

DOI:10.13475/j.fzxb.20191206306

纳米纤维吸声降噪研究进展

李好义^{1,2}, 许浩¹, 陈明军¹, 杨涛³, 陈晓青¹,
阎华^{1,2}, 杨卫民^{1,2}

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 北京化工大学 有机无机复合材料
国家重点实验室, 北京 100029; 3. 中国化学纤维工业协会, 北京 100022)

摘要 为拓宽纳米纤维在声学领域的应用,促进高性能纳米纤维吸声材料的发展,对目前国内外纳米纤维的吸声降噪研究进展进行综述。首先分析了纳米纤维的吸声原理及吸声优势,认为纳米纤维的高比表面积与高孔隙率促进了其对中低频段声波的吸收;其次对影响纳米纤维吸声性能的因素进行了归纳与总结;然后重点阐述了纳米纤维对天然纤维、合成纤维与泡沫等材料吸声性能的影响,认为在常规吸声材料表面复合纳米纤维后可显著提升自身中低频段的吸声性能;最后针对纳米纤维吸声研究中亟待解决的问题以及如何制备绿色高性能的纳米纤维吸声材料进行了展望。

关键词 纳米纤维; 吸声材料; 降噪; 静电纺丝; 复合材料

中图分类号: TS 141 **文献标志码**: A

Research progress of noise reduction by nanofibers

LI Haoyi^{1,2}, XU Hao¹, CHEN Mingjun¹, YANG Tao³, CHEN Xiaoqing¹,
YAN Hua^{1,2}, YANG Weimin^{1,2}

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*
2. *State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*
3. *China Chemical Fibers Association, Beijing 100022, China*)

Abstract In order to broaden the application of nanofibers in acoustics and promote the development of sound absorption of high-performance nanofibers, the current research on sound absorption and noise reduction of nanofibers at domestic and abroad is reviewed. First, the sound absorption principle and advantages of nanofibers are analyzed. The high specific surface area and porosity of nanofibers promote the absorption of sound waves in the low and middle frequency range. Secondly, the factors that affect the sound absorption properties of nanofibers are summarized. Then introduced the preparation technology of nanofibers. The effects of nanofibers on the sound absorption properties of natural fibers, synthetic fibers and foams are mainly described. It is believed that conventional sound absorption materials can significantly improve their sound absorption performance in low and middle frequency range by combining with nanofibers. Finally, the prospects for nanofiber sound-absorbing urgently to be solved and how to prepare green and high-performance nanofiber sound-absorbing materials were made.

Keywords nanofiber; sound absorbing material; noise reduction; electrospinning; composite material

噪声污染是仅次于空气污染的四大污染之一,来源主要有交通噪声、工业噪声、建筑施工噪声和社会生活噪声。长期暴露在噪声环境下会增加耳聋、

糖尿病和心肌梗死的风险。根据声波在传播过程中的反射、吸收等特点,噪声处理方式有吸声、隔声和消声。在吸声领域,根据吸声机制的不同分为多孔

收稿日期:2019-12-30 修回日期:2020-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51603009)

第一作者:李好义(1987—),男,讲师,博士。主要研究方向为静电纺丝纳米纤维。

通信作者:杨卫民(1965—),男,教授,博士。主要研究方向为高分子材料先进制造。E-mail: yangwm@mail.buct.edu.cn。

材料吸声和共振结构吸声。多孔吸声材料通过多孔结构促进声波的扩散消耗,可有效吸收高频段噪声,但在中低频段吸声性能差甚至不具备吸声性能。穿孔板等共振吸声结构对低频噪声具有优良的吸收效果,但其共振吸声频带较窄,占据空间大。在穿孔板吸声结构空腔内放置多孔吸声材料,可有效拓宽吸声频带^[1]。

相比于高频噪声,中低频噪声衰减缓慢,可轻易穿越障碍物的声学特性使其危害更大,处理更加困难。采用纤维细化技术制备出了高比表面积、质轻的纳米纤维,为低频噪声的吸收提供了方法。Chang 等^[2]制备了具有优良低频吸声性能的轻质纳米纤维,在 200~600 Hz 频段平均吸声系数高达 0.5。研究表明,纳米纤维可明显改善材料中低频段的吸声效果,但目前纳米纤维吸声降噪研究基本处于实验室阶段。为促进纳米纤维在声学领域的发展,本文分析了纳米纤维的吸声降噪原理;归纳了影响纳米纤维吸声性能的影响因素;总结了纳米纤维复合吸声材料的类型;最后指出了纳米纤维吸声材料存在的问题及发展方向。

