

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.11.022

硅烷偶联剂改性APP类膨胀阻燃剂及其对 阻燃聚乙烯性能的影响

钟志强^{1,2,3}

(1.重庆科聚孚新材料有限责任公司,重庆 401332; 2.重庆市高性能工程塑料工程技术研究中心,重庆 401332;
3.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037)

摘要:在不影响聚磷酸铵(APP)类膨胀阻燃剂TC100阻燃效果的情况下,为提高其耐水性和与聚乙烯(PE)的相容性,采用有机硅烷低聚物硅烷偶联剂(KH6202)对APP类膨胀阻燃剂TC100进行表面改性,再将改性后的TC100用于PE阻燃改性,并通过接触角测量仪、垂直燃烧仪、极限氧指数(LOI)测定仪、傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪、扫描电子显微镜(SEM)及万能试验机等对KH6202改性TC100及其阻燃PE的耐水、阻燃、相容性和力学性能进行了表征与分析。结果表明,在表面改性温度为160℃时,添加TC100和KH6202总质量1%的KH6202,TC100水接触角由0°提升到表面改性后的150.0°,且其阻燃PE经恒定湿热加速测试1 000 h后未析出,浸水测试后失重率降低到0.21%。表面改性同时改善了TC100和PE之间的相容性,提高了阻燃PE的力学性能,且SEM照片显示,表面改性后的TC100和PE基体相容为一体,未见两者间界面。FTIR分析显示TC100的表面成功改性接枝了KH6202。同时,表面改性后的TC100添加到PE中,阻燃PE经恒定湿热加速和浸水测试后垂直燃烧等级仍可保持V-0级,LOI略有降低。

关键词:膨胀阻燃剂;耐水性;表面改性;聚乙烯;阻燃性能

中图分类号: TQ314.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)11-0139-07

Silane Coupling Agent Modified APP Intumescent Flame Retardant and Its Effect on Properties of Flame Retardant PE

Zhong Zhiqiang^{1,2,3}

(1. Chongqing Copolyforce New Material Co., Ltd., Chongqing 401332, China; 2. Chongqing Engineering Technology Research Center of High Performance Engineering Plastics, Chongqing 401332, China; 3. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract : In order to improve the water resistance ammonium polyphosphate (APP) and its compatibility with polyethylene (PE) without affecting the flame retardant effect of APP intumescent flame retardant TC100, organic silane oligomer silane coupling agent (KH6202) was used to modify the surface of TC100, and then the surface modified TC100 was used for flame retardant modification of PE. The water resistance, flame retardancy, compatibility and mechanical properties of TC100 modified by KH6202 and its flame retardant PE were characterized and analyzed by contact angle meter, vertical combustion meter, limiting oxygen index (LOI) meter, Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), scanning electron microscope (SEM) and universal testing machine. The results show that, when the surface modification temperature is 160 °C and 1wt% KH6202 of the total mass of TC100 and KH6202 is added, the water contact angle of TC100 increases from 0° to 150.0° after surface modification, and its flame retardant PE doesn't precipitate after 1 000 hours of steady damp heat acceleration test, and the weight loss rate decreases to 0.21% after immersion test. The surface modification improves the compatibility between TC100 and PE, and improves the mechanical properties of flame retardant PE. The SEM images show that the surface modified TC100 and PE matrix are compatible, and there is no interface between them. FTIR analysis shows that KH6202 is successfully grafted onto the surface of TC100. At the same time, when the surface modified TC100 is added to PE, the vertical combustion level of the flame retardant PE can still maintain V-0 after damp heat and immersion test, and the LOI decreases slightly.

Keywords : intumescent flame retardant ; water resistance ; surface modification ; polyethylene ; flame retardancy

基金项目: 重庆市技术预见与制度创新项目(CSTB2022TFII-OFX0029), 重庆英才计划“包干制”项目(CQYC20210309902)

通信作者: 钟志强, 硕士研究生, 主要从事环保阻燃剂合成和高分子材料改性的理论与应用研究

收稿日期: 2022-07-19

引用格式: 钟志强. 硅烷偶联剂改性APP类膨胀阻燃剂及其对阻燃聚乙烯性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(11): 139-145.

Zhong Zhiqiang. Silane coupling agent modified APP intumescent flame retardant and its effect on properties of flame retardant PE[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11): 139-145.

