

APP-PER-MEL 阻燃剂对竹粉/PP 复合材料性能的影响

王嘉辉,袁 峰,刘子江,秦兴发,周吓星*

(福建农林大学 材料工程学院,福建 福州 350002)

摘 要:采用硅烷包覆型聚磷酸铵(APP)作为阻燃剂,对竹粉/聚丙烯(PP)复合材料进行阻燃改性,研究 APP 的用量对复合材料阻燃性能和力学性能的影响;基于 APP 的最佳用量,以 APP、季戊四醇(PER)和三聚氰胺(MEL)作为膨胀型阻燃剂(IFR),研究 APP、PER 和 MEL 的互配比例对复合材料阻燃和力学性能的影响。结果表明,随着 APP 用量的增加,复合材料的阻燃性能不断增强,但弯曲和拉伸强度下降。当 APP 用量为复合材料总质量的 15%时,其综合性能较佳,与未阻燃复合材料相比,极限氧指数(LOI)由 17.1%提高至 21.5%,弯曲模量和缺口冲击强度(NIS)分别增强 14.8%和 32.2%,弯曲强度和拉伸强度分别降低 9.3%和 28.8%。当 APP、PER 和 MEL 的互配比例为 3:1:1 时,添加 15% IFR 的复合材料的力学性能总体增强,与未阻燃复合材料相比,弯曲强度、弯曲模量和 NIS 分别增强 18.1%、20.0%和 23.3%,仅拉伸强度降低 10%。锥形量热仪和极限氧指数仪结果显示,IFR 阻燃复合材料的热释放速率、热释放速率峰值和总热释放量分别降低 56.7%、40.2%和 30.5%;LOI 提高至 25.9%,复合材料的阻燃性能进一步改善,但是,总产烟量增大了 16.7%,该 IFR 的添加对复合材料的持久抑烟效果不佳。

关键词:竹塑复合材料;竹粉;聚丙烯;阻燃;聚磷酸铵

中图分类号:TB332 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2020)04-0212-06

Effects of Ammonium Polyphosphate-Pentaerythritol-Melamine Flame Retardant on the Properties of Bamboo Powder/Polypropylene Composites

WANG Jia-hui, YUAN Feng, LIU Zi-jiang, QIN Xing-fa, ZHOU Xia-xing*

(College of Materials Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: To improve the flame retardant performance of bamboo powder/polypropylene (PP) composites, the silane-coated ammonium polyphosphate (APP) was used as flame retardant, and the effects of the APP amount on the flame retardancy and mechanical properties of the composites were studied. Additionally, the intumescent flame retardant (IFR) was prepared by melt blending with pentaerythritol (PER), melamine (MEL), and APP, and the effects of the compounding ratio of APP, PER, and MEL on the composite flame retardant and mechanical properties were also investigated. The results showed that the limiting oxygen index (LOI) increased with the increase of APP amount, but the bending and tensile strength decreased. Compared with the untreated composite, the LOI of the composite with 15% APP loading increased from 17.1% to 21.5%, increased by 25.7%, and the flexural modulus and notched impact strength enhanced by 14.8% and 32.2%, respectively, and the flexural and tensile strength decreased by 9.3% and 28.8%, respectively. The optimal mass ratio of APP, PER, and MEL was 3:1:1 for which the composite overall mechanical properties were enhanced, and the bending strength, flexural modulus and notched impact strength increased by 18.1%, 20.0%, and 23.3%, respectively, and the tensile strength only decreased by

收稿日期:2019-10-11 修回日期:2019-11-08

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD060080203)。

作者简介:王嘉辉。研究方向:木塑阻燃。E-mail:1295163736@qq.com

* 通信作者:周吓星,博士,副教授,硕士生导师。研究方向:生物质复合材料。E-mail:star11110818@163.com

10%。The cone calorimeter test results showed that the average heat release rate (HRR) decreased from 465.7 to 201.6 kW/m², decreased by 56.7%, and the total heat release (THR) decreased from 237.9 to 165.3 MJ/m², decreased by 40.2%, and the LOI increased to 25.9%, increased by 51.5%. But the total smoke production (TSP) increased by 16.7%; the IFR had no positive effects on endurable smoke suppression.

