

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.006

硅氧烷双酚型共聚碳酸酯的制备与性能

鄂永胜, 张丹凤, 刘明辉

(辽宁科技学院生物医药与化学工程学院, 辽宁本溪 117004)

摘要: 硅氧烷阻燃剂是一种新型高效、环境友好的无卤阻燃剂, 硅氧烷双酚(SBP)和双酚A(BPA)共聚在聚碳酸酯中引入Si—O键和Si—C键, 可以获得阻燃性能、透明性和耐低温性能良好的硅氧烷双酚型共聚碳酸酯(SBP-PC)。首先以邻烯丙基苯酚和1,1,3,3-四甲基二硅氧烷为原料, 采用Karstedt催化剂合成SBP, 然后以SBP, BPA和三光气(BTC)为原料, 采用界面缩聚法制备SBP-PC。红外吸收光谱验证了SBP和SBP-PC的结构。考察了SBP和BPA的物质的量比对SBP-PC的阻燃性能、耐热性能和力学性能的影响, 得到SBP与BPA的最佳物质的量比为8:92。经检测, 最佳物质的量比时SBP-PC的垂直燃烧级别为V-0级, 极限氧指数为39.2%, 通过了针焰试验, 表明其阻燃性能较双酚A型聚碳酸酯(BPA-PC)有了显著提高。SBP-PC的玻璃化转变温度为145.5℃, 略低于BPA-PC, 耐热性能略有下降。SBP-PC的5%热失重温度为446℃, 高于BPA-PC, 说明其有更好的热稳定性。通过低温测试, SBP-PC在-30℃时简支梁缺口冲击强度下降幅度仅为13.19%, 其低温耐冲击性能良好。SBP-PC具有很好的透光率和低的雾度, 光学性能良好。共聚PC在力学性能和透光率上显著优于共混PC。

关键词: 硅氧烷双酚; 聚碳酸酯; 制备; 性能; 阻燃

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0045-07

Preparation and properties of siloxane bisphenol type copolycarbonate

E Yongsheng, ZHANG Danfeng, LIU Minghui

(School of Biomedical and Chemical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China)

Abstract : Siloxane flame retardant is a new kind of halogen-free flame retardant, which is highly efficient and environmentally friendly. Siloxane bisphenol type copolycarbonate (SBP-PC) with good flame retardant, transparency and low temperature resistance could be obtained by copolymerization of siloxane bisphenol (SBP) and bisphenol A (BPA) to introduce Si—O bond and Si—C bond into polycarbonate. First, siloxane bisphenol was synthesized from o-allylphenol and 1,1,3,3-tetramethyldisiloxane. Then, SBP-PC was prepared by interfacial polycondensation method using SBP, BPA and triphosgene as raw materials. The structures of SBP and SBP-PC were verified by infrared absorption spectroscopy. The influence of molar ratio of SBP and BPA on the properties of SBP-PC was investigated, and the best molar ratio was obtained. The vertical combustion grade of SBP-PC is V-0, and the oxygen index is 39.2%, which passes the needle-flame test, indicating that its flame retardant performance has been significantly improved. The glass transition temperature is slightly lower than that of bisphenol A type polycarbonate (BPA-PC), and the heat resistance is slightly decreased. The thermal weight loss temperature of 5% is 446℃, indicating that it has better thermal stability. According to the low temperature test, the charpy impact strength of SBP-PC decreases only by 13.19% at -30℃, and its low temperature impact resistance is good. SBP-PC has good light transmittance and low fog, which indicates that its optical performance is good. The mechanical properties and light transmittance of copolymerized PC are significantly better than those of blended PC.

Keywords : siloxane bisphenol ; polycarbonate ; preparation ; property ; flame retardant

基金项目: 辽宁省教育厅科研项目-科研创新团队项目(LJ222411430018)

通信作者: 鄂永胜, 教授, 主要研究方向为高分子材料合成

收稿日期: 2024-12-09

引用格式: 鄂永胜, 张丹凤, 刘明辉. 硅氧烷双酚型共聚碳酸酯的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(2):45-51.