聚乙烯(PE)作为用途非常广泛的聚烯烃塑料^[1],是当前塑料中用量最大的热塑性塑料,具有优异的耐寒性、介电性能、化学稳定性和易加工性等,广泛应用于医疗、电线电缆、薄膜、管材、包装、容器、日用品等制品^[2-3]。然而,PE的极限氧指数(LOI)仅为17%~18%,遇明火会持续燃烧,为易燃材料,且燃烧迅速、发热发烟、易滴落^[4-5]。因此,为了扩大PE应用范围,需要对其进行阻燃改性。PE阻燃改性通常会采用各种类型的阻燃剂,如卤系阻燃剂^[6-7]、膨胀型阻燃剂(IFR)^[8-9]、磷系阻燃剂^[10-11]、金属氢氧化物^[12-13]等。传统的IFR由磷、氮含量高且成本低的聚磷酸铵(APP)、成炭剂和协效剂组成,体系中APP和成炭剂富含羟基,具有较强的吸湿性、与聚烯烃相容性不佳、易从高分子材料中析出、抗水解性差等缺点,而传统微胶囊化包覆、偶联剂改性和表面活性剂及超细化改性等改性技术,仍存在影响阻燃、力学性能或不能解决耐析出等问题^[14-15],因此对以APP为主要成分的APP型IFR进行表面改性研究仍然非常必要。

为了进一步提高APP类膨胀阻燃剂耐水性和相容性,拓展其应用领域,笔者以含非亲水性烷基官能团的有机硅烷低聚物硅烷偶联剂对富含羟基的APP类IFR进行表面改性处理,考察了表面改性APP类IFR对阻燃PE的阻燃性能、耐水性能、力学性能和相容性的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

去离子水:自制;

PE: DFDA-7042, 中石油四川石化有限责任公司;

抗滴落剂: 911, 惠源(上海)化工有限公司;

抗氧剂: 1010, 168, 巴斯夫化工有限公司;

有机硅烷低聚物硅烷偶联剂: KH6202, 杭州杰西卡化工有限公司;

APP类IFR: TC100, 重庆科聚孚新材料有限责任公司。

1.2 主要设备及仪器

超纯水机: QYY5-20 A型, 重庆前沿水处理设备有限公司;

双螺杆挤出机: TE-35型, 江苏科亚化工装备有限公司;

注塑机: SZ-90型, 广东东华机械有限公司;

微机控制电子万能试验机: CMT-4204型, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

摆锤冲击试验机: ZBC8400-B型, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

自动型接触角测量仪: CA-200型, 广东北斗精密仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): Hitachi Regulus8100型, 日立科学仪器(北京)有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nicolet iS20型, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

智能LOI分析仪: TTech-GBT2406-2型, 泰思泰克(苏州)检测仪器科技有限公司;

水平垂直燃烧试验箱: CZF-3型, 南京江宁区分析仪器厂。

1.3 试样制备

(1) APP类IFR(TC100)的表面改性。

首先,将未处理TC100(记为TC100-W)加入到高速混合机中,并预热至设定温度;然后采用喷雾加料器从顶端缓慢加入稀释的偶联剂(将KH6202质量分数定义为其占TC100-W和KH6202总质量的百分数,并将其和去离子水按照质量比1:3复配),高速搅拌反应30 min后,置于真空烘箱中在室温下冷却,得到表面改性后的TC100,其表面改性样品配方及改性温度见表1,表面改性过程如图1所示。

表1 KH6202表面改性TC100配方及改性温度

样品编号	TC100-W质量 分数/%	KH6202质量分 数/%	改性温度/℃
TC100-1 [#]	99.5	0.5	100
TC100-2 [#]	99.0	1.0	100
TC100-3 [#]	98.0	2.0	100
TC100-4 [#]	99.0	1.0	130
TC100-5 [#]	99.0	1.0	160
TC100-6 [#]	99.0	1.0	190

