

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.010

PLA超细纤维/非织造吸声材料的制备及性能

孙少阳, 胡顺杰, 徐珍珍, 邢剑

(安徽工程大学纺织服装学院, 安徽芜湖 241000)

摘要: 目前石油基多孔吸声材料在市面上被广泛应用, 在环保方面仍存在一系列问题亟待解决, 因此需要开发绿色可降解的多孔吸声材料。首先以聚乳酸(PLA)纤维为原料, 通过针刺非织造工艺制备了PLA针刺非织造材料, 考察了针刺道数、纤维喂入量、针刺深度对非织造材料结构和吸声性能的影响。结果表明, 较大的纤维喂入量和适当针刺深度能够显著提升非织造材料的吸声性能, 在针刺道数8道和针刺深度5 mm下制备的面密度为300 g/m²的针刺非织造材料(PLA₃₀₀₋₈₋₅)吸声系数可达0.56。采用静电纺丝技术制备不同形貌的PLA超细纤维, 并将其与PLA₃₀₀₋₈₋₅非织造基材复合, 构建PLA超细纤维复合吸声材料, 探究了纤维形貌及超细纤维膜厚度对材料吸声性能的影响, 结果表明, 多孔纤维及较厚的纤维膜可以有效增强吸声性能。PLA超细纤维复合吸声材料的构建为后续新型高效吸声材料的设计开发提供一定的理论基础。

关键词: 聚乳酸; 针刺材料; 纤维形貌; 复合材料; 吸声材料

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0057-07

Preparation and properties of polylactic acid ultrafine fiber/nonwovens sound-absorbing materials

SUN Shaoyang, HU Shunjie, XU Zhenzhen, XING Jian

(School of Textile and Garment, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract : At present, petroleum-based porous sound-absorbing materials are widely used in the market, and there are still a series of problems to be solved in environmental protection. Therefore, it is necessary to develop green and degradable porous sound-absorbing materials. Polylactic acid (PLA) needle-punched nonwovens were prepared by needle-punched nonwoven process using PLA fiber as raw material. The effects of number of punching passes, fiber feeding amount and needling depth on the structure and sound absorption properties of nonwovens were investigated. The results show that larger fiber feeding amount and appropriate needling depth can significantly improve the sound absorption performance. The sound absorption coefficient of needle-punched nonwoven (PLA₃₀₀₋₈₋₅) with density of 300 g/m² prepared under 8 punching passes number and 5 mm needling depth can reach 0.56. Then, different morphologies of PLA ultrafine fibers were prepared by electrospinning technology, and they were combined with PLA₃₀₀₋₈₋₅ nonwoven substrate to construct PLA ultrafine fiber composite sound absorption materials. The effects of fiber morphology and ultrafine fiber membrane thickness on the sound absorption properties of the materials were investigated. The results show that porous fibers and thicker fiber membranes can effectively enhance the sound absorption properties. The construction of PLA ultrafine fiber composite sound-absorbing material provides a theoretical basis for the design and development of new high-efficiency sound-absorbing materials.

Keywords : polylactic acid ; needle cloth ; morphology of fiber ; composite ; sound-absorbing material

噪声污染是仅次于空气和水污染的第三大污染, 对人们的神经系统会产生有害的影响, 影响正常的生活作息。控制声源、在传播过程中耗散声能等方法已被应用于解决噪声污染问题, 其中, 利用

吸声材料消耗噪声传播过程中的声能是缓解噪声污染对人体健康有害影响的最有效途径^[1-3]。目前常用的吸声材料包括共振吸声材料和多孔吸声材料^[4-5]。其中, 由纤维制成的多孔吸声材料具有宽带

通信作者: 邢剑, 副教授, 博士, 研究方向为有机化学、材料科学

收稿日期: 2024-01-15

引用格式: 孙少阳, 胡顺杰, 徐珍珍, 等. PLA超细纤维/非织造吸声材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 57-63.

SUN Shaoyang, HU Shunjie, XU Zhenzhen, et al. Preparation and properties of polylactic acid ultrafine fiber/nonwovens sound-absorbing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 57-63.