E Yongsheng, ZHANG Danfeng, LIU Minghui. Preparation and properties of siloxane bisphenol type copolycarbonate[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2):45-51.

聚碳酸酯(PC),通用的为双酚A型聚碳酸酯(BPA-PC),因其具备一定的耐热性、耐寒性、阻燃性、透明性和使用温度内良好的力学性能而被广泛应用于汽车、医疗器械、包装、建筑材料等各个领域^[1]。但随着PC在诸如航空航天、电子电气、照明等高性能材料领域的应用,对其阻燃性能提出了更高的要求^[2]。

硅氧烷阻燃剂是一种新型高效、低毒、抑烟、环境友好的无卤阻燃剂^[3],燃烧时会生成硅氧烷特有的含有Si—O键和Si—C键的无机隔氧绝热保护层,既阻止了燃烧分解产物外逸,又抑制了高分子材料的热分解,达到阻燃、低烟和低毒等目的^[4]。PC中引入硅氧烷有共混和共聚两种方法,共混是直接将聚硅氧烷按一定比例混入PC中,这种方法操作简单、成本低,是目前主要使用的方法,但由于聚硅氧烷和PC的相容性不好,因此这种添加型阻燃方式使PC在透明性、力学性能等方面存在缺陷^[5]。共聚是将带有羟基的硅氧烷和双酚A(BPA)共聚,制备含硅的共聚PC,在PC分子链中引入Si—O键和Si—C键,属于本质阻燃^[6],可以解决相容性不好的问题。硅氧烷的引入还能增加分子链的柔性,提高低温韧性,属于高端PC产品,在人工智能和虚拟现实设备等领域的应用前景广阔。目前应用的带有羟基的硅氧烷主要分为两类^[7],一类是羟基封端的聚二甲基硅氧烷(PDMS),由于羟基直接连接在硅原子上,活性差,反应困难;另一类是酚羟基封端的PDMS,羟基活性强,能够和BPA共聚生成PC。Islam等^[8]使用丁香酚封端的PDMS和BPA共聚制得含硅PC,柔韧性和润湿性有所增加,热氧化稳定性和透明度与BPA-PC相当。魏志涛等^[9]选用双丁香酚封端的PDMS和BPA共聚制得阻燃和低温抗冲击性能良好的共聚PC。但笔者在实验中发现,由于PDMS分子远大于BPA,反应均一性不好,分子量不易控制,影响产品性能。硅氧烷双酚(SBP)为含有Si—O键和Si—C键的单分子,和BPA共聚生成PC时,硅氧烷能够均匀地分散在PC的分子链中,得到性能均一的高分子量产品,对此还未见报道。

PC的工业合成方法主要有光气界面法和熔融酯交换法两种^[10]。光气有毒,熔融酯交换需要高温、高真空等苛刻的操作条件^[11]。三光气(BTC)是无毒、无污染的固体化合物,可以代替光气用于PC的合

成^[12]。笔者选用BPA、BTC和自制的SBP为原料,采用界面缩聚法制备硅氧烷双酚型共聚碳酸酯(SBP-PC),并对其性能等进行测定,为工业化生产提供技术基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

邻烯丙基苯酚:纯度98%(质量分数,下同);

Karstedt 催化剂:Pt的二甲苯溶液(质量浓度为2%);

1,1,3,3-四甲基二硅氧烷:纯度98%;

BTC、BPA、三乙胺:纯度99%;

甲苯:纯度≥99.5%;

羟基封端的PDMS:平均数均分子量(M_n)为500;

以上全部购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器及设备

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:WQF-510A,北京北分瑞利分析仪器(集团)有限责任公司;

同步热分析仪:SDT-Q600,美国TA公司;

极限氧指数(LOI)仪:JF-3,南京江宁分析仪器厂;

水平垂直燃烧试验箱:HT-2408E-L,广东宏拓仪器科技有限公司;

超低温冰箱:MDF-U5411,日本三洋电器公司;

简支梁冲击试验机:HT-1043-25D,广东宏拓仪器科技有限公司;

电子万能材料试验机:HT-140SC,广东宏拓仪器科技有限公司;

针焰试验仪:ZY-H,深圳市德迈盛测控设备有限公司;

