

碳纳米材料改性聚氨酯泡沫研究进展

廉兆龙¹, 李晓屿¹, 陈鹏¹, 孙彬¹, 徐新宇¹, 黄玉东², 王彩凤^{1*}

1. 辽宁石油化工大学石油化工学院, 抚顺 113001

2. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150001

摘要 介绍了近年利用碳纳米材料改性聚氨酯泡沫的研究进展, 根据引入碳纳米材料的不同方式将增强方法分为内部掺杂法和外保护层法, 探讨了2种方法的作用机理与改性效果; 分析了碳纳米材料改性聚氨酯泡沫存在的不足, 认为改性操作简单、降低填料团聚性是未来研究的重点。

关键词 聚氨酯泡沫; 碳纳米材料; 压缩强度; 阻燃

聚氨酯(PU)泡沫是最常见的多孔泡沫状聚合物之一, 宏观上主要由固体聚合物基质相与发泡剂发生物理和化学反应产生的气相构成; 在微观结构中, 聚氨酯分子链由交替的软段和硬段组成, 软段(SS)主要由聚酯、聚醚或聚碳酸酯多元醇组成, 提供柔韧性, 而硬段(HS)由二异氰酸酯与低分子量二醇或二胺反应作为链延长剂, 通常提供机械强度^[1-5]。

经过几十年的发展, 聚氨酯泡沫已经衍生出刚性、半刚性和柔性3大种类, 在建筑保暖、隔音装

修、汽车内饰等常见领域皆有应用^[6-10]。但随着应用范围的扩大, 它本身的缺点也开始凸显出来; 例如, 由于聚氨酯键的断裂温度低、多孔细胞结构高, 使得它很容易燃烧, 燃烧时还会产生有毒气体与烟雾^[11-12]; 再例如聚氨酯泡沫多应用于建筑领域, 但其压缩强度与隔热保温能力却并不十分出色, 这些问题限制了聚氨酯泡沫应用领域的扩展, 所以对聚氨酯泡沫进行改性势在必行。

正因如此, 作为一种具有颗粒小、比表面积大等优点的新型材料, 纳米材料(如碳纳米材料、纳米

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-03-10

基金项目: 辽宁省教育厅自然科学基金项目(L2019041)

作者简介: 廉兆龙, 硕士研究生, 研究方向为改性聚氨酯泡沫的制备, 电子信箱: 1941669040@qq.com; 王彩凤(通信作者), 副教授, 研究方向为碳纤维表面改性以及树脂基复合材料增强增韧, 电子信箱: wcf2lxy@163.com

引用格式: 廉兆龙, 李晓屿, 陈鹏, 等. 碳纳米材料改性聚氨酯泡沫研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(9): 85-93;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.11.01815

黏土粒子、纳米 SiO₂ 等)理所当然地成为了聚氨酯泡沫改性方面的最佳选择^[13]。这些材料既可以通过混入原料中的方式掺杂进聚氨酯泡沫内部,对聚氨酯进行改性^[14-16];也可以通过沉积、层层自组装等方式在聚氨酯泡沫外部形成保护层,对聚氨酯泡沫进行改性^[17-19]。而在多种多样的纳米材料中,碳纳米材料凭自身活性高、应用广、跨纬度的优势成为国内外科人员研究的重点。

近年来相关领域的科研成果如雨后春笋般不断涌现。本文以碳纳米材料改性聚氨酯泡沫为主题,以内部掺杂与外保护层 2 种方式为路线,阐述国内外近年来通过不同方式引入碳纳米材料改性聚氨酯泡沫的研究进展,介绍不同增强方式的作用机理以及不同碳纳米粒子的基础性能,并对未来碳纳米材料增强聚氨酯泡沫的研究进行展望。

1 内部掺杂

聚氨酯泡沫是由固体聚合物基质相与通过发泡过程中产生的气相所构成的多孔泡沫状聚合物,它内部的泡孔形态对其自身的各项性能都有较大的影响^[20]。在不加入成核剂的情况下,聚氨酯泡沫的气泡主要有以下 3 种来源:反应自身产生的 CO₂、反应体系中的水蒸发为水蒸气以及加入的发泡剂^[21-22]。这 3 种来源可控性差,导致聚氨酯泡沫内部的泡孔尺寸大小不均,对产品的相关性能(力、热等)产生影响。

对此问题,科研人员提出的解决办法之一便是在发泡体系中添加小颗粒填料,充当成核剂,以此达到调控泡沫孔径的目的;同时还可以将填料自身的特殊性能赋予聚氨酯泡沫(如力学性能、导热能力)^[23]。由此,碳纳米材料(即尺度至少有一维小于 100 nm 的碳材料),在拥有优异性能与小尺寸的前提下,还具有较高的极性基团含量与可修饰的官能团,这使得碳纳米材料在改性聚氨酯泡沫方面前途远大^[23]。

