

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.024

阻燃剂类型对聚碳酸酯阻燃性能的影响

邵景昌^{1,2,3}, 汪洋², 张德权², 付俊祺², 李斯良², 许凌峰²

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201; 2. 公牛集团股份有限公司, 浙江宁波 315311; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 分别选用溴化齐聚物、磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯阻燃剂对聚碳酸酯(PC)进行阻燃改性,研究了阻燃剂类型对PC阻燃性能的影响,同时探讨了试样厚度对阻燃性能测试结果的影响。结果表明,溴化齐聚物提升了PC的灼热丝起燃温度(GWIT),磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯降低了PC的GWIT;成炭对起燃的影响远小于热分解,决定GWIT高低的因素是热分解温度,热分解温度越高,GWIT越高。磺酸盐分解的SO₂促使PC交联形成的产物为层碳或石墨化结构,不仅隔热、隔氧、阻止气体流通,还具有导电性,是真炭层,磺酸盐阻燃改性PC的相比电痕化指数由纯PC的175 V降低至150 V;聚硅氧烷混合物、磷酸酯及其分解物形成的“炭层”仅具有类似炭层的作用,无导电性,对PC的电痕化性能无影响。添加四种阻燃剂后PC的灼热丝可燃性指数、垂直燃烧等级均有不同程度的提升,针焰试验结果变好。随着试样厚度增加,溴化齐聚物阻燃PC的GWIT升高,磺酸盐和磷酸酯阻燃PC的GWIT降低,聚硅氧烷混合物阻燃PC的GWIT无明显变化。随着试样厚度增加,四种阻燃剂阻燃PC的其它阻燃性能整体变好,但磷酸酯阻燃PC的垂直燃烧等级仍为V-1级。

关键词: 聚碳酸酯; 阻燃剂类型; 阻燃性能; 灼热丝试验; 垂直燃烧试验; 针焰试验; 厚度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0130-05

Effect of Flame Retardant Type on Flame Retardancy of Polycarbonate

Shao Jingchang^{1,2,3}, Wang Yang², Zhang Dequan², Fu Junqi², Li Siliang², Xu Lingfeng²

(1. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China; 2. Gongniu Group Co. Ltd., Ningbo 315311, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The flame retardancy of polycarbonate (PC) was studied by adding various flame retardants, such as brominated oligomer, sulfonate, polysiloxane mixture and phosphate flame retardants. Besides, the influences of the thickness of the sample on flame retardancy were discussed. The results show that, the glow wire ignition temperature (GWIT) of PC is increased by brominated oligomer and decreased by sulfonate, polysiloxane mixture, phosphate. The main factor that determines the level of GWIT is thermal decomposition temperature, the impact of which on ignition largely outweighs that of char formation. The higher the thermal decomposition temperature is, the higher the GWIT is. The SO₂ decomposed from sulfonate promotes the cross-linking of PC to form a layered carbon or graphitized structure, which not only insulates heat, oxygen, and prevents gas flow, but also has electrical conductivity. It should be noticed that the char layer is real, and the comparative tracking index (CTI) of PC is reduced from 175 V to 150 V by adding sulfonate flame retardant. The “char layer”, formed by the polysiloxane mixture or phosphate and its decomposition products, only has a part of function of char layer. There is no influence on conductivity and CTI in the “char layer” for flame retardant modified PC. All four kinds of flame retardants can improve the burning resistance of PC, in terms of the glow wire flammability index (GWFI), vertical burning level, and needle flame test result. As the thickness of the sample increases, the GWIT of the flame retardant modified PC is increased by adding brominated oligomer and reduced by sulfonate and phosphate, while the GWIT of PC flame retarded by polysiloxane mixture has no obvious change. With the increase of sample thickness, there is an overall rise in the GWFI, vertical burning rating, and needle test result of PC with adding brominated oligomer, sulfonate, polysiloxane mixture, and phosphate, but the vertical burning rating of the phosphate flame retarded PC is still V-1.

Keywords: polycarbonate; flame retardant type; flame retardancy; glow wire test; vertical burning test; needle flame test; thickness

通信作者: 邵景昌, 工程师, 同等学力博士生, 主要从事塑胶材料的研发和应用开发工作 E-mail: shaojc@gongniu.cn

收稿日期: 2019-12-30

引用格式: 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.