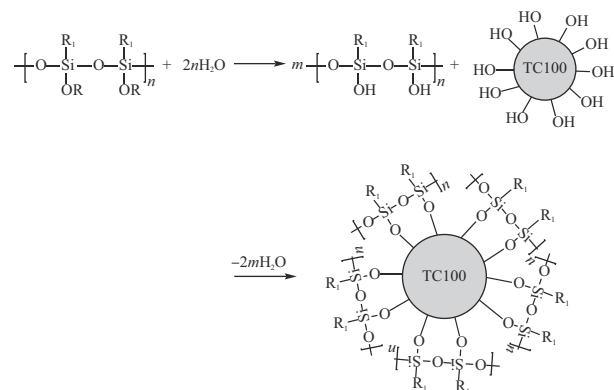


图1 KH6202表面改性TC100示意图

(2)阻燃PE试样制备。

将质量分数分别为74.4%, 25%, 0.3%, 0.1%和0.2%的PE、阻燃剂(分别为TC100-W, TC100-1[#]至TC100-6[#])、抗滴落剂、抗氧剂1010和抗氧剂168混合均匀后,通过双螺杆挤出机共混、挤出和造粒,挤出机各段温度为170, 180, 190, 190, 190, 170℃,螺杆转速120 r/min,分别得到阻燃PE材料(PE/TC100-W和PE/TC100-1[#]至PE/TC100-6[#])的粒料;将制备的阻燃PE粒料在80℃烘箱中干燥3 h,在注塑温度为200℃、注塑压力为50 MPa下注塑成标准样条,供测试使用。

1.4 测试与表征

水接触角测试:将阻燃剂用压片机压成一定厚度且表面平整的圆片,在自动型接触角测量仪上进行测试。

FTIR 分析:KBr 压片,分析范围为4 000~400 cm⁻¹。

失重率测试:将用于垂直燃烧的3.2 mm样条在烘箱100℃下烘干后测量常温下的质量,记为 W_1 ;将样品进行浸水测试试验后,在烘箱100℃下烘干后测量常温下的质量,记为 W_2 。按照式(1)计算失重率 W_x 。

$$W_x = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

浸水测试试验按照UL 746C-2018进行,将样品浸于(70.0±1.0)℃的去离子水中7 d。

恒定湿热加速测试试验按照GB/T 2423.50-2012进行,相对湿度85%,温度85℃,1 000 h。

拉伸性能按GB/T 1040-2006测试,拉伸速度为50 mm/min,试样尺寸175 mm×20 mm×4 mm。

缺口冲击强度按GB/T 1843-2008测试,试样尺寸80 mm×10 mm×4 mm, A型缺口;半径(0.25±0.05) mm,保留宽度(8.0±0.2) mm。

垂直燃烧性能按GB/T 2408-2008测试,试样尺寸为125.0 mm×13.0 mm×3.2 mm。

LOI按GB/T 2406.2-1909测试,试样尺寸为100.0 mm×6.5 mm×3.0 mm。

SEM测试:将缺口冲击样条在液氮中脆断,断面喷金,放大500倍拍照,观察形貌。

2 结果与讨论

2.1 耐水性分析

(1)阻燃剂水接触角测试。

表2为阻燃剂TC100-W和TC100-1[#]至TC100-

6[#]样品的水接触角测试数据,图2为TC100-W和TC100-5[#]水接触角对比图。由图2和表2可知,由于TC100-W的表面富含羟基,表现出强极性,当水滴接触到其表面后,立刻渗透其中,导致其水接触角为0°。当偶联剂KH6202质量分数(为TC100-W和KH6202总质量的百分数,下同)仅为0.5%时,TC100-1[#]的水接触角就提高到107.2°。水接触角的提高主要是因为TC100-W不含疏水基团且富含羟基,经过KH6202表面改性后,TC100表面被疏水的聚硅氧烷覆盖,再加上外围疏水性的烷基,因此,TC100经KH6202表面改性后表现出较强的疏水性。持续提高KH6202用量发现,当其质量分数达到1%时,水接触角可达131.9°,这是因为提高KH6202用量能使TC100表面覆盖更多偶联剂,从而提高TC100疏水性,再提高KH6202用量,水接触角变化不明显,说明基本达到其饱和用量。当提高表面改性时的温度发现,改性温度的提高使阻燃剂水接触角得到提升,并在改性温度为160℃时达到150.0°,是因为提高改性温度能提高硅烷偶联剂反应活性,加快反应进程使表面改性更加充分,从而持续提高TC100的疏水性。此后继续提高改性温度,水接触角基本没有提升,说明适宜的改性温度为160℃。

表2 阻燃剂样品水接触角测试数据

样品编号	水接触角/(°)
TC100-W	0
TC100-1 [#]	107.2
TC100-2 [#]	131.9
TC100-3 [#]	132.9
TC100-4 [#]	141.1
TC100-5 [#]	150.0
TC100-6 [#]	150.7

