

# MCA 阻燃剂的合成及其在 PA6 中的应用

袁文聪, 魏珊珊, 张夏宇

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** **目的** 用一种新的方法合成三聚氰胺氰尿酸盐 (MCA), 并探究其在聚酰胺 6 (PA6) 中的应用。**方法** 将三聚氰胺 (MA)、氰尿酸 (CA) 和少量水混合成膏状物, 并使其在室温下反应一定时间, 再加入少量 MCA, 使其继续反应以制备 MCA 阻燃剂。将制备的 MCA 与 PA6 熔融共混制备阻燃 PA6 复合材料, 用 FTIR, XRD, TG, SEM 对制备的 MCA 进行表征, 对阻燃 PA6 复合材料的阻燃和力学性能进行测试。**结果** 所制 MCA 的 FTIR 和 XRD 特征峰与在水中合成 MCA 的特征峰一致; 所合成的 MCA 最大热失重温度达到 451.7 °C。在阻燃剂质量分数为 8% 时, 阻燃 PA6 复合材料的极限氧指数 (LOI) 为 29%, 阻燃性能达到 UL-94 V0 级。随着阻燃剂含量的增加复合材料的力学性能有所降低, 当阻燃剂质量分数为 8% 时, 拉伸强度为 66.4 MPa, 冲击强度为 4.7 kJ/m<sup>2</sup>。**结论** 用文中方法合成的 MCA 具有工艺简单、不需加热、耗水量低等优点, 大大提高了 PA6 复合材料的阻燃性能。

**关键词:** 三聚氰胺氰尿酸盐; 聚酰胺 6; 复合材料; 阻燃性能

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)13-0167-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.023

## Preparation of MCA Flame Retardants and Its Application in PA6

YUAN Wen-cong, WEI Shan-shan, ZHANG Xia-yu

(College of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**ABSTRACT:** The work aims to synthesize melamine cyanurate (MCA) in a new method, and explore its application in polyamide 6 (PA6). Melamine (MA), cyanuric acid (CA) and a small amount of water were mixed into paste and the paste reacted for a certain time at room temperature. Then, a small amount of MCA was added for the paste to continue reacting for the preparation of MCA (flame retardant). The MCA and PA6 were blended to prepare flame retardant PA6 composites. MCA was characterized by FTIR, XRD, TG and SEM, and the flame retardancy and mechanical properties of flame retardant PA6 composites were tested. The results showed that the FTIR and XRD characteristic peaks of MCA were consistent with those of the MCA synthesized in the water. The maximum thermogravimetric temperature of the synthesized MCA reached 451.7 °C. When the mass fraction of flame retardant was 8%, the limited oxygen index (LOI) of flame retardant PA6 composites reached 29% and the flame retardancy was UL-94 V0. With increase of the flame retardant content, the mechanical properties of the composites decreased gradually. When the mass fraction of flame retardant was 8%, the tensile strength was 66.4 MPa and the impact strength was 4.7 kJ/m<sup>2</sup>. Therefore, the MCA synthesized by the proposed method and featured by simple technology, requiring no heating and low water consumption, greatly improves the flame retardancy of PA6 composites.

**KEY WORDS:** melamine cyanurate; polyamide 6; composites; flame retardancy

收稿日期: 2019-10-04

基金项目: 湖南省教育厅重点项目 (18A259)

作者简介: 袁文聪 (1993—), 女, 湖南工业大学硕士生, 主攻阻燃高分子材料。

通信作者: 魏珊珊 (1971—), 男, 博士, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为阻燃高分子材料。

聚酰胺 6 (PA6) 具有力学性能优、耐磨、耐高温等性能,在生产生活中得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。PA6 极限氧指数 (LOI) 仅为 24%,属于可燃材料<sup>[5]</sup>,由于在燃烧过程中会释放高热并产生大量烟雾,极大地限制了其在阻燃性能高要求领域中的应用,因此对其阻燃性能的研究越来越迫切<sup>[6-7]</sup>。MCA 是一种含氮无卤环保型阻燃剂,具有含氮量高、低毒、低烟和高效等优点<sup>[8-11]</sup>,在 PA6 中能显著改善复合材料的阻燃性能,扩大其在无卤阻燃领域的应用<sup>[12-14]</sup>。

