



# 十二烷基硫酸钠/硼酸复合改性水滑石阻燃剂的制备及其在聚丙烯中的应用

张 坤<sup>1</sup>, 张官铭<sup>1</sup>, 张 睿<sup>2</sup>, 何 涛<sup>1</sup>, 蔡玉荣<sup>1</sup>, 姚菊明<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学材料科学与工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江联洋新材料股份有限公司, 浙江嘉兴 314511)

**摘 要:** 为改善水滑石(LDH)与聚合物基体相容性差、阻燃效率低的问题, 利用离子交换法制备了十二烷基硫酸钠(SDS)和硼酸复合改性的水滑石, 并将其作为阻燃剂, 经熔融共混法制得 PP/LDH 复合材料。采用红外、XRD、SEM 和 TGA 对改性水滑石的结构、形貌和性能进行分析, 利用极限氧指数仪和锥形量热仪对 PP/LDH 复合材料的阻燃性能进行分析。结果表明: 复合改性方法有效扩大了水滑石的层间距, 改善了其与 PP 基体间相容性, 有利于 LDH 阻燃剂在 PP 中的均匀分散。复合改性 LDH 的添加大大提升了 PP/LDH 复合材料的阻燃性能; 当向 PP 中添加质量分数为 20.0% 的阻燃剂时, 该材料的极限氧指数值由纯 PP 的 18.0% 提升至 30.9%, 热释放速率峰值由纯 PP 的 1215.84 kW/m<sup>2</sup> 下降至 50.70 kW/m<sup>2</sup>, 烟释放总量由纯 PP 的 12.66 m<sup>2</sup> 下降至 6.15 m<sup>2</sup>。该研究为高阻燃性能聚丙烯的制备及应用提供了策略支撑。

**关键词:** 水滑石; 聚丙烯; 十二烷基硫酸钠; 硼酸; 阻燃性能

**中图分类号:** TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 11-0814-07

## Preparation of LDH flame retardant modified by sodium dodecyl sulfate/boric acid and its application in polypropylene

ZHANG Kun<sup>1</sup>, ZHANG Guanming<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, HE Tao<sup>1</sup>, CAI Yurong<sup>1</sup>, YAO Juming<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Lianyang New Material Co., Ltd., Jiaxing 314511, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of poor compatibility between layered double hydroxide (LDH) and polymer matrix and low flame retardant efficiency, LDH modified by sodium dodecyl sulfate and boric acid was prepared by means of ion exchange, and it was used as a flame retardant to prepare the PP/LDH composite through melt blending. The structure, morphology and properties of the modified LDH were characterized by FT-IR, XRD, SEM and TGA. The flame retardancy of the PP/LDH composite was analyzed by limiting oxygen index meter and cone calorimeter. The results showed that the method of compound modification effectively enlarged the interlayer spacing of LDH, improved its compatibility with PP matrix and was conducive to the uniform dispersion of LDH flame retardant in PP matrix. The addition of the modified LDH greatly improved the flame retardancy of PP/LDH composite. When flame retardant with a mass fraction of 20.0% was added to PP, the limiting oxygen index of this composite increased from 18.0% for pure PP to 30.9%. The peak heat release rate decreased from 1215.84 kW/m<sup>2</sup> for pure PP to 50.70 kW/m<sup>2</sup> and the total smoke emission decreased from 12.66 m<sup>2</sup> for pure PP to 6.15 m<sup>2</sup>. Our study

收稿日期: 2022-03-02 网络出版日期: 2022-05-09

基金项目: 浙江省国际科技合作项目—双边产业联合研发计划项目(2022C04027)

作者简介: 张 坤(1995—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要从事阻燃复合材料方面的研究。

通信作者: 蔡玉荣, E-mail: caiyr@zstu.edu.cn

provides strategic support for the preparation and application of polypropylene with high flame retardancy.

**Key words:** hydrotalcite; polypropylene; sodium dodecyl sulfate; boric acid; flame retardancy

## 0 引 言

水滑石(LDH)是一类具有层状结构的阴离子超分子功能材料,由富含羟基的主体层板和层间阴离子通过非共价键组成,在吸附、能源、阻燃等领域受到了广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。作为一种无机纳米阻燃材料,水滑石兼具氢氧化镁和氢氧化铝类阻燃剂的优点,具有阻燃性和抑烟性。然而,水滑石阻燃效率较低,表面的亲水性使其在聚合物中易团聚,较小的层间距也使得聚合物的大分子链难以插入,致使其与聚合物的相容性很差。因此,与聚合物相容性差的水滑石在聚合物基体中往往难以发挥其原有的阻燃性能<sup>[4-6]</sup>。