1 纳米纤维吸声降噪原理

纳米纤维属于多孔吸声材料,具有大量深入材料内部且相互贯通的孔或间隙,有利于声波在材料内部的扩散消耗。图 1 为多孔材料吸声示意图^[3]。对于多孔材料,声波通过孔隙进入材料内部,会激发材料内空气来回运动,与多孔材料壁面的相对运动产生黏滞摩擦,使声能不断转化为热能;声波以纵波形式在空气中传递,具有压缩和膨胀的交替变化特性,不断与材料发生热交换消耗声能。纳米纤维同时具备共振吸声与多孔吸声的能力。

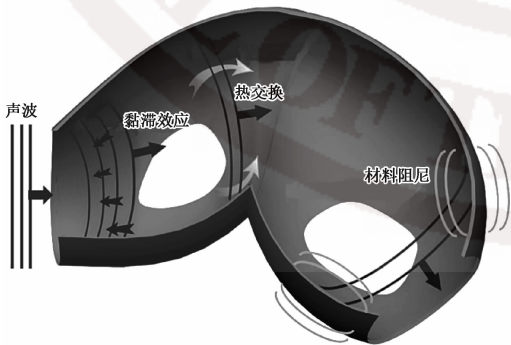


图 1 多孔材料吸声示意图

Fig. 1 Schematic of porous material sound absorption

当吸声材料的固有频率与声波频率一致时,会引发强烈的共振现象,振幅和振动速度达到最大值,声能消耗最大。图 2 为声波引起的纳米纤维膜振动

示意图^[4]。Kucukali 等^[5]通过高速摄像机捕捉到聚乙烯醇(PVA)纳米纤维薄膜与铝箔在不同频率声波下的挠度变化发现,纳米纤维薄膜相对于铝箔具有更低的共振频率与更高的共振峰值。

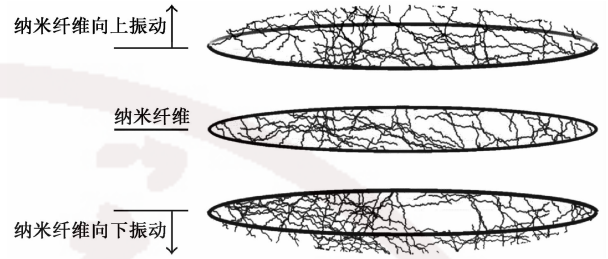


图 2 纳米纤维膜共振示意图

Fig. 2 Schematic resonance of nanofiber membrane

高频声波振动速度快,引起空气与材料内壁的热交换更快;低频声波振动速度慢,会绕过材料产生低频绕射现象,引起材料内空气与材料间的相对轻微运动,声能消耗不明显,所以常规多孔吸声材料具有良好的高频吸声性能,但中低频吸声能力较差。纳米纤维有高于普通纤维 100~10 000 倍的比表面积与孔隙率^[6]。高比表面积增加了声波与纤维的作用面积,使中低频段声波与纤维表面的碰撞消耗更加容易,从而可提高中低频段的吸声性能。

2 纳米纤维吸声材料的影响因素

纳米纤维是高比表面积的纤维类吸声材料,原材料的种类、纤维直径、纤维密度等因素都会显著影响其吸声性能^[7]。

2.1 纳米纤维原材料

表 1 示出吸声降噪研究中常用的纳米纤维材料。聚偏氟乙烯(PVDF)可将声能转化为电能,进一步促进中低频段的声吸收。Chen 等^[19]利用该原理制备的纳米发电机可用作多场合的电声传感器。高分子材料弹性越好,其吸声性能越好^[20]。相比于聚丙烯腈(PAN),聚氨酯(PU)在中低频段吸声性能更好,这可能是 PU 的高弹性促进了声波与纤维的共振消耗。Zkal 等^[21]制备了具有夹层结构的新型 PU 纳米纤维吸声材料,降噪系数高达 0.55。

2.2 纤维直径与比表面积

纤维直径由微米级跨越至纳米级,可使其比表面积增大百倍。比表面积的增大可增加声波与纤维的摩擦与热交换面积,从而直接影响纤维的吸声性能。与微米级纤维相比,纤维跨越至纳米级后吸声系数显著提升。若纳米纤维进一步细化,在中低频段的吸声效果会提高,但可使高频段的吸声效果降低^[6],因此,纳米纤维并不是越细其吸声性能就越