目前,MCA 的工业生产大多是在大量热水介质中合成,杨淑兰等<sup>[15]</sup>在大量水中加入 MA 和 CA,在 115 °C 下反应 10 h 制得 MCA。王正洲等<sup>[16]</sup>将 MA 和 CA 加入到 15 倍的水中,在 120~180 °C 下反应 5 h 制得 MCA。用此方法合成的 MCA 需水量大,能耗高。

文中选用一种新的方法合成 MCA,能大大减少水的消耗与排放,具有节约能源的优点。相较于传统合成方法,每合成 1 t 的 MCA 可节省约 7.1 t 水。在含水量少的情况下,MA 和 CA 反应活动性低,相互接触形成氢键自组装的机率小<sup>[17]</sup>,使得合成的 MCA 纯度降低,从而导致热分解温度下降,影响阻燃性能。为克服此不足,文中实验加入少量 MCA 成品,以利于 MA 和 CA 分子之间有足够多的氢键形成合成 MCA。MA 与 CA 反应的分子式见图 1,MA 与 CA 含有多个氢键,相互接触形成氢键复合体 MCA,将合成的 MCA 与 PA6 熔融共混,制备出阻燃 PA6 复合材料,分析其性能<sup>[18-20]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 材料

主要材料:MA,工业级,河南骏化发展股份有限公司;CA,工业级,山东沃蓝生物集团有限公司;MCA,工业级,山东秀诚化工有限公司;季戊四醇 (PER),工业级,安徽金禾实业股份有限公司;PA6,岳阳巴陵石化化工化纤有限公司。

### 1.2 MCA 的制备

将 20 g 的 MA 和 20.5 g 的 CA 加入研钵中,充分搅拌均匀研磨 20 min。根据所加 MA 和 CA 的质量按比例量取适量的 MCA 成品 (0%, 2%, 4%, 6%) 和 36.5 mL 蒸馏水,将量取的 MA, CA, MCA 和蒸馏水加入 100 mL 烧杯内,搅拌均匀密封,在室温下静置 5d 后,放入温度为 80 °C 的环境中干燥 10 h,球磨粉碎后用 200 目网筛过筛,制得样品 MCA 的质量分数分别为 0, 2%, 4%, 6%。

### 1.3 PA6/MCA 阻燃复合材料的制备

将 PA6 在 80 °C 下干燥 12 h,将 PA6,PER, MCA (质量分数为 6%, 8%, 13%) 加入高速混合机并使其混合均匀,具体投料量见表 1。后用双螺杆配混挤出机 (CTE-35, 科倍隆科亚机械有限公司) 熔融共混造粒,干燥后用注塑机将其注塑成标准力学和阻燃测试样条,注塑温度为 230~245 °C,挤出和注塑的工艺条件见表 2。