为了改善上述问题,通常采用以下两种途径对水滑石进行改性处理:一种是利用阴离子表面活性剂对水滑石进行表面改性,改善水滑石的疏水性,提高其与聚合物基体的相容性;另一种是利用水滑石层间阴离子可置换的特性,引入具有阻燃性或可以扩大水滑石层间距的阴离子基团,以提高水滑石的阻燃效率或与聚合物基体的相容性。Wu 等<sup>[7]</sup>采用共沉淀法制备了木质素磺酸钠表面改性的 MgAl 水滑石(LDH-LS),改性后的水滑石可以在聚丙烯(PP)基体中均匀分散,当阻燃剂的添加量达到 20.0% 时,PP/LDH-LS 复合材料的极限氧指数(LOI)值达到了 29.4%,并且达到了垂直燃烧试验 V-0 等级。Wang 等<sup>[8]</sup>采用离子交换法制备了硼砂改性的 ZnAl 水滑石,并采用一种新的溶剂混合方法制备了阻燃剂质量分数为 30.0% 的 PP/LDH 复合材料,该复合材料的 LOI 值可以达到 29.9%,且热释放速率峰值(PHRR)与 PP 相比下降了 63.7%。由此可见,表面改性和插层改性均可在一定程度上改善水滑石的阻燃性能。

虽然水滑石的改性已有较多报道,但大多局限于水滑石的单一改性,不能兼具分散性和阻燃效率。采用相应的试剂对水滑石进行复合改性,有望同时解决分散性差和阻燃效率低的问题。如 Jin 等<sup>[9]</sup>通过煅烧重建法制备了一种硬脂酸钠/钼酸铵复合改性的 MgAl 水滑石(LDH-SMo),并将其用作 PP 的阻燃剂。改性后的 LDH-SMo 水接触角增大至 63°,与 PP 基体的相容性良好;当向 PP 中添加 20.0% 的阻燃剂时,PP/LDH-SMo 复合材料的 LOI 值达

到了 28.2%,表现出良好的阻燃性。

本文采用相应的试剂对 LDH 进行复合改性,期望同时改善分散性差和阻燃效率低的问题。以 MgAl-NO<sub>3</sub> 型水滑石为前驱体,同时将十二烷基硫酸钠(SDS)和硼酸作为改性剂,通过离子交换法制备复合改性的水滑石,并将改性产物与 PP 熔融共混后探究其对 PP/LDH 复合材料阻燃性能的影响。本文制得的阻燃剂可为高阻燃性能聚丙烯的应用提供一定的理论参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂与仪器

#### 1.1.1 主要试剂

镁铝水滑石(MgAl-LDH),麦克林试剂有限公司,工业级;十二烷基硫酸钠(SDS)、硼酸(H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)、氢氧化钠(NaOH)、硝酸(HNO<sub>3</sub>),阿拉丁试剂有限公司,均为分析纯;聚丙烯(PP,T30 S),广东埃克森美孚公司;去离子水,实验室自制。

#### 1.1.2 主要仪器

EL204 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DF-101 S 集热式磁力搅拌器,上海精密仪器仪表有限公司;SHZ-DIII 耐腐式真空抽滤机,拓赫机电科技(上海)有限公司;DHG-9030A 鼓风干燥箱,上海鳌珍仪器制造有限公司;RM-200C 混炼式转矩流变仪,哈尔滨哈普电器技术有限责任公司;QC-677 T 桌上型手动热压成型机,上海谱展仪器科技有限公司;NICOLET is50 傅立叶红外光谱仪,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;Rigaku RU-200BVH 型 X 射线衍射分析仪,日本 Rigaku 公司;Hitachi S-4800 型场发射扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司;EM-30AX 型台式扫描电子显微镜,北京天耀科技有限公司;NETZSCH TG 209 F1 型热重分析仪,德国 NETZSCH 公司;FTT0077 型极限氧指数仪,英国 FTT 公司;FTT0007 型锥形量热仪,英国 FTT 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 改性 BS@LDH 的制备

以 MgAl-LDH 为前驱体,通过离子交换法分别制备了 SDS、硼酸、SDS/硼酸改性的 LDH。按照摩尔比 1:1:1 的比例分别称取一定量的 SDS、硼酸和水滑石;随后先将称量好的水滑石倒入装有 200 mL

