复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第1期 2月 2013年
Vol. 30 No. 1 February 2013

文章编号：1000-3851(2013)01-0083-07

新型无卤膨胀阻燃聚丙烯的制备及阻燃性能

卢林刚*[1]，徐晓楠[2]，王大为[3]，董希琳[1]，杨守生[2]

(1. 中国人民武装警察部队学院 科研部，廊坊 065000；2. 中国人民武装警察部队学院 消防工程系，廊坊 065000；
3. 中国人民武装警察部队学院 研究生队，廊坊 065000)

摘　要： 利用有机杂环磷酸酯1，2，3-三(5，5-二甲基-1，3-二氧杂环己内磷酸酯基)苯(FR)、聚磷酸铵(APP)和三聚氰胺(MEL)制备新型无卤三源膨胀阻燃聚丙烯(IFR/PP)材料，通过极限氧指数(LOI)、水平燃烧(UL-94)、热重分析法(TGA)、锥形量热(cone)等方法研究了IFR对聚丙烯阻燃性能影响。结果表明：当IFR总添加质量分数为30%(FR∶APP∶MEL质量比为4∶8∶3)，阻燃IFR/PP的LOI达到36.2%，其热释放速率峰值(pk-HRR)、热释放速率平均值(av-HRR)、有效燃烧热平均值(av-EHC)、比消光面积平均值(av-SEA)、质量损失速率平均值(av-MLR)及一氧化碳释放率平均值(av-CO)相对未阻燃PP分别降低75.9%、71.7%、76.4%、74.6%、58.3%和50.0%，300 s时CO释放量接近0，呈现出良好的阻燃、抑烟和抑毒性能；SEM研究表明，IFR催化PP在燃烧初期形成了致密、坚硬的优质炭层。

关键词： 膨胀阻燃剂；聚丙烯；阻燃性能；燃烧；锥形量热仪

中图分类号： (TQ323.8)　　**文献标志码：** A

Preparation and flame retardancy of intumescent flame-retardant polypropylene

LU Lingang*[1], XU Xiaonan[2], WANG Dawei[3], DONG Xilin[1], YANG Shousheng[2]

(1. Department of Science and Technology, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China;
2. Department of Fire Protection Engineering, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China;
3. Graduates Forces, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China)

Abstract: Polypropylene(PP) was flame retarded with an intumescent flame retardant(IFR) system containing 1, 2, 3-tri(5, 5-dibromomethyl-1, 3-dioxaphosphorinanyl-2-oxy)benzene(FR), polyphosphate(APP) and melamine (MEL). The effect of content on flame retarding properties such as limited oxygen index(LOI) measurements, thermal gravimetric analysis(TGA), UL-94 and cone tests was studied. The results demonstrate that IFR is effective on improving the flame retardancy of polypropylene. The limited oxygen index value could reach 36.2% for the sample containing 30% IFR(FR∶APP∶MEL, 4∶8∶3, mass ratio). The cone experimental results show that the peak heat release rate(pk-HRR), average heat release rate(av-HRR), average effective heat of combustion (av-EHC), average specific extinction area(av-SEA), average mass loss rate(av-MLR) and average CO release rate(av-CO) of the PP are reduced 75.9%, 71.7%, 76.4%, 74.6%, 58.3% and 50.0% respectively than those of the pure PP. The release rate of soot and poisonous gas are reduced, which reaches to about zero at burning time of 300 s. In addition, SEM observation reveales that the IFR can promote the formation of strong charred layers in the early stage of burning of the composite.

Keywords: intumescent flame retardant(IFR); polypropylene; flame retardancy; combustion; cone calorimeter

聚丙烯(PP)因其综合力学性能好、无毒、质轻、耐腐蚀、易加工回收等诸多优点而广泛应用于交通运输、电子电器、化工、建筑、轻工、包装等众多领域。但是，聚丙烯属于易燃材料，燃烧过程放热量大，并产生剧烈熔滴效应，极易发生火焰蔓延引起火灾事故，危害社会及人民生命财产安全。因

收到初稿日期： 2011-12-23；**收到修改稿日期：** 2012-04-27；**网络出版时间：** 2012-10-11 17:22:40
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20121011.1722.009.html
基金项目： 河北省自然科学基金(E2012507008)
通讯作者： 卢林刚，博士，副教授，从事有机合成及阻燃剂开发　E-mail：wjxylulingang@sohu.com

