

doi: 10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.001

# 泡沫成形法制备芳纶纤维-碳纤维复合导电泡沫及性能

陈翔, 谭蕉君, 宋顺喜, 张美云, 陈瑛奇, 舒管沛

(陕西科技大学轻工科学与工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 高性能泡沫因其轻质、隔热、吸音和抗冲击等特性在航空航天、汽车制造、建筑材料等领域得到广泛应用。芳纶纤维以其卓越的综合性能成为这类材料理想构筑基元。然而, 芳纶泡沫存在工艺复杂、耗时耗能等不足, 限制了其应用的拓展。为了克服这些挑战, 提出了泡沫成形法, 利用泡沫作为纤维载体实现了芳纶纤维的高效分散和气泡模板的辅助造孔, 进一步加入羰基铁粉和丁苯胶乳来抑制泡沫聚并、增强泡沫稳定性, 实现了常压下芳纶纤维泡沫的快速干燥, 极大简化制备流程、提高了制备效率。同时, 在泡沫浆料中通过引入碳纤维和羰基铁粉, 制备了具有高导电性的芳纶/碳纤维复合泡沫, 研究了碳纤维含量对泡沫的电导率、电磁屏蔽特性及力学性能的影响。结果表明, 当碳纤维质量分数达到 9.9% 时, 芳纶/碳纤维/羰基铁粉复合泡沫不仅具有优于芳纶泡沫的力学性能, 还表现出优异的导电性和电磁屏蔽效能。

**关键词:** 芳纶泡沫; 泡沫成形法; 常压干燥; 导电; 电磁屏蔽

**中图分类号:** TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0001-09

## Preparation and performance of aramid fiber/carbon fiber composite conductive foam by foam forming method

CHEN Xu, TAN Jiaojun, SONG Shunxi, ZHANG Meiyun, CHEN Yingqi, SHU Guanrui

(College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** High-performance foams, characterized by their lightweight, thermal insulation, sound absorption and impact resistance, demonstrate significant potential in aerospace, automotive manufacturing, and construction materials. Aramid fibers, renowned for their exceptional properties, are ideal building blocks for these high-performance foams. Despite their advantages, the production of aramid foams is typically complex, time-consuming and energy-intensive, which restricts their wider application. To tackle these issues, we have developed a novel foam-forming technique that employs foam as a medium for the dispersion of aramid fibers and creating a porous structure. Additionally, integrating carbonyl iron powder and styrene-butadiene latex into the foam slurry effectively prevents foam coalescence and bolsters stability, facilitating the rapid drying of aramid fiber foams at atmospheric pressure. This advancement greatly simplifies the manufacturing process and enhances production efficiency. Moreover, aramid/carbon fiber composite foams with high electrical conductivity have been prepared by incorporating carbon fibers and carbonyl iron powder, and the effect of carbon fiber content on foam's electrical conductivity, electromagnetic shielding, and mechanical properties were investigated. It is demonstrated that the composite foam, with a carbon fiber content of 9.9%, not only meets the mechanical properties of aramid foams but also exhibits excellent electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness.

**Keywords:** aramid foam; foam forming; atmospheric pressure drying; electrical conductivity; electromagnetic shielding

聚合物泡沫是一种以树脂为基体、内部含有多孔结构的材料, 因其具有轻质、高强、吸音、隔热等优异性能在农业、工业、建筑、车辆和武器装备等领域被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。随着应用领域的不断拓展, 传统

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51903142), 陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBGY-474), 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室开放基金项目(KF201904)

**通信作者:** 谭蕉君, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高性能纸基材料

**收稿日期:** 2024-09-02

**引用格式:** 陈翔, 谭蕉君, 宋顺喜, 等. 泡沫成形法制备芳纶纤维-碳纤维复合导电泡沫及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 1-9.

CHEN Xu, TAN Jiaojun, SONG Shunxi, et al. Preparation and performance of aramid fiber/carbon fiber composite conductive foam by foam forming method[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 1-9.

的聚氨酯泡沫和三聚氰胺通用泡沫因耐热和阻燃性能不佳难以满足国防军工等特种领域的要求<sup>[3]</sup>。同时,为了实现泡沫材料的性能和效益最大化,结构功能一体化先进复合泡沫是未来发展的必然趋势,故泡沫的设计还应考虑多种功能的集成。开发兼具轻质高强、耐高温隔热的多功能泡沫材料及其高效制备方法具有重要意义<sup>[4]</sup>。

芳香族聚酰胺(简称芳纶)的高度有序和强氢键作用的结构赋予其高强、高模、高耐热性和出色的耐化学性质,是高性能泡沫材料的理想基材<sup>[5]</sup>。然而,受限于较差的溶解性,芳纶无法通过常用化学发泡、注射成型发泡、挤出成型发泡和超临界发泡制备泡沫材料<sup>[6-8]</sup>。目前制备芳纶泡沫的主要方法为是以芳纶纳米纤维为原料,利用冷冻干燥或超临界二氧化碳干燥制备芳纶泡沫<sup>[9-10]</sup>。尽管该方法制备的泡沫具有高孔隙率和小孔径等优势,但限于制备工艺复杂、条件苛刻、生产周期长的缺点,无法实现规模化制备<sup>[11]</sup>。因此,急需发展芳纶纤维基泡沫的高效制备方法,进一步发挥其结构优势,并拓展其应用领域。