聚碳酸酯(PC)因具备优良的力学、耐候、耐热和电绝缘性能被广泛应用于电工电子产品中^[1]。PC自身具有一定的阻燃性,垂直燃烧等级可达V-2级,但在带USB接口的插座等信息技术设备外壳上应用时要求满足V-1及以上等级,此时需向PC添加阻燃剂进行改性。PC阻燃改性按照阻燃剂是否含有卤素分为含卤阻燃和无卤阻燃,其中含卤阻燃剂通常为溴系阻燃剂,无卤阻燃剂分含硫阻燃剂、含硅阻燃剂和含磷阻燃剂^[2]。溴化碳酸酯齐聚物与PC有较好的相容性,阻燃效果好,但高温下铁容易催化含溴阻燃剂分解,螺杆和模具易被腐蚀产生黑点,白色外观产品上不能使用,且含溴阻燃剂燃烧时产生有毒有害气体危害环境和人类健康,一些行业已开始逐渐限制其使用。某些磺酸盐对PC的阻燃非常有效,较小的添加量即可显著提升PC的阻燃性能,且对材料的透明度和热性能影响小。采用聚硅氧烷等含硅阻燃剂改性PC具有阻燃性能优异、加工性能良好、环境友好等特点,但含硅阻燃剂成本较高且影响材料的焊接强度和包胶效果。适用于PC的含磷阻燃剂多为相对分子质量较高的有机磷酸酯,但含磷阻燃剂易水解且降低材料的耐热性能,应用受到一定限制。有关PC阻燃改性的研究报道多聚焦于上述一类或一种阻燃剂^[3-4],较少对比不同类型阻燃剂对PC阻燃性能的影响。

除外部火源引燃外,电工电子产品使用过程中因接触不良、过载、短路等引起的过热也是导致火灾发生的重要原因。起燃是燃烧过程的重要阶段,它既是燃烧的引发阶段,也是燃烧蔓延的关键过程。认识和掌握聚合物的起燃过程和机理十分重要,对研究聚合物燃烧理论与模型、研究阻燃机理均是不可缺少的重要基础^[5]。灼热丝试验用来模拟过载电阻之类的热源短时间所造成的热应力,用来评定着火的危险性,其中灼热丝起燃温度(GWIT)用于评估材料的起燃特性,灼热丝可燃性指数(GWFI)与垂直燃烧试验、针焰试验类似,用于评估材料起燃后的燃烧和熄灭特性^[6]。PC阻燃改性的研究多采用垂直燃烧试验评定,同时利用灼热丝、垂直燃烧和针焰试验方法测试阻燃性能的文献较少。

笔者分别选用苯氧基封端四溴双酚A碳酸酯齐聚物(溴化齐聚物)、三氯苯磺酸钠(磺酸盐)、聚硅氧烷+稳定剂+烷基苯磺混合物(聚硅氧烷混合物)和间苯二酚双二(2,6-二甲基苯基)磷酸酯(磷酸酯)对PC进行阻燃改性,研究了阻燃剂类型

对PC阻燃性能以及试样厚度对阻燃性能测试结果的影响,采用灼热丝、垂直燃烧和针焰三种试验方法评价材料的阻燃性能,重点探讨了各阻燃剂对PC GWIT的影响以及起燃机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PC:PC-110,奇美实业股份有限公司;
溴化齐聚物:BC-58,美国科聚亚公司;
磺酸盐:STB-FR,美国 Arichem 公司;
聚硅氧烷混合物:MR-01,日本钟渊公司;
磷酸酯:PX220,浙江万盛股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机:SHJ-36型,南京杰亚挤出装备有限公司;

注塑机:HT-250型,海天塑机集团有限公司;

热重(TG)分析仪:TG 209 F3型,德国耐驰集团;

灼热丝试验仪:SH5141A型,广州信禾电子科技有限公司;

耐电痕化指数试验仪:YH-8902PT型,东莞市越铎电子科技有限公司;

水平垂直燃烧试验仪:SH5300型,广州信禾电子科技有限公司;

针焰试验仪:SH5441A型,广州信禾电子科技有限公司。

1.3 试样制备

将PC在100℃鼓风干燥箱中干燥4h,然后将干燥后的材料和阻燃剂按照表1配方(参考有关文献研究和阻燃剂使用说明,选择阻燃剂最佳用量)在高速混合机中混合,再加入双螺杆挤出机中挤出、冷却、切粒,挤出机温度为280~300℃,转速为300~400 r/min。将制得的粒料经注塑机注塑成标准试样,注塑温度为260~300℃,注塑压力为110 MPa。

