

# 塑料科技®

ISSN 1005-3360  
CN 21-1145/TQ

## Plastics Science and Technology

■ 中文核心期刊 ■ 中国科技核心期刊 ■ CA/AJ 收录期刊 ■ 荣获首届《CAJ-CD 规范》执行优秀奖

【广告】



### 新产品 塑料 新技术 研发与合作

大连塑料研究所有限公司  
Dalian Plastics Research Institute Co., Ltd.

[Http://www.plasticdl.com](http://www.plasticdl.com)

E-mail: [dsy@plasticdl.com](mailto:dsy@plasticdl.com)



ISSN 1005-3360



主管: 辽宁省轻工业总会

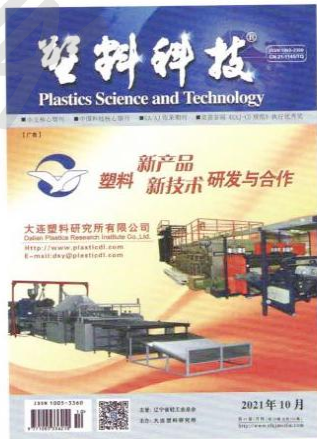
主办: 大连塑料研究所

2021年10月

第49卷/月刊(第10期 总第354期)

<http://www.slkjmedia.com>

# 塑料科技®



- 编委会主任委员：曹 俭
- 编委会副主任委员：孙成伦  
吴 亮  
乔文路
- 编委（按姓氏笔划排序）：  
于文杰 于 翔 王成云 王克智  
王晓钧 王 超 田 岩 黄俊彦  
刘俊龙 李超群 陈福泉 何冰强  
金晓明 罗居杰 罗世鹏 杨雅琦  
杨长龙 秦 刚 聂 敏 戚春晓  
敬 波 甄卫军 雷 文 翟 明

## 本刊启事

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。

《塑料科技》编辑部

## 目 次

### ● 理论与研究

- 高密度聚乙烯高阻隔性包装膜的研究.....1  
汪钰文,李亚娜,林勤保,任纪州,王晓,李增辉
- 建筑用可降解聚苯乙烯复合塑料板的制备与保温性能研究.....6  
梁磊,元晓,高海波,赵丽丽
- 聚合型抗氧剂的合成及其在ABS树脂中的应用.....10  
王孝鹏,张学茹,陈杰
- 再生塑料混凝土复合材料的制备及性能研究.....13  
马海鹏,杜智超,尹迪
- 改性植物纤维增强PBAT复合材料的性能研究.....17  
尹玉霞,楚云松
- 发泡法制备建筑墙体高密度聚乙烯保温层及其性能研究.....21  
马秀颖
- 聚丙烯/短切碳纤维复合材料的界面相容性与力学性能的研究.....25  
孟笑毅,崔野,孙洪涛,王元霞,史颖,宋立新,刘立志

### ● 加工与应用

- 溴代三嗪/三氧化二锑阻燃聚双环戊二烯材料的研究.....30  
董晓光,余志强,杜丽媛,林清怀,郭二茹,李俊贤,张玉清
- 基于甲醇解选择性亲水化浮选分离PET/PVC.....35  
边凯,蒋鸿儒,张迎霜,王晖
- 环氧/聚磷酸铵/二氧化锑复合树脂的制备与阻燃性能研究.....41  
姚小平,刘助,王艳娟
- 新型成炭剂的合成及其在阻燃聚丙烯材料中的应用研究.....46  
乔金莲
- 纳米TiO<sub>2</sub>对PVA/St复合膜性能的影响.....51  
党在清,吕东亮
- 次磷酸铝/水滑石对聚丙烯阻燃性能的影响.....55  
陈曦,李文翠,俞晨龙
- 纳米SiC增强铝基复合材料中增强颗粒含量对材料结构和性能的影响.....59  
刘超,邢雪青,史颖,宋立新,龙凌