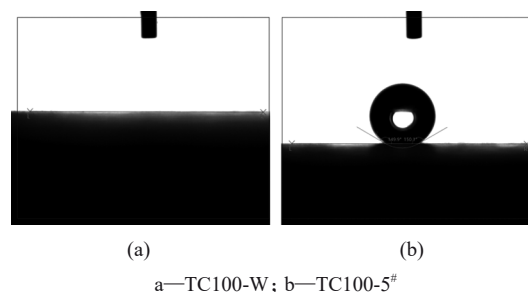


图2 TC100-W和TC100-5[#]样品水接触角情况

(2)湿热和浸水测试后阻燃PE试样耐水情况。

表3为用阻燃剂TC100-W和TC100-1[#]至TC100-6[#]制备的阻燃PE材料经湿热测试后的析出情况和浸水测试后的失重情况。由表3可知,纯PE

湿热测试后无析出,浸水测试后也无失重。随着阻燃剂 TC100-W 的加入,由于阻燃剂中存在大量亲水的 APP 和其它富含羟基的成分,导致其阻燃 PE 经湿热测试后 84 h 就发现样条表面富有粘性,有析出,浸水测试后失重率达到 3.45%。经过表面改性的 TC100-1[#]至 TC100-6[#]制备的阻燃 PE 材料析出情况得到明显改善,其中,随着 KH6202 用量的增加,当其质量分数达到 1% 时,表面析出延后到 708 h,失重率降低到 0.64%,这是因为提高 KH6202 用量能使 TC100 表面覆盖更多偶联剂,进而提高其疏水性,再提高 KH6202 用量,析出情况变化不明显,说明基本达到其饱和用量。当提高表面改性的温度时发现,改性温度的提高使阻燃 PE 耐水性能得到提升,并在改性温度为 160℃ 时,阻燃 PE 的耐水性能达到最佳,经湿热测试 1 000 h 后,表面未发现析出,失重率降低到仅 0.21%,是因为提高温度能提高硅烷偶联剂反应活性,加快反应进程使表面改性更加充分,从而进一步提高其疏水性,再提高温度,耐水性能几乎没有变化,说明 160℃ 为最适宜的改性温度。阻燃 PE 材料耐水性能的提高,主要是因为 TC100 经表面改性剂 KH6202 的疏水改性后,其耐水性能得到了大大提高;同时经表面改性后,TC100 表面极性降低,提高了阻燃剂与 PE 的相容性,其界面结合得更加致密,水分子不易渗透使阻燃剂析出,进而阻燃 PE 的耐水性能得到提高。

表3 阻燃 PE 材料湿热和浸水测试后的结果

材 料	湿热测试后析出情况	浸水测试后失重率/%
PE	无析出	0
PE/TC100-W	84 h 析出	3.36
PE/TC100-1 [#]	410 h 析出	1.37
PE/TC100-2 [#]	708 h 析出	0.64
PE/TC100-3 [#]	768 h 析出	0.60
PE/TC100-4 [#]	894 h 析出	0.31
PE/TC100-5 [#]	无析出	0.21
PE/TC100-6 [#]	无析出	0.20

2.2 力学性能分析

表4为KH6202的用量和改性温度对阻燃PE力学性能的影响。由表4可知,纯PE的拉伸强度为8.2 MPa,缺口冲击强度为39.3 kJ/m²,且样条没有破坏。随着阻燃剂TC100-W的加入,由于阻燃剂以刚性粒子加入,且相容性差,导致PE/TC100-W的拉伸强度和缺口冲击强度降低至8.2 MPa和30.8 kJ/m²。随着KH6202用量的增加,材料的拉伸强度和缺口冲击强度得到提升,并在KH6202质量分数为1%

时,达到最大值,分别为9.1 MPa和36.2 kJ/m²。再增加KH6202用量,材料力学性能下降。这是因为,在TC100表面的偶联剂起到了其和PE之间的桥梁作用,改善了TC100和PE之间的相容性,KH6202添加越多,相容性改善得越好,但过量的偶联剂在TC100表面,因偶联剂本身强度较低,会导致界面强度降低,力学性能出现下降^[16-18]。当提高表面改性温度时发现,随着改性温度提高,材料的拉伸强度和缺口冲击强度得到进一步提升,这是因为提高改性温度能提高硅烷偶联剂反应活性,加快反应进程使表面改性更加充分,并在160℃时,拉伸强度和缺口冲击强度达到相对最佳的10.4 MPa和37.7 kJ/m²。再提高改性温度,力学性能几乎没有变化,说明160℃为最适宜的改性温度。

