

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.03.004

二乙基次膦酸铝和 OMMT 在 PLA 中协同阻燃作用研究^{*}

陈雅君,毛小军,钱立军,辛菲,许国志

(北京工商大学材料与机械工程学院,北京 100048)

摘要:采用熔融共混工艺制备了一系列聚乳酸(PLA)/二乙基次膦酸铝(AHP)和 PLA/AHP/有机蒙脱土(OMMT)复合材料,并通过热失重分析、极限氧指数、垂直燃烧和锥形量热仪测试研究了 AHP 和 OMMT 对 PLA 复合材料热稳定性和阻燃性能的影响,探讨了 AHP 和 OMMT 协同阻燃的作用机理。结果表明,相比于 PLA/AHP 复合材料,PLA/AHP/OMMT 复合材料表现出更优异的热稳定性和阻燃性能,材料的最大热分解温度提高了约 3℃,而且能够通过垂直燃烧 UL 94 V-0 级别测试,同时材料的热释放速率峰值、平均热释放速率、平均质量损失速率等都出现显著降低,这证实 AHP 和 OMMT 在 PLA 基体中具有明显的协同阻燃效果。扫描电子显微镜观察材料燃烧后残炭的微观形貌发现,与 PLA/AHP 相比,PLA/AHP/OMMT 的炭层更加连续、致密,红外结果显示该炭层中有“类陶瓷”结构生成,起到了促进成炭及稳定炭层结构的作用,这是 AHP 和 OMMT 发挥良好协同阻燃效果的原因。

关键词:聚乳酸;二乙基次膦酸铝;有机蒙脱土;热稳定性;阻燃性能

中图分类号:TQ323.4+1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2015)03-0019-06

Synergistic Effect Between Aluminum Hypophosphite and OMMT in Flame-Retarded PLA

Chen Yajun, Mao Xiaojun, Qian Lijun, Xin Fei, Xu Guozhi

(School of Materials Science & Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract : A series of PLA / aluminum diethylphosphite (AHP) composites and PLA / AHP / organic montmorillonite (OMMT) nanocomposites were prepared by melt blending method. Synergistic effects between AHP and OMMT on thermal behavior and combustion properties in PLA matrix were investigated by using thermogravimetric analysis, limiting oxygen index, vertical burning test(UL94), and cone calorimeter test. Furthermore, the synergistic flame retardant mechanism was explored. The experimental results show that PLA / AHP / OMMT nanocomposite performed more excellent thermal stability and flame retardancy, compared with those of PLA / AHP. TGA results show that the T_{max} of PLA / AHP / OMMT composite was increased by 3℃. The results of cone calorimeter test reveal that the heat release rate, average heat release rate, and average mass lost rate decrease markedly. In the vertical test, PLA / AHP / OMMT composite can pass UL94 V-0 level. These results indicate that a distinct synergistic effect between AHP and OMMT in PLA matrix during combustion. SEM micrograph shows that the residual char after cone calorimeter test of PLA / AHP / OMMT composite displays a continuous and compact morphology with a “ceramic-like” structure. Because of this, PLA / AHP / OMMT nanocomposites exhibits a better flame retardant performance than PLA / AHP composites.

Keywords : PLA ; aluminum diethylphosphite ; organic montmorillonite ; thermal stability ; flame retardancy

为缓解能源和环境问题,发展可生物降解的绿色高分子^[1-3]代替传统石油基材料已成为一大趋势。聚乳酸(PLA)不仅广泛来源于玉米等可再生农作物,而且还具有良好的力学性能和加工性能^[4],因而具有较好的应用前景^[5-6]。然而由于自身的聚酯结构^[7-8],火灾隐患较大,限制了其在电子电器、汽车工业等领域的应用,因此阻燃改性 PLA 显得尤为重要^[9-10]。

作为新兴的环境友好型阻燃剂,磷系阻燃剂^[11-13]因具有资源丰富、阻燃效率高、无毒低烟等优

点,逐渐应用于阻燃 PLA 的领域。烷基次膦酸盐是德国科莱恩公司商业化的新型磷系阻燃剂,该阻燃剂由于综合性能(如阻燃性能、热稳定性、生烟性能、物理力学性能等)良好,已经在诸如聚酰胺^[14]、聚苯乙烯^[15]、聚酯^[16-18]、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯

^{*} 国家自然科学基金项目(51403007)

联系人:陈雅君,博士,讲师,主要研究方向为环境友好高分子阻燃材料;钱立军,博士,副教授,主要研究方向为环境友好阻燃助剂及其高分子材料的制备及产业化

收稿日期:2014-12-22

[19-20] 等高分子材料中应用,取得了良好的阻燃效果。同时,大量事实证明^[21-25],有机蒙脱土(OMMT)在较少添加量时就能显著提高材料的阻燃性能,并且还能够保持材料本身的力学性能,因而成为无机填料中作为复配协效阻燃剂的首选。

笔者采用熔融共混工艺制备了一系列 PLA/二乙基次膦酸铝(AHP)和 PLA/AHP/OMMT 复合材料,并通过热重(TG)分析、极限氧指数(LOI)、垂直燃烧和锥形量热仪测试对材料热稳定性和阻燃性能进行了研究,进一步探讨了 AHP 和 OMMT 的协同阻燃作用机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA: 2003D, 美国 Nature Works 公司;

AHP: OP 935, 德国科莱恩公司;

OMMT: 经过双十八烷基有机化改性处理,浙江丰虹粘土化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电热恒温干燥箱: DHC-9245 型, 上海一恒科技有限公司;

转矩流变仪: XSS-300 型, 上海科创橡塑机械设备有限公司;

压片机: LP-S-50 型, 瑞典 Labtech Engineering 公司;

TG 分析仪: Instrument TGA Q 5000 型, 美国 TA 公司;

LOI 仪: FTT 0080 型, 英国 FTT 公司;

垂直燃烧试验箱: FTT 0082 型, 英国 FTT 公司;

锥形量热仪: FTT 0007 型, 英国 FTT 公司;

扫描电子显微镜(SEM): Quanta 250 FEG 型, 捷克 FEI 公司。

1.3 试样制备

首先将 PLA 于 80℃ 下恒温干燥 6 h; 然后按表 1 配比将 PLA, AHP, OMMT 经人工预混后加入转矩流变仪中, 熔融共混 6 min, 流变仪的参数设定为 190℃, 60 r/min; 完毕后模压成型, 物料在模具中预热 5 min, 排气 3 次, 在 10 MPa 下压制 8 min, 保压冷却 10 min; 最后用制样机切成标准试样。

表 1 阻燃 PLA 复合材料的配方 %

样品编号	PLA	AHP	OMMT
0 [#]	100	0	0
1 [#]	80	19	1
2 [#]	80	20	0
3 [#]	70	30	0

1.4 性能测试与结构表征

TG 分析: 测试区间为室温至 800℃, 升温速率为 20℃/min, 氮气气氛, 样品质量为 0~5 mg;

LOI 按 GB/T 2406-2009 测试, 样条尺寸为 100 mm×6.5 mm×3.2 mm;

UL 94 垂直燃烧测试按 GB/T 2408-2008 进行, 样条尺寸为 125 mm×13 mm×3.2 mm;

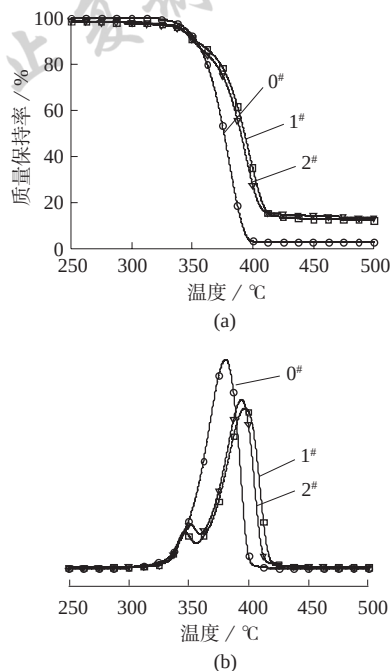
锥形量热测试按 ISO 5600 进行, 样品尺寸为 100 mm×100 mm×3 mm, 实验所采用的辐射热通量为 50 kW/m², 实验结果误差在 ±10% 以内;