去离子水的三颈烧瓶中,剧烈搅拌制成悬浮液,再依次将称量好的 SDS 和硼酸分别溶于去离子水后倒入上述三颈烧瓶中。用稀硝酸调节溶液的 pH 值至 4,在 70 ℃的水浴中搅拌 3 h,待反应完成后冷却,静置 24 h。倒掉上清液,底部液体用滤纸抽滤后再用去离子水和无水乙醇洗涤至滤液呈中性。滤饼在 60 ℃下过夜烘干,研磨,过 200 目筛后待用。最终制备的改性 LDH 分别命名为 S@LDH、B@LDH、BS@LDH,与所使用的改性剂对应。

### 1.2.2 PP/LDH 复合材料的制备

各称取 5 g LDH、S@LDH、B@LDH 和 BS@LDH,分别与 20 g PP 混合均匀后放入预热好的 (220 ℃)转矩流变仪中,在 60 r/min 的转速下混炼 20 min。混炼完成后在 190 ℃、10 MPa 的条件下将试样压制成块,冷却后裁剪待用。

## 1.3 测试与表征

### 1.3.1 结构表征

采用傅立叶红外光谱仪对改性前后 LDH 进行测试,用 KBr 压片制样,设定测试波数范围为 4000~500  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为 32 次;采用 X 射线衍射分析仪对改性前后 LDH 的晶型进行分析,扫描范围为 5°~80°,扫描速度为 2(°)/min。

### 1.3.2 形貌表征

采用场发射扫描电子显微镜观察改性前后 LDH 的形貌变化,采用台式扫描电子显微镜观察改性前后 LDH 在 PP 中的分散情况。

### 1.3.3 热性能测试

采用热重分析仪对改性前后 LDH 的热稳定性进行分析;样品质量 6 mg,空气氛围,气体流速为 30 mL/min,升温速率 5 ℃/min,温度范围为 30~800 ℃。

### 1.3.4 阻燃性能测试

采用极限氧指数仪根据《塑料 用氧指数法测定燃烧行为》(GB/T 2406.2—2009)表征测定 PP/LDH 复合材料的 LOI 值,样品尺寸为 120 mm×10 mm×4 mm,各样品测 15 次取平均值;采用锥形量热仪根据《燃烧热释放速率测试》(ISO 5660—1)标准测试 PP/LDH 复合材料的燃烧行为,样品尺寸为 100 mm×100 mm×4 mm,热辐射强度为 50  $\text{kW/m}^2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 改性前后 LDH 的结构形貌分析

图 1(a)为改性前后 LDH 样品的红外光谱图,

图中各样品均表现为典型的水滑石结构,其中位于 3467  $\text{cm}^{-1}$  和 1636  $\text{cm}^{-1}$  的特征峰为羟基的弯曲振动吸收峰。对于 LDH 样品而言,1380  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为  $\text{NO}_3^-$  的伸缩振动吸收峰,而改性后的样品中该峰消失,这说明 LDH 层间的  $\text{NO}_3^-$  已完全被其余阴离子基团取代<sup>[10]</sup>。S@LDH 和 BS@LDH 中 2920  $\text{cm}^{-1}$  和 2851  $\text{cm}^{-1}$  分别为甲基和亚甲基的伸缩振动吸收峰,1226  $\text{cm}^{-1}$  和 1064  $\text{cm}^{-1}$  则是  $\text{SO}_4^{2-}$  的特征吸收峰<sup>[11]</sup>。B@LDH 和 BS@LDH 中 1484  $\text{cm}^{-1}$  和 1366  $\text{cm}^{-1}$  处出现了属于  $\text{BO}_3^{3-}$  的对称振动吸收峰<sup>[12]</sup>。以上结果证明了 BS@LDH 样品中十二烷基硫酸根基团和硼酸根基团的存在,且其有可能与 LDH 阴离子  $\text{NO}_3^-$  发生了交换,形成了新的阴离子插层 LDH。对改性前后的 LDH 样品进行了 XRD 分析,结果见图 1(b)。如图 1(b)所示,在  $2\theta$  为 11.049°、22.810°和 34.632°的位置出现了反映 LDH 层状结构的三个特征峰,分别对应于 LDH 的(003)、(006)和(009)晶面<sup>[12]</sup>。根据布拉格方程  $2d\sin\theta=n\lambda$ :已知  $2\theta$  为 11.049°,反射级数  $n$  为 1,波长  $\lambda$  为  $0.15\times10^{-2}$  nm,则(003)衍射峰对应的晶面层间距  $d_{003}$  的值为 0.79 nm,表明该 LDH 是典型的  $\text{NO}_3^-$  型 LDH<sup>[13]</sup>。改性后各 LDH 的衍射峰强度减弱,(003)衍射峰表现出不同程度的左移,其中 B@LDH 的(003)衍射峰出现在  $2\theta$  为 8.355°处,对应的层间距为 1.09 nm,表明  $\text{BO}_3^{3-}$  取代了原来的  $\text{NO}_3^-$ ,形成新的插层 LDH<sup>[14]</sup>;S@LDH 的(003)衍射峰出现在  $2\theta$  为 7.420°处,对应的层间距为 1.19 nm,层间距进一步扩大,这是因为 SDS 带有长链,取代  $\text{NO}_3^-$  后更大幅度地增加了 LDH 的层间距<sup>[15]</sup>;BS@LDH 的(003)衍射峰出现在  $2\theta$  为 5.591°处,对应的层间距为 1.58 nm,这是 SDS 和硼酸复合改性的结果,大大增加了 LDH 的层间距。结合红外和 XRD 数据,证明通过离子交换法可以成功制备出 SDS 和硼酸复合改性的 LDH,并且较好地保持了层状结构。