20世纪70年代,研究者发明了泡沫成形法,即在纤维浆料中加入表面活性剂,通过机械、气流等作用产生泡沫,以泡沫充当纤维载体、实现均匀分散,最后通过脱水干燥得到高匀度、高松厚度纸页<sup>[12]</sup>。随后,泡沫成形法也被成功用于纤维基泡沫的制备,先后实现了芳纶纤维<sup>[13]</sup>、聚酰亚胺纤维<sup>[14]</sup>、氧化铝纤维<sup>[15]</sup>、石英纤维<sup>[16-17]</sup>基泡沫材料的制备。与传统发泡法相比,泡沫成形法具有快速成型、操作简单和易于规模制备等优势<sup>[12,18]</sup>。然而,泡沫成形法制备芳纶泡沫材料仍存在以下挑战:泡沫是一个远离平衡的亚稳定体系,泡沫的聚并和熟化难以避免,会造成多孔结构坍塌和内部空洞,通常需要低温长时间干燥来抑制泡孔坍塌<sup>[13,19]</sup>;芳纶纤维表面光滑、纤维间相互作用弱<sup>[7]</sup>,得到的芳纶泡沫材料力学性能不佳。因此,提高湿态泡沫稳定性、保留孔隙结构和增强纤维间相互作用对于拓展芳纶泡沫应用领域具有重要意义<sup>[20]</sup>。

针对现有芳纶纤维基泡沫稳定性差、力学性能不佳的问题,笔者首先选用间位芳纶短切纤维和芳纶沉析纤维混合发泡,其中芳纶短切纤维充当泡沫的骨架,而芳纶沉析纤维可利用其手帕状结构对短切起着黏附和增强作用,两者混合使用可形成更加致密和均匀的交织结构,从而增强泡沫整体强度和

稳定性。其次在混合芳纶纤维泡沫成形体系中引入丁苯胶乳(SBR)和炭黑铁粉,研究其对浆料体系稳定性和纤维间相互作用的影响,并通过常压烘箱快速干燥提高泡沫制备效率。同时,引入碳纤维(CF)制备了高导电芳纶/CF复合泡沫,并对其导电性能、电磁屏蔽性能和光热性能进行了表征。笔者提出的制备方法有望简化泡沫制备工艺、提升制备效率、拓展泡沫功能,为高性能泡沫的快速、高效、规模化制备提供技术参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料及试剂

间位芳纶短切纤维:VICWA® ShortCut,长度6 mm,中芳特纤股份有限公司;

芳纶沉析纤维:Kevlar®,东营市中芳特纤股份有限公司;

短切CF:长度3 mm,碳烯技术(深圳)有限公司;

十二烷基苯磺酸钠(SDBS):S817805,上海麦克林生化科技有限公司;

十二烷基硫酸钠(SDS):S817788,上海麦克林生化科技有限公司;

SBR:AL-3001A,固含量为50%,日本爱宇隆株式会社;

炭黑铁粉:3 μm,拓普金属材料有限公司。

间位芳纶短切纤维使用前用SDBS溶液洗涤处理除去表面油剂,干燥备用。

### 1.2 仪器及设备

标准纤维疏解机:ZQS4,德国Lorentzen & Wettre公司;

高速搅拌器:VISC6000,德国IKA公司;

扫描电子显微镜(SEM):Vega 3 SBH,捷克TESCAN公司;

光学显微镜:DMB5-223IPL-5,麦克奥迪实业集团有限公司;

伺服多功能材料试验机:AI-7000-NGD,高特威尔(东莞)有限公司;

远红外成像仪:i7,FL-IR System OÜ公司;

网络矢量分析仪:AV 3620,德国Rohde & Schwarz公司;

振动样品磁强计:7404,美国LakeShore公司;

直流电源:MS-605D,东莞迈盛科技有限公司;

红外线灯泡:R95E,深圳市安宏达光电有限公司;

万用表:DEM21,德力西电器有限公司。

### 1.3 增强芳纶泡沫的制备

芳纶泡沫和SBR增强芳纶泡沫的制备流程如图1所示。将芳纶短切纤维和间位芳纶沉析纤维按照1:1的质量比各称取绝干量为0.25 g,混合后加入自制的发泡容器中,加入SBR和表面活性剂SDS,然后加入实验室用去离子水,控制体系总质量为25 g,最后置于高速搅拌器下以一定的速度对纤维浆料发泡一定时间,然后将所形成的纤维-泡沫混合体系转移到布氏漏斗中形成预制体,最后在70 °C的烘箱中干燥5 h制备出增强芳纶泡沫。当SBR质量分数为0时,所得泡沫为芳纶泡沫。

实验分别控制SDS浓度(用量)0.6 g/L (0.015 g), 1.0 g/L (0.025 g), 1.2 g/L (0.03 g), 2.4 g/L (0.06 g), 4.8 g/L (0.12 g);搅拌转速1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5000 r/min;搅拌时间2, 5, 10, 15, 20 min; SBR的添加量为0%, 5%, 10%, 20%, 30%。探究SDS用量、搅拌转速、搅拌时间以及SBR的添加质量分数对增强芳纶泡沫的微观形貌、泡沫性能以及力学性能的影响。

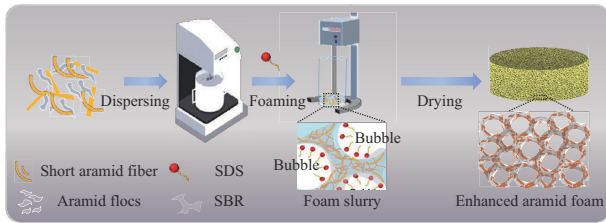


图1 SBR增强芳纶泡沫的制备流程图

Fig. 1 Preparation diagram of SBR-enhanced aramid foams

### 1.4 增强芳纶/羰基铁粉复合泡沫和增强芳纶/CF/羰基铁粉导电泡沫的制备

在混合浆料中引入了质量分数为36%羰基铁粉和不同量的CF,增强泡沫稳定性,并赋予泡沫导电性。实验控制CF质量分数为0, 3.3%, 6.6%, 9.9%, 13.2%,发泡完成后将混合浆料高度压缩到2 cm,以调控泡沫空气含量,最后在70 °C烘箱中干燥5 h,分别得到增强芳纶/羰基铁粉泡沫和增强芳纶/CF/羰基铁粉导电泡沫。

### 1.5 性能表征

泡沫性能主要用空气含量、排液率来表征。空气含量用来表征溶液的发泡能力,即浆料发泡后泡沫高度与初始浆料高度差值与最终泡沫高度的比值。排液率即在相同时间下泡沫的滤水体积与最终高度泡沫的体积的比值。