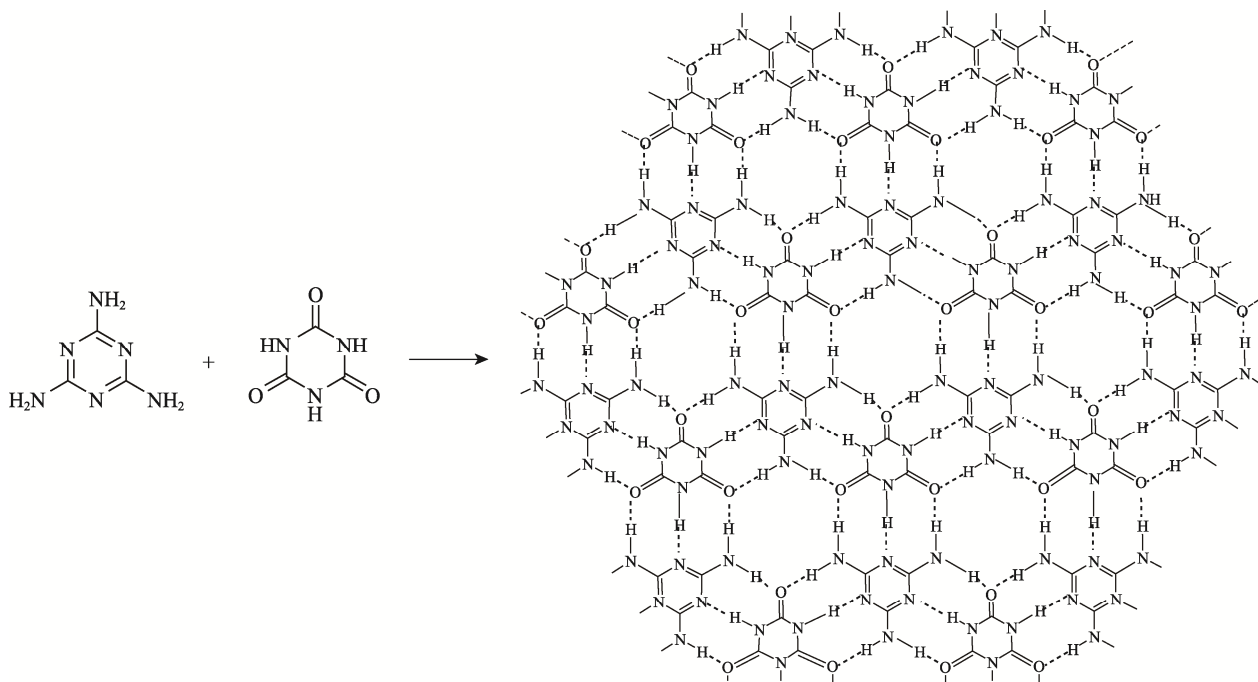


图 1 MA 与 CA 反应的示意图

Fig.1 Molecular formula of MA reacts with CA

表 1 阻燃 PA6 复合材料的组成  
Tab.1 Ingredient of flame retardant PA6 composites

试样	质量/kg		
	PA6	MCA	PER
PA6	4	0	0
PA6(6%)/MCA(2%)/PER	3.68	0.24	0.08
PA6(8%)/MCA(2%)/PER	3.6	0.32	0.08
PA6(13%)/MCA(2%)/PER	3.4	0.52	0.08

表 2 挤出工艺参数  
Tab.2 Extrusion process parameters

螺杆转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	各区温度/°C									
	一区	二区	三区	四区	五区	六区	七区	八区	九区	机头
300	210	220	225	235	240	245	245	240	235	235

## 1.4 仪器与表征

用 Nicolet380 型傅里叶变换红外光谱仪对 MCA 化学结构进行表征, KBr 压片。用 6100 型 X 射线衍射仪对 MCA 的晶体结构进行表征, 扫描范围为 5°~60°。用 Q-50 型热重分析仪对 MCA 的热失重进行表征, 样品质量在 5~10 mg 范围内, N<sub>2</sub> 氛围, 升温速率为 20 °C/min, 升温范围为室温至 600 °C。用 JSM-6510 JEOL 型扫描电子显微镜对 MCA 的表面形貌进行表征, 喷金处理, 加速电压 20 kV。用 JF5 极限氧指数测试仪 (江宁分析仪器公司), 按 ASTM D2863—2010 测试 PA6/MCA 复合材料的 LOI, 样条尺寸为 100 mm×6.7 mm×3 mm。用 CZF-II 水平和垂直燃烧测试仪 (江宁分析仪器公司), 按 ASTM D3801—2010 测试 PA6/MCA 复合材料的垂直燃烧性能, 样条尺寸为 127 mm×12.7 mm×3.2 mm。

用 CMT4104 型电子万能实验机 (深圳新三思), 按 GB/T 1040—92 测试 PA6/MCA 复合材料的拉伸强度和弯曲强度, 拉伸速度为 50 mm/min, 样条尺寸为 160 mm×10 mm×4 mm; 弯曲速度为 2 mm/min, 样条尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm。用 CL-3003 数显悬臂梁冲击实验机 (江都区昌隆实验机械厂), 按 GB/T 1843—2008 测试 PA6/MCA 复合材料的 V 型缺口冲击性能, 样条尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm (V 型缺口)。

## 2 结果与分析

### 2.1 FTIR 分析

MCA (质量分数为 0, 2%, 4%, 6%) 的 FTIR 图, 见图 2。图 2(a, b, c, d) 的 FTIR 谱图基本一致, 且都具有 MCA 的特征吸收峰。1430 cm<sup>-1</sup> 为 C—N 的