透光率雾度仪:WGT-S,济南赛成电子科技有限公司;

乌氏黏度计:1836,上海隆拓仪器公司。

1.3 试样制备

1.3.1 SBP的合成

在250 mL三口烧瓶中加入30 mL干燥脱水后的甲苯和28 mL邻烯丙基苯酚,充氮气30 min,然后用注射器注入120 μ L的Karstedt催化剂[铂(0)-1,3-二乙烯基四甲基二硅氧烷络合物]和18 mL的1,1,3,3-四甲基二硅氧烷,水浴加热至70 $^{\circ}$ C,反应9 h。反应结束后在旋转蒸发器上回收溶剂甲苯,剩余的深

棕色黏稠油状物质即为 SBP^[13]。反应方程式见图1。

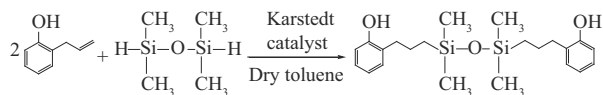


图1 SBP的合成反应式

Fig. 1 Synthesis reaction of SBP

1.3.2 SBP-PC的制备

在250 mL带有冷凝管的三口烧瓶中加入合计0.05 mol的SBP和BPA,再加入40 g质量分数12%的NaOH溶液和20 mL二氯甲烷,充分搅拌使SBP和BPA溶解。将6.5 g BTC溶于80 mL二氯甲烷中配制成溶液。水浴加热至40℃,加入催化剂三乙胺0.5 g,然后滴加BTC的二氯甲烷溶液,控制滴加速度在30 min滴加完毕,补加三乙胺0.3 g,继续回流反应60 min。反应结束后静置分层,得到下层的二氯甲烷溶液,水洗至中性,旋转蒸发器回收溶剂二氯甲烷,剩余的白色纤维状固体用乙醇洗涤、干燥后得到SBP-PC。聚合反应方程式见图2。

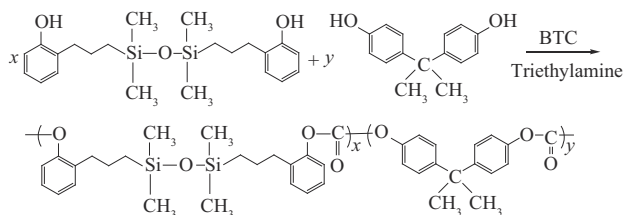


图2 SBP-PC的聚合反应式

Fig. 2 Polymerization reaction of SBP-PC

同样的条件制备BPA-PC用于性能比较。

1.4 测试与表征

FTIR分析:溴化钾压片,扫描范围400~4 000 cm⁻¹。

差示扫描量热(DSC)和热失重温度(TG)分析:升温速率10℃/min,氮气气氛,温度范围室温到800℃。

燃烧性能的测定:采用垂直燃烧法按照GB/T 2408-2008进行测试,样条尺寸125 mm×13 mm×3 mm。

LOI测试:按GB/T 2406.2-2009进行,样条尺寸100 mm×10 mm×4 mm。

缺口冲击强度测试:按GB/T 1043.2-2018测量,样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,摆锤能量5.5 J。低温测试时,测试温度为-10, -20, -30, -40, -50℃,测试时将样条放置在低温冰箱中在设定温度下保持4 h,快速取出试样,每根样条测试过程在10 s内完成。

