

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.12.023

基于白酒丢糟的膨胀型阻燃剂在PBAT 复合材料中的应用

农彦彦, 冯才敏, 姜佳丽, 练翠霞, 黄健光, 梁敏仪, 张涓琨, 蔡志成, 韦国恒

(顺德职业技术学院烹饪学院, 轻化与材料学院, 广东佛山 528333)

摘要: 为了综合利用生产废弃物白酒丢糟(DDGS), 采用预处理后的DDGS与聚磷酸铵(APP)进行复配制备膨胀型阻燃剂(IFR), 并用于聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)的阻燃改性, 制备了新型生物可降解阻燃PBAT复合材料。通过极限氧指数(LOI)、热重(TG)分析和锥形量热(CCT)仪, 研究了IFR对PBAT阻燃性、热降解和燃烧行为的影响, 并采用扫描电子显微镜、拉曼光谱(LRS)分析了残炭的形貌和石墨化情况。结果表明, 当APP与DDGS的质量比为3:1, IFR的质量分数为20%时, IFR的阻燃效果最好, LOI值达到31.8%。TG分析数据显示, PBAT/IFR热分解初始温度为335℃, 在800℃残炭率达22.54%。CCT数据显示, PBAT/IFR的最大热释放速率、平均热释放速率、总热释放量最大值与纯PBAT相比, 分别下降了44%, 50.6%, 33.7%, 其燃烧残炭率从2.21%增加到20.87%, 结合残炭形态结构及LRS分析, 表明IFR可以明显改变PBAT的分解行为, 形成连续致密的、石墨化程度较高的膨胀炭层。

关键词: 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯; 膨胀型阻燃剂; 酒糟; 阻燃性

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)12-0136-06

Application of Intumescent Flame Retardant based on Distillers Dried Grains with PBAT Composites

Nong Yanyan, Feng Caimin, Jiang Jiali, Lian Cuixia, Huang Jianguang, Liang Minyi, Zhang Yikun, Cai Zhicheng, Wei Guoheng

(Culinary Institute, College of Applied Chemical Engineering, Shunde Polytechnic, Foshan 528333, China)

Abstract : In order to re-utilize the distillers dried grains with soluble (DDGS), an intumescent flame retardant (IFR) containing DDGS and ammonium polyphosphate (APP) was prepared, and was applied on a new biodegradable flame retardant poly (butyleneadipate-co-terephthalate) (PBAT) composites. The effects of IFR on flame retardancy, thermal degradation, and flammability properties of PBAT composites were investigated by limited oxygen index (LOI), thermogravimetric analysis (TGA), and cone calorimeter test (CCT). The morphology and graphitization degree of char layer were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and Laser Raman spectroscopy analysis (LRS). It is found that when the mass ratio of APP to DDGS is 3:1, the IFR lead to the best LOI value of 31.8%. The TGA data shows that the initial temperature of PBAT/20% IFR thermal decomposition is 335℃, and the char residue reaches 22.54% at 800℃. The CCT results show that the PHRR, AHRR, and THR value of PBAT/IFR are 44%, 50.6%, and 33.7% lower than those of pure PBAT respectively. The residual weight of PBAT/IFR increases from 2.21% to 20.87% compared with pure PBAT. As SEM and LRS results shown, the decomposition behavior of PBAT is changed obviously when incorporation of IFR, and a compact char layer with a suitable graphitization degree is formed.

Keywords : poly (butyleneadipate-co-terephthalate) ; intumescent flame retardant; distillers dried grains with soluble; flame retardancy

随着石油能源的逐渐减少以及环境污染问题的日益严峻,传统生物不可降解塑料逐渐被生物可降

解塑料所取代。聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)作为典型的石油基生物可降解塑料,具有力

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2021A1515012274), 广东省攀登计划项目(pdjh2022b1091)

通信作者: 冯才敏, 教授, 博士, 研究方向为聚合物改性、食品分析

收稿日期: 2022-11-14

引用格式: 农彦彦, 冯才敏, 姜佳丽, 等. 基于白酒丢糟的膨胀型阻燃剂在PBAT复合材料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12): 136-141.