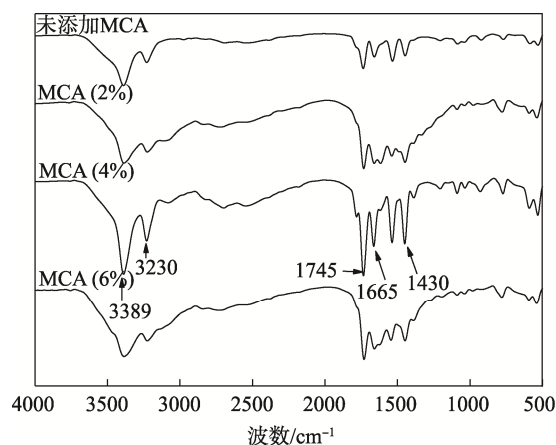


图 2 不同含量 MCA 的 FTIR  
Fig.2 FTIR with different MCA contents

伸缩振动, 1665 cm<sup>-1</sup> 为 C=N 的弯曲振动, 1745 cm<sup>-1</sup> 为 C=O 的伸缩振动, 在 3000~3500 cm<sup>-1</sup> 范围内, 3230 cm<sup>-1</sup> 为 N—H 的伸缩振动, 3389 cm<sup>-1</sup> 为 N=N 的伸缩振动。这说明采用该方法成功合成出了 MCA。

### 2.2 XRD 分析

MCA (质量分数为 0, 2%, 4%, 6%) 的 XRD 图, 见图 3。从图 3 可以看出, MCA 的 XRD 峰形尖锐, 不同条件下合成 MCA 的 2θ 角基本相同, 其中 10.8° 和 28.1° 为 MCA 的特征峰, MA 和 CA 的特征峰 (13.3°, 17.9°, 20.0°, 26.4°, 29.0° 和 30.0°) 均消失。这表明 MA 和 CA 反应完全, 所制备的 MCA 晶体较完善。

### 2.3 TG 分析

MCA (质量分数为 0, 2%, 4%, 6%) 的 TG 和 DTG 图, 见图 4—5, 数据见表 3。TG 结果可以反映材料的耐热性能, 在 TG 曲线中, 初始分解温度是质量损失为 5% 时的温度, 最大热失重温度为样品呈现

