文章编号：1008-1542(2022)04-0407-10

废聚苯乙烯泡沫塑料综合利用研究进展

王　琰，于浩然，刘子欣，刘　欢，徐智策，王建英

（河北科技大学化学与制药工程学院，河北石家庄　050018）

摘　要：聚苯乙烯泡沫具有质量轻、表观密度低、不易分解、廉价等优点，是当下应用最广泛的塑料制品之一。同时其废弃物的丢弃量也越来越大，这种聚苯乙烯泡沫废弃物在大自然中难以降解，燃烧还会产生有毒物质，导致回收处理难度较大，给环境带来了很多问题。如果将废聚苯乙烯泡沫塑料（WFPS）进行回收或者资源化利用，不仅能改善环境问题，而且符合“低碳”理念。对 WFPS 的回收包括溶剂回收、热解回收等方法进行了详细地介绍，重点综述了 WFPS 在能源领域、建筑领域和环境保护领域的资源化再利用的研究现状。结合中国 WFPS 的回收现状对其今后回收与再利用技术研究前景作出了展望：1）兼顾经济与环保的规模化溶剂回收技术的开发；2）催化裂解回收单体的高效催化剂的研发；3）聚焦高附加值的 WFPS 资源化利用技术研究。

关键词：塑料、橡胶和纤维；废聚苯乙烯泡沫塑料；回收；资源化利用；聚合物

中图分类号：TQ319　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7535/hbkd.2022yx04008

Research progress on comprehensive utilization of waste foamed polystyrene plastics

WANG Yan，YU Haoran，LIU Zixin，LIU Huan，XU Zhice，WANG Jianying

(School of Chemical and Pharmaceutical Engineering，Hebei University of Science and Technology，Shijiazhuang，Hebei 050018，China)

Abstract： Polystyrene foam is one of the most widely used plastic products because of its light weight，low apparent density，uneasy decomposition，low cost and so on. At the same time，the amount of waste is also increasing，and this kind of polymer is difficult to degrade in nature and its combustion will produce toxic substances. The different recovery of the waste brings a lot of problems to the environment. Recycling or resource utilization of WFPS can not only improve the environment，but also conform to the concept of " low carbon". The recovery methods of WFPS，including solvent recovery and pyrolysis recovery，were introduced in detail. The recycling and reuse of WFPS in the fields of energy，construction and environmental protection were summarized. It is pointed out that the WFPS recovery technology with high-efficiency，environmental

收稿日期：2022-01-21；修回日期：2022-06-02；责任编辑：王淑霞

基金项目：河北省自然科学基金（B2020208090）

第一作者简介：王　琰（1998—），男，河北廊坊人，硕士研究生，主要从事绿色化工方面的研究。

通讯作者：王建英教授。E-mail：jenneywjy@163.com

王琰，于浩然，刘子欣，等.废聚苯乙烯泡沫塑料综合利用研究进展[J].河北科技大学学报，2022，43(4)：407-416.

WANG Yan，YU Haoran，LIU Zixin，et al.Research progress on comprehensive utilization of waste foamed polystyrene plastics[J].Journal of Hebei University of Science and Technology，2022，43(4)：407-416.

protection and low-cost needs to be further developed. Combined with the recycling status of WFPS in China, the prospects of recycling and reuse technology of WFPS in the future are proposed as following: 1) Development of large-scale solvent recovery technology that takes into account both economy and environmental protection; 2) Research and development of high-efficiency catalysts for catalytic cracking and recovery of monomers; 3) Focusing on high value-added WFPS resource utilization technology research.

Keywords: plastics, rubber and fibers; waste foamed polystyrene plastics; recovery; resource utilization; polymers

聚苯乙烯(polystyrene,PS)是由苯乙烯聚单体合成的一种高分子聚合物,分子式为 ,是五大通用合成树脂之一。聚苯乙烯的全球年产量超过2 000万t,生产量已排名世界塑料第4位,需求量仍在持续增长[1]。

可挥发性聚苯乙烯(expandable polystyrene,EPS)指含有发泡剂、一旦受热能立即发泡膨胀的珠粒状聚苯乙烯树脂[2]。随着聚苯乙烯类制品的使用范围越来越广,使用后丢弃的废聚苯乙烯泡沫塑料(waste foamed polystyrene plastics,WFPS)的数量也越来越多,给环境带来了很多问题。这种高分子聚合物难以降解且燃烧会产生有毒物质。在回收处理上不适合采用一般废弃物一样集中堆放、掩埋或焚烧等处理方式。如何有效合理地利用WFPS资源,最大限度地降低其对环境造成的危害,是近年来各国政府在环保领域努力的重点方向之一[3]。

目前,国内外WFPS的回收主要分为溶剂回收、热解回收单体等。溶剂回收利用WFPS在有机溶剂中的溶解特性,使其体积减少100倍以上(而聚合物链不会降解),采用不同的溶剂溶解回收聚合物。同时因为在废弃物生产地直接溶解,故从经济上考虑比传统的回收方法更有利[4-5]。热解回收单体是指在适当的热解条件下(一般在无氧和高温条件下),将WFPS转化为单环芳香化合物,以及少量的碳和气体。

与回收方法相比,WFPS资源化利用更具价值。目前,WFPS资源化利用主要有如下几种途径。1)将WFPS热解制成燃料油,实现能源领域燃料油的部分替代;也可以通过各种物理或化学方法如静电纺丝法制备储能材料[6]。2)WFPS作为废弃物还可以直接应用到建筑材料行业,比如外墙保温材料、隔音材料,开发廉价和轻便的混凝土、砖等[7]。3)通过烷基化交联等方法将WFPS制成多孔吸附材料,如交联聚苯乙烯,用于环境保护领域的污水处理或者气体吸附净化等。

本文介绍废弃聚苯乙烯泡沫溶剂回收、热解回收单体,重点对WFPS的资源化再利用,包括在能源领域、环境保护领域和建筑材料行业的应用,并对未来WFPS的回收与资源化再利用前景进行展望。