### ● 计算机辅助技术

- 基于模拟分析的自动制氧机叶轮动平衡性能优化.....65  
王清,袁霞,铁锐
- 汽车线束支架注塑工艺优化设计.....70  
刘赞
- 基于Moldflow软件的中央接线盒注塑模具优化研究.....75  
梁昊,张曹卿,顾局



# 新型成炭剂的合成及其在阻燃聚丙烯材料中的应用研究

乔金莲

(信阳职业技术学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:**以水为溶剂,合成一种聚-2-氨基-4,6-哌嗪基-1,3,5-三嗪的新型成炭剂,并对该成炭剂的红外和热稳定性进行测试。通过该新型成炭剂与聚磷酸铵制备膨胀阻燃剂(IFR),探究IFR对聚丙烯(PP)的氧指数、垂直燃烧、热降解行为、燃烧行为、炭层形貌的影响。结果表明:当新型成炭剂与聚磷酸铵质量比为1:4,IFR-4使PP的阻燃性能最佳。当IFR-4的添加量为25%,PP/25%IFR-4的氧指数达到29.4%,1.6 mm垂直燃烧通过V-0级。新型成炭剂的热稳定性高,起始分解温度达到285.6 °C,800 °C残炭率达到32.8%。PP/IFR-4最大热失重峰对应的温度是481.6 °C,800 °C残炭率7.6%,热分解速率降低。加入IFR-4阻燃剂,复合材料的最大热释放速率为435 kW/m<sup>2</sup>,总热释放量为3 827.3 MJ/m<sup>2</sup>。IFR-4的加入使PP材料形成致密的炭层。因此,IFR-4提高PP的热稳定性,PP表面形成的炭层,隔热隔氧,起阻燃作用,并且降低热释放速率和总热释放量。

**关键词:**新型成炭剂;聚丙烯;膨胀阻燃

中图分类号:TQ325.1<sup>+</sup>4;TB332

文献标识码:A

文章编号:1005-3360(2021)10-0046-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2021.10.011

## Study on Synthesis of New Charring Agent and Its Application in Flame Retardant Polypropylene Material

QIAO Jin-lian

(Xinyang Vocational and Technical College, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** A new charring agent poly-2-amino-4,6-piperazine-1,3,5 triazine was synthesized, and the infrared and thermal stability of the charring agent was tested. Intumescent flame retardant (IFR) was prepared by the new charring agent and ammonium polyphosphate. The effects of IFR on oxygen index, vertical combustion, thermal degradation behavior, combustion behavior and carbon layer morphology of polypropylene (PP) were investigated. The results show that when the mass ratio of the new charring agent to the ammonium polyphosphate is 1 : 4, IFR-4 makes PP flame retardancy best. When the added amount of IFR-4 is 25%, the oxygen index of PP/25%IFR-4 reaches 29.4%, and the 1.6 mm vertical combustion passes the V-0 rating. The thermal stability of the new charring agent is high, the initial decomposition temperature reaches 285.6 °C, and the char residue rate reaches 32.8% at 800 °C. The maximum thermal weight loss peak temperature of PP/IFR-4 is 481.6 °C, the char residue rate is 7.6% at 800 °C, and the thermal decomposition rate is decreased. When IFR-4 flame retardant is added, the maximum heat release rate of the composite is 435 kW/m<sup>2</sup>, and the total heat release is 3 827.3 MJ/m<sup>2</sup>. The addition of IFR-4 makes PP material form dense carbon layer. Therefore, IFR-4 improves the thermal stability of PP. The carbon layer formed on the surface of PP is heat-insulated and oxygen-insulated, which plays a flame retardant effect, and reduces the heat release rate and total heat release.

