

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.007

无卤阻燃改性超高分子量聚乙烯纤维的制备及性能

苏家凯^{1,2}, 刘双艳^{1,2}, 厉勇^{1,2}, 温晓丹^{1,2}, 刘艳玲^{1,2}, 赵衍逊^{1,2}

(1. 山东南山智尚科技股份有限公司, 山东龙口 265700; 2. 山东南山科学技术研究院有限公司, 山东龙口 265700)

摘要: 通过氮磷系阻燃剂复配方式,以三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)为主阻燃剂,二乙基次膦酸铝(ADP)为协效阻燃剂,六方氮化硼(h-BN)为杂化改性剂,白油为溶剂,制备了无卤阻燃超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维。首先对阻燃剂粉体进行干燥、表面处理,然后与白油共混,经过超声波液相分散、研磨机高速研磨,得到无卤阻燃浆料。将此阻燃浆料分散到 PE-UHMW 纺丝原液中,经双螺杆挤出机挤出得到冻胶丝,冻胶丝经过溶剂萃取、干燥、热牵伸,最终得到阻燃 PE-UHMW 纤维,对纤维的阻燃性能和力学性能进行表征。结果表明,通过研磨机的反复研磨,可将粉体粒径降低到百纳米级别,更易于在 PE-UHMW 溶胀液中分散,且极大地提升了阻燃纤维的可纺性;杂化改性剂提升了复配阻燃剂的阻燃性和材料的阻燃等级,当 h-BN 质量分数为 4% 时,阻燃剂质量分数可以到 20%,PE-UHMW 纤维的极限氧指数数值达到 27.5%,材料阻燃等级达到 V-0 级;通过一系列改性手段,可使 PE-UHMW 纤维在添加大量的阻燃粉体后,仍能保持良好的可纺性,且改性对纤维力学性能影响较小,拓宽了 PE-UHMW 纤维的应用领域,提升其使用价值。

关键词: 杂化;无卤阻燃;阻燃剂复配;超高分子量聚乙烯纤维;极限氧指数

中图分类号: TS102.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0039-06

Preparation and performance of halogen-free flame retardant modified ultra-high molecular weight polyethylene fiber

SU Jiakai^{1,2}, LIU Shuangyan^{1,2}, LI Yong^{1,2}, WEN Xiaodan^{1,2}, LIU Yanling^{1,2}, ZHAO Yanxun^{1,2}

(1. Shandong Nanshan Zhishang Technology Co., Ltd., Longkou 265700, China;

2. Shandong Nanshan Institute of Science and Technology Co., Ltd., Longkou 265700, China)

Abstract : By nitrogen and phosphorus flame retardant compounding, with melamine cyanurate (MCA) as the main flame retardant, aluminum diethylphosphonate (ADP) as the co-efficient flame retardant, hexagonal boron nitride (h-BN) as the heterogeneous modifier, and white oil as the solvent, halogen-free flame retardant ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) fiber were prepared. Firstly, the flame retardant powder was dried and surface treated, then it was co-mingled with white oil, and after ultrasonic liquid-phase dispersion and high-speed grinding by mill, the halogen-free flame retardant slurry was obtained. The flame retardant slurry was dispersed into the PE-UHMW spinning stock, and extruded by the twin-screw extruder to obtain the lyophilized filament, which was solvent-extracted, dried, and thermally drafted to obtain the flame retardant PE-UHMW fibers, and then the flame retardant properties as well as the mechanical properties of the fibers were characterized. The results show that the powder particle size can be reduced to hundred nanometer level by repeated grinding of the mill, which is easier to be dispersed in the PE-UHMW dissolution solution and greatly improves the spinnability of the flame retardant fibers; the heterogeneous modifier improves the flame retardancy of the compound flame retardant and the flame retardant grade of the material. When the addition amount h-BN is 4%, the mass fraction of flame retardants can be added to 20%, the fiber limiting oxygen index value reaches 27.5%, and the material flame retardant grade can reach V-0. Above all, through a series of modification means, it can make PE-UHMW fiber maintain good spinnability after adding a large amount of flame retardant powder. Meanwhile, the modification has less effect on the mechanical properties of the fiber, which broadens the application field of PE-UHMW fiber and enhances its use value.

