

# 离子液体在阻燃领域的研究进展

屈贞财

(河南牧业经济学院包装与印刷工程学院, 郑州 450011)

**摘要:**离子液体作为一种新兴的绿色溶剂,具有低蒸气压、高热稳定性、良好的可设计性和非燃烧性等优点,在各个领域得到了广泛的应用。随着人们对消防安全的日益关注,研究和开发无(低)毒、低烟、绿色环保的阻燃材料逐渐成为阻燃领域的发展方向。本文简要综述了近几年来离子液体在阻燃领域的最新研究进展,重点介绍了离子液体在聚合物基体中的阻燃机理和进展,同时也介绍了离子液体在棉织物及锂离子电池等材料中的阻燃应用,最后对其发展前景作了展望。

**关键词:**离子液体;绿色溶剂;高分子基体;阻燃剂

## 引言

离子液体(ionic liquids, ILs)通常指的是熔点低于  $100^{\circ}\text{C}$ ,且完全由离子组成的一类液体<sup>[1]</sup>。离子液体具有很多其它液体不具备的优异性质,例如低蒸气压、高热稳定性、耐化学性、高溶剂化能力、结构可设计性、容易回收<sup>[2]</sup>和非燃烧性等<sup>[3]</sup>。正是由于离子液体的这些独特的优异性能,在日益重视绿色环保的今天,被视为绿色溶剂的离子液体应用范围日益广泛,包括催化<sup>[4, 5]</sup>、生物医药<sup>[6, 7]</sup>、纤维素处理和纺织工艺<sup>[8, 9, 10]</sup>、电池和超级电容器等很多领域<sup>[11~14]</sup>。相比于离子液体在其它领域的研究热潮,它在阻燃方面的研究进展缓慢。离子液体主要由阴、阳离子组成,常见的阴离子有卤素离子、硫酸酯类阴离子、四氟硼酸阴离子、六氟磷酸阴离子、对甲苯磺酸根阴离子等,阳离子有咪唑阳离子、吡啶阳离子、季铵盐阳离子、季磷阳离子等。离子液体因组成不同,种类千差万别,并非所有的离子液体都具有阻燃性,只有其化学结构中含有阻燃元素(Cl元素、Br元素、P元素及N元素等)且阻燃元素含量较大时,该类离子液体才能成为优良的阻燃剂。传统的阻燃剂主要包括含卤阻燃剂和无卤阻燃剂两大类,含卤阻燃剂燃烧会释放出有毒有害气体,对人体和环境存在一定的危害<sup>[15, 16]</sup>。最近十年以来,研究人员开始着手离子液体阻燃方面的研究,但总体来说这方面的研究目前仍处于初级阶段,已经公开报道的文献中尚没有这方面的综述。因此,本综述的目的在于总结过去一段时间内国内外研究人员在离子液体阻燃方面的研究成果,并对离子液体的未来发展进行了展望,以期对今后的研究工作提供一定的理论参考。

## 1 单一的离子液体阻燃剂

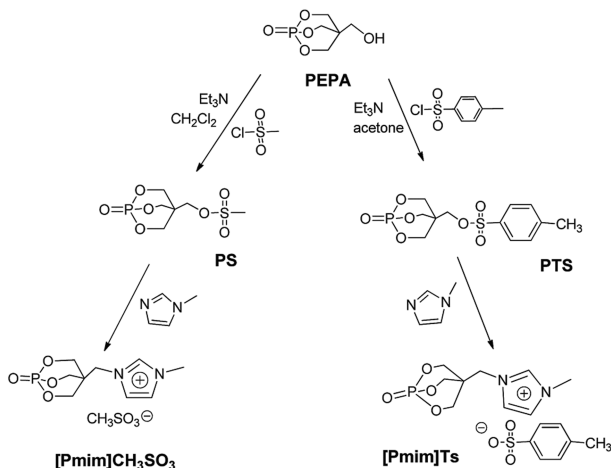
离子液体具有较高的热稳定性和难燃烧性,引起了阻燃领域的广泛关注。He等<sup>[17]</sup>合成了两种具有不同磺酸根阴离子的新型含磷离子液体[Pmim]  $\text{CH}_3\text{SO}_3$ 和[Pmim] Ts,如图1所示。

将这两种自制的离子液体用作聚酰胺 PA6 的阻燃剂时,发现它们具有不同的阻燃效果。当二者的添加量为 30%(wt)时,PA6/[Pmim]  $\text{CH}_3\text{SO}_3$ 和 PA6/[Pmim] Ts 的极限氧指数 LOI 值分别为 26.2%和 24.4%。同时,纯 PA6 在燃烧后没有残留物,而 PA6/[Pmim]  $\text{CH}_3\text{SO}_3$ 和 PA6/[Pmim] Ts 燃烧后有大量膨胀残余物。由于  $\text{CH}_3\text{SO}_3$ 和 Ts 阴离子的酸性差异,具有强酸性的[Pmim]  $\text{CH}_3\text{SO}_3$ 表现出更高的催化分解能力。由于[Pmim]  $\text{CH}_3\text{SO}_3$ 对 PA6 的阻燃效果优于[Pmim] Ts,可见通过改变阴离子结

10.14028/j.cnki.1003-3726.2020.06.002

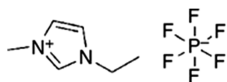
收稿:2019-10-13;修回:2019-12-05;

作者简介:屈贞财(1986-),男,陕西汉中,硕士,河南牧业经济学院讲师,主要研究方向为包装阻燃材料。E-mail: quzhencai@126.com.