此，赋予聚丙烯阻燃性能，降低其火灾危险性已极为重要和迫切[1-4]。近年来，人们生命健康和环境保护意识不断增强，对阻燃材料使用安全性和环保性尤为关注，高效、低烟、无毒、无卤化已成为聚丙烯阻燃技术发展趋势[7-8]。膨胀阻燃剂(IFR)是以P、C、N为核心阻燃元素，集酸源、碳源、气源于一体的多功能复合型阻燃体系，IFR受热分解能促进聚合物表面形成均匀炭质泡沫层，进而发挥良好的隔热、隔氧、抑烟和防熔滴等作用，有效阻止聚合物与辐射源间热传导，降低聚合物热降解速度，增强燃烧聚合物自熄能力，呈现出良好应用前景[5-9]。近年来，以新戊二醇为基本单元的笼状或环状结构含磷化合物以其优异热稳定性和良好成炭性，兼具丰富的碳源和酸源，表现出较高的应用前景[10]，因此本实验中利用新近合成的有机杂环磷酸酯1，2，3-三(5，5-二甲基-1，3-二氧杂环己内磷酸酯基)苯(FR，图1)[11]与聚磷酸铵和三聚氰胺复配成膨胀阻燃体系(IFR)，研究各种组分不同配比对PP阻燃性能的影响。

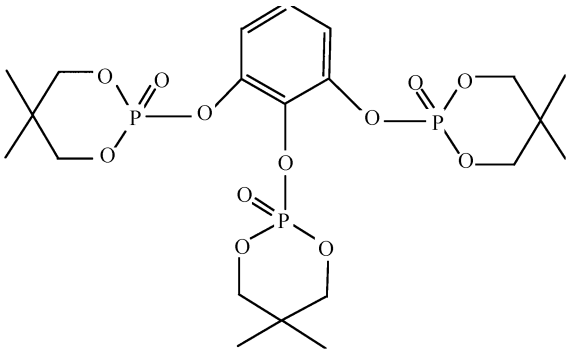


图1　化合物1，2，3-三(5，5-二甲基-1，3-二氧杂环己内磷酸酯基)苯(FR)的分子结构式

Fig. 1　Molecular structure of compound 1，2，3-tri (5，5-dibromomethyl-1，3-dioxaphosphorinanyl-2-oxy) benzene(FR)

1　实验部分

1.1　主要原料

阻燃剂FR，参考文献[11]合成(1，2，3-三(5，5-二甲基-1，3-二氧杂环己内磷酸酯基)苯，纯度大于99%)；PP，K8303，工业级，北京燕山石油化工有限公司；三聚氰胺(MEL)，分析纯，天津福晨化学试剂厂；聚磷酸铵Ⅱ型(APP)，工业级，平均聚合度>1500，青岛海化阻燃材料有限公司；其他试剂均为分析纯。

1.2　性能测试

采用氧指数仪HC-2CZ(南京上元分析仪器厂)按照ASTM D-2863标准测定IFR/PP氧指数，试样尺寸100 mm × 6.5 mm × 3 mm；采用水平燃烧仪UL94 SCZ-3(南京上元分析仪器厂)按FMVSS 302/ZSO 3975标准进行水平燃烧测定，试样尺寸127 mm×12.7 mm × 3 mm；采用锥形量热仪S001(英国FTT公司)按ASTM E-1354标准进行锥形量热测定，热辐射功率为35 kW·m^{-2}，样品尺寸100 mm ×100 mm × 3 mm；采用热重分析仪TGA/SDTA 851(METTLER公司)，分析气氛为N_2，气体流速为30 mL/min，升温速率为10 ℃/min，测试范围25～600 ℃；采用扫描电子显微镜KYKY2800(中科科仪厂)燃烧试样断口表面喷金处理，在SEM上进行断面形貌分析；采用万能制样机NHY-W(河北承德市试验机厂)、拉伸试验机AG-IS(北京岛津医疗器械有限公司)、悬臂梁冲击试验机XBL-22(深圳市凯强利试验仪器有限公司)按GB 1040-79标准进行拉伸强度测定，拉伸速度为5 mm/min。按GB 1043-79标准进行简支梁缺口冲击强度测定，摆锤冲击速度为2.2 m/s。

1.3　阻燃IFR/PP试样的制备

参考表1中复合材料配方，将PP与阻燃剂组分在高速混合机中混合5～6 min，出料冷却后，将混合物料置于双辊塑炼机混炼、塑化、拉片，将片材定量放在模具中，再将模具置于平板硫化机中加热、加压、冷却，经裁剪制得燃烧标准试样。工艺参数：双辊塑炼温度190～210 ℃；模压温度200 ℃；压力7 MPa；时间10 min。