Keywords : hybridization ; halogen-free flame retardant ; flame retardant compounding ; ultra-high molecular weight polyethylene fiber ; limiting oxygen index

通信作者: 苏家凯,高级工程师,主要研究方向为功能性纤维及阻燃材料

收稿日期: 2024-01-08

引用格式: 苏家凯,刘双艳,厉勇,等. 无卤阻燃改性超高分子量聚乙烯纤维的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 39-44.

SU Jiakai, LIU Shuangyan, LI Yong, et al. Preparation and performance of halogen-free flame retardant modified ultra-high molecular weight polyethylene fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 39-44.

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维是一种比强度和比模量首屈一指的高性能材料,是可以与特种纤维中性能优异的碳纤维、芳纶纤维齐名的新一代特种纤维材料。由于PE-UHMW的密度只有 0.97 g/cm^3 ,其质量轻、力学性能优异,可以用来制造防弹衣、防弹头盔、防刺服装等防护装备^[1-3]。此外,PE-UHMW纤维不仅具有优异的力学性能,而且由于其分子链规则排列,没有支链和杂链等结构,化学性质稳定,具有耐化学腐蚀性能和耐化学介质性能,还具有一定的耐磨性能和绝缘性能等,在国防军事、海洋渔业、航空航天和民用纺织品领域具有重要的使用和生产价值^[4-5]。

但是由于PE-UHMW纤维分子链结构中C—H键是主要分子构成,因此PE-UHMW纤维的可燃性很大,且其极限氧指数(LOI)值只有17%。此外,在PE-UHMW纤维的燃烧过程中,大量烟雾的产生会导致热量积累,最终发生熔滴现象,极大概率会引发二次燃烧^[6-8]。PE-UHMW纤维的易燃性阻碍了其在许多领域的应用,因此,开发阻燃PE-UHMW(FR-PE-UHMW)纤维是创新性和实操性都非常具有挑战的一项研发课题。

目前PE-UHMW纤维的阻燃改性方法主要有2种。一种是在纺丝过程中直接添加阻燃剂。另一种方法是通过涂层、浸轧等方法对纤维和织物进行阻燃后整理。王苏娜等^[9]采用聚磷酸铵、季戊四醇和三聚氰胺组成的膨胀型阻燃体系对PE-UHMW阻燃性能的影响做了研究,当三者质量比为20:12:3时,其LOI达到32%,但添加剂总量为25%,这种方法无法保证阻燃剂粉体在基体中均匀分散,严重降低了纤维的力学性能。薛平等^[10]使用十溴联苯醚、硼酸锌和 Sb_2O_3 的复合阻燃体系对PE-UHMW阻燃改性,其LOI能达到27%,但溴锑系阻燃剂对人体和环境有害,许多国家已明令禁止在公众场所使用。马文俊等^[11]采用涂层整理的方法对PE-UHMW纤维表面改性,使用浓度为20%的间苯二酚进行浸轧焙烘整理后,纤维的阻燃性能得到了明显的改善,该方法虽操作简单,但织物不耐水洗,阻燃效果不持久。

针对以上问题,笔者选取了性能优异且无毒无害的氮系阻燃剂三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)和磷系阻燃剂二乙基次磷酸铝(ADP)进行复配,并添加一定量的六方氮化硼(h-BN)进行杂化改性,通过干燥-表