图 1 [Pmim] CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub> 和 [Pmim] Ts 的合成路线Figure 1 Synthesis route for [Pmim] CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub> and [Pmim]Ts

构大小,不仅可以改变离子液体的物理化学性质,还可以改变它们的阻燃效果。

Chen 等<sup>[18]</sup>选择离子液体(1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐, EMIMPF<sub>6</sub>) (见图 2) 作为热塑性聚氨酯 (TPU) 的阻燃剂,研究了 EMIMPF<sub>6</sub> 在 TPU 中的阻燃性能。具有 2.0% (wt) EMIMPF<sub>6</sub> 的离子液体具有最低的热释放速率,EMIMPF<sub>6</sub> 可以在低温下催化 TPU 分解形成炭层,使得 TPU 具有优良的阻燃和抑烟性能。

图 2 EMIMPF<sub>6</sub> 的结构Figure 2 Structure of EMIMPF<sub>6</sub>

Sonnier 等<sup>[19]</sup>用一种磷离子液体 IL169 (见图 3) 作为环氧树脂预聚物的固化剂和阻燃剂制备了阻燃环氧树脂。这种离子液体由于磷含量高 (高达 3.69% (wt)), 不需要添加任何其它的阻燃剂便可显著降低环氧树脂的可燃性。当加入 30% (wt) 的 IL169 时,热释放速率峰值从 1099kW/m<sup>2</sup> 下降到 300kW/m<sup>2</sup>,降低了 73%,同时总的热释放降低了 48%。

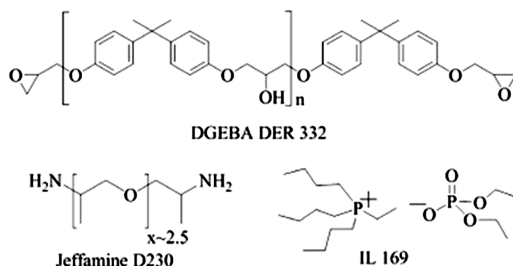


图 3 IL169 和其它原料的结构

Figure 3 Chemical structures of IL169 and other materials

Xiao 等<sup>[20]</sup>合成了一种磷酸酯基离子液体 (见图 4), 并将其引入到环氧树脂 (EP) 中。极限氧指数 LOI 和 UL-94 垂直燃烧测试等级随着 IL 质量分数的增加而增强 (见图 5)。图 5 显示,纯净的 EP 样品在 UL-94 测试中燃烧完全,当 EP/IL 复合材料中添加 4% (wt) 的 IL 时,UL-94 垂直燃烧测试达到 V-0 级,其极限氧指数从纯环氧树脂的 25.9% 提高到 34.9%,提升了 33.9%。此外,探究 EP/IL 复合材料的阻

燃机理(见图 6),发现 IL 可以同时起到气相与凝固相双重阻燃作用,燃烧初期 IL 开始降解,同时催化 EP 的初始降解,含磷残炭层的产生起到了隔绝热量传递的作用,并抑制了 EP/IL 复合材料的分解。随后释放到气相中的含磷和溴的自由基在气相中可以捕获氧自由基等,可降低加速火焰燃烧的自由基浓度,从而达到阻燃作用。