1 WFPS的回收

1.1 溶剂回收

溶剂回收的一般过程包括去除杂质(如阻燃剂、分散剂和其他塑料添加剂)、溶解(均相或非均相溶解)以及再沉淀或挥发溶剂[8],也可以通过把溶剂聚合到聚合物里进行回收(见表1)。MUMBACH等[9]采用溶解再聚合技术研究了WFPS的回收,使其以最大速率溶解在苯乙烯(其单体)中,然后对该溶液进行悬浮聚合,将单体(溶剂)并入聚合物链中,避免需要分离聚合物和溶剂,同时该研究探讨了该过程的最佳操作条件。采用有机溶剂溶解聚苯乙烯,虽然可以通过体积缩减解决低密度、运输成本高的问题,但通常使用的有机溶剂一般为有毒的甲苯、二甲苯、苯、氯仿等,使用传统的有机溶剂对WFPS进行回收昂贵且难以满足环保要求。

表1 WFPS在溶剂回收方面的应用

Tab.1 Application of WFPs on the field of solvent recovery

溶剂种类	特点	参考文献序号
苯乙烯	利用苯乙烯将WFPS溶解后直接并入聚合物链中,简化了回收步骤	[9]
d-柠檬烯	主要来源为植物,绿色、无毒	[10]
商业天然油	相对于d-柠檬烯溶解速率有更快的溶解速率	[12]

植物精油回收 WFPS 具有成本低、无污染等特点。植物精油如 d-柠檬烯类以及其他植物提取油是一种被归类为萜烯的碳氢化合物，这些化合物是一大类天然产物，来源广泛，已在高等植物的根、茎、叶、花、果实和种子中鉴定出约 30 000 种。刘环宇等[10]研究表明从柑橘皮香精油中提取出的 d-柠檬烯，对 WFPS 起到了很好的溶解作用，并且过程无污染。d-柠檬烯溶解 WFPS 的量与一些传统的有机溶剂相同，但存在收率低、提取成本高的问题。商业天然油是回收 WFPS 的一种更环保、更有前途的溶剂[11-12]。GIL-JASSO 等[12]报道了一种使用商业天然油的方法回收 WFPS，天然油脂的来源有八角茴香、洋甘菊、百里香和桉树，聚苯乙烯完全溶解，最大质量比为 1∶1，这种溶解时间至少比柠檬烯快 4 倍，且溶剂精油可简单回收再利用。GIL-JASSO 等[13]还报道了一种利用花精油回收 WFPS 的方法，研究对象包括橙花、茉莉花、百合、薰衣草等，每种精油的溶解时间和最大溶解浓度与使用常用溶剂所报道的值相当。如表 1 所示，对 WFPS 的有效溶解主要是由于其含有高含量萜类及其衍生物。在植物精油回收过程中，所有 WFPS 和天然油脂都可以实现有效回收。

与传统有毒的有机溶剂相比，萜烯类化合物在回收 WFPS 方面具有更好的环境友好性，而橘皮精油类提取物由于其原料廉价，相对于花精油等产品在成本方面更具优势。

1.2　裂解回收苯乙烯单体

热解(pyrolysis)又称裂解或者高温分解，是指聚合物材料在惰性气体条件下利用热量进行分解的过程。该过程通常在 350～900 ℃的温度下进行，这个过程可以是热裂解，也可以是催化裂解[14]。WFPS 的热解主要取决于反应温度、反应时间、反应器类型、催化剂的类型及存在方式等反应条件。使用合适的催化剂进行催化热解，除了能降低反应温度，还可以影响产物收率及其分布[15]。

1.2.1　热裂解回收单体

WFPS 在热裂解回收单体方面的研究较为广泛[16-17]。不同类型的反应器(比如间歇和半间歇反应器[18]，锥形喷动床反应器(CSBR)[19-20]、球床反应器[21]等)对 WFPS 的热裂解特点及结果各不相同，如表 2 所示。半间歇反应器的产油量和苯乙烯单体的产率优于间歇反应器。在锥形喷动床反应器中，当温度从 450 ℃升高到 500 ℃时，苯乙烯的产率从 50.8%增加到 70.6%。球床反应器对 WFPS 的热裂解有很大的优势，当热解温度为 500 ℃时，液体产品收率为 91.7%，苯乙烯收率为 85.5%。LU 等[22]使用 TGA 技术发现其在氮气气氛下的最佳热解温度为 420 ℃，液体产物收率高达 76.24%，其中苯乙烯的含量高达 73%。

表 2　WFPS 在热裂解回收单体方面的应用

Tab.2　Application of WFPS in pyrolysis recovery of monomer

反应器类型	特　　点	参考文献序号
半间歇反应器	与间歇反应器相比，产率更高	[18]
锥形喷动床反应器	设计简单，投资少，且不用考虑分离问题	[19]和[20]
球床反应器	对聚苯乙烯的热解效率非常高	[21]

研究人员还考察了各种操作参数对裂解结果的影响，比如 MO 等[23]建立了苯乙烯产率与 3 个操作参数(温度、升温速率和载气流量)之间的数学模型，确定了最佳工艺条件，为热裂解产率优化提供了一种新的思路。

1.2.2　催化裂解回收单体

INAYAT 等[18]采用分层排列的催化剂与混合排列催化剂 2 种方式，探究反应器中催化剂布置对 WFPS 热解和苯乙烯单体收率的影响。结果表明，在 400 ℃下，催化剂(用石英棉分离原料和催化剂)层状排列不仅产油量高，而且对苯乙烯单体有较高的选择性，表明 WFPS 的催化裂解主要发生在气相中。