表1 阻燃PC各组分质量分数 %

试样编号	PC	溴化齐聚物	磺酸盐	聚硅氧烷混合物	磷酸酯
PC	100				
Br-PC	92	8			
S-PC	99.5		0.5		
Si-PC	98			2	
P-PC	90				10

1.4 测试与表征

(1) TG测试。

用无水乙醇将5 mg样品粒子表面处理干净,

从室温升温至 750℃,升温速率为 10℃/min,氮气氛围。

(2) 相比电痕化指数 (CTI) 测试。

CTI 按照 GB/T 4207-2012 测试,选用溶液 A,50 滴液滴期间未电痕化失效和不发生持续燃烧为判定标准,试样厚度 3 mm。

(3) 阻燃性能测试。

各阻燃性能测试的试样厚度为 1,2,3 mm。

GWIT 按照 GB/T 5169.13-2013 测试。

GWFI 按照 GB/T 5169.12-201 测试。

垂直燃烧等级按照 GB/T 5169.16-2017 测试。

针焰试验按照 GB/T 5169.5-2008 进行,火焰持续施加时间 30 s,火焰施加位置参照该标准文件中的图 1b。

2 结果与讨论

2.1 阻燃剂类型对 PC GWIT 的影响

图 1 是试样厚度为 2 mm 时 PC 及阻燃 PC 的 GWIT 测试结果。由图 1 看出,相比纯 PC,磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯改性 PC 的 GWIT 降低,溴化齐聚物改性 PC 的 GWIT 则明显升高。聚合物受热时分解出可燃性气体,当可燃性气体浓度足够大、物系温度足够高时起燃^[7]。灼热丝测试试验程序就是聚合物与灼热丝接触受热分解,达到条件起燃并燃烧的过程,决定起燃快慢的因素有聚合物分解的可燃性气体和物系热传导^[8]。

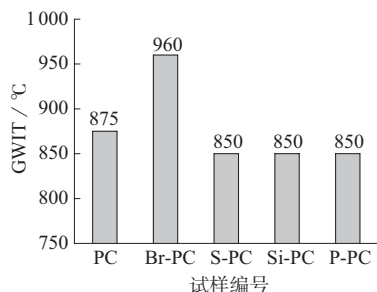


图 1 PC 及阻燃 PC 的 GWIT

F. Acquasanta 等^[9]研究认为,不同类型聚合物的 GWIT 不仅与聚合物的分解温度有关,还与分解的可燃性气体自燃温度和可燃性气体浓度范围有关。聚合物的分解温度越低,可燃性气体的自燃温度越低,可燃性气体浓度范围越宽,聚合物越容易起燃。各试样的基体均为 PC,可燃性气体自燃温度和可燃性气体浓度范围相同,因此 GWIT 只与分解温度有关。各 PC 的 TG 和 DTG 测试曲线如图 2 和图 3 所示。图 2 和图 3 显示,磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯阻燃剂降低了 PC 的热分解温度,即在