Nong Yanyan, Feng Caimin, Jiang Jiali, et al. Application of intumescent flame retardant based on distillers dried grains with PBAT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 136-141.

学性能好、热稳定性高等特点,被广泛应用于制造薄膜、包装袋等。然而PBAT易燃烧,且伴有严重的熔融滴落现象,具有严重的火灾隐患^[1]。目前,对PBAT复合材料的研究主要集中在生物可降解复合材料中^[2-3],对PBAT阻燃研究较少。

白酒丢糟(DDGS)是农作物发酵后蒸馏出酒精剩下的固态残留物,其干基主要由纤维素(28.9%)、半纤维素(25.3%)、木质素(19.6%)组成^[5]。作为酿酒的残渣,产量巨大^[4-5]。若大量DDGS无法及时处理,不仅会造成资源的浪费,还极易腐败变质造成环境的污染^[6-8]。因此,利用DDGS作为碳源制作成生物可降解阻燃剂具有巨大潜力。近年来,研究学者用纤维素含量高的生物材料^[9]如香蕉皮^[10]、竹粉^[11]、DDGS^[12]、芦苇^[13]等制备聚乳酸(PLA)复合阻燃材料,但尚无研究DDGS与PBAT组成复合材料用于改善PBAT的阻燃性能相关研究。因此,利用DDGS加工制成PBAT复合阻燃材料对发酵行业发展循环经济和节能减排具有重要意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBAT:新疆蓝山屯河化工股份有限公司;

DDGS:泸州老窖股份有限公司;

聚磷酸铵(APP):广东顺德同程新材料科技有限公司;

抗氧化剂1010:市售。

1.2 仪器及设备

极限氧指数(LOI)测定仪:JF-3型,南京江宁分析仪器有限公司;

锥形量热仪:FTT2042型,英国FTT公司;

双辊混炼机:HL-200型,吉林大学科教仪器厂;

压片机:LD-S-20型,美国Lab Tech公司;

热重(TG)分析仪:Q500型,美国TA公司;

拉曼光谱(LRS)仪:DXR3型,美国赛默飞世尔科技有限公司。

1.3 试样制备

(1) DDGS的预处理。

将冷冻保存的DDGS放至室温,在普通烘箱中烘干,经过粉碎后过80目筛得到粉末状DDGS,用超纯水水洗,搅拌30 min后抽滤,得到浸湿的块状DDGS,在真空干燥箱中60℃干燥后研磨成粉得到预处理后的DDGS粉末。

(2) PBAT复合材料的制备。

首先将PBAT, DDGS, APP在真空干燥箱中60℃干燥2 h。阻燃复合材料的制备工艺为:按照表1的配方将干燥好的PBAT, DDGS, APP混合,其中DDGS与APP混合称为膨胀型阻燃剂(IFR),在混炼机中熔融共混,加工温度为135℃。然后将刚混合的复合材料放进100 mm×100 mm×40 mm的模具,放置于压力机中150℃模压成型,待室温冷却后得到复合材料样板。

表1 试验配方表

试样编号	原材料			/%
	PBAT	DDGS	APP	
PBAT	100	0	0	
PBAT/DDGS	80	20	0	
PBAT/APP	80	0	20	
PBAT/IFR-1	80	10	10	
PBAT/IFR-2	80	6.67	13.33	
PBAT/IFR-3	80	5	15	
PBAT/IFR-4	80	13.33	6.67	

1.4 性能测试与表征

(1) 阻燃试验。

采用LOI仪按照GB/T 2406-2009对所有试样进行阻燃性能测试。

(2) TG分析。

升温速率为10℃/min。4~5 mg的试样在N₂气体环境下从室温升到800℃, N₂气体流动速率为40 mL/min, 所有的热降解数据均由TG和DTG曲线获得。

(3) 锥形量热分析(CCT)。

按照ISO 5660-1:2015测试, 热通量为35 kW/m²。所有试样规格均为100 mm×100 mm×4 mm, 试验时放置在一个水平的试样架上, 用铝箔半包裹。