面处理-超声波分散-湿法研磨,在PE-UHMW纺丝溶剂白油中再次将研磨后的阻燃剂进行乳化分散,制成无卤阻燃浆料。该浆料使用纳米级无卤阻燃剂,加入偶联剂和分散剂特殊处理后,使得浆料组分分散均匀、不易析出,与纺丝基体相容性好,少量添加就能达到良好的阻燃效果。将所制的阻燃浆料加入PE-UHMW纺丝原液中,经前纺工艺的双螺杆挤出机得到冻胶纤维,后经过后纺工艺将PE-UHMW冻胶纤维采用溶剂分离萃取和纤维干燥、多级热拉伸等工艺制得FR-PE-UHMW纤维。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-UHMW:分子量700万,美国塞拉尼斯有限公司;

白油:运动黏度 $70\text{ mm}^2/\text{s}$,浙江正信石油科技有限公司;

MCA:M-MCA2,湖南美莱珀科技有限公司;

ADP:LFR-5006,江苏利思德新材料有限公司;

h-BN:XF80-120,苏州纳朴材料科技有限公司;

酞酸酯偶联剂:Plenact 55,日本味之素公司;

润湿分散剂:BYK-9076,德国BYK有限公司;

抗氧剂:B225,德国巴斯夫公司。

1.2 仪器及设备

高速分散机:FS-10L,常州市兆圣实验设备制造有限公司;

真空干燥箱:D2F-60,天津市宏诺仪器有限公司;

顶置搅拌机:LC-OES-60SH,上海力辰邦西仪器有限公司;

磁力搅拌加热器:90-2,常州越新仪器制造有限公司;

超声波发生器:AK-070SD,深圳钰洁清洗设备有限公司;

研磨机:WM-5,安徽华派化工设备有限公司;

双螺杆挤出机:TSE-75,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

极限氧指数(LOI)测定仪:XYC-75,承德金建检测仪器有限公司;

电子式拉力试验机:DLL-1000,上海德杰仪器设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):EVO-10,德国ZEISS公司。

1.3 FR-PE-UHMW 纤维的制备

1.3.1 干燥

将MCA阻燃剂和ADP阻燃剂的阻燃浆料配方按表1(质量分数)的配方称取,后在真空干燥箱中平衡干燥,温度设置为105℃,干燥平衡时间1h。

1.3.2 阻燃剂的复配与分散

将干燥后的阻燃剂放入盛有白油的烧杯中,上

表1 不同阻燃剂含量的阻燃浆料配方

Tab. 1 Flame retardant paste formulations with different flame retardant content

Sample	White oil	MCA	ADP	h-BN	Coupling agent	Dispersant
1 [#]	87	8	2	0	1.5	1.5
2 [#]	76	15	5	0	2	2
3 [#]	66	20	10	0	2	2
4 [#]	84	8	2	3	1.5	1.5
5 [#]	72	15	5	4	2	2
6 [#]	61	20	10	5	2	2

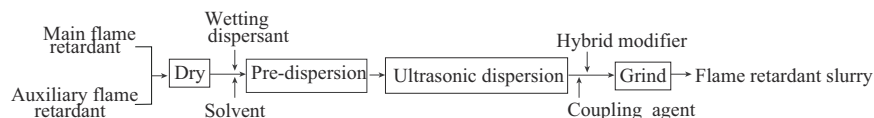


图1 阻燃剂浆料制备工艺流程图

Fig. 1 Schematic illustration of flame retardant preparation

1.3.4 FR-PE-UHMW 纤维的制备

按表1的配方分别配制阻燃浆料,1[#]~3[#]分别为阻燃剂质量分数为10%,20%,30%的未经杂化的阻燃浆料,相对应的4[#]~6[#]分别为相同阻燃剂含量的经h-BN杂化过的阻燃浆料。

以白油为溶剂,将PE-UHMW粉末配制固体质量分数为9%的纺丝原液,将配制的1[#]~6[#]阻燃浆料分别加入纺丝原液中,搅拌均匀后,经双螺杆挤出机进行纺丝,双螺杆挤出机各区温度在120~280℃,螺杆转速为50~120 Hz,含有阻燃成分的纺丝液在双螺杆的加热剪切作用下,形成溶解状态良好的溶液,经过过滤器、计量泵注入双螺杆纺丝机组件,通过双螺杆纺丝机中双螺杆的转动和加热区升温,使纺丝液得到充分溶胀溶解,最后溶胀溶解好的纺丝液从喷丝板在一定的压力下挤出形成纤维,成型的纤维经过冷却水槽冷却后,最终得到冻胶纤维。