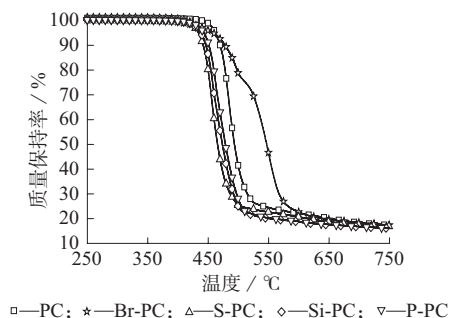


图 2 PC 及阻燃 PC 的 TG 曲线

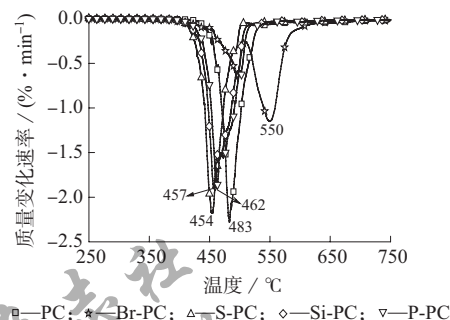


图 3 PC 及阻燃 PC 的 DTG 曲线

较低温度下即可分解出足够的可燃性气体而起燃。溴化齐聚物阻燃 PC 则相反,溴化齐聚物显著提升了 PC 的热分解温度,需达到较高的温度才可以分解足够的可燃气体的。

材料燃烧时,含硫、含硅和含磷阻燃剂主要在凝聚相中发挥作用^[10-11]。含硫阻燃剂分解的 SO₂ 气体可促进 PC 的异构和 Fries 重排,PC 交联在燃烧表面形成炭层。含硅阻燃剂在高温下易迁移到材料表面,形成—Si—O—或—Si—C—致密结构,在材料表面起到类似炭层的作用。含磷阻燃剂受热形成含磷酸和磷酸酐,具有较强的脱水作用且非常粘稠,覆盖在材料表面也可起到类似炭层的作用。这些炭层或类似炭层的结构都具有隔热作用,影响起燃过程的热传导^[12]。但炭层或类似炭层的结构对热传导的作用未对 GWIT 造成明显影响,可能是因为灼热丝推进到试样表面并穿过程中炭层或类似炭层的结构被破坏^[9]。结合聚合物分解的可燃性气体因素可以判定影响 PC 起燃快慢的主要因素是热分解温度,即相比成炭对热传导的影响,决定 GWIT 的主要因素是材料的热分解温度。

M. Bundy 等^[13]对 7 类 19 种不同型号工程塑料的 GWIT 和锥形量热仪法耐燃测试结果进行对比研究,发现 GWIT 与锥形量热仪法耐燃测试中的起燃时间 (t_{ig}) 成正比。聚合物锥形量热仪法耐燃测试的有关研究建立了理论模型 [见式 (1)],将 t_{ig} 与

导热系数(k)、密度(ρ)、热容量(c)、起燃温度(T_{ig})、环境温度(T_0)、热通量(F_H)和起燃临界热通量(F_{CH})进行了关联^[14-15]。热扩散速率(δ)与 ρ 和 c 关系见式(2)^[16],换算后的理论模型见式(3)。笔者制备的各类PC在该理论模型中的主要变量是 δ 和 F_{CH} 。由上述分析得知影响PC起燃快慢的主要因素是热分解温度,热分解温度越高,起燃需要的 F_{CH} 越大, t_{ig} 越高。与GWIT测试 results 和 M. Bundy 等^[13]的研究结论一致,进一步说明热分解温度是影响GWIT的主要因素。

$$t_{ig} = \frac{\pi k \rho c}{4} \left(\frac{T_{ig} - T_0}{F_H - F_{CH}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\delta = k / \rho c \quad (2)$$

$$t_{ig} = \frac{\pi \rho^2 c^2 \delta}{4} \left(\frac{T_{ig} - T_0}{F_H - F_{CH}} \right)^2 \quad (3)$$

含硫阻燃剂高温下分解的 SO_2 促使PC交联形成的炭层是PC不完全燃烧或受热分解得到的层碳或石墨化结构^[17]。含硅、含磷阻燃剂及其高温下的分解物形成的“炭层”仅具有炭层的作用,但无碳成分。为证明该观点,测试了阻燃改性前后各PC的CTI,如图4所示。由图4可以看出,仅磺酸盐阻燃PC的CTI值由175 V降低至150 V,溴化齐聚物、聚硅氧烷混合物和磷酸酯阻燃PC的CTI值未发生变化。即磺酸盐分解的 SO_2 促使PC交联形成的炭层不仅隔热、隔氧、阻止气体流通,还具有导电性,而聚硅氧烷混合物、磷酸酯及其分解物形成的“炭层”仅具有类似炭层的作用,无导电性。

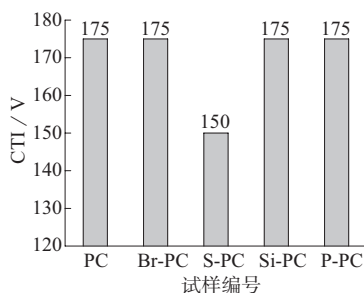


图4 PC及阻燃PC的CTI

2.2 阻燃剂类型对PC其它阻燃性能的影响

表2列出试样厚度为2 mm时各PC的GWFI、

垂直燃烧、针焰测试结果和部分详细数据。由表2可以看出,虽然磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯降低了PC的GWIT,但它们与溴化齐聚物均可提升PC的耐燃烧性能。另外,表2显示,针对不同阻燃试验测试方法,四种阻燃剂的阻燃效果表现有差异。阻燃剂一定添加量下,溴化齐聚物和磺酸盐阻燃PC可同时满足GWFI 960℃、垂直燃烧等级V-0级和通过针焰试验测试的要求。聚硅氧烷混合物阻燃PC在垂直燃烧等级达到V-0级和通过针焰试验测试的情况下,GWFI仅达到930℃。磷酸酯阻燃PC在GWFI 960℃及通过针焰试验测试情况下,垂直燃烧等级仍停留在V-2级。磷酸酯阻燃PC在明火引燃的垂直燃烧和针焰试验中未能改善PC的燃烧滴落,滴落物引燃垂直燃烧试验中的铺垫物脱脂棉,但未引燃针焰试验中的铺垫物纸巾。