力学性能主要用压缩强度和压缩弹性模量来表征。采用伺服多功能材料试验机,在2 940 N作用下以20 mm/min的压缩速度测试泡沫材料在70%应变条件下的应力-应变曲线。

利用SEM对泡沫材料的平面和截面形貌进行表征。测试前对样品进行喷金预处理,测试时加速电压为10 kV。

导电性能测试:利用万用表对导电泡沫进行电阻测试。测试三组数据取平均值。电导率公式见式(1):

$$\sigma=L/RA \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为电导率, $L$ 为泡沫长度, $R$ 为电阻, $A$ 为泡沫横截面积)。

使用振动样品磁强计对芳纶导电泡沫的比磁饱和强度( $M$ )进行表征测试。测试条件为:极头直径5 cm,室温测量灵敏度 $5 \times 10^{-7}$  emu,测量范围: $5 \times 10^{-7}$  emu到 $10^3$  emu,最大磁场:2.17 T。

利用稳压电源和远红外成像仪对导电泡沫进行测试,施加不同电压,记录温度随时间的变化。利用100 W红外线灯泡和远红外成像仪对导电泡沫在不同光照强度下进行测试。

采用网络矢量分析仪在8.2~12.4 GHz波长范围内对制备的导电泡沫进行电磁屏蔽性能测试。每个样品在不同位置测试3组数据作为平行对照样,由测量的散射参数( $B_{11}$ 和 $B_{21}$ )计算出吸收系数( $A$ )、反射系数( $R$ )、透射系数( $T$ )和总屏蔽效能( $S_{ET}$ )、吸收效能( $S_{EA}$ )、反射效能( $S_{ER}$ ),相关公式见式(2)~式(7)。

$$R = |B_{11}|^2 \quad (2)$$

$$T = |B_{21}|^2 \quad (3)$$

$$A = 1 - R - T \quad (4)$$

$$S_{ER} = -10 \lg(1 - R) \quad (5)$$

$$S_{EA} = -10 \lg[T/(1 - R)] \quad (6)$$

$$S_{ET} = S_{ER} + S_{EA} \quad (7)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 泡沫成形法制备增强芳纶泡沫及稳定性能

泡沫成形法制备纤维基泡沫的原理和过程如下:纤维浆料经疏解后混合,通过机械搅拌产生泡沫,利用泡沫作为纤维分散的载体,泡沫固化后在原来气泡位置留下泡孔结构,实现纤维基泡沫材料的制备。搅拌过程中,空气进入溶液并形成气泡,表面活性剂分子亲油基指向空气,亲水基指向溶液,起到稳泡作用。泡沫成形具有快速成形、操作

简单和规模化制备等优势,但泡沫本质是一个亚稳定的水包气乳液,不可避免地发生聚并、熟化,造成多孔结构坍塌和内部空洞。通常只能通过降低干燥温度、延长干燥时间来部分抑制泡孔坍塌。因此,提高泡沫稳定性和干燥速率对于拓展泡沫成形应用和增强泡沫性能具有重要意义。

首先研究了水性SBR和固体颗粒(羰基铁粉)对泡沫稳定性的影响,将不同组分的芳纶泡沫浆料发泡后脱模并静置30 min,观察泡沫的形态和稳定性,如图2所示(图中FeCO为羰基铁粉,下同)。

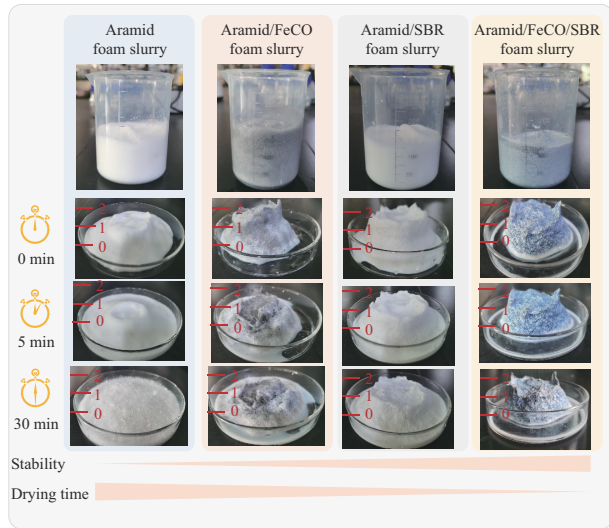


图2 SBR和羰基铁粉对泡沫稳定性的影响

Fig. 2 Effects of SBR and carbonyl iron powder on stability of aramid foams

从图2可以看出,所有泡沫浆料都有很好的起泡特性,达到较高的泡沫高度。未经增强的芳纶泡沫浆料的聚并、熟化现象明显,发泡后5 min已有部分坍塌,发泡后30 min泡沫熟化和聚并现象明显。经羰基铁粉增强的芳纶/羰基铁粉泡沫浆料稳定性得到部分提升,尽管发泡后30 min有所坍塌,仍保留泡沫整体形状,主要原因是羰基铁粉具有合适疏水性,能够覆盖气泡表面,增强泡沫液膜强度、阻碍液膜运动,进一步提高泡沫浆料稳定性。加入SBR的芳纶/SBR泡沫浆料的稳定性进一步提升,聚并和熟化进一步被抑制。SBR作为一种高固含水性乳液,一方面能提高浆料体系的黏度、降低泡沫运动,同时可黏附纤维、增强纤维间相互作用,达到增强泡沫稳定性的目的。羰基铁粉和SBR协同增强的芳纶/SBR/羰基铁粉泡沫浆料稳定性进一步增强,发泡30 min后仍保持脱模时的形状和高度,表明泡沫的熟化、聚并基本被完全抑制,有望实现常压高温干燥。