吸声、结构设计灵活、安装更换方便等优点,被广泛应用于建筑和交通领域的噪声消除^[6-7]。然而,单一的材料结构极大地限制了其在声能粘热消耗方面的作用^[8],为提高吸声材料的性能,研究新型的复合材料是必然的发展道路。目前多孔吸声材料原料主要为石油基材料,而随着不可再生能源的日益减少,生物基可降解材料的应用受到广泛关注^[9]。

聚乳酸(PLA)是一种性能良好、用途广泛的生物可降解材料。采用静电纺丝技术制备的PLA超细纤维还具有高孔隙率、多孔互联结构,在吸声降噪领域具有极大的应用潜力^[10]。因此,笔者首先以PLA纤维为原料将其开松梳理,采用针刺非织造工艺制备PLA非织造材料;然后以PLA针刺非织造材料为基材,通过静电纺丝技术制备PLA超细纤维复合材料。探究所制备复合材料吸声系数的影响因素,为新型超细纤维复合吸声材料的设计提供一定的理论参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PLA:6060D,上海郡冉塑胶有限公司;

PLA纤维:长度38 mm,线密度2.0 dtex,安徽同光邦飞生物科技有限公司;

三氯甲烷(CF):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器及设备

电子天平:WTB5003,杭州万特衡器有限公司;

磁力搅拌器:B4-1A,上海司乐仪器有限公司;

静电纺丝机:JDF05,长沙纳仪仪器有限公司;

高清感光耦合组件(CCD)测量显微镜:GP-300C,昆山高品精密仪器有限公司;

小型针刺实验机:ZSZC01-220,扬州市至上机械有限公司;

噪声振动测试系统:VA-Lab,中科新悦(苏州)科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-4800,日本日立公司;

数字式织物厚度仪:YG141LA,宁波纺织仪器厂。

1.3 样品制备

1.3.1 PLA针刺非织造材料的制备

称重PLA纤维后进行三次开松梳理,铺网后针刺加固。针刺机植针密度9 600枚/m,针刺频率52刺/min,纤网输出速度0.2 m/min,针刺密度249.6刺/cm³。以不同的纤维喂入量、针刺道数和针刺深度制备PLA针刺非织造材料。其中,面密度60 g/cm³、针刺道数2道、针刺深度5 mm的样品记为PLA₆₀₋₂₋₅,以此类推。

1.3.2 PLA超细纤维/非织造材料的制备

室温条件下,分别以CF:DMF不同质量比(7:3,8:2)与PLA不同质量分数(7%,12%)制备PLA纺丝液,搅拌12 h后,将不同参数制备后的PLA针刺非织造布固定在辊轮上,采用静电纺丝技术分别制备不同纤维形貌PLA超细纤维/非织造材料复合材料,相对湿度为40%~60%,纺丝距离为15 cm,纺丝速率为1 mL/h,调控纺丝时间,制备不同纤维膜厚度复合材料。

1.4 结构表征与性能测试

1.4.1 针刺非织造材料及PLA超细纤维形貌表征

将PLA针刺非织造材料裁剪为20 mm×5 mm的试样,采用高清CCD测量显微镜观察材料截面纤维缠结情况。

在PLA超细纤维/非织造材料中剥离PLA超细纤维,将PLA超细纤维在15 kV的工作电压下表面喷金处理,采用SEM观察纤维形貌,扫描电压10 kV。

1.4.2 针刺非织造材料面密度和厚度测试

按照GB/T 24218.1-2009测定针刺材料的面密度。将针刺材料剪裁为160 mm×320 mm的试样,共5块,依次测试其面密度,求其平均值。

按照GB/T 24218.2-2009测定PLA针刺非织造材料厚度,试样为半径2.5 cm的圆,每种结构测试5块,计算平均值。

1.4.3 PLA纤维膜厚度测试

按照GB/T 24218.2-2009采用织物厚度仪测定在复合材料中剥离出的PLA超细纤维膜厚度。压脚面积为2 500 mm²,压重砝码为100 cN,将纤维膜剪裁为100 mm×100 mm的试样,共3块,每组试样随机选取5个点,求其平均值。

1.4.4 针刺非织造材料孔隙率计算

根据孔隙率计算公式求平均值。孔隙率的计

算公式见公式(1)。

$$P = (1 - \rho_1/\rho_p) \times 100\%$$
 (1)

式中: P ——PLA 针刺非织造材料孔隙率,%;

ρ_1 ——PLA 针刺非织造材料体积密度,g/cm³;

