

http://pmse.scu.edu.cn

含取代基的焦磷酸哌嗪调控聚乳酸阻燃和力学性能

王琢^{1,3}, 戴彩云¹, 李娟²

(1. 沈阳化工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 浙大宁波理工学院 火安全材料研究所, 浙江 宁波 315100;
3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要:焦磷酸哌嗪(PAPP)是一种环保型阻燃剂,但是其在聚乳酸(PLA)中的阻燃效率较低,通常需要25%左右才能达到UL-94 V0等级。文中采用含取代基的焦磷酸哌嗪(H-PAPP)改善PLA的阻燃性能,引入异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)调控其力学性能。结果发现,H-PAPP的质量分数为3%即可使PLA获得UL-94 V0等级。在氮气氛围中,H-PAPP使PLA的5%降解温度($T_{5\%}$)略有降低,在空气中反而使PLA的 $T_{5\%}$ 提高,但是PLA的炭残留提高不明显。锥形量热分析表明,H-PAPP虽然降低了总热释放量(THR),但是峰值热释放量(PHRR)和烟释放(TSR)增加。此外,H-PAPP使拉伸和冲击强度略有降低,TGIC通过扩链反应提高了PLA的力学性能。

关键词:聚乳酸;阻燃;偶联;焦磷酸哌嗪;力学性能

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2025)02-0063-07

聚乳酸(PLA)是生物基和生物可降解材料的典型代表,具有优异的可降解性,在一次性制品领域得到了广泛的应用^[1]。随着可持续发展战略的推进,PLA的应用领域不断拓宽,已有不少厂家尝试将其用于电子电器、汽车等。然而PLA由于本身结构的原因极易燃烧,其极限氧指数(LOI)仅为19%~21%,并且由于易降解导致燃烧时伴有严重熔滴^[2-4]。为了提高PLA应用时的安全性,需要对其进行阻燃改性。当前,用于PLA的阻燃剂主要包括磷系阻燃剂^[5,6]、磷氮阻燃剂^[7]、膨胀型阻燃剂^[8]、纳米阻燃剂^[9]、离子液体^[10]等。

焦磷酸哌嗪(PAPP)是一种膨胀型阻燃剂,因其较高的热分解温度和良好的成炭性能而受到关注^[11-13]。然而PAPP在PLA中的阻燃效率不高,通常需要添加20%以上才能达到良好的阻燃性能。吕强^[14]在PLA中添加31%的PAPP,得到的PLA的LOI为31%,UL-94测试中获得V0级。为了提高PAPP

的阻燃效率,方法之一是采用复合阻燃剂。Chen等^[15]将PAPP与氰尿酸三聚氰胺按4:1复合,质量分数为15%时能使PLA获得UL-94 V-0级,LOI也达到34.9%。将PAPP的P—OH进行有机取代是调节其热稳定性及与聚合物匹配性的另一种方法。Xu等^[16]采用甲基膦酸和哌嗪成盐然后与新戊二醇共聚制备了大分子阻燃剂PPMPNG,发现仅需21%即可使聚乙烯(PE)获得UL-94 V0级别,但是对其在PLA中的应用研究未见公开报道。此外,阻燃剂的添加通常造成力学性能的损失,引入扩链剂可以调控其力学性能^[17,18]。

本文通过在PLA中添加含取代基的焦磷酸哌嗪(H-PAPP)、扩链剂-异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)来调控PLA的阻燃性能和力学性能。通过LOI、UL-94垂直燃烧、锥形量热法、热失重分析(TGA)等研究了PLA及共混物的阻燃性能和降解行为,通过拉伸、冲击等试验对其力学性能进行了分析。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0018

收稿日期:2024-01-31

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LZ23E030001)

通讯联系人:李娟,主要从事阻燃高分子材料研究,E-mail: lijuan@nbt.edu.cn

1 试验部分

1.1 试剂与仪器

PLA: 4032D, 美国 Natureworks 公司; H-PAPP: 绍兴兴欣新材料股份有限公司; TGIC: $\geq 98\%$, 合肥能源化工股份有限公司。

