

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.008

梯形倍半硅氧烷/海泡石/PC/ABS复合材料的制备与性能

刘海路, 刘小忠, 徐娟, 李湘
(湖南化工职业技术学院, 湖南株洲 412000)

摘要: 利用双螺杆挤出机通过熔融共混制备无卤阻燃聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(PC/ABS)复合材料, 分析梯形倍半硅氧烷(TSQ)和海泡石(SEP)对复合材料阻燃性能、热失重和力学性能的影响, 结果表明, TSQ可以提高PC/ABS的阻燃性能、热稳定性和低温韧性, 在PC/ABS中加入质量分数1%的TSQ, 复合材料的阻燃等级达到UL 94 V-0级(3.0 mm)和UL 94 V-1级(2.0 mm), 极限氧指数(LOI)达到29.1%, 热释放速率峰值(PHRR)、总热释放量(THR)和总烟释放量(TSR)相对PC/ABS分别降低27.4%、21.0%和12.4%, 点燃时间(TTI)、火灾性能指数(FPI)和-40℃缺口冲击强度分别提高5.8%、45.5%和51.8%, 失重速率最大时温度($T_{\max}$)和750℃残炭率(CRC)分别提高5.2℃和3.0%; 在添加了质量分数1% TSQ的PC/ABS中加入SEP, 随着SEP添加量的增大, 复合材料的初始失重温度($T_{5\%}$)、 $T_{\max}$ 和刚性逐渐增大, 韧性逐渐降低, 强度和阻燃性能先上升后下降, 当SEP的质量分数为4%时, 复合材料的阻燃达到UL 94 V-0级(1.5 mm), LOI为34.5%, 与未加SEP的TSQ/PC/ABS复合材料相比, PHRR, THR和TSR分别降低17.1%、22.1%和16.3%, TTI和FPI分别提高5.5%和25.0%, $T_{\max}$ 和CRC分别提高8.5℃和6.7%。

关键词: 聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料; 梯形倍半硅氧烷; 海泡石; 阻燃性能; 低温冲击强度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0051-06

Preparation and properties of trapezoidal silsesquioxane/sepiolite/PC/ABS composites

LIU Hailu, LIU Xiaozhong, XU Juan, LI Xiang

(Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou 412000, China)

Abstract : Halogen-free flame retardant polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (PC/ABS) composites were prepared by twin-screw melt blending. The effects of trapezoidal silsesquioxane (TSQ) and sepiolite (SEP) on flame retardant properties, thermogravimetric and mechanical properties of the composites were studied. The results show that, TSQ can improve the flame retardancy, thermal stability and low temperature toughness of PC/ABS. By adding 1 wt% TSQ to PC/ABS, the flame retardant rating of the composite reaches UL 94 V-0 (3.0 mm) and V-1 (2.0 mm) levels, and the limiting oxygen index (LOI) reaches 29.1%. Compared with PC/ABS, the peak heat release rate (PHRR), total heat release (THR) and total smoke release (TSR) are reduced by 27.4%, 21.0% and 12.4%, respectively, while the ignition time (TTI), fire performance index (FPI) and notched impact strength at -40℃ are increased by 5.8%, 45.5% and 51.8%, respectively, the temperature at maximum weight loss rate ($T_{\max}$) and 750℃ carbon residue (CRC) are increased by 5.2℃ and 3.0%. With the increase of SEP addition, the initial weight loss temperature ($T_{5\%}$), $T_{\max}$ and rigidity of the composites with 1 wt% TSQ gradually increase, the toughness gradually decreases, and the strength and flame retardancy first increase and then decrease. When the addition amount of SEP is 4 wt%, the flame retardant rating of the composite reaches UL 94 V-0 (1.5 mm) level, LOI is 34.5%, compared with TSQ/PC/ABS composite without SEP, the PHRR, THR and TSR are reduced by 17.1%, 22.1% and 16.3%, respectively, TTI and FPI are increased by 5.5% and 25.0%, respectively, $T_{\max}$ and CRC are increased by 8.5℃ and 6.7%, respectively.

