环境与资源
2024 年 9 月第 6 卷第 3 期

阻燃聚苯乙烯的最新研究进展

张琳琳　姜宛彤　向一夫　杨芷欣　房美琦　张洪涛

沈阳理工大学环境与化学工程学院，沈阳

摘　要 | 聚苯乙烯（PS）是一种多功能材料，具有优异的机械性能、电性能、耐气候老化性，还具有优良的加工成型性能。但是聚苯乙烯是一种易燃的材料，当其暴露于空气中时，其表面会形成一层极薄的可燃物质，在一定程度上降低了聚苯乙烯的阻燃性能。因此，必须对聚苯乙烯进行阻燃改性，以提高其阻燃性能。本文从阻燃性能的角度出发，综述了阻燃聚苯乙烯材料的最新研究进展，介绍了通过聚合阶段阻燃法、后处理涂层法阻燃、浸渍阶段添加法阻燃和包覆法阻燃的研究进展，对其阻燃性能进行了分析和总结，旨在为制备具有较好阻燃性能的阻燃聚苯乙烯材料提供新思路。

关键词 | 聚苯乙烯；阻燃剂；阻燃方法

Copyright © 2024 by author (s) and SciScan Publishing Limited
This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

1　引言

聚苯乙烯（PS）是一种广泛使用的通用工程塑料，具有优异的机械性能、电性能、耐气候老化性、耐化学腐蚀性、抗微生物侵蚀性，还具有优异的热稳定性和冲击强度。其用途十分广泛，如电子电器零件，机械零件，包装材料，

通讯作者：张琳琳，沈阳理工大学环境与化学工程学院在读研究生，研究方向：材料化工安全工程。
文章引用：张琳琳，姜宛彤，向一夫，等．阻燃聚苯乙烯的最新研究进展［J］．环境与资源，2024，6（3）：25–32.
https://doi.org/10.35534/er.0603003

车辆等。但是，聚苯乙烯属于易燃材料，当其暴露于空气中时，其表面会形成一层极薄的可燃物质，当这层可燃物质与空气中的氧气接触时就会发生燃烧反应释放出大量的烟雾和有毒气体，严重影响工作环境和健康安全。因此，必须对聚苯乙烯进行改性以提高其阻燃性能。

对阻燃聚苯乙烯材料的研究大致可分三大类：（Ⅰ）聚合阶段阻燃法；（Ⅱ）后处理涂层法阻燃；（Ⅲ）浸渍阶段添加法阻燃；（Ⅳ）包覆法阻燃。本文将按照上述分类对阻燃聚苯乙烯材料进行分析和总结，并针对该材料的制备方法以及阻燃性能等方面进行综述。

2 聚合阶段阻燃法

聚合阶段阻燃法是指将阻燃剂与聚苯乙烯（PS）混合后在高温聚合过程中发生交联反应，从而使聚苯乙烯（PS）阻燃效果大大提高。常见的阻燃剂主要包括磷系，氮系，硅系，金属氧化物，硼系等，本文主要介绍了氮磷系阻燃剂和硅系阻燃剂。

2.1 氮 / 磷系阻燃剂

常见的氮系阻燃剂包括聚磷酸铵及其衍生物、尿素等，通过高温下分解出惰性气体以实现气象阻燃，其稳定性较好但成炭效果较差阻燃效率不佳，因此常与磷系阻燃剂复配使用。磷系阻燃剂燃烧过程中分解自由基能捕捉活跃自由基从而实现阻燃同时也能促进材料脱水成炭以实现较好的阻燃效果。如唐刚等人[1]采用熔融共混法制备复合材料聚苯乙烯/次磷酸铝（PS/AHP）。当添加20%的次磷酸铝时，复合材料相比于纯聚苯乙烯材料复合材料的热释放速率峰值（PHRR）降低40.5%，总热释放量（THR）降低18.9%。极限氧指数（LOI）值达到24%，并且通过UL-94测试可以达到V-0级。鲍大顺等人[2]以石墨烯（GN）改性聚苯乙烯（PS）制备了阻燃型 PS/GN 材料，并研究其力学性能、热学性能等。研究表明：KH-550 成功接枝到了 GN表面。随着 GN掺量的增加，PS/GN保温材料的力学性能、耐热性能逐渐提高，导热系数逐渐降低。GN掺量未超过 0.3% 时，PS/GN 保温材料的力学性能、耐热性能增长显著，导