Key words: bamboo-plastic composite (BPC); bamboo powder; polyethylene; flame retardant; ammonium polyphosphate (APP)

我国是世界上竹类资源最丰富的国家,竹材生长周期短、强度高、韧性大、耐磨性好,是工程结构的理想原料,适合用做木塑复合材料的增强相^[1]。竹塑复合材料(bamboo plastic composite, BPC)的研究对于实现“以竹代木”,缓解木材资源紧张,提高竹材资源综合利用率,加强塑料综合利用具有重要的意义^[2]。竹粉/聚丙烯(PP)复合材料是以竹粉为增强相、PP 为基体制备的复合材料,具有良好的力学性能、加工性能和可降解性,可应用于装饰、建材家具、市政工程和包装等多个领域^[3]。但是竹粉和 PP 均属于易燃材料,未经阻燃处理的 BPC 无法满足材料的防火要求,产品的应用受到限制,木塑复合材料(WPC)的阻燃改性是目前一个重要的研究方向^[4-5]。磷系阻燃剂具有低烟、无卤素、阻燃效果持久等优点,受到越来越多的关注,尤其聚磷酸铵(APP)受到广泛应用研究^[6-7],国内外学者采用聚合度较高的 APP^[8]、对 APP 进行表面改性、偶联改性^[9]、采用膨胀石墨^[10]、次磷酸铝^[11]、硅灰石、MgO、硼酸锌、纳米蒙拓土、纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃、碳纳米管、石墨烯等无机纳米填料、层状双羟基氧化物、分子筛等作为协效剂协同阻燃改性,其中,以 APP 为酸源制备的膨胀型阻燃剂(IFR)具有隔热、隔氧、防滴等功效,是国内外解决 WPC 易燃的主要方法^[12]。本研究热压制备 30%竹粉/PP 复合材料,以硅烷包覆型 APP 为阻燃剂,研究 APP 的用量对复合材料阻燃性能和力学性能的影响,确定较佳 APP 用量后,以季戊四醇(PER)为炭源、三聚氰胺(MEL)为气源制备 IFR,采用锥形量热仪(CONE)法^[13]研究 IFR 对复合材料阻燃性能和力学性能的影响,确定 3 种组分的较佳配比,以期制备阻燃性能和力学性能较佳的竹塑复合材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

聚丙烯(PP):型号 K8303,购自中化泉州石化有限公司;竹粉:购自浙江临安市明珠竹木粉有限公司;偶联剂马来酸酐接枝聚丙烯(maleic anhydride modified polypropylene, MAPP),购自南京德巴化

工有限公司;润滑剂硬脂酸、硬脂酸钙均为市售;硅烷包覆型聚磷酸铵:HY-APP202,聚合度>1000,东莞市汇意化工材料有限公司;季戊四醇和三聚氰胺均购自天津市致远化学试剂有限公司。

1.2 竹粉/PP 复合材料的制备

将竹粉放入 105℃烘箱中干燥 10 h,至绝干。60℃时,将干燥的竹粉、APP、PP、MAPP 及润滑剂放入高速混合机中,混合升温至 120℃后继续混合 10 min,制得预混料;将预混料放入密炼机中混炼 8 min,混炼温度 185℃、转速 30 r/min,混炼后的复合材料经塑料粉碎机粉碎成粒径为 2~10 mm 的竹塑粒子;然后将竹塑粒子平铺于模具中,放入热压成型机(4389,美国 carver 有限公司)中预压 5 min、预压温度 180℃;然后热压成型,热压温度 185℃、热压压力 5.8 MPa,热压时间 10 min;最后冷水冷却至 60℃,开模取样。竹粉、MAPP 和润滑剂分别占复合材料总质量的 30%、2%和 1%,APP 分别占总质量的 0%、5%、10%、15%和 20%;优选出 APP 用量的基础上,进一步优化聚磷酸铵、季戊四醇和三聚氰胺的比例,APP:PER:MEL 分别为 2:1:1、3:1:1、4:1:1、5:1:1、6:1:1,进一步改善复合材料的阻燃性能。