ρ_p ——PLA 针刺非织造材料骨架密度,其值为 1.25 g/cm³。

1.4.5 吸声性能测试

将针刺非织造材料分别制备成规格半径为 5 cm 和 1.5 cm 的圆形状样品,通过噪声振动测试系统对复合材料的吸声性能进行测试,其中半径为 1.5 cm 的样品测试频率为 1 600~6 300 Hz,半径为 5 cm 的样品测试频率为 63~1 600 Hz,每种规格的样品分别测试 3 块,计算平均数。

吸声系数 α 是指材料吸收的声能与入射声能的比值。理论上如果某种材料完全反射声音,那么它的 $\alpha=0$;如果某种材料将入射声能全部吸收,那么它的 $\alpha=1$ 。事实上,所有材料的 α 介于 0 和 1 之间,也就是不可能全部反射,也不可能全部吸收。

α 的计算公式见式(2)。

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = \frac{(E_i - E_r)}{E_i} = 1 - r$$
 (2)

式中: E_i 为入射声能; E_a 为被材料或结构吸收的声能; E_r 为被材料或结构发射的声能; r 为反射系数。

PLA 超细纤维单面覆盖在针刺非织造材料样品一侧,考虑样品在阻抗管内的测试方向,复合材料上纤维膜面迎声或背声对吸声效果可能存在一定影响,因此改变不同放置位置,将样品放置方式分为迎声面放置和背声面放置测试吸声性能,测试 3 次计算平均值,样品吸声测试示意图如图 1 所示。

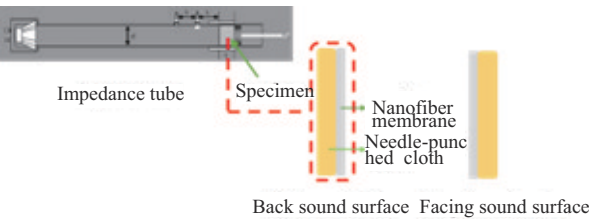


图1 样品吸声测试示意图

Fig. 1 Sample sound absorption test diagram

2 结果与讨论

2.1 PLA 针刺非织造材料吸声性能

2.1.1 针刺道数对吸声性能的影响

在针刺深度为 5 mm 时,调控针刺道数和 PLA

纤维喂入量制备了不同面密度和孔隙率的非织造材料列于表 1,探究针刺道数和喂入量对非织造材

表1 PLA 针刺非织造材料的结构特征

Tab. 1 Characteristic of PLA needle-punched nonwovens

PLA needle-punched nonwovens	Surface density/(g·m ⁻²)	Thickness/mm	Porosity/%
PLA ₆₀₋₂₋₅	60	4.8	98.93
PLA ₆₀₋₄₋₅		4.3	98.39
PLA ₆₀₋₆₋₅		3.8	98.28
PLA ₆₀₋₈₋₅		2.8	98.40
PLA ₁₂₀₋₂₋₅	120	6.6	98.83
PLA ₁₂₀₋₄₋₅		6.1	98.53
PLA ₁₂₀₋₆₋₅		5.1	98.48
PLA ₁₂₀₋₈₋₅		4.8	98.22
PLA ₁₈₀₋₂₋₅	180	8.4	98.11
PLA ₁₈₀₋₄₋₅		7.6	97.91
PLA ₁₈₀₋₆₋₅		6.3	98.06
PLA ₁₈₀₋₈₋₅		5.6	97.74
PLA ₂₄₀₋₂₋₅	240	9.6	98.09
PLA ₂₄₀₋₄₋₅		5.3	96.46
PLA ₂₄₀₋₆₋₅		4.8	96.18
PLA ₂₄₀₋₈₋₅		5.6	95.56
PLA ₃₀₀₋₂₋₅	300	10.4	97.26
PLA ₃₀₀₋₄₋₅		8.9	97.25
PLA ₃₀₀₋₆₋₅		6.9	95.86
PLA ₃₀₀₋₈₋₅		5.5	95.08

料结构和吸声性能的影响。

各面密度 PLA 针刺非织造材料在不同针刺道数吸声性能对比如图 2 所示。由图 2 可知,高面密度下随着针刺道数的增加吸声系数先减小后增大,而由表 1 可以发现,随着针刺道数的增加,高面密度下的针刺非织造材料的孔隙率不断减小。纤网在相同植针密度、输出速度和针刺频率的针刺机上针刺加固,随着针刺道数的增加,刺针多次作用于纤网上,PLA 纤维间摩擦缠结,同时刺针带着表层纤维进入非织造材料内部,纤维间纠缠紧密,导致材料厚度减少,吸声系数随之降低。