在 3 种聚氨酯泡沫中,唯一具有封闭气泡结构的刚性聚氨酯泡沫无疑是这种增强方法的最大受益者,常用于建筑领域的刚性聚氨酯泡沫最重要的

力学性能和隔热性能也能随着碳纳米材料的加入而得到改善。

1.1 主要材料

近年来相关的研究成果主要集中在利用石墨烯,碳纳米纤维与碳纳米管改性刚性聚氨酯泡沫方面^[24]。

1) 石墨烯。作为一种新型的单层纳米材料,石墨烯具有高强度、低电阻等特性;同时,石墨烯的光学特性也十分出色,这让石墨烯跻身 21 世纪最引人注目的材料之一。

2) 碳纳米纤维。碳纳米纤维是多层石墨片卷曲而成的纤维状纳米碳材料,其特殊的结构使得它沿纤维轴方向的强度惊人,还具有极强的耐高温能力与导电能力,是增强材料的优秀选择。

3) 碳纳米管。碳纳米管的特殊之处在于它的管状结构,这使得它具有超大的比表面积与比强度。将其加入基体材料中,可使复合材料表现出良好的强度、弹性、抗疲劳性及各向同性,给复合材料的性能带来极大的改善。

1.2 石墨烯

石墨烯是一种具有规则结构的二维纳米材料,表面的碳原子具有优异的电学性质与特殊的功能化结构,这使它受到各个领域学者的关注^[25-26],在改性聚氨酯泡沫领域,石墨烯也大显身手,出现了许多出色的成果。

直接将石墨烯分散到原料中,采用一步法制备石墨烯/聚氨酯泡沫复合材料是最简单的增强方法^[27]。结果表明加入成核剂石墨烯后,泡孔的尺寸变得小而均匀,分散入泡沫中的石墨烯对聚氨酯气泡骨架起支撑作用,使得加入石墨烯后的聚氨酯泡沫抗压强度增长了 25%。并由于石墨烯对红外辐射的强烈吸收,复合材料的导热系数也明显下降^[27]。

由于聚氨酯泡沫制备工艺的多样性,也可以将石墨烯分散到预聚体中,使用两步法制备石墨烯/聚氨酯泡沫复合材料^[28]。由于碳纳米填料产生的成核效应,复合材料内部的气泡数量变多,增加的气泡壁会阻碍热流的通过,使得热流通过材料的难度增大,所以复合材料的热扩散系数下降了

10.5%;材料的压缩强度更是在石墨烯本身刚性与所发挥的成核剂性质的双重作用下提高了122.6%。

鉴于石墨烯与聚氨酯泡沫基体的相容性并不是十分优异,故而可以利用对石墨烯进行改性的方式,增大复合材料中石墨烯的比例,进而放大石墨烯对聚氨酯泡沫的增强作用。Li等^[29]以二异氰酸酯为改性剂,将异氰酸盐基团接枝到氧化石墨烯上,提高了氧化石墨烯与基体的相容性(图1为改性后氧化石墨烯^[29]),使其可以很好地分散在PU基质中,作为气泡的成核剂,缩小泡孔尺寸;而且改性氧化石墨烯上的异氰酸盐可以参与PU的发泡反

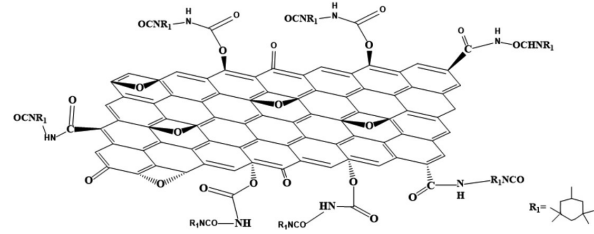


图1 改性后氧化石墨烯示意

应,从而提高发泡过程中的气泡壁强度,减少孔隙破裂的发生。当改性氧化石墨烯加入量为1.5wt%时,复合材料的压缩强度达到最大值,提升了200%,图2^[29]为不同改性氧化石墨烯含量的聚氨酯泡沫的相关参数。