**Key words:** New charring agent; Polypropylene; Intumescent flame retardant

聚丙烯(PP)是一种无毒无味,应用广泛、性能优异的热塑性通用塑料<sup>[1-3]</sup>。由于PP具有优异的化学稳定性及良

好的物理性能<sup>[4]</sup>,使其在机械电子、新能源汽车、航空航天、食品包装等行业广泛应用。近年来,随着这些行业的快速发展,使PP材料用量增加。然而PP材料具有易燃性,在某些对于防火有特殊要求的领域,PP材料无法达到其使用标准,制备一种具有阻燃性能的PP材料,是非常必要的。

阻燃剂通常分为反应型和添加型<sup>[5]</sup>,反应型阻燃剂通常应用在热固性塑料,添加型常用于热塑性树脂。常用的

收稿日期:2021-03-04

基金项目:河南省高等教育教学改革研究与实践立项重点项目(2019SJGLX669)

联系人,qiaojinlian2287@163.com

添加型阻燃剂包含卤系阻燃剂、无机阻燃剂、膨胀阻燃剂等。用量最大的是卤系阻燃剂,它具有阻燃效率高,与材料相容性好等优点。但卤系阻燃剂制备的阻燃材料,在燃烧时冒黑烟,并释放大量的卤化氢有毒气体。随着人们对环保越来越重视和各种环保法规的出台,使卤系阻燃剂的使用受到限制。膨胀阻燃剂作为一种依据磷氮阻燃的环保阻燃剂,受到广泛关注。

膨胀阻燃剂主要由碳源、酸源、气源组成<sup>[6-8]</sup>。传统的膨胀阻燃剂主要以季戊四醇为碳源、聚磷酸铵为酸源、三聚氰胺为气源进行复配应用于PP。但是阻燃剂原料添加量过大,还存在小分子的季戊四醇析出问题,许多学者选用双季戊四醇、淀粉、山梨醇、三嗪成炭剂作为碳源制备膨胀阻燃剂应用于PP。三嗪成炭剂作为碳源制备的膨胀阻燃剂阻燃效率最高,还起气源的作用。本实验以水作溶剂,合成一种聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5-三嗪的新型成炭剂,对新型成炭剂进行红外光谱和热稳定性测试,并与聚磷酸铵制备膨胀阻燃剂,研究膨胀阻燃剂对PP材料阻燃性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

氨水,浓度28%,德州金和化工经贸有限公司;三聚氰氨,工业级,营口三征化工有限公司;无水哌嗪,分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;聚磷酸铵,2型,镇江星星阻燃剂有限公司;聚丙烯(PP),K8300,上海赛科有限公司。

### 1.2 仪器与设备

螺杆挤出机,KTE-45,南京科尔克挤出装备有限公司;塑料注射机,通用型,宁波海天机械有限公司;氧指数仪(LOI),JF-5,南京江宁分析仪厂;垂直燃烧测定仪,CZF-3,南京江宁分析仪厂;锥形量热仪,PX-07-007,江苏费尔曼安全科技有限公司;扫描电子显微镜(SEM),Quanta x50,荷兰FEI公司;热失重分析仪(TG),TGA-701,南京汇诚仪器仪表有限公司,傅里叶红外光谱仪(FTIR),Spectrum 65,美国Perkin-Elmer公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5-三嗪的合成

将100 mL的水和200 mL的氨水溶液加入四口瓶,并分三次加入90 g的三聚氰氨,每次30 g,1 h内加完,控制反应温度在0~5 °C,控制pH值在6~7之间。滴加哌嗪的水溶液40 mL,控制反应温度在45~55 °C之间,并保温2 h,滴加哌嗪的水溶液40 mL,控制反应温度在90~100 °C之间。100 °C下,保温4 h,获得92 g聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5-三嗪产品,产率96.5%。

#### 1.3.2 PP/IFR复合材料的制备

将聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5三嗪、聚磷酸铵按一定比例加入高混机中,高速混合10 min,制备膨胀阻燃剂(IFR)。将28% IFR加入PP,在高速混合机中混合10 min,