冻胶丝先经过2~4倍的预牵伸,进入含有氯代烷烃的萃取剂中进行萃取,在萃取槽中,萃取剂与丝束中的白油通过双扩散作用,将白油从丝束中萃取出来,萃取时间为10~20 min,后续丝束进入干燥箱体,萃取剂通过热风干燥从丝束中挥发出来,干

部通过顶置搅拌器进行搅拌,转速为800~1 000 r/min;下部通过磁力加热器加热,升温至60~80℃;混合20~30 min后,再缓缓倒入润湿分散剂,混合20~30 min后;将预混后的阻燃剂溶液放入超声波振荡器中,以40 kHz的频率震荡1~2 h后,得到均匀分散的复配阻燃剂溶液。

1.3.3 阻燃剂杂化

将杂化改性剂加入到复配阻燃剂溶液中,通过顶置搅拌器进行搅拌,边搅拌边缓缓加入偶联剂,搅拌时间为20~30 min;将搅拌后的浆液倒入高速研磨机罐体中,再向研磨罐中加入70%氧化锆微珠进行循环研磨,通过罐体夹套导热油加热至60~80℃。经高速研磨分散,得到杂化的复配阻燃剂浆料。阻燃剂浆料制备的工艺流程图如图1所示。

燥时间为10~25 min,干燥温度为40~50℃。干燥后的丝束经过七辊牵伸机的多道热拉伸,拉伸倍数为25~50倍,拉伸温度为130~140℃,最后通过收卷机收卷得到PE-UHMW纤维^[12]。

1.4 测试与表征

1.4.1 干冻胶纤维最大拉伸倍数测试

取一定长度萃取后的干冻胶纤维,将其两端均系上对位芳纶,用细记号笔标记两绳结位置,精确测量待拉伸干冻胶纤维长度,记为 L_0 。将干冻胶纤维一端固定,另一端则由芳纶牵引干冻胶纤维,使干冻胶纤维在100℃的热拉伸管中以1 m/min的速度均匀被拉伸,直至PE-UHMW纤维断裂。对拉伸断裂后的PE-UHMW纤维长度进行测量,记为 L_1 。利用 L_1/L_0 计算干冻胶纤维的最大拉伸比。平行取样10次,最后计算平均值^[13]。

1.4.2 纤维燃烧性能的测试

根据GB/T 5454-1997用LOI仪测试FR-PE-UHMW纤维的LOI值。

将FR-PE-UHMW纤维经纬编织紧密缠绕在金属框之间,选取火源外延部分对实验样品进行加热处理,控制火源的直径在40 mm以内,最后观察并

记录FR-PE-UHMW纤维的燃烧情况。

1.4.3 阻燃织物燃烧性能的测试

将FR-PE-UHMW纤维织成布样,根据GB/T 17591-2006测试,检测面料垂直燃烧性能。

1.4.4 纤维的形貌结构表征

用SEM表征FR-PE-UHMW纤维的形貌,观察纤维横断表面阻燃剂分布的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 FR-PE-UHMW 冻胶纤维的拉伸性能

按表1配方制成阻燃浆料分别添加到纺丝原液中,经纺丝萃取后得到6组干冻胶纤维样品,按1.4.1测试方法测试拉伸倍数,结果列于表2。

表2 不同阻燃剂含量冻胶纤维的拉伸倍数

Tab. 2 Stretch ratio of gelatin fiber with different flame retardant content

Samples	Stretching times										Average value
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 [#]	11.5	12.5	11.25	11.5	11.8	12	12	12.25	12.5	13	12.03
2 [#]	10.2	11	11.75	11	10.5	10.6	10.6	11.25	11	11.15	10.91
3 [#]	9.65	10.05	9.10	9.45	9.15	9.45	9.85	9.25	9.35	9.15	9.45
4 [#]	12.25	12.5	11.25	11.5	11.8	12.45	12.65	12.25	12.5	13.2	12.24
5 [#]	10.2	11.15	11.75	11	10.95	11.55	11.1	11.25	11.25	11.75	11.20
6 [#]	9.65	10.5	9	9.5	10.35	10	10.25	9.85	10.5	10.15	9.98