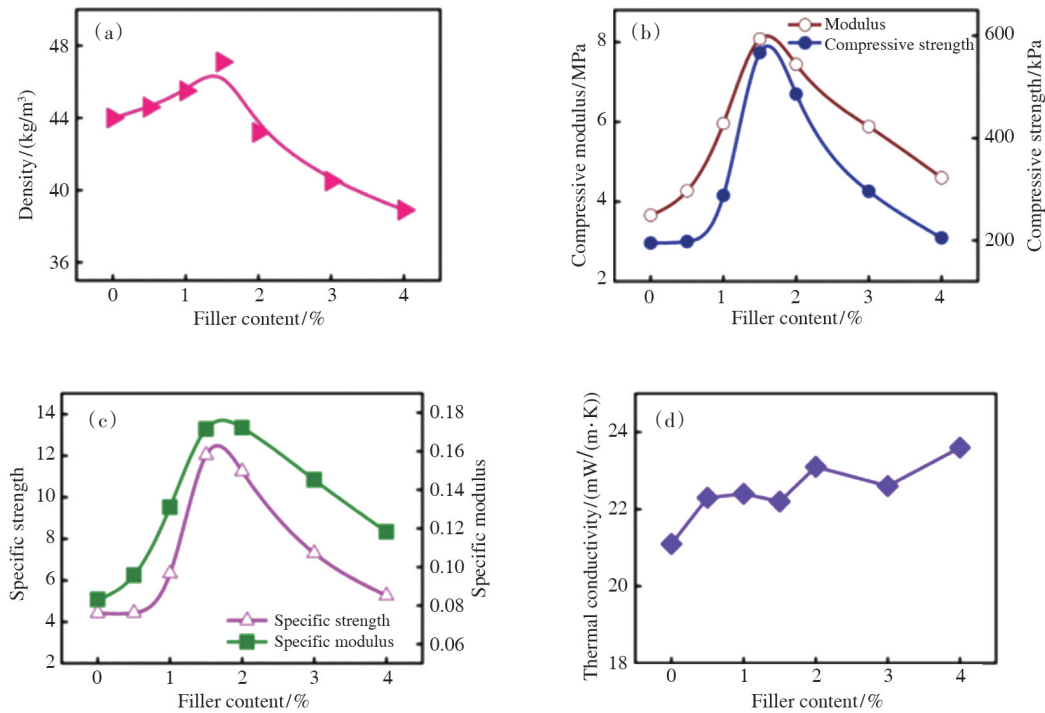


图2 不同改性氧化石墨烯含量的聚氨酯泡沫的密度(a)、抗压强度和模量(b)、比强度/模量(c)和导热系数(d)

1.3 碳纳米纤维

碳纳米纤维是多层石墨片卷曲而成的纤维状纳米碳材料,具有较好的导热和导电性能以及高表面积,同时热稳定性也十分优秀^[30-31]。同石墨烯一样,利用碳纳米纤维对聚氨酯泡沫改性后,增强效果显著。

由于碳纳米纤维与泡沫有较好的相容性,因此碳纳米纤维会给发泡体系提供大量的成核位点,从

而形成较小的泡孔尺寸和更多的气泡数量。气泡数量的增多导致了热量在材料内部传递时必须通过的屏障数量增加,水分的进入也变得困难,故而复合材料的热导率降低了10%,吸水率也有所下降;得益于碳纳米纤维的特殊结构,当应力沿碳纳米纤维排列方向时,复合材料的力学性能改善十分显著,达到了125%的增长^[32]。

众所周知,聚氨酯是一种绝缘体,不能测量塞

贝克系数;但将碳纳米纤维以分散进多元醇的方式加入聚氨酯泡沫后,将聚氨酯泡沫内碳纳米纤维浓度从1%增加到3%,复合材料的塞贝克系数也随之从1.2 V/K增加到11.9 V/K;这说明碳纳米纤维为

复合材料中的载流子提供了良好的导电通道,从而产生了较高的塞贝克系数^[33],图3^[33]、图4^[33]分别为不同碳纳米纤维含量的聚氨酯泡沫的扫描电镜图像和相关参数。