随着针刺道数的继续增加,纤维之间的纠缠抱合紧密,非织造材料密度变大,单位面积内的纤维根数增多,纤维之间的空隙减少,孔隙率降低,由表 1 可知,材料孔隙率降低后仍保持 90% 以上,而声波传递过程中与单位面积内逐渐增多的纤维摩擦更加频繁,声能更加容易转化为热能被消耗,吸声系数开始增加;同时,纤维间空隙的减小导致非织造材料的厚度变化逐渐减小,部分紧密纠缠的纤维因多次的针刺对纤网表层和内部的纤维造成破坏而回弹,材料厚度随着针刺道数的增加先减小后趋于

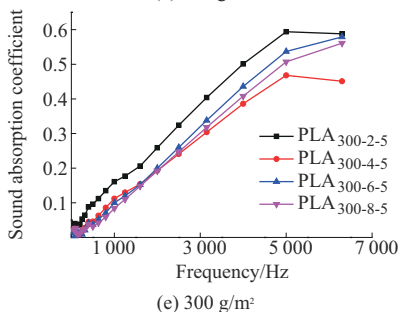
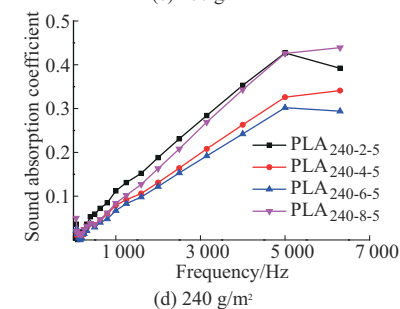
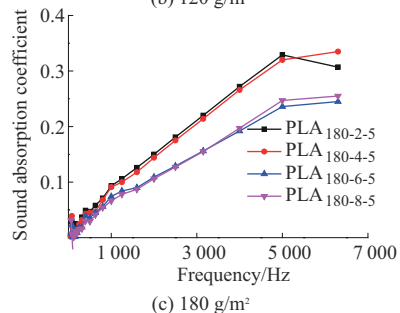
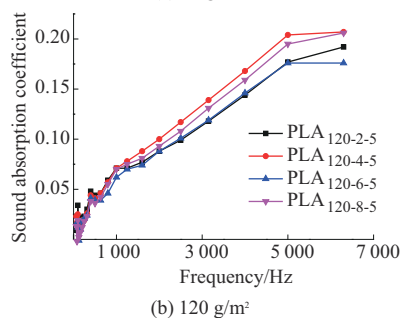
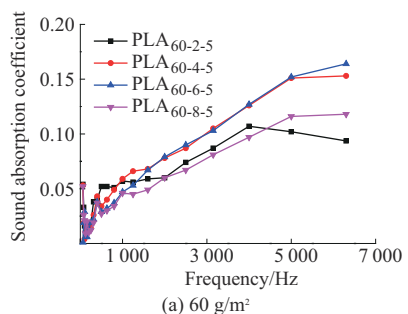


图2 各面密度PLA针刺非织造材料在不同针刺道数下的吸声系数
Fig. 2 Sound absorption coefficients of PLA needle-punched nonwovens with different surface densities under number of acupuncture channels

稳定,因此随着针刺道数的增大,非织造材料的吸声系数先减小后增大^[11]。

2.1.2 PLA纤维喂入量对吸声性能的影响

在针刺道数为8道和针刺深度为5 mm时,探究了纤维喂入量对非织造材料的吸声性能的影响。由表1可见,根据PLA纤维喂入量的不同制备了5种面密度不同的针刺非织造材料,分别为PLA₆₀₋₈₋₅, PLA₁₂₀₋₈₋₅, PLA₁₈₀₋₈₋₅, PLA₂₄₀₋₈₋₅和PLA₃₀₀₋₈₋₅。图3为不同面密度下PLA针刺非织造材料吸声系数。

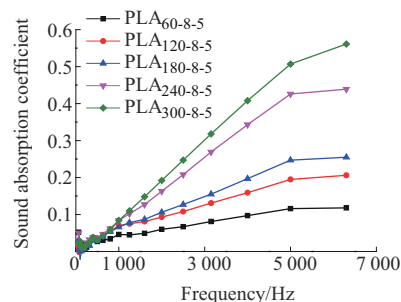


图3 不同面密度下PLA针刺非织造材料吸声系数

Fig. 3 Sound absorption coefficients of PLA needle-punched nonwovens with different surface densities