扭矩流变仪: 型号 M-TNI-55, 广州波通实验分析仪器有限公司; 平板硫化机: 型号 XLBD, 湖州顺力橡胶机械有限公司。

1.2 实验过程

将 PLA、阻燃剂在真空烘箱中 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘 6 h, 按照 Tab.1 中的配方进行熔融共混。温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 时间为 5 min, 转速为 50 r/min。最后, 在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 MPa 条件下, 将 PLA 共混物压制不同尺寸的板材。

1.3 测试与表征

1.3.1 阻燃性能分析: 采用 5400 垂直燃烧测试仪(苏州阳屹沃尔奇检测技术有限公司)测试 UL-94 垂直燃烧级别, 测试标准为 ASTM D3801, 试样尺寸为 $100\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$; 采用英国 FTT 公司的标准锥形量热计(FTT0242)对热释放行为进行研究, 测试标准为 ISO 5660, 热流密度为 35 kW/m^2 , 样品尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$; 采用 5801 型数字氧指数分析仪(苏州阳屹沃尔奇检测技术有限公司)测试 LOI 值, 测试标准为 ASTM D 2863-97, 样品尺寸为 $100\text{ mm} \times 6.5\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$ 。

1.3.2 热稳定性能分析: 采用梅特勒公司的 TGA/DSC1 分析仪进行 TGA 分析。将 3.0~5.0 mg 样品放在氧化铝坩埚中, 从 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, 气体流速为 50 mL/min 。

1.3.3 质谱分析: 将 PLA 共混物通过酒精灯灼烧 15 s, 30 s, 采用 Triple TOF 4600 Q-TOF 质谱仪(美国 AB Sciex)对固相产物进行分析。选择正离子模式, 离子喷雾电压为 5500 V , 聚簇电位为 80 V , 汽化器温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 注射速度为 $5\text{ }\mu\text{L/min}$, 质量范围为 $m/z = 100\sim 1200$ 。

1.3.4 力学性能测试: 采用 Instron 5567 型电子万能试验机对拉伸性能进行测试, 拉伸速率为 20 mm/min , 样品尺寸为 a 型哑铃形试样, 厚度为 0.8 mm ; 采用 XJ-50Z 冲击试验机(承德大华试验机有限公司)对冲击性能进行测试, 测试标准为 ISO179 - 1:8 8, 摆锤能量为 1 J。试样尺寸为 $80\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。

1.3.5 相对分子质量及其分布测试: 采用 Agilent 1260 HT Infinity II 仪器测试数均分子量(M_n)和重均分子量(M_w), 并计算分子量分布指数($\text{PDI} = M_w/M_n$)。以氯仿(色谱级)为洗脱液, 流速为 1.0 mL/min , 温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 阻燃性能

Tab.1 是 PLA/H-PAPP 的垂直燃烧性能和 LOI 值。PLA 的 LOI 仅 20.4%, 在垂直燃烧测试中没有级别。添加 25% 的 PAPP 使 PLA 达到 UL-94 V0 等级, 而添加 3% 的 H-PAPP 即可使 PLA 获得 UL-94 V0 级, LOI 也提高到 27.3%。这说明 H-PAPP 比 PAPP 具有更好的阻燃效率。在 PLA/H-PAPP 中加入 0.8%~1.2% 的 TGIC, 仍然可以使 PLA 获得 UL-94 V0 级, LOI 也保持不变, 这说明添加少量 TGIC 对 PLA 的阻