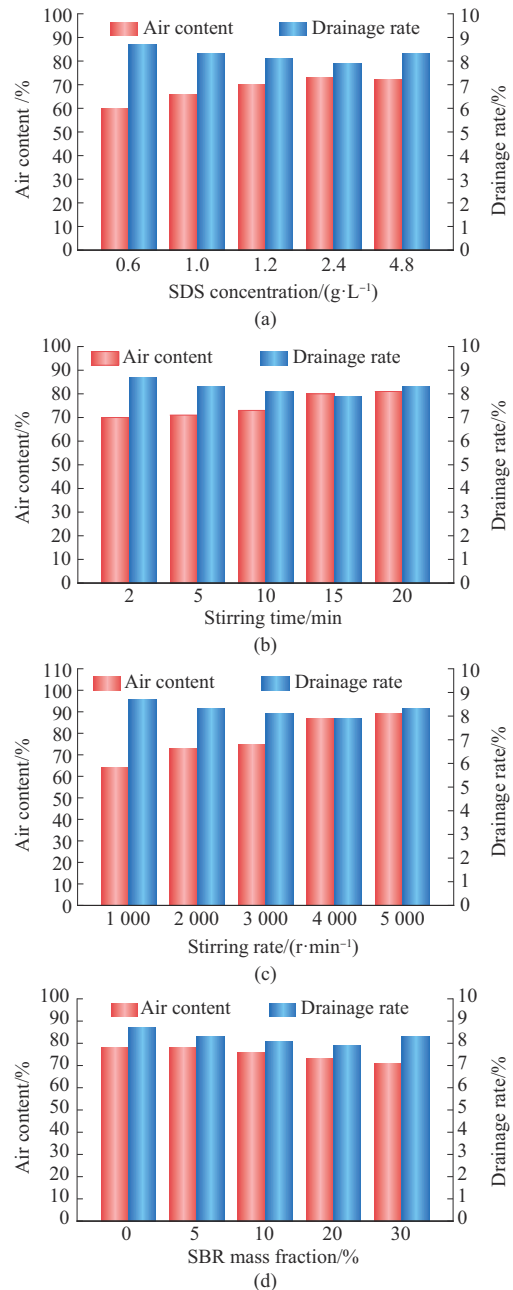


图3 不同SDS浓度、搅拌时间、搅拌转速和SBR含量时芳纶泡沫的空气含量与排液率

Fig. 3 Air contents and drainage rates of aramid foams with different SDS concentrations, stirring times, stirring speeds and SBR contents

为了进一步探究泡沫性能的影响因素,进一步对表面活性剂含量、搅拌时间和搅拌转速等发泡工艺参数进行考察。图3为不同工艺参数对泡沫空气含量与排液率的影响。通常,在空气体积分数为55%~75%之间时,泡沫会呈现最佳状态,气泡保持圆球形,这称为“湿泡沫”。此时,气泡之间有大量间隙液体,相邻气泡以点接触存在,能够自由移动,纤维分布均匀。当空气含量过高时,泡沫中液体减

少,相邻气泡以面接触形式存在,位置固定,气泡间的液膜薄且易破裂。若空气含量过低,气泡在浆料中离散分布,纤维团聚现象严重,溶液无法发泡。

从图3可以看出,随着SDS含量增加,泡沫的空气体积分数从60%增加到73%,这是由于SDS降低了表面张力,有利于泡沫的产生和稳定。当SDS添加量为2.4 g/L (0.06 g)时,泡沫的空气含量最高,体积分数达到73%,此时达到了SDS临界胶束浓度,表面张力最低,泡沫的发泡能力最大,排液率最低,泡沫最稳定。搅拌时间、搅拌转数增大,空气含量也随之增大,这是由于随着搅拌时间增加引入空气越来越多的原因,搅拌转速对空气含量的影响比较大是由于空气被快速引入体系的原因。当搅拌时间为2~10 min、搅拌转数为1 000~3 000 r/min时,泡沫空气的体积分数均保持在55%~75%最佳区间,2 000 r/min和3 000 r/min的排液率在当前状态下较低,见图3b~图3c。尽管SBR对发泡高度起到一定抑制作用,但泡沫空气体积分数仍基本保持在55%~75%区间。值得注意的是,SBR能够增加泡沫黏度和纤维间相互作用,可降低泡沫的排液率。SBR质量分数为20%时,排液率最低为7.9%。

图4和图5为不同SDS浓度、搅拌时间、转速和SBR含量下芳纶泡沫照片和力学性能。由图可以看出,改变SDS含量、搅拌时间对芳纶泡沫发泡高度、压缩强度和模量影响较小,改变搅拌转数对芳纶泡沫发泡高度影响显著,这是因为随着转速升

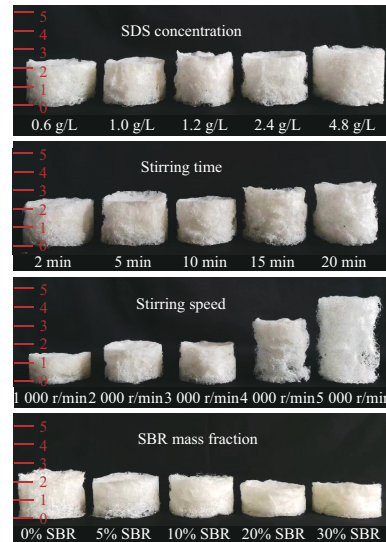


图4 不同SDS浓度、搅拌时间、转速和SBR含量芳纶泡沫照片  
Fig. 4 Photos of aramid foam with different SDS concentrations, stirring times, speeds, and SBR contents

