

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.011

PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料的 制备及影响因素分析

张毅¹,杨彬¹,张奇鹏¹,高金霞²,郁崇文³

(1. 浙江工业职业技术学院,浙江绍兴 312000; 2. 绍兴透真纺织科技有限公司,浙江绍兴 312000; 3. 东华大学纺织学院,上海 201620)

摘要:以黄麻纤维毡为增强材料、3-羟基丁酸酯和 3-羟基戊酸酯的共聚物 (PHBV) 为基体,聚磷酸铵和氢氧化铝为复合阻燃剂,制备 PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料,研究黄麻纤维毡面密度及层数、纤维线密度、阻燃复合材料厚度对 PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料阻燃、燃烧性能的影响,得出最优工艺参数为:黄麻纤维毡层数为 3 层,面密度依次为 120,100,80 g/m²,纤维线密度为 1.65 tex,制备阻燃复合材料厚度为 4.5 mm;对最优工艺参数下的 PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料的热稳定性、拉伸性能、结构和形貌进行分析。结果表明,PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料的阻燃性能和耐燃烧性能最好,极限氧指数达 27.2%,垂直燃烧等级为 V-0 级;与未添加复合阻燃剂的 PHBV/黄麻纤维毡复合材料相比,添加复合阻燃剂的 PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料的热解温度降低 30℃,500℃时的残炭率提高 102%,拉伸强度降低 8.6%。添加复合阻燃剂的复合材料内部仍存在着少量阻燃剂的局部团聚现象。

关键词:黄麻纤维;3-羟基丁酸酯和 3-羟基戊酸酯的共聚物;面密度;复合阻燃剂;聚磷酸铵

中图分类号:TS102.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2021)12-0061-06

Preparation and Analysis of Influencing Factors of PHBV/Jute Fiber Felt Flame Retardant Composites

Zhang Yi¹, Yang Bin¹, Zhang Qipeng¹, Gao Jinxia², Yu Chongwen³

(1. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China; 2. Shaoxing Touzhen Textile Technology Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 3. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: 3-hydroxybutyrate and 3-hydroxyvalerate copolymer (PHBV)/jute fiber felt flame retardant composites were prepared with jute fiber felt as reinforcing material, PHBV as matrix, ammonium polyphosphate and aluminum hydroxide as composite flame retardant. The influences of surface density and layer number of jute fiber felt, fiber linear density and thickness of flame retardant composites on the flame retardant and combustion properties of PHBV/jute fiber felt flame retardant composites were researched, the optimum process parameters are as follows: the layer number of jute fiber felt is three, and the area densities are 120,100,80 g/m² respectively, the linear density is 1.65 tex, and the thickness of flame retardant composite is 4.5 mm. Under the optimum process parameters, the thermal stabilities, tensile properties, structures and morphologies of PHBV/jute fiber felt flame retardant composites were measured. The results show that the PHBV/jute fiber felt flame retardant composite has the best flame retardant and combustion resistance, the limiting oxygen index is 27.2%, and the vertical combustion grade is V-0. Compared with the PHBV/jute fiber felt composite without composite flame retardant, the pyrolysis temperature of PHBV/jute fiber felt composite with composite flame retardant decreases by 30℃, the carbon residue rate increases by 102% at 500℃, and the tensile strength decreases by 8.6%. The local agglomeration of a small amount of composite flame retardants still exists in the composite with composite flame retardant.

Keywords: jute fiber; 3-hydroxybutyrate and 3-hydroxyvalerate copolymer; surface density; composite flame retardant; ammonium polyphosphate

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202146090),浙江工业职业技术学院校级创新团队科技项目(112709010921620801)

通信作者:张毅,硕士,副教授,主要从事麻类纤维的脱胶与相关复合材料开发

收稿日期:2021-09-28

引用格式:张毅,杨彬,张奇鹏,等. PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料的制备及影响因素分析[J]. 工程塑料应用,2021,49(12): 61-66.

Zhang Yi, Yang Bin, Zhang Qipeng, et al. Preparation and analysis of influencing factors of PHBV/jute fiber felt flame retardant composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 61-66.