2　结果与分析

2.1　IFR/PP复合材料极限氧指数(LOI)、UL-94水平燃烧及力学性能分析

表1为纯PP及IFR/PP阻燃体系LOI、UL-94水平燃烧性能及力学性能测试数据。结果表明，纯PP氧指数仅为19.7%，燃烧速度快，熔滴效应显著，火灾危险性高；保持阻燃体系总添加量30%(质量分数，下同)不变，并将FR∶APP质量比固定1∶2，改变MEL∶(FR+APP)比例。可以看出，从IFR/PP1到IFR/PP4，MEL∶(FR+APP)值从1∶1降低到1∶4时，膨胀阻燃PP体系的氧指数从28.3%逐渐增至36.2%，实现了IFR/PP难燃并抑制滴落，水平燃烧速率降幅从25.9%增至50.4%。IFR配方调整结果发现，随着MEL∶(FR+APP)值逐渐降低，体系LOI值和水平燃烧速度依次降低，表明

表 1 纯 PP 及 IFR/PP 复合材料的配方及其性能测试结果

Table 1 Sample Proportion and experimental results of pure PP and IFR/PP

Sample	Mass fraction/%				LOI/%	UL-94/ ($mm \cdot min^{-1}$)	Tensile strength/MPa	Impact strength/($kJ \cdot m^{-2}$)
	PP	FR	APP	MEL				
Pure PP	100	0	0	0	19.7	FH-3-13.9	35.3	32.0
IFR/PP1	70	5.0	10.0	15	28.3	FH-3-10.3	25.5	27.6
IFR/PP2	70	6.7	13.3	10	31.4	FH-3-9.7	24.9	29.4
IFR/PP3	70	7.5	15.0	7.5	33.6	FH-3-8.6	24.7	30.3
IFR/PP4	70	8.0	16.0	6.0	36.2	FH-3-6.9	24.3	30.8

Note: LOI—Limited oxygen index; UL-94-FH—Horizontal flame test.

适当比例气源能够使炭层发挥出良好阻燃效果，但气源量太大会破坏残炭层结构完整性，造成热量、可燃气体与基体之间的贯通和接触，导致材料阻燃性能下降。此外，力学性能研究表明，随着 MEL：(FR+APP)值逐渐降低，IFR/PP 体系的拉伸强度呈下降趋势，由纯 PP 时的 35.3 MPa 逐渐下降到 24.3 MPa，降幅 31.2%，IFR/PP 体系的冲击强度呈先下降后逐渐上升的趋势，由纯 PP 时 32.0 kJ/m^2 降至 IFR/PP1 时的 27.6 kJ/m^2 后又逐渐增加到 IFR/PP4 时的30.8 kJ/m^2，其原因主要是多组分添加剂影响了 PP 内部各项粒子的分布和状态，抑制 PP 材料分子间作用力，从而降低了材料物理力学性能。

2.2 IFR/PP 体系燃烧特性

2.2.1 阻燃体系的易燃性和释热特性分析

表 2 为 IFR/PP 阻燃体系火灾相关性参数数据。图 2 为 IFR/PP 阻燃体系热释放速率与时间关系曲线。从反映材料火灾强度大小以及蔓延速度重要指标的热释放速率(HRR)数据变化来看，纯 PP 48 s 时被点燃，HRR 很快达到最大值 428.42 $kW \cdot m^{-2}$，其曲线陡峭，峰值高且尖锐，约 375 s 时燃烧完全；经 IFR 阻燃 PP 的点燃时间随着 MEL 含量降低而延长，HRR 峰值及平均值均明显下降，IFR/PP4 体系点燃时间达 87 s，较纯 PP 增加了 1 倍，其 pk-HRR、av-HRR 较纯 PP 分别降低 75.9%和 71.7%，峰值时间延迟 395 s，这与氧指数和 UL-94 的测试结果一致。IFR/PP4 热释放速率得到有效抑制，改善了 PP 热分解性能，其 av-MLR 较纯 PP 低，从0.048 $g \cdot s^{-1}$降至 0.020 $g \cdot s^{-1}$，减少其在实际应用中的火灾风险，为火灾救援、人员疏散及财产保护赢得宝贵时间。