1.3 试验方法

1.3.1 阻燃性能测试 参照 GB/T 2406.2-2009《塑料用氧指数法测定燃烧行为 第 2 部分:室温试验》进行极限氧指数测定,采用氧指数仪(JF-3,德量检测仪器有限公司)测定复合材料的极限氧指数(limiting oxygen index, LOI),试样尺寸为 100 mm(长)×10 mm(宽)×4 mm(厚),每组试样测试 10 根样品,取平均值。采用锥形量热仪(East Grinstead, UK)测试,参照 ASTM D6113 标准测定样品的热释放速率(heat release rate, HRR)、总热释放量(total heat rate, THR)、总烟产量(total smoke production, TSP)等参数。试样的尺寸为 100 mm(长)×100 mm(宽)×4 mm(厚),热流设置为 50 kW/m²,每组测试 3 个样品,取平均值。

1.3.2 力学性能测试 参照 GB/T 9341-2008《塑料弯曲性能的测定》,采用 CMT6000 型深圳三思

万能力学试验机测定试样的弯曲强度和弯曲模量,试样尺寸为 80 mm(长)×10 mm(宽)×4 mm(厚),加载速度为 10 mm/min,跨距 48 mm。参照 GB/T 1040.1-2018《塑料 拉伸性能的测定 第 1 部分:总则》,对哑铃型试样进行拉伸性测试,试样尺寸为 150 mm(长)×20 mm(宽)×4 mm(厚)。弯曲性能和拉伸性能测试结果为 6 个试样测试结果的平均值。参照 GB/T 1043.1-2008《塑料 简支梁冲击性能的测定 第 1 部分:非仪器化冲击试验》,采用摆锤冲击试验机测定试样的缺口冲击强度(notched impact strength,NIS),试样的尺寸为 40 mm(长)×10 mm(宽)×4 mm(厚),缺口深 1.4 mm,试验结果为 8 个试样测试结果的平均值。

2 结果与分析

2.1 APP 含量对竹粉/PP 复合材料阻燃和物理力学性能的影响

APP 含量对竹粉/PP 复合材料阻燃性能和物理力学性能的影响见表 1。对表 1 中的数据进行单因素方差分析可知,APP 的添加量对复合材料的密度、拉伸强度和冲击强度的影响不显著,对弯曲强度和弯曲模量的影响显著($P<0.05$)。未阻燃复合材料的密度是 0.93 g/cm³,添加 APP 后,材料的密度略微增大,为 0.94~0.98 g/cm³。当 APP 用量为 5%~15%时,随着 APP 用量增加,复合材料的弯曲和拉伸强度缓慢下降,APP 用量为 15%时,弯曲和

拉伸强度分别降低 9.3%和 28.8%;APP 用量为 20%时,弯曲和拉伸强度明显降低,分别降低26.6%和 31.4%。随着 APP 用量的增加,复合材料的弯曲模量和 NIS 先增强后降低。当 APP 用量为 15%时,复合材料的弯曲模量和 NIS 达到最大,弯曲模量由未改性时的 3 380.51 MPa 增强至 3 881.45 MPa,提高 14.8%,NIS 由 5.66 kJ·m⁻² 增强至 7.48 kJ·m⁻²,提高 32.2%。添加 APP 时,稻秸-HDPE 复合材料的冲击强度显著增加,这可能是因为竹材中的硅物质与 APP 交联反应,产生的新物质有利于复合材料在承受冲击载荷时吸收能量,从而提高了材料的冲击强度^[8]。随着 APP 用量的增加,聚乳酸/秸秆粉复合材料的刚性增强,但聚乳酸/秸秆粉复合材料的冲击韧性随着 APP 用量增加而下降^[14]。LOI 是指复合材料燃烧的最低氧气浓度,LOI 越高,阻燃性能越好。对表 1 中的 LOI 进行方差分析显示,APP 的添加量对氧指数有显著影响($P<0.05$)。随着 APP 用量的增加,复合材料的 LOI 逐渐增大,但是,单纯加入 APP 阻燃处理竹粉/PP 复合材料时,LOI 的增长率不大,加入 20%APP 时,其阻燃效果才较明显,LOI 由未阻燃处理时的 17.1%提高至 23.2%,提高了 35.7%,且 LOI>22%,不属于易燃材料,但是该复合材料的弯曲强度和拉伸强度降低明显。综合阻燃性能和力学性能,确定 APP 的较佳用量为 15%,该复合材料的 LOI 为 21.5%,仍需进一步改性。