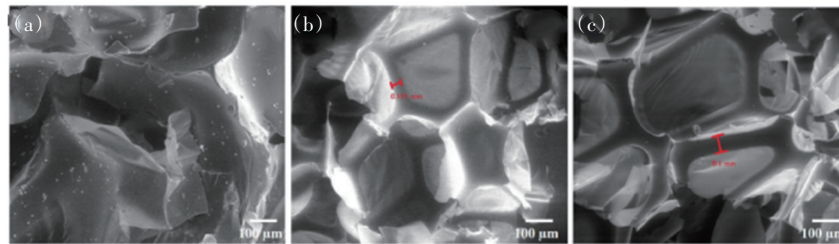


图3 (a)纯聚氨酯泡沫和(b)加入1%和(c)加入3%碳纳米纤维泡沫的扫描电镜图像

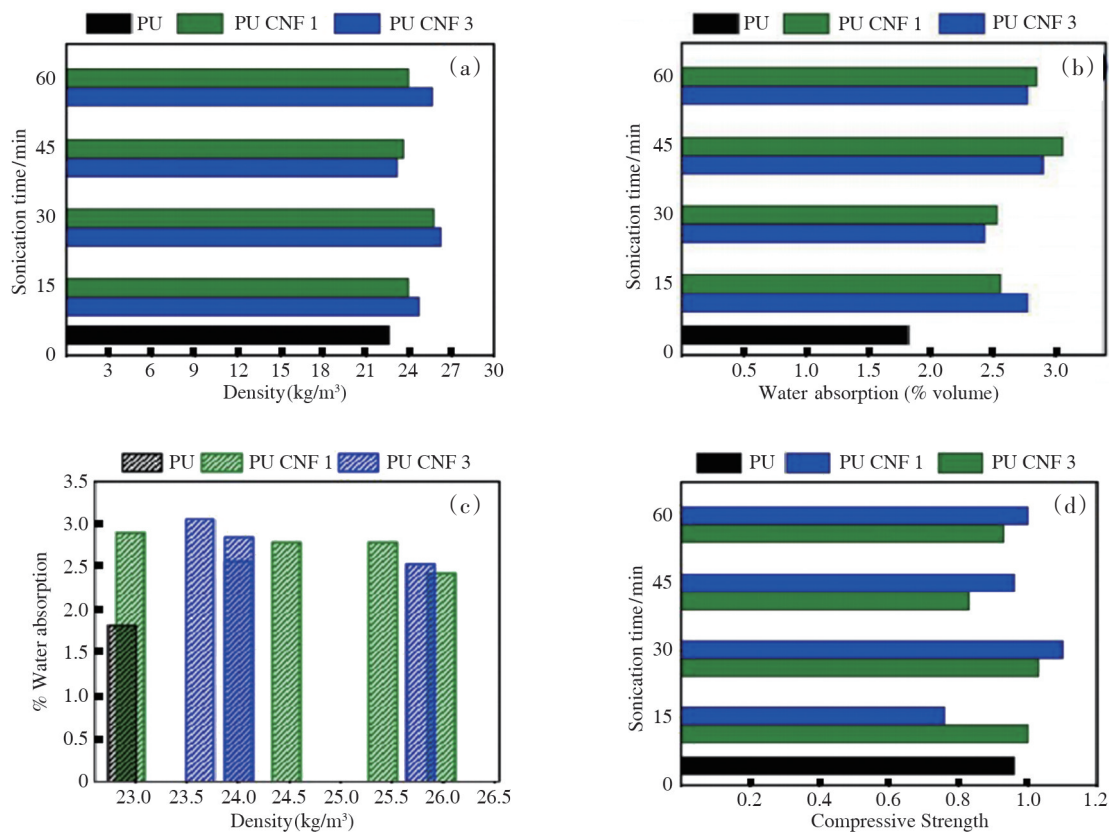


图4 聚氨酯泡沫的物理力学性能

1.4 碳纳米管

碳纳米管是具有空间拓扑结构的一维中空管状晶体粒子,因优良的力学性能、特殊的磁性能、优异的化学活性等特性,被称为超级纳米材料^[34-35]。在改性聚氨酯泡沫方面主要是将碳纳米管以高速搅拌、超声等方式分散在聚氨酯原料中,以达到将碳纳米管掺杂到聚氨酯泡沫内部的目的。

在聚氨酯发泡体系中加入碳纳米管可使得前

驱体溶液黏度增加,从而阻止了泡沫制备过程中气泡的形成和生长^[36];因此,理论上聚氨酯泡沫中碳纳米管含量越高,其结构中孔隙率也就越低,压缩强度也就越大。但碳纳米管表面存在大量的活性基团,导致它很容易发生团聚现象,这对其在聚氨酯泡沫内的分散十分不利,所以利用改性后的碳纳米管增强聚氨酯泡沫就成了人们的最佳选择。然而虽然碳纳米管经过改性,分散性有所提高,但团

聚现象仍然存在,如 Yaghoubi 等^[37]利用双峰硅烷(DSI)将多壁碳纳米管硅烷化用以降低团聚性(图 5 为多壁碳纳米管改性过程^[37]);其结果为在改性多壁碳纳米管加入量为 1.5wt% 时得到最好的改性聚氨酯泡沫样品,模量和抗拉强度分别提高了 53% 和 20%;而 Duc 等^[38]先将多壁碳纳米管酸化以接枝

羧基,再利用羧基基团与苯胺的氨基基团之间的相互作用在多壁碳纳米管表面附着苯胺,通过这种方式提高分散性,经过实验后确定苯胺化多壁碳纳米管最佳加入量为 3wt%,所制备的复合材料压缩强度提高了 39%,图 6^[38]为多壁碳纳米管改性前后的扫描电镜图片。