表 2 纯 PP 及 IFR/PP 复合材料的锥形实验数据

Table 2 Cone calorimetry data of pure PP and IFR/PP composite

Sample	TTI/s	pk-HRR/ ($kW \cdot m^{-2}$)	av-HRR/ ($kW \cdot m^{-2}$)	av-EHC/ ($MJ \cdot kg^{-1}$)	av-SEA/ ($m^2 \cdot kg^{-1}$)	av-MLR/ ($g \cdot s^{-1}$)	av-CO
Pure PP	48	428.42 (375^b)	207.53 (171.3^a)	110.11 (79.94^a)	1093.4 (1154.4^a)	0.048 (0.055^a)	0.07 (0.085^a)
IFR/PP1	59	199.53 (645^b)	141.08 (120.4^a)	32.78 (23.0^a)	438.93 (434.2^a)	0.038 (0.046^a)	0.026 (0.022^a)
IFR/PP2	62	172.83 (660^b)	113.76 (91.1^a)	33.58 (24.8^a)	283.94 (411.0^a)	0.030 (0.033^a)	0.027 (0.025^a)
IFR/PP3	73	149.83 (665^b)	97.34 (81.3^a)	30.65 (20.7^a)	274.44 (579.1^a)	0.028 (0.035^a)	0.025 (0.024^a)
IFR/PP4	87	103.32 (770^b)	58.76 (42.1^a)	26.03 (16.8^a)	278.17 (189.0^a)	0.020 (0.022^a)	0.035 (0.020^a)

Note: TTI—Time to ignition; pk-HRR—Peak heat release rate; av-HRR—Average heat release rate; av-EHC—Average effective heat of combustion; av-SEA—Average specific extinction area; av-MLR—Average mass loss rate; av-CO—CO average release rate; a—Average data in 6 min; b—Time of the peak formed(s).

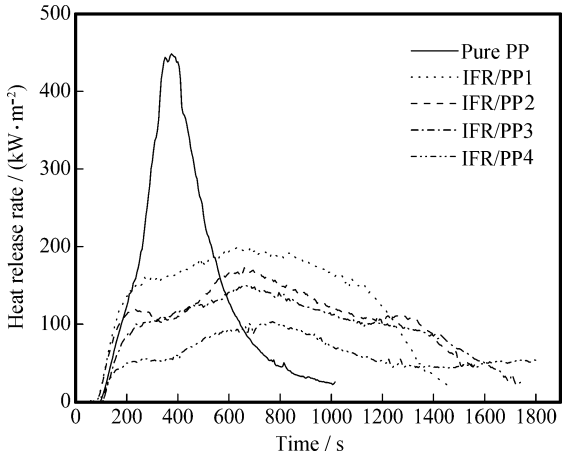


图 2　纯 PP 及 IFR/PP 体系的热释放速率曲线

Fig. 2　Heat release rate curves of pure PP and IFR/PP

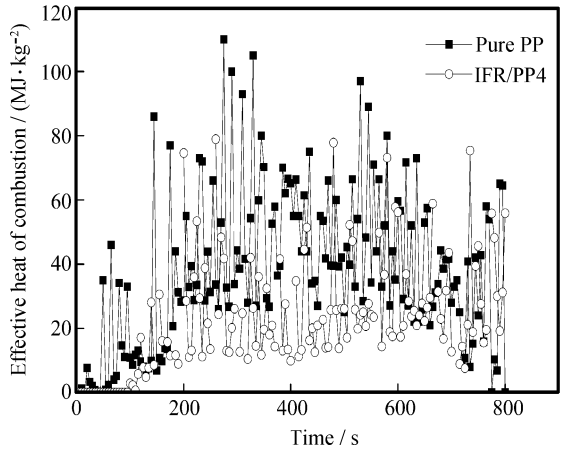


图 3　纯 PP 及 IFR/PP 复合材料的有效燃烧热曲线

Fig. 3　Effective heat of combustion curves of pure PP and IFR/PP

仔细观察发现，IFR 阻燃 PP 体系 HRR 曲线均存在两个波峰即 M 峰型，这是高效膨胀阻燃体系典型特征，主要过程是材料被点燃后，迅速发生热氧化、降解，生成可燃物，HRR 开始增长，但是同时酸源迅速催化 PP 形成的有效隔离炭层抑制了 HRR 快速增长，使得 IFR/PP4 在 375 s 时的 HRR 仅为 50 kW·m^{-2}，释热量急剧降低，此时纯 PP 的 HRR 却达到峰值；随着热辐射继续作用，膨胀炭层由于不够稳定或不牢固而在燃烧过程中发生分解，同时 MEL 气源释放量增加，进一步削弱了炭层阻隔效应，使材料部分暴露于热辐射之下，产生放热和阻隔竞争作用，导致第 2 个峰出现。实验表明，初期表面形成炭层质量越高，热稳定性越好，其隔热隔氧作用就越强，第 1 个 HRR 峰值也会更低，同时延长了第 2 个峰值的出现时间，避免材料内部热辐射作用加剧。