表 1 APP 含量对竹粉/PP 复合材料物理力学性能和极限氧指数的影响

Table 1 Effects of APP content on physico-mechanical properties and limited oxygen index of bamboo powder-PP composites

APP 质量分数/%	密度 /(g·cm ⁻³)	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /MPa	拉伸强度 /MPa	NIS /(kJ·m ⁻²)	极限氧指数 /%
0	0.93(0.01)	37.06(2.15)	3 380.51(234.43)	15.96(1.34)	5.66(0.26)	17.1(0.2)
5	0.98(0.01)	34.25(2.01)	3 527.03(221.68)	13.63(1.26)	5.94(0.18)	18.8(0.1)
10	0.97(0.01)	31.56(1.96)	3 634.05(204.32)	12.56(1.58)	6.26(0.23)	19.9(0.2)
15	0.96(0.01)	33.64(2.13)	3 881.45(246.63)	11.37(1.17)	7.48(0.21)	21.5(0.2)
20	0.94(0.01)	25.72(2.78)	3 056.73(212.53)	10.95(1.02)	6.49(0.29)	23.2(0.1)

注:括号内为标准偏差。

2.2 APP 和 IFR 对竹粉/PP 复合材料阻燃性能的影响

图 1 是阻燃处理前后竹粉/PP 复合材料的热释放速率(HRR)、总热释放量(THR)、CO 产生量(YCO)和总烟产量(TSP)曲线。由图 1(a)可见,复合材料点燃后 HRR 曲线均迅速上升,未阻燃复合材料在燃烧 75 s 时 HRR 达到最大值,其峰值为 928.9 kW/m²,燃烧 250 s 后,HRR 曲线迅速下降;阻燃复合材料 HRR 曲线出现“双峰”,且 HRR 的峰值明显降低,添加 15% APP 的复合材料燃烧 50 s 后 HRR 达到峰值,为 678.9 kW/m²,采用 APP :

PER : MEL 为 3 : 1 : 1 制备的 IFR 处理的复合材料在燃烧 45 s 后 HRR 达到峰值,为 555.3 kW/m²,分别降低了 26.9%和 40.2%。由图 1(b)可见,THR 随着燃烧时间急剧上升后趋于稳定值,阻燃处理后,复合材料的 THR 明显降低,而且 THR 趋于稳定值的燃烧时间延长。点燃后,未阻燃复合材料 THR 曲线迅速上升,燃烧 300 s 后,THR 曲线平缓上升并趋于稳定,530 s 燃烧试验结束时,THR 为 237.9 MJ/m²;阻燃复合材料的 THR 曲线上升趋势明显变缓,燃烧 400 s 后,THR 曲线趋于稳定;燃烧 675 s 后,添加 15%APP 的复合材料的 THR 为

176.4 MJ/m²;燃烧 845 s 后,IFR 处理的复合材料的 THR 为 165.3 MJ/m²,分别下降了 25.9% 和 30.5%。由此可见,APP 对复合材料具有一定的阻燃效果,将 APP 与 PER、MEL 互配的 IFR 可进一步吸收热量,很好地抑制材料的燃烧过程,在实际火灾中起到延缓火势的作用。APP 的加入改变了复合材料的热降解行为,降低最大热降解速率^[15]。由图 1(c)可见,IFR 处理的复合材料燃烧过程产生的 CO 量明显增加,锥形量热试验结束时,未阻燃复合材料的 YCO 为 27.91 kg/kg,而 IFR 处理的复合材料的 YCO 为 78.02 kg/kg。YCO 的增加说明复合材料燃烧得不完全,CO 无法进一步转换成 CO₂。这是因为高温下作为酸源的 APP 分解成 NH₃ 和 H₂O,可燃性气体和易挥发物质被稀释,O₂ 浓度减少,阻碍气态物质进一步燃烧释放热量,从而起到气相阻燃的作用^[16-17]。由图 1(d)可见,竹粉/PP 复合