Keywords : polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene plastic ; trapezoidal silsesquioxane ; sepiolite ; flame retardancy ; low temperature impact strength

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(21B0871)

通信作者: 李湘, 硕士, 工程师, 主要研究方向为改性塑料、废塑料的循环利用、木塑复合材料

收稿日期: 2024-06-11

引用格式: 刘海路, 刘小忠, 徐娟, 等. 梯形倍半硅氧烷/海泡石/PC/ABS复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 51-56.

LIU Hailu, LIU Xiaozhong, XU Juan, et al. Preparation and properties of trapezoidal silsesquioxane/sepiolite/PC/ABS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 51-56.

尽管聚碳酸酯(PC)具有V-2的阻燃等级,但是丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)易于燃烧,所以PC/ABS的阻燃性能不佳。PC/ABS作为工程塑料主要应用在电器、汽车、电子及玩具等行业^[1-2],而随着社会产品的更新换代,对材料的阻燃要求越来越高,如打印机用PC/ABS要求阻燃等级至少达到V-2级,电视机和笔记本壳用PC/ABS要求阻燃等级达到V-0级^[3],因此如何提高PC/ABS的阻燃等级一直是PC/ABS材料研究的热点之一,也取得了一定的成果^[4-6]。

阻燃效果好的卤系阻燃剂应用广泛^[7-8],但其阻燃的聚合物在燃烧时会释放出对环境不友好的有毒气体,因此逐渐被无卤阻燃剂替代。硼系^[9]、磷系^[10]、硅系^[11]、次膦盐^[12]等是常见的用于阻燃PC/ABS的无卤阻燃剂,其中硅系阻燃剂拥有防止滴落、效率高、容易成炭、抑制生烟等优点,对PC有很好的阻燃效果,但是单独使用时,对PC/ABS阻燃效果不佳。倍半硅氧烷是一种典型的有机硅系阻燃剂,其复配阻燃体系可以有效阻燃PC/ABS^[13],如李湘等^[14]把磷酸三苯酯与倍半硅氧烷阻燃剂添加到PC/ABS中,成功制备了阻燃等级为V-0级的PC/ABS。梯形倍半硅氧烷(TSQ)是倍半硅氧烷的一种,具有极好的耐候性、耐水解性和阻燃持久性。拥有耐高温和良好吸附性的海泡石(SEP)具有独特的孔道结构^[15],在聚合物中加入SEP,不仅使聚合物具有优良的抑烟和阻燃作用^[16],还可以提高聚合物的强度和刚性。如果采用TSQ和SEP的复配阻燃体系可以有效阻燃PC/ABS,那么可为制备高强度、高刚性的无卤阻燃PC/ABS提供参考方案,而目前相关的文献报道较少,因此笔者通过熔融共混在PC和ABS中加入TSQ和SEP等阻燃剂,制备了一系列无卤阻燃PC/ABS复合材料,探讨TSQ和SEP对阻燃PC/ABS的力学性能、热性能和阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC:110,奇美实业股份有限公司;

ABS:8391,中国石化上海高桥石油化工有限公司;

TSQ:FR 9804,广东铨盛化工有限公司;

高胶粉:HR181,韩国锦湖石油化学株式会社;

SEP:5 μm ,工业级,河北宏利海泡石石绒有限公司;

抗滴落剂:SN3300,广州熵能聚合物技术有限公司;

抗氧剂1010、抗氧剂168:德国巴斯夫公司;

季戊四醇硬脂酸酯(PETS):PETS-AP,意大利发基公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:AK36,南京科亚化工成套装备有限公司;

注塑机:UN90SK,广东伊之密机械股份有限公司;

水平垂直燃烧试验仪:HVR-4,广州市新纳电子设备有限公司;

极限氧指数(LOI)测定仪:HC-2C,南京上元分析仪器有限公司;