图 3 为纯 PP 及 IFR/PP 复合材料的有效燃烧热(EHC)曲线。EHC 反映可燃挥发性气体在气相火焰中的燃烧程度，其值越大，火灾危险性越高。由图 3 和表 2 可见，阻燃 PP 有效燃烧热平均值与 HRR 数据变化规律基本一致，均明显低于纯 PP 试样，IFR/PP4 较 PP 的 av-EHC 下降了76.4%，主要由于致密膨胀炭层阻隔效应使 PP 分解速率减缓，导致易燃性挥发物质组分含量降低并抑制其逸出，进而减少了气相可燃性挥发性物质的生成量，同时 IFR 热降解过程中生成氨气、水等不燃性气体，降低可燃性气体在气相中的燃烧程度，从而发挥良好的气相抑制作用。

2.2.2　IFR/PP 复合材料的生烟特性及烟毒性分析

图 4 为 IFR/PP 体系的比消光面积和 CO 释放率曲线。比消光面积(SEA)是表征燃烧过程中发烟量的动态参数。膨胀阻燃体系 SEA 平均值均在纯 PP 以下，其 av-SEA 较纯 PP 降低 74.6%；毒性气体释放方面，阻燃体系效果明显优于纯 PP 体系，尤其在 300 s 时，IFR/PP4 的 CO 释放量几乎为 0，而此时纯 PP 已达到最大峰值，毒性气体释放得到有效控制。仔细观察发现，CO 生成曲线也呈现出 M 峰特征，这与炭层形成过程一致，可见膨胀型阻燃剂的加入有效控制了 PP 材料发烟量及 CO 生成速率，为人员逃生和灭火救援工作提供了有利条件。

2.3　IFR/PP 复合材料热降解与成炭行为分析

表 3 及图 5 为纯 PP 和 IFR/PP 复合材料的热失重数据和相应曲线。可见，纯 PP 在 368～492 ℃区间只有一个热分解阶段，其 DTG 曲线在 436.3 ℃存在一个最大热分解峰，600 ℃左右时几乎无残炭剩余，仅剩余 6.8%。IFR/PP 阻燃体系初始分解温度较纯 PP 提前约 100 ℃，其分解过程呈现出两个阶段，其中 250～310 ℃区间为阻燃剂弱分解过程，最大失重率仅 10%；395～480 ℃区间为 PP 和阻燃剂共同分解过程，是主分解阶段，失重率约 65%，最大分解温度在 460 ℃附近，最大热失重速率较纯 PP 降低约 38.2%，600 ℃时残炭显著增加约 20%。TG 分析表明，IFR 的添加能有效促进 PP 成炭，缓解 PP 分解速率，增强 PP 材料在高温下的热稳定性。