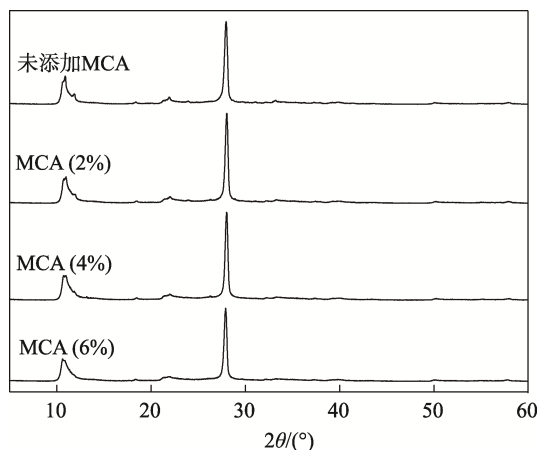


图3 不同含量MCA的XRD

Fig.3 XRD with different MCA contents

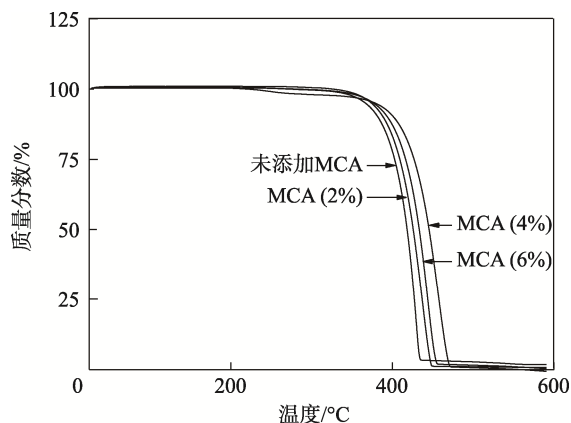


图4 不同含量MCA的TG曲线

Fig.4 TG curves of with different MCA contents

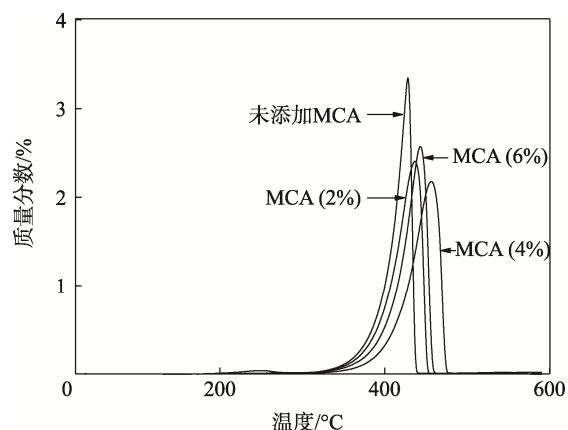


图5 不同含量MCA的DTG曲线

Fig.5 DTG curves of with different MCA contents

最大质量损失速率时的温度。MA的热分解温度为300℃左右,CA的热分解温度为360℃左右<sup>[21]</sup>,从图4可以看出,MCA的质量损失表现在单个阶段中最大热失重温度达到451.7℃,表明MA和CA反应完全,生成了MCA,此结果也进一步支持FTIR和XRD的结果。质量损失过程包括氨和水分子的释放,MCA分解成挥发性氰酸盐,这是一个快速的质量损

失过程,在DTG曲线中表示为峰值<sup>[22]</sup>。在这个过程中MCA会吸收大量的热,并且释放出大量 $N_2$ , $NH_3$ , $CO_2$ 等难燃性气体,能降低燃烧部位的温度和稀释燃烧部位可燃气体的浓度,实现阻燃。从表3可以看出,MCA(质量分数为2%,4%,6%)时,样品的 $T_d$ 和最大热失重温度均高于MCA质量分数为0。样品MCA质量分数为4%时,最大热失重温度为451.7℃,比MCA质量分数为0的最大热失重温度提高了24.1℃,具有较好的耐热性能。从表3可以看出,随着MCA成品含量的增加,合成的MCA耐热性呈先上升后降低的趋势,MCA质量分数为4%时的耐热性最好,这是由于合成质量分数为4%的MCA纯度最高,具有最高的热分解温度。

## 2.4 SEM分析

MCA的SEM图,见图6。从图6可以看出,所制备的MCA呈片状。在合成MCA的过程中,体系粘度大,容易发生团聚。图6c中MCA粒子呈明显的片状,相较于其他样品颗粒分散更均匀,这也为质量分数为4%的MCA样品提供了最大热失重温度支撑。

## 2.5 PA6/MCA复合材料的阻燃性能分析

极限氧指数(LOI)和垂直燃烧测试(UL-94)广泛应用于评估聚合物阻燃性能。

选用质量分数为4%的MCA、PA6和PER,按表1配比熔融共混制备PA6/MCA复合材料。PA6/MCA复合材料的LOI和UL-94测试结果,见表4, $t_1$ 和 $t_2$ 为2次点燃后复合材料的燃烧时间。纯PA6的LOI为24%,属于可燃材料。PA6样条在点燃后,燃烧时间较长且会产生有焰熔滴,熔滴能引燃脱脂棉。随着MCA含量的增加,复合材料的阻燃性能逐渐提高,当MCA的质量分数从8%增加到13%时,PA6/MCA复合材料的LOI从29%提高到31%,都达到UL-94 V0级。随着MCA含量的增加,PA6复合材料的燃烧时间逐渐缩短,虽然也有熔滴产生,但都不能引燃脱脂棉。首先,MCA热分解是吸热过程,通过吸热反应降低树脂的温度,有助于阻燃性能的改善;其次,MCA含氮量高,当其在受热分解时会分解出 $CO_2$ , $NH_3$ , $N_2$ , $H_2O$ 等难燃性气体,从而稀释因PA6热解