Tab. 1 UL-94 rating and LOI of PLA composites

Samples	$w(\text{PLA})/\%$	$w(\text{H-PAPP/TGIC})/\%$	LOI/%	UL-94(3.2 mm)		
				$(t_i/t_f)/s$	Dripping/ignition	Rating
PLA	100	0/0	20.4 \pm 0.1	-	Y/Y	NC
PLA-1	98.0	2.0/0	26.8 \pm 0.2	1.52/3.54	Y/Y	V2
PLA-2	97.0	3.0/0	27.3 \pm 0.2	1.56/2.34	Y/N	V0
PLA-3	94.0	6.0/0	27.8 \pm 0.1	1.19/1.29	Y/N	V0
PLA-4	96.2	3.0/0.8	27.5 \pm 0.2	4.98/1.02	Y/N	V0
PLA-5	96.0	3.0/1.0	27.5 \pm 0.1	1.28/1.02	Y/N	V0
PLA-6	95.8	3.0/1.2	27.1 \pm 0.1	3.23/1.04	Y/N	V0
PLA-7	75.0	25PAPP/0	28.8 \pm 0.1	5.43/1.65	Y/N	V0

燃性能影响不大。

2.2 热降解行为

Fig.1 为 PLA 及其共混物在氮气和空气氛围中的 TGA 曲线,数据列于 Tab.2。质量损失为 5%,10% 和最大降解速率对应的温度分别记作 $T_{5\%}$, $T_{10\%}$ 和 T_{\max} 。无论在氮气还是空气中, H-PAPP 均显示出两步分解,其中 $T_{5\%}$ 在 274 °C 左右,能够满足 PLA 的加工需求。而 H-PAPP 与 PLA 共混后,在氮气中与 PLA 一样仅有 1 个降解台阶,但是 PLA/H-PAPP 的 TGA 曲线向低温方向平移,这说明 H-PAPP 促进 PLA 在更低的温度下降解;所有的共混物在 600 °C 时的炭残留量均比较少。

在空气中 PLA/H-PAPP 与 PLA 一样有 2 个降解

台阶,其中第 2 个降解台阶比较小。比较有意思的是, PLA/H-PAPP 的 TGA 曲线略向高温方向平移。PLA/H-PAPP 的 $T_{5\%}$ 和 $T_{10\%}$ 均有所提高,这说明在空气中 H-PAPP 与 PLA 的反应提高了其降解温度,这应该是由氧化而导致的交联,延缓了其降解。

2.3 锥形量热法分析

采用锥形量热法分析 PLA 及其共混物燃烧时的热释放行为,结果如 Tab.3 和 Fig.2 所示。PLA/H-PAPP 的热释放曲线与 PLA 基本一致,虽然总热释放量 (THR) 和 CO 释放量有所降低,但是峰值热释放量 (PHRR) 有所升高; PLA 的 TTI 为 61 s, H-PAPP 的加入使 PLA 的 TTI 变短;而且,所有 PLA/H-PAPP 共混物的总烟释放速率 (TSR) 明显增加,这在 PLA 体系

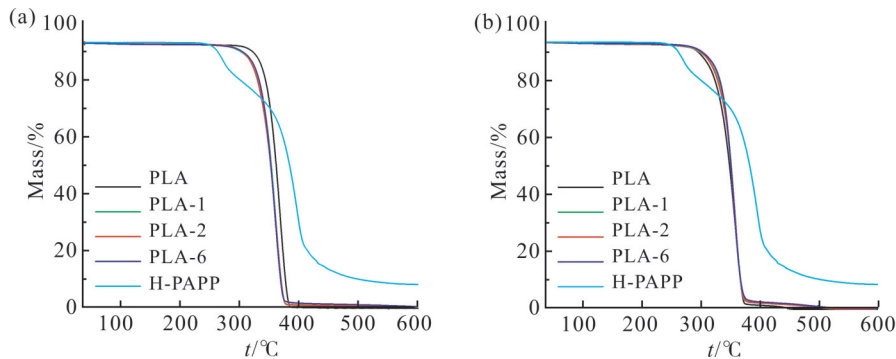


Fig. 1 TGA curves of PLA composites in (a) N_2 and (b) air

Tab. 2 TGA results of PLA composites in N_2 and air

Samples	N_2				Air			
	$T_{5\%}/^{\circ}C$	$T_{10\%}/^{\circ}C$	$T_{\max}/^{\circ}C$	Residues at 600 °C/%	$T_{5\%}/^{\circ}C$	$T_{10\%}/^{\circ}C$	$T_{\max}/^{\circ}C$	Residues at 600 °C/%
PLA	333	343	372	0.0	309	323	372	0.6
PLA-1	326	331	369	1.4	314	329	369	0.4
PLA-2	324	329	369	0.6	314	327	369	0.3
PLA-6	325	332	369	0.6	317	331	369	0.6
H-PAPP	274	288	399	8.2	274	283	299	8.2