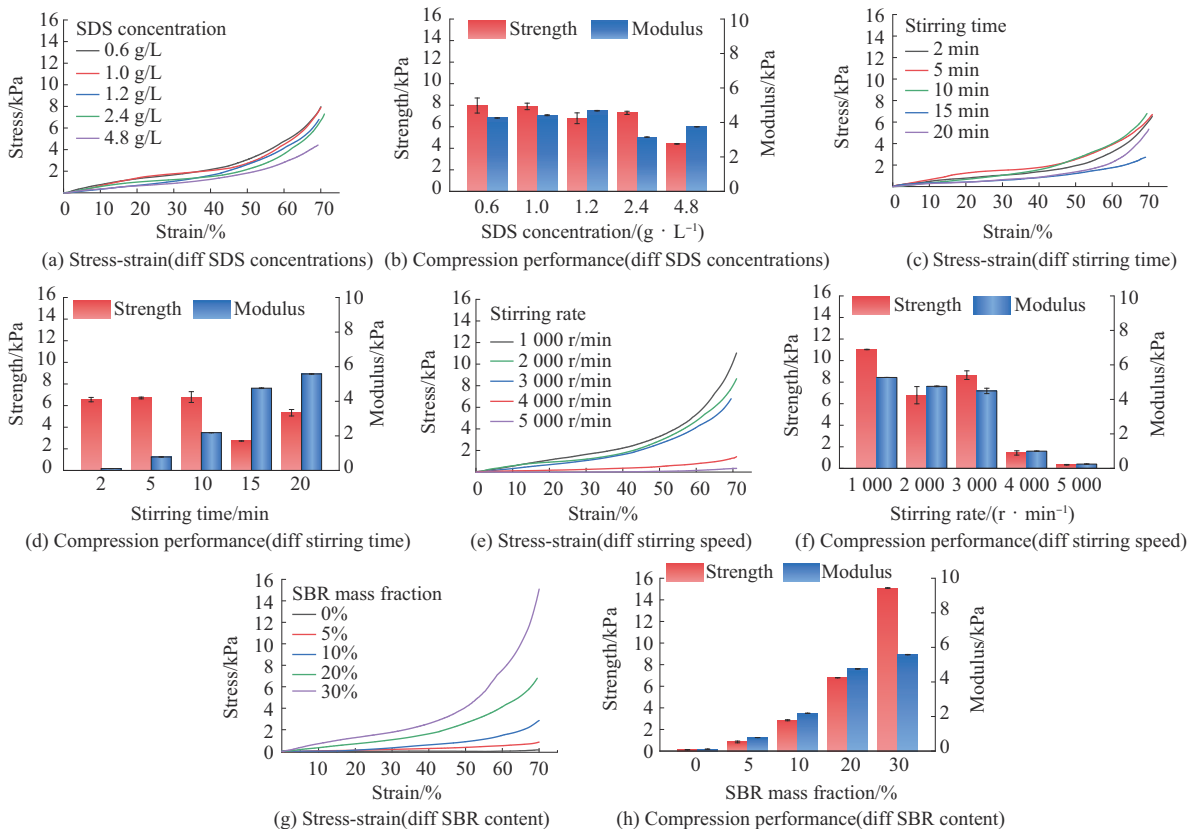


图5 不同SDS浓度、搅拌时间、搅拌转速及不同SBR含量时芳纶泡沫的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of aramid foams with different SDS concentrations, stirring times, stirring speeds and SBR contents

高,鼓入空气不断增多,泡沫发泡高度变大,但气泡聚并更明显,泡沫致密度随之下降。当搅拌转速为1 000~3 000 r/min时制备的泡沫表现出相对较高的压缩性能和压缩弹性模量。随着搅拌转速迅速增大,大量空气被引入,发泡高度快速升高,泡孔结构较松散,导致材料抵抗外力能力较弱,表现为4 000 r/min和5 000 r/min制备的芳纶泡沫发泡高度高,但力学性能较差。SBR含量对泡沫的发泡高度影响较小,但对泡沫的力学性能影响显著。随SBR含量的增加,材料的屈服点逐渐左移,且压缩强度及其弹性模量逐渐增大。在线性弹性阶段内,泡沫的压缩性能随SBR含量升高而逐渐上升。SBR质量分数为30%的增强泡沫具有最高力学性能。

## 2.2 增强芳纶泡沫的微观形貌

搅拌转速和SBR含量对芳纶泡沫的综合性能有显著影响,但增大搅拌转速引入过多空气,泡沫结构疏松、内部缺陷多,故进一步对不同含量SBR增强芳纶泡沫的形貌进行探究,如图6所示。从光学显微镜照片可看出,所有泡沫中的气泡均可作为载体,实现对纤维高效分散,纤维被限制在多个泡沫的间隔中。从SEM图可知,未经增强芳纶泡沫干燥后表面和截面都是疏松多孔结构,纤维间相互作用较弱,仅依靠芳纶沉析对芳纶短切的搭接和包覆作用。SBR增强芳纶泡沫中纤维间相互作用明显增强,出现了很多膜状物质,且随着SBR含量的提高而增多。当SBR质量分数为20%时,膜状物和纤维之间结合紧密,且无明显余胶。当SBR质量分数增加到30%,膜状物完全包覆芳纶纤维。尽管SBR能增强泡沫稳定性和纤维间相互作用,过多SBR也会增加泡沫密度、降低发泡高度和泡沫综合性能。

结合上述因素,将SDS浓度为2.4 g/L、搅拌时

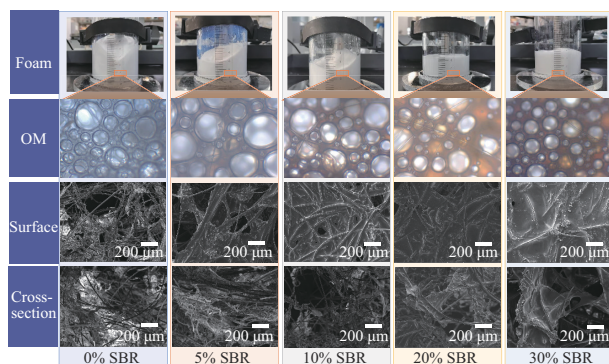


图6 不同质量分数SBR增强芳纶泡沫的数码照片、光学显微镜(OM)照片、表面与截面SEM照片

Fig. 6 Digital photos, OM images and SEM photos of aramid foam enhanced with different SBR mass fractions