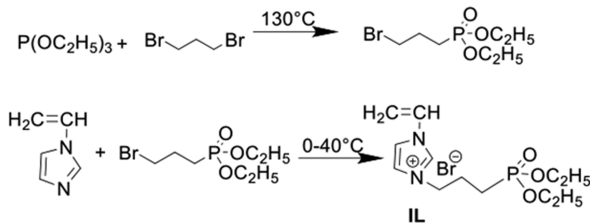


图 4 磷酸酯基离子液体合成路线示意图

Figure 4 Synthesis route of phosphonate-based ionic liquid

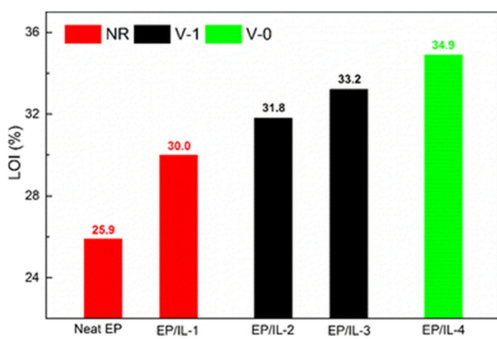


图 5 EP 复合材料的 LOI 值和 UL-94 等级

Figure 5 LOI values and UL-94 ratings of EP composites

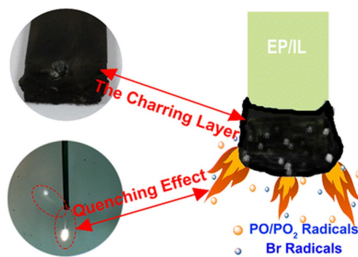


图 6 EP/IL 复合材料的阻燃机理

Figure 6 Flame-retardant mechanisms of EP/IL composites

## 2 离子液体和传统阻燃剂协同阻燃的研究

离子液体单独作为阻燃剂时,由于其所含阻燃元素的含量有限,大部分体系的阻燃效果欠佳,因而往往需要与传统阻燃剂协同阻燃,以便最大限度发挥阻燃效率。离子液体因其自身含有阴阳离子的特殊结构决定了它是一种优良的表面活性剂,可以对大部分无机/有机阻燃剂进行表面改性,提升阻燃剂在聚合物中的分散性,最终达到协同阻燃的目的。常见的离子液体与传统阻燃剂的复合阻燃效果如表 1 所示。

由表 1 可见,离子液体与传统阻燃剂进行复配后,极限氧指数明显增加,且最高热释放速率也显著降低,表明离子液体与传统阻燃剂具备良好的协同阻燃效果。这类协同阻燃体系主要用于咪唑类离子液体

表 1 离子液体单独使用和复配使用的阻燃效果

Table 1 Flame retardant effect of ionic liquid used alone and in combination

树脂 基材	阻燃体系	LOI (%)	pHRR (kW/m <sup>2</sup> )	参考 文献
	25% (wt) Al(OH) <sub>3</sub>	22.3	/	
PUF	25% (wt) (1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐) [BMIM]PF <sub>6</sub>	24.2	/	[21]
	12.5% (wt) Al(OH) <sub>3</sub> + 12.5% (wt) [BMIM]PF <sub>6</sub>	24.5	/	
	150phr Al(OH) <sub>3</sub>	24.2	/	
HDPE	6phr 氯代 1-十四烷基-3-羧甲基咪唑盐 ([C <sub>14</sub> cim]Cl)	31	/	[22]
	150phr Al(OH) <sub>3</sub> + 6phr [C <sub>14</sub> cim]Cl	32.2	/	
PLA	2.5% (wt) 多壁碳纳米管 (MWCNTs)	/	311.5	[23]
	2.5% (wt) 三(1-甲基咪唑氯盐)磷酸乙酯 ([TCEPmIm]Cl) - MWCNTs	/	262.2	
	0.5% (wt) CNTs	25.2	/	
EP	8% (wt) (1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐) [BMIM]PF <sub>6</sub>	27.8	/	[24]
	0.5% (wt) CNTs + 8% (wt) [BMIM]PF <sub>6</sub>	30.5	/	
	1% (wt) 芳纶纤维 (AF)	/	310	
TPU	0.75% (wt) 芳纶纤维 (AF) + 0.25% (wt) 1-乙酸乙酯基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐 ([EOEMIm][PF <sub>6</sub> ])	/	280	[25]
	0.5% (wt) 芳纶纤维 (AF) + 0.5% (wt) 1-乙酸乙酯基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐 ([EOEMIm][PF <sub>6</sub> ])	/	250	
	15% (wt) 次磷酸铝 (AHP)	31.25	135	
TPU	0.5% (wt) 1-乙基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐离子液体 ([EMIM]PF <sub>6</sub> )	27.75	573	[26]
	0.5% (wt) 1-乙基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐离子液体 ([EMIM]PF <sub>6</sub> ) + 14.5% (wt) APP	32.75	119.7	
	0.125% (wt) 空心玻璃微珠 (HGM)	23.5	1021	[27]
TPU	0.125% (wt) HGM@[EOEMIm][PF <sub>6</sub> ](1-乙酸乙酯基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐)	23.75	779.3	

和大部分的无机阻燃剂,这是因为咪唑类离子液体大多都含有阻燃元素,有利于获得较好的阻燃效果;而无机阻燃剂与树脂相容性差,易发生团聚现象,从而降低了阻燃效果。将离子液体与传统阻燃剂复配,可以综合离子液体和传统阻燃剂的阻燃优点,最大限度地发挥阻燃剂的阻燃性能。

膨胀型阻燃剂(IFR)广泛用于阻燃领域,聚磷酸铵(APP)无毒无味,是目前工业上 IFR 体系采用较多的一类阻燃成分<sup>[28]</sup>。Yang 等<sup>[29]</sup>合成了一种新型含磷离子液体([PCMIM] Cl),将它和 APP 组成一种新型的 IFR 体系,测试了膨胀型阻燃 PP/IFR 复合材料的可燃性和热性能,发现[PCMIM] Cl 和 APP 之间存在明显的协同效应。当[PCMIM] Cl 与 APP 的重量比为 1:5,IFR 总量保持在 30%(wt)时,PP/IFR 复合材料的 LOI 值达到 31.8%,UL-94 测试等级为 V-0 级。与纯的 PP 材料相比,PP/IFR 复合材料的峰值热释放速率和峰值质量损失率均显著降低。TGA 曲线表明,[PCMIM] Cl 具有良好的成炭能力,与 APP 结合后可大大促进 PP/IFR 复合材料的炭化,从而提高阻燃性能。