表3 MCA的TG和DTG数据

Tab.3 TG and DTG data of MCA

MCA 质量 分数/%	初始分解 温度/°C	最大热失重 温度/°C	残碳量/%
0	366.1	427.6	1.75
2	374.2	436.9	0.73
4	374.5	451.7	0.69
6	376.1	442.3	0.36



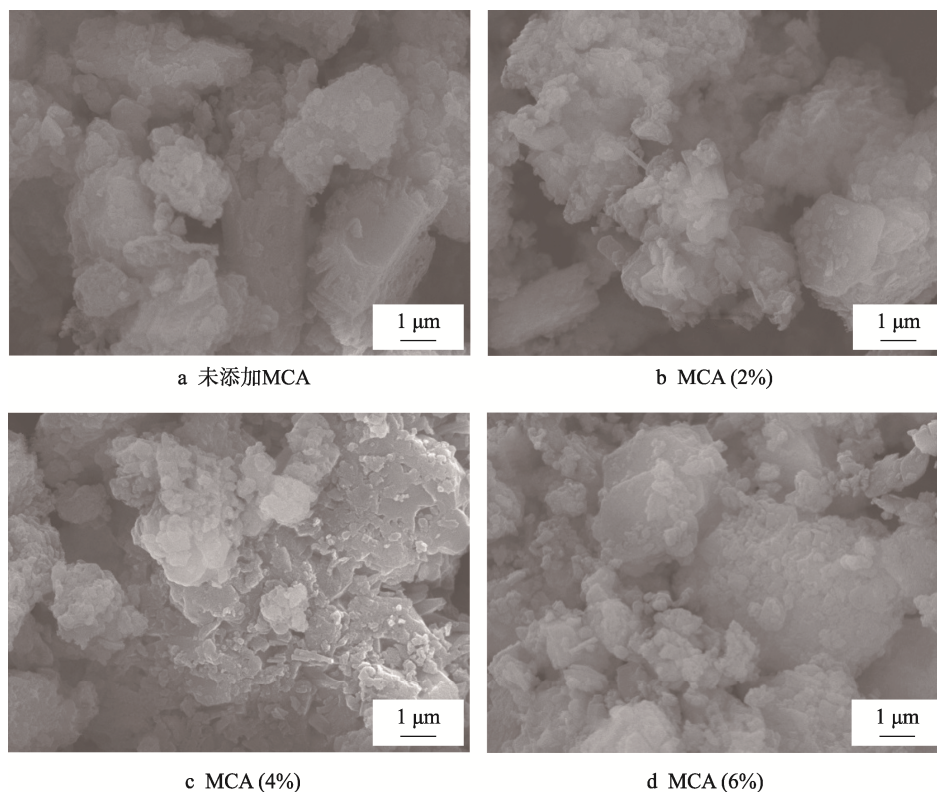


图 6 不同含量 MCA 的 SEM 图

Fig.6 SEM images ofwith different MCA contents

表 4 PA6/MCA 复合材料的阻燃性能  
Tab.4 Flame retardancy of PA6/MCA composites

样本	LOI/%	UL-94	$t_1/s$	$t_2/s$	是否 点燃 脱脂棉
PA6	24	未评级	7.7	4.8	是
PA6/MCA(6%)/PER(2%)	27	V-2	3.1	2.6	是
PA6/MCA(8%)/PER(2%)	29	V-0	2.3	2.0	否
PA6/MCA(13%)/PER(2%)	31	V-0	1.7	1.4	否

表 5 PA6/MCA 复合材料的力学性能  
Tab.5 Mechanical properties of PA6/MCA composites

样品	拉伸 强度/ MPa	冲击强度/ ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	弯曲 强度/ MPa
PA6	70.3	6.7	70.1
PA6/MCA(6%)/PER(2%)	67.6	5.4	63.3
PA6/MCA(8%)/PER(2%)	66.4	4.7	72.8
PA6/MCA(13%)/PER(2%)	62.9	4.5	78.1

而释放的可燃性气体和空气中氧气的浓度,提高阻燃性能;再者,PER 是一种高效的成碳剂,有助于炭层的形成,而炭层具有隔热和阻隔可燃物质传递的作用,可提高复合材料的阻燃性能;MCA 和 PER 的加入可以大大地提高复合材料的阻燃性能。