图 2 为改性前后 LDH 样品的 SEM 图像。从图 2(a)可见,改性前的 LDH 具有明显的片层状结构,片的尺寸约为 200 nm,片层结构完整,但是团聚较严重。单一改性后的 LDH 样品的 SEM 照片如图 2(b)和图 2(c)所示,改性后的 LDH 样品仍然保持着片层状结构,然而由于层间距的增大,LDH 颗粒边缘崩塌,边界变得模糊且层间距越大边界越模糊。SDS/硼酸复合改性后的 LDH 样品的 SEM 照片见图 2(d),由于复合改性后 LDH 的层间距过大,



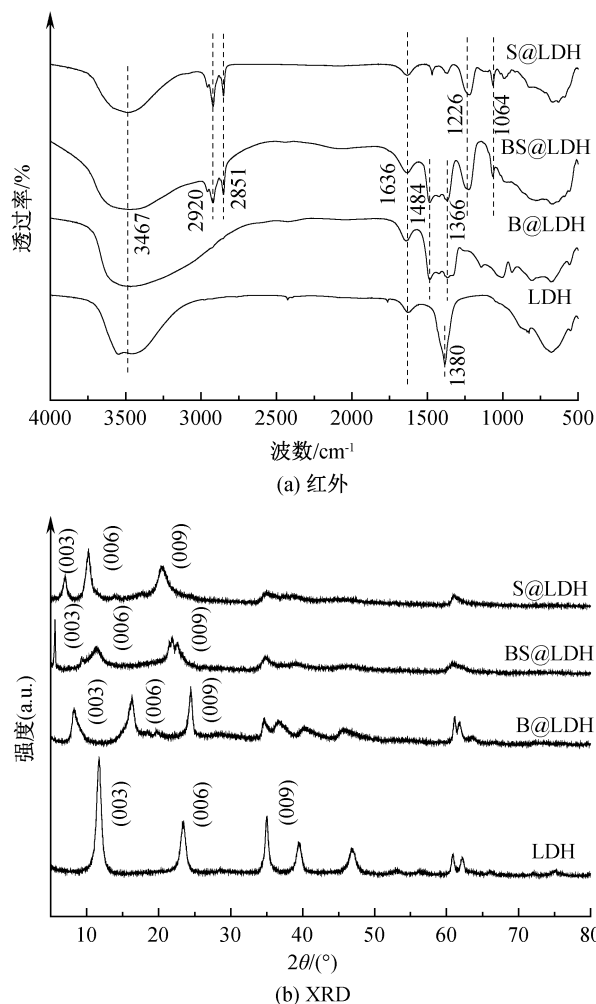


图 1 改性前后 LDH 的红外和 XRD 谱图

其原有的片层结构被破坏,其表面丰富的薄片结构相互交差,形成“绣球”结构,表明复合改性的水滑石表面形态发生了变化。

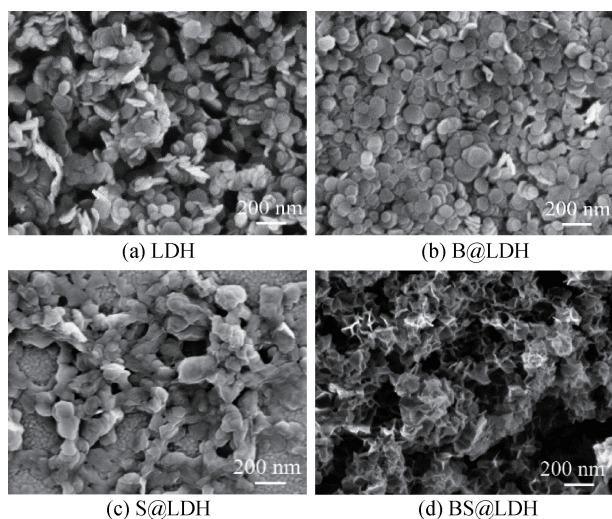
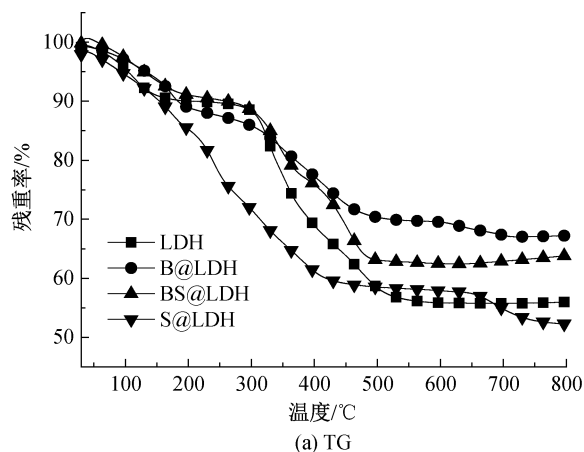


图 2 改性前后 LDH 的 SEM 图像

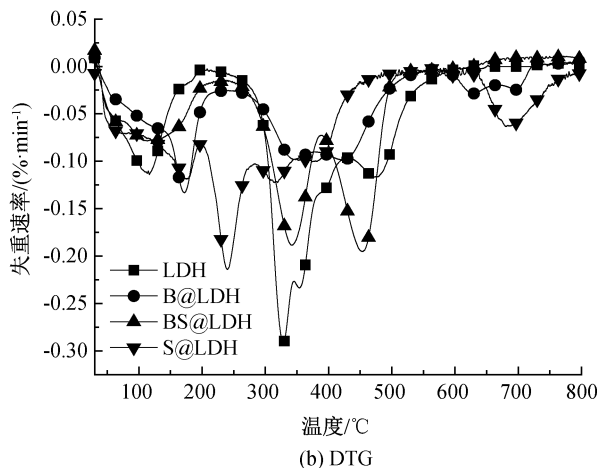
## 2.2 改性前后 LDH 的热重分析

改性前后 LDH 的 TGA 测试结果如图 3 所示。

从图 3(a)和图 3(b)中可以看出,LDH 的初始分解温度为 80 °C,到 180 °C 时完成第一阶段的分解,这一阶段的失重是 LDH 内自由水分子和层间水分子蒸发的结果;第二阶段的分解发生在 250~440 °C,这个阶段是由—OH 的断裂分解造成的<sup>[16]</sup>;第三阶段的分解发生在 410~550 °C,这一阶段是层间  $\text{NOV}^{3-}$  分解引起的<sup>[17]</sup>。