双柜型锥形量热仪:4100,英国 Testing Technology Limited公司;

热重(TG)分析仪:TAQ50,美国TA仪器公司;

液晶式塑料摆锤冲击试验机:ZBC1400B,美特斯工业系统(中国)有限公司;

万能材料试验机:CT-TCS-2000,中国台湾高铁科技股份有限公司。

1.3 试样制备

按表1配方将各原材料在高速混合搅拌机中混合,然后在双螺杆挤出机上进行熔融共混、冷却切粒,挤出温度为240~260 $^{\circ}\text{C}$,主机转速为420 r/min。造粒后的粒子经注塑机制成测试样条,注塑温度为240~260 $^{\circ}\text{C}$ 。

表1 阻燃PC/ABS复合材料试样配方(质量分数)

Tab. 1 Formulation of flame retardant PC/ABS composite samples (mass fraction)

	%								
Sample	PC	ABS	TSQ	SEP	HR181	SN3300	168	1010	PETS
1 [#]	87.5	8			3	0.3	0.4	0.2	0.6
2 [#]	86.9	8	0.6		3	0.3	0.4	0.2	0.6
3 [#]	86.5	8	1		3	0.3	0.4	0.2	0.6
4 [#]	86.0	8	1.5		3	0.3	0.4	0.2	0.6
5 [#]	85.5	8	1	1	3	0.3	0.4	0.2	0.6
6 [#]	83.5	8	1	3	3	0.3	0.4	0.2	0.6
7 [#]	82.5	8	1	4	3	0.3	0.4	0.2	0.6
8 [#]	81.5	8	1	5	3	0.3	0.4	0.2	0.6

1.4 性能测试

按GB/T 2406.2-2009测定LOI,试样尺寸为150.0 mm×12.8 mm×3.0 mm;

按UL 94垂直燃烧法测试试样的燃烧性能,试样尺寸为128.0 mm×12.8 mm×3.0 mm,128.0 mm×

12.8 mm×2.0 mm和128.0 mm×12.8 mm×1.5 mm;

使用TG分析材料的热失重情况,升温速率10 °C/min,试样质量8 g, N₂气氛,升温范围25~750 °C;

按ISO 5660-1:2015进行锥形量热仪测试,热辐射功率为50 kW/m²,试样尺寸为100 mm×100 mm×3.0 mm;

按GB/T 1040.1-2018测试拉伸性能,样品为1A型,拉伸速度为50 mm/min,取5根样条测试数据的平均值;

按GB/T 9341-2008测试弯曲性能,样品尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,弯曲速度为2 mm/min,取5根样条测试数据的平均值;

按GB/T 1843-2008测试常温和低温(缺口冲击试样置于-40 °C环境下48 h)悬臂梁缺口冲击强度,样品尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,缺口为A型,取5根样条测试数据的平均值。

2 结果与讨论

2.1 TQS和SEP对PC/ABS阻燃性能的影响

表2为阻燃PC/ABS复合材料的LOI和UL 94测试结果。从表2可以看出,在PC/ABS中加入TSQ,复合材料的阻燃性能提高,当TSQ的质量分数为1%时,试样3[#]的阻燃等级达到UL 94 V-0级(3.0 mm)和UL 94 V-1级(2.0 mm),LOI为29.1%,其阻燃性能与4[#](添加质量分数1.5%的TSQ)相差不大。这可能是因为复合材料燃烧时,TSQ可以形成含硅氧键和硅碳键陶瓷类物质,该物质不燃、耐热,覆盖在材料表面,起到隔热和隔气的作用,既能阻止燃烧产生的物质外溢,还能抑制基体材料热分解^[17],同时TSQ在高温下能催化PC表面成炭,从而使复合材料的阻燃性能提高,但TSQ对ABS没有催化成炭作用^[14],所以其对PC/ABS的阻燃性能提高有限,当TSQ添加量超过一定值时,再增加添加量,阻燃效果不明显。