(4) LRS分析。

先将试样在500℃下处理5 min, 用LRS仪获得了残炭的LRS。

2 结果与讨论

2.1 阻燃性能分析

通常认为材料的LOI低于22%时可以在空气中被点燃^[8]。笔者将IFR用于PBAT材料中得到PBAT/IFR复合材料。研究表明, 在IFR体系中, 合适的酸源/成炭剂/发泡剂/起燃剂比例对其阻燃性非常重要。

PBAT是一种易燃的聚合物材料, 在空气中就能正常燃烧, LOI值小于22%。含有20%APP或20%DDGS的PBAT复合材料的LOI值仅为25.2%和19.9%, 与纯PBAT的LOI值相近。因此实验选择

APP和DDGS添加总质量分数为20%形成PBAT/IFR复合材料进行LOI测试。不同DDGS含量的PBAT/IFR复合材料的LOI如图1所示。APP和DDGS的质量比为3:1时,PBAT/IFR复合材料的LOI值达到最大为31.8%。结果表明,当DDGS和APP按一定比例混合时,PBAT/IFR复合材料的LOI值显著提高。

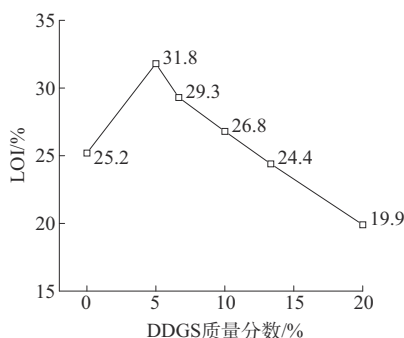


图1 不同DDGS含量的PBAT/IFR复合材料的LOI

2.2 热稳定性分析

笔者选择了LOI最好的PBAT/IFR-3与APP, DDGS, PBAT/DDGS, PBAT/APP进行测试,探究复合材料的热稳定性。TG分析数据列于表2,图2和图3是APP,DDGS,PBAT/IFR复合材料在N₂环境下的TG和DTG分析曲线。

表2 PBAT及PBAT复合材料在N₂环境下的TG分析数据

项目	PBAT	PBAT/DDGS	PBAT/APP	PBAT/IFR-3	DDGS
$T_{1\%}/^{\circ}\text{C}$	317.5	169.1	310.7	255.5	47.07
$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	359.7	302.1	340.5	335.0	164.2
$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	371.5	344.7	348.1	345.6	256.0
$T_{50\%}/^{\circ}\text{C}$	398.9	395.5	363.5	363.7	341.2
$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	400.9	398.3	362.1	361.0	304.1
$C_{w1600^{\circ}\text{C}}/\%$	8.70	12.03	18.39	24.51	28.78
$C_{w1700^{\circ}\text{C}}/\%$	6.72	10.90	16.72	23.84	27.84
$C_{w1800^{\circ}\text{C}}/\%$	5.36	10.37	15.12	22.54	27.51

注: $T_{1\%}$, $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ 分别表示试样质量损失率为1%, 5%, 10%, 50%时的环境温度; T_{max} 表示质量损失速率最大时的环境温度; $C_{w1600^{\circ}\text{C}}$, $C_{w1700^{\circ}\text{C}}$, $C_{w1800^{\circ}\text{C}}$ 分别表示600, 700, 800℃时试样的残炭率。

在N₂气氛下,纯PBAT在359.7℃左右开始分解,而PBAT/DDGS, PBAT/APP, PBAT/IFR的初始分解温度分别为302.1, 340.5, 335.0℃。随着单组分DDGS, APP以及混合IFR的添加,PBAT复合材料的分解温度有所降低,这可能是由于DDGS的分解温度(164.2℃)较低。虽然20%IFR的添加降低了PBAT的分解温度,但仍然具有较好的热稳定性,表明IFR的添加对PBAT的热稳定性影响不大。