由图3可知,随着面密度的增大,吸声系数也随之增大,同时吸声系数与面密度整体上呈正相关。图4为不同纤维喂入量下制备的PLA非织造材料的吸声性能和微观形貌。由图4可见,面密度的增大体现在其内部纤维缠结紧密,单位体积内的纤维数量增多,材料结构随着面密度的增大从疏松到紧密,这使声波在材料中传递时空气与纤维壁摩擦擦

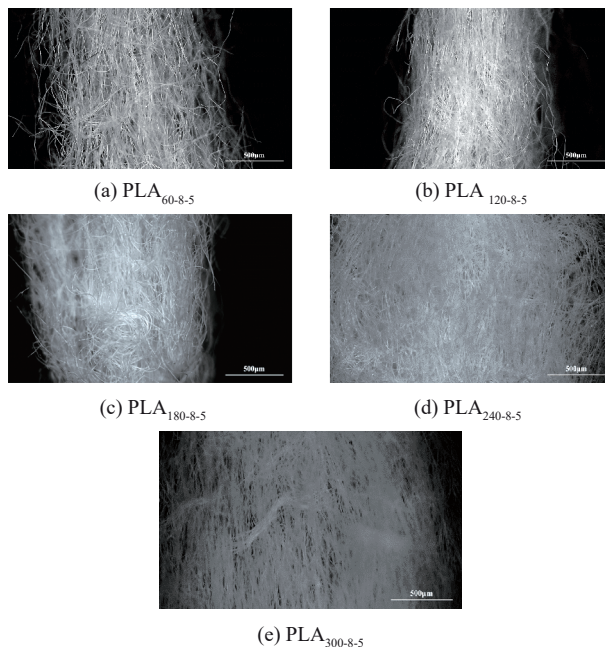


图4 不同面密度的针刺非织造材料截面光学显微镜图

Fig. 4 Optical microscope observation diagram of cross section of needle-punched nonwoven material with different surface densities

撞更为频繁,声能转化为热能被消耗,有利于吸声性能的提升^[12]。由表1可知,随着面密度增大,针刺非织造材料厚度增大并趋于稳定,孔隙率不断减小,并且随着孔隙率变化幅度的大小对材料吸声系数的变化也产生了影响。从低面密度向上增加时,如60 g/m²增至180 g/m²过程中,材料孔隙率下降幅度较小,此时吸声系数涨幅也较小,180 g/m²增至240 g/m²时,材料孔隙率下降2.18%,吸声系数从0.2增长到0.42,而面密度从240 g/m²增至300 g/m²,孔隙率与吸声系数变化均变小。因此,随着面密度的增大,材料厚度增加,吸声系数逐渐增大,此时孔隙率的改变,影响着吸声系数的变化幅度。

2.1.3 针刺深度对吸声性能的影响

在针刺道数为8道时,调控针刺深度,制备面密度为300 g/m²的PLA针刺非织造材料,探究针刺深度对材料吸声性能的影响,如图5所示。

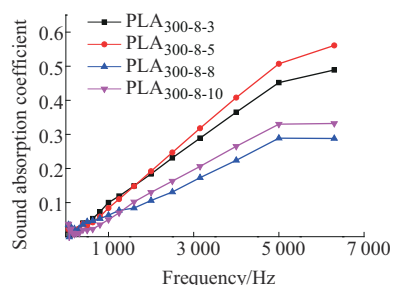


图5 不同针刺深度下PLA针刺非织造材料吸声系数

Fig. 5 Sound absorption coefficients of PLA needle-punched nonwoven materials under different needle depths

由图5可知,随着针刺深度的增加,PLA针刺非织造材料吸声性能先增大后减小,表2为不同针刺深度下制备的PLA针刺非织造材料的厚度及孔隙率。由表2可见,随着针刺深度的增加,非织造材料厚度与孔隙率不断减小。当针的规格一定时,针刺深度大,钩刺带动纤维多,也可加大纤维移动的距离,加强纤维之间的缠结,纤维间摩擦增多抱合紧密,材料厚度减小。图6为针刺非织造材料截面光学显微镜图。由图6a可发现,当针刺深度为3 mm时,非织造材料厚度为6.8 mm,针刺过程中纤维网内

表2 不同针刺深度下制备的PLA针刺非织造材料的厚度及孔隙率
Tab. 2 Thickness and porosity of PLA needle-punched nonwovens prepared at different needle depths