碱性催化剂对 WFPS 的降解效果优于酸性催化剂。IMANI MOQADAM 等[24]研究了 WFPS 在硅铝催化剂上的热解，结果表明在 410 ℃下，当催化剂与聚合物的质量比为 1∶1 时，有 96%～99%(质量分数，下同)的聚苯乙烯被转化为苯乙烯。PARK 等[25]考察了温度、催化剂性质、催化剂大小、反应时间等因素对 WFPS 催化裂解的影响，在所考察的催化剂中，固体碱 BaO 的催化效率最高，在 350 ℃时苯乙烯产率最高为 84.29%，与热催化和酸催化降解相比，固体碱 BaO 明显提高了苯乙烯的选择性。CELIKGÖĜÜS 等[26]合成了以 Al_2O_3 为载体的 Ni，Cu，Ce，Co 和 La 催化剂。考察了催化剂类型对 WFPS 热解产物及其分布的影响，液体成分主要为苯乙烯单体、乙苯、甲苯、α-甲基苯乙烯和 1，3-二苯基丙烷。在 500 ℃时，Al_2O_3 负载 Cu 催化剂的苯乙烯产率最高为 63.59%。

采用热裂解的方法对苯乙烯单体进行回收，反应器类型的选择以及操作条件的控制极为重要，如果采用催化裂解的方式对苯乙烯单体进行回收，催化剂的酸碱性选择以及反应器中催化剂的布置方式显得尤为重要。

综上所述，溶剂回收和裂解单体回收2种方法是目前研究最多的回收方法，具有回收效率高、回收后产品质量优良等优点，可以实现WFPS的再利用，同时可以生成具有相同固有特性的新产品。它涉及对使用后的聚合物产品进行分类、清洗和干燥，然后再进行熔融处理，以生产新的聚合物材料。然而，WFPS中残留的添加剂、水分和其他污染物会导致在二次熔炼过程中新产品的性能显著恶化[27]。

2 WFPS的资源化利用

2.1 能源领域的应用

2.1.1 WFPS热解制燃料油

与热解回收苯乙烯单体不同的是，这种热解WFPS制燃料油的方法，其目标产物是甲苯、乙苯等，能作为原料油的组分，可以通过控制反应条件或者加入催化剂来达到目的。将WFPS的裂解油用作燃料油，在能源日渐紧缺的今天，对WFPS的资源化利用显得极具研究价值。NISAR等[28]在自制炉中对废聚苯乙烯进行热解，通过与柴油、汽油和煤油的标准参数比较发现，WFPS的热解油具有很好的替代燃料油的应用前景。

WFPS热解用于燃料油生产中，裂解油中苯乙烯的含量越高越会降低产品油的质量。裂解产物的组成分布主要是由WFPS裂解机制所导致的。在没有催化剂的热裂解过程中，聚合物的降解机理通常被认为是自由基机制。而当使用催化剂时，通常是离子机制[14]。WFPS的热解主要是在高温下的随机链断裂如均裂(见图1)，然后是β-断裂(见图2)的传递，导致热解产物中含有大量的苯乙烯单体[29-30]。

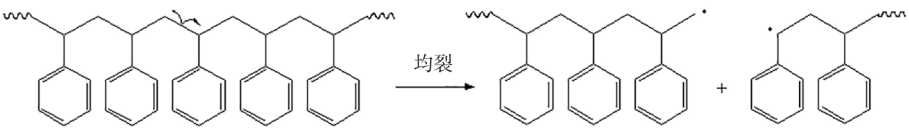

图1 聚苯乙烯链的均裂[29]

Fig.1 Homogenization of polyphenylene chain[29]

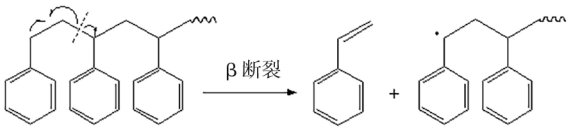

图2 聚苯乙烯链的β断裂[29]

Fig.2 β-fracture of polystyrene chain[29]

在热解过程中，使用催化剂可以降低反应温度，提高产物选择性，得到质量更好的产品。因此，可以对WFPS进行催化裂解，以获得可用作燃料的、有价值的碳氢化合物[31]。例如，VERMA等[31]在一种自制的反应器中以ZSM-5为催化剂，对WFPS进行了催化裂解研究。结果表明，AB型/多相催化裂解得到的产品油中乙苯(甲苯和乙苯是汽油中用于提高辛烷值的燃料成分)含量最高为28.12%，苯乙烯含量最低为46.30%。NISAR等[32-33]研究了聚苯乙烯在氧化铜、掺镍CuO存在条件下的热解，在最佳反应条件下，液体产率最高可达到87.34%。收集的原油主要由2-丙酮/b-酮丙烷、1,3-二苯丙烷、2-丙酮、甲苯、乙苯、1-羟基-2-丙酮、苯乙烯和甲基苯乙烯组成。裂解油用作燃料油不仅需要限制其化学成分，其物理性质也要符合燃料油的标准。MIANDAD等[34]研究了反应温度和反应时间对WFPS热解制得液体油的动态黏度、运动黏度、密度、倾点、凝固点和闪点的影响。

以上研究表明，控制裂解油中苯乙烯单体的量需要相对更高的温度，提高了工艺难度及成本，所以选择合适的催化剂不仅可以降低反应温度，同时还能够有选择性地得到目标产物。

2.1.2 WFPS用于储能材料

除了热解产生燃料油以外，国内外学者还在相变储能材料、燃料电池膜材料、电容器材料的开发等能源领域对WFPS开展了广泛研究。

相变储能技术对于缓解能源短缺风险具有重要意义，可以解决热能供需时间和空间不匹配的问题[35-36]。LIU 等[37]利用废弃聚苯乙烯泡沫作为储热材料，采用形状稳定化方法，实现了原位相变材料（phase change material，PCM）封装策略。PCM 对石蜡的包封率可达 68.7%，且无泄漏。与原始石蜡相比，导热系数可提高 61.0%。此外，在电池材料方面，WFPS 也显示出较好的应用性能。JALAL 等[38]利用废旧包装的 WFPS，采用静电纺丝法制备了电纺聚苯乙烯膜，用作氢燃料电池中的阳离子交换膜。通过磺化反应对电纺 WFPS 膜进行了化学改性，通过延长磺化时间，可使膜的离子电导率最高达到 2.857 mmol/g，质子电导率最大为 8.8×10^{-4} S/cm。DEKA 等[39]利用廉价易得的 WFPS 作为原料，合成了一系列氮杂多孔炭（PSC-3-700 型）材料，适用于超级电容器和电容去离子等电容型应用。