通过双螺杆挤出机在185 °C下挤出造粒,制备的粒料在80 °C的烘箱中干燥2 h。在195 °C利用注射机注塑成型,制备测试样条。表1为IFR的配方。

表1 IFR的配方

Tab.1 Formula of IFR

| 样品    | 聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5-三嗪/g | 聚磷酸铵/g | 质量比 |
|-------|---------------------------|--------|-----|
| IFR-1 | 50.0                      | 50.0   | 1:1 |
| IFR-2 | 33.3                      | 66.6   | 1:2 |
| IFR-3 | 25.0                      | 75.0   | 1:3 |
| IFR-4 | 20.0                      | 80.0   | 1:4 |
| IFR-5 | 16.7                      | 83.5   | 1:5 |
| IFR-6 | 14.3                      | 85.8   | 1:6 |

将IFR-4阻燃剂以不同添加量加入PP,制备PP/IFR-4复合材料,具体加工工艺与IFR相同,表2为PP/IFR-4复合材料的配方。

表2 PP/IFR-4复合材料的配方

Tab.2 Formula of PP/IFR-4 composites

| 样品          | w(IFR-4)/% | PP/g | IFR-4/g |
|-------------|------------|------|---------|
| 纯PP         | 0          | 100  | 0       |
| PP/18%IFR-4 | 18         | 72   | 18      |
| PP/20%IFR-4 | 20         | 80   | 20      |
| PP/25%IFR-4 | 25         | 75   | 25      |
| PP/28%IFR-4 | 28         | 72   | 28      |

### 1.4 性能测试与表征

FTIR分析:测试范围500~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 。

垂直燃烧测试:按GB/T 2408—2008进行测试,样条尺寸为130.0 mm×130.0 mm×3.2 mm和130.0 mm×13.0 mm×1.6 mm。

LOI测试:按GB/T 2406.2—2009进行测试,样条尺寸为130.0 mm×6.5 mm×3.0 mm。

TG测试: $\text{N}_2$ 气氛,样品质量为3~5 mg,以20 °C/min升温速率,从50 °C升温至800 °C进行测试。

燃烧行为测试:按ISO-5660-1:2015进行测试,热辐射功率为50  $\text{kW/m}^2$ ,样品尺寸100.0 mm×100.0 mm×4.0 mm。

SEM分析:取锥形量热仪辐射后的膨胀残炭的完整部分,表面喷金处理,观察残炭的表面形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5三嗪FTIR分析

图1为聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5三嗪的FTIR谱图。从图1可以看出,3 320  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为N—H的伸缩振动吸收峰,2 945  $\text{cm}^{-1}$ 和2 871  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为亚甲基的C—H伸缩振动吸收峰,1 562  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为三嗪环的骨架振动峰,1 335  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为三嗪环连接的N—H伸缩振动吸收峰,1 168  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为C—N伸缩振动吸收峰,815  $\text{cm}^{-1}$ 处的



峰为N—H的变形振动吸收峰。因此,可以断定聚-2-胺基-4,6哌嗪基-1,3,5三嗪制备成功。

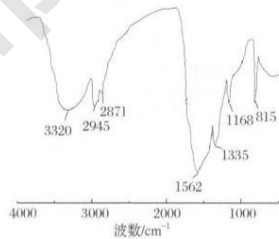


图1 新型成炭剂的红外谱图

Fig.1 FTIR spectra of charring agent

## 2.2 纯PP及PP/IFR-4的FTIR分析

图2为纯PP和PP/IFR-4的FTIR谱图。从图2可以看出,与纯PP相比,PP/IFR-4在 $3342\text{ cm}^{-1}$ 处出现明显的吸收峰,为新型成炭剂的N—H伸缩振动吸收峰,在 $1562\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为新型成炭剂的三嗪环的骨架振动峰, $1168\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为新型成炭剂的C—N伸缩振动吸收峰, $1207\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为聚磷酸铵的P=O键的伸缩振动峰, $1075\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为聚磷酸铵的P—O键的对称伸缩振动峰。PP/IFR-4含有新型成炭剂和聚磷酸铵的特征峰,表明PP/IFR-4制备成功。