以黄麻纤维作为增强体,聚丙烯(PP)或3-羟基丁酸酯和3-羟基戊酸酯的共聚物(简称PHBV)作为基体,添加单一阻燃剂或复合阻燃剂后制备成的热压复合材料广泛应用于汽车内饰结构、建筑板材、装饰材料等,具有轻质、吸声、易降解等特性^[1-3]。PHBV又称绿色塑料,是一种用淀粉为原料,运用发酵工程技术生产出的一种生物聚酯,具有完全的生物相容性和对水、气的高阻隔性等^[4],可以制得性能各异的生物可降解复合材料。笔者所在课题组前期调研黑龙江、湖南、重庆等地的汽车内饰企业,发现相关生产线普遍采用PP或PHBV与黄麻纤维毡、聚磷酸铵(APP)热压复合制备黄麻阻燃复合内饰板,即先制备黄麻针刺纤维毡,再与APP阻燃剂、PP或PHBV基体热压复合,冷却后即可完成制备,少数企业运用PHBV来代替PP基体,以减少对环境的危害^[5]。如何让黄麻纤维毡与粉末状阻燃剂混合充分、均匀是当前企业急需解决的关键问题^[6]。

近年来,关于麻类阻燃复合材料的制备方法主要有阻燃液整理法及热压复合法^[7]。代表性的研究主要有:鲁小城等^[8]通过配置阻燃工作液,对苧麻织物进行二浸二轧处理,设置轧余率为75%,然后在105℃的烘箱中焙烘5 min,最后与酚醛树脂复合制备酚醛树脂/苧麻层压复合材料,制备材料的极限氧指数(LOI)由25.2%提高到29.1%,并达到垂直燃烧试验UL 94的V-0级。笔者所在课题组对该方法进一步研究发现,阻燃液与黄麻原料虽然接触均匀,但因材料表面吸附的阻燃剂用量过少,以及浸泡造成纤维材料变脆等,导致复合材料的阻燃性能和力学性能降低。窦艳丽等^[9]通过针刺工艺制备PP/黄麻复合纤维毡,采用表面撒粉方式将阻燃剂均匀铺撒在PP/黄麻复合纤维毡上进行热压复合,制备阻燃复合材料,当阻燃剂质量分数为20%时,复合材料水平燃烧58 s后自熄,LOI达到26.6%;经实验验证,该方法的不足之处在于热压成型过程中粉末状阻燃剂与长纤维难以混合均匀,造成复合材料阻燃效果的稳定性、均匀性欠佳。

实验中发现,APP虽能有效保护内层材料不被燃烧,具有良好的阻燃功能,但是在燃烧过程中会增加有毒烟气的释放,需要与其它阻燃剂复配使用,方可达到效果最佳^[10-11];因此笔者采用APP和氢氧化铝(ATH)复配制备复合阻燃剂,一方面利用APP良好的隔热、隔氧、防滴等功效,抑制热量释放^[12];另一方面利用ATH能良好抑制材料燃烧时产生烟

雾的优势^[13],强化阻燃效果。同时黄麻纤维毡的面密度、纤维线密度等因素对阻燃剂与纤维毡能否混合均匀关系密切;复合材料的厚度同样对阻燃性能存在一定的影响,因此制备该阻燃复合材料时,必须考虑上述因素对复合材料阻燃性能的影响。

目前,关于APP和ATH复合阻燃PHBV/黄麻纤维毡/复合材料的研究鲜见报道。笔者运用黄麻纤维毡、APP和ATH复合阻燃剂、PHBV热压复合制备PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料。通过LOI、垂直燃烧性能、锥形量热等方法探讨黄麻纤维毡的面密度及层数、纤维线密度、阻燃复合材料厚度对阻燃复合材料阻燃和燃烧性能的影响,从而拟定最优工艺条件,对最优条件下制备的阻燃复合材料进行性能和结构表征分析,为实际生产提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

黄麻纤维:线密度分别为1.25,1.65,2.05 tex,浙江金鹰集团有限公司;

PHBV粉末:熔点为80~100℃,宁波天安生物材料有限公司;

APP:Ⅱ型,聚合度>1500,镇江星星阻燃剂有限公司;

ATH:H-WF-0.8,浙江置信铝业有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电气式撒粉机:KMPF-D型,佛山市科妙机械有限公司;

平板硫化机:XLB-350×350×2型,上海齐才热压机械有限公司;