热系数增长不大。GN的最佳掺量为 0.3%，此时 PS/GN 保温材料的压缩强度提高 37.2%，起始降解温度提高 29℃，质量残留量提高0.7%，导热系数为0.037 1 W/（m · K）郑兰兰等人[3]开利用三步简单、高收率的反应对聚苯乙烯进行功能化改性实现了聚苯乙烯的磷酸酯功能化改性，制备磷酸酯功能化的聚苯乙烯 PS-P 材料。PS-P 材料的最大放热温度、最大放热速率和总放热量相比于聚苯乙烯原料均有大幅度下降，质量分数 3%的 PS-P 材料的加入即可使原材料具有阻燃性，达到 UL-94 标准下的 V-2 等级以及 LOI为21.5%。

2.2 硅系阻燃剂

硅系阻燃剂是指以硅化合物为原料合成的一种新型环保阻燃材料，燃烧时在材料表面形成致密的炭层，从而实现凝聚相阻燃。目前用的阻燃剂材料包括硅酸盐、有机硅树脂等，对硅系阻燃剂进行研究开发的主要方法有：将有机硅化合物与其他物质共混，以达到协同效应；将有机硅化合物与阻燃剂、增塑剂等其他材料复配；将有机硅化合物与无机阻燃剂复配，以达到降低成本、提高阻燃性能、提高阻燃剂稳定性等目的。如：Li等人[4]制备了用Co_3O_4修饰内壁的介孔二氧化硅SBA-15（SBA-15@Co_3O_4），通过熔融共混制备了PS/2SBA-15@Co_3O_4，与纯PS和PS/SBA-15复合材料相比，添加了2wt%SBA-15@Co_3O_4的PS复合材料（PS/2SBA-15@Co_3O_4）阻燃效果更好，其着火时间（TTI）为116 ± 2s，明显高于PS（98 ± 1s）和PS/2SBA-15（106 ± 1s），PHRR值降低了24.1%。李君等人[5]合成了介孔SBA-15型二氧化硅材料，对其进行烷基化处理后加入IFR阻燃剂制得复合材料PSBA/PP/IFR，其LOI值达到30%，TTI为39s，PHRR降低至145KW/m2，燃烧后形成致密的炭层达到高效阻燃的效果。

3 后处理涂层阻燃法

在 PS 泡沫塑料表面涂覆具有阻燃性能的膨胀涂层或包覆不燃性板材，如涂覆硅酸盐水泥灰膨胀型防火涂料或包覆石膏板等，都是可取且有效的阻燃方式[6]。Xia等人[7]以磷基水处理剂1-羟基乙基-1，1-二膦酸（HEDP）为原料，用氨水中和，合成了其铵盐1-羟基乙基-1，1-二膦酸铵（HEDPA），将

https://doi.org/10.35534/er.0603003

HEDPA溶液加热浓缩直至形成晶体然后将结晶HEDPA与季戊四醇（PER）和三聚氰胺混合（MEL）生产HEDPA-PER和改进的HEDPA-PER-MEL系统作为环保友好膨胀阻燃剂（IFR），均匀涂覆于PS表面，该体系表现出较好的阻燃性和与PS基体的相容性与MEL具有协同效应，当HEDPA/PER比例为5∶1时阻燃效果最佳。在MEL浓度为1.0%时，协同效应最大，合成的氧指数上升到28.3%，垂直燃烧率达到V-0级别。郭晓荣等人[8]通过将改性葡萄糖酸钙（MCG）、聚磷酸铵（APP）制备膨胀阻燃体系，通过后处理涂层法阻燃挤塑聚苯乙烯泡沫板（XPS）。当APP和MCG的质量比为3∶1时，复合材料燃烧时会在表面形成致密的炭层，实现良好的阻燃效果。其LOI值升高至32.4%，通过UL-94测试达到V-0级。

4 浸渍阶段阻燃

这种加料方法多为二步法中，其制备方法为：将阻燃剂在发泡剂中均匀掺混，在浸渍过程中向 PS溶液中添加阻燃剂，在特定的温度、固定的气压下将其发泡，并通过发泡剂作为发泡剂将阻燃剂引入到 PS中。范渊源等人[9]采用水溶性$MgSO_4$/MgO混合物浸渍制得阻燃PS复合材料，当$MgSO_4$∶MgO∶H_2O加入质量比为5∶5∶10时，复合材料的LOI值达到33.5%，具有较低的导热系数和密度，阻燃效果较好。不仅可以提高其阻燃性能，同时还可以增强其压缩强度，适合于保温层和楼体建筑外层的应用。洪晓东等人[10]采用悬浮聚合法制备了聚苯乙烯（PS）包覆水镁石（MH）阻燃剂，当阻燃剂填加30%时，包覆MH阻燃材料的氧指数为25.3%，比普通MH阻燃试样增加0.8百分点，垂直燃烧熄灭时间略低于MH阻燃材料；包覆MH阻燃材料的拉伸强度和冲击强度分别为50.9MPa和10.9 kJ/m^2，比普通MH阻燃试样分别提高18.9%和45.3%。