当温度达到 800 °C 时,LDH 的最终残重率为 55.97%。改性后 LDH 的热降解行为发生了明显地变化,S@LDH 最大分解温度提前至 240 °C,最终残重率下降至 52.24%,这是因为 SDS 的存在,导致 LDH 的失重速率上升,热稳定性下降;而 B@LDH 质量损失 5% 时的温度 ( $T_{5\%}$ ) 虽然由于  $\text{BOV}^{3-}$  的分解而降低,但其最终残重率提升至 67.24%,说明  $\text{BOV}^{3-}$  的存在可大幅提高 LDH 的热稳定性;SDS 和硼酸复合改性的 BS@LDH 的热重曲线与 LDH 相似,最终残重率为 63.83%,表明复合改性后的 LDH 热稳定性优于 LDH 和 S@LDH,劣于 B@LDH,进一步说明 SDS 的存在降低了 LDH 的热稳定性。



(a) TG



(b) DTG

图 3 改性前后 LDH 的 TG 和 DTG 曲线图

## 2.3 PP/LDH 复合材料的形貌分析

PP/LDH 复合材料的截面 SEM 图像如图 4 所

示。从4图可知,在未改性的前提下,大部分 LDH 颗粒在 PP 基体中分布不均匀,团聚严重且有与 PP 基体相分离;而改性后的 LDH 可以均匀地分散到 PP 基体中,且复合改性的 LDH 的分散性优于单一改性的 LDH 的分散性,这说明大的层间距可以提高 LDH 与 PP 基体的相容性和界面效应,这也与上文 XRD 的分析结果相对应。