拉伸强度检测:按GB/T 1040.2-2006测量,样条尺寸75 mm×5 mm×2 mm,样条类型1BA型,拉伸速度为20 mm/min。

针焰试验:按GB/T 5169.5-2020进行,施加试验火焰持续时间30 s,铺底层为覆盖一层绢纸的木板。

透光率和雾度检测:按GB/T 2410-2008进行测试。

黏均分子量检测:测量20℃的特性黏度,然后通过Mark-Houwink方程式^[14]计算而得。

2 结果与讨论

2.1 SBP和SBP-PC的FTIR分析

图3为FTIR谱图,从上到下分别为SBP, SBP-PC (SBP与BPA的物质的量比为8:92)和BPA-PC。

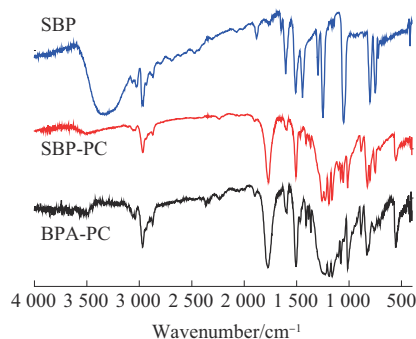


图3 SBP, SBP-PC, BPA-PC的FTIR谱图

Fig. 3 FTIR spectra of SBP, SBP-PC, BPA-PC

在SBP的FTIR谱图中,3 330 cm⁻¹是—OH的振动吸收峰,2 962 cm⁻¹是与Si相连的—CH₃的伸缩振动吸收峰,1 251 cm⁻¹是—CH₃的变形振动吸收峰,1 054 cm⁻¹是Si—O的伸缩振动吸收峰,800 cm⁻¹是Si—C的伸缩振动吸收峰,752 cm⁻¹是Si—O邻位苯环的特征吸收峰,结合分子结构分析,可以确定合成产物是SBP^[13]。

对SBP-PC和BPA-PC的FTIR谱图进行比较分析,2 962 cm⁻¹是—CH₃的伸缩振动吸收峰,两者都有;1 774 cm⁻¹是C=O伸缩振动的特征吸收峰,1 611 cm⁻¹和1 509 cm⁻¹为苯环骨架振动吸收峰,两者都有;1 234, 1 189, 1 160 cm⁻¹处的三个吸收峰是C—O伸缩振动吸收峰,两者都有;1 054 cm⁻¹是Si—O的伸缩振动吸收峰,SBP-PC中有,BPA-PC中没有此峰;1 012 cm⁻¹和825 cm⁻¹是对位苯环的特征吸收峰,两者都有;800 cm⁻¹是Si—C的伸缩振动吸收峰,752 cm⁻¹是邻位苯环的特征吸收峰^[15],SBP-PC中有,BPA-PC中没有。

由SBP-PC和BPA-PC的FTIR谱图对比可知,SBP-

PC具有一 CH_3 、 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{O}$ 、苯环结构、对位苯环取代等PC的典型特征^[16],同时又多了 $\text{Si}-\text{O}$ 、 $\text{Si}-\text{C}$ 和邻位苯环取代,结合SBP-PC的分子结构特征,可以确定制备的聚合物为SBP-PC。

2.2 SBP与BPA物质的量比对SBP-PC性能影响

硅氧烷引入的主要目的就是提高PC的阻燃性能,但其引入也会增加PC分子链的柔性,从而降低PC的耐热性能和常温的力学性能,所以在确定SBP

与BPA的物质的量比时要综合考虑这些因素。

表征PC阻燃性能普遍的方法是垂直燃烧法和LOI法。 T_g 是工程材料使用温度的上限,是衡量高分子材料耐热性能的重要指标。简支梁冲击强度(缺口)和拉伸强度是表征塑料力学性能最重要的两个指标。SBP和BPA物质的量比对SBP-PC性能的影响见表1。

表1 SBP和BPA物质的量比对SBP-PC性能的影响

Tab. 1 Effect of molar ratio of SBP and BPA on properties of SBP-PC

Molar ratio ($n_{\text{SBP}}:n_{\text{BPA}}$)	Vertical burning test		LOI/%	$T_g/^{\circ}\text{C}$	Charpy impact strength (notched, 23 $^{\circ}\text{C}$)/($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	Tensile strength (23 $^{\circ}\text{C}$)/MPa
	t/s	level				
0:100	25	V-2	25.2	148.2	52.46	63.67
2:98	19	V-1	29.4	147.8	52.32	63.46
4:96	14	V-1	33.1	147.3	52.06	63.14
6:94	11	V-1	36.3	146.6	51.64	62.69
8:92	8	V-0	39.2	145.5	51.01	62.04
10:90	7	V-0	41.7	143.6	49.89	60.92
12:88	6	V-0	43.8	140.1	47.73	58.87

Note: t is remaining flame time.