5 包覆法阻燃

包覆法是一种在聚合物基体表面包覆阻燃材料的方法。这种方法不仅可以改善聚合物的物理性能，还可以提高其阻燃性能，是一种较为常用的聚合物阻燃剂。本文主要提到两种包覆方法：树脂包覆法、硅酸盐包覆。

5.1 树脂包覆法

树脂包覆法是通过在聚苯乙烯表面包覆阻燃剂的方法，阻燃剂可以作为催化剂和成膜剂，在聚苯乙烯树脂中形成一层或多层具有阻燃功能的聚合物膜。该方法是一种环保、无污染的阻燃方法，它可以用于多种聚合物的阻燃，适用于提高聚合物的热学性能、力学性能等。如Cao等人[11]将三聚氰胺改性脲醛树脂（MUF）与膨胀型阻燃剂（IFR）共混后包覆于预发泡聚苯乙烯（PS）颗粒表面，制备阻燃可发性PS泡沫。通结果表明，涂覆IFR后，EPS泡沫的峰值热释放速率从406kW/m^2显著降低到49kW/m^2，LOI值可达36.3%，达到V-0级。刘喜山等人[12]通过聚磷酸铵、硼酸锌与蒙脱土（MMT）、二硫化钼（MoS_2）和可膨胀石墨（EG）进行复配，使用三聚氰胺改性脲醛树脂包覆聚苯乙烯泡沫。对比不同组分阻燃体系对聚苯乙烯材料阻燃及抑烟效果的影响。证明了，当所添加EG与硼酸锌的量为24phr且二者的质量比为2∶1时，复合材料受热燃烧生成的炭层均匀且致密，复合材料的LOI值达到32.6%，烟密度等级降低至27.31，通过了UL-94垂直燃烧测试达到V-0级。李永庆[13]在发泡聚苯乙烯表面包覆以酚醛树脂为基体，有机-无机的复合材料。其导热系数为0.039W/m℃，LOI值升高至30.5%，燃烧过程中无滴落，产生烟气量较少且增加了其抗压强度。

5.2 硅酸盐包覆法

硅酸盐包覆法是将硅系阻燃剂通过熔融共混方式加入聚苯乙烯中，然后通过熔融共混方法使硅系阻燃剂包覆在聚苯乙烯基体中。这种方法的优点是工艺简单，且能够使聚苯乙烯基体保持稳定，并且可以通过调节硅系阻燃剂的添加量来调节聚苯乙烯的热稳定性。宋秀龙等人[14]采用溶解吸附法用氯化石蜡包覆硅藻土制备出复合阻燃剂，并将其加入到 PS中进行阻燃改性，制得阻燃性能优良、力学性能优异的复合材料，当硅藻土与氯化石蜡质量比为 1∶1，阻燃剂添加量为 30wt%时，阻燃效果最好，LOI 达到 27.6%，UL-94 达到 V-0 级，同时只有微量烟产生；其残重量与纯 PS 对比有明显提高，达到 22.1%。陈巧玲[15]用硼酸改性的聚硅酸钠涂料（BSPS），复合可膨胀石墨（EG）对EPS进行包覆。当BSPS与EG的比例为22∶3时，复合材料的LOI值提高至29.5，PHRR降低

https://doi.org/10.35534/er.0603003

了360.8KW/m^2（相比于原材料降低了68.9%），THR降低了26.4MJ/m^2（相比于原材料降低了31.3%），且在燃烧时在材料表面形成的炭层致密且均匀，阻燃性能较好。

6 结论及展望

PS板由于其优异的保温、阻燃性能被广泛应用于建筑领域，但由于其易燃、可燃特性，导致了其在使用过程中发生火灾时会分解产生有毒气体，导致人身安全以及环境安全的危害。因此，人们采取了各种方法来提高PS板的阻燃性。其中包括添加阻燃剂，这些添加剂可以在PS板的生产过程中被均匀地添加到树脂中，以此形成保护层，降低火焰接触时的温度。然而，使用传统卤系阻燃剂时，在燃烧过程中产生的有毒气体却是一个不容忽视的安全隐患。这些有害气体不仅会影响工人的身体健康，还可能污染空气质量，给环境带来长期的负面影响。