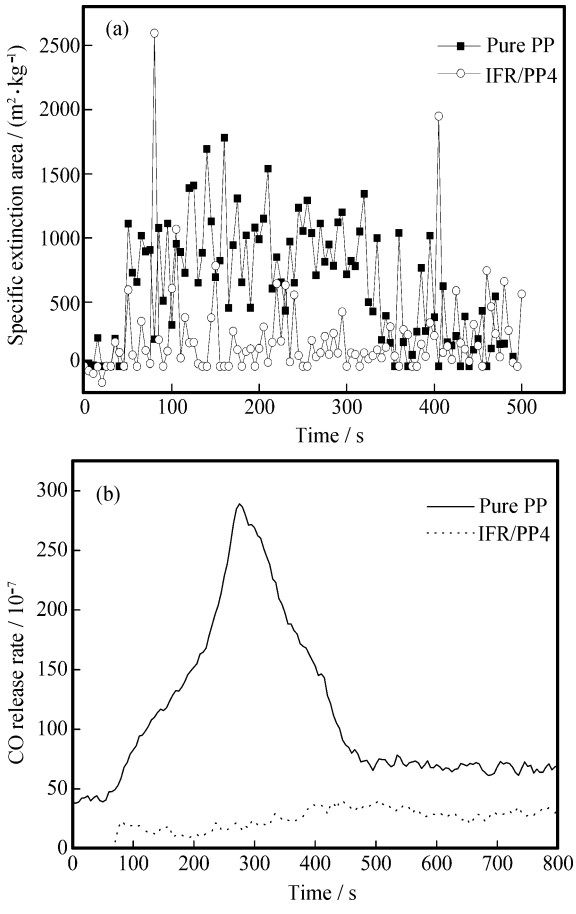


图 4　纯 PP 及 IFR/PP 体系的比消光面积和 CO 释放率曲线

Fig. 4　Specific extinction area and CO release rate curves of pure PP and IFR/PP

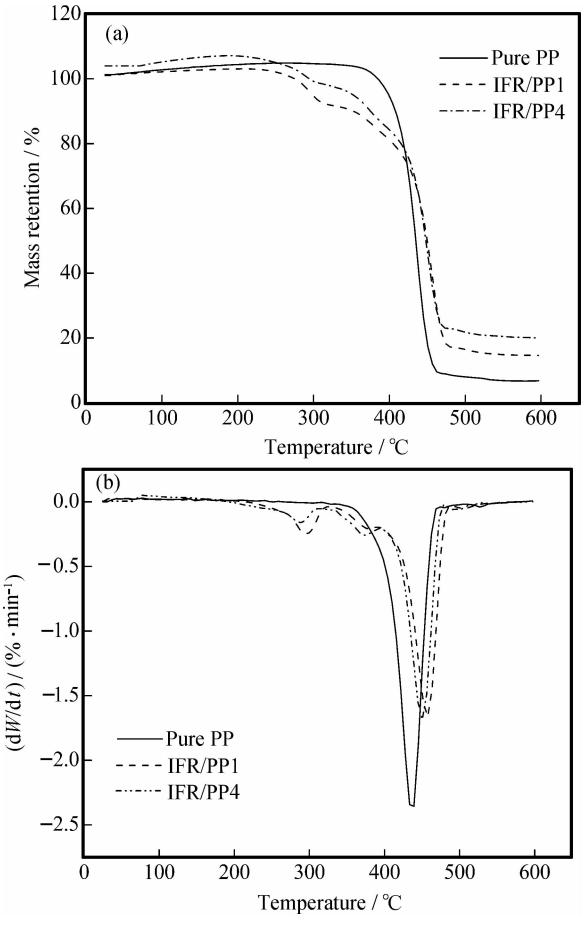


图 5　纯 PP 及 IFR/PP 体系热失重及失重微分分析曲线

Fig. 5　Thermal gravimetric and analysis curves of pure PP and IFR/PP

表 3　纯 PP 及 IFR/PP 复合材料的热失重数据

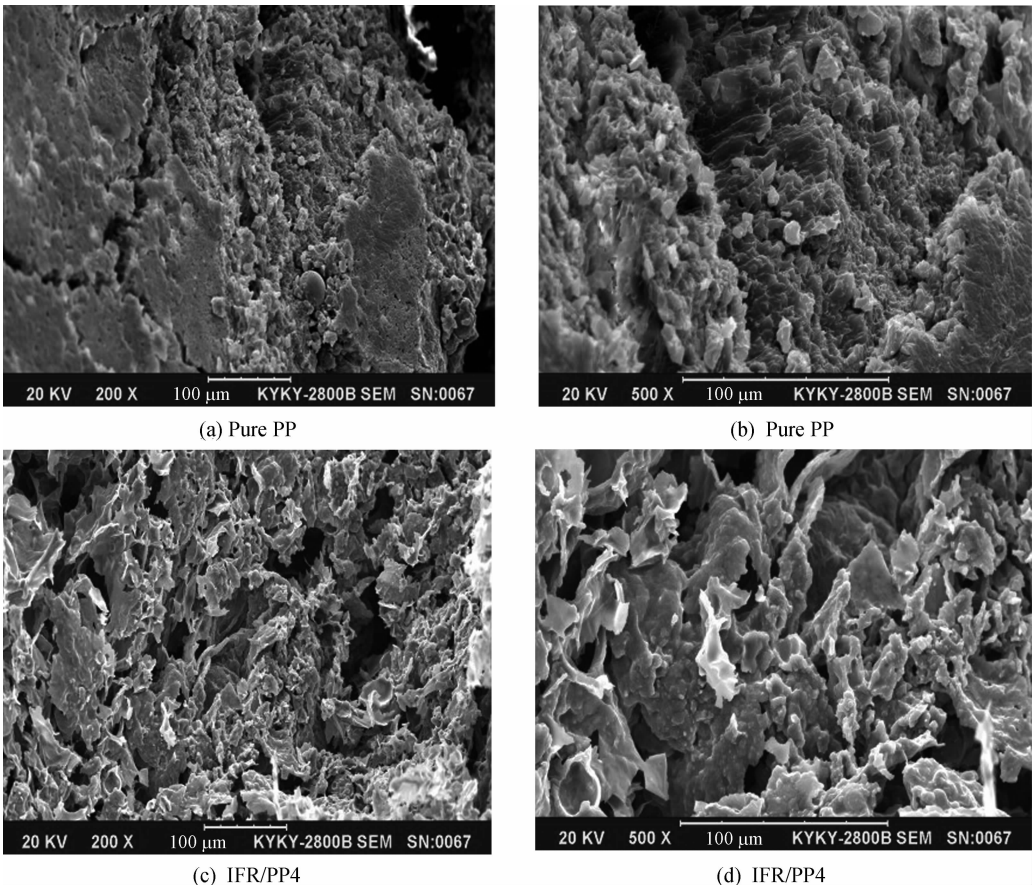
Table 3　Thermal analysis data collected from TGA of pure PP and IFR/PP