由表1可知,随着SBP-PC中SBP比例的逐步增加,垂直燃烧试验时的余焰时间越来越短,并且只要加入SBP,棉垫就不会被引燃,垂直燃烧级别由V-2级提升到可以满足电子设备使用的V-0级别。LOI也随着SBP物质的量比的增加而提高,由可燃材料变为难燃材料(LOI在22%~27%之间属可燃材料,LOI>27%属难燃材料)。这是由于PC在燃烧时,由于键能的差异,硅氧烷从PC内部向表面迁移、富集而形成均质的含 $\text{Si}-\text{O}$ 和 $\text{Si}-\text{C}$ 的无机隔氧绝热保护层,并且与PC发生了交联,这既阻止了燃烧分解产物外逸,又抑制了内部材料的进一步燃烧,并能防止熔体滴落,从而隔绝了内部PC与外界氧气的接触,达到了阻燃、低烟、低毒的目的^[17]。

T_g 随着共聚PC中SBP物质的量比的增加而逐步下降,并且有加速下降的趋势。常温简支梁冲击强度(缺口)和拉伸强度也随着SBP物质的量比的增加而逐步下降,并且也有加速下降的趋势。这是由于硅氧烷增加了PC分子链的柔顺性,分子中硅氧烷含量越多,柔顺性越好, T_g 和力学性能下降就越明显。

由表1数据可知,SBP与BPA物质的量比在8:92时较为合适,这时制备的共聚PC垂直燃烧级别达到了电子设备要求的V-0级,LOI值也高达39.2%,而此时的 T_g 、常温简支梁冲击强度和拉伸强度下降都还较为缓和,简支梁冲击强度下降幅度为

2.76%,拉伸强度下降幅度为2.56%。SBP物质的量比继续增加,垂直燃烧级别仍为V-0级,LOI值增加幅度放缓,意味着阻燃性能提高已不明显,但 T_g 、简支梁冲击强度和拉伸强度下降幅度越来越大,而且SBP比例的增加也会提高共聚PC的制备成本,所以SBP与BPA的最佳物质的量比是8:92。

最佳物质的量比时SBP-PC(后面性能检测采用的都是最佳物质的量比的SBP-PC)和BPA-PC的差示扫描量热曲线(DSC)见图4。

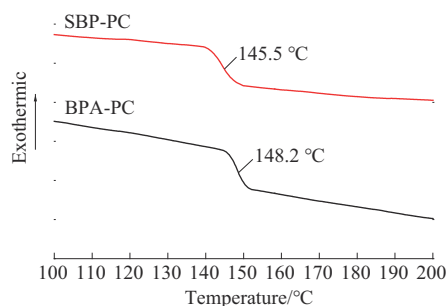


图4 SBP-PC和BPA-PC的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of SBP-PC and BPA-PC

由图4可知,SBP-PC的 T_g 为145.5 $^{\circ}\text{C}$,相较于BPA-PC的148.2 $^{\circ}\text{C}$ 下降不大。

经乌氏黏度计检测并计算出SBP-PC的黏均分子量为32 360,与BPA-PC基本相当。

2.3 TG检测

TG通常测量的是5%热失重温度,可以表征材料

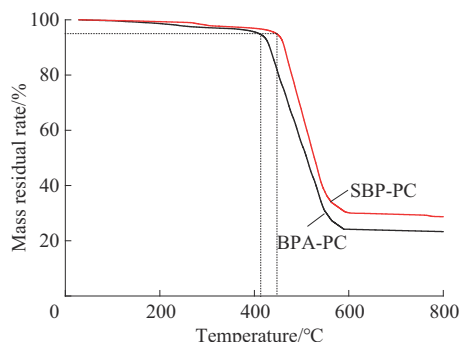


图5 SBP-PC和BPA-PC的TG曲线

Fig. 5 TG curves of SBP-PC and BPA-PC

的热稳定性。图5为BPA-PC和SBP-PC的TG曲线。由图5可知,虽然SBP-PC的 T_g 相较于BPA-PC略有下降,但5%热失重温度却有提高,BPA-PC为410 °C,SBP-PC为446 °C,提高了36 °C,表明SBP-PC的热稳定性有所提高,这是由于高温下PC主链断裂重排,并发生了交联反应,形成了相当稳定的带有硅氧烷交联网状结构的中间产物,增强了PC的热稳定性。并且硅氧烷的成炭作用,形成保护性的炭层,从而使炭渣剩余量有所增加^[18]。