在能源供应越发紧张的今天，将 WFPS 应用在储能材料、燃料电池膜材料等方面，虽然提供了一种新的处理废塑料废弃物的思路，但是其研究并不深入，且产品的实际应用效果很少能达到工业化应用的水平，所以对 WFPS 在上述方面的应用研究还需要深入与拓展。

2.2　环境保护领域的应用

2.2.1　WFPS 用于污水处理

水污染主要包括电镀、采矿、电池生产和运输的重金属污染以及纺织、制革、造纸和油墨等行业的染料污染等[40-41]，开发简便的污水处理工艺具有非常重要的意义。如表 3 所示，YASSIN 等[42]通过 Michael 加成反应和 Schiff 碱反应，将辣根过氧化物酶（HRP）共价固定在改性聚苯乙烯泡沫塑料上。与游离的 HRP 相比，固定化酶在较高的 pH 值和温度下表现出良好的耐受性以及重复使用性。LIU 等[43]以壳聚糖（CS）、WFPS 为基料，通过 Friedel-Craft 反应制备了一种改性复合材料（PS-CS），PS-CS 对刚果红（CR）和活性红（RR24）有较大的吸附容量和良好的循环使用性。PU 等[44]利用 WFPS 和 N，N′-二环己基碳二亚胺（DCC）通过 Friedel-Craft 反应制备了一种磁性酰胺化改性聚苯乙烯（Fe_3O_4/PS-SD）。Fe_3O_4 的引入提高了热稳定性，Fe_3O_4/PS-SD 对大容量水样中的亚甲蓝（MB）、藏红 T（ST）和刚果红（CR）有较好的去除效果。DELEÓN-CONDÉS等[45]对 WFPS 经 γ 射线辐照后进行磺化处理，将其作为纳米氧化铁的载体制备出的铁复合材料对靛蓝胭脂红染料的去除率达到 99 %。TRAN 等[46]研究了 WFPS 的磺化以及利用磺化 WFPS 交换去除水中重金属的可行性。结果表明，磺化聚苯乙烯对锌、铜和镉的最大吸附量分别为 4.09，4.58 和 4.04 mg/g。

表 3　WFPS 污水处理方面的应用研究

Tab.3　Application of WFPS on the field of wastewater treatment

吸附剂	应用效果	参考文献序号
HRP@PDA/EPS	较高的 pH 值和温度耐受性	[42]
PS-CS	对刚果红（CR）和活性红（RR24）有较大的吸附容量	[43]
Fe_3O_4/PS-SD	较好的热稳定性以及对亚甲蓝（MB）、藏红 T（ST）和刚果红（CR）有较好的去除效果	[44]
FeO-NPs + iS-WEPS	对靛蓝胭脂红染料的去除率可达到 99%	[45]
HCP	对污水中 Cd^{2+} 的吸附量最高可达 950 mg/g	[47]

如表 3 所示，对 WFPS 进行简单的化学改性后，将其添加到复合材料中可提高材料的应用性能，但简单的化学改性对 WFPS 附加值的提升是极其有限的，针对其化学结构进行更深入的结构设计更为重要。JIA 等[48]以磺化后的 WFPS 为原料，以低成本的 1，2-二氯乙烷为有机溶剂和交联剂，通过简单的一步法 Friedel-Crafts 烷基化反应制备得到亲水性磺化超交联聚合物（SHCP）吸附剂，研究了在固定床柱中去除废水中 Cd^{3+} 的性能。采用 Thomas 模型拟合柱吸附数据，模拟吸附量为 68.90～80.46 mg/g。随后 MASOUMI 等[47,49]对废聚苯乙烯泡沫塑料基超交联聚合物（HCP）对于污水体中的重金属吸附进行了系统研究，采用响应面法对 HCP 的制备及吸附实验条件进行优化。结果表明，在含有镍、铅离子的二元溶液中对镍吸附容量为 146.47 mg/g，选择性为 0.511；以铅分离为目标时，铅的吸附容量为 137.27 mg/g，选择性为3.971，对 Cd^{2+} 的吸附量最高达到了 950 mg/g。

废聚苯乙烯泡沫塑料基超交联聚合物（HCP）不仅在污水吸附方面有显著效果，在处理大气污染方面也显示出了优越的性能。

2.2.2　WFPS 制备吸附剂用于治理大气污染

CO_2 捕获和存储（CCS）是一种降低大气中 CO_2 含量的技术，目前许多研究致力于 CO_2 的捕获与存储。

FU等[50]以WFPS和1,2-二氯乙烷为原料,通过Friedel-Crafts反应制备超交联聚合物(HCP),研究其对CO_2的吸附性能,结果表明吸附容量最高为1.987 mmol/g。随后FU等[51]又以四氯化碳代替1,2-二氯乙烷为外交联剂,制备的WFPS基吸附剂(HCP-A)对CO_2有更好的吸附能力。在101.3 kPa和273 K条件下,HCP-A吸附剂对CO_2的吸附量为2.521 mmol/g。ZHUANG等[52]以WFPS为原料,采用溶液浇铸法制备出一种用于气体分离的废旧聚苯乙烯膜,并将其应用于O_2/N_2和CO_2/N_2的分离,结果表明这种气体分离膜具有良好的气体分离前景。

以上研究表明,WFPS可以通过简单的一步烷基化反应制备出在气体分离与捕获方面有良好前景的气体吸附分离或捕获材料。

2.3 建筑材料行业的应用

早在20世纪70年代,聚苯乙烯泡沫就作为建筑材料应用在道路建设上[53]。随着应用越来越广泛,其在建筑领域的应用已经占有一席之地。WFPS相较于未使用过的泡沫其物理和化学性能有所降低,导致在建筑领域的应用方式有所不同。