表 1 常见纳米纤维的吸声曲线特点

Tab.1 Sound absorption curves characteristic of common nanofiber

材料	吸声曲线特点	参考文献
PVC	共振频率低,中低频吸声性能好	[6,8]
PVP	相比于 PVC,高频段吸声性能更好	[6,8]
PVA	材料中低频段吸声性能,高频吸声性能变差	[9-10]
PAN	共振频率高, 对材料在高频段的吸声性能改善明显	[11-12] [13-14]
PU	相比于 PAN,共振频率低,中低频吸声性能好	[12-13,15]
PVDF	相比于 PU,共振频率低,中低频吸声性能好	[16-17]
PA	高频提升效果明显,中低频几乎无提升作用	[18]

注: PVC—聚氯乙烯;PVP—聚乙烯吡咯烷酮;PVA—聚乙烯醇;
PAN—聚丙烯腈;PU—聚氨酯;PVDF—聚偏氟乙烯;PA—聚酰胺。

好。Kalinova^[4]通过改变纺丝接收距离制备了平均直径为 68~80 nm 的 PVA 纳米纤维发现,纤维直径细化使共振频率向高频方向移动,反而降低中低频吸声效果。JI 等^[17]研究显示,较粗的纳米纤维吸声性能更好。在未来研究中,有必要对纳米纤维的直径区间进行拓展与细化,进一步明确纤维直径与材料吸声性能的关系,以制备性能更好的吸声材料。

2.3 纳米纤维膜面密度

面密度变化会改变纳米纤维结构分布,通过影响空气与纤维结构的共振与摩擦最终影响其吸声性能。Kalinova^[4]的研究表明,纳米纤维膜的共振频率随着纤维膜面密度的增加而降低。适度提高纤维膜面密度可显著提升材料吸声性能,Kucukali 等^[22]发现,增加面密度后材料共振明显,高频段的吸声系数显著提升。面密度过大过小都不利于吸声性能的提升甚至会产生相反的效果。若纳米纤维膜面密度过小,对材料的吸声性能影响不显著^[13-14],Avossa 等^[23]研究表明,随着 PVP 纳米纤维膜面密度的增加,其共振频率减小,但减小的速度逐渐降低直至不再变化,吸声系数峰值也有所减小。

2.4 纳米纤维空间结构

纳米纤维通常是比较致密的二维平面结构,通过材料改性和工艺创新可制备具有稳定的三维空间结构的纤维体,从而进一步提升其吸声性能。Chang 等^[2]通过 2 个极性相反的单针产生带电射流加以向上的热气流辅助制备出柔软、富有弹性、高孔隙率(95%)的三维纳米纤维(见图 3)。结果表明,该三维纳米纤维在全频段吸声能力明显优于商业棉,频率为 400 Hz 时吸声系数达到 0.5,频率为 800 Hz 时吸声系数达到 0.95,具有优良的中低频吸声能力。Cao 等^[24]通过交联技术制备了结构稳定、回弹性好的三维海绵状轻质改性聚苯乙烯(PS)纳米纤维吸声材料(见图 4),其在 500~1 000 Hz 频段吸声系数明显高于非织造布毡和三聚氰胺泡沫,频率为