Tab. 3 Cone calorimetry data of different PLA composites

Samples	TTI/s	TSR/($m^2 \cdot m^{-2}$)	PHRR/($W \cdot g^{-1}$)	THR/($kJ \cdot g^{-1}$)	Residues/%
PLA	61±3	33.2±5.3	550±40	112.1±0.1	0.3
PLA-1	56±2	234.8±13.5	610±30	93.7±0.2	0.7
PLA-2	57±3	362.1±20.4	618±17	93.4±2.0	2.2
PLA-6	58±1	293.5±6.5	654±11	92.7±1.3	3.2

note: TTI—time to ignition; TSR—total smoke rate; PHRR—peak of heat release rate; THR—total heat release

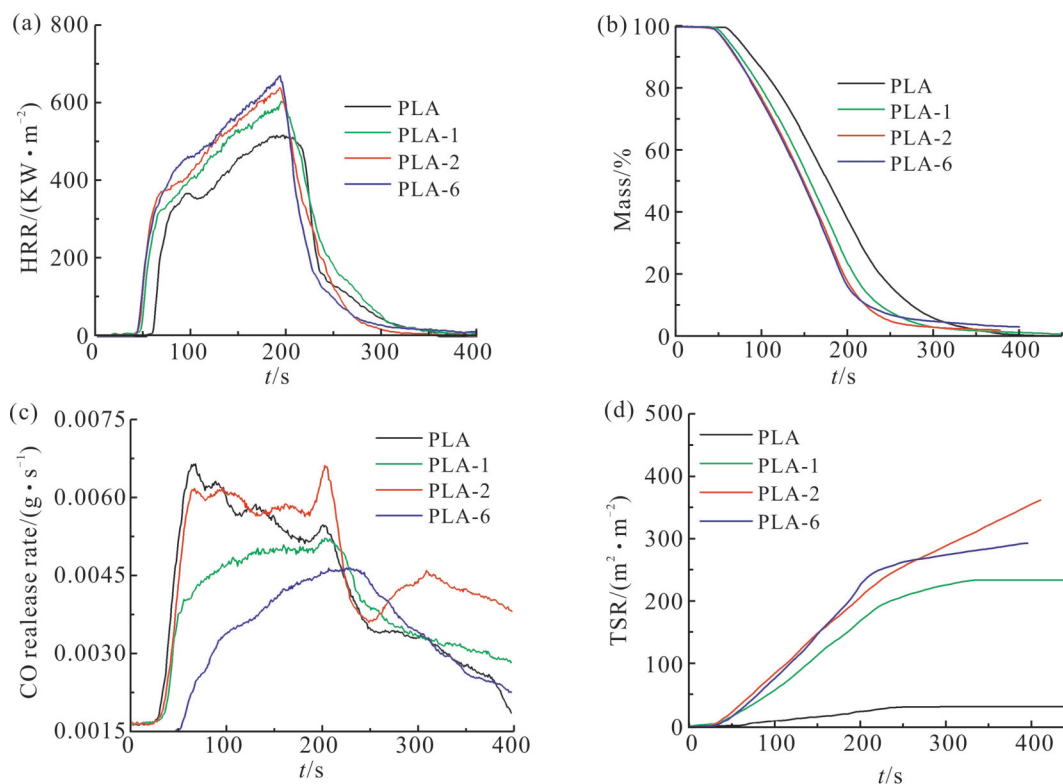


Fig. 2 Relationships between (a) HRR, (b) mass, (c) CO and (d) TSR and time of PLA composites