由表2可知,阻燃剂含量越多,纤维拉伸性能越差,说明阻燃剂含量影响了FR-PE-UHMW纤维的拉伸性能。当阻燃剂质量分数高于20%时,阻燃剂分子团聚体增多,使得纤维中拉伸应力缺陷数量增加,大分子链在拉伸过程中应力集中现象增强,使纤维更容易发生断裂^[14-15]。在4[#]~6[#]配方中加入了杂化改性剂h-BN,其独特的空间网络结构对纤维拉伸应力有一定的提升效果,相比同配方的1[#]~3[#]拉伸倍数略有提高。结果表明,冻胶纤维最大拉伸倍数随阻燃剂浓度增大而不断减少,导致最终制备的PE-UHMW纤维的强度降低。通过高速研磨机将材料纳米化,在保证阻燃效果的同时,添加量相对较少,同时对纤维力学性能的影响较小。

2.2 FR-PE-UHMW 纤维的阻燃性能

图2为FR-PE-UHMW纤维经纬编织物示意图。按表1中的6组浆料分别制成FR-PE-UHMW纤维,并将其经纬编织紧密缠绕在金属框之间,按以上的方法测试纤维的燃烧性能,结果列于表3。

由表3可知,随着阻燃剂添加量的增加,改性后的FR-PE-UHMW纤维的阻燃性有了明显的改善。

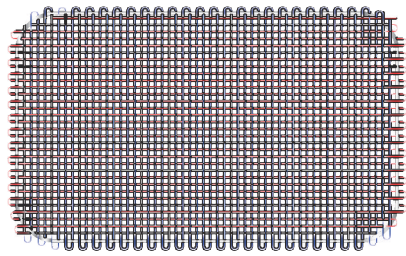


图2 FR-PE-UHMW纤维经纬编织物示意图

Fig. 2 FR-PE-UHMW fiber warp and weft knitted fabric diagram

表3 FR-PE-UHMW 纤维的燃烧性能

Tab. 3 Combustion properties of FR-PE-UHMW fiber

Sample	Flame retardant content/%	Hybrid modifier content/%	LOI/%	After-flame time/s	Number of molten droplets	Flame-retardant level
1 [#]	10	0	22.3	25	15	V-2
2 [#]	20	0	24.8	18	12	V-2
3 [#]	30	0	27.5	12	8	V-1
4 [#]	10	3	24.2	10	8	V-1
5 [#]	20	4	27.5	6	3	V-0
6 [#]	30	5	28.8	3	2	V-0

与1[#]纤维阻燃性能比较可以发现,当阻燃剂质量分数从10%提高到30%时,3[#]纤维的LOI值提高了23.3%,可燃性得到了控制,但是熔滴数较多,阻燃级别较低,只能达到V-2级。按照1[#]~3[#]配方比例,在4[#]~6[#]配方中逐渐增加h-BN的含量,4[#]~6[#]纤维的LOI值比1[#]~3[#]纤维都有了较大提升,同时,续燃时间和熔滴数都相应减少,其中5[#]纤维的h-BN质量分数为4%,阻燃剂质量分数为20%,其LOI值达到了27.5%,阻燃级别达到了V-0级。6[#]纤维的h-BN质量分数为5%,阻燃剂质量分数为30%,其LOI值达到了28.8%,阻燃级别达到了V-0级。