SEM 分析: 取一小块锥形量热测试后的残炭, 待表面喷金处理后, 置于电镜样品舱内观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 AHP/OMMT 复配阻燃体系对 PLA 热稳定性的影响

图 1 给出了纯 PLA 及阻燃复合材料的 TG 和微分热失重(DTG)曲线, 详细数据列于表 2。



a—TG 曲线; b—DTG 曲线

图 1 纯 PLA 及其阻燃复合材料的 TG 和 DTG 曲线

表 2 纯 PLA 及其阻燃复合材料的 TG 和 DTG 数据

项目	0 [#]	1 [#]	2 [#]
起始分解温度 ¹⁾ /℃	345.6	342.6	341.5
分解 10% 温度/℃	353.3	353.1	351.3
最大热分解温度/℃	380.0	396.5	393.7
最大热分解速率/(%·min ⁻¹)	57.7	44.3	46.7
500℃ 残炭量/%	2.8	12.2	13.3

注: 1) 试样分解 5% 时的温度。

可以看出, 纯 PLA 在 345.6℃ 开始分解, 最大

热分解温度 ($T_{\max}$) 为 380.0°C , 而最大热分解速率为 $57.7\%/ \text{min}$, 当温度达到 500°C 时, 仅剩余 2.8% 残炭。此外, 纯 PLA 裂解过程只出现一个平台 ($300 \sim 400^{\circ}\text{C}$)。对比可以发现, 添加了 AHP 的复合材料的 TG 曲线由一阶分解变成两阶分解, 在 DTG 曲线上出现了明显的“双峰”现象。这是因为 AHP 在加热过程中会提前发生热解^[16,26]。

PLA/AHP 复合材料 (2[#] 试样) 的起始分解温度有一定程度下降, 这主要归因于 AHP 在较低的温度下发生的分解。值得注意的是, PLA/AHP 复合材料的 $T_{\max}$ 升高了 13.7°C , 说明 AHP 的加入会赋予 PLA 基体良好的热稳定性。这主要是因为 AHP 能在较高温度下生成水和较稳定的焦磷酸盐, 不仅能带走燃烧过程中产生的热量, 而且还能阻隔内层材料与外界接触, 从而使最大热分解速率出现显著降低。同时, 该材料在 500°C 下的残炭量也出现大幅度增加。加入 1% OMMT 后 (1[#] 试样), 相比于 2[#] 试样, 其起始分解温度和 $T_{\max}$ 分别升高了 1°C 和 3°C ; 同时, 材料的最大热分解速率降低了约 5.1% 。这说明 OMMT 的加入进一步提高材料的热稳定性, 并且能有效延缓 PLA/AHP 复合材料的分解过程。

2.2 AHP/OMMT 复配阻燃体系对 PLA 阻燃性能的影响

(1) LOI 和垂直燃烧测试结果。

纯 PLA 及复合材料 LOI 和垂直燃烧测试结果如表 3 所示。可以看出, 纯 PLA 的 LOI 仅为 19.3% , 低于空气中的氧浓度值 (21%), 表明纯 PLA 在空气中极易燃烧。当添加 20% AHP 时, 复合材料的 LOI 显著升高至 29.8% , 这说明含磷阻燃剂 AHP 对 PLA 基体具有良好的阻燃效果。

表 3 纯 PLA 及其阻燃复合材料的垂直燃烧测试结果

项目	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]
LOI/%	19.3	28.3	29.8	29.6
$t_{1\max}^{1)}/\text{s}$	38.2	5.9	4.2	0.9
$t_{2\max}^{2)}/\text{s}$	3)	6.9	5.7	2.3
是否滴落	是	否	是	否
是否引燃脱脂棉	是	否	是	否
UL 94 级别	NR	V-0	V-2	V-0