800 Hz 时吸声系数高于 0.9。

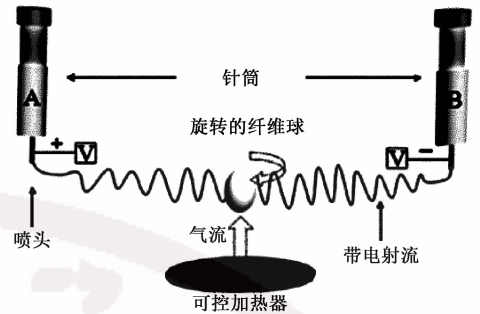


图 3 三维纳米纤维制造过程

Fig. 3 3-D nanofiber manufacturing process

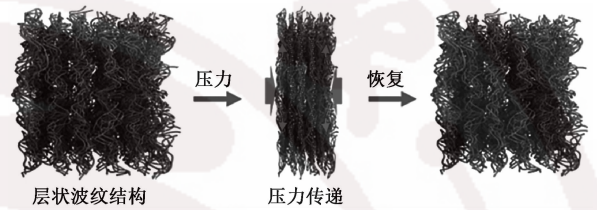


图 4 交联 PS 纳米纤维回弹性

Fig. 4 Resilience performance of cross-linked PS nanofiber

2.5 空腔结构

纳米纤维膜不仅是多孔材料,还能和其他结构形成共振吸声材料来提升其低频吸声能力,在纤维膜与刚性壁面间留有一定厚度的空气层,可形成空腔结构。空腔的厚度影响材料的共振吸声效果,相比于纤维层厚度的增加,更具经济性。有研究表明,空腔深度增加会使吸声系数峰值向低频移动,高频吸声效果降低^[11,25]。材料种类的不同,最适宜的空腔深度与空腔带来的吸声增益不同。Liu 等^[26]研究了空腔深度对 PAN、热塑性聚氨酯弹性体橡胶(TPU)、聚酯橡胶(TPEE)纳米纤维吸声系数的影响,其中 PAN 吸声效果最好,当空腔深度为 50 mm 时,750 Hz 频率的吸声系数高达 0.8。

3 纳米纤维复合吸声材料

吸声降噪研究中的纳米纤维几乎全部采用溶液静电纺丝技术制备。该技术工艺简单,可控性好,但生产效率低,制备的纳米纤维膜通常作为表面薄层与其他材料进行复合使用。相比于溶液静电纺丝技术,熔体静电纺丝技术研究较少,但其可实现纳米纤维的绿色高效制备^[27],研究团队已实现 500 nm 范围内纤维的可控制备^[28]。天然纤维、合成纤维等通过与纳米纤维复合可显著提高其中低频段的吸声能力,且复合轻薄纳米层可带来显著的空间和成本优势,使其在航空航天、高铁汽车等应用领域极具潜力。

3.1 纳米纤维与天然纤维复合吸声材料

随着材料制备技术的发展,纳米纤维与常规吸声材料复合可制备出宽频范围内吸声性能优良的复合材料。天然纤维具有绝缘隔热、绿色环保等优点,

但是阻燃防潮性能差。大多数天然纤维在高频段吸声性能良好,但在中低频段吸声性能差甚至不具备吸声能力。用于吸声研究的天然纤维有羊毛^[29]、麻类^[30]等,如表 2 所示。

表 2 纳米纤维复合吸声材料在不同频段的吸声性能

Tab. 2 Sound absorption performance of nanofiber composite sound-absorbing materials in different frequency ranges

材料	吸声性能				吸声系数峰值 对应频率/Hz	吸声系数 峰值	
	250~500 Hz	500~1 000 Hz	1 000~2 000 Hz	2 000~4 000 Hz			
天然纤维	羊毛 ^[18]	差	差	差	一般	4 000	0.46
	PA 纳米纤维网/羊毛 ^[18]	差	差	一般	好	4 000	0.85
	黄麻 ^[14]	差	差	差	好	4 000	0.65
	PAN 纳米纤维/黄麻 ^[14]	差	一般	一般	好	4 000	0.85
	椰壳 ^[9]	差	差	一般	—	1 200	0.40
	PVA 纳米纤维/椰壳 ^[9]	差	一般	一般	—	1 000	0.37
	改性 PVA 纳米纤维/椰壳 ^[9]	差	一般	好	—	800	0.55
合成纤维	PET 非织造布 ^[13]	差	差	一般	好	4 000	0.76
	PU 纳米纤维/PET 非织造布 ^[13]	差	一般	好	好	2 200	0.74
	PAN 纳米纤维/PET 非织造布 ^[13]	差	一般	好	好	3 000	0.80
	聚酯 ^[22]	差	差	差	差	4 000	0.18
	PAN 纳米纤维/聚酯 ^[22]	差	差	一般	好	2 000	0.70
	非织造布 ^[15]	差	差	好	好	3 200	0.55
	非织造布/非织造布 ^[15]	差	一般	好	好	2 600	0.80
	PU 纳米纤维/非织造布 ^[15]	差	一般	好	好	2 600	0.80
	非织造布/PU 纳米纤维/非织造布 ^[15]	差	一般	好	好	2 500	0.98
	BASF 泡沫 ^[11]	差	差	一般	一般	4 000	0.60
泡沫	PAN 纳米纤维/BASF 泡沫 ^[11]	差	一般	好	好	3500	0.96
	聚氨酯泡沫 ^[12]	差	差	差	差	1 500	0.15
	PAN 纳米纤维/聚氨酯泡沫 ^[12]	差	一般	好	好	3 200	0.77
	PU 纳米纤维/聚氨酯泡沫 ^[12]	差	一般	好	好	2 000	0.70
	泡沫板 ^[31]	差	差	差	差	1 250	0.10
	(PU/PVDF 纳米纤维)/泡沫板 ^[31]	差	一般	好	差	1 400	0.68
	泡沫 ^[16]	差	差	一般	好	3 200	0.91
	PVDF/泡沫 ^[16]	一般	好	好	好	1 000	0.82
PVDF(添加 CNTs)/泡沫 ^[16]	一般	好	好	好	1 000	0.90	