通过表3可以看出,在相同配方中逐渐增加了h-BN的含量,纤维的LOI值都有了较大提升,而且续燃时间和熔滴数都相应减少。其中,4[#]~6[#]配方相比1[#]~3[#]配方续燃时间分别降低了60%,67%,75%,熔滴数分别减少了46%,75%,67%,这说明h-BN对氮磷阻燃剂有提高成炭速率和炭层质量的效果,可帮助纤维材料提升阻燃性和减少熔滴。这是因为h-BN是由氮原子和硼原子构成的共价键型晶体,具有独特的空间片层结构,且比表面积大,层间空隙较大,具有优良的热稳定性、高导热性、润滑性优异的特点。复配阻燃剂体系中引入了h-BN,利用其类石墨的片层结构和自身不饱和性,作为由MCA阻燃剂和ADP阻燃剂形成的大分子阻燃剂的接枝

复合载体,形成杂化的阻燃体系,既可作为导热剂快速传导燃烧释放的热能,还可以加速燃烧物的炭化过程,稀释可燃气体浓度,不仅提高了材料的阻燃等级,其空间网络结构,还能防止阻燃剂在加工过程中析出而影响阻燃效果^[16-17]。

2.3 阻燃织物燃烧性能

将纤度为 100 dtex 的 6[#]配方的 FR-PE-UHMW 纤维用经纬编织机织成布样,按照 GB/T 17591-2006 阻燃织物中的试验方法,分别从经向和纬向裁取布样,进行垂直燃烧测试,图 3 为 FR-PE-UHMW 织物垂直燃烧测试图。测试结果列于表 4。由表 4 可见,检测结果达到装饰用织物 B1 级标准。

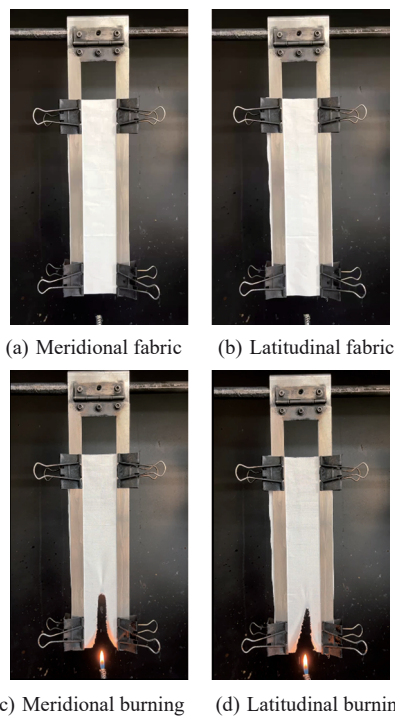


图 3 FR-PE-UHMW 织物垂直燃烧测试

Fig. 3 FR-PE-UHMW Fabric vertical combustion test

表 4 FR-PE-UHMW 织物的燃烧性能

Tab. 4 Combustion properties of FR-PE-UHMW fabric

Sample No.	Damaged length/ mm	After flame time/s	After glow time/s
Meridional fabric 1	7.5±0.5	0	0
Meridional fabric 2	7.0±0.5	0	0
Meridional fabric 3	8.0±0.5	0	0
Latitudinal fabric 1	7.0±0.5	0	0
Latitudinal fabric 2	8.5±0.5	0	0
Latitudinal fabric 3	8.0±0.5	0	0

2.4 FR-PE-UHMW 纤维的形貌分析

图 4 为 6[#]配方的 PE-UHMW 纤维的 SEM 照片。由图 4 可以看出,添加了阻燃剂的纤维内部明显可见许多球形颗粒,这些球形颗粒即为阻燃剂分子的

团聚体,尺寸为 50 nm 左右。连续增加阻燃剂固含量对纤维的表面形貌产生明显的影响,主要表现为阻燃剂固含量越多,纤维表面粗糙度越大,与此同时,阻燃剂的团聚行为也越来越多,这种现象会对纤维力学性能带来较大影响。