LOI仪:ZR01型,青岛山纺仪器有限公司;

垂直燃烧仪:M601型,青岛山纺仪器有限公司;

锥形量热仪:i-Cone 0402型,英国FTT公司;

热重(TG)-卡量计双重分析仪:TG/DTA7200型,日本日立公司;

电子万能试验机:CMT5304型,深圳新三思材料检测有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet IS5型,上海禹重实业有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Quanta FEG250型,美国FEI公司。

1.3 阻燃复合材料的制备

(1) 黄麻纤维毡的制备。

黄麻纤维毡由黄麻纤维制备而成。制备工艺

参数为:针刺深度为 10 mm,针刺密度为 240 刺/ cm^2 ,针刺道数为 4 道。

(2) 阻燃复合材料的制备。

运用撒粉机将复合阻燃剂 APP 和 ATH (质量配比为 2:1) 以分层撒粉方式均匀地撒在两层纤维毡或三层纤维毡之间,运用撒粉机将已设定质量比例的 PHBV 粉末均匀地撒在最上层的黄麻纤维毡上,再通过平板硫化机进行热压复合,然后冷却,制得 PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料。热压复合工艺条件为:热压温度为 170~180℃,热压压力为 17~21 MPa,热压时间为 7~9 min;冷却压力为 15~19 MPa,冷却时间为 7~9 min。

1.4 性能测试与表征

(1) LOI 测试。

按照 GB/T 2406.2-2009 测试,样品尺寸为 130 mm×10 mm×4 mm。

(2) 垂直燃烧测试。

按照 GB/T 2408-2008 测试,样品尺寸为 130 mm×13 mm×3 mm。

(3) 锥形量热测试。

按照 ISO5660-1-2016 测试,辐射功率为 35 kW/ m^2 ,样品尺寸为 100 mm×100 mm×3 mm。

(4) 热稳定性测试。

选择 N_2 环境, N_2 流速为 30 mL/min,温度为 0~500℃,升温速率为 10℃/min,对样品进行 TG 分析,样品的长、宽、高均不超过 3 mm。

(5) 拉伸性能测试。

按照 GB/T 1447-2006 测试,拉伸速度为 50 mm/min,样品尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm。

(6) FTIR 测试。

采用衰减全反射(ATR)模式进行 FTIR 测试,波数范围为 1500~4000 cm^{-1} ,样品的长×宽不超过 30 mm×30 mm。

(7) SEM 测试。

测试前对样品表面进行喷金处理,观察放大 5 万倍的样品表面形貌,样品的长、宽、高均不超过 10 mm。

2 结果与讨论

2.1 黄麻纤维毡面密度及层数对阻燃复合材料阻燃和燃烧性能的影响

在黄麻纤维毡总面密度均为 300 g/ m^2 条件

下,制备黄麻纤维毡面密度及层数不同的 3 种阻燃复合材料,分别是面密度为 180 g/ m^2 和 120 g/ m^2 的两层黄麻纤维毡阻燃复合材料,命名 1[#] 样品;面密度均为 150 g/ m^2 的两层黄麻纤维毡阻燃复合材料,命名 2[#] 样品;面密度为 120,100,80 g/ m^2 的三层黄麻纤维毡阻燃复合材料,命名 3[#] 样品。测试 3 种黄麻纤维毡面密度及层数对阻燃复合材料阻燃和燃烧性能的影响。其中,黄麻纤维线密度均为 1.65 tex, PHBV/黄麻纤维毡/复合阻燃剂的质量配比为 45/45/10,复合材料的厚度均为 4.5 mm。3 种黄麻纤维毡面密度结构阻燃复合材料的阻燃和燃烧性能测试结果见表 1 和表 2。

表 1 黄麻纤维毡面密度及层数不同的 3 种阻燃复合材料的

阻燃性能测试结果						
样品 编号	LOI/ %	续燃 时间/s	阴燃 时间/s	损毁 长度/mm	阻燃 等级	是否引燃 脱脂棉
1 [#]	25.1	0	0	4.3	V-1	否
2 [#]	25.8	0	0	4.0	V-1	否
3 [#]	27.4	0	0	3.8	V-0	否