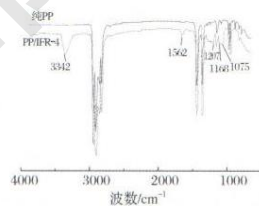


图2 纯PP和PP/IFR-4的FTIR谱图

Fig.2 FTIR spectra of pure PP and PP/IFR-4

## 2.3 不同IFR对PP/IFR复合材料阻燃性能的影响

将不同原料比的IFR加入PP,制备PP/IFR材料,IFR的添加量为28%。表3为纯PP和不同PP/IFR复合材料的垂直燃烧测试结果。从表3可以看出,纯PP的LOI值仅达到17.0%,非常容易燃烧;加入IFR的复合材料的LOI值都具有一定程度提高。新型成炭剂与聚磷酸铵质量比是1:1时,PP/IFR-1复合材料的LOI值提高至24.5%,3.2 mm样条可以达到V-1级。这可能是由于纯PP遇到火焰时,与氧自由基快速反应,在短时间开始燃烧,直至完全烧完;添加IFR后,由于聚磷酸铵在受热后产生焦磷酸,焦磷酸催化新型成炭剂在PP表面形成炭层,隔绝热量向PP材料传播,起阻燃作用。

当新型成炭剂与聚磷酸铵的质量比是1:4,PP/IFR-4复合材料的LOI值最高,达到30.8%,1.6 mm样条可以达到V-0级。当新型成炭剂与聚磷酸铵的质量比是1:6,PP/IFR-6复合材料的LOI值为26.4%,1.6 mm样条仅达到V-2

级。这说明新型成炭剂与聚磷酸铵只有在合适质量比下才能够使PP具有最佳的阻燃性能。IFR-1虽然对PP具有一定的阻燃作用,但是由于成炭剂的加入量过大,聚磷酸铵分解产生的焦磷酸的含量无法与全部新型成炭剂发生酯化反应交联成炭,部分新型成炭剂直接分解,炭层并不紧密,所以阻燃性能不好。IFR-4中多数聚磷酸铵分解产生的焦磷酸,都能够与新型成炭剂发生酯化反应交联成炭,形成的炭层致密,所以阻燃性能最好。IFR-6中新型成炭剂的量过少,虽然聚磷酸铵分解产生大量的焦磷酸,能够与新型成炭剂发生酯化反应交联成炭,但是由于新型成炭剂的量过少,成炭量有限,炭层不致密,阻燃性能变差。

表3 纯PP和PP/IFR复合材料的垂直燃烧测试结果

Tab.3 Vertical combustion test results of pure PP and

| 试样       | LOI/% | PP/IFR composites |     |        |     |
|----------|-------|-------------------|-----|--------|-----|
|          |       | 3.2 mm            |     | 1.6 mm |     |
|          |       | 熔滴                | 级别  | 熔滴     | 级别  |
| 纯PP      | 17.0  | 是                 | 燃烧  | 是      | 燃烧  |
| PP/IFR-1 | 24.5  | 否                 | V-1 | 燃烧     | 燃烧  |
| PP/IFR-2 | 26.2  | 否                 | V-1 | 是      | V-2 |
| PP/IFR-3 | 28.8  | 否                 | V-0 | 否      | V-0 |
| PP/IFR-4 | 30.8  | 否                 | V-0 | 否      | V-0 |
| PP/IFR-5 | 29.2  | 否                 | V-0 | 否      | V-0 |
| PP/IFR-6 | 26.4  | 是                 | V-0 | 是      | V-2 |