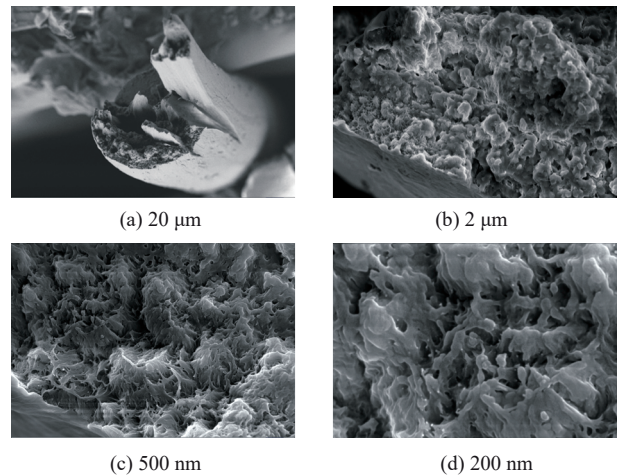


图 4 添加 30% 阻燃剂后的 PE-UHMW 纤维的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photo of PE-UHMW fiber after adding with 30% flame retardant

2.5 偶联剂对纤维力学性能的影响

以 6[#]配方为基准,分别添加了 1% 和 2% 的钛酸酯偶联剂,对比了不同偶联剂添加量对材料各项性能的影响。结果显示,添加偶联剂后 FR-PE-UHMW 纤维的流动性分别提高了 32% 和 60%;断裂强度分别提高了 18% 和 36%;断裂伸长率分别提高了 42% 和 74%。这说明利用偶联剂处理阻燃剂可改善其对聚合物的黏合,可使材料具有良好的流动性,改善材料的拉伸强度、冲击强度,阻止阻燃剂在加工过程中析出。这是因为钛酸酯偶联剂是一种两端具有不同官能基的化合物,其中一端能够与有机高分子聚合物结合,另一端能够与无机物相结合,因此能使树脂与填充物之间产生相互相容性,吸附和密着特性,可用于不同材料界面之间相容性的改善,还能有效提高复合材料的相关力学性能和加工性。

3 结论

(1) 采用 MCA 为主要阻燃剂,ADP 为协效阻燃剂,h-BN 为杂化改性剂,三者相互间产生协同阻燃效应,可使阻燃剂的用量减少,阻燃效果增强;通过高速研磨机将材料纳米化,在保证阻燃效果的同时,添加量相对较少,同时对纤维力学性能的影响较小。