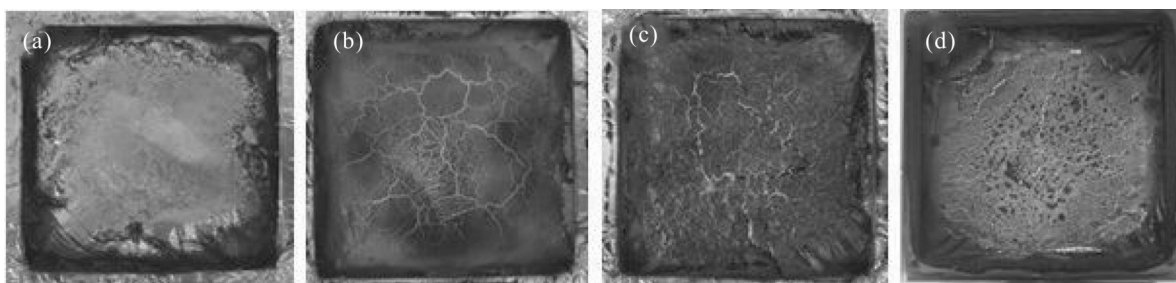


Fig. 3 Char for (a) PLA, (b) PLA-1, (c) PLA-2 and (d) PLA-6

是一种比较常见的现象^[3,10]。此外添加H-PAPP后炭残留量有所提高,阻燃剂添加量增加残炭量也随之增加。由Tab.1结果可知,H-PAPP提高了PLA的LOI和UL-94级别,但在锥形量热测试中表现不佳,这主要是测试条件不同引起的。因为PLA易降解难成炭,在UL-94测试中可以依靠熔滴带走热量而实现V0级。而在锥形量热测试中,样品被限制在样品池内,在连续辐照下持续燃烧,成炭量又比较低,因而热释放量变化不大。而烟释放的提高主要是因为阻燃剂能够促进PLA成炭,并且有较好的气相作用,而这些形成的炭颗粒比较小,挥发到气相形成烟,这在气相阻燃作用较强的阻燃材料中比较常见^[19]。

锥形量热法测试后的炭层照片如图3所示。PLA燃烧时几乎被烧光,只在样品池边缘沉积了少量炭。添加H-PAPP后,形成了一层覆盖在底部的炭层。但是残炭量不足以形成完整覆盖的炭层,可以看到有很多缝隙,这是热释放量降低不明显的原因之一。

2.4 力学性能和相对分子质量

PLA共混物的拉伸和冲击性能列于Tab.4中。PLA的拉伸和冲击强度分别为66 MPa和9.7 kJ/m²。在PLA中加入H-PAPP后,PLA-2的拉伸和冲击强度降低到61 MPa和7.7 kJ/m²;在PLA-2中加入0.8%~1.2%的TGIC后,PLA-4和PLA-5的拉伸和冲击强度

Tab. 4 Mechanical properties and molecular weight of PLA composites

Samples	TM/MPa	TS/MPa	EB/%	IS/(kJ·m ⁻²)	$\bar{M}_n \times 10^{-4}$	$\bar{M}_w \times 10^{-5}$	PDI
PLA	3074±175	66±6	4.5±0.3	9.7±0.7	7.0	1.3	1.86
PLA-2	2710±327	61±3	4.4±0.2	7.7±1.4	5.4	1.1	2.04
PLA-4	2868±324	65±4	4.7±0.2	10.0±1.4	8.5	1.5	1.75
PLA-5	2868±324	63±3	4.5±0.3	8.9±1.1	8.3	1.5	1.81
PLA-6	2814±355	69±3	4.7±0.2	9.4±0.6	7.4	1.4	1.89

note: TM——tensile modulus; TS——tensile strength; EB——elongation at break; IS——impact strength