表2 阻燃PC/ABS复合材料的LOI和UL 94测试结果

Tab. 2 LOI and UL94 test results of flame retardant PC/ABS composites

Sample	Sample thickness/mm						LOI/%
	3.0		2.0		1.5		
	UL 94 rating	Whether dripping ignites	UL 94 rating	Whether dripping ignites	UL 94 rating	Whether dripping ignites	
1 [#]	—	YES	—	YES	—	YES	23.5±0.11
2 [#]	V-2 (<i>t</i> ₁ =8.9 s, <i>t</i> ₂ =15.7 s)	YES	—	YES	—	YES	27.2±0.13
3 [#]	V-0 (<i>t</i> ₁ =3.2 s, <i>t</i> ₂ =5.7 s)	NO	V-1 (<i>t</i> ₁ =10.2 s, <i>t</i> ₂ =11.5 s)	NO	—	YES	29.1±0.15
4 [#]	V-0 (<i>t</i> ₁ =3.2 s, <i>t</i> ₂ =5.2 s)	NO	V-1 (<i>t</i> ₁ =9.5 s, <i>t</i> ₂ =11.7 s)	NO	—	YES	29.4±0.15
5 [#]	V-0 (<i>t</i> ₁ =3.0 s, <i>t</i> ₂ =5.1 s)	NO	V-0 (<i>t</i> ₁ =4.5 s, <i>t</i> ₂ =5.2 s)	NO	—	YES	30.2±0.15
6 [#]	V-0 (<i>t</i> ₁ =2.0 s, <i>t</i> ₂ =2.4 s)	NO	V-0 (<i>t</i> ₁ =2.2 s, <i>t</i> ₂ =4.5 s)	NO	V-1 (<i>t</i> ₁ =7.5 s, <i>t</i> ₂ =5.4 s)	NO	33.4±0.17
7 [#]	V-0 (<i>t</i> ₁ =1.8 s, <i>t</i> ₂ =2.1 s)	NO	V-0 (<i>t</i> ₁ =2.0 s, <i>t</i> ₂ =4.3 s)	NO	V-0 (<i>t</i> ₁ =5.2 s, <i>t</i> ₂ =4.3 s)	NO	34.5±0.19
8 [#]	V-0 (<i>t</i> ₁ =3.0 s, <i>t</i> ₂ =4.2 s)	NO	V-0 (<i>t</i> ₁ =4.2 s, <i>t</i> ₂ =4.9 s)	NO	V-2 (<i>t</i> ₁ =10.8 s, <i>t</i> ₂ =9.5 s)	YES	31.3±0.16

Notes: "—" means not meeting minimum level of this test; " t_1 " represents average time of first combustion; " t_2 " represents average time of second combustion.

在3[#]中加入SEP,随着SEP含量的提高,复合材料的阻燃性能先上升后下降,这是因为SEP是纤维状的无机材料,自身不燃、耐高温,添加量较小时,可以很好地分散在复合材料中,一定程度弥补含硅氧键和硅碳键陶瓷层间的空隙,提高陶瓷层的连续性,同时有“骨架”效应^[18],使陶瓷层的坚硬度提高,隔离可燃性气体、氧和热的能力变强,复合材料的阻燃性能提高。但SEP粒径小,比表面积大,添加较多时,其在复合材料中分散变差,对应阻燃效果下降。7[#](SEP的质量分数为4%)的阻燃等级达到UL 94 V-0级(1.5 mm),LOI为34.5%,在3[#]的基础上提高了5.4%,阻燃性能明显变好。

结合表1和表2,3[#]的“性价比”较2[#]和4[#]高,更具研究价值,所以后续不再分析2[#]和4[#]的性能。阻燃PC/ABS的热释放速率(HRR)曲线和总热释放量(THR)曲线如图1和图2所示,相应的点燃时间(TTI)、热释放速率峰值(PHRR)、THR、总烟释放量(TSR)、火灾性能指数(FPI)的数据见表3。

