滴产生,说明热老化处理会直接造成PC材料阻燃性能的下降。在将PTFE和OPS分别与PPFBS复配后,PC复合材料经热老化处理仍然可以达到UL 94 V-0级,初步表明PTFE和OPS的引入可以有效抑制热老化对PC材料阻燃性能的恶化作用。

表5 阻燃PC复合材料热老化处理后的UL 94测试结果

Samples	UL 94 (3.2 mm)		Rating	Dripping
	After-flame time			
	t_1/s	t_2/s		
PC	1.2	7.0	V-2	Yes
0.1%PTFE/PC	1.4	1.1	V-0	No
0.2%PTFE/PC	1.0	3.3	V-0	No
0.1%OPS/PC	2.4	6.6	V-0	No
0.2%OPS/PC	0.9	5.5	V-0	No
0.3%OPS/PC	0.5	2.4	V-0	No

为了进一步对比添加PTFE和OPS的PC复合材料热老化处理后阻燃性能的差异,通过锥形量热仪对0.1%PTFE/PC,0.1%OPS/PC和仅添加PPFBS的PC试样进行了测试,结果见表6。

HRR)可以达到490 kW/m²。0.1%PTFE/PC试样到达pk-HRR所需的时间和仅添加PPFBS的PC相比无明显差异,其pk-HRR值和THR值与PC相比甚至有略微的上升,表明热老化处理后PTFE的引入并

不能有效抑制PC复合材料的热释放。添加质量分数0.1% OPS的PC复合材料则不同,从图1可以明显看到0.1%OPS/PC试样到达pk-HRR的时间与仅添加PPFBS的PC材料相比延迟了约50 s;另外,0.1%OPS/PC的pk-HRR为415 kW/m²,与仅添加PPFBS的PC相比下降了15.3%,说明OPS的加入可以有效抑制热老化后PC复合材料的热释放,0.1%OPS/PC试样THR的下降也再次表明了OPS和PPFBS发挥了良好的协同阻燃作用。

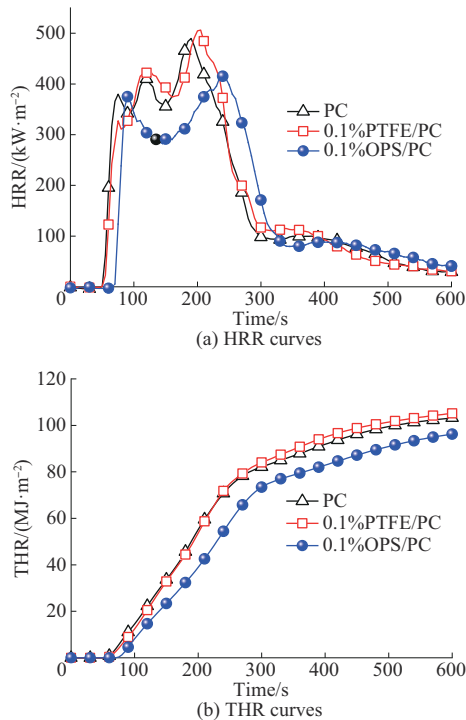


图1 阻燃PC复合材料热老化处理后的HRR和THR曲线

Fig. 1 HRR and THR curves of flame retardant PC composites after thermal aging treatment

由表6数据可知,OPS的加入使PC复合材料的点燃时间(TTI)值显著升高,而添加PTFE的PC复合材料的TTI与仅含有PPFBS的PC基本相同,这说明了OPS与PPFBS共同作用时,延长TTI效果优异,而PTFE与PPFBS共同作用于PC对于延迟材料TTI没有明显效果。

图2为阻燃PC复合材料热老化处理后的总烟释放量(TSR)和质量损失曲线。从图2a可以看到,分别添加质量分数0.1%的PTFE和OPS后,PC复合材料的TSR值与仅含有PPFBS的PC复合材料相比差异不大,结合表6中平均CO生成量(av-CO_Y),平均CO₂生成量(av-CO₂Y)的数据可知,PTFE和OPS的引入对PC复合材料烟释放的抑制效果不明显。

从图2b和表6可以看到,0.1%OPS/PC试样燃烧后的残炭率为14.7%,高于0.1%PTFE/PC和仅含有PPFBS的PC试样,表明OPS与PPFBS在凝聚相中可以发挥较好的协同成炭作用,通过提高残炭率赋予热老化处理后的PC复合材料良好的阻燃性能。