鉴于此，近年来，人们开始研究更加低烟、环保且高效的含磷型、硅型等无卤阻燃技术。这种新型无卤阻燃剂的开发，代表着阻燃材料科学领域的一个重要进步。它不仅有助于减少火灾事故中的危害，还为可持续发展和生态保护提供了新的方向。随着科研人员对这些新型材料的深入研究，预计未来几年内将会有更多创新成果投入实际应用，推动建筑材料阻燃技术向前发展。

参考文献

[1] 唐刚，王九武，翟彬旭，等．聚苯乙烯/次磷酸铝复合材料的制备及阻燃性能［J］．塑料，2015，44（2）：5-8.

[2] 鲍大顺．石墨烯制备阻燃型聚苯乙烯保温材料的力学性能和热学性能研究［EB/OL］．［2024-06-06］．http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1145.TQ.20240522.1419.002.html.

[3] 郑兰兰，王欣雨，周莉，等．磷酸酯功能化聚苯乙烯的制备及其阻燃改性聚乳酸的研究［J］．当代化工，2023，52（12）：2785-2789.

[4] Li Z，Wang D．Nano-architectured mesoporous silica decorated with ultrafine

Co3O4 toward an efficient way to delaying ignition and improving fire retardancy of polystyrene［J］. Materials & Design，2017.

［5］李君．介孔二氧化硅SBA-15对聚合物膨胀阻燃的协效作用［D］．上海交通大学，2010.

［6］张胜，李玉玲，谷晓昱，等．聚苯乙烯泡沫塑料阻燃方法的研究进展［J］．塑料，2013，42（4）：37-41.

［7］Xia Y，Mao Z，Jin F，et al. Synthesis of 1-hydroxy ethylidene-1，1-diphosphonic ammonium and the promise of this ammonium salt as an intumescent flame retardant in polystyrene［J］. Polymer Degradation and Stability，2014，102（APR.）：186-194.

［8］郭晓荣，耿江涛，孙斌，等．葡萄糖酸钙阻燃涂层对挤塑聚苯乙烯泡沫板的阻燃改性［J］．应用化工，2021，50（5）：1188-1191.

［9］范渊源，徐翔宇，刘波．无机物浸渍聚苯乙烯泡沫塑料阻燃性能的研究［J］．塑料科技，2020，48（9）：27-30.

［10］洪晓东，代文娟，肖阳，等．聚苯乙烯悬浮聚合包覆水镁石及阻燃环氧树脂的研究［J］．非金属矿，2013，36（6）：4-6.

［11］Cao B，Gu X，Song X，et al. The flammability of expandable polystyrene foams coated with melamine modified urea formaldehyde resin［J］. Journal of Applied Polymer Science，2017，134（5）.

［12］刘喜山，曹博，纪文斐，等．二维层状无机物/硼酸锌复合体系对聚苯乙烯泡沫阻燃性能的影响［J］．材料工程，2019，47（6）：101-107.

［13］李永庆．无卤阻燃聚苯乙烯保温板生产工艺研究［J］．橡塑技术与装备，2020，46（12）：22-24.

［14］宋秀龙．聚苯乙烯/硅藻土/氯化石蜡复合阻燃材料的制备及性能研究［D］．太原理工大学，2015.

［15］陈巧玲．无卤包覆阻燃聚苯乙烯泡沫及其机理研究［D］．北京化工大学，2023.

https://doi.org/10.35534/er.0603003

The Latest Research Progress of Flame Retardant Polystyrene

Zhang Linlin　Jiang Wantong　Xiang Yifu　Yang Zhixin
Fang Meiqi　Zhang Hongtao

School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Polytechnic University, Shenyang

Abstract: Polystyrene (PS) is a multi-functional material, with excellent mechanical properties, electrical properties, weathering resistance, but also has excellent processing and forming properties. However, polystyrene is a flammable material, and when it is exposed to air, its surface will form an extremely thin layer of flammable substances, which reduces the flame retardant performance of polystyrene to a certain extent. Therefore, flame retardant modification of polystyrene must be carried out to improve its flame retardant performance. The commonly used flame retardants are mainly nitrogen and phosphorus flame retardants and silicon flame retardants. In this paper, several common flame retardant methods of polystyrene are briefly introduced, their flame retardant mechanism is analyzed and compared, and the flame retardant modification methods and processes of different types of polystyrene in the process of processing and molding are discussed.

Key words: Polystyrene; Flame retardant; Flame retardant method