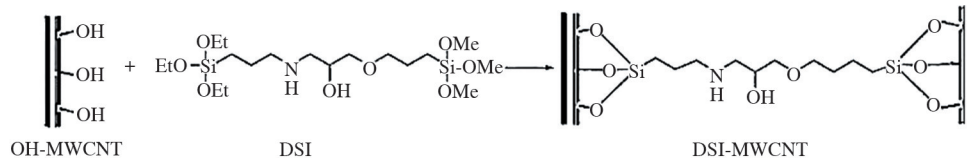


图 5 利用双峰硅烷将多壁碳纳米管硅烷化过程示意

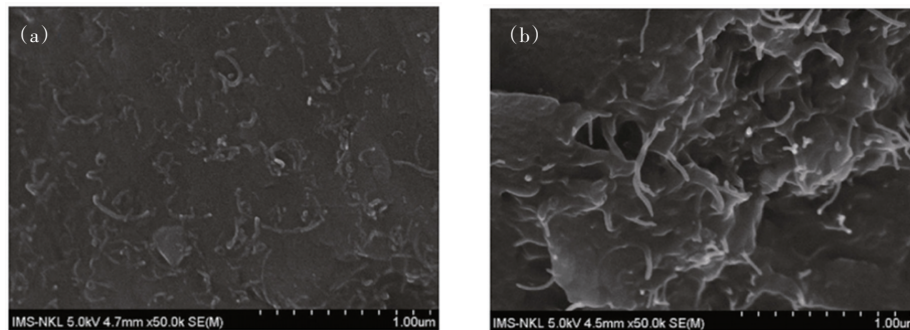


图 6 (a) 3 wt% 未改性多壁碳纳米管和 (b) 3 wt% 改性多壁碳纳米管的泡沫的高倍扫描电镜显微镜图

2 外保护层

将碳纳米粒子掺杂进聚氨酯泡沫内部的改性方式虽然具有操作简单的优点;但因为粒子本身的团聚性和聚氨酯泡沫多孔结构的特殊性,使得填料的添加量被限制在一个较低的范围,对聚氨酯泡沫的增强有限。同时,填料在发泡体系中如何分散也是个难题:多元醇黏度大不易分散,异氰酸酯易于与空气中的水反应,限制了分散时间。由此,科研人员探索出另一种增强聚氨酯泡沫的方式,即在聚氨酯泡沫外附加保护层^[39-40]。

在泡沫外附加碳纳米材料保护层能在不破坏泡沫本身性质的前提下,大幅度增强它的阻燃性能,相较于刚性和半刚性聚氨酯泡沫,柔性聚氨酯泡沫多用于家具、汽车内饰等长期直接接触人体的产品领域;一旦燃烧,必然会对使用者的人身安全造成危害,阻燃性能就成了限制其应用的最主要原因,所以

近年来外保护层法主要应用于柔性聚氨酯泡沫。

2.1 浸渍沉积法

想在聚氨酯泡沫外部形成保护层,最简单的办法就是直接将聚氨酯泡沫浸泡在含有保护层原料的液体混合物中一定时间,通过自然沉积的方式构建保护层。这种方法由于不用考虑相容性与发泡工艺的影响,在增强材料的选择方面就少了许多限制。

脱氧核糖核酸(DNA)就是一个例子(图 7^[41]为在泡沫表面沉积 DNA/氧化石墨烯复合涂层示意图),在 DNA/氧化石墨烯复合涂层中,DNA 被用作功能性黏着剂,当它暴露在热和火焰中时会产生稳定的碳质结构,将氧化石墨烯黏连在一起,从而产生对热量和挥发物的屏障;具体表现为添加涂层后的聚氨酯泡沫的热释放速率(HRR)和总烟雾释放峰值(TSR)分别下降了 75% 和 30%^[41]。

2.2 层层自组装

直接浸泡固然可以在聚合物基体表面生成所

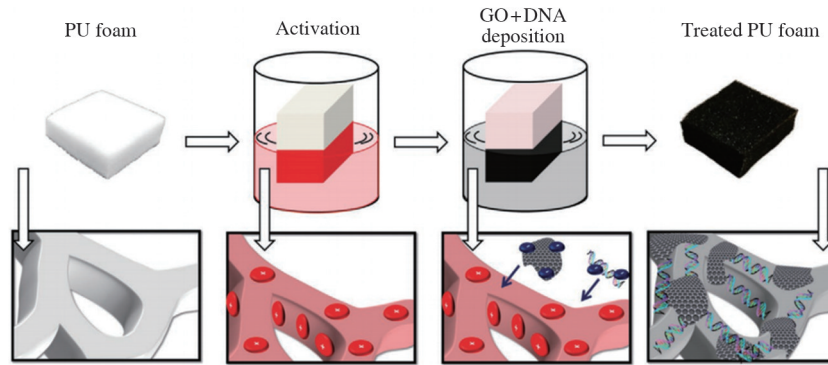


图7 在泡沫表面沉积DNA/氧化石墨烯复合涂层示意

需保护层,但这种生成是被动的,既难以掌控又效率低下;所以科研人员以正负电荷相互吸附为机理,交替地将基底浸入带相反电荷的聚电解质溶液或悬浮液中,让带相反电荷的材料排列成多个双层,使它们通过各种引力(如范德华力、氢键等)连接和组装,这种方法被称为层层自组装^[42-43]。