添加质量分数为20% IFR的PBAT复合材料在

600, 700, 800℃时的残炭率从原来的8.7%, 6.72%, 5.36%上升到了24.51%, 23.84%, 22.54%,表明IFR的添加能显著提高PBAT复合材料燃烧生成的残炭率,残炭率的提高能有效阻止火势以及热量的传递,提高阻燃效果。

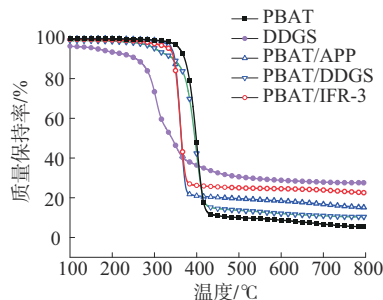


图2 N₂气氛下材料的TG分析曲线

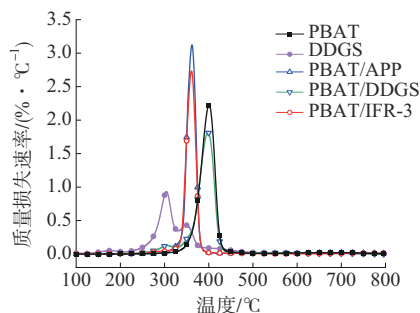


图3 N₂气氛下材料的DTG曲线

2.3 燃烧行为分析

锥形量热分析已广泛应用于火焰材料的燃烧性能分析。它与实际火灾情况具有很好的相关性,可以提供丰富的燃烧行为信息^[14]。表3为锥形量热仪试验中获得的PBAT和PBAT复合材料的锥形量热分析数据。

图4为PBAT, PBAT复合材料的热释放速率(HRR)曲线。纯PBAT在点火后195 s达到了最大热释放速率(PHRR)为769.06 kW/m²,平均热释放速率(AHRR)为254.48 kW/m²。当质量分数为20%的IFR加入PBAT时,PBAT/IFR复合材料的HRR峰值有所下降。PHRR和AHRR分别为430.59 kW/m²和125.63 kW/m²,与纯PBAT相比,分别下降了44.0%和50.6%。同时,PBAT/IFR复合材料的HRR曲线有两个峰。其原因是:第一,IFR降解和膨胀表层形成;第二,第一步形成的膨胀表层不够坚固,不足以抵抗锥形量热仪的热量而降解,因此形成了一个新的膨胀表层用以阻止热量传递^[15]。

图5为PBAT和PBAT复合材料的总热释放量(THR)曲线。THR可用于评价材料在真实火灾中的防火安全性,THR曲线的斜率可视为火灾扩散速

表3 PBAT及PBAT复合材料的锥形量热分析数据

项目	复合材料			
	PBAT	PBAT/DDGS	PBAT/APP	PBAT/IFR-3
Peak ₁ -HRR/(kW·m ⁻²)	769.06	420.68	376.29	430.59
t _{Peak1-HRR} /s	195	105	100	90
Peak ₂ -HRR/(kW·m ⁻²)	—	387.09	257.16	312.46
t _{Peak2-HRR} /s	—	180	205	195
AHRR/(kW·m ⁻²)	254.48	188.89	123.59	125.63
THR/(MJ·m ⁻²)	85.65	77.45	60.10	56.78
Peak ₁ -SPR/(m ² ·s ⁻¹)	0.106	0.048	0.085	0.072
t _{Peak1-SPR} /s	215	95	115	125
Peak ₂ -SPR/(m ² ·s ⁻¹)	—	0.059	0.065	0.084
t _{Peak2-SPR} /s	—	225	255	245
TSP/m ²	12.69	10.10	13.25	14.04
C _{Wt450 s} /%	2.21	7.35	22.21	20.87
燃烧时间/s	445	460	570	530

注:Peak₁-HRR,Peak₂-HRR分别为热释放速率曲线上的第一、第二个峰值;t_{Peak1-HRR},t_{Peak2-HRR}分别为第一、第二个热释放速率峰值所对应的时间;AHRR为平均热释放速率;THR为总热释放量;Peak₁-SPR,Peak₂-SPR为烟生成速率曲线上的第一、第二个峰值;t_{Peak1-SPR},t_{Peak2-SPR}分别为第一、第二个烟生成速率峰值所对应的时间;TSP为烟生成总量;C_{Wt450 s}为450 s时剩余的质量分数。