2.4 针焰试验

在表征阻燃性能时除了常用的垂直燃烧法和LOI法外,由于SBP-PC在电子产品上有很广泛的应用,针焰试验可以模拟因电气故障引起的小火焰效应来评定着火危险^[19]。对制备的SBP-PC进行针焰试验,并与BPA-PC进行比较,结果见表2。

表2 BPA-PC和SBP-PC针焰试验

Tab. 2 Needle flame test of BPA-PC and SBP-PC

Sample	t'/s	Ignite bottom layer	Passes needle flame test
BPA-PC	31	Yes	No
SBP-PC	8	No	Yes

Notes: t' is flame duration after removing needle flame.

由表2可知,SBP-PC通过了针焰试验,完全可作为电子产品设备的零件使用,而BPA-PC没有通过针焰试验,其在电子产品的应用会受到限制。这是因为硅氧烷在高温下会形成一种致密炭层,这层炭层能够阻止材料进一步燃烧和熔体滴落,所以针焰移开后,SBP-PC很快熄灭并且不会引燃铺底层。

2.5 低温冲击性能检测

硅氧烷的引入增加了PC分子链的柔性,降低了常温时的冲击强度,但硅氧烷在低温下也能保持很好的韧性,对提高PC在低温下的冲击强度起到很大作用。SBP-PC和BPA-PC在低温时的简支梁缺口冲击强度见图6。

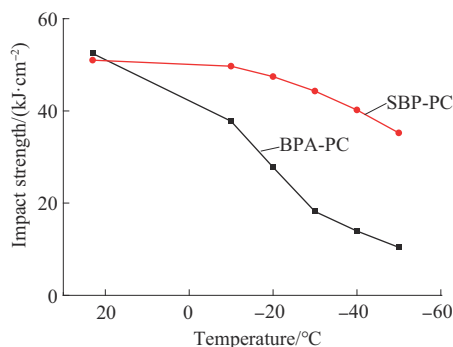


图6 SBP-PC和BPA-PC低温下的冲击强度

Fig. 6 Impact strength of SBP-PC and BPA-PC at low temperature

由图6可知,SBP-PC常温时的简支梁缺口冲击强度略低于BPA-PC,但随着温度的降低,BPA-PC的冲击强度迅速下降,在-30 °C时为18.17 kJ/m²,下降幅度达到65.36%;而SBP-PC的冲击强度则下降较为缓和,在-30 °C时为44.28 kJ/m²,下降幅度仅为13.19%。这是因为低温时,PC分子运动减缓,分子间的相互作用力减弱,导致材料变脆,表现为冲击强度下降,而硅氧烷的分子链由Si—O—Si组成,这种键合方式使得分子链在低温下依然能够保持较高的柔顺性,受到冲击时能够吸收大量的冲击能,增加低温韧性,从而提高低温时的冲击强度^[20]。

2.6 光学性能测试

SBP-PC仍为无色透明塑料,采用透光率雾度测试仪器测试其透光率和雾度,测试方法按照GB/T 2410-2008规定执行,测试结果见表3。

表3 SBP-PC和BPA-PC的透光率和雾度

Tab. 3 Light transmittance and fog degree of SBP-PC and BPA-PC

Sample	Light transmittance/%	Fog degree/%
BPA-PC	89.8	0.81
SBP-PC	88.6	0.87

由表3可知,SBP-PC的透光率和雾度与BPA-PC相近,说明其有着良好的光学性能,这是由于共聚PC能够使硅氧烷均匀地分布在PC的分子链中,有助于减少分子间的相互作用力,从而降低光散射,保持PC的高透明度。

2.7 共聚PC和共混PC性能比较

取与共聚PC中Si原子摩尔数相同的羟基封端PDMS,与共聚PC中相同摩尔数的BPA制备的BPA-PC共混,制备共混PC,对其性能进行检测,并与共聚PC进行比较,结果见表4。