如表4所示,将WFPS混入水泥或者砂浆中可以制备出新型混凝土或砂浆材料,随着WFPS含量的增加,会增加孔隙率降低自重,同时力学性能会相应地降低。或者将其溶解在有机溶剂中再与水泥或者砂浆混合,可以提高其黏接性能,并且符合建筑行业应用需求的特性。

表4 WFPS在各种建筑材料方面的应用

Tab.4 Application of WFPS in various building materials

建筑材料类别	性能	参考文献序号
新型混凝土材料	相比于普通混凝土,其密度、导热系数、抗压强度等性能明显变好	[54]
水泥基砂浆	WFPS的加入会使孔隙率增加,进而降低自重,提高保温性	[55]
水泥-聚合物复合材料	在普通水、地下水和海水中浸泡后,显示出符合建筑行业应用需求的特性	[56]
FPS砂浆	粘结强度是水泥砂浆的2倍以上	[57]
空心和实心砌块	更好的力学性能,可以适用于外墙和内墙的非承重墙体	[58]和[59]

例如KAYA等[54]以WFPS为原料,将其与水泥和西黄胶树脂混合,制备了一种新型混凝土材料,并对其热性能和力学性能进行研究。结果表明,随着WFPS含量和树脂含量的增加,混凝土的密度、导热系数、抗压强度等性能明显变好。KOKSAL等[55]研究了膨胀蛭石和WFPS对水泥基砂浆性能的影响,结果表明将WFPS和膨胀蛭石当作骨料添加到砂浆中,随着比例的增加会使其孔隙率最高达到67.2%,孔隙率的增加会降低自重,提高了保温性,但相应地降低了其抗压强度。ESKANDER等[56]将WFPS溶解在丙酮和甲苯中后,加入体积比为50%的甲苯/树脂溶液,再与水泥混合,得到一种新型水泥-聚合物(CP)复合材料,研究了其在普通水、地下水和海水中浸泡后,对抗压强度、产品质量变化和吸水率的影响。结果表明这种复合材料显示出符合建筑行业应用需求的特性。MILLING等[57]先将WFPS在砂浆中完全替代水泥再混入细骨料用于连接砌体单位,将WFPS微珠溶于丙酮配合砂粒配制了一种新型砂浆,并与普通硅酸盐水泥砂浆进行了对比。结果表明FPS砂浆的粘结强度是水泥砂浆的2倍以上,2种砂浆的透水性和吸水性能相当。ALI等[58-59]将WFPS碎块混入砂浆代替砂浆中的砂,生产空心和实心砌块。实心砌块相较于空心砌块有更好的力学性能,同时两者都可以适用于外墙和内墙的非承重墙体。

将廉价的WFPS作为原料制备出的高附加值材料还可以应用于防火建筑材料,提高阻燃性能。LIU等[60]以WFPS为原料制备出一种超交联聚合物,将其用于建筑阻燃材料,并对其阻燃性能与聚苯乙烯泡沫塑料阻燃材料进行了比较。结果表明其阻燃性能得到了提高。MOGHADDAM FARD等[61]将废旧塑料袋夹在WFPS薄板之间,制作出一种防水、防火保温材料,与对照的EPS板块相比,尽管降低了抗压强度,但显著提高了耐火性和耐水性。

2.4 其他领域的应用

随着WFPS产量迅速增大,其资源化应用领域也在不断拓展。近年来,在化工、材料等领域的研究也引起关注。20世纪90年代有研究报道利用WFPS制备乳胶型黏合剂。目前,WFPS在生产化工产品(胶粘剂、涂料、染料等)方面的研究已较为深入[62]。有研究表明,在使用WFPS为原料制备胶黏剂时,对WFPS进行化学改性,能提升胶黏剂的力学性能和传热性能。制作防水涂料时,对WFPS进行改性,能有效提升其防水性能[63]。利用WFPS制备出黏合剂,将其用作涂改液或者抛光磨石的添加剂[64]。利用静电纺丝技术

将 WFPS 制成的纤维材料在许多领域都是受欢迎的。苏焕幼等[65]利用静电纺丝技术，以 WFPS 为原料，以有机稀土配合物为发光介质，制备出一种具有较强红色荧光发射聚苯乙烯纤维膜，并将其作为配件应用到 LED 灯上。UDDIN 等[66]使用同样的方法，混合 TiO_2/Al 纳米微粒，制备出一种纳米复合材料，将其用作大气雾集水，开发了一种高效、简便、廉价的大气雾集水方法。

综上，目前 WFPS 回收再利用研究多处于研发阶段，距离工业化回收及再利用还有一定的距离。国内工业规模 WFPS 的回收再利用手段主要以熔融造粒为主，例如，山东英科再生公司每年依靠自主研发生产的 Greenmax 泡沫减容机可回收利用 10 万 t 的 WFPS[67]。利用 WFPS 生产化工产品也实现了工业化，如生产高含溴量的(高达 60%)阻燃剂溴代聚苯乙烯(BPS)。中国现已具备利用 WFPS 制备 BPS 的技术，其性能与美国 Ferro 公司的产品接近。裂解技术也是目前国内外大规模回收 WFPS 非常重要的一种手段，日本 MITSUI 造船工程公司、德国 IKV 公司分别采用固定床和流化床反应器回收苯乙烯单体，或其他裂解产物[68]。

3　研究展望

WFPS 回收再利用已被广泛认为是控制环境污染、高效利用自然资源以及节约能源的有效手段之一。据不完全统计，目前世界上发达国家对 WFPS 的回收再利用率为 60%～70%，而中国由于回收再利用的技术和制度还不够完善，回收利用率仅有 30%左右，大多数 WFPS 并未得到有效利用。随着中国对 WFPS 的回收及其在各行业资源化利用步伐的加快，开发高效、环保、低成本的 WFPS 回收技术及资源化再利用技术将成为未来 WFPS 回收再利用的关键。今后，在以下几个方面的研究需要进一步加强。