由表3可以看出,3[#]的PHRR (351.8 kW/m²), THR (62.8 MJ/m²)和TSR (1 438.7 m²/m²)相对1[#]分别降低27.4%,21.0%和12.4%,TTI (55 s)和FPI [0.16 (s·m²)/kW]分别提高5.8%和45.5%,这是因为TSQ受热生成的含硅氧键和硅碳键陶瓷层抑制了复合材料的烟释放量和热释放量,限制了燃烧激烈强

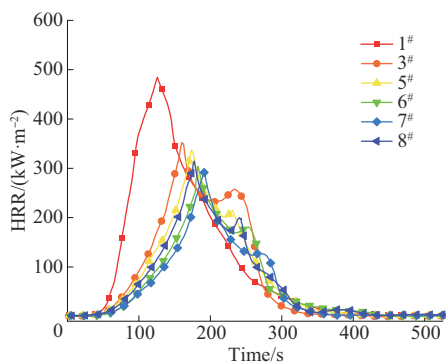


图1 阻燃PC/ABS复合材料的HRR曲线

Fig. 1 Heat release rate curves of flame retardant PC/ABS composites

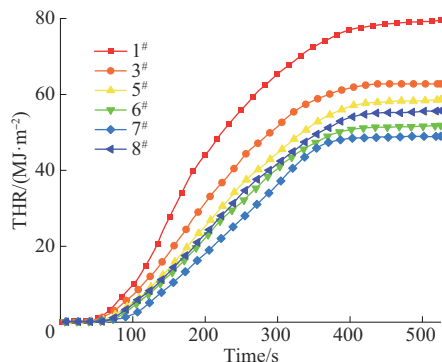


图2 阻燃PC/ABS复合材料的THR曲线

Fig. 2 Total heat release curves of flame retardant PC/ABS composites

表3 阻燃PC/ABS复合材料的锥形量热特征数据

Tab. 3 Cone calorimeter characteristic data of flame retardant PC/ABS composites

Sample	TTI/s	PHRR/(kW·m ⁻²)	THR/(MJ·m ⁻²)	TSR/(m ² ·m ⁻²)	FPI/[(s·m ²)·kW ⁻¹]
1 [#]	52±0.6	484.6±4.7	79.5±2.4	1 643.2±9.8	0.11±0.003
3 [#]	55±0.6	351.8±3.8	62.8±2.2	1 438.7±9.5	0.16±0.005
5 [#]	55±0.5	337.1±3.5	58.6±2.2	1 396.2±9.5	0.16±0.006
6 [#]	57±0.8	303.8±3.2	51.8±1.8	1 256.4±8.7	0.19±0.007
7 [#]	58±0.8	291.5±3.2	48.9±1.8	1 203.8±8.5	0.20±0.007
8 [#]	57±0.7	314.6±3.5	55.7±2.2	1 322.5±9.3	0.18±0.006

度,延长了TTI,复合材料的FPI提高,阻燃性能变好。在3[#]中加入SEP,随着SEP添加量的增大,复合材料的PHRR,THR和TSR先下降后上升,TTI和FPI先增大后减小,7[#]的PHRR (291.5 kW/m²)、THR (48.9 MJ/m²)和TSR (1 203.8 m²/m²)相对3[#]分别降低17.1%,22.1%和16.3%,TTI (58 s)和FPI[0.20 (s·m²)/kW]分别提高5.5%和25.0%,说明SEP可以抑制复合材料的放热量和生烟量,提高FPI,延长TTI,当SEP在复合材料中分散性好时,含硅氧键和硅碳键陶瓷层对热、氧和可燃性气体的阻隔能力强,对应的抑制效果好,反之抑制效果变差,复合材料的阻燃性能下降。