注:比较频段为 0~4 000 Hz,不同频段内平均吸声系数<0.2 时为吸声性能差,平均吸声系数>0.5 时为吸声性能好,平均吸声系数在 0.2~0.5 之间为吸声性能一般。PET—聚对苯二甲酸乙二醇酯;BASF—德国巴斯夫公司;CNTs—碳纳米管。

从表 2 可以看出,纳米纤维层的复合可使天然纤维在 500 Hz 以上频段具备吸声能力。PA 纳米纤维网对羊毛吸声性能的提升体现在 1 000 Hz 以上频段,对 1 000 Hz 以下中低频段几乎无提升效果^[18],这可能是制备的纳米纤维网分布松散很难阻隔中低频段的声波。Kucukali 等^[14]发现,黄麻复合纳米纤维后空气渗透性降低 5 倍以上,对超过 400 Hz 频段的吸声系数均有显著提升。稳定的纳米纤维结构为声波的转化吸收提供结构基础。Selvaraj 等^[9]研究表明,改性 PVA 纳米纤维对椰壳中低频段吸声性能提升明显优于未改性 PVA 纳米纤维。虽然改性 PVA 纳米纤维比表面积更低,但拉伸强度远高于未改性 PVA 纤维,结构更加稳定,使得纤维对于低频声波共振消耗更加明显。

3.2 纳米纤维与合成纤维复合吸声材料

相比于天然纤维,合成纤维化学性质稳定,可制备更耐用的吸声材料,但其促进了 CO₂ 排放,将加剧全球变暖等问题。为降低非织造废料对环境的污染,Lou 等^[32]回收了旧的聚丙烯和聚酯非织造布并采用热压技术制备出复合吸声材料,研究发现,复合材料厚度为 68 mm 时,平均吸声系数可达 0.72。从表 2 可以看出,合成纤维与天然纤维均存在中低频段吸声性能差的问题。通过在合成纤维表面复合纳米纤维薄层可改善这一问题,同时可保证材料自身的高频吸声性能。虽然提高厚度或设置空腔结构也可改善材料的中低频吸声性能,但对材料或结构的厚度要求较高,存在材料成本增加、空间浪费严重等问题;而纳米纤维薄层厚度可忽略不计,可大大扩展常规吸声材料的应用范围。

Zkal 等^[15]研究表明,在单层非织造布表面复合纳米纤维薄层后在全频段的吸声系数与双层非织造布几乎相同,这表明纳米纤维薄层与非织布复合后,在保证吸声性能的同时,可节省近一半空间。此外,在双层非织造布中间复合纳米纤维薄层后,全频段的吸声性能均有提升,且共振频率减小。Kucukali 等^[22]发现,在聚酯纤维膜前后表面均复合纳米纤维薄层与在其前表面复合纳米纤维薄层的吸声性能相似。

3.3 纳米纤维与泡沫复合吸声材料

泡沫具有大量深入材料内部且相互贯通的开口^[33],吸声性能良好,应用广泛。其中多孔型聚氨酯泡沫质轻且阻燃性能优异,是目前市场上颇受欢迎的新颖声学材料。Bahrambeygi 等^[12]研究表明,在中低频段,PU 纳米纤维对泡沫吸声性能的提升稍好于 PAN 纳米纤维。但从原料选择角度来看,PAN 溶解性与可纺性要好于 PU,可作为纳米纤维吸声层的优选材料。

从表 2 可看出,在 250~500 Hz 低频段,PVDF 纳米纤维膜对泡沫吸声性能提升效果明显优于 PAN、PU 材料,这源于 PVDF 材料的特殊压电性能。Wu 等^[16]通过添加 CNTs 改善了 PVDF 纳米纤维膜的压电性能,使复合材料的吸声性能进一步提升。PVDF 可将声能转化为电能的特殊性质使其在吸声降噪领域极具潜力。