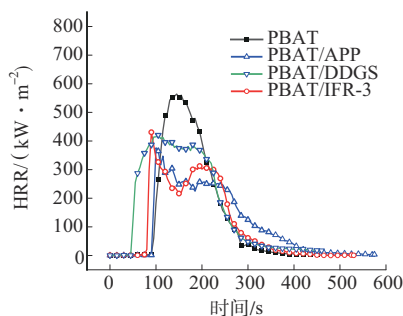


图4 PBAT和PBAT复合材料的HRR曲线

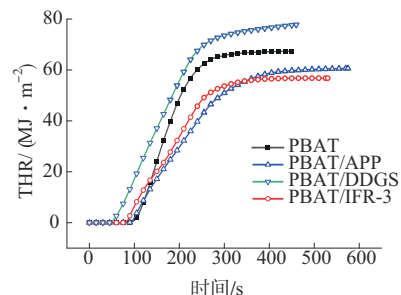


图5 PBAT和PBAT复合材料的THR曲线

率^[14]。纯PBAT的THR最大值为85.65 MJ/m²,相比之下,PBAT/IFR复合材料THR曲线的最大值有所下降,约为56.78 MJ/m²,下降了33.7%。PBAT/IFR复合材料THR的下降,表明部分PBAT/IFR复合材料没有完全燃烧。这是因为PBAT与IFR复合时,IFR产生了膨胀炭层作为热绝缘体,防止可燃气体供给火焰,保护底层基质不进一步燃烧,从而有效延缓聚合

物的热解。

PBAT和PBAT/IFR的烟气生成速率(SCR),TSP曲线如图6和图7所示。由图6及图7可以看出,SCR,TSP曲线的趋势分别与HRR,THR曲线相似,表明材料的燃烧放热与烟气释放具有同步性。纯PBAT的SCR,TSP值分别为0.106 m²/s和12.69 m²,添加DDGS后,PBAT/DDGS的SCR,TSP值分别为0.058 m²/s和10.23 m²,说明添加DDGS能有效改善PBAT材料的SCR和TSP。PBAT/IFR和PBAT/APP的SCR,TSP值分别为0.084 m²/s和14.04 m²以及0.085 m²/s和13.89 m²,SCR低于纯PBAT,然而TSP却相对较高,这是由于PBAT/IFR的燃烧时间相对于纯PBAT延长了85 s,导致了TSP的增加。

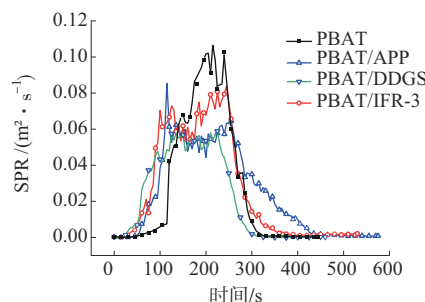


图6 PBAT和PBAT复合材料的SCR曲线

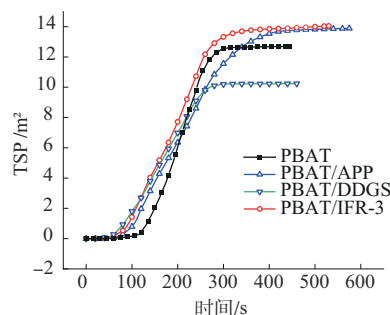


图7 PBAT和PBAT复合材料的TSP曲线

图8为燃烧过程中PBAT和PBAT复合材料的TG曲线。由图8和表3可见,添加阻燃剂后,复合材料的质量保持率相对于纯PBAT都有所增加,在燃烧结束时留下的残余质量较大。说明稳定的炭层降低