2.2 TQS和SEP对PC/ABS热失重的影响

阻燃PC/ABS复合材料的TG曲线如图3所示,相应特征数据见表4。可以看出,相对1[#],3[#]起始失重温度($T_{5\%}$)相差不大,失重速率最大时温度(T_{max})和750℃残炭率(CRC)分别提高5.2℃和3.0%,这是因为TSQ受热时催化PC成炭,同时生成的含硅氧键和硅碳键陶瓷层可隔离热量,所以 T_{max} 和CRC提高。在3[#]中加入SEP,随着SEP添加量的增大,复合材料的 $T_{5\%}$ 和 T_{max} 逐渐增大,这主要是由于SEP耐高温且有隔热作用。与 $T_{5\%}$ 和 T_{max} 不同,复合材料的CRC随SEP添加量的增加先增大后减小,且实际CRC大于对应的最大理论CRC,这说明SEP提高了含硅氧键和硅碳键陶瓷层的隔热、隔气能力,促进了复合材料高温成炭,当SEP在复合材料中团聚时,高温成炭量减小,实际CRC与最大理论CRC的差值也变小。在3[#]中添加质量分数4%的SEP,复合材料(7[#])的 T_{max} 和CRC相对3[#]分别提高8.5℃和6.7%。

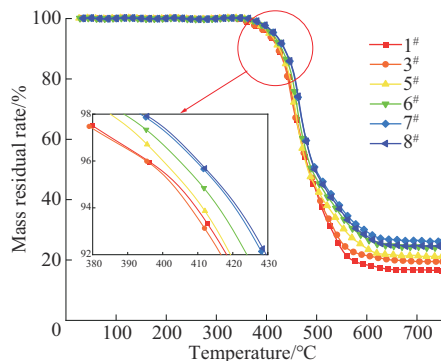


图3 阻燃PC/ABS复合材料的TG曲线

Fig. 3 TG curves of flame retardant PC/ABS composites

表4 阻燃PC/ABS复合材料热失重特征数据

Tab. 4 TG characteristic data of flame retardant PC/ABS composites

Sample	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	750℃ carbon residue (CRC)/%	Maximum theory CRC/%
1 [#]	402.9±4.5	443.5±5.2	16.5±0.10	—
3 [#]	402.1±4.6	448.7±5.4	19.5±0.12	—
5 [#]	405.4±4.5	450.1±5.4	21.2±0.12	20.5±0.12
6 [#]	410.1±4.3	455.5±5.3	24.1±0.14	22.5±0.14
7 [#]	414.9±4.7	457.2±5.5	26.2±0.15	23.5±0.15
8 [#]	415.4±4.5	457.6±5.5	24.6±0.13	24.5±0.13

Note: Maximum theory CRC is equal to sum of 3[#] CRC and mass fraction of SEP added.

2.3 TQS和SEP对PC/ABS力学性能的影响

阻燃PC/ABS复合材料的力学性能见表5。由表5可以看出,相对1[#],3[#]在-40℃的缺口冲击强度(38.7 kJ·m⁻²)提高了51.8%,其他力学性能变化不大,这主要是TSQ是有机硅系阻燃剂,有机硅成分

表5 阻燃PC/ABS复合材料的力学性能数据

Tab. 5 Mechanical properties data of flame retardant PC/ABS composites

Sample	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Flexural modules/MPa	Notched Izod impact strength/(kJ·m ⁻²)	-40 °C Notched Izod impact strength/(kJ·m ⁻²)
1 [#]	65.5±1.8	83.5±2.5	2 430.4±18	82.6±3.2	25.5±1.0
3 [#]	64.7±1.8	83.8±2.3	2 415.7±18	83.7±3.2	38.7±1.5
5 [#]	66.3±2.0	85.4±2.8	2 450.3±17	81.8±3.0	37.2±1.5
6 [#]	69.5±2.2	87.7±3.0	2 520.5±20	78.2±2.8	35.1±1.3
7 [#]	70.8±2.2	89.2±3.2	2 570.4±19	75.4±2.6	31.4±1.2
8 [#]	69.2±2.1	86.5±2.8	2 598.6±22	70.3±2.4	27.5±1.0