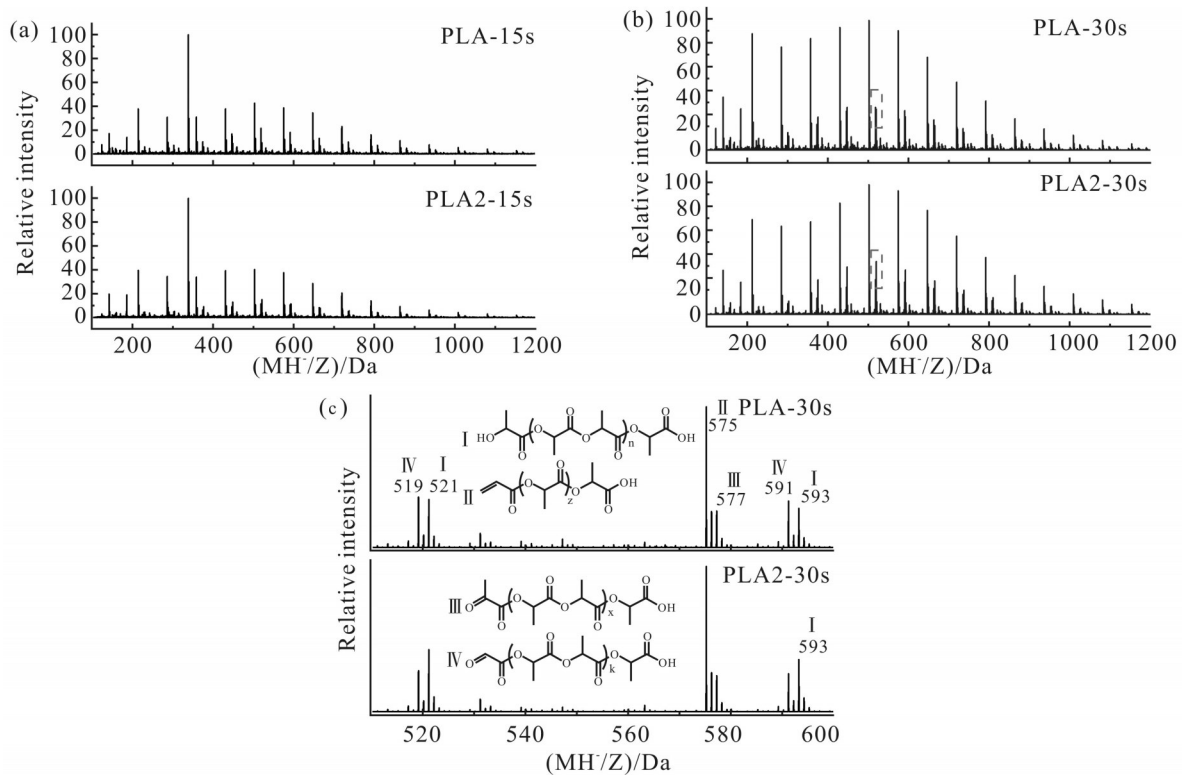


Fig. 4 Q-TOF mass spectra of PLA and PLA2: (a) 15 s; (b, c) 30 s

均有提高。其中,PLA-4的性能最佳,拉伸和冲击强度分别提高到65 MPa和10.0 kJ/m²。增加TGIC的量,拉伸强度提高不明显,冲击强度略有降低。TGIC含有3个环氧官能团,在高温时可以与PLA反应。适量的TGIC可以使PLA的相对分子质量增加而达到增强的效果,但是过量的TGIC反而使分子链交联,造成冲击强度降低。此外,PLA及其共混物的 M_n , M_w 和PDI见Tab.4中。可以看出,H-PAPP的加入降低了PLA的相对分子质量,分子量分布也变宽,而TGIC提高了PLA的相对分子质量,并且使PDI变小,也即分子量分布变窄;这是因为扩链反应