PLA needle-punched nonwovens	Thickness/mm	Porosity/%
PLA ₃₀₀₋₈₋₃	6.8	96.50
PLA ₃₀₀₋₈₋₅	5.5	95.06
PLA ₃₀₀₋₈₋₈	4.1	94.75
PLA ₃₀₀₋₈₋₁₀	4.2	93.93

部部分纤维未被针刺,纤维间纠缠不够紧密,较多材料内部纤维间无缠结,而针刺深度5 mm时可以有效对材料针刺加工,纤维整体结构紧密,因此随着针刺深度增加吸声系数提高。但针刺深度过大,会使纤维断裂增多,非织造材料强度反而下降,同时厚度与孔隙率减小,吸声系数随之降低。对比各针刺深度,5 mm针刺深度下针刺PLA非织造吸声材料吸声效果最好。

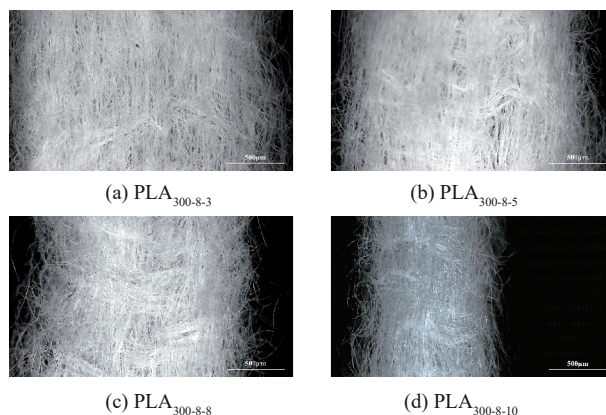


图6 不同针刺深度的针刺非织造材料截面光学显微镜图

Fig. 6 Optical microscope observation diagram of cross section of needle-punched nonwoven material

综上所述,在针刺道数8道和针刺深度5 mm下制备的面密度为300 g/m²的针刺非织造材料(PLA₃₀₀₋₈₋₅)呈现较好的吸声性能,吸声系数可达0.56。

2.2 PLA超细纤维复合材料吸声性能

以PLA母粒为原料,采用静电纺丝技术,固定纺丝工艺为室温条件下,环境湿度为70%纺丝电压15 kV,纺丝速率为1.0 mL/h以及收集距离为15 cm。通过改变溶液比例与PLA浓度分别影响纺丝液的挥发速率与黏度,制备不同形貌PLA纤维,其SEM图如图7所示^[13],当CF:DMF为8:2,PLA质量分数为7%时可制备PLA串珠纤维;当CF:DMF为7:3,PLA质量分数为12%时可制备PLA无孔纤维;CF:DMF为8:2,PLA质量分数为12%时可制备PLA多孔纤维(见图7c)。改变沉积时间将不同厚度PLA超细纤维膜与PLA₃₀₀₋₈₋₅基材复合,探究纤维形貌及纤维膜厚度对PLA超细纤维复合材料吸声性能的影响。

图8为迎声面、背声面放置下不同纤维形貌对吸声性能影响及不同纤维膜厚度下复合材料吸声系数。由图8a可以发现,多孔纤维迎声面放置时,吸声效果要优于串珠和无孔纤维,主要是因为多孔