## 2.4 IFR-4的添加量对PP/IFR复合材料阻燃性能的影响

由PP/IFR复合材料的垂直燃烧测试结果可知,新型成炭剂与聚磷酸铵的质量比为1:4时,PP/IFR复合材料的阻燃性能最佳,所以探讨IFR-4在不同添加量下对PP材料的阻燃性能的影响。表4为纯PP和PP/IFR-4复合材料的垂直燃烧测试结果。

表4 纯PP和PP/IFR-4复合材料的垂直燃烧测试结果

Tab.4 Vertical combustion test results of pure PP and

| 样品          | LOI/% | PP/IFR-4 composites |     |        |     |
|-------------|-------|---------------------|-----|--------|-----|
|             |       | 3.2 mm              |     | 1.6 mm |     |
|             |       | 熔滴                  | 级别  | 熔滴     | 级别  |
| 纯PP         | 17.0  | 是                   | 燃烧  | 是      | 燃烧  |
| PP/18%IFR-4 | 25.1  | 否                   | V-0 | 否      | 燃烧  |
| PP/20%IFR-4 | 26.3  | 否                   | V-0 | 是      | V-2 |
| PP/22%IFR-4 | 28.5  | 否                   | V-0 | 否      | V-1 |
| PP/25%IFR-4 | 29.4  | 否                   | V-0 | 否      | V-0 |
| PP/28%IFR-4 | 30.8  | 否                   | V-0 | 否      | V-0 |

从表4可以看出,纯PP材料是熔滴燃烧。当IFR-4的添加量为18%,3.2 mm样条可以达到V-0级。当IFR-4的添加量为25%,1.6 mm垂直燃烧能通过V-0级,复合材料的垂直燃烧性能明显提高。这可能是因为PP/IFR-4的燃烧过程中IFR-4阻燃剂产生大量不燃气体,并在复合材料

表面形成炭层,阻止材料内部可燃气体释放,起阻燃的作用。随着IFR-4添加量的增加,IFR-4阻燃剂在复合材料燃烧时产生的不可燃性气体增多,成炭量也随之增多,炭层也更加致密,隔绝热量及火焰向PP材料内部传递的效果更好,阻燃性能也随之提高。纯PP材料的LOI值仅17.0%,而加入18%的IFR-4,复合材料的LOI值达到25.1%,当IFR-4添加质量分数为28%,复合材料的LOI值最大,达到30.8%。这说明随着IFR-4的添加量的增大,复合材料表面在燃烧过程中形成的炭层更加致密,隔绝氧气的能力越强,LOI值越高。

### 2.5 新型成炭剂及PP/IFR-4复合材料的热稳定性研究

图3为新型成炭剂的TG和DTG曲线。

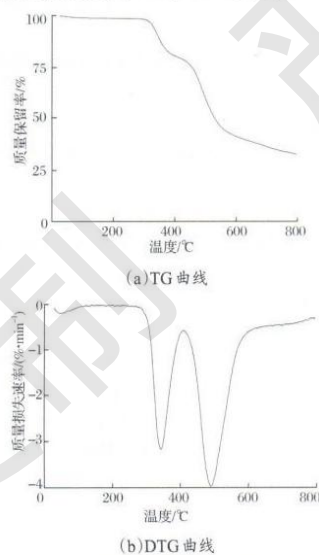


图3 新型成炭剂的TG和DTG曲线

Fig.3 TG and DTG curves of charring agent

从图3可以看出,新型成炭剂存在2个失重阶段。第1阶段,新型成炭剂的起始分解温度为285.6°C,最大热失重速率峰对应的温度为346.2°C,降解速率为3.4%/min;新型成炭剂第2阶段最大热失重速率峰的温度为494.4°C,800°C的残炭率为32.8%。说明新型成炭剂的起始分解温度高,产品热稳定性高,残炭率高,满足PP材料的加工要求,是一种热稳定性好且成炭量高的优质成炭剂。