间为10 min、转数为2 000 r/min、SBR质量分数为20%的条件确定为制备增强芳纶泡沫的优选条件。

## 2.3 芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的制备及力学性能

随着需求多样化,泡沫材料不仅提供隔热、隔音、缓冲等基本功能,在电磁防护、电热光热等高科技领域的需求也日益增加<sup>[21]</sup>,故对泡沫材料的功能性提出了新的挑战和需求。如芳纶泡沫在航空航天、电子设备等领域的应用<sup>[22]</sup>,除了要求具备良好的强度和耐温性能外,还需要具备电磁屏蔽和电磁防护功能以保护敏感设备免受电磁干扰影响<sup>[23-24]</sup>。为了满足这些高端需求,在制备芳纶泡沫优化条件下引入导电CF和磁性羰基铁粉制备高导电、磁性的芳纶/CF/羰基铁粉复合泡沫,制备流程如图7所示。高强高模、高导电的CF不仅能有效提高泡沫电导率和电磁屏蔽性能,还能增强泡沫稳定性和机械性能。羰基铁粉能赋予复合泡沫磁性、增强电磁波的磁损耗,同时还能利用颗粒稳定效应进一步增强泡沫稳定性。从图7可看出,加入CF和羰基铁粉后泡沫浆料颜色加深,且具有出色稳定性,常压烘箱干燥后基本保持湿态泡沫的外观,这种高稳定性、高导电、工艺简单的芳纶泡沫制备方法为其在高端保护领域应用奠定基础。

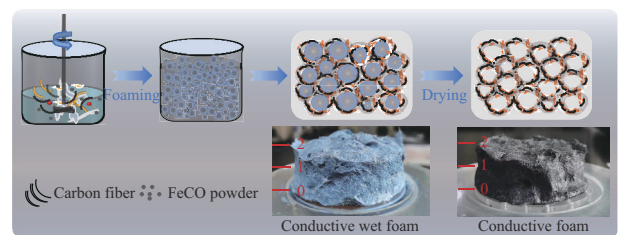


图7 增强芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的制备流程图

Fig. 7 Preparation diagram of aramid/CF/carbonyl iron powder composite conductive foam

图8为不同含量CF增强芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的压缩强度及其弹性模量和形貌。加入CF后,增强芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的强度与模量均发生大幅提升。随着CF质量分数从3.3%增加到9.9%,复合泡沫的压缩强度从7.4 kPa提升到32.1 kPa,增加幅度可达333.8%;压缩弹性模量从4.1 kPa增加到15.5 kPa,增加幅度达278%。原因是高强高模的CF进一步增加了复合泡沫抵抗形变的能力。图8c表面和截面形貌可能看出,引入CF后复合泡沫中出现了大量伸直、棒状CF,也从侧面证实了高强高模CF的增强作用。当进一步增加CF质量分数到13.3%时,复合泡沫的压缩强度开始下降,可能原因

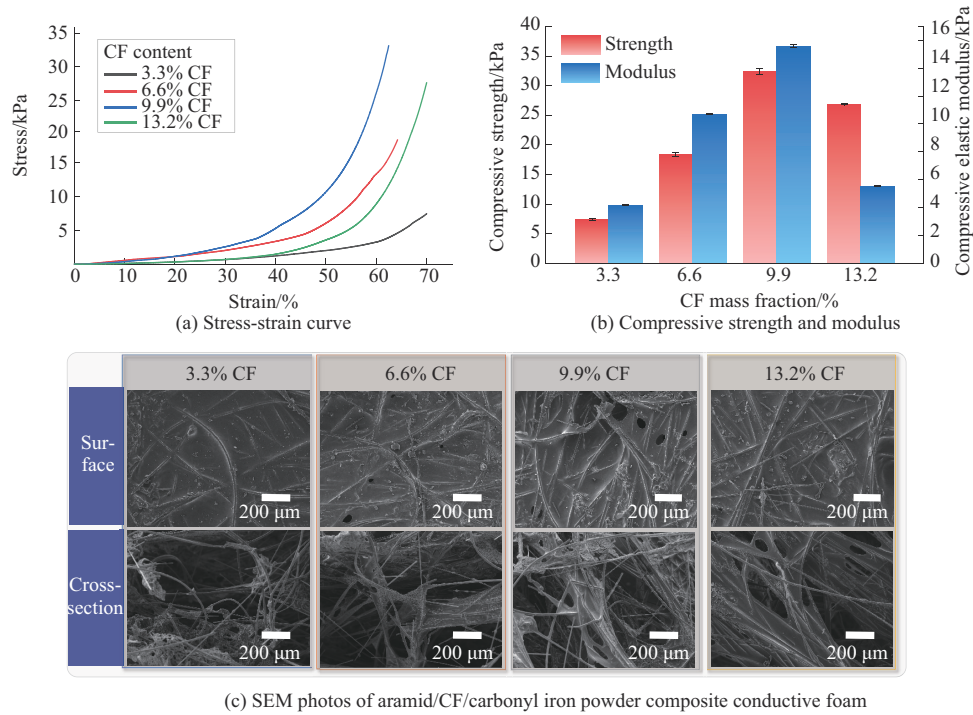


图8 增强芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的应力-应变曲线、压缩性能及SEM图

Fig. 8 Stress-strain curve, compression performance and SEM photos of aramid/CF composite conductive foam

是引入过多CF降低了纤维界面间相互作用。

#### 2.4 芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的电磁屏蔽性能

CF和羰基铁粉的引入可赋予复合泡沫出色的

电导率和磁性能,对其电磁参数和电磁屏蔽性能进行研究,如图9所示。图9a为CF的含量对复合泡沫电导率的影响,可以看出CF为复合泡沫提供了优异的电导率,仅加入3.3%CF的复合泡沫电导率