注: 1) 第一次点燃 10 s 后, 五根试样中最大余焰时间; 2) 第二次点燃 10 s 后, 五根试样中最大余焰时间; 3) 试样完全燃烧至夹具。

由表 3 还可以看出, 纯 PLA 在空气中持续燃烧并伴有严重的滴落现象, 因而不能通过垂直燃烧 UL 94 测试。加入 20% AHP 后, 在测试过程中观察到, 复合材料的点燃时间 ($t_{1\max}$, $t_{2\max}$) 大幅度缩短, 并且滴落现象与纯 PLA 相比有所缓解, 但是仍然存在熔

滴物引燃脱脂棉的现象, 因而只能达到 V-2 级别。当加入 30% AHP 时, 复合材料才能达到 V-0 级。但是, 保持阻燃剂总量为 20% , 用 1% OMMT 替代等量的 AHP 后, 复合材料在垂直燃烧测试中能通过 UL 94 V-0 级, 并且燃烧时没有产生熔滴, 达到了单独添加 30% AHP 的阻燃效果。此时材料的 LOI 与 PLA/AHP 复合材料 (2[#] 试样) 相比虽然略有下降, 但仍能达到 28% 以上。

(2) 锥形量热测试结果。

图 2、图 3 分别给出了纯 PLA 及其阻燃复合材料的热释放速率 (HRR) 和质量损失曲线, 详细数据列于表 4。

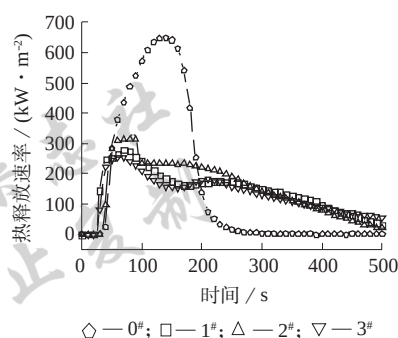


图 2 纯 PLA 及其阻燃复合材料的热释放速率曲线图

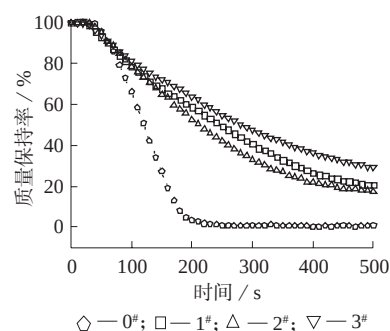


图 3 纯 PLA 及其阻燃复合材料的质量损失曲线图

表 4 纯 PLA 及其阻燃复合材料的锥形量热测试结果

项目	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]
点燃时间/s	35	18	30	20
热释放速率峰值/(kW·m ⁻²)	649	279	342	254
平均热释放速率/(kW·m ⁻²)	174	120	159	113
总热释放量/(MJ·m ⁻²)	81	74	75	70
平均有效燃烧热/(MJ·kg ⁻¹)	22.2	21.0	22.0	20.9
平均质量损失速率/(g·s ⁻¹)	0.069	0.050	0.064	0.048
最终残炭量/%	0.8	18.0	17.6	25.2

由图 2 可看出, 纯 PLA 的 HRR 曲线呈现出典型的尖峰, HRR 峰值 (pk-HRR) 高达 $649 \text{ kW}/\text{m}^2$, 表明材料在很短的时间内就燃烧殆尽, 而且燃烧时火势较大。AHP 的加入显著降低了 PLA 基体的 pk-HRR。当加入 20% 的 AHP 时, 复合材料的 pk-

HRR 与纯 PLA 相比下降了 47.3%,这说明 AHP 在 PLA 基体中具有优异的阻燃效果。相比于 PLA/AHP(2[#] 试样), PLA/AHP/OMMT 复合材料(1[#] 试样)的 pk-HRR 进一步降低了 18.4%,同时材料的平均热释放速率降低了 24.9%,意味着材料的 HRR 变得更加平缓。这说明 OMMT 与 AHP 在燃烧过程中产生了协同效果,显著提高了 PLA 基体的阻燃性能。