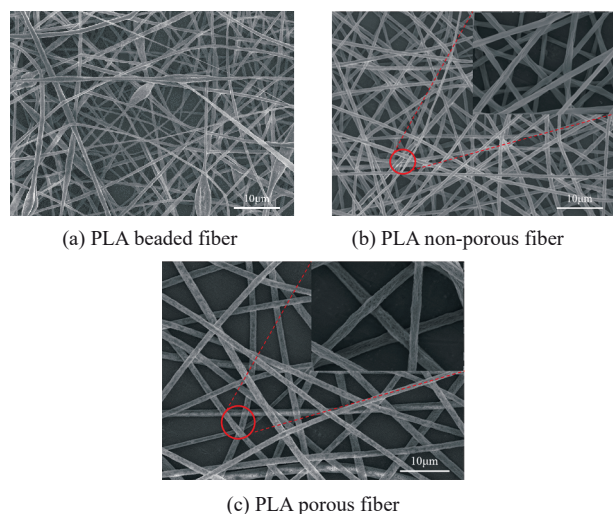


图7 不同形貌PLA纤维SEM图

Fig. 7 SEM images of PLA fibers with different morphologies

纤维特殊的纤维结构带来的高比表面积和高孔隙率。声波传达到复合材料表面时,部分声波被反射,剩余声波透射进入材料内部中纤维之间的空隙和微孔以及PLA超细多孔纤维上的孔洞,材料内部空气开始运动,由于空气的黏滞阻力和空气与纤维及孔壁的摩擦,部分声能转化为热能从而被消耗掉,得到显著的吸声性能^[14]。由图8b可见,背声面放置时各形态纤维吸声性能与纯针刺材料基本一致,说明背声位置下纤维膜并没有起到吸声的作用,这主要是归因于复合材料的孔隙率排布方式。PLA超细纤维膜迎声面放置时,高孔隙率的多孔纤维膜使得声波容易进入材料内部传递,而背声面放置与针刺非织造材料受声方式相同,吸声效率较低^[15]。因此,为吸收更多声能进入材料内部,应将PLA超细纤维膜采用迎声面放置进行测试。

同时,调控沉积时间(3, 5, 10 h),制备了厚度分别为0.052, 0.112, 0.215 mm的PLA多孔超细纤维膜。将不同厚度的PLA超细纤维膜与针刺非织造材料复合后迎声放置进行吸声性能测试。由图8c可见,随着沉积时间由3 h增加至10 h,复合材料所测得的吸声系数由0.58增加至0.79。这是由于沉积时间与纤维膜的厚度成正比,随着厚度的增加,声波在穿过纤维膜的过程中接触面积增大,摩擦增多,更多地被转化为热能消耗,复合材料吸声性能得到提升^[16]。

3 结论

(1)在面密度为300 g/m²,针刺道数为8道,针刺深度为5 mm时,PLA针刺非织造布综合吸声性能

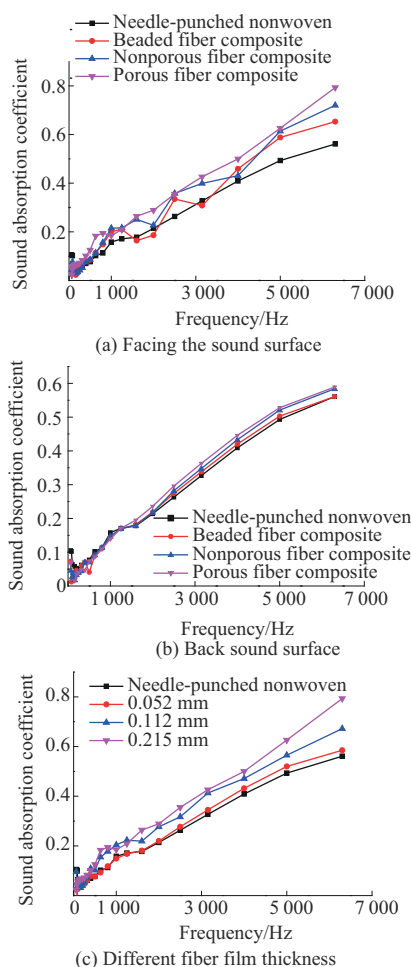


图8 迎声面、背声面放置下不同纤维形貌对吸声系数影响及不同纤维膜厚度下复合材料吸声系数

Fig. 8 Influence of different fiber morphology on sound absorption coefficients under arrangement of facing the sound surface and back sound surface and sound absorption coefficients of composites with different fiber film thickness

较好。PLA针刺非织造材料吸声系数主要受纤维喂入量和针刺深度影响,针刺道数主要影响材料厚度与孔隙率。其中,增大喂入量可制备高面密度针刺非织造材料,纤维与纤维间结构更加紧凑,可以有效地将声波转化为热能消耗掉;针刺深度影响钩刺带动的纤维数量和距离,针刺深度越大纤维相互缠结增强,产品强度高,但是过大的针刺深度会使纤维断裂增多,产品强度下降,同样也会降低吸声系数。

(2)在CF与DMF溶剂质量比为8:2,PLA质量分数为12%时制备PLA超细多孔纤维可以有效提升复合材料的吸声性能。静电纺PLA超细纤维形貌对复合材料的吸声性能有较大影响,多孔纤维膜因其特殊的多孔结构,单根纤维上的纳米孔洞与非

织造材料纤维间的孔洞形成三维立体多孔吸声结构,声波在孔洞中反复碰撞摩擦,可以有效地提升复合材料的吸声性能;同时增加复合的超细纤维膜厚度,同样有助于复合材料吸声性能的提高。