聚丙烯(PP)是目前生产规模最大的通用塑料之一,但是纯的 PP 塑料容易燃烧<sup>[30, 31]</sup>。Li 等<sup>[32]</sup>2013 年首次报道了基于多金属氧酸盐(POM)的 ILs 混合材料(PIL)作为催化剂来提高阻燃效率,该课题组制备了一种由 12-磷钼酸(PMoA)和 1-丁基-3-甲基咪唑鎓组成的杂化材料[BMIIm]<sub>3</sub>PMo(见图 7),并将其引入到 PP/IFR 复合材料中,发现[BMIIm]<sub>3</sub>PMo 可显著提高膨胀型阻燃剂(IFR)的阻燃效率,单独的 IFR 和[BMIIm]<sub>3</sub>PMo 的阻燃性都很差,商业化 IFR 的量需要超过 25%(wt)才能达到 UL-94 的 V-0 级,而含有 14.5%(wt)IFR 和 0.5%(wt)[BMIIm]<sub>3</sub>PMo 的 PP 复合材料,其 LOI 值可达到 28%,并且可以通

过 UL-94 的 V-0 级测试而没有熔融滴落现象,可见 $[\text{BMIm}]_3\text{PMo}$ 与 PP 树脂的 IFR 具有良好的协同效应。由于 IFR 和 PP 复合材料中的交联和成炭反应由 $[\text{BMIm}]_3\text{PMo}$ 催化,因此焦炭残留物也得到提高,进而提高了阻燃效率。该课题组进一步的研究证实<sup>[33]</sup>,PIL 的阴离子在 PP/IFR 的阻燃性能中起着重要的作用。其中,由磷钨酸(PWA)阴离子组成的 IL 比含有硅钨酸(SiWA)或磷钼酸(PMoA)的阴离子具有更好的协同效应。之后,他们又研究了 PILs 中阳离子有机结构对 PP/IFR 复合材料阻燃性能和力学性能的影响<sup>[34]</sup>。Li 课题组<sup>[35]</sup>也研究了双咪唑多金属氧酸盐(POMs)在聚丙烯/膨胀型阻燃剂(PP/IFR)复合材料阻燃中的作用。

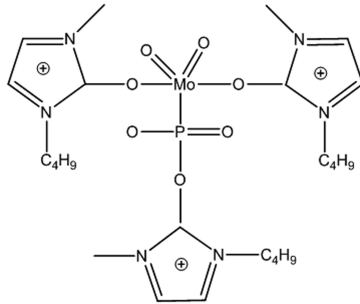


图 7  $[\text{BMIm}]_3\text{PMo}$  的化学结构

Figure 7 Chemical structure of the  $[\text{BMIm}]_3\text{PMo}$

次磷酸铝(AHP)是一种无机磷系阻燃剂,燃烧后分解成磷酸盐和焦磷酸盐,但单独的 AHP 阻燃效果并不十分理想,用量大,因此经常与其它阻燃剂复配使用<sup>[36]</sup>。Chen 等<sup>[37]</sup>研究了咪唑离子液体 $[\text{Emim}]\text{PF}_6$ 和 AHP 对热塑性聚氨酯(TPU)的协同阻燃效果和抑烟性能。实验发现,在低温下 $[\text{Emim}]\text{PF}_6$ 能催化 TPU/AHP 体系分解形成磷氧化物,使 AHP 催化分解形成保护性碳层,进一步提高了 TPU/AHP 体系的热稳定性。当 $[\text{Emim}]\text{PF}_6$ 含量为 0.0625%(wt),AHP 含量为 19.9375%(wt)时,UL-94 测试达到 V-0 级,LOI 值为 35.75%,放热量和产烟量达到最小值,阻燃效果最佳,研究表明离子液体 $[\text{Emim}]\text{PF}_6$ 与 AHP 对 TPU 的阻燃协同效应显著。

自从 2004 年 Novoselov 等<sup>[38]</sup>从天然石墨中剥离制备出石墨烯以来,由于它具有高导热系数(约 5300W/mK)、高化学稳定性、高比表面积和良好的气体阻隔性等诸多优异的性能,使其在阻燃领域的应用成为可能<sup>[39]</sup>。石墨烯连续致密的二维片层结构在作为阻燃剂燃烧时可以有效隔绝空气的进入,改善聚合物的热稳定性,改变聚合物的热解途径,抑制火焰蔓延并降低热释放速率。Gui 等<sup>[40]</sup>研究了新型含磷离子液体 $[\text{PCMIM}]\text{PF}_6$ 表面功能化石墨烯(GIL)对聚乳酸(PLA)纳米复合材料的阻燃行为的影响(见图 8)。研究认为, $[\text{PCMIM}]\text{PF}_6$ 的磷酸基团在较低温度下形成的焦磷酸可以将石墨烯连接为网络结构,因此 GIL 提高了 PLA 复合材料在较高温度的热稳定性,促进了炭层的形成。实验测得含 4% GIL 的复合材料 LOI 值增加至 28%,UL-94 测试为 V-1 级,相比于纯的易燃 PLA(LOI 值为 19%)提高了 42.11%。随后,该课题组利用多壁碳纳米管(MWNT)和三(1-羟乙基-3-甲基氯化咪唑)磷酸盐(IP)制备了功能化的 MWNT(MIP),并和 PLA 熔融共混制备了一系列 PLA 复合材料(见图 9)<sup>[41]</sup>。与 PLA/MWNT 相比,PLA/MIP 降低了热释放速率和总热释放量,增加了炭残余物,阻燃性能得到显著改进。