由图 3 和表 4 可以得出,纯 PLA 的质量损失曲线在较短的时间内就变成一条水平线,平均质量损失速率高达 0.069 g/s,且最终残炭量几乎为零(0.8%)。加入 AHP 后,随 AHP 添加量的增加, PLA/AHP 复合材料的质量损失曲线变得越来越平缓,并且残炭量逐渐增加。当加入 30% AHP 时,复合材料的残炭剩余 25.2%。相比于 PLA/AHP(2[#] 试样), PLA/AHP/OMMT 复合材料(1[#] 试样)的质量损失曲线变得更为平缓,并且残炭量进一步增多,同时复合材料的平均质量损失速率从 0.064 g/s 降低到 0.050 g/s,下降了 21.9%。这表明 AHP 和 OMMT 复配使用能够使复合材料的燃烧过程变得平缓,从而提高了材料的阻燃性能。

另外,纯 PLA 在燃烧过程中的总热释放量为 81 MJ/m²。AHP 的加入能够降低 PLA 复合材料的总热释放量,当添加 20% AHP 时,材料的总热释放量降低至 75 MJ/m²,与纯 PLA 相比下降了 13.2%。当用 1% 的 OMMT 等量替代 AHP 之后,复合材料的总热释放量进一步降低,约为 74 MJ/m²。从表 4 还可以看出, PLA/AHP/OMMT 复合材料的有效燃烧热与 PLA/AHP(2[#] 试样)相比也有一定程度下降。以上结果都说明 OMMT 与 AHP 复配使用能在 PLA 基体中产生协同阻燃效果。

2.3 AHP 和 OMMT 协同阻燃作用机理的研究

(1) 残炭形貌。

图 4、图 5 分别给出了 PLA 阻燃复合材料残炭的宏观和微观形貌。从图 4 可以看出, AHP 和 OMMT 复配阻燃体系的残炭表面非常平整致密。而只加入 AHP 阻燃剂的 PLA 复合材料的残炭表面比较粗糙,有很多小空洞,空洞周边有一圈突起的边缘,这些小突起是由于燃烧过程产生的气体冲破炭层而形成的。