4 展 望

纳米纤维具有广阔的应用前景,其在吸声降噪领域发展迅速,但仍存在一些问题亟待解决。1) 中低频段的吸声性能需进一步提高,通过材料改性或创新工艺制备具有稳定空间结构的纳米纤维是进一步提升其吸声性能的重要途径;2) 天然纤维吸声材料绿色环保,但阻燃与防潮性能差,与纳米纤维制备阻燃防潮性能优异的复合吸声材料是拓宽其应用的关键;3) 溶液静电纺技术生产效率低、涉及有毒溶剂使用,通过熔体静电纺丝技术有望实现纳米纤维吸声材料的绿色高效制备。

FZXB

参考文献:

- [1] 丁雷. 声频工程中共振吸声材料特性及应用[J]. 电声技术, 2019(5): 12-18.
DING Lei. Characteristics and application of resonant sound absorbing materials in audio engineering [J]. Audio Engineering, 2019(5): 12-18.
- [2] CHANG G, ZHU X, LI A, et al. Formation and self-assembly of 3D nanofibrous networks based on oppositely charged jets[J]. Materials & Design, 2016, 97: 126-130.
- [3] RAHIMABADY M, STATHARAS E C, YAO K, et al. Hybrid local piezoelectric and conductive functions for high performance airborne sound absorption [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(24): 241601.
- [4] KALINOVÁ K. Nanofibrous resonant membrane for acoustic applications [J]. Journal of Nanomaterials, 2011. DOI: org/10.1155/2011/265720.
- [5] KUCUKALI O M M K, KALINOVA K, NERGIS B, et al. Comparison of resonance frequency of a nanofibrous membrane and a homogeneous membrane structure [J]. Textile Research Journal, 2013, 83(20): 2204-2210.
- [6] ASMATULU R, KHAN W, YILDIRIM M B. Acoustical properties of electrospun nanofibers for aircraft interior noise reduction [C] // Asme International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Florida: The American Society of Mechanical Engineers, 2009: 223-227.
- [7] 彭敏, 赵晓明. 纤维类吸声材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3669-3677.
PENG Min, ZHAO Xiaoming. Advances in the fiber-based sound-absorbing materials [J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3669-3677.
- [8] KHAN W S, ASMATULU R, YILDIRIM M B. Acoustical properties of electrospun fibers for aircraft interior noise reduction [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 25(3): 376-382.
- [9] SELVARAJ S, JEEVAN V, JONNALAGADDA R R, et al. Conversion of tannery solid waste to sound absorbing nanofibrous materials: a road to sustainability [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 375-383.
- [10] KUCUKALI OZTURK M, NERGIS F B, CANDAN C. Design of layered structure with nanofibrous resonant membrane for acoustic applications. [J]. Journal of Industrial Textiles, 2018, 47(7): 1739-1756.
- [11] XIANG H, TAN S, YU X, et al. Sound absorption behavior of electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membranes [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, 29(6): 650-657.
- [12] BAHRAMBEYGI H, SABETZADEH N, RABBI A, et al. Nanofibers (PU and PAN) and nanoparticles (nanoclay and MWNTs) simultaneous effects on polyurethane foam sound absorption [J]. Journal of Polymer Research, 2013, 20(2): 72.
- [13] RABBI A, BAHRAMBEYGI H, NASOURI K, et al. Manufacturing of PAN or PU nanofiber layers/PET nonwoven composite as highly effective sound absorbers [J]. Advances in Polymer Technology, 2014, 33(4): 21425.
- [14] KUCUKALI O M, NERGIS F B, CANDAN C. Design of electrospun polyacrylonitrile nanofiber-coated nonwoven structure for sound absorption [J]. Polymers for