参考文献

- [1] 程旭扬. 噪声污染及其防治[J]. 科技风, 2022(25): 151–153.
CHENG Xuyang, Noise pollution and its prevention[J]. Technology Wind, 2022(25): 151–153.
- [2] LI X, PENG Y, HE Y, et al. Research progress on sound absorption of electrospun fibrous composite materials[J]. Nanomaterials, 2022, 12. DOI: 10.3390/nano12071123.
- [3] 崔丽丽, 张庆环. 噪声污染防治现状与相关问题探讨[J]. 资源节约与环保, 2023(3): 98–101.
CUI Lili, ZHANG Qinghuan. Discussion on the present situation and related problems of noise pollution prevention and control[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2023(3): 98–101.
- [4] 谭睿, 郭荣辉. 纤维类吸声材料的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(2): 102–108.
TAN Rui, GUO Ronghui. Research progress of fiber sound-absorbing materials[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(2): 102–108.
- [5] WANG P, LV H, CAO X, et al. Recent progress of the preparation and application of electrospun porous nanofibers[J]. Polymers, 2023, 15. DOI: 10.3390/polym15040921.
- [6] 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): 3 669–3 677.
PENG Min, ZHAO Xiaoming. Advances in the fiber-based sound-absorbing materials[J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3 669 – 3 677.
- [7] CHO Y S, LEE H J. Fabrication of porous silica fibers by electrospinning for sound absorbing materials[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2018. DOI: 10.24425/123838.
- [8] YU Y, ZHAO G Z, REN S H, et al. Layout optimization of porous sound-absorbing material in mid-frequency vibro-acoustic systems[J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 100. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs. 2020.103197.
- [9] 刘杨, 霍又嘉, 杜元开, 等. 吸声材料制备, 性能研究进展[J]. 功能材料, 2022, 53(2): 2 073–2 079.
LIU Yang, HUO Youjia, DU Yuankai, et al. Research progress in the preparation and properties of sound absorbing materials[J]. Journal of Functional Materials, 202253(2): 2 073–2 079.
- [10] 王喜花, 刘涛, 黄丽, 等. 静电纺丝技术制备复合纳米纤维电磁屏蔽及吸波材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1 300–1 310.
WANG Xihua, LIU Tao, HUANG Li, et al. Research progress for preparation of composite nanofiber electromagnetic shielding and absorbing materials by electrostatic spinning technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1 300–1 310.
- [11] 潘蕾蕾, 范硕, 王宇轩, 等. 吸声隔音功能纺织材料的研究现状及进展[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(6): 216–225.
PAN Leilei, FAN Shuo, WANG Yuxuan, et al. Research status and progress of textile materials with sound-absorbing and sound insulation functions[J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(6): 216–225.
- [12] MAGDI E M, AFFAF K A, YASMIN A, et al. Statistical analysis of the effect of processing machine parameters on acoustical absorptive properties of needle-punched nonwovens[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2023. DOI: 10.1177/15589250231155623.
- [13] 孙少阳, 申莹, 王容容, 等. 静电纺聚乳酸纳米纤维的制备及其孔结构调控[J]. 中国塑料, 2023, 37(4): 67–73.
SUN Shaoyang, SHEN Ying, WANG Rongrong, et al. Preparation and pore structure regulation of electrospun polylactic acid nanofibers[J]. China Plastics, 2023, 37(4): 67–73.
- [14] LI Lijun, DONG Fuxiang, GANG Xianye, et al. Analysis on influence factors of acoustic absorption performance of porous fiber materials[J]. International Journal of Modeling Simulation and Scientific Computing, 2020. DOI: 10.1142/S1793962321500021.
- [15] 马胜男, 刘新金, 谢春萍, 等. 聚丙烯腈静电纺纳米纤维膜及其层合材料的吸声性能[J]. 丝绸, 2020, 57(11): 13–19.
MA Shengnan, LIU Xinjin, XIE Chunping, et al. Sound absorption properties of polyacrylonitrile electrospinning nanofiber membrane and its laminated materials[J]. Journal of Silk, 2020, 57 (11): 13–19.
- [16] QIAN Y F, GUO Z Y, LI N, et al. Composite sound-absorbing materials using electrospun PS fibrous membranes and needle-punched PET non-woven fabrics[J]. Journal of Fiber Science and Technology, 2022, 78(1): 18–27.