目前,部分离子液体含有卤素,随着对离子液体阻燃研究的深入,一些研究者开始注意到含卤离子液体阻燃的危害,尝试通过阴离子交换的方式将离子液体中的卤素阴离子除去。Xiao 等<sup>[42]</sup>合成了一种阴离子为溴的膦酸酯基离子液体,与磷钼酸的阴离子交换制备了离子液体基金属有机杂化材料(PMAIL)(见图 10),并将其作为高效阻燃剂应用于 EP 中。对 EP-PMAIL 复合材料的阻燃性能进行了全面研究后发现,仅添加 6%(wt)的 PMAIL,EP-PMAIL 复合材料就达到 UL-94 的 V-0 级。与纯环氧树脂相比,加入 1%(wt)的 PMAIL,EP-PMAIL 复合材料在 700℃下的焦炭产率提高了 108.3%,充分说明 PMAIL

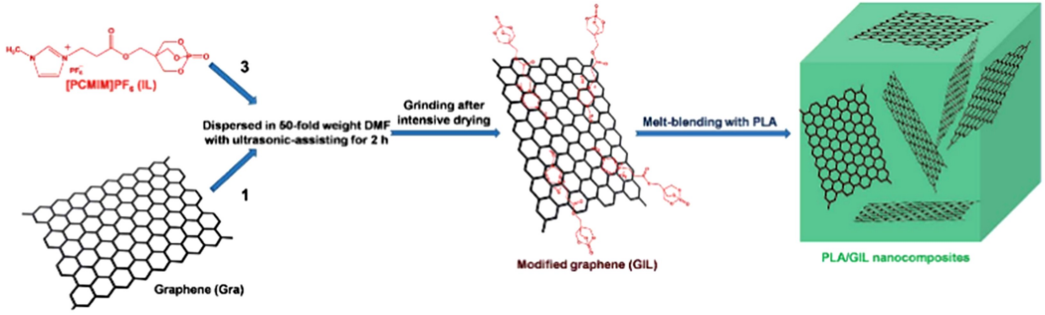


图 8 PLA/GIL 纳米复合材料的制备示意图

Figure 8 Schematic diagrams of the preparation of PLA/GIL nanocomposites

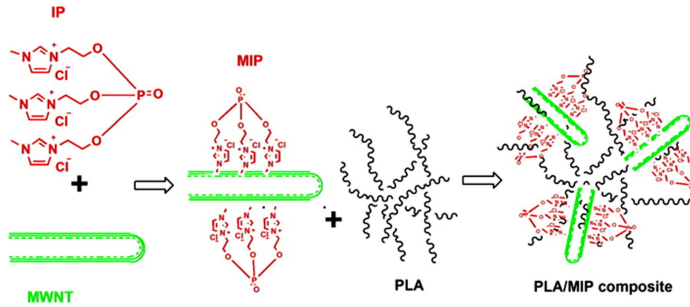


图 9 PLA/MIP 复合材料的制备示意图

Figure 9 Schematic diagrams of the preparation of PLA/MIP composite

具有优异的催化炭化效果。这种利用功能化离子液体基金属有机杂化材料提高 EP 阻燃性的方法为构建高效阻燃材料提供了新方向。

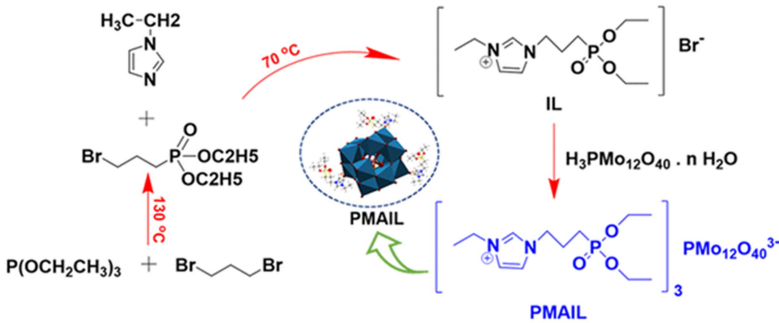


图 10 PMAIL 的合成路线和结构

Figure 10 Synthetic route and structure of PMAIL

### 3 离子液体在其它领域的阻燃研究

目前,离子液体除了被用于 PP、PC、PLA、环氧树脂等高分子材料的阻燃外,在其它领域的阻燃研究较少<sup>[43, 44]</sup>。公开报道的文献中,Boukhriss 等<sup>[45]</sup>合成了咪唑鎓离子液体(MCPTS)和吡啶鎓离子液体(PCPTS)(见图 11)用于棉织物的阻燃。他们将棉织物用含有这些离子液体盐制备的溶胶通过烘干固化工艺处理后,再浸渍在 HPF<sub>6</sub> 的稀释溶液中进行复分解反应。研究发现,未处理的棉织物在火焰去除后保持燃烧 45s,最终残留物为 1%(wt),而用[MCPTS] PF<sub>6</sub> 或[PCPTS] PF<sub>6</sub> 功能化的棉织物不燃烧,残

