

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.001

定向排列PLA/芥酸酰胺超细纤维材料的 熔喷制备及其贴肤特性

赵珂¹, 张恒¹, 翟倩¹, 秦子轩¹, 甘益², 杨自强²

(1. 中原工学院纺织学院, 郑州 451191; 2. 河南逸祥卫生材料科技有限公司, 郑州 451191)

摘要: 为提升聚乳酸(PLA)超细纤维材料的柔软贴肤性,以PLA、聚乙二醇(PEG)和芥酸酰胺(Era)为原料,采用共混熔喷的原位牵伸工艺获得一种定向排列PLA/PEG@Era超细纤维材料,探究了不同牵伸风压(P_{da})和接收距离(D_{cd})对其柔软性、透气性等贴肤性的影响。结果表明,当Era质量分数为2.0%,共混聚合物冷结晶峰温度为93.20℃,熔融峰温度为140.52℃,表明Era可以促进PLA大分子链运动。所制备PLA/PEG@Era超细纤维材料样品的纤维取向角在-20°~20°范围内占比为54.07%,表现为高定向排列结构; P_{da} 和 D_{cd} 对纤维细度、孔隙率和力学性能有显著影响,随着 P_{da} 增大到0.54 kPa时,纤维细度从2.70 μm减小到1.10 μm,纵向断裂强力从15.94 N增大到22.03 N;随着 D_{cd} 增大到32 cm时,孔隙率从87.21%增大到93.24%,纵向断裂强力从24.40 N减小到16.52 N。受益于定向排列PLA/PEG@Era超细纤维材料所具有的大孔隙结构,样品纵向柔软力值分布在0.12~0.62 N,透气率分布在168.46~567.06 mm/s,水蒸气透湿率分布在1 630.27~2 463.36 g/(m²·24 h)。同时,所构建透气率和水蒸气透湿率二次回归方程的置信度分别为0.95和0.94,可用于PLA/PEG@Era超细纤维材料通透性能的研究。

关键词: 聚乳酸; 芥酸酰胺; 共混熔喷; 定向排列; 贴肤; 非织造

中图分类号: TS176+.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0001-08

Melt Blowing Process and Skin Covering Properties of PLA/Polyethylene glycol @ Erucic Amide Microfibers Materials with Directional Alignment

Zhao Ke¹, Zhang Heng¹, Zhai Qian¹, Qin Zixuan¹, Gan Yi², Yang Ziqiang²

(1. School of Textile, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China;

2. Henan Yeesain Health Technology Co., Ltd., Zhengzhou 451191, China)

Abstract : To improve the softness and skin covering properties of polylactic acid (PLA) microfibrillar fabrics, a PLA/polyethylene glycol (PEG) @erucic amide (Era) microfibrillar materials with directional alignment were prepared by the in-situ drawing process of blended melt blown. The effect of skin covering properties, such as softness properties, air permeability properties were explored in different draft air pressure (P_{da}) and die-to-collector distance (D_{cd}). The results show that for the blended polymer with Era mass ratio of 2%, temperature of cold crystallization peak and melting peak are 93.20 °C and 140.52 °C, respectively, which presents that blending Era is good for improving the mobility of PLA molecular chains. The proportion of the fiber orientation angles distributing in -20°-20° of the samples is 54.07%, which demonstrates the prepared PLA/PEG@Era microfibrillar fabrics possesses a directional alignment. The fiber fineness, porosity and mechanical properties are significant affected by the melt blowing process parameters, such as P_{da} and D_{cd} . The fiber diameter decreases from 2.70 μm to 1.10 μm and the longitudinal tensile breaking strength increases from 15.94 N to 22.03 N with the P_{da} increasing to 0.54 kPa; The porosity increases from 87.21% to 93.24% and the longitudinal tensile breaking strength decreases from 24.40 N to 16.52 N with the D_{cd} increases to 32 cm. Moreover, benefiting from the microporous structure of PLA/PEG@Era microfibrillar materials with directional alignment, the longitudinal softness value ranges 0.12-0.62 N, the permeability ranges 168.46-567.06 mm/s, and water vapor transmission rate ranges 1 630.27-2 463.36 g/(m²·24 h). Furthermore, the confidence of the quadratic regression equation about air permeability and water vapor transmission rate are 0.95 and 0.94, respectively, implied that it is useful for studying the air permeability properties of PLA/PEG@Era microfibrillar fabrics.

Keywords : polylactic acid ; erucic amide ; blended melt blown ; directional alignment ; skin covering property ; nonwoven

基金项目: 国家自然科学基金项目(52003306), 河南省高等学校重点科研项目(23 A540003), 河南省高校科技创新人才支持计划资助项目(24HASTIT011), 河南省重大科技专项(221100310500), 中原工学院研究生科研创新计划项目(YKY2023ZK02)

通信作者: 张恒, 副教授, 博士, 主要研究方向为新型非织造材料的加工技术及其功能性应用

收稿日期: 2023-10-13

引用格式: 赵珂, 张恒, 翟倩, 等. 定向排列PLA/芥酸酰胺超细纤维材料的熔喷制备及其贴肤特性[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 1-8.