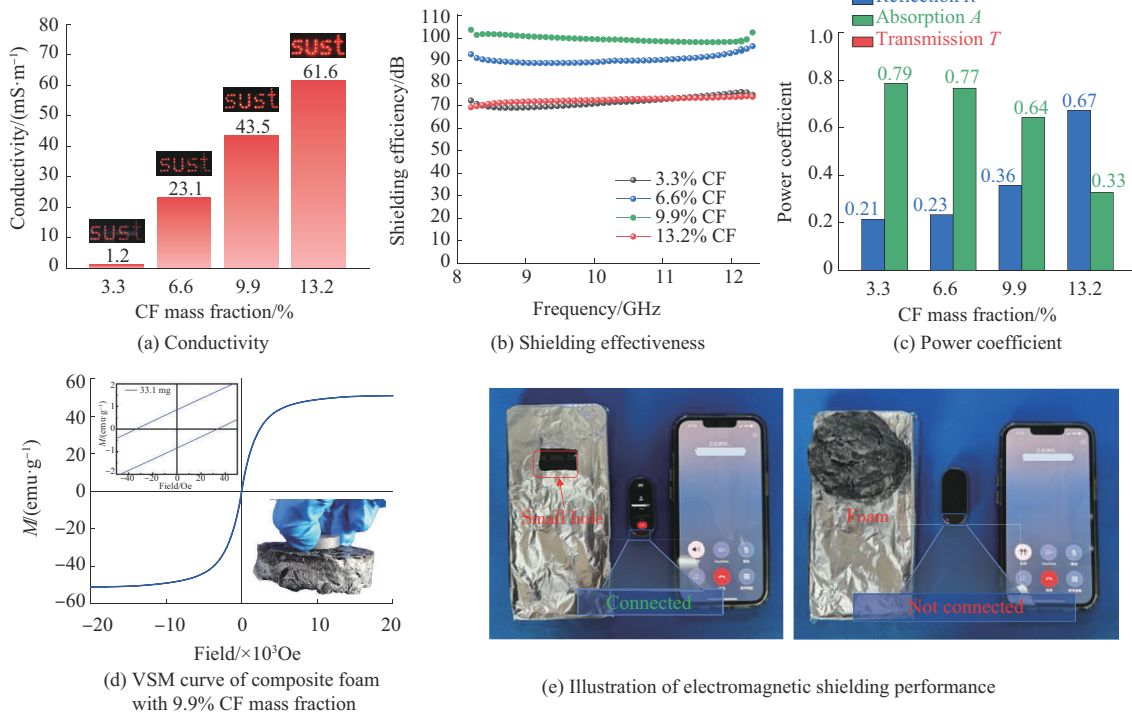


图9 增强芳纶/CF/羰基铁粉复合导电泡沫的电磁参数和电磁屏蔽性能

Fig. 9 Electromagnetic parameters and shielding performances of aramid/CF/carbonyl iron powder composite foams

可达 1.2 mS/m,即可点亮 LED 灯珠。随着 CF 含量的提升,复合泡沫电导率也不断变高,点亮的 LED 灯珠光强也越来越强。羰基铁粉的引入可赋予复合泡沫磁性,复合泡沫能用磁铁吸附,其比磁饱和强度达到 51.1 emu/g,如图 9 d 所示。同时,磁滞回线没有出现明显的剩余磁化强度和矫顽力,表明其是一种具有易磁化和退磁、高磁导率、低磁滞损耗及高饱和磁化强度的软磁材料。

图 9b~图 9c 为复合泡沫在 X 波段的电磁屏蔽性能。所有泡沫在该波段下均具有出色的电磁屏蔽性能,总屏蔽能在 70 dB 以上。随着 CF 含量的增加,导电泡沫的电导率逐渐增加,但屏蔽性能呈现先升高后降低的趋势。其中,CF 质量分数为 9.9% 的导电泡沫的屏蔽效能可达 100 dB,吸收系数达到 0.64,表现出高屏蔽效能、高吸收损耗和低反射特性,即大部分电磁波能量是通过吸收和内部损耗机制被耗散掉。这种高屏蔽效能、高吸收损耗和低反射特性得益于泡沫的多孔结构、CF 的导电性和羰基铁粉的磁损耗,一方面 CF 的导电性和羰基铁粉的磁损耗能使电磁波通过反射、电磁耦合作用被耗散,同时泡沫的多孔结构为电磁波提供多个反射界面,增强了泡沫电磁波耗散能力。进一步对复合泡沫的实际电磁屏蔽性能进行探究,如图 9e 所示。当手机未被锡箔纸完全包裹时,手机能接收到来电信号,且蓝牙连接的手环显示来电;当将导电泡沫完全覆盖在锡箔纸空缺处时,手机无法接收到来自外部的来电信号,手环的蓝牙连接也断开,且不显示来电,表明导电泡沫可具有良好的电磁屏蔽效能。

### 3 结论

针对芳纶纤维基泡沫稳定性差、力学性能不佳的问题,在芳纶纤维的泡沫成形体系中引入 SBR 和羰基铁粉增强泡沫稳定性,成功制备高度稳定的芳纶/SBR 泡沫浆料,并实现了常压高温烘箱干燥,极大简化了芳纶泡沫制备流程、提高了制备效率。同时,制备了高导电电磁屏蔽复合泡沫,对其导电性能、电磁屏蔽性能和光热性能进行表征。具体结论如下:

(1) 羟基铁粉和 SBR 可大幅提高芳纶泡沫的泡沫稳定性,抑制泡沫聚并和熟化,不仅赋予泡沫浆料高温快速干燥和规模化制备能力,同时保持了泡沫的高孔隙结构。

(2) 确定 SDS 浓度为 2.4 g、搅拌时间为 10 min、

转速为 2 000 r/min、SBR 添加质量分数为 20% 的条件为制备增强芳纶泡沫的优选条件,该条件下制备的芳纶泡沫具有优异泡沫稳定性、力学性能和孔结构。

(3) 芳纶复合泡沫浆料中引入 CF 可制备高导电的电磁屏蔽复合泡沫。优化条件下,CF 质量分数为 9.9% 的复合导电泡沫电导率可达 43.5 mS/m,对 X 波段电磁波有 100 dB 的总屏蔽效能,且吸收系数达到 0.64。