材料燃烧过程会产生大量的烟气,而阻燃处理后,复合材料的 TSP 反而略微增大,分别燃烧 250 s 和 330 s 后,APP 和 IFR 处理的复合材料产生的烟气均超过未处理复合材料。IFR 处理的复合材料的 TSP 为 31.5 m²,比未处理复合材料的 TSP 增加了 16.7%。这可能与图 2 所示的长时间燃烧后阻燃复合材料表面产生的炭层不稳定有关。由图 2 可见,锥形量热仪测试后,未阻燃复合材料表面炭层呈灰白色,说明材料燃烧较完全;IFR 阻燃的复合材料燃烧后表面形成块状深黑色炭层,说明 APP 的降解产物较早产生,这些产物在燃烧初始紧密地覆盖在炭层表面,有效阻止复合材料的燃烧,但是随着燃烧时间的延长,复合材料表面的炭层不够坚固,炭块之间产生很多缝隙和较大的裂缝,减弱了复合材料后期的阻燃性,而且导致产烟量增大。

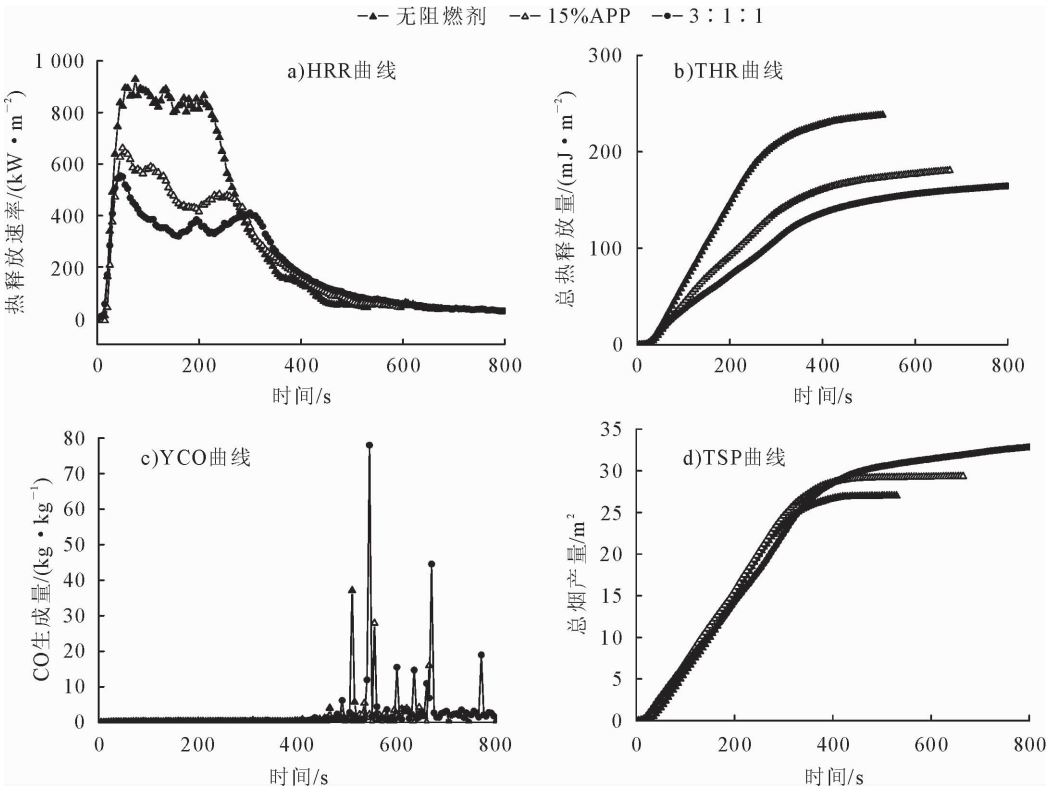
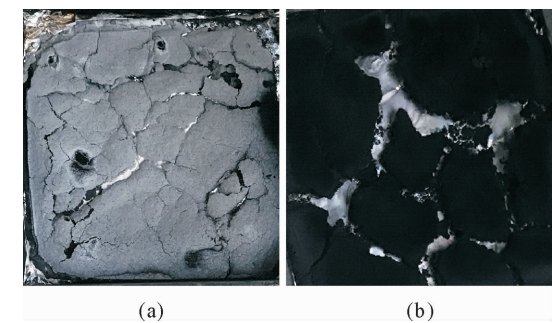