由表4可知,共聚PC和共混PC的垂直燃烧级别都为V-0级,LOI值略有下降。共混PC的力学性能和透光率下降明显。这是因为无论共混还是共

表 4 共聚 PC 和共混 PC 性能比较
Tab. 4 Performance comparison of copolymerized PC and blended PC

Sample	Vertical burning level	LOI/%	Charpy impact strength (notched, 23 °C)/(kJ·m ⁻²)	Tensile strength (23 °C)/MPa	Light transmittance/%
Copolymerized PC	V-0	39.2	51.01	62.04	88.6
Blended PC	V-0	38.6	45.68	54.97	80.3

聚,硅氧烷都能有效提高 PC 的阻燃性能。但由于 PDMS 和 PC 两种分子间键能差异巨大,使其相容性差,PDMS 无法均匀分散在 PC 基体中,会形成颗粒、团块等,从而导致其力学性能和透明性都明显下降^[21],而共聚 PC 则使硅氧烷分子均匀分布在 PC 分子链中,进而在提高阻燃性能的同时还能基本保持 PC 原有的力学性能和光学性能。

3 结论

(1)以 SBP, BPA 和 BTC 为原料,采用界面缩聚法制备 SBP-PC, SBP 和 BPA 最佳物质的量比为 8:92,红外吸收光谱验证了 SBP 和 SBP-PC 的结构。

(2)通过检测,SBP-PC 的垂直燃烧级别为 V-0 级,LOI 值为 39.2%,通过了针焰试验,表明其阻燃性能有了明显提升;SBP-PC 的 T_g 为 145.5 °C,耐热性能略有下降;5% 热失重温度为 446 °C,热稳定性更好;SBP-PC 在 -30 °C 时简支梁缺口冲击强度下降幅度仅为 13.19%,说明其低温下仍能保持较好的耐冲击性能;SBP-PC 具有很好的透光率和低的雾度,光学性能良好。共聚 PC 的力学性能和透光率显著优于共混 PC。

参考文献

[1] 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.

[2] 徐星驰,张伟,郭金顺,等.螺杆组合对阻燃聚碳酸酯材料性能的影响[J].现代塑料加工应用,2021,33(5):29-32.
XU Xingchi, ZHANG Wei, GUO Jinshun, et al. Effect of Screw Combination on Properties of Flame Retardant Polycarbonate[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(5):29-32.

[3] 蔡华轮,许凯,刘欢,等.硅基阻燃剂在聚碳酸酯体系中研究进展[J].合成材料老化与应用,2010,39(1):29-33.
CAI Hualun, XU Kai, LIU Huan, et al. Progress of silicon-based flame retardants in the polycarbonate system[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2010, 39(1):29-33.

[4] 周伯龙,张明聪,史翎.反应型有机硅阻燃剂研究进展[J].应用化学,2021,38(12):1 556-1 575.
ZHOU Bolong, ZHANG Mingcong, SHI Ling. Research progress on reactive silicone flame retardants[J]. Chinese Journal of Applied

Chemistry, 2021, 38(12):1 556-1 575.

[5] 陈轲,刘鸣飞,赵彪,等.有机硅改性高分子材料阻燃及耐腐蚀性能研究进展[J].中国塑料,2022,36(6):149-154.
CHEN Ke, LIU Mingfei, ZHAO Biao, et al. Research progress in flame retardancy and ablative resistance of silicone-modified polymeric materials[J]. China Plastics, 2022, 36(6):149-154.

[6] 傅轶,谭颂斌,赵建青.含硅化合物在阻燃聚碳酸酯材料中的应用进展[J].塑料工业,2007(6):1-4.
FU Yi, TAN Songbin, ZHAO Jianqing. Progress in application of silicone-containing compound in flame retardant polycarbonate[J]. China Plastics Industry, 2007(6):1-4.

[7] 姜振浩,王远榕,覃珊珊,等.有机硅改性双酚 A 型聚碳酸酯研究进展[J].有机硅材料,2024,38(2):69-74.
JIANG Zhenhao, WANG Yuanrong, QIN Shanshan, et al. Research progress of silicone modified bisphenol A polycarbonate[J]. Silicone Material, 2024, 38(2):69-74.