1)兼顾经济与环保的规模化溶剂回收技术的开发

传统的熔融造粒回收技术仍然是目前中国最常用的 WFPS 回收方法，并且目前中国对 WFPS 的回收端多以个人小型回收站为主，塑料回收产业集中度不高。另外，中国现有的溶剂回收技术大部分停留在研究阶段，还难以实现产业化应用。因此，应该将重心转移至更经济、高效的溶剂回收技术研发上面，加大对低成本、无污染的植物精油回收 WFPS 技术的研发投资力度，加速推进这一新型环保的溶剂回收技术的工业化应用进程。

2)催化裂解回收单体的高效催化剂的研发

与热裂解相比，催化裂解回收苯乙烯单体具有条件温和、产物选择性高的优点。催化裂解技术也相对成熟，工业化前景更为广阔。催化裂解技术中催化剂是关键，因此，高效、高选择性催化剂的开发对 WFPS 催化裂解回收单体的产业化发展具有十分重要的意义。目前，加强催化裂解高效催化剂的研发力度，进而实现催化裂解技术的提升对 WFPS 回收更具有现实意义。

3)聚焦高附加值的 WFPS 资源化利用技术研究

WFPS 作为一种废弃物，对其赋予更高的附加值资源化利用技术在未来更具有优势，尤其是在储能材料领域，比如相变储能材料、新能源电池材料。储能及新能源电池作为一种能解决能量的时空不匹配问题以及发电和最终使用之间不匹配问题的技术，前者可在冷链运输、电力、食品等领域发挥巨大作用，而后者能与可再生资源相结合提升发电技术的质量和稳定性。

在国家“碳达峰、碳中和”的大背景下，WFPS 的回收和资源化高效利用技术的研发及其产业化应用具有十分重要的实际意义，相关技术支持及推进产业化进程的相关政策亟需进一步加强和完善。未来，期待相关产业化技术尽快取得突破性进展，实现对 WFPS 的高效回收和再利用。

参考文献/References：

[1]　KIM H W，JO J H，KIM Y B，et al.Biodegradation of polystyrene by bacteria from the soil in common environments[J].Journal of Hazardous Materials，2021，416：126239.

[2]　汪晓鹏，贺建梅.奇妙的微结构材料——泡沫塑料[J].西部皮革，2020，42(19)：33-34.
WANG Xiaopeng，HE Jianmei.Magnificent microstructural materials-foam plastics[J].West Leather，2020，42(19)：33-34.

[3]　李兰.废弃聚苯乙烯泡沫塑料的应用研究[D].沈阳：沈阳建筑大学，2015.
LI Lan.Research on Application of Discarded Polystyrene Foam[D].Shenyang：Shenyang Jianzhu University，2015.

[4]　HAMAD K，KASEEM M，DERI F.Recycling of waste from polymer materials：An overview of the recent works[J].Polymer Degradation

and Stability,2013,98(12):2801-2812.

[5] GARCÍA M T,GRACIA I,DUQUE G,et al.Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process[J].Waste Management,2009,29(6):1814-1818.

[6] SINGH R K,RUJ B,SADHUKHAN A K,et al.Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere:Part 1:Effect of temperature,product optimization,and degradation mechanism[J].Journal of Environmental Management,2019,239:395-406.

[7] CHAUKURA N,GWENZI W,BUNHU T,et al.Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries:A review[J].Resources Conservation and Recycling,2016,107:157-165.

[8] ZHAO Yibo,LV Xudong,NI Honggang.Solvent-based separation and recycling of waste plastics:A review[J].Chemosphere,2018,209:707-720.

[9] MUMBACH G D,BOLZAN A,MACHADO R A F.A closed-loop process design for recycling expanded polystyrene waste by dissolution and polymerization[J].Polymer,2020,209.DOI:10.1016/j.polymer.2020.122940.

[10] 刘环宇,谢思凡,郑婵群,等.柑橘精油对泡沫塑料降解的研究[J].化工时刊,2015,29(2):16-18.
LIU Huanyu,XIE Sifan,ZHENG Chanqun,et al.The study of foam degradation by citrus essential oils[J].Chemical Industry Times,2015,29(2):16-18.

[11] HATTORI K,NAITO S,YAMAUCHI K,et al.Solubilization of polystyrene into monoterpenes[J].Advances in Polymer Technology,2008,27(1):35-39.

[12] GIL-JASSO N D,SEGURA-GONZÁLEZ M A,SORIANO-GILES G,et al.Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils[J].Fuel,2019,239:611-616.

[13] GIL-JASSO N D,GILES-MAZÓN E A,SORIANO-GILES G,et al.A methodology for recycling waste expanded polystyrene using flower essential oils[J].Fuel,2022,307.DOI:10.1016/j.fuel.2021.121835.

[14] ALMEIDA D,MARQUES M D F.Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste[J].Polímeros,2016,26(1):44-51.

[15] MAAFA I M.Pyrolysis of polystyrene waste:A review[J].Polymers,2021,13(2):225.

[16] KAMINSKY W,PREDEL M,SADIKI A.Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed[J].Polymer Degradation and Stability,2004,85(3):1045-1050.

[17] ACHILIAS D S,KANELLOPOULOU I,MEGALOKONOMOS P,et al.Chemical recycling of polystyrene by pyrolysis:Potential use of the liquid product for the reproduction of polymer[J].Macromolecular Materials and Engineering,2007,292(8):923-934.

[18] INAYAT A,KLEMENCOVA K,GRYCOVA B,et al.Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in batch and semi-batch reactors:A comparative study[J].Waste Management & Research:The Journal for a Sustainable Circular Economy,2021,39(2):260-269.

[19] AGUADO R,OLAZAR M,GAISÁN B,et al.Kinetics of polystyrene pyrolysis in a conical spouted bed reactor[J].Chemical Engineering Journal,2003,92(1/2/3):91-99.

[20] ARTETXE M,LOPEZ G,AMUTIO M,et al.Styrene recovery from polystyrene by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor[J].Waste Management,2015,45:126-133.

[21] CHAUHAN R S,GOPINATH S,RAZDAN P,et al.Thermal decomposition of expanded polystyrene in a pebble bed reactor to get higher liquid fraction yield at low temperatures[J].Waste Management,2008,28(11):2140-2145.