图 1 竹粉/PP 复合材料的热释放速率、总热释放量、CO 生成量、总烟产量曲线

Fig. 1 Heat release rate, total heat release, YCO, and total smoke production curves of bamboo powder-PP composites

由表 2 可见,未处理复合材料的 HRR 和 THR 分别为 465.7 kW·m⁻² 和 237.9 MJ·m⁻²,添加 APP 和 IFR 后,复合材料的 HRR 和 THR 明显降低,尤其是 APP:PER:MEL 为 3:1:1 时,复合材料的 HRR 和 THR 降至最低,分别为 201.6 kW·m⁻² 和 165.3 MJ·m⁻²,分别降低了 39.4% 和 23.3%。复合材料的点燃时间(time to ignition, TTI)较短,为 13 s,IFR 阻燃处理后,TTI 有所延长。阻燃处理复合材料的残炭率(residue weight, RW)略有提高,表明 APP 起到促进成炭的作用,但是,APP 和 IFR 对 TSP 的影响不明显,在燃烧一定进程后并没有显示出优良的抑烟性能。与锥形量热仪测试结果一致的是,与 15%APP 阻燃复合材料相比,添加 IFR 的复合材料的 LOI 有所增大,当 APP:PER:MEL 为 2:1:1 时,复合材料的 LOI 由 21.7%提高至 23.8;当 APP:PER:MEL 为 3:1:1 时,LOI 继续提高至 25.9%;继续提高 APP 所占比例,LOI 不再继续增大。



注：(a)未阻燃复合材料；(b)IFR阻燃复合材料。

图 2 竹粉/PP 复合材料锥形量热测试后的表面照片

Fig. 2 Photos of residue bamboo powder/PP composites after CONE tests

2.3 IFR 对竹塑复合材料物理力学性能的影响

以 APP 为主要原料的膨胀型阻燃剂对竹粉/PP 复合材料物理力学性能的影响见表 3。对表 3 中的数据进行单因素方差分析可知,聚磷酸铵、季戊

四醇和三聚氰胺的对比对复合材料各项物理力学指标均有显著影响($P<0.05$)。与表 2 中添加 15% APP 的复合材料相比,IFR 阻燃复合材料的密度略微增大,为 $1.02\sim1.08\text{ g/cm}^3$,复合材料的弯曲强度、弯曲模量、拉伸强度均增强,而 NIS 总体上有所降低。当 APP:PER:MEL 为 2:1:1 时,复合材料的弯曲强度和拉伸强度增强,NIS 降低,随着 APP 在 3 种材料中比例的逐渐增大,复合材料的拉伸强度和 NIS 呈现波动变化,力学性能总体不再明显增强。结合阻燃性能、物理力学性能以及原料的价格等因素,确定 APP:PER:MEL 为 3:1:1 为三者的较佳比例,与未阻燃复合材料相比,阻燃复合材料的 LOI 为 25.9%,提高了 51.5%;且其总体力学性能增强,弯曲强度和弯曲模量分别提高 18.1%和 20.0%,NIS 提高 23.3%,仅拉伸强度下降 9.9%。

表 2 竹粉/PP 复合材料的燃烧特征参数和极限氧指数

Table 2 Combustion characteristic parameters and LOI of bamboo powder-PP composites

试样	TTI /s	HRR /(kW·m ⁻²)	THR /(MJ·m ⁻²)	TSP /m ²	RW /%	LOI /%
未添加阻燃剂	13(1)	465.7(46.0)	237.9(12.6)	27.0(1.1)	61.6(0.1)	17.1(0.02)
15%APP	15(2)	276.5(16.4)	176.4(2.5)	29.3(1.3)	64.9(0.1)	21.7(0.12)
2:1:1	15(1)	282.3(16.7)	182.4(3.3)	27.1(0.4)	64.2(0.4)	23.8(0.13)
3:1:1	18(1)	201.6(20.7)	165.3(4.2)	31.5(1.1)	64.9(2.1)	25.9(0.10)
4:1:1	21(3)	292.8(41.8)	176.0(5.6)	28.3(1.5)	64.4(0.6)	23.7(0.15)
5:1:1	18(1)	290.3(25.5)	166.9(0.1)	26.2(0.1)	65.1(0.9)	24.5(0.13)
6:1:1	17(3)	296.7(3.4)	169.7(6.7)	27.9(1.3)	66.1(0.4)	24.6(0.17)