[8] ISLAM M M S, KWON Y D, ISLAM M M, et al. Synthesis and characterization of polycarbonates containing terminal and chain interior siloxane[J]. Polymer Bulletin, 2012, 68(6):1 551-1 564.

[9] 魏志涛,王磊,曾伟,等.一种聚硅氧烷封端改性的共聚碳酸酯及其制备方法:CN202111173979.9[P]. 2022-01-04.
WEI Zhitao, WANG Lei, ZENG Wei, et al. A kind of copolycarbonate modified by polysiloxane sealing and its preparation method: CN202111173979.9[P]. 2022-01-04.

[10] 曾伟华,刘俊逸,谢海生,等.聚碳酸酯合成技术研究进展[J].高分子材料科学与工程,2021,37(7):183-190.
ZENG Weihua, LIU Junyi, XIE Haisheng, et al. Progress on synthesis technology of polycarbonate[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(7):183-190.

[11] 鄂永胜,吕萍,刘彬,等.双酚 AF 型聚碳酸酯的制备与性能[J].工程塑料应用,2022,50(4):41-45, 57.
E Yongsheng, LYU Ping, LIU Bin, et al. Preparation and properties of bisphenol AF polycarbonate[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):41-45, 57.

[12] 张子俊.三光气法合成双酚 A 型聚碳酸酯及本征改性研究[D].成都:四川大学,2021.
ZHANG Zijun. Study on synthesis and intrinsic modification of bisphenol A polycarbonate by triphosgene method[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.

[13] 华幼卿,金日光.高分子物理[M]. 5 版.北京:化学工业出版社,2019.
HUA Youqing, JIN Riguan. Polymer physics[M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

- [14] 李月红. 硅氧烷双酚型苯并噁嗪的合成与性能研究[D]. 保定:河北大学, 2016.
- LI Yuehong. The synthesis and properties of polybenzoxazines based on a siloxane-containing diphenol[D]. Baoding: Hebei University, 2016.
- [15] 宁永成. 有机化合物结构鉴定与有机波谱学[M]. 4版. 北京:科学出版社, 2018.
- NING Yongcheng. Structural identification of organic compounds and organic spectroscopy [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2018.
- [16] SWEILEH B A, ALHIARI Y M, KAILANI M H, et al. Synthesis and characterization of polycarbonates by melt phase interchange reactions of alkylene and arylene diacetates with alkylene and arylene diphenyl dicarbonates[J]. *Molecules*, 2010, 15(5): 3 661–3 682.
- [17] 苗越卓. 羧基聚硅氧烷和羟基聚硅氧烷的合成表征及对聚碳酸酯的阻燃研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2010.
- MIAO Yuezhuo. Study on preparation characterization and flame retardancy on polycarbonate of carboxyl-polysiloxane and hydroxyl-polysiloxane[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010.
- [18] 单佳丽, 宋荣君, 李斌. 一种新型含硅阻燃剂的制备及在聚碳酸酯中的应用研究[J]. *塑料科技*, 2016, 44(4): 90–94.
- SHAN Jiali, SONG Rongjun, LI Bin. Study on preparation of a novel silicon-containing flame retardant and its application in polycarbonate[J]. *Plastics Science and Technology*, 2016, 44(4): 90–94.
- [19] 邵景昌, 汪洋, 张德权, 等. 阻燃剂类型对聚碳酸酯阻燃性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(3): 130–134.
- SHAO Jingchang, WANG Yang, ZHANG Dequan, et al. Effect of flame retardant type on flame retardancy of polycarbonate[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(3): 130–134.
- [20] 王德政. 阻燃型聚硅氧烷改性聚碳酸酯的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- WANG Dezheng. Preparation and properties of flame retardant polysiloxane modified polycarbonate[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [21] 李一搏, 盖景刚. 高透明耐溶剂性聚碳酸酯合金材料的制备[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(6): 33–38.
- LI Yibo, GAI Jinggang. Preparation of polycarbonate alloy with high transparency and excellent solvent resistant[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2024, 40(6): 33–38.