因为所产生的涂层通过各种引力吸附在基体表面,故而层层自组装法的一大优势就是产生的外保护层要优于浸渍涂覆法产生的外保护层。例如,将聚氨酯泡沫交替浸泡在八氨基多面体低聚倍半硅氧烷溶液(阳离子)和氧化石墨烯悬浮液(阴离子)中,在泡沫基体表面形成混合保护层(图8^[18]为在泡沫表面组装八氨基多面体低聚倍半硅氧烷/氧化石墨烯涂层示意图)。该保护层不仅能显著改善

聚氨酯泡沫的火焰腐蚀性和烟雾抑制特性,而且还显著提高了其抗拉强度。与纯聚氨酯泡沫相比,添加保护层的聚氨酯泡沫的抗拉强度提高了42%;锥形量热计试验结果表明,与纯聚氨酯泡沫相比,添加保护层的聚氨酯泡沫的热释放速率峰值(PHRR)和总热释放量(THR)分别降低了67.3%和28.3%。此外,烟生成速率峰值(PSPR)和总烟释放量(TSR)也分别降低了42.9%和65.03%。这表明,该涂层作为一种防火涂层是非常有效的。同时CO释放量(COY)和CO₂释放量(CO₂Y)的显著下降(分别为62.3%和21.3%)也表明,添加此保护层的聚氨酯泡沫在燃烧条件下抑制了窒息气体的产生,这是在建筑火灾场景中降低相关火灾风险的关键^[18]。

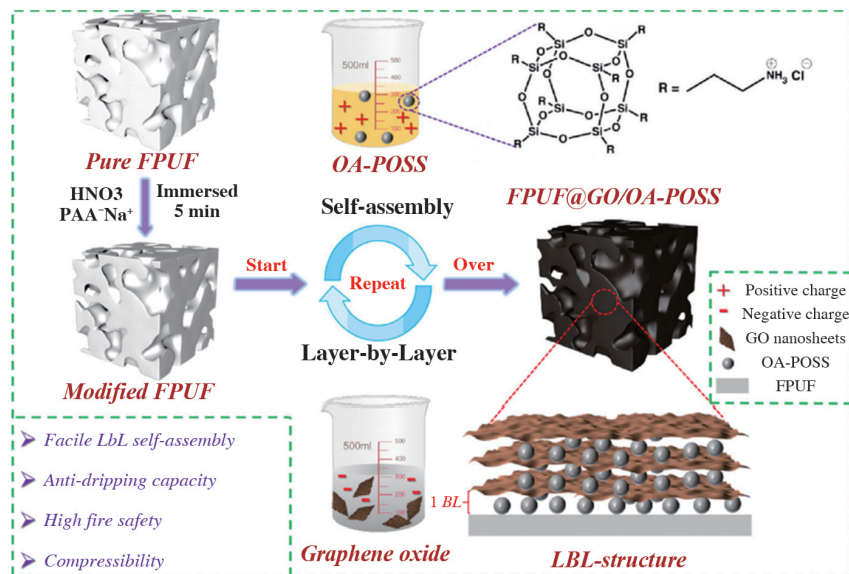


图8 在泡沫表面组装八氨基多面体低聚倍半硅氧烷/氧化石墨烯涂层示意

3 结论

综述了国内外科研人员利用碳纳米材料增强聚氨酯泡沫的研究进展,得出如下结论。

1) 将碳纳米材料通过混入原料或预聚体的方式掺杂进聚氨酯泡沫内部,使材料充当成核剂改善泡沫的泡孔结构,并结合材料的自身特性对聚氨酯进行增强。此种方法操作简单,可改善聚氨酯泡沫的导热性能与压缩强度;但仍存在碳纳米材料易团聚、在体系中分散困难等问题。

2) 以自然沉积或正负电荷相吸为原理,通过涂覆、层层自组装的方法使碳纳米材料在聚氨酯泡沫外部形成保护层,对聚氨酯泡沫进行增强。该方法增强效果明显,添加的保护层让聚氨酯泡沫的阻燃性能大幅提高;缺点是操作复杂,无法精准把控保护层厚度。