表4 阻燃 PE 材料力学性能

材 料	拉伸强度/MPa	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)
PE	9.0	39.3 (未冲断)
PE/TC100-W	8.2	30.8
PE/TC100-1 [#]	9.0	34.2
PE/TC100-2 [#]	9.1	36.2
PE/TC100-3 [#]	8.9	35.7
PE/TC100-4 [#]	9.7	37.0
PE/TC100-5 [#]	10.4	37.7
PE/TC100-6 [#]	10.5	37.6

2.3 垂直燃烧和LOI分析

表5为用阻燃剂TC100-W和TC100-1[#]至TC100-6[#]制备的阻燃PE材料经湿热测试和浸水测试后的垂直燃烧和LOI情况。综合来说,湿热测试后,阻燃剂析出在样条表面,未表面处理的样品因析出到表面太多,严重改变了阻燃剂配方,阻燃效果降低;浸水测试后由于阻燃剂析出到水中,未表面处理的样品因析出太多,样品的阻燃剂整体用量降低,且配方改变,阻燃效果下降明显。具体由表5可知,纯PE的垂直燃烧测试结果为不阻燃(NR),且LOI仅为17.2%。随着阻燃剂TC100-W的加入,垂直燃烧等级达到V-0级,LOI提高到25.9%,但经湿热测试后,垂直燃烧等级降低到V-1级,LOI降低到23.8%;浸水测试后,垂直燃烧测试结果变成NR,LOI降低到22.4%。而经过KH6202表面改性的TC100-1[#]至TC100-6[#]制备的阻燃PE材料阻燃效果得到明显改善,其中,当KH6202质量分数达到1%时,经湿热测试后,垂直燃烧等级恢复到V-0级,LOI提高到24.9%;浸水测试后,垂直燃烧等级也恢复到V-0级,LOI提高到24.2%。再持续增加

KH6202用量,阻燃性能无明显变化。而提高表面改性温度可以继续提高湿热和浸水测试后阻燃PE的LOI,且垂直燃烧等级仍保持V-0级,当改性温度为160℃时,湿热测试后,LOI提高到25.5%;浸水测试后,LOI达到最佳的25.2%。继续提高表面改性温度对湿热测试和浸水测试后的垂直燃烧和LOI都没有明显改善。阻燃剂TC100-W和TC100-1[#]至TC100-6[#]制备的阻燃PE材料湿热和浸水测试前后垂直燃烧和LOI情况,也与前述阻燃剂耐水性测试结果互相印证,在KH6202质量分数1%和160℃下改性的TC100疏水性最好,进而表现出更好的耐析出性能,使得阻燃PE经湿热和浸水测试后阻燃性能保持得更好,并和其阻燃PE力学性能情况一致,都表现为在质量分数1% KH6202和160℃条件下表面改性的TC100-5[#]具有最优的综合性能,表明KH6202质量分数1%和改性温度160℃为最佳表面改性条件。

表5 阻燃PE材料湿热和浸水测试前后垂直燃烧等级和LOI

材 料	垂直燃烧等级(3.2 mm)			LOI/%		
	测试前	湿热测试后	浸水测试后	测试前	湿热测试后	浸水测试后
PE	NR	NR	NR	17.2	17.3	17.2
PE/TC100-W	V-0	V-1	NR	25.9	23.8	22.4
PE/TC100-1 [#]	V-0	V-0	V-1	26.1	24.5	23.5
PE/TC100-2 [#]	V-0	V-0	V-0	26.2	24.9	24.2
PE/TC100-3 [#]	V-0	V-0	V-0	26.0	24.7	24.2
PE/TC100-4 [#]	V-0	V-0	V-0	26.2	25.2	24.8
PE/TC100-5 [#]	V-0	V-0	V-0	26.1	25.5	25.2
PE/TC100-6 [#]	V-0	V-0	V-0	26.0	25.5	25.1