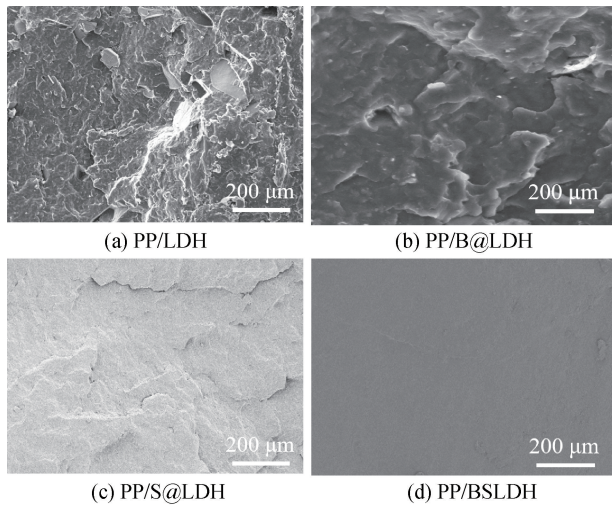
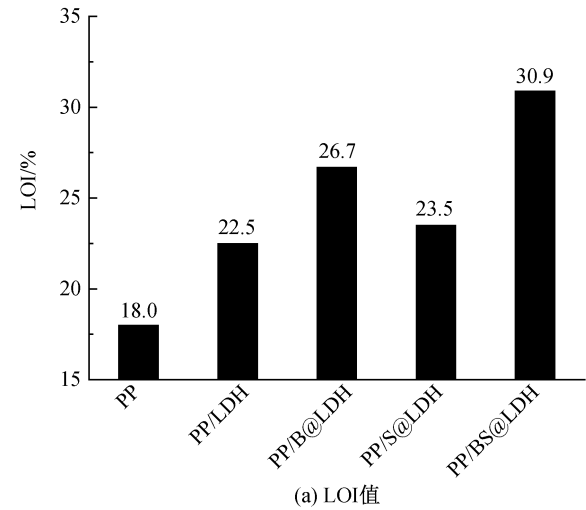


图4 PP/LDH 复合材料的截面 SEM 图像

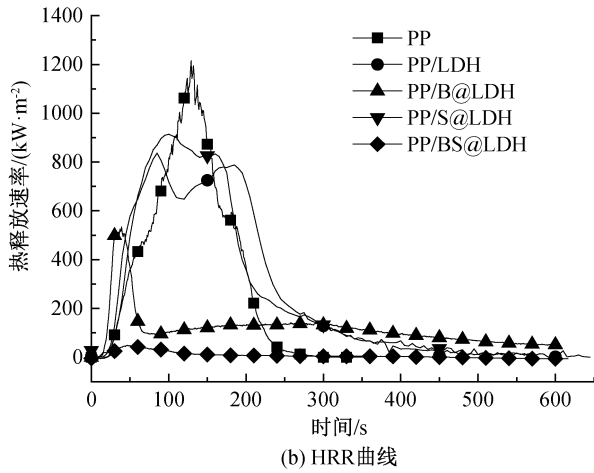
2.4 PP/LDH 复合材料的阻燃性能分析

LOI 值是指在规定的条件下,材料在氧氮混合气流进行有焰燃烧所需的最低氧浓度,以氧所占的体积百分数的数值来表示,是表征材料燃烧行为的一个重要指数。通常,氧指数越高则材料越难燃烧<sup>[18-20]</sup>。图5(a)为PP及其复合材料的LOI值,可以看到在阻燃剂质量分数为20.0%的情况下,PP/LDH复合材料的LOI值仅为22.5%;经单一改性后,PP/B@LDH和PP/S@LDH复合材料的LOI值分别提升至26.7%和23.5%,而复合改性之后PP/BS@LDH复合的LOI值则提升至30.9%。为进一步探究PP/LDH复合材料的阻燃性能,对纯PP及PP复合材料进行了锥形量热仪测试(CCT),其结果见图5(b)。从图5(b)可知,PP复合材料的PHRR相较于纯PP有明显下降,表明LDH阻燃剂的添加可以有效提升PP复合材料的阻燃性能。其中PP/LDH和PP/S@LDH的PHRR分别为814.69 kW/m<sup>2</sup>和952.74 kW/m<sup>2</sup>,与纯PP相比分别下降了32.99%和21.64%,降幅较小;而PP/B@LDH和PP/BS@LDH的PHRR降幅明显,又以PP/BS@LDH的降幅为最,其PHRR由纯PP的1215.84 kW/m<sup>2</sup>下降至50.70 kW/m<sup>2</sup>,降幅高达95.83%。结合LOI值和CCT数据可知,BS@