留物的重量达到 93% (wt), 这说明离子液体可以作为棉织物的优异阻燃剂。Bentis 和 Boukhriss 等<sup>[46]</sup> 制备了 6 种基于有机硅烷的离子液体, 通过溶胶-凝胶工艺将离子液体固定在棉织物基底上来提高阻燃性能, 发现经过离子液体处理后的棉织物具有非常高的阻燃性能和较好的热稳定性。

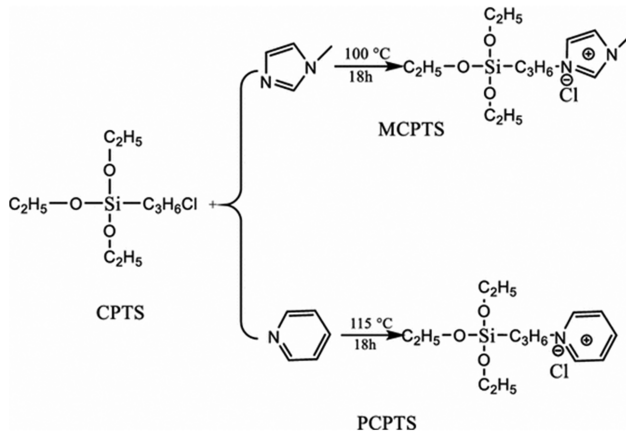


图 11 MCPTS 和 PCPTS 盐的合成

Figure 11 Synthesis of MCPTS and PCPTS salts

此外, 值得一提的是, 离子液体在锂离子电池方面的阻燃研究有着潜在的应用前景。锂离子电池因其高能量密度和良好的循环稳定性而在电子设备、电动汽车等方面获得广泛应用, 但已经商品化的锂离子电池电解质中使用的碳酸酯类有机溶剂易燃易爆, 存在安全性问题。由于离子液体具有不燃、宽的电化学稳定性和高离子电导率等优点, 有望解决锂离子电池的安全性问题。Bae 等<sup>[47]</sup> 将基于 1-丁基-1-甲基吡咯烷阳离子的不同离子液体作为阻燃添加剂添加到有机电解质中, 制备了含有不同离子液体(如 BMP-TFSI、BMP-PF<sub>6</sub>、BMP-BF<sub>4</sub>) 的电解质溶液。研究表明, BMP-PF<sub>6</sub> 是最理想的离子液体, 向电解质中添加 BMP-PF<sub>6</sub> 可以提高安全性而不降低电池的循环性能并增强电池的热稳定性。Kim 等<sup>[48]</sup> 制备了由吡咯鎓基离子液体和商业碳酸盐组成的新型二元电解质(见图 12), 燃烧测试发现, 火焰在大于 60% (wt) 离子液体的二元电解质中逐渐熄灭, 含 80% (wt) 或更多离子液体的二元电解质完全不燃, 该二元电解质具有较高的离子电导率和优异的阻燃性能。

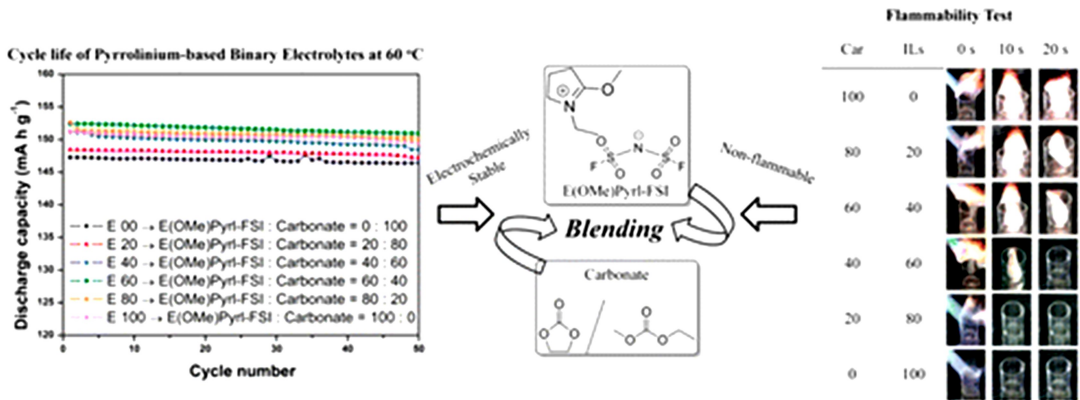


图 12 离子液体基二元电解质示意图

Figure 12 Schematic diagram of ionic liquid-based binary electrolytes

Guo 等<sup>[49]</sup> 通过溶液流延法制备了由 Li<sub>1.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Ge<sub>1.5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (LAGP) 支撑的离子液体凝胶聚合物电解质(ILGPE)(见图 13), 研究了 LAGP 作为活性填料对 ILGPE 性能的影响。ILGPE 表现出不可燃性和