能提高相对分子质量。但是TGIC添加量过多时相对分子质量并未继续增加,这与过量添加造成局部交联有关。此外,相对分子质量的变化趋势与力学性能基本一致,因此引入适量TGIC可以调控PLA的力学性能。

2.5 阻燃机理分析

采用Q-TOF对PLA共混物的降解产物进行了分析,结果如Fig.4所示。PLA主要通过随机酯交换或顺式消除降解,产生一系列低聚物^[9]。从Fig.4中可知,PLA2的降解产物与PLA相似,表明H-PAPP未改变PLA的降解路径。但是将500~600之间的谱图

放大之后可以发现,化合物I的强度增加,而化合物IV的强度降低。其中化合物I主要由随机酯交换反应产生,IV主要由顺式消除反应产生,这表明H-PAPP对PLA的随机酯交换反应具有促进作用。较大相对分子质量的降解产物更有助于交联成炭,从而改善阻燃性能^[3]。

综上所述,PLA阻燃性能的改善应该是多种因素影响的结果,其一是H-PAPP促进了PLA降解,导致相对分子质量降低,熔滴加剧,通过熔滴带走热量使火焰熄灭;其二是H-PAPP促进了PLA的随机酯交换反应,一定程度上减少了可燃物的产生,因此产生的熔滴不会引燃脱脂棉,故在UL-94测试中获得了V0级别;此外,阻燃剂释放的惰性气体及自由基也能在气相发挥作用。

3 结论

采用H-PAPP和TGIC调控PLA的阻燃性能和力学性能。仅添加3%的H-PAPP即可使PLA通过UL-94 V0等级,获得了明显优于PAPP的阻燃效率。H-PAPP可在气相稀释可燃物,并且通过熔滴带走热量;同时促进PLA的随机酯交换反应,减少可燃物的产生;综合多重效应得到了较好的阻燃性能。此外,H-PAPP促使PLA降解,降低了PLA的力学性能,通过适量偶联剂与PLA反应能提高分子量,改善力学性能。总之,阻燃剂与偶联剂复合调控了PLA的阻燃性能和力学性能。

参考文献:

- [1] Nofar M, Sacligil D, Carreau P J, *et al.* Poly (lactic acid) blends: processing, properties and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125: 307-360.
- [2] Rasal R M, Janorkar A V, Hirt D E. Poly (lactic acid) modifications [J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35: 338-356.
- [3] Sun J H, Li L, Li J. Effects of furan-phosphamide derivative on flame retardancy and crystallization behaviors of poly (lactic acid) [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 369: 150-160.
- [4] Wang D Y, Song Y P, Lin L, *et al.* A novel phosphorus-containing poly (lactic acid) toward its flame retardation[J]. Polymer, 2011, 52: 233-238.
- [5] Ju Y, Liao F, Dai X, *et al.* Flame-retarded biocomposites of poly (lactic acid), distiller's dried grains with solubles and resorcinol di (phenyl phosphate) [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 81: 52-60.
- [6] Yu S, Xiang H, Zhou J, *et al.* Enhanced flame- retardant performance of poly (lactic acid) (PLA) composite by using intrinsically phosphorus- containing PLA[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28: 590-597.
- [7] Liu L, Xu Y, Di Y, *et al.* Simultaneously enhancing the fire retardancy and crystallization rate of biodegradable polylactic acid with piperazine- 1, 4- diylbis (diphenylphosphine oxide) [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 202: 108407.
- [8] Feng C, Liang M, Jiang J, *et al.* Flame retardant properties and mechanism of an efficient intumescent flame retardant PLA composites[J]. Polymers for Advanced Technology, 2016, 27:693-700.
- [9] Guo Y, Yang K, Zuo X, *et al.* Effects of clay platelets and natural nanotubes on mechanical properties and gas permeability of poly (lactic acid) nanocomposites[J]. Polymer, 2016, 83: 246-259.
- [10] Li C X, Wang B T, Yang Y, *et al.* Synergistic effect of poly (ionic liquid) and phosphoramidate on flame retardancy and crystallization of poly (lactic acid) [J]. International Journal of Biological Macromolecules. 2022, 223: 1344-1355.
- [11] 叶文, 许肖丽, 肖雄, 等. 焦磷酸哌嗪制备方法研究进展[J]. 上海塑料, 2021, 49(1): 21-27.
Ye W, Xu X L, Xiao X, *et al.* Research progress on preparation methods of piperazine pyrophosphate[J]. Shanghai Plastics, 2021, 49(1): 21-27.
- [12] 许肖丽, 许保云, 叶文. 焦磷酸哌嗪及其复配阻燃剂对共聚聚丙烯阻燃性能的研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(5): 117-122.
Xu X L, Xu B Y, Ye W. Flame retardant performance of copolymerized polypropylene with piperazine pyrophosphate and compound flame retardants[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(5): 117-122.
- [13] 肖雄, 胡爽, 陈涛, 等. 磷氮阻燃剂聚焦磷酸哌嗪及其复配体系对聚丙烯材料性能的影响和阻燃机理[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(10): 71-78.
Xiao X, Hu S, Chen T, *et al.* Properties and flame retarding mechanism of polypropylene with nitrogen- phosphorus flame retardant (piperazine polypyrophosphate) and its compound system[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36