(2) h-BN 的加入,能增强阻燃效果,极大降低续燃时间,减少熔滴数,提高复合材料阻燃等级。

(3) 利用钛酸酯偶联剂处理阻燃剂,可阻止阻燃剂析出,提高了纤维表面光滑度,改善纤维的力学性能,使填充助剂对纤维材料力学性能影响降到最低。

参考文献

- [1] 莫根林,刘静,金永喜,等.超高分子量聚乙烯纤维防护机理研究综述[J].兵器装备工程学报,2021,42(10):23-28.
MO Genlin, LIU Jing, JIN Yongxi, et al. Review on protective mechanism of UHMWPE fiber[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(10):23-28.
- [2] 苏豪,孔凡敏,吴小莲,等.细旦高强聚乙烯纤维加工过程研究[J].能源化工,2022,43(6):44-48.
SU Hao, KONG Fanmin, WU Xiaolian, et al. Study on the manufacturing process of the fine-denier and high-strength ultra-high molecular weight polyethylene fibers[J]. Energy Chemical Industry, 2022, 43(6):44-48.
- [3] 黄伟,丁金友,程金龙,等.阻燃超高分子量聚乙烯纤维的研究现状[J].塑料科技,2022,50(11):120-123.
HUANG Wei, DING Jinyou, CHENG Jinlong, et al. Research progress of flame retardant ultra high molecular weight polyethylene fibers[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(11):120-123.
- [4] 司庆宗,安晓莉,安应飞,等.医用超高分子量聚乙烯的改性及其摩擦学特点[J].中国组织工程研究,2013,17(3):496-500.
SI Qingzong, AN Xiaoli, AN Yingfei, et al. Medical ultra-high molecular weight polyethylene modification and tribological characteristics[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2013, 17(3):496-500.
- [5] 杨雅茹,沈小军,唐柏林,等.超高分子量聚乙烯纤维的无卤阻燃整理[J].纺织学报,2020,41(11):109-115.
YANG Yaru, SHEN Xiaojun, TANG Bolin, et al. Halogen-free flame retardant finishing of ultra-high molecular weight polyethylene fiber[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(11):109-115.
- [6] SHEN L, LI J, LIN H, et al. The enhanced compatibility and flame retarding ability of UHMWPE-MH composites by adding phenoxy-cyclophosphazene (HPCTP) [J]. Polymer Bulletin, 2017, 74(9): 3 639-3 655.
- [7] WANG H, CAO J, CAO C, et al. Influence of phosphorus-grafted expandable graphite on the flame-retardant property of UHMWPE composite[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2019, 30(3): 493-503.
- [8] WANG H, CAO J, LUO F, et al. Hugely enhanced flame retardancy and smoke suppression properties of UHMWPE composites with silicone-coated expandable graphite[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2019, 30(7):1 673-1 683.
- [9] 王苏娜,刘广建.膨胀型阻燃剂阻燃 UHMWPE 的研究[J].塑料, 2003(3):16-17.
WANG Suna, LIU Guangjian. Study on flame retarding UHMWPE by intumescent flame retardants[J]. Plastics, 2003(3):16-17.
- [10] 薛平,蒋启柏,何亚东,等.超高分子量聚乙烯复合阻燃改性及挤出工艺研究[J].工程塑料应用,2001,39(8):1-3.
XUE Ping, JIANG Qibo, HE Yadong, et al. Study on flame retardant modification and extrusion process of ultra high molecular weight polyethylene composite[J]. Engineering Plastics Application, 2001, 39(8):1-3.
- [11] 马文俊,邱日祥,张胜,等.超高分子量聚乙烯纤维的浸轧阻燃整理[J].印染,2015,41(4):37-40.
MA Wenjun, QIU Rixiang, ZHANG Sheng, et al. High molecular weight polyethylene fiber dip flame-retardant finishing[J]. Dyeing and Finishing, 2015, 41(4):37-40.
- [12] 苏家凯,厉勇,赵亮,等.一种有机-无机杂化无卤阻燃体系.超高分子量聚乙烯纤维用阻燃浆料及其制备方法[P]. CN116657262 A, 2023-08-29.
SU Jiakai, LI Yong, ZHAO Liang, et al. The invention relates to an organic-inorganic hybrid halogen-free flame retardant system, flame retardant slurry for ultra-high molecular weight polyethylene fiber and a preparation method thereof[P]. CN116657262A, 2023-08-29.
- [13] 王宏球.耐磨改性超高分子量聚乙烯纤维的制备及其结构性能研究[D].上海:东华大学,2022.
WANG Hongqiu. The structure and properties of ultrahigh molecular weight polyethylene with enhanced abrasion resistance [D]. Shanghai:Donghua University, 2022.
- [14] LAU S, ATAKAN B. Isothermal pyrolysis investigation of aluminum diethylphosphinate mixed as a flame retardant additive into ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Combustion and Flame, 2020, 222:272-284.
- [15] ZHANG W, HU Z, ZHANG Y, et al. Gel-spun fibers from magnesium hydroxide nanoparticles and UHMWPE nanocomposite: The physical and flammability properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 51:276-281.
- [16] LI Ai, SUN Chen, LI Yang, et al. Synergistic flame retardant effect of organic boron flame retardant and aluminum hydroxide on polyethylene[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22(2):354-365.
- [17] ZHANG T, LIU W, Wang M, et al. Synergistic effect of an aromatic boronic acid derivative and magnesium hydroxide on the flame retardancy of epoxy resin[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, 130:131-132.