注:括号内为标准偏差。

表 3 聚磷酸铵、季戊四醇和三聚氰胺的对比对竹粉/PP 复合材料物理力学性能的影响

Table 3 Effects of APP,PER,and MEL ratio on physico-mechanical properties of bamboo powder-PP composites

APP:PER:MEL	密度 /(g·cm ⁻³)	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /MPa	拉伸强度 /MPa	NIS /(kJ·m ⁻²)
2:1:1	1.06(0.02)	43.87(1.38)	4036.30(253.18)	16.01(2.01)	6.26(0.25)
3:1:1	1.06(0.01)	43.77(2.67)	4057.93(221.67)	14.37(1.43)	6.98(0.28)
4:1:1	1.02(0.01)	42.39(1.92)	3719.66(239.45)	14.16(1.62)	6.76(0.17)
5:1:1	1.08(0.01)	45.11(2.51)	4089.55(268.18)	15.55(1.51)	7.27(0.27)
6:1:1	1.07(0.01)	46.49(2.34)	4242.90(247.92)	13.73(1.38)	7.66(0.26)

注:括号内为标准偏差。

3 结论与讨论

硅烷包覆型 APP 的添加量对 30%竹粉/PP 复合材料的密度、拉伸强度和 NIS 的影响不显著,对极限氧指数、弯曲强度和弯曲模量的影响显著。随着 APP 用量的增加,复合材料的 LOI 增大,弯曲强度和拉伸强度下降,弯曲模量先增强后下降,NIS 总体增强。以 APP 为酸源,PER 为炭源,MEL 为气源制备的 IFR 可进一步改善复合材料的阻燃性能和力学性能。

APP 的较佳用量为 15%,复合材料的 LOI 由

17.1%提高至 21.5%,HRR 和 THR 分别降低 41.9%和 25.9%。以 APP:PER:MEL 为 3:1:1 制备 IFR,添加 15% IFR 时,复合材料的力学性能总体增强,弯曲强度、弯曲模量和 NIS 分别由 37.06 MPa、3 380.51 MPa、5.66 kJ·m⁻²增强至 43.77 MPa、4 057.93 MPa、6.98 kJ·m⁻²,与未阻燃复合材料相比,分别提高了 18.1%、20.0%和 23.3%,拉伸强度由 15.96 MPa 下降至 14.37 MPa,降低 10%。添加 15% IFR 时,复合材料的 LOI 为 25.9%,与未阻燃复合材料相比提高了 51.1%;HRR 的峰值由 928.9 kW·m⁻²降低至

555.3 kW · m⁻²,降低 40.2%,HRR 由 465.7 kW · m⁻²降低至 201.6 kW · m⁻²,降低 56.7%,THR 由 237.9 MJ · m⁻²降低至 165.3 MJ · m⁻²,降低 30.5%。但是,锥形量热仪测试结束后复合材料表面产生的炭块之间有较大的裂缝,总产烟量增大,该 IFR 对复合材料不具有持久的抑烟性。

参考文献:

[1] DITTENBER D B,GANGARAO H V S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012,43(8):1419-1429.

[2] BAHARI S A,KRAUSE A. Utilizing *Malaysian* bamboo for use in thermoplastic composites[J]. Journal of Cleaner Production,2016,110:16-24.

[3] ZHOU X X,HUANG S S,CHEN L H. Effect of antiaging agents on the outdoor natural weathering of bamboo powder/polypropylene foamed composites[J]. Journal of Vinyl & Additive Technology,2016,22(3):311-319.

[4] ZHANG Z X,ZHANG J,LU B X,*et al.* Effect of flame retardants on mechanical properties,flammability and foamability of PP/wood-fiber composites [J]. Composites: Part B, 2012, 43 (2):150-158.

[5] 靳肖贝,张禄晟,李瑜瑶,等. 3 种阻燃剂对重组竹燃烧性能和物力学性能的影响[J]. 西北林学院学报,2015,30(5):214-218.