目前利用碳纳米材料改性聚氨酯泡沫的2种方式各有优点,但仍有不足,在未来的研究中应对改性方式进行探究,致力于探索出一种既操作简单,改性效果又明显的改性方法。

参考文献(References)

- [1] Kaikade D S, Sabnis A S. Polyurethane foams from vegetable oil-based polyols: A review[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(3): 2239–2261.
- [2] Noreen A, Zia K M, Tabasum S, et al. Hydroxyethylcellulose-g-poly (lactic acid) blended polyurethanes: Preparation, characterization and biological studies[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 151: 993–1003.
- [3] Noureddine B, Zitouni S, Achraf B, et al. Development and characterization of tailored polyurethane foams for shock absorption[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4): 2206–2206.
- [4] Vatankhah E, Abasnezhad M, Nazerian M, et al. Thermal energy storage and mechanical performance of composites of rigid polyurethane foam and phase change material prepared by one-shot synthesis method[J]. *Journal of Polymer Research*, 2022, 29(3): 81–81.
- [5] 周继宏, 吕杰, 刘佳. 聚氨酯高分子合成及应用研究进展[J]. *化工时刊*, 2019, 33(12): 27–31.
- [6] 李慕珂, 李自力, 李扬, 等. 聚氨酯泡沫材料的高温蠕变特性[J]. *石油化工高等学校学报*, 2018, 31(2): 96–100.
- [7] 姜浩浩, 刘新亮, 邹勇. 硬质聚氨酯泡沫/聚磷酸铵复合材料的制备及阻燃性能研究[J]. *塑料工业*, 2019, 47(1): 89–93.
- [8] Xie H, Zhu Z, Zhang X. Study on thermal behavior and kinetics of flexible polyurethane foam modified with strontium stannate and ammonium polyphosphate[J]. *Polymer Science, Series A*, 2021, 63(Suppl 1): 64–74.
- [9] Luo Y, Zou J, Li J, et al. Effect of crosslinking agent on properties and morphology of water-blown semirigid polyurethane foam[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(42): 46753.
- [10] 许晓辰. 硬质聚氨酯泡沫塑料的发展及应用[J]. *化工设计通讯*, 2020, 46(3): 3–4.
- [11] Bo G, Xu X, Tian X, et al. Enhancing the flame retardancy for castor oil-based rigid polyurethane foams via silica aerogel[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, 562: 120783.
- [12] 杨洋, 杨超, 覃峰. 硬质聚氨酯隔热泡沫材料的制备及其阻燃性能研究[J]. *塑料科技*, 2022, 50(2): 43–46.
- [13] 解森, 孙海涛, 于浩. 纳米材料改性聚氨酯泡沫的研究进展[J]. *聚氨酯工业*, 2018, 33(4): 1–3, 10.
- [14] Bhinder J, Agnihotri P K. Synthesis and characterization of poly-urethane foam doped with different nano-fillers [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 1479–1488.
- [15] 刘利威, 常春, 戚小各. 粗甘油生物基聚氨酯泡沫的改性研究[J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33(2): 469–474.
- [16] Nazeran N, Moghaddas J. Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, 461: 1–11.
- [17] 方园, 赵华伟, 张冰洁. 纳米 TiO₂ 改性环氧涂层对玻璃纤维/不饱和聚酯复合材料紫外-凝露老化特性的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(5): 1407–1415.
- [18] Jia P, Cheng W, Lu J, et al. Applications of GO/OA-POSS layer-by-layer self-assembly nanocoating on flame retardancy and smoke suppression of flexible polyurethane foam[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(11): 4516–4530.
- [19] 潘颖, 赵红挺. 埃洛石自组装涂层在软质聚氨酯泡沫上的制备及其阻燃抑烟性能[J]. *材料研究学报*, 2021, 35(6): 449–457.
- [20] 徐祥, 沈照羽, 崔胜凯. 发泡剂对硬质聚氨酯泡沫性能的影响[J]. *热固性树脂*, 2021, 36(2): 31–33.
- [21] Kurańska M, Prociak A, Michałowski S, et al. The influ-