表2 试样厚度为2 mm时各PC GWFI、垂直燃烧和针焰测试结果

试样 编号	GWFI			垂直燃烧				针焰		
	$\bar{t}_i$ / s	$\bar{t}_e$ / s	D I	T / ℃	$\bar{t}_{1,2}$ / s	D I	R_1	$\bar{t}_b$ / s	D I	R_2
PC	0	0	否 否	850	10.3	是 是	V-2	14.3	是 是	否
Br-PC	14.7	17	否 否	960	2.7	否 否	V-0	2.3	否 否	是
S-PC	0.1	37	否 否	960	1.7	否 否	V-0	1.0	否 否	是
Si-PC	0.2	47	否 否	930	4.1	否 否	V-0	4.2	否 否	是
P-PC	0.2	33	否 否	960	2.8	是 是	V-2	2.0	是 否	是

注: $\bar{t}_i$ 代表3个试样从灼热丝顶端施加到试样开始至试样或位于试样下方铺垫物起燃的平均持续时间, $\bar{t}_e$ 代表3个试样从灼热丝顶端施加到试样开始至所有火焰熄灭的平均持续时间, $\bar{t}_{1,2}$ 代表5个试样两次施加火焰后的平均余焰时间, $\bar{t}_b$ 代表3个试样或铺垫物从移开试验火焰开始至完全熄灭的平均持续时间;D、I分别代表是否存在滴落以及是否引燃铺垫物; T 为GWFI的测试值, R_1 为垂直燃烧等级, R_2 代表是否通过针焰测试。

2.3 试样厚度对PC阻燃性能测试结果的影响

表3列出不同试样厚度下各PC的阻燃性能测试结果。由表3可以看出,随着试样厚度增加,磺酸盐和磷酸酯阻燃PC的GWIT降低,溴化齐聚物阻燃PC的GWIT升高,聚硅氧烷混合物阻燃PC的GWIT无明显变化;随着试样厚度增加,四种阻燃剂阻燃PC的GWFI、垂直燃烧等级整体上升高,针焰试验结果变好。试样厚度为3 mm时,四种阻燃PC的GWFI均达到960℃且均通过针焰试验测试,但磷酸酯阻燃PC的垂直燃烧等级仍为V-1级。试样厚度增加,灼热丝周边单位体积内聚合物质量增加,

表3 不同试样厚度下各PC阻燃性能测试结果

试样 编号	GWIT / ℃			GWFI / ℃			垂直燃烧等级			是否通过针焰测试		
	1 mm	2 mm	3 mm	1 mm	2 mm	3 mm	1 mm	2 mm	3 mm	1 mm	2 mm	3 mm
PC	875	875	850	850	850	850	V-2	V-2	V-2	否	否	否
Br-PC	930	960	960	960	960	960	V-2	V-0	V-0	是	是	是
S-PC	850	850	825	960	960	960	V-0	V-0	V-0	是	是	是
Si-PC	850	850	850	875	930	960	V-2	V-0	V-0	否	是	是
P-PC	875	850	850	960	960	960	V-2	V-2	V-1	是	是	是

磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯阻燃 PC 在较低温度下即可产生足够多引起燃烧的可燃性气体,因此随着厚度增加, GWIT 降低。溴化齐聚物阻燃 PC 在灼热丝周边单位体积内存在更多的阻燃剂,热分解需要更高的温度, GWIT 升高。随着试样厚度的增加,试样含有更多的阻燃剂,可以更快地阻断和终止燃烧,耐燃烧性能表现整体得到提升。

3 结论

(1) 磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯阻燃剂降低了 PC 的 GWIT,溴化齐聚物阻燃剂提升了 PC 的 GWIT。相较于热传导,热分解是影响 PC 起燃温度的主要因素,热分解温度越高,分解足够的可燃性气体越困难, GWIT 越高。