图 5 更清楚地显示出 PLA 阻燃复合材料的残炭的微观形貌的差异。从图 5 可以看到, PLA/AHP/OMMT 复合材料的炭层完整连续,并且呈现

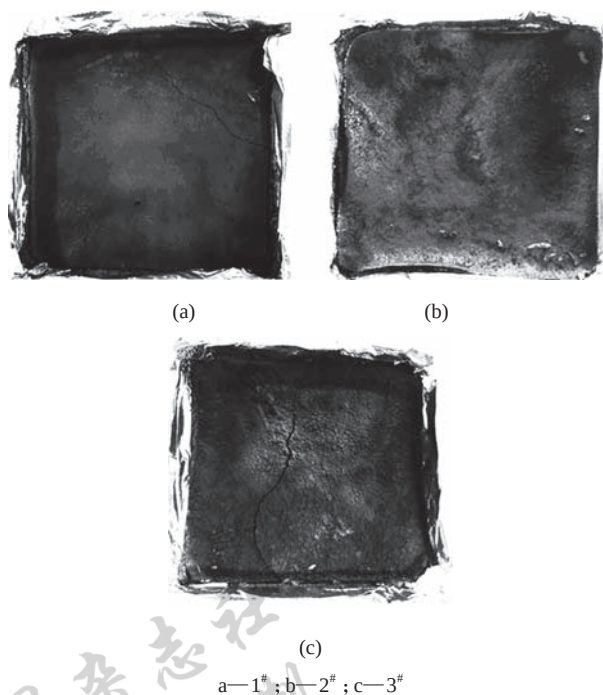


图 4 PLA 阻燃复合材料残炭的数码照片

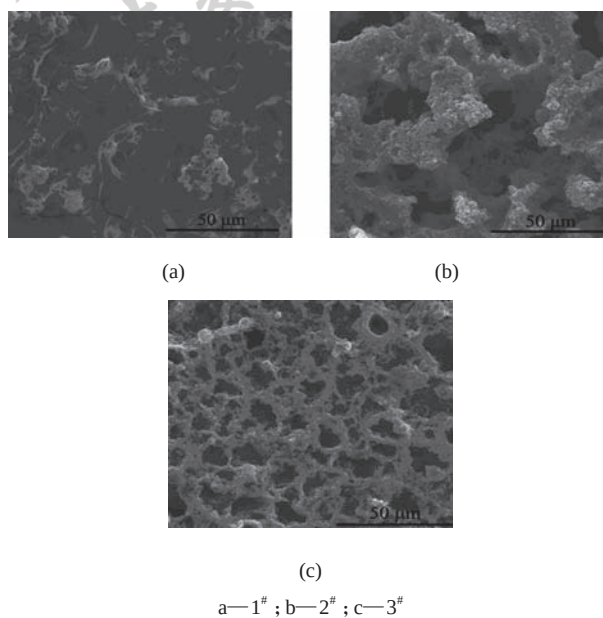


图 5 PLA 阻燃复合材料残炭的 SEM 照片

出致密光滑的“类陶瓷”结构形貌,该炭层几乎没有被气体冲破,意味着它具有很高的强度;而 PLA/AHP 复合材料的炭层有很多大的孔洞,呈现“蜂窝状”结构形貌,这是因为炭层强度较低,被燃烧时释放出的气体冲破所致。以上残炭的形貌特征可以说明 OMMT 的加入能够显著提高 PLA/AHP 复合材料燃烧过程中所形成的残炭的强度。而高强度的炭层能够在燃烧过程中有效隔绝外界的氧气和热量接触下层未燃烧的材料,同时还能阻止已经燃烧的材

料放出的可燃性气体逸出材料表面进一步燃烧,从而起到阻燃的效果。这也是 AHP/OMMT 复配阻燃体系在 PLA 基体中具有良好协同阻燃作用的原因。

(2) 残炭的红外光谱图。

将 PLA 阻燃复合材料锥形量热之后的残炭进行了红外光谱分析,结果如图 6 所示。

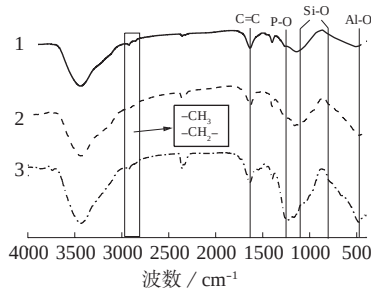


图 6 PLA 阻燃复合材料残炭的红外光谱图

由图 6 可以看出,2800~2900 cm^{-1} 处的吸收峰对应的是甲基和亚甲基的吸收峰,说明 PLA/AHP/OMMT 复合材料燃烧后还有部分树脂基体的残留物在残炭中。对于 1300~1000 cm^{-1} 的宽吸收峰,则主要归因于非晶态结构中的 P—O 以及 P—C 结构^[15,18,27]。1101,803 cm^{-1} 特征峰对应的是 Si—O 基团的伸缩振动。而在指纹区出现的 469 cm^{-1} 证明了 Al—O 结构的存在。这说明在燃烧过程中 AHP 与 OMMT 发生相互作用,生成 SiO_2 , Al_2O_3 等“类陶瓷”结构,而这些结构最终会随着体系温度的升高而最终生成 Si—P—Al—C 化学键,起到促进成炭及稳定炭层结构的作用。这就是 AHP 和 OMMT 能够产生良好协同效应的原因^[28-29]。

3 结论

通过熔融共混法,制备了 PLA/AHP, PLA/AHP/OMMT 复合材料。当添加 20% AHP 时,复合材料的热性能和燃烧性能有了一定的改善。相比于纯 PLA,其 T_{max} 提高了 14 $^{\circ}\text{C}$,最大热分解速率显著下降,同时 LOI 升高至 29.8%,但是由于在垂直燃烧测试时产生熔滴并且引燃脱脂棉,故只能达到 UL 94 V-2 级别。而 PLA/AHP/OMMT 复配阻燃体系不仅能通过垂直燃烧 UL94 V-0 级别的测试,而且锥形量热测试结果显示,其热释放速率峰值、平均热释放速率、平均质量损失速率分别降低了 18.4%, 24.9%, 21.9%,这意味着 AHP 和 OMMT 在 PLA 基体中具有明显的协同阻燃效果。同时,材料的热稳