JIN X B,ZHANG L S,LI Y Y,*et al.* Effects of three flame retardants on combustion,physical and mechanical properties of bamboo scrimer [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(5):214-218. (in Chinese)

[6] 范友华,吴袁泊,袁利萍. 多孔材料协同 APP 处理木纤维/PVC 复合材料的阻燃与抑烟研究[J]. 西北林学院学报,2018,33 (5):208-213.

FAN Y H,WU Y B,YUAN L P. Flame retardant and smoke inhabitation of wood fiber/PVC composite material treated by APP and porous materials[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(5):208-213. (in Chinese)

[7] ARAO Y,NAKAMURA S,TOMITA Y,*et al.* Improvement on fire retardancy of wood flour/polypropylene composites using various fire retardants [J]. Polymer Degradation and Stability,2014,100(2):79-85.

[8] 潘明珠,梅长彤,李国臣,等. 聚磷酸铵改善稻秸-高密度聚乙烯复合材料的理化性能[J]. 农业工程学报,2014,30(16):328-333.

PAN M Z,MEI C T,LI G C,*et al.* Ammonium polyphosphate improving physicochemical properties of rice straw-high density polyethylene composites[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014,30(16):328-333. (in Chinese)

[9] 周林,李丽萍. 硅烷改性聚磷酸铵对木粉/聚丙烯复合材料阻燃性能的影响[J]. 燃烧科学与技术,2012,18(1):62-66.

ZHOU L,LI L P. Influence of ammonium polyphosphate modified with silanes on flame retardancy properties of wood flour-polypropylene composites[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2012,18(1):62-66. (in Chinese)

[10] GUO C G,ZHOU L,LV J X. Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flour-polypropylene composites [J]. Polymers & Polymer Composites, 2013, 21 (7):449-456.

[11] 赵盼盼,李丽萍. 聚磷酸铵/次磷酸铝协效阻燃聚丙烯/木粉复合材料[J]. 材料导报,2017,31(6):115-119.

ZHAO P P,LI L P. Ammonium polyphosphate/alumium hypophosphite compound flame retardant polypropylene/wood flour composite [J]. Materials Review,2017,31(6):115-119. (in Chinese)

[12] KIEN-SIN,LIMASOO-TUEEN BEE,LEE TIN SIN,*et al.* A review of application of ammonium polyphosphate as intumescent flame retardant in thermoplastic composites[J]. Composites Part B:Engineering,2016,84(1):155-174.

[13] 刘景宏,谢拥群,魏起华. 用 CONE 法研究 ULDM 的阻燃特性[J]. 西北林学院学报,2014,29(1):174-177.

LIU J H,XIE Y Q,WEI Q H. Fire retardant properties of ultra-low density wood fiber-based foaming material by cone calorimeter [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,29(1):174-177. (in Chinese)

[14] 姜洪丽,施成涛,王光照. 聚磷酸铵对聚乳酸/麦秸秆复合材料阻燃和力学性能的影响[J]. 中国塑料,2016,30(7):30-33.

JIANG H L,SHI C T,WANG G Z. Effect of ammonium polyphosphate on flame retardancy and mechanical properties [J]. China Plastic,2016,30(7):30-33. (in Chinese)

[15] SUN L C,WU Q L,XIE Y J,*et al.* Thermal decomposition of fire-retarded wood flour/polypropylene composites kinetic property and degradation mechanisms [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2016,123(1):309-318.

[16] 王百年,王吉祥,杨保俊,等. 原位一步合成 CuAl-LDHs-聚磷酸铵及其在聚丙烯阻燃中的应用[J]. 复合材料学报,2016,33 (9):1931-1938.

WANG B N,WANG J X,YANG B J,*et al.* One-pot in situ synthesis of CuAl-LDHs-ammonium polyphosphate and application in polypropylene as flame retardant[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2016,33(9):1931-1938. (in Chinese)

[17] 刘玉桂,任元林. 阻燃协效剂与膨胀型阻燃剂在木粉/聚丙烯复合材料中的阻燃协效性[J]. 复合材料学报,2012,29(2):53-58.

LIU Y G,REN Y L. Flame retardant synergistic effect of the fire retarded synergistic agent and the intumescent fire retardant in wood flour/polypropylene composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2012,29(2):53-58. (in Chinese)