LDH 阻燃剂可以大幅提高 PP 的阻燃性能,这主要归因于十二烷基硫酸根、硼酸根和原有镁铝水滑石之间的协效作用。一方面十二烷基硫酸根提高了 LDH 与 PP 基体的相容性,使得 LDH 可以发挥出原有的阻燃作用;另一方面 LDH 和 BOV3<sup>3-</sup>在阻燃过程中的协同效应可以催化 PP 参与碳化反应<sup>[21]</sup>,形成致密稳定的炭层,从而起到隔绝热量的效果。



(a) LOI值



(b) HRR曲线

图5 PP及其复合材料的LOI值和HRR曲线

火灾中,烟雾和各类有毒气体是对人类生命造成威胁的最大隐患,为了分析PP/LDH复合材料的抑烟性能,对其燃烧过程中释放的烟雾量进行了测试,具体结果如图6所示。从图6可以看出,纯PP的烟释放总量(TSP)最高,在点火400s后达到了12.66 m<sup>2</sup>,添加了阻燃剂后,PP/LDH复合材料的TSP均有不同程度的下降。其中,PP/LDH和PP/S@LDH复合材料的TSP曲线基本重叠,最终的TSP均为10.85 m<sup>2</sup>,这表明十二烷基硫酸根基团的引入对PP抑烟性能的改善没有影响。PP/B@LDH和PP/BS@LDH复合材料的TSP降幅明显,

最终的 TSP 分别为  $6.29 \text{ m}^2$  和  $6.15 \text{ m}^2$ , 比纯 PP 的 THR 分别下降了 50.32% 和 51.42%, 这是因为引入硼酸根基团后, 受热分解的硼酸根可以捕获火焰中的自由基, 降低烟雾浓度; 此外, 硼酸根和 LDH 在燃烧过程中的协同作用会促使致密多孔炭层的形成, 隔绝火焰与基体材料之间热量和物质传导的同时吸收释放出的气体, 达到阻燃抑烟的效果。

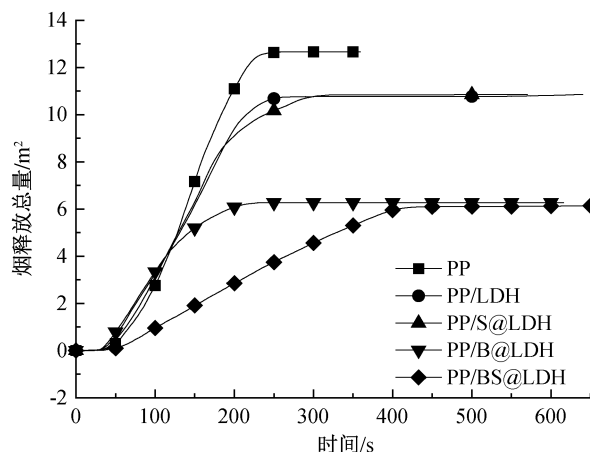


图 6 PP 及其复合材料的 TSP 曲线

### 3 结 论

本文提出一种利用离子交换法制备 SDS/硼酸复合改性水滑石的实验方案, 通过在水滑石层间成功插入十二烷基硫酸根基团和硼酸根基团, 改善了水滑石阻燃效率低、与聚合物基体相容性差的问题, 改性后的水滑石还可以提高聚合物基体的阻燃效率, 所得主要结论如下:

a) 复合改性后的水滑石中, 十二烷基硫酸根和硼酸根取代了原来的硝酸根, 成为新的插层阴子, 水滑石的层间距由  $0.79 \text{ nm}$  扩大至  $1.58 \text{ nm}$ ; 复合改性的 LDH 有着较好的热稳定性, 当分解温度达到  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时 BS@LDH 的残重量相比 LDH 增加了 7.86%。

b) SDS 和硼酸的引入只改变了 BS@LDH 的形貌, 并没有改变其层状结构; 复合改性后的水滑石在 PP 基体中分散均匀, 与基体相容性较好。

c) PP/BS@LDH 复合材料有着较好的阻燃性能, 当 BS@LDH 质量分数为 20.0% 时, PP/BS@LDH 复合材料的 LOI 值高达 30.9%, 达到了难燃材料的标准; 锥形量热仪测试显示, PP/BS@LDH 复合材料的 PHRR 相比纯 PP 下降了 95.83%, TSP 则下降了 51.42%, 表现出良好的阻燃抑烟性能。