## 2.6 PA6/MCA 复合材料的力学性能分析

不同 PA6/MCA 阻燃复合材料的拉伸强度、缺口冲击强度和弯曲强度数据,见表 5。从表 5 可以看出,复合材料的拉伸强度和冲击强度随 MCA 含量的增加而降低,弯曲强度随 MCA 含量的增加呈先下降后上升的趋势。这是由于刚性的 MCA 粒子与 PA6 基体的界面结合性差,降低了力学性能。另外, MCA 粒子极易发生团聚,在复合材料受到外力作用时,易成为应力集中点,不利于复合材料力学性能的改善。

## 3 结语

用文中方法成功地合成出 MCA。其中质量分数为 4%的 MCA 最大热失重温度为 451.7 °C,相较于质量分数为 0 的 MCA 提高了 24.1 °C,具有较好的耐热性能;使用此方法合成的 MCA 相较于传统的水热法具有反应能耗低、工艺简单、需水量少等优点。合成的 MCA 能提高 PA6 的阻燃性能,当 MCA 质量分数为 8%时,PA6/MCA 复合材料的极限氧指数(LOI)为 29%,UL-94 V0 级;PA6/MCA 复合材料的力学性能由于较大量 MCA 的加入而降低,拉伸强度为 66.4 MPa,缺口冲击强度为 4.7  $\text{kJ}/\text{m}^2$ ,因此用文中方法合成的 MCA 是应用于 PA6 复合材料良好的阻燃剂。