注:黄麻纤维毡总面密度均为 300 g/ m^2 。

表 2 黄麻纤维毡面密度及层数不同的 3 种阻燃复合材料的

燃烧性能测试结果					
样品 编号	TTI/ s	MEHC/ (MJ·kg ⁻¹)	pkHRR/ (kW·m ⁻²)	MHRR/ (kW·m ⁻²)	TSP/ m ²
1 [#]	20	29.5	408	140	4.1
2 [#]	19	28.8	392	125	4.0
3 [#]	16	25.6	334	101	4.0

注:黄麻纤维毡总面密度均为 300 g/ m^2 , TTI 为引燃时间, MEHC 为平均有效燃烧热, pkHRR 为热释放速率峰值, MHRR 为平均热释放速率; TSP 为总烟释放量。

由表 1、表 2 可以看出,3[#] 样品的 LOI 最高,为 27.4%,阻燃等级为 V-0 级,TTI, MEHC, pkHRR, MHRR 和 TSP 均最低。说明 3[#] 样品的黄麻纤维毡面密度结构阻燃性能和耐燃烧性能最好,能有效地减少阻燃复合材料燃烧过程的热量释放,形成有效隔热层,隔绝燃烧时的热量释放。原因在于该黄麻纤维毡面密度结构存在着 3 层纤维毡,与复合阻燃剂、PHBV 的撒粉混合更为均匀充分,提升了阻燃复合材料的整体阻燃效果。此外,2[#] 样品的阻燃性能略优于 1[#] 样品,表明两层纤维毡的面密度越接近,撒粉混合也更为均匀。3 种黄麻纤维毡面密度结构的 TSP 基本相同,说明复合阻燃剂中的 ATH 能够有效抑制烟雾产生,其基本不受黄麻纤维毡面密度结构的影响。在实际生产中,当其它工艺参数不变时,选取的黄麻纤维毡为 3 层面密度结构,面密度依次为 120,100,80 g/ m^2 ,作为增强体进行复合效果最佳,可改善阻燃剂与黄麻纤维毡的混合均匀程度。

2.2 纤维线密度对阻燃复合材料阻燃和燃烧性能的影响

制备 3 种纤维线密度的阻燃复合材料,测试纤维线密度对阻燃复合材料阻燃与燃烧性能的影响。其中,黄麻纤维毡为 3 层面密度结构,面密度依次为 120,100, 80 g/m²,黄麻纤维毡总面密度均为 300 g/m², PHBV/ 黄麻纤维毡 / 复合阻燃剂的质量配比为 45 / 45 / 10,复合材料的厚度均为 4.5 mm。3 种纤维线密度阻燃复合材料的阻燃性能和燃烧性能测试结果见表 3、表 4。

表 3 3 种纤维线密度阻燃复合材料的阻燃性能测试结果

纤维线密度 / tex	LOI / %	续燃时间 / s	阴燃时间 / s	损毁长度 / mm	阻燃等级	是否引燃脱脂棉
1.25	27.9	0	0	3.7	V-0	否
1.65	27.2	0	0	3.7	V-0	否
2.05	26.3	0	0	4.3	V-1	否

表 4 3 种纤维线密度阻燃复合材料的燃烧性能测试结果

纤维线密度 / tex	TTI / s	MEHC / (MJ · kg ⁻¹)	pkHRR / (kW · m ⁻²)	MHRR / (kW · m ⁻²)	TSP / m ²
1.25	16	23.9	308	96	4.0
1.65	16	25.5	337	100	4.0
2.05	18	27.3	375	114	3.2

由表 3、表 4 可以看出,当纤维线密度为 1.25 tex 时,阻燃复合材料的阻燃性能和耐燃烧性能最好,LOI 为 27.9%,阻燃等级为 V-0 级,TTI, MEHC, pkHRR 和 MHRR 均最低。原因在于纤维越细,制备的纤维毡越紧密,复合材料内部的空隙大大减少,氧气的可及性变低,同时复合阻燃剂、PHBV 撒粉很难漏出,混合更加均匀。当纤维线密度为 2.05 tex 时,阻燃复合材料的阻燃等级仅为 V-1 级,但 TSP 最低。纤维线密度越大,制备的纤维毡单位面积的空隙越大,燃烧时产生的烟雾一部分进入材料内部空隙,同时 ATH 高温分解成 H₂O,很好地吸收了烟雾,故使得 TSP 最低。当纤维线密度为 1.65 tex 时,阻燃复合材料的阻燃等级为 V-0 级,且燃烧性能介于纤维线密度为 1.25 tex 和 2.05 tex 的阻燃复合材料之间,故选择纤维线密度为 1.65 tex 为宜。