良好的热稳定性,具有该电解质的锂金属电池表现出良好的循环性能和高安全性,ILGPE-10%(wt)的LAGP可作为高安全性可充电固态锂金属电池的潜在替代电解质。

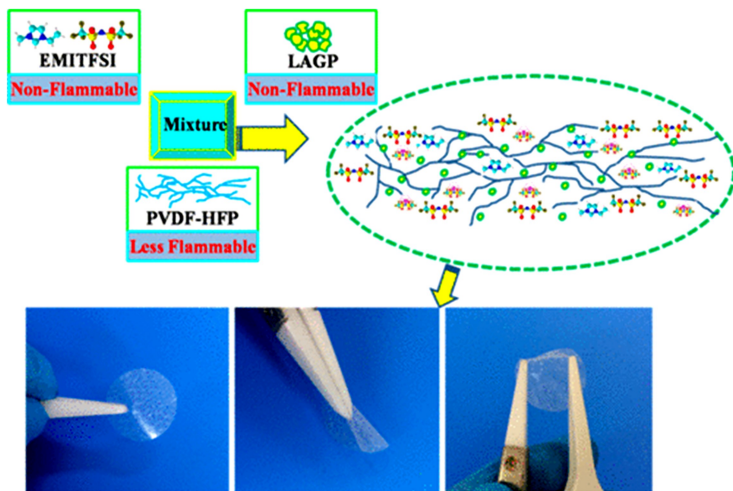


图 13 ILGPE 的制备过程示意图

Figure 13 Schematic diagram of preparation process of ILGPE

## 4 总结和展望

与传统阻燃剂相比,离子液体基阻燃剂具有热稳定性高、可设计性强、环保高效等优点,具有广阔的应用前景。单一离子液体由于阻燃元素含量少,将其与高分子树脂复合,对材料的阻燃性能提升有限。利用离子液体功能化传统阻燃剂制备协同阻燃体系,不仅克服了传统阻燃剂用量大、易团聚的现象,也提高了离子液体的协同阻燃效率,是当前提升离子液体阻燃性能的有效途径。离子液体中阴阳离子的可选择性为高效阻燃离子液体的开发提供了巨大的便利,可以将更多的阻燃元素和官能团通过离子配位的形式引入到离子液体中以增强阻燃性。但是作为阻燃领域的新生物,离子液体在阻燃领域的研究目前仍处于初级阶段,当前对于离子液体的阻燃机理尚处于探索阶段,今后将进一步探究离子液体的阻燃机理以及离子液体与传统阻燃剂的协同阻燃机理。随着环保政策的日益严格,无卤阻燃已成为阻燃剂的发展方向,我们期待未来无卤离子液体阻燃剂在阻燃领域能得到更广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 乐长高, 谢宗波. 离子液体的合成及其在有机合成中的应用. 科学普及出版社, 2010, 1.
- [2] 许耀光, 张慧, 黄六莲, 曹石林, 陈礼辉. 林业工程学报, 2017, 2(4):70~76.
- [3] Mohamed Y, Sebastien L, Jannick D R. Chem Eng J, 2014, 255(6):513~524.
- [4] Steinrück H P, Wasserscheid P. Catal Lett, 2015, 145(1):380~397.
- [5] Ishak Z I, Sairi N A, Yatimah A, Aroua M K T, Rozita Y. Catal Rev Sci Eng, 2017, 59(1):44~93.
- [6] Egorova K S, Gordeev E G, Ananikov V P. Chem Rev, 2017, 117(10):7132~7189.
- [7] Shamshina J L, Barber P S, Rogers R D. Expert Opin Drug Deliv, 2013, 10(10):1367~1381.
- [8] Zhang J M, Wu J, Yu J, Zhang X Y, He J S, Zhang J. Mater Chem Front, 2017, 1(7):1273~1290.
- [9] Meksi N, Moussa A. J Cleaner Production, 2017, 161:105~126.
- [10] Wang H, Gurau G, Rogers R D. Chem Soc Rev, 2012, 41(4):1519~1537.
- [11] Soares B G. J Mol Liq, 2018, 262:8~18.
- [12] Mourad E, Coustan L, Lannelongue P, Zigah D, Mehdi A, Vioux A, Freunberger S A, Favier F. Nat Mater, 2017, 16(4):446~453.
- [13] Watanabe M, Thomas M L, Zhang S, Zhang S G, Ueno K, Yasuda T, Dokko K. Chem Rev, 2017, 117(10):7190~7239.