## 参考文献:

- [1] 魏珊珊, 谢翔, 王乐宇, 等. 高流动性尼龙 6/改性 MCA 阻燃复合材料的性能[J]. 材料研究学报, 2015, 29(5): 365—370.  
WEI Shan-shan, XIE Xiang, WANG Le-yu, et al. Properties of High Flow-ability Nylon 6/Modified MCA Flame Retardant Composites[J]. Chinese Journal of Material Research, 2015, 29(5): 365—370.
- [2] WEI Shan-shan, YAO Feng, XU Xiang-yang, et al. Rheological Behaviors of Nylon 6/Silica Modified Melamine Cyanurate Non-halogen Flame Retardant Composites[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 13(3): 2325—2333.
- [3] 宋娜, 崔思奇, 焦德金, 等. 不同填料复配对尼龙 6/石墨烯复合材料导热性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 101—107.  
SONG Na, CUI Si-qi, JIAO De-jin, et al. Influence of Hybrid Fillers on Thermal Conductivity of Nylon 6/Graphene Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(6): 101—107.
- [4] GE Hua, TANG Gang, HU Wei-zhao, et al. Aluminum Hypophosphite Microencapsulated to Improve Its Safety and Application to Flame Retardant Polyamide 6[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 294: 186—194.
- [5] SHA K, HU Y L, WANG Y H, et al. Preparation of Flame Retardant Polyamide 6/Melamine Cyanurate Via in Situ Polymerisation and its Characterization[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(4): 843—847.
- [6] 吴笑, 许博, 朱向东, 等. 催化阻燃聚合物的研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(9): 14—22.  
WU Xiao, XU Bo, ZHU Xiang-dong, et al. Research Progress of Catalytic Flame Retardant Polymers[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(9): 14—22.
- [7] 张琪, 刘娟, 桑小名, 等. 高岭土/聚磷酸铵阻燃硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫塑料的制备与性能[J]. 材料工程, 2017, 45(11): 23—29.  
ZHANG Qi, LIU Juan, SANG Xiao-ming, et al. Preparation and Properties of Rigid Polyurethane-imide Foams Flame Retarded by Kaolin/APP[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(11): 23—29.
- [8] 魏珊珊, 姚峰, 许向阳, 等. 尼龙 6/SiO<sub>2</sub> 改性 MCA 复合材料的阻燃性能[J]. 材料研究学报, 2012, 26(6): 627—631.  
WEI Shan-shan, YAO Feng, XU Xiang-yang, et al. Flame Retardant Properties of Nylon 6/SiO<sub>2</sub> Modified MCA Composites[J]. Chinese Journal of Material Research, 2012, 26(6): 627—631.
- [9] 张宏宇, 杜长海. 阻燃润滑剂氰尿酸三聚氰胺盐的一步法合成研究[J]. 化工新型材料, 2006, 34(11): 32—34.  
ZHANG Hong-yu, DU Chang-hai. Study on Synthesis of Retardant Lubricant MCA by One Step[J]. New Chemical Materials, 2006, 34(11): 32—34.
- [10] 董妍妍, 范少文, 许小荣, 等. 阻燃剂三聚氰胺氰尿酸盐的生产与应用研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30: 298—301.  
DONG Yan-yan, FAN Shao-wen, XU Xiao-rong, et al. Production and Application of Flame Retardant Melamine Cyanurate[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30: 298—301.
- [11] FANG Zhi-ming, SONG Wei-guo, ZHANG Jun, et al. A Multi-grid Model for Evacuation Coupling with the Effects of Fire Products[J]. Fire Technology, 2012, 48(1): 91—104.
- [12] 杨典, 陆昶, 唐坦, 等. 添加 CNTs、APP 和 ABS 对尼龙 6 阻燃性能改善的协同效应研究[J]. 材料研究学报, 2016, 30(3): 199—208.  
YANG Dian, LU Chang, TANG Tan, et al. Synergistic Effect of Introducing Ammonium Polyphosphate, Carbon Nanotubes and Acrylonitrile Butadiene Styrene to Nylon 6 for Improving Flame Retardancy[J]. Chinese Journal of Material Research, 2016, 30(3): 199—208.
- [13] ZHANG Wen, TANG Ren-cheng. Adsorption and Flame Retardant Properties of Potassium Diphenyl Sulfonate on Nylon 6 Fabric[J]. Reactive and Functional Polymers, 2018, 126: 36—43.
- [14] 欧育湘. 实用阻燃技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 25—29.  
OU Yu-xiang. Practical Flame Retardant Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 25—29.
- [15] 杨淑兰, 肖继君, 李彦涛, 等. 阻燃润滑剂三聚氰胺氰尿酸盐的合成[J]. 河北省科学院学报, 2000(4): 28—32.  
YANG Shu-lan, XIAO Ji-jun, LI Yan-tao, et al. The Synthetic Process the Flame Retardant and Lubricant Melamine Cyanurate Acid[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2000(4): 28—32.
- [16] 王正洲, 徐少洪, 胡立飞. 纳米三聚氰胺氰尿酸盐的合成、表征及其在酚醛泡沫中的应用[J]. 材料研究学报, 2014, 28(6): 401—406.  
WANG Zhen-zhou, XU Shao-hong, HU Li-fei. Preparation and Characterization of Nano Melamine Cyanurate and Its Application in Phenolic Foam[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(6): 401—406.
- [17] 刘渊. 通过分子复合改性三聚氰胺氰尿酸盐及对 PA6 阻燃性能的研究[D]. 成都: 四川大学, 2004: 23—45.  
LIU Yuan. Studies on Preparation of Modified Melamine Cyanurate through Molecular Complexation and its Flame Retardative Effects on Polyamide-6[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004: 23—45.
- [18] CHEN Li, WANG Yu-zhong. A Review on Flame Retardant Technology in China. Part I: Development of Flame Retardants[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2010, 21(1): 1—26.
- [19] CHEN Ying-hong, WANG Qi, YAN Wei, et al. Preparation of Flame Retardant Polyamide 6 Composite with Melamine Cyanurate Nanoparticles in Situ Formed in Extrusion Process[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(11): 2632—2643.
- [20] LI Qi-fei, LI Bin, ZHANG Sheng-qiang. Investigation on Effects of Aluminum and Magnesium Hypophosphites on Flame Retardancy and Thermal Degradation of Polyamide 6[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(3): 1782—1789.
- [21] SANGEETHA V, KANAGATHARA N, SUMATHI R, et al. Spectral and Thermal Degradation of Melamine Cyanurate[J]. Journal of Materials, 2013: 1—7.
- [22] LIU Yuan, WANG Qi. The Investigation on the Flame Retardancy Mechanism of Nitrogen Flame Retardant Melamine Cyanurate in Polyamide 6[J]. Journal of Polymer Research, 2009, 16(5): 583—589.