2.3 阻燃复合材料厚度对阻燃复合材料阻燃和燃烧性能的影响

制备 3 种厚度的阻燃复合材料,测试厚度对阻燃复合材料阻燃与燃烧性能的影响。其中:黄麻纤维线密度均为 1.65 tex,黄麻纤维毡为 3 层面密度结构,面密度依次为 120,100, 80 g/m²,黄麻纤维毡总面密度均为 300 g/m², PHBV/ 黄麻纤维毡 / 复合阻燃剂的质量配比为 45 / 45 / 10。3 种厚度阻

燃复合材料的阻燃性能和燃烧性能测试结果见表 5、表 6。

表 5 3 种厚度阻燃复合材料的阻燃性能测试结果

厚度 / mm	LOI / %	续燃时间 / s	阴燃时间 / s	损毁长度 / mm	阻燃等级	是否引燃脱脂棉
3.5	26.2	0	0	4.2	V-0	否
4.5	27.4	0	0	3.8	V-0	否
5.5	27.1	0	0	3.9	V-0	否

表 6 3 种厚度阻燃复合材料的燃烧性能测试结果

厚度 / mm	TTI / s	MEHC / (MJ · kg ⁻¹)	pkHRR / (kW · m ⁻²)	MHRR / (kW · m ⁻²)	TSP / m ²
3.5	19	28.2	378	119	4.6
4.5	16	25.9	335	101	3.9
5.5	15	28.7	364	115	3.7

由表 5、表 6 可以看出,阻燃复合材料的 LOI 随着阻燃复合材料厚度的增加呈现先上升后下降的趋势,阻燃等级均为 V-0 级,均能达到良好的阻燃效果,损毁长度以及 MEHC, pkHRR 和 MHRR 均呈先下降后上升的趋势。原因在于同等规格及工艺参数下,复合材料厚度越小,热压复合程度越高,纤维间排列更为紧密,复合阻燃剂容易发生局部团聚现象,反之,厚度越大,纤维排列更为蓬松,材料内部孔隙率过大,从而导致阻燃性能下降。同时厚度越大,燃烧时产生的烟雾一部分进入材料内部空隙,加上 ATH 高温分解成 H₂O,很好地吸收了烟雾,使得 TSP 越低。一般选择阻燃复合材料厚度为 4.5 mm 为宜。

综上所述,制备 PHBV/ 黄麻纤维毡阻燃复合材料的优化工艺参数为:黄麻纤维毡层数为 3 层,面密度依次为 120,100, 80 g/m²,每层表面均匀撒粉 1 次,纤维线密度为 1.65 tex,阻燃复合材料的厚度为 4.5 mm。

2.4 阻燃复合材料的热稳定性性能分析

在优化工艺参数下,对添加复合阻燃剂前后制备的 PHBV/ 黄麻纤维毡复合材料进行热稳定性性能测试,结果如图 1 所示。由图 1 可知,失重 5% 时,添加复合阻燃剂的复合材料的热解温度为 235℃,明显低于未添加阻燃剂的复合材料的 265℃,降低 30℃;500℃ 时,添加复合阻燃剂的复合材料的残炭率为 42.18%,较未添加阻燃剂的复合材料提升了 102%,显著改善了复合材料的热稳定性。原因在于阻燃剂 APP 的初始分解温度比较低,在复合材料持续升温过程中,APP, ATH 优先分解,产生的磷酸、氨气、H₂O 等小分子促进复合材料炭化,形成炭层,起到了良好的阻燃、隔热效果,进而提高了阻燃复合材料的热稳定性。