- ence of blowing agents type on foaming process and properties of rigid polyurethane foams[J]. *Polimery*, 2018, 63(10): 672–678.
- [22] 李婷. 建筑保温硬质聚氨酯泡沫塑料的发泡工艺与应用[J]. *上海节能*, 2016(11): 629–635.
- [23] 李莹. 纳米复合聚氨酯泡沫材料的微孔结构及其性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [24] 李业光, 贾洪. 纳米碳材料改性聚氨酯泡沫的研究进展[J]. *炭素*, 2017(3): 15–17, 38.
- [25] Kong S, Zhang X, Jin B, et al. FeNb₂O₆/reduced graphene oxide composites with intercalation pseudo-capacitance enabling ultrahigh energy density for lithium-ion capacitors[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(51): 32248–32257.
- [26] Liu H, Zhou S, Li J, et al. Preparation of graphene via modified redox method and its electronic performance[J]. *Ferroelectrics*, 2019, 551(1): 251–258.
- [27] Shin S R, Lee D S. Nanocomposites of rigid polyurethane foam and graphene Nanoplates obtained by exfoliation of natural graphite in polymeric 4, 4'-Diphenylmethane Diisocyanate[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(4): 685–685.
- [28] Pinto S C, Marques P A A P, Vicente R, et al. Hybrid structures made of polyurethane/graphene nanocomposite foams embedded within aluminum open-cell foam[J]. *Metals*, 2020, 10(6): 768.
- [29] Li Y, Tian H, Zhang J, et al. Fabrication and properties of rigid polyurethane nanocomposite foams with functional isocyanate modified graphene oxide[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(12): 5126–5134.
- [30] Melati A, Padmasari G, Oktavian R, et al. A comparative study of carbon nanofiber (CNF) and activated carbon based on coconut shell for ammonia (NH₃) adsorption performance[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(3): 211.
- [31] 程健强, 王文广, 韩杰. 碳纤维增强水泥基复合材料的力学性能研究进展[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2021, 41(3): 34–42.
- [32] Stazi F, Tittarelli F, Saltarelli F, et al. Carbon nanofibers in polyurethane foams: Experimental evaluation of thermo-hygroscopic and mechanical performance[J]. *Polymer Testing*, 2018, 67: 234–245.
- [33] Sathiyamoorthy S, Girijakumari G, Kannan P, et al. Tailoring the functional properties of polyurethane foam with dispersions of carbon nanofiber for power generator applications[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 449: 507–513.
- [34] Aqel A, Abou El-Nour K M M, Ammar R A A, et al. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2012, 5(1): 1–23.
- [35] Omachi H, Nakayama T, Takahashi E, et al. Initiation of carbon nanotube growth by well-defined carbon nanorings[J]. *Nature Chemistry*, 2013, 5(7): 572–576.
- [36] Ates M, Eker A A, Eker B. Carbon nanotube-based nanocomposites and their applications[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, 31(18): 1977–1997.
- [37] Yaghoubi A, Nikje M M A. Silanization of multi-walled carbon nanotubes and the study of its effects on the properties of polyurethane rigid foam nanocomposites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 109: 338–344.
- [38] Duc H M, Huu D N, Huu T T, et al. The effect of multi-walled carbon nanotubes on the thermal conductivity and cellular size of polyurethane foam[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2021, 2021: 1–8.
- [39] 冯文静, 李守平, 陈雅君. 软质聚氨酯泡沫阻燃技术的研究进展[J]. *中国塑料*, 2020, 34(3): 93–102.
- [40] 邢凤钦, 张伟, 佟铭玉. 阻燃型硬质聚氨酯泡沫的研究进展[J]. *辽宁化工*, 2021, 50(5): 650–653, 657.
- [41] Maddalena L, Carosio F, Fina A. *In situ* assembly of DNA/graphene oxide nanoplates to reduce the fire threat of flexible foams[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(21): 2101083.
- [42] Hu J, Yang Z. Layer-by-layer self-assembly preparation and desalination performance of graphene oxide membrane[J]. *Water Supply*, 2022, 22(1): 126–136.
- [43] Ge L, Tan X, Sheng R, et al. Layer-by-layer self-assembly of giant polyelectrolyte microcapsules templated by microbubbles as potential hydrophilic or hydrophobic drug delivery system[J]. *Colloid and Interface Science Communications*, 2022, 47: 100603.

Research progress of polyurethane foam modified by carbon nano-materials

LIAN Zhaolong¹, LI Xiaoyu¹, CHEN Peng¹, SUN Bin¹, XU Xinyu¹, HUANG Yudong², WANG Caifeng^{1*}

1. Institute of Petrochemical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

2. School of Chemical and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract This paper introduces the research progress of polyurethane foam changed by carbon nano-materials in recent years. The enhancement methods are divided into two categories according to the different ways of introducing carbon nano-materials, namely the internal doping method and the external protective layer method. The action mechanism and modification effect of the two methods are discussed respectively. The shortcomings of polyurethane foam modified by carbon nano-materials and the prospect for the future are discussed. Simple modification operation and reduction of packing agglomeration should be the focus of future research.

Keywords polyurethane foams; carbon nanometre materials; compressive strength; fire resistance ●



(责任编辑 祝叶华)