- [14] Osada I, de Vries H, Scrosati B, Passerini S. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55(2): 500~513.
- [15] Zhang M M, Buekens A, Li X D. *J Hazard Mater*, 2016, 304:26~39.
- [16] Ezechiás M, Covino S, Cajthaml T. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2014, 110: 153~167.
- [17] He Q X, Tang L, Fu T, Shi Y Q, Wang X L, Wang Y Z. *RSC Adv*, 2016, 6(57): 52485~52494.
- [18] Chen X L, Feng X L, Jiao C M. *J Therm Anal Calorim*, 2017, 129(2):1~7.
- [19] Sonnier R, Dumazert L, Livi S, Nguyen T K L, Duchet R J, Vahabi H, Laheurte P. *Polym Degrad Stab*, 2016, 134:186~193.
- [20] Xiao F, Wu K, Luo F B, Guo Y Y, Zhang S H, Du X X, Zhang S H, Zhu Q Q, Lu M G. *J Mater Sci*, 2017, 52(24):13992~14003.
- [21] 李艳伟, 李德民, 叶建. *消防科学与技术*, 2013, 32(4):434~437.
- [22] 陈龙. 咪唑基离子液体修饰的氢氧化镁对聚乙烯性能的影响. 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2009.
- [23] 桂豪冠. 功能性离子液体对聚乳酸热行为的影响. 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2014.
- [24] 郑香允. 离子液体修饰碳纳米管对环氧树脂改性的研究. 天津: 天津科技大学硕士学位论文, 2016.
- [25] 姜华振, 焦传梅. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(4): 78~83.
- [26] 冯晓琳. 含氟磷酸盐型离子液体协同阻燃热塑性聚氨酯弹性体复合材料的研究. 青岛: 青岛科技大学硕士学位论文, 2016.
- [27] 王洪志. 离子液体改性空心材料阻燃 TPU 的研究. 青岛: 青岛科技大学硕士学位论文, 2018.
- [28] 黎航, 刘志鹏, 杨政, 凌敏, 张蕤. *林业工程学报*, 2017, 2(4): 77~83.
- [29] Yang X F, Ge N L, Hu L Y, Gui H G, Wang Z G, Ding Y S. *Polym Adv Technol*, 2013, 24(6):568~575.
- [30] 张忠州, 王磊, 路敏, 蒋成, 彭辉, 牛明军. *包装工程*, 2019, 40(15):1~10.
- [31] 李菲, 江贵长, 张凌昊, 陈明芬, 赵忆鑫. *包装工程*, 2019, 40(15):98~103.
- [32] Chen S J, Li J, Zhu Y K, Guo Z B, Su S P. *J Mater Chem A*, 2013, 1(48): 15242~15246.
- [33] Chen S J, Li J, Zhu Y K, Su S P. *RSC Adv*, 2014, 4(62):32902~32913.
- [34] Chen S J, Wang C L, Li J. *Thermochim Acta*, 2016, 631:51~58.
- [35] Wang C L, Wang Z J, Li J. *J Appl Polym Sci*, 2017, 134(44):45491.
- [36] 丛佳玉, 张世锋, 张求慧. *林业工程学报*, 2018, 3(3): 95~101.
- [37] Chen X L, Ma C Y, Jiao C M. *RSC Adv*, 2016, 6(71):67409~67417.
- [38] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang, Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A. *Sci*, 2004, 306 (5696): 666~669.
- [39] Sang B, Li Z W, Li X H, Yu L G, Zhang Z J. *J Mater Sci*, 2016, 51 (18): 8271~8295.
- [40] Gui H G, Xu P, Hu Y D, Wang J, Yang X F, Ali B, Ding Y S. *RSC Adv*, 2015, 5(35):27814~27822.
- [41] Hu Y D, Xu P, Gui H G, Wang X X, Ding Y S. *Composites Part A: Appl Sci Manufact*, 2015, 77:147~153.
- [42] Xiao F, Wu K, Luo F B, Yao S, Lv M P, Zou H M, Lu M G. *J Mater Sci*, 2018, 53 (14):10135~10146.
- [43] 李晖, 吕黄飞, 陈美玲, 刘嵘, 费本华. *林业工程学报*, 2018, 3(3): 12~17.
- [44] 胡云, 薄采影, 刘承果, 冯国东, 贾普友, 周永红. *林业工程学报*, 2019, 4(3): 100~105.
- [45] Boukhriss A, Gmouh S, Hannach H, Roblin J P, Cherkaoui O, Boyer D. *Cellu*, 2016, 23(5):3355~3364.
- [46] Bentis A, Boukhriss A, Boyer D, Gmouh S. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 254:122001.
- [47] Bae S Y, Shim E G, Kim D W. *J Power Sources*, 2013, 244:266~271.
- [48] Kim H T, Kang J, Mun J, Oh S M, Yim T, Kim Y G. *ACS Sustain Chem Eng*, 2016, 4(2):497~505.
- [49] Guo Q P, Han Y, Wang H, Xiong S Z, Sun W W, Zheng C M, Xie K. *J Phys Chem C*, 2018, 122(19):10334~10342.

# Research Progress of Ionic Liquids in the Field of Flame Retardancy

QU Zhen-cai

*(School of Packaging and Printing Engineering, Henan University of Animal Husbandry & Economy, Zhengzhou 450011, China)*

**Abstract:** As an emerging green solvent, ionic liquids have the advantages of low vapor pressure, high thermal stability, good designability and non-combustibility, and have been widely used in various fields. With the increasing attention to fire safety, the research and development of flame-retardant materials with low (low) toxicity, low smoke, and environmental protection has gradually become the development direction of the flame-retardant field. This review briefly summarizes the latest research progress of ionic liquids in the field of flame retardancy in recent years, focusing on the flame-retardant mechanism and progress of ionic liquids in polymer matrices, and also introduces the application of ionic liquids in cotton fabrics, lithium-ion batteries and other materials. Finally, the application prospect of ionic liquids is prospected.

**Key words:** Ionic liquids; Green solvent; Polymer matrix; Flame retardant