2.4 FTIR 分析

图3是KH6202, TC100-W和TC100-5[#]的FTIR谱图。由图3可知,3 057 cm⁻¹处附近为阻燃剂TC100中APP的N—H伸缩振动峰^[19],再加上2 974 cm⁻¹处KH6202的—CH₂特征吸收峰^[20],使得TC100-5[#]在3 080~2 950 cm⁻¹附近的吸收峰得到增强。通过对比可以看出,TC100-5[#]在750~1 280 cm⁻¹范围的

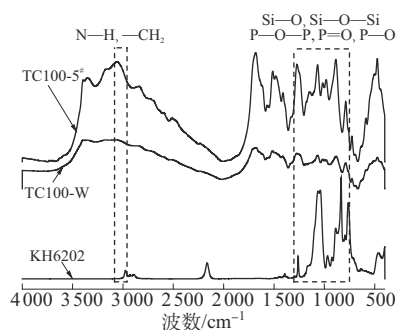


图3 KH6202, TC100-W和TC100-5[#]的FTIR谱图

吸收峰相对于TC100-W变强,应是该吸收峰范围既包含KH6202的Si—O和Si—O—Si键^[21-22],又有TC100阻燃剂的P—O—P, P=O和P—O键^[23]的特征峰,由于几个特征峰的位置相近,叠加导致该位置吸收峰增强,也说明KH6202成功改性接枝到了TC100-W的表面。

2.5 SEM分析

图4是PE/TC100-W和PE/TC100-5[#]的缺口冲击样条断面SEM照片。由图4可以看出,未表面改性的阻燃剂TC100-W在PE中相容性差,TC100-W以刚性粒子的状态嵌入PE中,在断面上可以明显看到TC100-W以大量的团聚颗粒形式存在,PE基体和颗粒物界面清晰,且还存在阻燃剂颗粒脱落后留下的凹坑。主要是因为APP类膨胀阻燃剂TC100中各组分大都为极性物质,导致其不能和非极性PE很好地相容。而经过表面改性的TC100-5[#],表面极性大大降低,分散效果明显改善,用其制备的PE/TC100-5[#]材料断面上几乎没有颗粒物或颗粒脱落后留下的凹坑,阻燃剂TC100-5[#]和PE基体很好地相容为一体,未见两者间界面,这也正是阻燃PE耐水性和力学性能提高的原因。

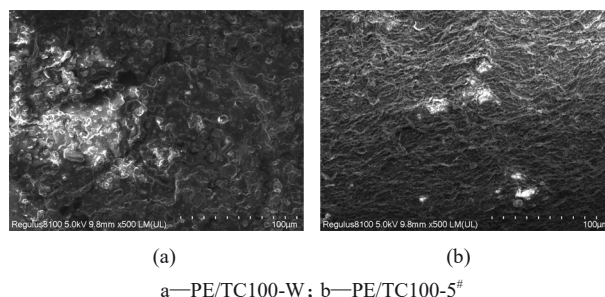


图4 PE/TC100-W和PE/TC100-5[#]的断面SEM照片

3 结论

(1) KH6202对APP类IFR TC100表面改性的最佳表面改性条件为KH6202的质量分数1%、改性温度160℃,在该条件下的耐水性和力学性能改善效果最佳。

(2) 表面改性不仅改善了TC100本身的耐水性,使水接触角提高到150.0°,还提高了与PE间的相容性,阻燃PE力学性能得到改善,且经恒定湿热加速测试1 000 h不析出,浸水测试后失重率降低到0.21%。