Sample	$T_{5\%}$/℃	$T_{10\%}$/℃	$T_{20\%}$/℃	R_{max}/(% · min^{-1})	T_{max}/℃	Char yield/%	
						500℃	600℃
Pure PP	398.3	408.5	418.6	2.33	436.3	8.1	6.8
IFR/PP1	289.5	347.0	398.7	1.67	451.3	18.9	17.6
IFR/PP2	302.0	315.5	332.7	1.46	455.5	22.8	22.5
IFR/PP4	352.7	375.7	416.0	1.44	455.6	24.7	23.1

Note: $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{20\%}$—Degradation temperature at 5%, 10% and 20% mass loss in the decomposition stage; R_{max}—Maximum degradation rate in the decomposition stage; T_{max}—Maximum degradation temperature in the decomposition stage.

2.4　IFR/PP 体系炭层微观形貌分析

热失重及锥形量热实验研究表明，膨胀阻燃材料在燃烧过程中能否生成优质、高效炭层，是影响其阻燃效果优劣的关键。图 6 为纯 PP 及 IFR/PP 膨胀体系残炭微观结构 SEM 照片。从图 6(a)、6(b)可见，纯 PP 体系炭层疏松，相互粘结性差，残炭表面有很大的相互贯通的裂缝和空洞，给燃烧时外部热量以及聚合物分解产生的挥发性小分子在火焰区和基体之间进行热量及物质交换提供了便利通道，加快了纯 PP 的燃烧分解进程；IFR/PP4 体系残炭(图 6(c)、6(d))表面均匀、致密、坚硬，并呈现出大量褶皱，里面含有许多能够容纳挥发性易燃气体囊泡，有效阻挡了小分子及热量的相互传递，表现出良好的阻燃效果。



(a) Pure PP　(b) Pure PP

(c) IFR/PP4　(d) IFR/PP4

图 6　纯 PP 及 IFR/PP4 燃烧后的扫描电镜照片

Fig. 6　SEM photographs of the residues of pure PP and IFR/PP4 composites

3　结　论

(1) 将有机杂环磷酸酯 1，2，3-三(5，5-二甲基-1，3-二氧杂环己内磷酸酯基)苯(FR)与聚磷酸铵和三聚氰胺复配，制备出新型膨胀阻燃体系(IFR)能够有效催化聚丙烯脱水并产生致密坚硬炭层，发挥了良好的隔热、隔氧、隔气以及抑烟、降毒效果。

(2) 当 IFR 总添加质量分数为 30%时(FR∶APP∶MEL 质量比为 4∶8∶3)，阻燃 PP 的 LOI 达到 36.2%，最大热分解速率降低 38.2%，其热释放速率峰值(pk-HRR)、热释放速率平均值(av-HRR)、有效燃烧热平均值(av-EHC)、比消光面积平均值(av-SEA)及质量损失速率平均值(av-MLR)相对未阻燃 PP 分别降低 75.9%、71.7%、76.4%、74.6%和 58.3%，呈现出良好的阻燃效果和抑烟、抑毒性能，从而有效降低了聚丙烯材料的火灾风险，这对于火场中人员逃生和救援以及减少火灾损失具有重要意义。

参考文献：

[1] 吕明福，刘　涛，张师军. 聚丙烯的热降解和燃烧行为[J]. 合成树脂及塑料，2007，24(6)：14-17.
Lü Mingfu，Liu Tao，Zhang Shijun. Thermal degradation and combustion behavior of polypropylene [J]. Chinese Synthenic Resin and Plastics，2007，24(6)：14-17.