定性较 PLA/AHP 复合材料也有一定的改善,其 T_{max} 提高了约 3 $^{\circ}\text{C}$,最大热分解温度也进一步降低。对 PLA 阻燃复合材料的残炭进行形貌和成分分析发现:PLA/AHP/OMMT 复配阻燃体系能够形成连续且完整的残炭,并且呈现光滑致密的“类陶瓷”微观结构形貌,该炭层具有高强度和高致密度,能够有效地隔热隔氧,从而显著提高了 PLA 基体的阻燃性能。

参考文献

- [1] Donald G. A literature review of poly(lactic acid)[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2001, 9(2):63-84.
- [2] Madhavan N K, Nair N R, John R P. An overview of the recent developments in polylactide(PLA) research[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(22):8493-8501.
- [3] Lim L T, Auras R, Rubino M. Processing technologies for poly(lactic acid)[J]. Progress in Polymer Science, 2008, 33(8):820-852.
- [4] Rasal R M, Janorkar A V, Hirt D E. Poly(lactic acid) modifications[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(3):338-356.
- [5] Auras R, Harte B, Selke S. An overview of polylactides as packaging materials[J]. Macromol Biosci, 2004, 4(9):835-864.
- [6] Siracusa V, Rocculi P, Romani S, et al. Biodegradable polymers for food packaging:A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(12):634-643.
- [7] Conn R E, Kolstad J J, Borzelleca J F, et al. Safety assessment of polylactide(PLA) for use as a food-contact polymer[J]. Food and Chemical Toxicology, 1995, 33(4):273-283.
- [8] Gupta B, Revagade N, Anjum N, et al. Preparation of poly(lactic acid) fiber by dry-jet-wet spinning.II. Effect of process parameters on fiber properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 101(6):3774-3780.
- [9] Bourbigot S, Fontaine G. Flame retardancy of polylactide:An overview[J]. Polymer Chemistry, 2010, 1(9):1413.
- [10] Bourbigot S, Le B M, Duquesne S, et al. Recent advances for intumescent polymers[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2004, 289(6):499-511.
- [11] Wei Lianlian, Wang Deyi, Chen Hongbing, et al. Effect of a phosphorus-containing flame retardant on the thermal properties and ease of ignition of poly(lactic acid)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(9):1557-1561.
- [12] Lai Xujun, Zeng Xingrong, Li Hongqiang, et al. Synergistic effect of phosphorus-containing montmorillonite with intumescent flame retardant in polypropylene[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2012, 51(6):1186-1198.
- [13] Li Qifei, Li Bin, Zhang Shengqiang, et al. 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):1 782–1 789.
- [14] Zhao Bin, Hu Zhi, Chen Li, et al. A phosphorus-containing inorganic compound as an effective flame retardant for glass-fiber-reinforced polyamide 6[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 119(4):2 379–2 385.
- [15] Yan Yuanwei, Huang Jianqian, Guan Yahui, et al. Flame retardance and thermal degradation mechanism of polystyrene modified with aluminum hypophosphite[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, 99:35–42.
- [16] Yang Wei, Song Lei, Hu Yuan, et al. Enhancement of fire retardancy performance of glass-fibre reinforced poly(ethylene terephthalate) composites with the incorporation of aluminum hypophosphite and melamine cyanurate[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2011, 42(5):1 057–1 065.
- [17] Yang Wei, Yuen R K K, Hu Yuan, et al. Development and characterization of fire retarded glass-fiber reinforced poly(1, 4-butylene terephthalate) composites based on a novel flame retardant system[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(21):11 975–11 981.
- [18] Tang Gang, Wang Xin, Xing Wei, et al. Thermal degradation and flame retardance of biobased polylactide composites based on aluminum hypophosphite[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(37):12 009–12 016.
- [19] Jian Rongkun, Chen Li, Zhao Bin, et al. Acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer with metal hypophosphites: flame retardance and mechanism research[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(6):2 299–2 307.
- [20] Wu Ningjing, Li Xiangting. Flame retardancy and synergistic flame retardant mechanisms of acrylonitrile-butadiene-styrene composites based on aluminum hypophosphite[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, 105:265–276.
- [21] Li Shumao, Yuan Hua, Yu Tao, et al. Flame-retardancy and anti-dripping effects of intumescent flame retardant incorporating montmorillonite on poly(lactic acid)[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2009, 20(12):1 114–1 120.
- [22] Fukushima K, Murariu M, Camino G, et al. Effect of expanded graphite / layered-silicate clay on thermal, mechanical and fire retardant properties of poly(lactic acid)[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(6):1 063–1 076.
- [23] Liu Yun, Wang Junsheng, Deng Chengliang, et al. The synergistic flame-retardant effect of O-MMT on the intumescent flame-retardant PP / CA / APP systems[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2010, 21(11):789–796.
- [24] Tang Yong, Hu Yuan, Song Lei, et al. Preparation and combustion properties of flame retarded polypropylene-polyamide-6 alloys[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(2):234–241.
- [25] Lai Xuejun, Zeng Xingrong, Li Hongqiang, et al. Synergistic effect of phosphorus-containing montmorillonite with intumescent flame retardant in polypropylene[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2012, 51(6):1 186–1 198.
- [26] Zhao Bin, Chen Li, Long Jiawei, et al. Aluminum hypophosphite versus alkyl-substituted phosphinate in polyamide 6: Flame retardance, thermal degradation, and pyrolysis behavior[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(8):2 875–2 886.
- [27] Yuan Bihe, Bao Chenlu, Guo Yuqiang, et al. Preparation and characterization of flame-retardant aluminum hypophosphite / poly(vinyl alcohol) composite[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(43):14 065–14 075.
- [28] Pan Ying, Hong Ningning, Zhan Jing, et al. Effect of graphene on the fire and mechanical performances of glass fiber-reinforced polyamide 6 composites containing aluminum hypophosphite[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2014, 53(14):1 467–1 475.
- [29] Yang Wei, Hu Yuan, Tai Qi Long, et al. Fire and mechanical performance of nanoclay reinforced glass-fiber / PBT composites containing aluminum hypophosphite particles[J]. *Composites:Part A*, 2011, 42(7):794–800.