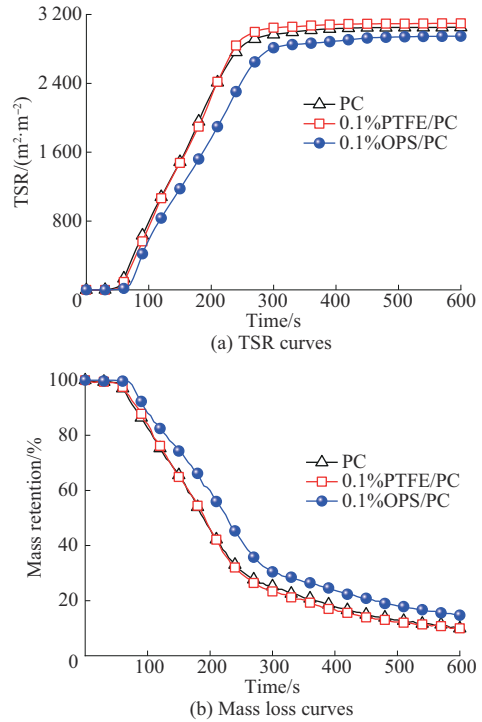


图2 阻燃PC复合材料热老化处理后的TSR和质量损失曲线

Fig. 2 TSR and mass loss curves of flame retardant PC composites after thermal aging treatment

为了进一步对比PTFE/PPFBS和OPS/PPFBS对PC复合材料凝聚相成炭行为的影响,对锥形量热法测试后残炭的宏观形貌进行了观察,如图3所示。由图3可以看到,仅添加PPFBS的PC复合材料与0.1%PTFE/PC复合材料的炭层难以覆盖PC基体表面,相比之下,0.1%OPS/PC复合材料的成炭量更高,并且炭层缺陷更少,再次表明OPS和PPFBS的协同作用有效提高了PC复合材料凝聚相的阻燃效

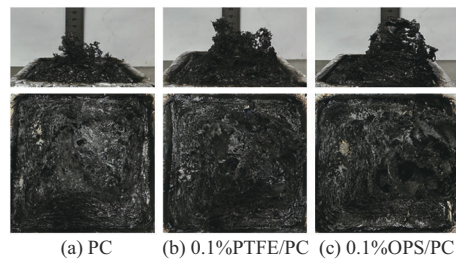


图3 阻燃PC复合材料锥形量热法测试后残炭形貌

Fig. 3 Morphology of carbon residue in flame retardant PC composites after cone calorimetry test

果。这主要归因于 OPS 在燃烧过程中受热分解产生了含硅化合物,这些含硅化合物可以覆盖在基体表面,提高炭层的致密性,从而抑制 PC 材料的持续燃烧^[18]。

3 结论

(1)向含有 PPFBS 的 PC 材料中加入 PTFE 和 OPS 可以提高复合材料的阻燃性能,PTFE 和 OPS 添加量相同时 OPS 与 PPFBS 的协同阻燃效果更好,0.2%OPS/PC 试样的 LOI 值最高,达到 42.2%。

(2)在相同添加量下,与 PTFE 相比,添加 OPS 的阻燃 PC 复合材料具有更好的透明性。当 PTFE 和 OPS 在 PC 中的质量分数分别为 0.2% 和 0.1% 时,PC 复合材料可以保持较好的力学性能。

(3)PTFE 和 OPS 的引入可以抑制热老化对 PC 阻燃性能的恶化作用,OPS 与 PPFBS 复配后可以通过在凝聚相中提高残炭量以及改善炭层品质从而抑制 PC 材料的持续燃烧。