- (10): 71-78.
- [14] 吕强. 焦磷酸哌嗪类阻燃剂阻燃 PLA 性能[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3): 55-59.
- Lv Q. Properties of piperazine pyrophosphate flame retardants using in PLA[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3): 55-59.
- [15] Chen H, Xia W, Wang N, *et al.* Flame retardancy of biodegradable polylactic acid with piperazine pyrophosphate and melamine cyanurate as flame retardant[J]. Journal of Fire Sciences, 2022, 40: 254-273.
- [16] Xia S, Zhang Z, Leng Y, *et al.* Synthesis of a novel mono-component intumescent flame retardant and its high efficiency for flame retardant polyethylene[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 134: 632-640.
- [17] Li L, Wang H, Jiang T, *et al.* Effect of epoxy chain extenders on molecular structure and properties of polylactic acid[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140: e54379.
- [18] Yahyae N, Javadi A, Garmabi H, *et al.* Effect of two-step chain extension using Joncryl and PMDA on the rheological properties of poly (lactic acid) [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305: 1900423.
- [19] Zhang W, Wang B T, Xia Y, *et al.* Effect of multiple reactions induced by a flame retardant containing P/N/S and chain extender on fire safety and mechanical performance of polyamide 6[J]. Reactive & Functional Polymers, 2023, 192: 105730.

Regulation Effect of Piperazine Pyrophosphate Containing Substituent Group on Flame Retardancy and Mechanical Properties of Polylactic Acid

Zhuo Wang^{1,3}, Caiyun Dai¹, Juan Li²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Institute of Fire Safety Materials, NingboTech University, Ningbo 315100, China; 3. Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

ABSTRACT: Piperazine pyrophosphate (PAPP) is an environmentally friendly flame retardant, but its flame-retardant efficiency in polylactic acid (PLA) is relatively low. Usually, 25% PAPP is required to reach the UL-94 V0 rating. In this paper, a piperazine pyrophosphate containing substituent group (H-PAPP) was used to improve the flame retardancy of PLA, and glycidyl isocyanurate (TGIC) was used to regulate its mechanical properties. The results show that PLA containing 3% H-PAPP achieves UL-94 V0 rating. In nitrogen atmosphere, H-PAPP reduces the 5% degradation temperature ($T_{5\%}$) of PLA, while in air, it increases $T_{5\%}$ of PLA. However, the increase in the char residue of PLA is not significant. The cone calorimetry test results show that although H-PAPP reduces the total heat release, the peak heat release and smoke release are increased. In addition, H-PAPP reduces the tensile and impact strength, while TGIC improves the mechanical properties of PLA by chain extension reaction.

Keywords: polylactic acid; flame retardant; coupling; piperazine pyrophosphate; mechanical properties