图4为纯PP、PP/IFR-4的TG和DTG曲线。从图4可以看出,纯PP的起始分解温度为320.5°C,PP/IFR-4的起始分解温度为292.1°C。这可能是由于IFR-4阻燃剂加入PP,IFR-4先分解生成水蒸气、氨气等,所以PP/IFR-4的起始分解温度降低。纯PP的最大热失重速率峰对应的温度为434.2°C,800°C残炭率0.7%,PP/IFR-4最大热失重速率峰对应的温度是481.6°C,800°C残炭率7.6%。这说明PP中加入IFR-4阻燃剂,提高PP材料的热稳定性,增加残炭率,PP材料表面形成炭层,隔绝热量向PP材料内部传递,从而起阻燃作用。

综上所述,新型成炭剂具有较高的热稳定性,满足PP材料的使用要求,IFR-4阻燃剂的加入,改变PP材料的热降解过程,提高PP材料的热稳定性,降低PP材料热分解速率,促进残炭率增加,提高PP材料的阻燃性能。

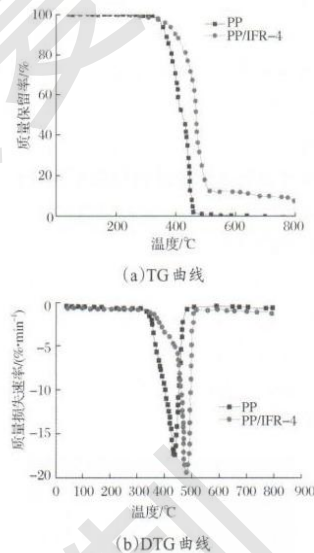


图4 纯PP和PP/IFR-4的TG和DTG曲线

Fig.4 TG and DTG curves of pure PP and PP/IFR-4

### 2.6 纯PP和PP/IFR-4复合材料燃烧性能分析

图5为纯PP和PP/IFR-4复合材料的热释放速率(HRR)和总热释放量(THR)曲线。

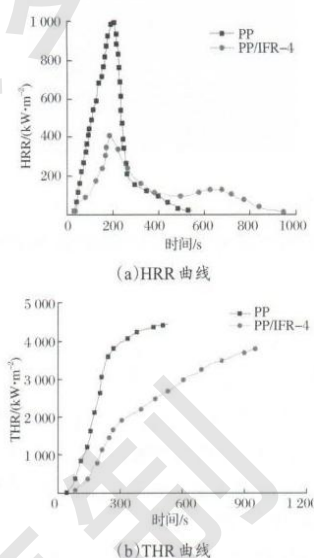


图5 PP和PP/IFR-4的HRR和THR曲线

Fig.5 HRR and THR curves of PP and PP/IFR-4

从图5可以看出,纯PP材料出现一个热释放速率峰,195 s时热释放速率峰值(PHRR)为992 kW/m<sup>2</sup>,THR为



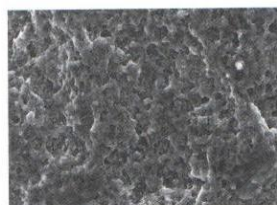
4 376.2 MJ/m<sup>2</sup>。但是加入 IFR-4 阻燃剂, HRR 和 THR 曲线发生明显改变。PP/IFR-4 在 185 s 时, PHRR 为 435 kW/m<sup>2</sup>, THR 为 3 827.3 MJ/m<sup>2</sup>。加入 IFR-4 阻燃剂, 复合材料的 HRR 和 THR 大幅下降。这说明 IFR-4 阻燃剂可以有效阻燃 PP 材料, 这是因为 IFR-4 阻燃剂分解释放不可燃的 NH<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>, 并且阻燃剂发生酯化、交联、成炭反应, 在 PP 材料表面形成一层致密的炭层, 延缓火焰和热量向 PP 内部传递, 抑制火焰的传播, 燃烧时间增长, 阻燃 PP 材料的 HRR 和 THR 明显降低。