亨斯迈宣布新加坡聚醚胺工厂将实行扩产

亨斯迈公司功能产品事业部近日宣布一项扩产计划,将新加坡聚醚胺装置产能增加 4 万 t/a。

亨斯迈将投资 7 000 万美元将位于裕廊岛的聚醚胺工厂产能提升一倍以上,以巩固聚醚胺技术的领先优势,满足全球不断增长的市场需求。作为全球领先的聚醚胺生产商,亨斯迈的 JEFFAMINE® 聚醚胺产品在过去五年的收益增长迅猛。

聚醚胺通常应用在环氧树脂涂料或添加剂中,可提高燃料、混凝土和农药的性能。随着聚醚胺材料不断应用于新的领域,亨斯迈预计该部门将会有显著增长。

亨斯迈功能产品部总裁 Stu Monteith 表示:“裕廊岛工厂于 2007 年首次投入运营时,按 1.6 万 t/a 能力设计生产。生产聚醚胺设备目前主要用于新加坡、得克萨斯州的康罗和威尔士的拉内利等三地工厂,近几年市场需求已经开始超出这三个主生产工厂的生产能力。此次亨斯迈产能扩建举措正符合公司对下一个 10 年的地区增长预测,并将优化公司全球特种胺生产地的生产,使我们能更灵活更迅速应对用户的需要。”

尽管亨斯迈已经在市场上具有重要地位,但预计 JEFFAMINE® 胺类在未来 10 年中在所有地区尤其是亚太地区的需求将以年均至少 10% 的速度增长。(慧聪塑料网)