Zhao Ke, Zhang Heng, Zhai Qian, et al. Melt blowing process and skin covering properties of PLA/polyethylene glycol @ erucic amide microfibrillar materials with directional alignment[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 1-8.

聚乳酸(PLA)超细纤维材料是一种具有生物降解性^[1]、柔和光泽、高手感的柔性多孔纤维结合体,可以很好地服务于医用防护^[2]、卫生护理和服装面料等领域^[3]。但PLA聚合物低结晶效率会造成纤维脆性大和力学性能弱等^[4],极大限制了PLA超细纤维在面膜基材、服装填充和纸尿裤等护理产品中的贴肤性高质应用^[5]。因此,提升PLA超细纤维材料贴肤性已经成为医卫产品领域和生物降解纺织品领域的共性热点。

PLA超细纤维材料制备方法主要包括静电纺丝法^[6]、溶液喷射法^[7]和熔喷法^[8]。其中,熔喷法是利用高速热气流对熔体进行高速牵伸,从而形成具有稳定结构和一定强力的自黏结超细纤维材料的一步法制备技术^[9]。熔喷法所特有的高速热气流牵伸工艺具有非稳态成纤的纺丝特性,可适用于多种热塑性聚合物。同时熔喷法生产过程中不涉及有机化学试剂使用^[10],是一种商业化的超细纤维材料绿色制备技术,受到了众多学者关注^[11]。例如Wei等^[12]以PLA/聚乙二醇(PEG)为原料,采用后牵伸辅助的熔喷法制备高度排列的PLA/PEG微纳米纤维材料。结果表明,PLA/PEG微纳米纤维材料表现出良好的柔韧性,材料的力学性能随着模头温度和热风温度的提高有所增强。Chen等^[13]将动态交联多硫化物(SOA)与PLA熔融共混,发现材料表现出优异的增韧效果。上述研究表明,PLA与其它小分子聚合物的共混熔融,是改善PLA超细纤维材料柔软性的有效途径。芥酸酰胺(Era)作为一种热塑性小分子物质,具有良好的热稳定性,常作为滑爽剂或润滑剂与各类塑料进行物理共混,以提高材料的柔性。将Era与PLA等聚合物进行共混熔喷,制备出一种手感柔软的超细纤维材料,对于提升贴肤性具有显著意义。此外,在熔喷加工成型的过程中,通过对牵伸风压(P_{ds})和接收距离(D_{cd})等工艺参数的调整,可以获得直径较细且孔隙率较大的超细纤维材料,进而提升材料的柔性。

基于此,笔者通过共混熔喷的原位牵伸工艺制备一种定向排列PLA/PEG@Era超细纤维材料,并对其形态结构、力学性能、通透性和柔软性等特性进行试验分析,为PLA超细纤维材料的柔软贴肤性增强研究提供思路,并为可降解医卫用贴肤产品的开发提供案例。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA: 6252D, 熔点 176 °C, 相对分子质量为 1.0×10^5 , 美国 Nature Work 公司;

Era: WK1980, 熔点 79~83 °C, 相对分子质量 337.59, 韩国 Pdathwel 公司;

PEG: PEG-6000, 熔点 64~66 °C, 相对分子质量 5 500~7 500, 江苏省海安石油化工厂。

1.2 主要仪器及设备

熔喷试验机: MB-300 型, 苏州多臻新材料科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC25 型, 美国 TA 公司;

高精度电子天平: BK-303G 型, 东莞怡雪电子有限公司;

高精度测厚仪: 32CHQF1030 型, 盛泰芯 SYNTEK 公司;

扫描电子显微镜(SEM): EVO18 型, 德国 ZEISS 公司;

力学性能分析仪: HD026S-100 型, 南通宏大实验仪器有限公司;

全自动透气量仪: YG461E-Ⅲ型, 宁波纺织仪器厂;

水蒸气透过率测试仪: W3-031 型, 济南兰光机电科技有限公司;

织物力学性能综合试验机: YG026MD 型, 温州方圆仪器有限公司。

1.3 试样制备

图1为定向排列PLA/PEG@Era超细纤维材料的熔喷原位牵伸工艺原理图。首先,将PLA, PEG与Era的质量比分别为: 93.5/6/0.5, 93/6/1 和 92/6/2 的共混原料通过料斗投入到螺杆挤出机中软化熔融为熔体。熔体随后输送到计量泵中, 经计量泵定量输送至熔喷模头处, 并以熔体细流形式喷出。然后, 熔体细流在两侧高速热气流的冷却、牵伸作用下形成PLA/PEG@Era超细纤维, 并在接收网帘上自黏成具有一定温度的无序纤维网。纤维网最终在收卷成布的过程中, 因接收网帘与卷绕滚筒间的速度差而牵伸成定向排列结构。牵伸比以卷绕滚筒速度(V_2)与接收网帘速度(V_1)的比值(V_2/V_1)计算获得。PLA/PEG@Era超细纤维材料样品制备的主要