玻璃化转变温度低^[2],低温下柔韧性好,有一定的增韧作用。在3[#]中加入SEP,复合材料的拉伸强度和弯曲强度随着SEP含量的上升先增大后减小,弯曲模量逐渐增大,常温和-40 °C缺口冲击强度逐渐降低,这是因为当SEP在复合材料中分散好时,可以有效传递应力,复合材料强度增大,反之则降低,同时SEP会抑制PC/ABS分子链的移动^[18],使刚性提高,但也使延长性和柔韧性降低,故复合材料的弯曲模量上升,缺口冲击强度下降。在3[#]中加入质量分数5%的SEP,复合材料(8[#])的-40 °C缺口冲击强度(27.5 kJ/m²)依然保持在25.0 kJ/m²以上,说明复合材料的低温韧性良好,可满足低温环境下产品的应用需求。

综上所述,利用TSQ和SEP复配的阻燃体系制备的无卤阻燃PC/ABS复合材料,其阻燃等级不仅能达到UL 94 V-0级(1.5 mm),且材料的热稳定性、强度、刚性和低温韧性良好,可广泛应用于大尺寸电视机前框、后壳,电吹风和电表盒底座等。

3 结论

(1) TSQ可以提高PC/ABS的阻燃性,抑制燃烧放热量和放烟量,当TSQ质量分数为1%时,复合材料的阻燃等级达到UL 94 V-1级(2.0 mm),LOI为29.1%。

(2) TSQ对PC/ABS的常温缺口冲击强度、拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量影响不大,但可以大幅提高复合材料的-40 °C缺口冲击强度,同时TSQ可以提高复合材料的 T_{max} 和高温残炭率。

(3)随着SEP添加量的增大,复合材料的阻燃性能先上升后下降,拉伸与弯曲强度先增大后减小,刚性逐渐增大,韧性逐渐降低,当SEP的质量分数为4%时,复合材料的阻燃达到UL 94 V-0级(1.5 mm),LOI为34.5%。

参考文献

[1] 丁步鹏,纪效均,沈圣翔.高刚高韧PC/ABS合金的制备及性能[J].工程塑料应用,2023,51(10):55-61.

DING Bupeng, JI Xiaojun, SHEN Shengxiang. Preparation and properties of PC/ABS alloys with high stiffness and toughness[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10):55-61.

[2] 傅利才,徐启奎,潘永柯,等.高性能PC/ABS合金的制备[J].塑料工业,2021,49(4):65-68,53.

FU Licai, XU Qikui, PAN Yongke, et al. Preparation of high performance PC/ABS alloy[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(4):65-68, 53.

[3] 李湘.螺杆组合对高刚无卤阻燃PC/ABS性能的影响[J].塑料,2021,50(2):48-51,57.

LI Xiang. Effect of screw combinations on high rigidity halogen-free flame retardant PC/ABS performance[J]. Plastics, 2021, 50(2):48-51, 57.

[4] 苑娜娟.高流动耐热阻燃PC/ABS合金的研制[J].广东化工,2023,50(8):38-40.

YUAN Najuan. Preparation study of high flow and flame-retardant PC/ABS alloy[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(8):38-40.

[5] 邵静波,王宇韬,张师军,等.二苯基磷酸酯阻燃PC/ABS合金的制备[J].合成树脂及塑料,2022,39(4):18-21.

SHAO Jingbo, WANG Yutao, ZHANG Shijun, et al. Preparation of BDP-flame retardant PC/ABS alloy[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(4):18-21.

[6] 王百年,吴波,王朋辉,等.PC/ABS合金膨胀型无卤阻燃配方体系开发[J].塑料科技,2022,50(9):30-35.

WANG Bainian, WU Bo, WANG Penghui, et al. Development of PC/ABS alloy expansion halogen-free flame retardant system[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(9):30-35.