- Advanced Technologies, 2018, 29(4): 1255-1260.
- [15] ZKAL A, CENGİZ Ç F, AKDUMAN Ç. Development of a new nanofibrous composite material from recycled nonwovens to improve sound absorption ability [J]. Journal of The Textile Institute Proceedings and Abstracts, 2020, 111(2): 189-201.
- [16] WU C M, CHOU M H. Polymorphism, piezoelectricity and sound absorption of electrospun PVDF membranes with and without carbon nanotubes [J]. Composites Science and Technology, 2016, 127: 127-133
- [17] JI G, CUI J, FANG Y, et al. Nano-fibrous composite sound absorbers inspired by owl feather surfaces [J]. Applied Acoustics, 2019, 156: 151-157.
- [18] NA Y, AGNHAGE T, CHO G. Sound absorption of multiple layers of nanofiber webs and the comparison of measuring methods for sound absorption coefficients [J]. Fibers and Polymers, 2012, 13(10): 1348-1352.
- [19] CHEN F Q, WU Y H, DING Z Y, et al. A novel triboelectric nanogenerator based on electrospun polyvinylidene fluoride nanofibers for effective acoustic energy harvesting and self-powered multifunctional sensing [J]. Nano Energy, 2019, 56: 241-251.
- [20] 浦文婧, 李效东, 王清华. 高分子吸声材料吸声性能与粘弹性之间的关系 [J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(12): 86-89.
- PU Wenjing, LI Xiaodong, WANG Qinghua. Relationship between acoustical absorptivity and viscoelasticity of acoustical absorptive polymer [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(12): 86-89.
- [21] ZKAL A, CENGİZ ÇALLIOĞLU F. Effect of nanofiber spinning duration on the sound absorption capacity of nonwovens produced from recycled polyethylene terephthalate fibers [J]. Applied Acoustics, 2020, 169: 107468.
- [22] KUCUKALI O M, OZDEN Y E, NERGİS B, et al. Nanofiber-enhanced lightweight composite textiles for acoustic applications [J]. Journal of Industrial Textiles, 2017, 46(7): 1498-1510.
- [23] AVOSSA J, BRANDA F, MARULO F, et al. Light electrospun polyvinylpyrrolidone blanket for low frequencies sound absorption [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2018, 36(12): 1368-1374.
- [24] CAO L, SI Y, YIN X, et al. Ultralight and resilient electrospun fiber sponge with a lamellar corrugated microstructure for effective low-frequency sound absorption [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(38): 35333-35342.
- [25] IANNACE G. Acoustic properties of nanofibers [J]. Noise & Vibration Worldwide, 2014, 45(10): 29-33.
- [26] LIU H, WANG D, ZHAO N, et al. Application of electrospinning fibres on sound absorption in low and medium frequency range [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(sup4): 888-891.
- [27] 杨卫民, 李好义, 吴卫逢, 等. 熔体静电纺丝技术研究进展 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2014, 41(4): 1-13.
- YANG Weimin, LI Haoyi, WU Weifeng, et al. Recent advances in melt electrospinning [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2014, 41(4): 1-13.
- [28] 陈明军, 张有忱, 李好义, 等. 熔体微分静电纺丝纳米纤维高效绿色制备技术 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2018, 45(5): 119-128.
- CHEN Mingjun, ZHANG Youchen, LI Haoyi, et al. Nanofiber preparation technology by melt differential electrospinning with high efficiency in the absence of a solvent [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2018, 45(5): 119-128.
- [29] 栾巧丽, 邱华, 成钢, 等. 羊毛及其混合纤维非织造材料的吸声性能 [J]. 纺织学报, 2017, 38(3): 67-71.
- LUAN Qiaoli, QIU Hua, CHENG Gang, et al. Sound absorption properties of nonwoven material based on wool and its hybrid fibers [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(3): 67-71.
- [30] 杜兆芳, 胡凤霞, 赵淼淼, 等. 汽车内饰材料的吸声性能 [J]. 纺织学报, 2011, 32(6): 45-49.
- DU Zhaofang, HU Fengxia, ZHAO Miaomiao, et al. Sound absorption properties of automotive ornamental materials [J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(6): 45-49.
- [31] 邹亚玲, 石琳, 周颖, 等. 纳米纤维毡复合材料制备及其吸声性能研究 [J]. 产业用纺织品, 2014(9): 22-26.
- ZOU Yaling, SHI Lin, ZHOU Ying, et al. Preparation of sound absorption on nano-fiber composite mats and its sound absorption property [J]. Technical Textiles, 2014(9): 22-26.
- [32] LOU C W, LIN J H, SU K H. Recycling polyester and polypropylene nonwoven selvages to produce functional sound absorption composites [J]. Textile Research Journal, 2005, 75(5): 390-394.
- [33] ARENAS J P, CROCKER M J. Recent trends in porous sound-absorbing materials [J]. Sound & Vibration, 2010, 44(7): 12-18.