### 2.7 纯 PP 和 PP/IFR-4 复合材料炭层形貌分析

图 6 为纯 PP 和 PP/IFR-4 复合材料残炭表面形貌。从图 6 可以看出, 纯 PP 燃烧后几乎没有炭层, 无法拍摄炭层形貌; 而加入 IFR-4 的 PP 材料表面形成致密的炭层。这可能是由于 IFR-4 阻燃剂的加入, 使 PP 材料在燃烧过程中聚磷酸铵与新型成炭剂发生酯化反应, 脱水炭化, 交联形成致密的炭层, 起隔热隔氧的作用, 这也是 PP 材料阻燃性能提高的根本原因。



(a) 纯 PP



(b) PP/IFR-4

图 6 纯 PP 和 PP/IFR-4 残炭表面形貌

Fig.6 Char residues surface morphology of pure PP and PP/IFR-4

### 3 结论

(1) 以水作溶剂, 合成新型成炭剂, 聚-2-氨基-4,6-嘧啶基-1,3,5 三嗪, 产率 96.5%。该新型成炭剂起始分解温度 285.6 °C, 具有优异的热稳定性, 满足 PP 加工温度。

(2) 当阻燃剂添加量为 28%, 新型成炭剂与聚磷酸铵质量比为 1:4, PP/IFR-4 复合材料的 LOI 值最高, 达到 30.8%, 1.6 mm 样条可以达到 V-0 级。

(3) IFR-4 阻燃剂的加入, 改变 PP 材料的热降解过程, 材料的起始分解温度降低, 达到 292.1 °C, 材料最大热失重速率峰对应的温度提高至 481.6 °C。IFR-4 使 PP 材料的热稳定性提高, 这可能是因为 IFR-4 阻燃剂的加入, IFR-4 率先分解, 在 PP 材料表面形成炭层, 隔绝热量, 使 PP 材料的

热稳定性提高。

(4) IFR-4 阻燃剂的加入使 PP 材料的热释放速率和总热释放量明显下降, PP/IFR-4 复合材料的 PHRR 降低至 435 kW/m<sup>2</sup>, THR 为 3 827.3 MJ/(m<sup>2</sup>·kg)。HRR 和 THR 大幅下降, 这说明 IFR-4 阻燃剂对 PP 材料具有阻燃作用, 在 PP 材料表面形成一层致密的炭层, 延缓火焰和热量向 PP 内部传递, 抑制火焰传播, 燃烧时间增长, 因此 PP 复合材料的 HRR 和 THR 明显降低。

### 参考文献

- [1] 赵敏. 改性聚丙烯新材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 高鸿宾. 实用有机化学辞典[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [3] 谭捷, 四月, 李威. 国内聚丙烯生产工艺技术现状及市场分析[J]. 弹性体, 2016, 26(1): 65-70.
- [4] 邹亮, 陶国良, 夏艳平. 废旧胶粉/聚丙烯共混物的制备及性能研究[J]. 橡胶工业, 2021, 68(3): 185-190.
- [5] 欧育湘. 阻燃剂制造、性能及应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
- [6] Almeras X, Le Bras M, Hornsby P, et al. Effect of fillers on the fire retardancy of intumescent polypropylene compounds[J]. Polym Degrad Stab, 2003, 82(2): 325-331.
- [7] Bourbigot S, Le Bras M, Delobe R. 4A zeolite synergistic agent in new flame retardant intumescent formulations of polyethylenic polymers—study of the effect of the constituent monomers[J]. Polym Degrad Stab, 1996, 54(2/3): 275-287.
- [8] Camino G, Martinasso G, Costa L. Thermal degradation of pentaerythritol diphosphate model compound for fire retardant intumescent systems: Part I—overall thermal degradation[J]. Polymer Degradation and Stability, 1990, 27(3): 285-296.