[22] LU Chao,XIAO Hang,CHEN Xi.Simple pyrolysis of polystyrene into valuable chemicals[J].E-Polymers,2021,21(1):428-432.

[23] MO Yu,ZHAO Lei,WANG Zhonghui,et al.Enhanced styrene recovery from waste polystyrene pyrolysis using response surface methodology coupled with Box-Behnken design[J].Waste Management,2014,34(4):763-769.

[24] IMANI MOQADAM S,MIRDRIKVAND M,ROOZBEHANI B,et al.Polystyrene pyrolysis using silica-alumina catalyst in fluidized bed reactor[J].Clean Technologies and Environmental Policy,2015,17(7):1847-1860.

[25] PARK J J,PARK K,KIM J S,et al.Characterization of styrene recovery from the pyrolysis of waste expandable polystyrene[J].Energy & Fuels,2003,17(6):1576-1582.

[26] ÇELIKGÖĜÜS Ç,KARADUMAN A.Thermal-catalytic pyrolysis of polystyrene waste foams in a semi-batch reactor[J].Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects,2015,37(23):2507-2513.

[27] HONG Miao,CHEN E Y X.Chemically recyclable polymers:A circular economy approach to sustainability[J].Green Chemistry,2017,19(16):3692-3706.

[28] NISAR J,ALI G,SHAH A,et al.Fuel production from waste polystyrene via pyrolysis:Kinetics and products distribution[J].Waste Management,2019,88:236-247.

[29] 吴中伟,焦清介,臧充光,等.阻燃高抗冲聚苯乙烯热降解研究[J].化学通报,2008,71(12):940-945.
WU Zhongwei,JIAO Qingjie,ZANG Chongguang,et al.Thermal decomposition of flame-retarded high impact polystyrene[J].Chemistry,2008,71(12):940-945.

[30] NISAR J,ALI G,SHAH A,et al.Production of fuel oil and combustible gases from pyrolysis of polystyrene waste:Kinetics and thermodynamics interpretation[J].Environmental Technology & Innovation,2021,24.DOI:10.1016/j.eti.2021.101996.

[31] VERMA A,SHARMA S,PRAMANIK H.Pyrolysis of waste expanded polystyrene and reduction of styrene via in-situ multiphase pyrolysis of product oil for the production of fuel range hydrocarbons[J].Waste Management,2021,120:330-339.

[32] NISAR J,ALI G,SHAH A,et al.Pyrolysis of expanded waste polystyrene:Influence of nickel-doped copper oxide on kinetics,thermody-

namics，and product distribution[J].Energy & Fuels，2019，33(12)：12666-12678.

[33] NISAR J，ALI G，SHAH A，et al.Pyrolysis of polystyrene waste for recovery of combustible hydrocarbons using Copper oxide as catalyst [J].Waste Management & Research：The Journal for a Sustainable Circular Economy，2020，38(11)：1269-1277.

[34] MIANDAD R，NIZAMI A S，REHAN M，et al.Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil[J].Waste Management，2016，58：250-259.

[35] 秦威南，何强，祝强，等.相变蓄冷材料研究进展[J].化工新型材料，2021，49(5)：1-6.
QIN Weinan，HE Qiang，ZHU Qiang，et al.Research progress on phase change cold storage material[J].New Chemical Materials，2021，49(5)：1-6.

[36] 黄港，邱玮，黄伟颖，等.相变储能材料的研究与发展[J].材料科学与工艺，2022，30(3)：80-96.
HUANG Gang，QIU Wei，HUANG Weiying，et al.Research and development of phase change energy storage materials[J].Materials Science and Technology，2022，30(3)：80-96.

[37] LIU Changhui，MA Xiaotian，DU Peixing，et al.Fabrication of highly efficient thermal energy storage composite from waste polystyrenes [J].Chemical Engineering Science，2020，216：115477.

[38] JALAL N M，JABUR A R，HAMZA M S，et al.Sulfonated electrospun polystyrene as cation exchange membranes for fuel cells[J].Energy Reports，2020，6(sup3)：287-298.

[39] DEKA N，BARMAN J，KASTHURI S，et al.Transforming waste polystyrene foam into N-doped porous carbon for capacitive energy storage and deionization applications[J].Applied Surface Science，2020，511.DOI：10.1016/j.eqyr.2019.11.012.

[40] JAN A T，AZAM M，SIDDIQUI K，et al.Heavy metals and human health：Mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants[J].International Journal of Molecular Sciences，2015，16(12)：29592-29630.

[41] ROUTOULA E，PATWARDHAN S V.Degradation of anthraquinone dyes from effluents：A review focusing on enzymatic dye degradation with industrial potential[J].Environmental Science & Technology，2020，54(2)：647-664.

[42] YASSIN M A，GAD A A M.Immobilized enzyme on modified polystyrene foam waste：A biocatalyst for wastewater decolorization[J].Journal of Environmental Chemical Engineering，2020，8(5)：104435.

[43] LIU Minyao，XIE Zhengfeng，YE Hao，et al.Waste polystyrene foam-Chitosan composite materials as high-efficient scavenger for the anionic dyes[J].Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects，2021，627.DOI：10.1016/j.colsurfa.2021.127155.

[44] PU Yanghao，XIE Zhengfeng，GONG Xingyu，et al.Study on removal of organic dyes by Fe_3O_4/amidation modified waste polystyrene composites[J].Environmental Technology & Innovation，2021，23：101732.

[45] DELEÓN-CONDÉS C A，ROA-MORALES G，MARTÍNEZ-BARRERA G，et al.Sulfonated and gamma-irradiated waste expanded polystyrene with iron oxide nanoparticles，for removal of indigo carmine dye in textile wastewater[J].Heliyon，2019，5(7).DOI：10.1016/j.heliyon.2019.e02071.

[46] TRAN A T K，PHAM T T，NGUYEN Q H，et al.From waste disposal to valuable material：Sulfonating polystyrene waste for heavy metal removal[J].Journal of Environmental Chemical Engineering，2020，8(5).DOI：10.1016/j.jece.2020.104302.