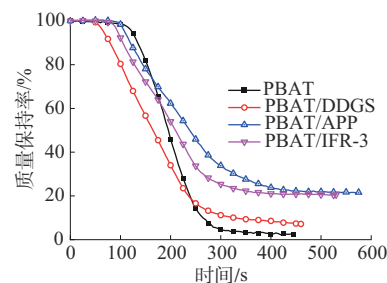


图8 PBAT和PBAT/20IFR复合材料的TG曲线

了氧气的进入,从而阻止了基质的进一步降解。结果表明,在450 s时,PBAT/IFR的残炭率从纯PBAT的2.21%增加到20.87%。

2.4 残炭分析

图9为锥形量热试验后PBAT和PBAT复合材料残留物的照片。从图9可以明显看出,PBAT在燃烧后几乎没有残留炭层,而PBAT/IFR在燃烧后形成厚而膨胀的炭层,可以有效阻止热量和助燃气体在火焰区和燃烧基板之间转移。

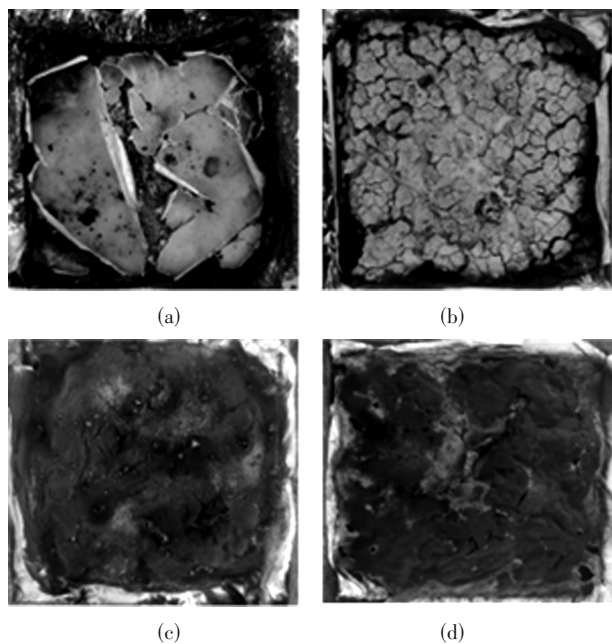


图9 锥形量热试验后PBAT以及PBAT复合材料的残留物照片

为进一步阐明膨胀炭层的微观结构与PBAT复合材料阻燃性能的关系及阻燃机理,通过SEM观察500℃下燃烧5 min后的残炭形貌如图10所示。PBAT/APP复合材料的炭层比其它PBAT复合材料炭层更致密,但没有形成膨胀炭层,因此不能在燃烧过程中为底层材料提供良好的火焰屏障。PBAT/DDGS的炭层则是松散而多孔的结构。而在PBAT/IFR复合材料燃烧后的SEM照片可观察到一个相对厚实的、膨胀的和连续的炭层,且表层有小孔和褶皱,可以作为骨架来加强表层^[15]。由此可见,APP与DDGS之间的协同效应能形成较高质量的膨胀炭层,防止热量和助燃成分在火焰区和燃烧基质之间的传递,保护底层材料不进一步燃烧,并延缓复合材料的热分解,从而获得更好的阻燃性能。

图11是PBAT/IFR和PBAT/DDGS残炭的LRS图。由图11可以观察到两个特征峰D峰(1 380 cm⁻¹)

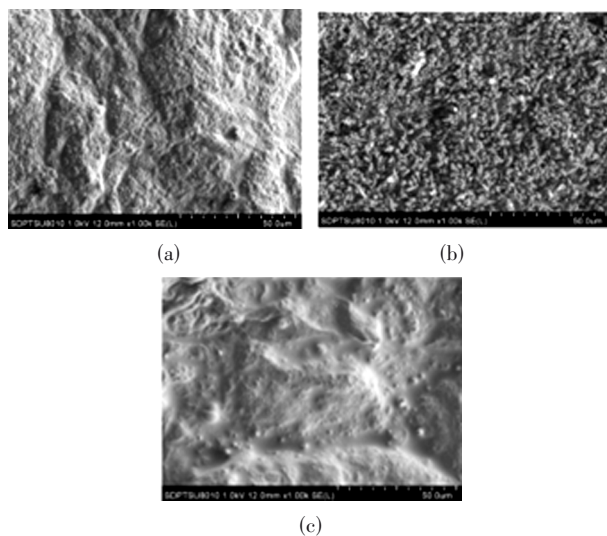


图10 PBAT和PBAT复合材料燃烧后SEM照片(放大1 000倍)