参考文献

- [1] FUKUOKA S, FUKAWA I, ADACHI T, et al. Industrialization and expansion of green sustainable chemical process: A review of non-phosgene polycarbonate from CO₂[J]. *Organic Process Research & Development*, 2019, 23(2):145–169.
- [2] 王荣军. 聚碳酸酯用杂化型抗滴落剂的制备及应用[J]. *化工生产与技术*, 2024, 30(2):4–7.
WANG Rongjun. Preparation and application of hybrid anti-drip agents for polycarbonate[J]. *Chemical Production and Technology*, 2024, 30(2):4–7.
- [3] WU X Y, XU D, BRUYN M D, et al. Novel stereoisomeric lignin-derived polycarbonates: Towards the creation of bisphenol polycarbonate mimics[J]. *Polymer Chemistry*, 2023, 14(8):907–912.
- [4] 刘朝艳. 2022—2023 年世界塑料工业进展(II): 工程塑料和特种工程塑料[J]. *塑料工业*, 2024, 52(4):1–26.
LIU Chaoyan. Progress of the world's plastics industry in 2022–2023(II): Engineering plastics and special engineering plastics[J]. *China Plastics Industry*, 2024, 52(4):1–26.
- [5] 唐荣芝, 何航, 马雅琳, 等. 聚碳酸酯用阻燃剂研究进展[J]. *四川化工*, 2019, 22(4):14–17.
TANG Rongzhi, HE Hang, MA Yalin, et al. The research progress of flame retardant used in polycarbonate[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2019, 22(4):14–17.
- [6] WANG B T, YE R F, GUO Z H, et al. Thermal stability and fire safety of polycarbonate flame retarded by the brominated flame retardant and a non-antimony synergistic agent[J]. *Journal of Polymer Research*, 2023, 30(6). DOI:10.1007/s10965-023-03586-w.
- [7] CHARITOPOULOU M A, PAPADOPOULOU L, ACHILIAS D S. Effect of brominated flame retardant on the pyrolysis products of polymers originating in WEEE[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(20):29 570–29 582.
- [8] OLESZEK S, KUMAGAI S, GRABDA M, et al. Mitigation of bromine-containing products during pyrolysis of polycarbonate-based tetrabromobisphenol A in the presence of copper(I) oxide [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 409. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.124972.
- [9] HUANG X B, OUYANG X Y, NING F L, et al. Mechanistic study on flame retardance of polycarbonate with a small amount of potassium perfluorobutane sulfonate by TGA-FTIR/XPS[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(3):606–613.
- [10] MU X W, JIN Z Y, CHU F K, et al. High-performance flame-retardant polycarbonate composites: Mechanisms investigation and fire-safety evaluation systems establishment[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 238. DOI:10.1016/j.compositesb.2022.109873.
- [11] 姚杏梅, 袁瑞建, 李志明. 无卤阻燃聚碳酸酯合金的制备及性能表征[J]. *辽宁化工*, 2022, 51(12):1 711–1 713.
YAO Xingmei, YUAN Ruijian, LI Zhiming. Preparation and characterization of halogen-free flame retardant polycarbonate alloy [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2022, 51(12):1 711–1 713.
- [12] DANG X R, BAI X, ZHANG Y. Thermal degradation behavior of low-halogen flame retardant PC/PPFBS/PDMS[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 119(5):2 730–2 736.
- [13] TRAN Q V, NGUYEN T N, DOAN T H, et al. Preparation of flame retardant polycarbonate-acrylonitrile butadiene styrene composite using graphene nanoplatelets and potassium perfluorobutane sulfonate additives[J]. *Chemistry Select*, 2023, 8(27). DOI:10.1002/slct.202300594.
- [14] 严欢焕, 贾义军, 陈国军, 等. 满足苛刻阻燃要求的聚碳酸酯材料的研制[J]. *上海塑料*, 2021, 49(3):22–25.
YAN Huanhuan, JIA Yijun, CHEN Guojun, et al. Development of polycarbonate materials meeting stringent flame retardant requirements[J]. *Shanghai Plastics*, 2021, 49(3):22–25.
- [15] ZHOU F S, XI W, QIAN L J, et al. Hexaphenoxycyclotriphosphazene/boron nitride high-efficiency charring system enhancing the flame retardancy and thermal conductivity of polycarbonate[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2024, 219. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2023.110601.
- [16] 应杰, 邱琪浩, 章兴, 等. 滑石粉对阻燃聚碳酸酯性能的影响[J]. *中国塑料*, 2021, 35(5):107–112.
YING Jie, QIU Qihao, ZHANG Xing, et al. Effect of talc on properties of flame-retardant polycarbonate[J]. *China Plastics*, 2021, 35(5):107–112.
- [17] LIU A Q, QIU Y, QIAN L J, et al. Rubber-based phosphaphenanthrene grafted polymer and its application to fabricate flame retardant polycarbonate blend with satisfied comprehensive mechanical properties[J]. *Polymer*, 2024, 299. DOI:10.1016/j.polymer.2024.126969.
- [18] WANG Z P, QIU Y, LIU A Q, et al. Micro-crosslinking of phosphaphenanthrene/siloxane molecule initiate aggregation flame retardant and toughening enhancement effects on its polycarbonate composite[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 466. DOI:10.1016/j.cej.2023.143169.