(3) 将表面改性后的TC100添加到PE中,阻燃PE经恒定湿热加速和浸水测试后垂直燃烧等级仍可保持V-0级,LOI略有降低。

参考文献

- [1] 陈涛,林倬仕,郝冬梅,等.无卤膨胀阻燃聚乙烯的制备[J].塑料工业,2013,41(5):38-42.
Chen Tao, Lin Zhuoshi, Hao Dongmei, et al. Preparation of intumescent flame retardant PE[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(5): 38-42.
- [2] 李占冲,孟凡涛,魏春城,等.无卤阻燃聚乙烯的研究进展[J].塑料工业,2022,50(1):1-5.
Li Zhanchong, Meng Fantao, Wei Chuncheng, et al. Research progress on halogen-free flame retardancy of polyethylene[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(1):1-5.
- [3] Zhou R, Ming Z, He J P, et al. Effect of magnesium hydroxide and aluminum hydroxide on the thermal stability, latent heat and flammability properties of paraffin/HDPE phase change blends[J]. Polymers, 2020, 12(1). DOI:10.3390/polym12010180.
- [4] 李娇.聚乙烯用阻燃剂研究进展[J].工程塑料应用,2016,44(2):145-148.
Li Jiao. Research progress on flame retardant for polyethylene[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):145-148.
- [5] Khanal S, Lu Y H, Dang L, et al. Effects of α -zirconium phosphate and zirconium organophosphonate on the thermal, mechanical and flame retardant properties of intumescent flame retardant high density polyethylene composites[J]. RSC Advances, 2020, 10(51): 30 990-31 002.
- [6] 邵水源,赵小亮,笄丽娜.高密度聚乙烯阻燃抗静电性能研究[J].塑料科技,2015,43(2):42-46.
Shao Shuiyuan, Zhao Xiaoliang, Zan Lina. Study on the flame-retardant and antistatic properties of high density polyethylene[J]. Plastic Science and Technology, 2015, 43(2):42-46.
- [7] Liu L, Zhuo J L, Chen X L, et al. Influence of ferric hydroxide on smoke suppression properties and combustion behavior of intumescent flame retardant silicone rubber composites[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 119(1):487-497.
- [8] 宋剑峰,李曼,梁小良,等.改性赤泥协同膨胀型阻燃剂阻燃聚乙烯[J].化工进展,2018,37(11):4 412-4 418.
Song Jianfeng, Li Man, Liang Xiaoliang, et al. Red mud modified synergistic intumescent flame retardation to retardant Polyethylene [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(11): 4 412-4 418.
- [9] 韩海军,梁淑君.微胶囊化聚磷酸铵阻燃改性高密度聚乙烯[J].塑料,2020,49(5):24-28.
Han Haijun, Liang Shujun. Flame retardant high density polyethylene with microencapsulated ammonium polyphosphate[J]. Plastics, 2020, 49(5):24-28.
- [10] 欧红香,叶青,蒋军成,等.聚烯烃无卤阻燃研究进展[J].常州大学学报:自然科学版,2019,31(4):1-8.
Ou Hongxiang, Ye Qing, Jiang Juncheng, et al. Research progress on halogen-free flame retardant of polyolefins[J]. Journal of Changzhou University: Natural Science Edition, 2019, 31(4):1-8.
- [11] 王彦辉,张锐涛,魏凯耀,等.聚乙烯基复合材料的阻燃体系研究进展[J].塑料工业,2019,47(8):12-15.
Wang Yanhui, Zhang Ruitao, Wei Kaiyao, et al. The research progress of flame retardant system with polyethylenematrix composite [J]. China Plastics Industry, 2019, 47(8):12-15.
- [12] 周城,刘鹏,张海松,等.阻燃改性氢氧化镁/低密度聚乙烯的性能研究[J].绝缘材料,2021,54(3):29-35.
Zhou Cheng, Liu Peng, Zhang Haisong, et al. Properties of flame retardant modified magnesium hydroxide/low density polyethylene[J]. Insulating Materials, 2021, 54(3):29-35.
- [13] 肖铭.氢氧化镁阻燃剂应用研究进展[J].精细与专用化学品, 2022, 30(2):31-33.
Xiao Ming. Application research progress of magnesium hydroxide flame retardant[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2022, 30(2): 31-33.
- [14] 者加云,罗勇,谢德龙,等.聚磷酸铵的应用研究进展[J].塑料工业,2019,47(2):1-5.
Zhe Jiayun, Luo Yong, Xie Delong, et al. The application research progress of ammonium polyphosphate[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(2):1-5.
- [15] 杨云艳,谢德龙,梅毅,等.聚磷酸铵的改性研究进展[J].塑料工业,2018,46(5):20-24.
Yang Yunyan, Xie Delong, Mei Yi, et al. Research progress on modification of ammonium polyphosphate[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(5):20-24.
- [16] 李洪恩,马志领,王磊,等.KH-560在聚丙烯/KD膨胀型阻燃剂复合体系中的偶联作用[J].塑料工业,2008,36(7):56-58.
Li Hongen, Ma Zhiling, Wang Lei, et al. Coupling function of silane KH-560 in PP/KDIFR composite[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(7):56-58.
- [17] 张忠厚,阎春绵,王海旺,等.偶联剂对膨胀石墨复合阻燃聚丙烯的影响[J].现代塑料加工应用,2005,17(2):37-40.
Zhang Zhonghou, Yan Chunmian, Wang Haiwang, et al. Influences of coupling agent on property of PP with expanded graphite composite flame-retardant[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2005, 17(2):37-40.
- [18] 冉国文,许贺,刘晓东,等.KH550改性PEPA对PP/IFR体系阻燃、耐水和力学性能的影响[J].塑料工业,2017,45(10):134-138.
Ran Guowen, Xu He, Liu Xiaodong, et al. Improving the flame retardancy, water resistance and mechanical properties of PP/IFR composites by introducing KH550 modified PEPA[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):134-138.
- [19] 杨世金.聚乙烯基复合材料的制备及阻燃耐水性能研究[J].塑料科技,2021,49(6):37-41.
Yang Shijin. Preparation of Polyethylene matrix composites and study on flame retardant and water resistance[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(6):37-41.
- [20] 苏甜,谢丽丽,郑龙,等.偶联剂KH550改性氧化石墨烯/聚苯乙烯磺酸钠及其与丁苯橡胶的复合材料性能研究[J].橡胶工业,