[47] MASOUMI H，GHAEMI A，GANNADZADEH GILANI H.Synthesis of polystyrene-based hyper-cross-linked polymers for Cd(Ⅱ) ions removal from aqueous solutions：Experimental and RSM modeling[J].Journal of Hazardous Materials，2021，416.DOI：10.1016/j.jhazmat.2021.125923.

[48] JIA Jizhen，FU Zhenyu，WANG Lin，et al.Conversion of waste polystyrene foam into sulfonated hyper-crosslinked polymeric adsorbents for cadmium removal in a fixed-bed column[J].Chemical Engineering Research and Design，2019，142：346-354.

[49] MASOUMI H，GHAEMI A，GHANADZADEH GILANI H.Exploiting the performance of hyper-cross-linked polystyrene for removal of multi-component heavy metal ions from wastewaters[J].Journal of Environmental Chemical Engineering，2021，9(4).DOI：10.1016/j.jece.2021.105724.

[50] FU Zhenyu，JIA Jizhen，LI Jing，et al.Transforming waste expanded polystyrene foam into hyper-crosslinked polymers for carbon dioxide capture and separation[J].Chemical Engineering Journal，2017，323：557-564.

[51] FU Zhenyu，MOHAMED I M A，LI Jing，et al.Novel adsorbents derived from recycled waste polystyrene via cross-linking reaction for enhanced adsorption capacity and separation selectivity of CO_2 [J].Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers，2019，97：381-388.

[52] ZHUANG Guoliang，TSENG H H，WEY M Y.Feasibility of using waste polystyrene as a membrane material for gas separation[J].Chemical Engineering Research and Design，2016，111：204-217.

[53] GIULIANI F，AUTELITANO F，GARILLI E，et al.Expanded polystyrene (EPS) in road construction：Twenty years of Italian experiences[J].Transportation Research Procedia，2020，45：410-417.

[54] KAYA A，KAR F.Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin[J].Construction and Building Materials，2016，105：572-578.

[55] KOKSAL F，MUTLUAY E，GENCEL O.Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene[J].Construction and Building Materials，2020，236.DOI：10.1016/j.conbuildmat.2019.117789.

[56] ESKANDER S B，SALEH H M，TAWFIK M E，et al.Towards potential applications of cement-polymer composites based on recycled polystyrene foam wastes on construction fields：Impact of exposure to water ecologies[J].Case Studies in Construction Materials，2021，15.

DOI:10.1016/j.cscm.2021.e00664.

[57] MILLING A,MWASHA A,MARTIN H.Exploring the full replacement of cement with expanded polystyrene (EPS) waste in mortars used for masonry construction[J].Construction and Building Materials,2020,253.DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119158.

[58] ALI Y A Y,FAHMY E H A,ABOUZEID M N,et al.Use of expanded polystyrene wastes in developing hollow block masonry units[J].Construction and Building Materials,2020,241.DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118149.

[59] ALI Y A Y,FAHMY E H A,ABOUZEID M N,et al.Use of expanded polystyrene in developing solid brick masonry units[J].Construction and Building Materials,2020,242.DOI:10.1016/j.combuildmat.2020.118109.

[60] LIU Changhui,XIE Yuanhui,GAO Ding,et al.Fabrication of fire-retardant building materials via a hyper-crosslinking chemical conversion process from waste polystyrenes[J].Energy and Built Environment,2022,3(2):226-232.

[61] MOGHADDAM FARD P,ALKHANSARI M G.Innovative fire and water insulation foam using recycled plastic bags and expanded polystyrene (EPS)[J].Construction and Building Materials,2021,305:124785.

[62] 陈松涛,孙海波,武昆.废聚苯乙烯泡沫塑料生产乳胶型粘合剂的研制[J].河南城建高专学报,1994(3):6-8.
CHEN Songtao,SUN Haibo,WU Kun.The research on the production of emulsion binder with polystyrene[J].Journal of Henan University of Urban Construction,1994(3):6-8.

[63] 刘运学,李兰,赵志滨,等.利用废弃聚苯乙烯泡沫塑料制备溶剂型胶粘剂[J].中国胶粘剂,2014,23(2):27-31.
LIU Yunxue,LI Lan,ZHAO Zhibin,et al.Solvent adhesive made from waste polystyrene foam[J].China Adhesives,2014,23(2):27-31.

[64] 曹媛媛,邓子庆,陈文静,等.用废聚苯乙烯泡沫塑料制备涂改液[J].粘接,2013,34(8):58-59.
CAO Yuanyuan,DENG Ziqing,CHEN Wenjing,et al.Preparation of correction fluid with waste polystyrene foam plastics[J].Adhesion,2013,34(8):58-59.

[65] 苏焕幼,刘丹,叶顺,等.废弃聚苯乙烯泡沫塑料制备荧光纤维膜及其在 LED 中的应用[J].广州化工,2019,47(9):112-114.
SU Huanyou,LIU Dan,YE Shun,et al.Luminescence fiber membrane from waste expanded polystrene and its application in LED device[J].Guangzhou Chemical Industry,2019,47(9):112-114.

[66] UDDIN N,DESAI F J,SUBESHAN B,et al.Sustainable atmospheric fog water generator through superhydrophobic electrospun nanocomposite fibers of recycled expanded polystyrene foams[J].Surfaces and Interfaces,2021,25.DOI:10.1016/j.surfin.2021.101169.

[67] 刘雅文.让万物再生 创绿色未来——访上海英科实业有限公司董事李志杰[J].中国石油和化工,2021(12):63.

[68] 邓亮,徐海萍,谢华清,等.废旧聚苯乙烯塑料再生再利用技术现状[J].上海第二工业大学学报,2014,31(2):114-120.
DENG Liang,XU Haiping,XIE Huaqing,et al.Research on techniques of waste polystyrene plastics recycling and reusing[J].Journal of Shanghai Second Polytechnic University,2014,31(2):114-120.