(2) 磺酸盐分解的 SO_2 促使 PC 交联形成的产物含有效碳成分,不仅隔热、隔氧、阻止气体流通,还具有导电性,是真炭层,磺酸盐阻燃改性 PC 的 CTI 由纯 PC 的 175 V 降低至 150 V。聚硅氧烷混合物、磷酸酯阻燃剂及其分解物形成的“炭层”仅具有类似炭层的作用,无导电性,对阻燃改性 PC 的电痕化性能无影响。

(3) 磺酸盐、聚硅氧烷混合物和磷酸酯阻燃剂虽然降低了 PC 的 GWIT,但与溴化齐聚物阻燃剂一样都可提升 PC 的耐燃烧性能, GWFI、垂直燃烧等级均有不同程度提升,且均通过针焰测试。

(4) 随着试样厚度增加磺酸盐和磷酸酯阻燃 PC 的 GWIT 降低,溴化齐聚物阻燃 PC 的 GWIT 升高,聚硅氧烷混合物阻燃 PC 的 GWIT 无明显变化。随着试样厚度增加,磺酸盐、聚硅氧烷混合物、磷酸酯和溴化齐聚物阻燃改性 PC 的 GWFI、垂直燃烧等级整体升高,针焰试验测试结果变好,但磷酸酯阻燃 PC 的垂直燃烧等级仍为 V-1 级。

参考文献

- [1] Brunelle D J. Polycarbonates[M]//Encyclopedia of polymer science and technology. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2006: 1-33.
- [2] Levchik S V, Weil E D. Overview of recent developments in the flame retardancy of polycarbonates[J]. Polymer International, 2005, 54(7): 981-998.
- [3] Wen W Q, Guo J W, Zhao X, et al. Synthesis of an efficient S / N-based flame retardant and its application in polycarbonate[J]. Polymers, 2018, 10(4). DOI: 10.3390/polym10040441.
- [4] Chao C Y, Gao M. Flame retardancy and thermal properties of octavinylsilsesquioxane / polycarbonate composites[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 128(2): 1125-1132.
- [5] Quintiere J G. Fundamentals of fire phenomena[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [6] da Silva Ribeiro S P, de Moura Estevão L R, Veiga Nascimento R S. Glow-wire evaluation of polymeric materials for the electric sector: Effect of the interlayer spacing of montmorillonite[J]. Applied Clay Science, 2017, 143: 399-407.
- [7] Torero J L. Flaming ignition of solid fuels[M]//SFPE handbook of fire protection engineering[M]. New York: Springer, 2016: 633-661.
- [8] 张军, 纪奎江, 夏延致. 聚合物燃烧与阻燃技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Zhang Jun, Ji Kuijiang, Xia Yanzhi. Polymer combustion and flame retardant technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [9] Acquasanta F, Berti C, Colonna M, et al. Study of glow wire ignition temperature (GWIT) and comparative tracking index (CTI) performances of engineering thermoplastics and correlation with material properties[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(4): 566-573.
- [10] Nazir R, Gaan S. Recent developments in P(O/S)-N containing flame retardants[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(1). DOI: 10.1002/app.47910.
- [11] Mohammadia A, Wang D Y, Hosseini A S, et al. Effect of intercalation of layered double hydroxides with sulfonate-containing calix[4] arenes on the flame retardancy of castor oil-based flexible polyurethane foams[J]. Polymer Testing, 2019, 79. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106055.
- [12] Wang Z J, Liu Y F, Li J. Regulating Effects of nitrogenous bases on the char structure and flame retardancy of polypropylene / intumescent flame retardant composites[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(3): 2375-2383.
- [13] Bundy M, Ohlemiller T. Bench-scale flammability measures for electronic equipment: NISTIR 7031[R]. Gaithersburg: NIST, 2003: 1-18.
- [14] Fina A, Camino G. Ignition mechanisms in polymers and polymer nanocomposites[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2010, 22(7): 1147-1155.
- [15] Safronava N, Lyon R E, Crowley S, et al. Effect of moisture on ignition time of polymers[J]. Fire Technology, 2014, 51(5): 1093-1112.
- [16] Hallman J R, Welker J R, Sliepcevich C M. Ignition times for polymers[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1976, 6(1): 1-56.
- [17] Cheng B F, Zhang W C, Li X M, et al. The study of char forming on OPS / PC and DOPO-POSS / PC composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(4). DOI: 10.1002/APP.39892.

欢迎投稿、欢迎订阅、欢迎刊登广告