- 2019, 66(12):908–916.
- Su Tian, Xie Lili, Zheng Long, et al. Coupling agent KH550 modified GO/PSS and properties of KH550-GO/PSS/SBR composites [J]. China Rubber Industry, 2019, 66(12):908–916.
- [21] 陈星宇, 李翠红, 张墩明. KH560水溶液的制备及其玻纤处理性能研究[J]. 有机硅材料, 2021, 35(4):11–16.
- Chen Xingyu, Li Cuihong, Zhang Dunming, et al. Study on preparation of KH560 aqueous solution and its performance by glass fiber treatment[J]. Silicone Material, 2021, 35(4):11–16.
- [22] 李湘洲, 钱伟, 吴志平, 等. 硅烷偶联剂改性茶皂素膨胀阻燃剂及涂料应用[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2014, 41(2):119–124.
- Li Xiangzhou, Qian Wei, Wu Zhiping, et al. Silane coupling agent modified tea saponin intumescent flame retardants and its application in coatings[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences, 2014, 41(2):119–124.
- [23] 刘建超, 许苗军, 李斌. 聚磷酸铵的疏水改性及聚丙烯阻燃性能[J]. 高等学校化学学报, 2015, 36(6):1 228–1 235.
- Liu Jianchao, Xu Miaojun, Li Bin. Hydrophobic modification of ammonium polyphosphate and its application in flame retardant polypropylene composites[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2015, 36(6):1 228–1 235.

(上接第 126 页)

- [13] Vladescu S C, Olver A V, Pegg I G, et al. The effects of surface texture in reciprocating contacts – An experimental study[J]. Tribology International, 2015, 82:28–42.
- [14] 李俊杰, 王金, 周霆. ABS材料粘滑现象改善[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):41–45.
- Li Junjie, Wang Jin, Zhou Ting. Improvement of stick-slip phenomenon of ABS materials[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):41–45.
- [15] 潘绍斌, 洪跃, 严新谊. 基于流体动压润滑效应的人工髋关节材料表面结构优化研究[J]. 润滑与密封, 2015, 40(7):70–74.
- Pan Shaobin, Hong Yue, Yan Xinyi. Optimization research on surface texturing of artificial hip joint materials based on hydrodynamic lubrication effect[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(7):70–74.
- [16] 尹红泽, 陈文刚, 李镔冰, 等. 3D打印ABS材料表面楔形结构的摩擦性能[J]. 中国表面工程, 2021, 24(4):158–166.
- Yin Hongze, Chen Wengang, Li Rongbing, et al. Friction performance of wedge-shaped texture on the surface of 3D printed ABS materials[J]. China Surface Engineering, 2021, 24(4):158–166.
- [17] 李昊, 高朋, 陈文刚, 等. 3D打印光敏树脂表面楔形冠状结构的摩擦学性能[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(4):112–118.
- Li Hao, Gao Peng, Chen Wengang, et al. Tribological properties of wedge-shaped crown texture on surface of 3D printed photosensitive resin[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):112–118.
- [18] Margalit B, Metzger B D. Constraining the maximum mass of neutron stars from multi-messenger observations of GW170817[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 850(2). DOI: 10.3847/2041-8213/aa991c.
- [19] Zhang H, Hua M, Dong G N, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. Tribology International, 2016, 93:583–592.