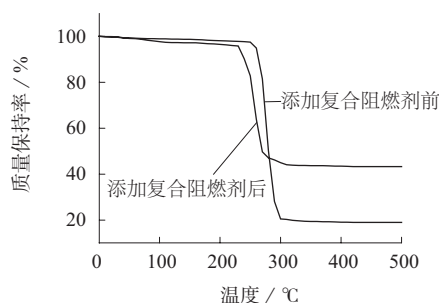


图1 添加复合阻燃剂前后复合材料的TG曲线

2.5 阻燃复合材料的拉伸性能分析

在优化工艺参数下,对添加复合阻燃剂前后制备的PHBV/黄麻纤维毡复合材料进行拉伸性能测试,结果表明,添加复合阻燃剂的复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别为27.67 MPa和6.13%,未添加阻燃剂的复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别为30.26 MPa和6.85%,前者较后者分别降低8.6%和10.5%。原因在于,未添加复合阻燃剂时,热压复合过程中不会发生局部团聚现象,而阻燃剂的加入会导致混合不均匀,局部产生团聚,造成拉伸强度和断裂伸长率均有一定程度的降低。

2.6 阻燃复合材料的FTIR分析

在优化工艺参数下,对添加复合阻燃剂前后制备的PHBV/黄麻纤维毡复合材料进行FTIR分析,结果如图2所示。

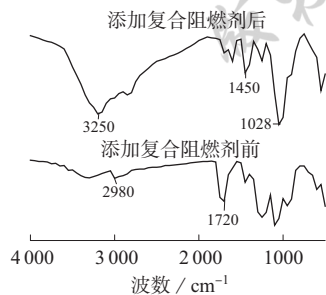
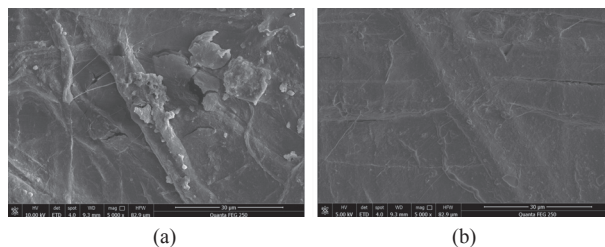


图2 添加复合阻燃剂前后复合材料的FTIR谱图

由图2可知,未添加复合阻燃剂的复合材料在 2980 cm^{-1} 处存在吸收峰,应为 $-\text{CH}_3$ 的吸收峰, 1720 cm^{-1} 处的吸收峰应为 $-\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰。添加复合阻燃剂的复合材料在 3250 cm^{-1} 处存在明显的吸收峰,应为添加APP后产生的 $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}$ 吸收峰, 1450 cm^{-1} 处应为 $\text{P}=\text{O}$ 特征峰, 1028 cm^{-1} 处应为 $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ 特征峰。

2.7 阻燃复合材料表面的SEM分析

在优化工艺参数下,对添加复合阻燃剂前后制备的PHBV/黄麻纤维毡复合材料表面进行SEM分析,结果如图3所示。



a—添加复合阻燃剂后;b—添加复合阻燃剂前

图3 添加复合阻燃剂前后复合材料表面的SEM照片

由图3可知,添加复合阻燃剂后,PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料中的复合阻燃剂虽然分散较为均匀,但仍存在着一定的局部团聚现象,这些团聚会造成复合材料在拉伸时的应力集中、断裂不均等问题,从而使复合材料的拉伸性能降低;而未添加复合阻燃剂的复合材料表面非常光滑,同时内部排列均匀,未产生PHBV的局部团聚现象,从而使得该复合材料的拉伸强度高于阻燃复合材料,这与拉伸性能测试结果一致。

3 结论

(1) 选取3层黄麻纤维毡时,PHBV/黄麻纤维毡阻燃复合材料的LOI最高,为27.4%,阻燃等级为V-0级,能有效减少阻燃复合材料燃烧过程的热量释放,形成有效隔热层;纤维线密度越细,阻燃性能和耐燃烧性能越好;复合材料的厚度越大或越小均造成阻燃和耐燃烧性能降低。综合上述结果,得出最佳工艺参数为:黄麻纤维毡层数为3层,面密度依次为 $120, 100, 80\text{ g/m}^2$,纤维线密度为 1.65 tex ,复合材料的厚度为 4.5 mm ,此时可使黄麻纤维毡与阻燃剂混合最为充分、均匀。

(2) 失重5%时,添加复合阻燃剂的复合材料的热解温度为 235°C ,明显低于未添加阻燃剂复合材料的 265°C ; 500°C 时,添加复合阻燃剂的复合材料的残炭率为42.18%,较未添加阻燃剂的复合材料提升了102%,显著改善了复合材料的热稳定性。