[7] 赵吉祥.阻燃剂发展现状与存在问题分析[J].化工设计通讯,2019,45(2):63.

ZHAO Jixiang. Analysis of the development status and existing problems of flame retardants[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(2):63.

[8] 曾星,徐绍娟,李强林.溴系阻燃剂在常见塑料改性中的应用进展[J].塑料,2023,52(1):116-121.

ZENG Xing, XU Shaojuan, LI Qianglin. Application progress of brominated flame retardants in modification of common plastics[J]. Plastics, 2023, 52(1):116-121.

[9] 刘晓亮,杨波,丁正亚,等.硼酸锌阻燃抑烟PC/ABS的研究[J].合成材料老化与应用,2016,45(1):15-18,90.

- LIU Xiaoliang, YANG Bo, DING Zhengya, et al. The effects of zinc borate on the smoke density and flame-retardant PC/ABS alloy [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2016, 45(1): 15–18, 90.
- [10] 李子骞,漆飞,陈谢仁,等.磷系阻燃剂对PC/ABS共混物燃烧性能的影响[J]. *塑料工业*, 2017, 45(6):93–97.
LI Ziqian, QI Fei, CHEN Xieren, et al. Effect of phosphorus flame retardant on combustion behaviors of PC/ABS blends[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(6):93–97.
- [11] 周文君,王雪芹,何伟壮. PC/ABS/聚硼硅氧烷阻燃合金的性能[J]. *化工进展*, 2016, 35(3):861–865.
ZHOU Wenjun, WANG Xueqin, HE Weizhuang. Properties of flame retarded PC/ABS/polyborosiloxane[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(3):861–865.
- [12] 毕伟,柯杨,何为,等.二丙基次磷酸铝对PC及PC/ABS的阻燃作用[J]. *现代塑料加工应用*, 2015, 27(4):39–41.
BI Wei, KE Yang, HE Wei, et al. Flame-retardant effect of aluminium dipropylphosphinate in PC and PC/ABS[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2015, 27(4):39–41.
- [13] 李湘,殷洁,方松刚,等. PC/ABS/VMT/倍半硅氧烷阻燃性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(9):135–138.
LI Xiang, YIN Jie, FANG Songgang, et al. Study on flame retardant properties of PC/ABS/VMT/sesquioxane[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(9):135–138.
- [14] 李湘,方松刚,殷洁,等. TPP与倍半硅氧烷阻燃剂对PC/ABS的性能影响[J]. *高分子通报*, 2021(11):30–34.
LI Xiang, FANG Songgang, YIN Jie, et al. Effects of TPP and sesquioxane flame retardants on PC/ABS performances[J]. *Chinese Polymer Bulletin*, 2021(11):30–34.
- [15] 田银彩,王延伟,杨秀琴,等. PP/海泡石复合材料的制备及性能表征[J]. *塑料*, 2017, 46(4):9–11.
TIAN Yincui, WANG Yanwei, YANG Xiuqin, et al. Preparation and characterization of PP/sepiolite composite[J]. *Plastics*, 2017, 46(4):9–11.
- [16] LI W X, LI S X, CHENG Z, et al. The effect of flame retardant-modified sepiolite nanofibers on thermal degradation and fire retardancy of low-density polyethylene[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 138(2):1 011–1 019.
- [17] 高峰,韦平,李林科,等. 硅系阻燃剂阻燃PC及PC/ABS复合材料研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(5):103–106.
GAO Feng, WEI Ping, LI Linke, et al. Research progress of silicone-containing flame retardant in PC and PC/ABS composites [J]. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(5):103–106.
- [18] 刘小忠,李湘. K-SEP对R-PET/AHP复合材料性能的影响[J]. *塑料科技*, 2023, 51(9):79–83.
LIU Xiaozhong, LI Xiang. Effect of K-SEP on properties of R-PET/AHP composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(9):79–83.