### 参考文献

- [1] 赵继永,王志鹏,程世婧,等.高性能聚合物泡沫材料的制备性能与应用研究进展[J].高分子材料科学与工程,2020,36(6):136-144.  
ZHAO Jiyong, WANG Zhipeng, CHENG Shijing, et al. Preparation, properties and applications of high-performance polymeric foam materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020,36(6):136-144.
- [2] VISSE C W R, AMATO D N, MUELLER J, et al. Polymer foams: Architected polymer foams via direct bubble writing[J]. Advanced Materials, 2019,31(46). DOI:10.1002/adma.201970326.
- [3] 贾梦,许准,魏思淼,等.建筑用泡沫材料阻燃研究进展[J].中国塑料,2024,38(2):52-60.  
JIA Meng, XU Zhun, WEI Simiao, et al. Research progress in flame-retardant foam materials for construction[J]. China Plastics, 2024,38(2):52-60.
- [4] SU Tuoyi, LIU Nishuang, GAO Yihua, et al. Mxene/cellulose nanofiber-foam based high performance degradable piezoresistive sensor with greatly expanded interlayer distances[J]. Nano Energy, 2021,87. DOI:10.1016/j.nanoen.2021.106151.
- [5] GARCÍA J M, GARCÍA F C, SERNA F, et al. High-performance aromatic polyamides[J]. Progress in Polymer Science, 2010,35(5):623-686.
- [6] WEN Huayin, WANG Min, LUO Shikai, et al. Aramid fiber reinforced EPDM microcellular foams: Influence of the aramid fiber content on rheological behavior, mechanical properties, thermal properties, and cellular structure[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021,138(22). DOI:10.1002/app.50531.
- [7] ZHAO Yan, LI Xin, SHEN Jiangnan, et al. The potential of kevlar aramid nanofiber composite membranes[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020,8(16):7548-7568.
- [8] SHAAAYEGAN V, AMELI A, WANG S, et al. Experimental observation and modeling of fiber rotation and translation during foam injection molding of polymer composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016,88:67-74.
- [9] NIU Qingyuan, SUN Dong, GAO Kezheng, et al. Cellulose microtube/aramid nanofiber composite foam[J]. Cellulose, 2023,30(15):9453-9463.
- [10] XIE Chunjie, LIU Siyuan, ZHANG Qinguan, et al. Macroscopic-

- scale preparation of aramid nanofiber aerogel by modified freezing-drying method[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(6): 10 000–10 009.
- [11] FERREIRA E S, CRANSTON E D, REZENDE C A. Naturally hydrophobic foams from lignocellulosic fibers prepared by oven-drying[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(22):8 267–8 278.
- [12] 聂景怡,张美云,甄晓丽,等.表面活性剂与泡沫性质对泡沫成形间位芳纶纸性能的影响[J].*中国造纸*,2022,41(1):15–21.  
NIE Jingyi,ZHANG Meiyun,ZHEN Xiaoli, et al. Effects on properties of meta-aramid paper via foam forming of surfactants and foam properties[J]. *China Pulp & Paper*,2022,41(1):15–21.
- [13] 宋顺喜,时宇杰,张美云,等.聚酰亚胺/芳纶纤维多孔材料的制备及其性能[J].*陕西科技大学学报*,2020,38(2):1–5.  
SONG Shunxi,SHI Yujie,ZHANG Meiyun, et al. Preparation and characterization of polyimide/aramid fiber porous materials[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2020, 38(2):1–5.
- [14] SONG Shunxi, SHI Yujie, TAN Jiaojun, et al. An efficient approach to fabricate lightweight polyimide/aramid sponge with excellent heat insulation and sound absorption performance[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 109: 404–412.
- [15] SANG Guolong, WANG Chao, ZHANG Qifan, et al. Strong and tough alumina ceramic from the particle - stabilized foam[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(2). DOI: 10.1002/adem.202200971.
- [16] HOU Fuqing, DING Nengxin, YANG Huikang, et al. Aqueous foam forming of quartz paper[J]. *Cellulose*,2023,30(1):495–508.
- [17] HUANG Mengle, ZHANG Chunhui, HOU Fuqing, et al. Stabilization and strengthening effects of filamentous nanocellulose in the foam forming of quartz paper[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130251.
- [18] 赵诗婷,王习文.泡沫成形法天丝纤维多孔缓冲材料的制备及其性能研究[J].*中国造纸*,2024,43(1):93–100.  
ZHAO Shiting, WANG Xiwen. Preparation and characterization of lyocell fiber porous buffer materials by foam forming[J]. *China Pulp & Paper*,2024,43(1):93–100.
- [19] JIN Jian, HUANG Jianguo, ICHINOSE I. Dried foam films: Self-standing, water-free, reversed bilayers of amphiphilic compounds [J]. *Angewandte Chemie*,2005,117(29):4 608–4 611.
- [20] 张凯,阴文博,秦晨妮,等.双分子层液膜法制备纤维素水基泡沫及其稳定性的研究[J].*包装工程*,2023,44(7):54–62.  
ZHANG Kai, YIN Wenbo, QIN Chenni, et al. Cellulose-based aqueous foam by bilayer liquid films and its stability[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(7):54–62.
- [21] JIA Zhenxin, ZHANG Mingfa, LIU Bin, et al. Graphene foams for electromagnetic interference shielding: A review[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(7):6 140–6 155.
- [22] JIANG Houmin, ZHU Youzhang, ZHAO Guofeng, et al. Preparation and optimization of conductive pdms composite foams with absorption-dominated electromagnetic interference shielding performance via silvered aramid microfibers[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 191. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112029.
- [23] QIAN Kunpeng, ZHOU Jianyu, MIAO Miao, et al. Highly ordered thermoplastic polyurethane/aramid nanofiber conductive foams modulated by kevlar polyanion for piezoresistive sensing and electromagnetic interference shielding[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1). DOI:10.1007/s40820-023-01062-0.
- [24] GUO Yunbao, VOKHIDOVA N R, WANG Qin, et al. Lightweight and thermal insulation fabric-based composite foam for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 303. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.127787.