与无序态环状结构玻璃态的碳原子振动相关,G峰(1 600 cm⁻¹)与石墨化结构中的C—C振动吸收相关。 A_D/A_G 值越大,表明碳层结构的缺陷越大,保护效率越低^[16]。从表4的结果可以看出,PBAT/DDGS的 A_D/A_G 均值为2.85,PBAT/APP和PBAT/IFR复合材料的 A_D/A_G 均值为2.63,说明,仅使用DDGS能生成大量的无定型残炭但不致密,使用APP和APP/DDGS则形成具有更高石墨化程度的膨胀层,更有效地保护PBAT基体。结合SEM和LRS的分析结果,APP与DDGS复配能形成致密而蓬松的炭层,提高阻燃性能。

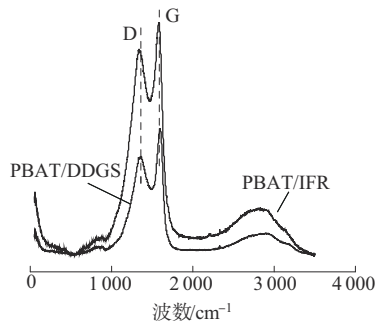


图11 PBAT/DDGS和PBAT/IFR-3残炭的LRS

表4 PBAT/IFR和PBAT/DDGS残炭拉曼图谱分析

试样	A_D	A_G	$R=A_D/A_G$
PBAT/DDGS	130 423	45 790	2.85
PBAT/APP	69 486	22 984	2.63
PBAT/IFR-3	73 047	27 772	2.63

注: A_D :D峰积分峰值强度; A_G :G峰积分峰值强度; $R=A_D/A_G$:D峰和G峰积分峰值强度比值,表征试样石墨化程度。

3 结论

(1)当APP与DDGS的质量比为3:1时,其具有

较好的LOI值,当PBAT中IFR质量分数为20%时,PBAT/IFR复合材料的LOI值达到31.8%,阻燃效果最佳。

(2) IFR的加入显著降低了PBAT/IFR复合材料的HRR, THR, SPR, TSP和质量损失,说明IFR在PBAT中是一种有效的阻燃剂。DDGS与APP的协同作用增加了PBAT的热稳定性,促进PBAT在燃烧过程中形成更多的残炭,残炭率从2.21%增加到20.87%。

(3)残炭的形态结构也证明了IFR有利于在燃烧过程中在材料表面形成致密、均匀的膨胀炭层。拉曼光谱研究表明,APP和DDGS能够提高炭层的石墨化程度,从而提高PBAT的阻燃性能。