(3) 添加复合阻燃剂的复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均低于未添加阻燃剂的复合材料,原因在于复合阻燃剂虽然分散较为均匀,但局部仍存在着一定的团聚现象。

(4) 添加复合阻燃剂的复合材料燃烧时可在表面形成稳定的炭层,达到良好的阻燃效果。

参考文献

- [1] Ahmad F, Choi H S, Park M K. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2015,

- 300(1):10-24.
- [2] 陈春晖,吉强,许多,等. PLA/麻纤维复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2020,48(12):151-156.
Chen Chunhui, Ji Qiang, Xu Duo, et al. Research progress of PLA/hemp fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):151-156.
- [3] 李艳,张得昆,徐自超,等. PP/GF/黄麻纤维汽车内饰用复合材料针刺工艺[J]. 纺织高校基础科学学报,2020,33(2):5-10.
Li Yan, Zhang Dekun, Xu Zichao, et al. Needling process of PP/GF/jute fiber composite sheet for automobile interior decoration[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2020, 33(2):5-10.
- [4] Aguiar G P S, Magro C D, Carvalho G O, et al. Co-precipitation of anthocyanin in PHBV by the SEDS techniques[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58:4 217-4 224.
- [5] 陈建香,杨润苗,向萌,等. 聚(β -羟基丁酸戊酸酯)复合材料的热力学性能[J]. 塑料,2021,50(3):38-43.
Chen Jianxiang, Yang Runmiao, Xiang Meng, et al. Thermodynamic properties of poly(β -hydroxybutyrate-co-valerate) composite[J]. Plastics, 2021, 50(3):38-43.
- [6] 宋莉,贾振福. 阻燃高分子材料的研究进展及其在工程领域中的应用[J]. 合成树脂及塑料,2018,35(5):95-99.
Song Li, Jia Zhenfu. Research progress of flame retardant polymer materials and their applications in engineering[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2018, 35(5):95-99.
- [7] Yu Tao, Tuerhongjiang T, Cong Sheng, et al. Phosphorus-containing diacid and its application in jute/poly(lactic acid) composites: Mechanical, thermal and flammability properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 97: 60-66.
- [8] 鲁小城,闫红强,王华清,等. 阻燃苧麻/酚醛树脂复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报,2011,28(3):1-5.
Lu Xiaocheng, Yan Hongqiang, Wang Huaqing, et al. Preparation and properties of flame retarded ramie/phenolic resin composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2011, 28(3):1-5.
- [9] 窦艳丽,李雪菲,张天琪,等. β -环糊精-聚磷酸铵对黄麻/聚丙烯复合材料阻燃性能的影响[J]. 复合材料学报,2019,36(11):2 568-2 578.
Dou Yanli, Li Xuefei, Zhang Tianqi, et al. Effect of β -cyclodextrin and ammonium polyphosphate on flame retardancy of jute/polypropylene composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2019, 36(11):2 568-2 578.
- [10] 彭淑萍,陶纯初,卢鑫,等. 新型含氮阻燃剂的合成与阻燃性能初探[J]. 塑料工业,2008,36(5):67-69.
Peng Shuping, Tao Chunchu, Lu Xin, et al. Study on synthesis and flame retardancy of new nitrogen-containing flame retardant[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(5):67-69.
- [11] 王欢,杨东杰,钱勇,等. 木质素基功能材料的制备与应用研究进展[J]. 化工进展,2019,38(1):434-437.
Wang Huan, Yang Dongjie, Qian Yong, et al. Recent progress in the preparation and application of lignin-based functional materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(1):434-448.
- [12] Zhang Tao, Yan Hongqiang, Shen Lie, et al. Chitosan/phytic acid polyelectrolyte complex: A green and renewable intumescent flame retardant system for ethylene-vinyl acetate copolymer[J]. Industrial & Engineering Chemical Research, 2014, 53(49):19 199-19 207.
- [13] 李建军. 阻燃理论[M]. 北京:科学出版社,2013.
Li Jianjun. Flame retardant theory[M]. Beijing: Science Press, 2013.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,编辑部所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.net,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账号汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用编辑部)