### 参考文献:

- [1] Jiang Y, Hao Z F, Luo H S, et al. Synergistic effects of boron-doped silicone resin and a layered double hydroxide modified with sodium dodecyl benzenesulfonate for enhancing the flame retardancy of polycarbonate[J]. RSC Advances, 2018, 8(20): 11078-11086.
- [2] 吴忱, 秦路彦, 王艳华, 等. 水滑石的功能化改性及其应用研究[J]. 功能材料, 2021, 52(8): 8060-8067.
- [3] 陈梦竹, 余林文, 袁慧慧, 等. 木质素磺酸钠改性 Ca-LDH 对水泥基材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2152-2158.
- [4] Hajibeygi M, Shafiei-Navid S, Shabanian M. Influence of imide functionalized organo-modified Mg-Al layered double hydroxide on the thermal and mechanical properties of new aliphatic-aromatic poly (amide-imide) [J]. Applied Organometallic Chemistry, 2019, 33(2): e4706.
- [5] Kalali E N, Wang X, Wang D Y. Functionalized layered double hydroxide-based epoxy nanocomposites with improved flame retardancy and mechanical properties [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(13): 6819-6826.
- [6] 赵春霞, 彭钢, 刘白玲. SDS-LDH 与 CTAB-MMT 协同 APP 阻燃 P(BA-VAc) 的对比分析[J]. 高分子学报, 2013(9): 1197-1203.
- [7] Wu K, Xu S, Tian X Y, et al. Renewable lignin-based surfactant modified layered double hydroxide and its application in polypropylene as flame retardant and smoke suppression [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 178: 580-590.
- [8] Wang Q, Undrell J P, Gao Y S, et al. Synthesis of flame-retardant polypropylene/LDH-borate nanocomposites [J]. Macromolecules, 2013, 46(15): 6145-6150.
- [9] Jin L, Zeng H Y, Du J Z, et al. Intercalation of organic and inorganic anions into layered double hydroxides for polymer flame retardancy [J]. Applied Clay Science, 2020, 187: 105481.
- [10] 孟伟青, 李峰, Evans D G, 等. 硝酸根型镁铁水滑石的合成及其离子交换性能研究[J]. 现代化工, 2004, 24(3): 35-38.
- [11] 任德财, 于雪, 魏丽娜, 等. 有机复合改性水滑石的制备与表征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 327-331.
- [12] 王娜, 仲剑初, 王洪志. 硼酸根插层的 Ca-Al-LDHs 的制备、表征和应用[J]. 无机盐工业, 2016, 48(1): 25-27.
- [13] 李素峰, 李殿卿, 史翎, 等. 硼酸根插层水滑石层间组成及取向结构的控制[J]. 化学学报, 2004, 62(13): 1205-1210.

[14] 刘艳侠, 梁旭, 徐贤伦, 等. 硝酸根型水滑石的制备及其在合成异佛尔酮中的应用[J]. 现代化工, 2015, 35(5): 121-124.

[15] Shi L, Li D Q, Wang J R, et al. Synthesis, flame-retardant and smoke-suppressant properties of a borate-intercalated layered double hydroxide[J]. Clays and Clay Minerals, 2005, 53(3): 294-300.

[16] 施燕琴, 钟明强, 武艳辉. 插层改性水滑石及其对聚丙烯力学和阻燃性的影响[J]. 塑料助剂, 2009(2): 37-42.

[17] Xu S, Li S Y, Zhang M, et al. Fabrication of green alginate-based and layered double hydroxides flame retardant for enhancing the fire retardancy properties of polypropylene[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 234: 115891.

[18] Mohammadi A, Wang D Y, Hosseini A S, et al. Effect of intercalation of layered double hydroxides with sulfonate-containing calix [4] arenes on the flame retardancy of castor oil-based flexible polyurethane foams[J]. Polymer Testing, 2019, 79: 106055.

[19] 朱善文, 陈帅杰, 王恩亮, 等. 聚磷酸铵/水性环氧形状记忆阻燃复合材料制备及其性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 786-792.

[20] 蔡菲, 杲爽, 孙锦涛, 等. 沉淀法改性聚磷酸铵及其在水性环氧树脂中的阻燃性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(1): 1-8.

[21] 林宁, 赵谨, 秦立娟. 磷酸根插层水滑石阻燃剂的研制[J]. 无机盐工业, 2005, 37(9): 35-37.

(责任编辑:刘国金)