参考文献

- [1] 刘坤坤. 填料填充PBAT/TPS改性与性能的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
Liu Kunkun. Study on modification and performance of PTAT /TPS by fillers filling[D]. Zhenjiang : Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [2] 何伟, 王义燃, 林伟, 等. 磷掺杂改性石墨相氮化碳的制备及其对PBAT阻燃性能研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(9):33-38.
He Wei, Wang Yiran, Lin Wei, et al. Study on preparation of phosphorus doped modified graphite carbon nitride and its flame retardant property on PBAT[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(9):33-38.
- [3] 周怡凯. PBAT基生物可降解复合材料的增容改性及表征[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
Zhou Yikai. Compatibility modification and characterization of PBAT-based biodegradable composites[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [4] 聂永增. 对于酒糟综合利用现状及创新应用的思考[J]. 轻工科技, 2021, 37(9):11-12.
Nie Yongzeng. Thoughts on the present situation of comprehensive utilization and innovative application of distiller's grains[J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(9):11-12.
- [5] 王琪, 陆兵, 李秀萍. 酿造丢糟综合利用的研究进展[J]. 酿酒, 2020, 47(1):21-23.
Wang Qi, Lu Bing, Li Xiuping. Research progress on comprehensive utilization of brewing waste grains[J]. Liquor Making, 2020, 47(1):21-23.
- [6] 袁颀, 邱树毅, 彭正东, 等. 固态白酒生产酒糟的资源化利用研究进展[J]. 酿酒科技, 2012(5):88-91.
Yuan Jie, Qiu Shuyi, Peng Zhengdong, et al. Research advance in the reclamation of distiller's grains in liquor production by solid fermentation[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2012(5): 88-91.
- [7] 金成国, 谢玉松, 范方勇. 宜宾多粮浓香型白酒糟生物炭的成分和结构特征分析[J]. 中国酿造, 2021, 40(3):139-142.
Jin Chengguo, Xie Yusong, Fan Fangyong. Composition and structural feature of biochar derived from distiller's grains of strong-flavor Baijiu by multiple grains in Yibin[J]. China Brewing, 2021, 40(3):139-142.
- [8] 时伟, 郑红梅, 何珺珺, 等. 白酒糟中功能因子及其提取技术的研究进展[J]. 中国酿造, 2020, 39(7):1-6.
Shi Wei, Zheng Hongmei, He Junjun, et al. Advances in functional factors in Baijiu distiller's grain and its extraction techniques[J]. China Brewing, 2020, 39(7):1-6.
- [9] 梁孟珂, 陈静, 戴鹏, 等. 木质素基膨胀型阻燃剂的制备及其应用[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(4):10-16.
Liang Mengke, Chen Jing, Dai Peng, et al. Preparation and application of lignin-based intumescent flame retardant[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2021, 41(4):10-16.
- [10] 庞锦英, 莫羨忠, 刘钰馨. 阻燃香蕉纤维增强聚乳酸复合材料的制备与表征[J]. 化工进展, 2015, 34(4):1 050-1 054.
Pang Jinying, Mo Xianzhong, Liu Yuxin. Preparation and characterization of flame retardant banana fiber reinforced PLA composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(4): 1 050-1 054.
- [11] 冯政玉. 竹粉纤维素微晶表面改性及其对环氧树脂和聚乳酸阻燃性能的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
Feng Zhengyu. Effects of surface modified bamboo powder cellulose microcrystals on the flammability of epoxy resin and polylactic acid[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [12] 张咪, 石小卫, 曹雨, 等. 无卤阻燃生物基聚乳酸/白酒糟复合材料[J]. 塑料, 2018, 47(3):27-30, 34.
Zhang Mi, Shi Xiaowei, Cao Yu, et al. Halogen-free flame-retarded biocomposites of polylactic acid /distiller's dried grains solubles[J]. Plastics, 2018, 47(3):27-30, 34.
- [13] 文泽伟. 阻燃聚乳酸/芦苇复合材料的制备与表征[D]. 保定: 河北大学, 2021.
Wen Zewei. Preparation and characterization of flame retardant polylactic acid/reed fiber composite[D]. Baoding: Hebei University, 2021.
- [14] Feng Caimin, Li Zongwen, Liang Minyi, et al. Preparation and characterization of a novel oligomeric charring agent and its application in halogen-free flame retardant polypropylene[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 111: 238-246.
- [15] Feng Caimin, Zhang Yi, Liu Siwei, et al. Synthesis of novel triazine charring agent and its effect in intumescent flame-retardant polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123: 3 208-3 216.
- [16] 冯才敏, 黄健光, 梁敏仪, 等. 化合物对乙丙弹性体/IFR体系阻燃性能和热降解行为的影响[J]. 中国塑料, 2015, 29(3):70-74.
Feng Caimin, Huang Jianguang, Liang Minyi, et al. Effect of compounds on the flame retardancy and thermal degradation of ethylene-propylene elastomer/IFR system[J]. China Plastics, 2015, 29(3):70-74.