[2] Du Baoxian，Guo Zhenghong，Song Ping'an，et al. Flame retardant mechanism of organo-bentonite in polypropylene [J]. Applied Clay Science，2009，45(3)：178-184.

[3] 陈晓浪，于　杰，何　敏，等. 表面改性剂对聚丙烯/氢氧化镁复合材料燃烧性能和热稳定性及结晶行为的影响[J]. 高分子材料科学与工程，2009，25(5)：60-63.
Chen Xiaolang，Yu Jie，He Min，et al. Effect of surface modification on flammability，thermal stability and crystallization behaviors of PP/Mg(OH)$_2$ composites [J]. Polymer Materials Science and Engineering，2009，25(5)：60-63.

[4] Suppakarn Nitinat，Jarukumjorn Kasama. Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites：Effect of flame retardant type and content [J]. Composites Part B，2009，40(7)：613-618.

[5] Chou Chuen-Shii, Lin Sheau-Horng, Wang Chin-I, et al. A hybrid intumescent fire retardant coating from cake - and eggshell-type IFRC [J]. Powder Technology, 2010, 198(1): 149-156.

[6] Peng Huaqiao, Zhou Qian, Wang Deyi, et al. A novel charring agent containing caged bicyclic phosphate and its application in intumescent flame retardant polypropylene systems [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2008, 14(5): 589-595.

[7] Zhou Shun, Song Lei, Wang Zhengzhou, et al. Flame retardation and char formation mechanism of intumescent flame retarded polypropylene composites containing melamine phosphate and pentaerythritol phosphate [J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(10): 1799-1806.

[8] Ju Zhiyu, Ye Yong, Zou Ruyi, et al. Synthesis and thermal stability of a novel phosphorus - nitrogen containing intumescent flame retardant [J]. Chinese Chemical Letters, 2008, 19(3): 277-278.

[9] Li Yantao, Li Bin, Dai Jinfeng, et al. Synergistic effects of lanthanum oxide on a novel intumescent flame retardant polypropylene system [J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(1): 9-16.

[10] 任元林，程博闻，张金树，等. N，N'-二(二乙氧基硫代磷酰基)-1，4-苯二胺的合成、晶体结构及热性能研究 [J]. 化学学报，2007，65(18)：2034-2038.
Ren Yuanlin, Cheng Bowen, Zhang Jinshu, et al. Synthesis, crystal structure and thermal properties of N, N' - di (diethoxythio-phosphoryl)-1, 4-phenylenediamine [J]. Acta Chimica Sinica, 2007, 65(18): 2034-2038.

[11] 卢林刚，王大为，董希琳，等. 1，2，3-三(5，5-二甲基-1，3-二氧杂环己内磷酰氧基)苯的合成、晶体结构及阻燃性能研究 [J]. 化学学报，2008，66(22)：2489-2493.
Lu Lingang, Wang Dawei, Dong Xilin, et al. Synthesis, structure and flame retardant property of 1, 2, 3-tris(5, 5-dimethyl-1, 3-dioxaphosphorinanyl-2-oxy)benzene[J]. Acta Chimica Sinica, 2008, 66(22): 2489-2493.

KEYWORDS FOR COMPOSITES

A: MATERIAL

aramid fibre
carbon fibre
carbon-carbon composites
ceramic fibre
ceramic-matrix composites
discontinuous reinforcement
fabrics/textiles
fibres
foams
glass fibres
glasses
honeycomb
hybrid
intermetallics
lamina/ply
laminates
layered structures
metal-matrix composites
moulding compounds
nano-structures
particle-reinforcement
plates
polymer(textile)fibre
polymer-matrix composites (PMCs)
preform
prepreg
recycling
resins
smart materials
strand
tape
thermoplastic resin
thermosetting resin
thin films
tow
3-dimensional reinforcement
wood
yarn

B: PROPERTY

adhesion
anisotropy
buckling
chemical properties
corrosion
creep
cure behaviour
damage tolerance
debonding
defects
delamination
directional orientation
elasticity
electrical properties
embrittlement
environmental degradation
fatigue
fibre/matrix bond
fracture
fracture toughness
fragmentation
hardness
high-temperature properties
impact behaviour
interface/interphase
internal friction/damping
magnetic properties
mechanical properties
microstructure
optical properties/techniques
physical properties
plastic deformation
porosity
residual/internal stress
rheological properties
strength
stress concentrations
stress relaxation
stress transfer
surface properties
thermal properties
thermomechanical
transverse cracking
vibration
wear
wettability

（下转第 154 页）