工艺参数见表1。

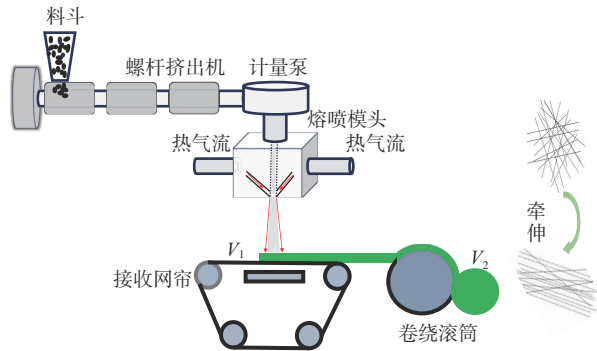


图1 定向排列 PLA/PEG@Era 超细纤维材料的熔喷原位牵伸工艺原理图

表1 PLA/PEG@Era 超细纤维材料制备的主要工艺参数

设备	特征参数	温度设定/℃
螺杆挤出机	一区	175
	二区	195
	三区	215
计量泵	转速为 3 Hz	215
熔喷模头	喷丝孔直径为 0.25 mm, 长径比为 10:1	223
罗茨风机	P_{Da} 为 0.31, 0.36, 0.41, 0.46 kPa 和 0.54 kPa	228
牵伸比	1.4	—
其他	D_{CD} 为 9, 14, 19, 24 cm 和 32 cm	—

1.4 性能测试与表征

(1) 聚合物熔融特性测试。

采用 DSC 仪对 PLA/PEG@Era 聚合物样品进行测试。测试条件为:氮气保护,样品以 30 °C/min 的速率升温,温度升到 200 °C 后以 30 °C/min 速率降温到 30 °C,再对样品二次升温,获得二次升温曲线。

(2) 超细纤维材料样品的特征性能测试。

利用 SEM 观察超细纤维材料样品的截面形态和表面形态,获得 SEM 照片,并利用 Image J 软件测量纤维直径,计算获得平均纤维直径。

参照 GB/T 24218.2-2009 选取 5 组样品,分别测量其厚度,取平均值。

参照 GB/T 24218.1-2009 选取 5 组样品,分别测试其面密度,取平均值。

依据公式(1)、公式(2)计算样品的孔隙率。

$$\eta = \left[1 - \frac{G}{\rho_f \times T} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$\rho_f = \rho_{PLA} \times \omega_{PLA} + \rho_{Era} \times \omega_{Era} + \rho_{PEG} \times \omega_{PEG} \quad (2)$$

式中: G ——面密度, g/cm²;

T ——材料厚度, mm;

ρ_f ——纤维密度, g/cm³;

ρ_{PLA} ——PLA 的密度, 1.25 g/cm³;

ρ_{Era} ——芥酸酰胺的密度, 0.1 g/cm³;

ρ_{PEG} ——聚乙二醇的密度, 1.27 g/cm³;

ω_{PLA} , ω_{Era} 和 ω_{PEG} ——PLA, Era 和 PEG 的质量分数。

(3) 通透性能测试。

按照 GB/T 24218.15-2018, 利用全自动透气量仪对样品进行透气率测试, 测试 5 组取平均值;

按照 GB/T 12704.1-2009, 利用水蒸气透过率测试仪对样品进行透湿率测试, 测试 5 组取平均值。

(4) 力学性能测试。

按照 GB/T 24218.3-2010, 利用力学分析仪对样品纵、横方向进行拉伸断裂强力测试, 样品规格为长 200 mm, 宽 50 mm, 夹持距离为 100 mm, 拉伸速度为 100 mm/min, 选取 5 组实验并取平均值。

(5) 柔软度测试。

按照 GB/T 8942-2016, 利用织物试验机测试样品纵、横向柔软力值, 选取 5 组实验并取平均值。测试条件为速度 100 mm/min, 槽宽 10 mm。纵向柔软度测试时, 刀具长度方向与样品的纵向平行; 横向柔软度测试时, 刀具长度方向与样品的纵向垂直。

2 结果与讨论

2.1 聚合物熔融特性

图 2 为 PLA/PEG@Era 超细纤维材料的二次升温曲线。从图 2 可以看出, PLA/PEG@Era 超细纤维材料的二次升温曲线上存在 1 个放热峰和 2 个吸热峰, 分别为共混聚合物的冷结晶峰、熔融峰。其中, 冷结晶是聚合物升温过程中的一种典型现象, 也是大分子链运动使材料结构重新排列的过程^[14]。PLA/PEG@Era 共混聚合物冷结晶峰为 103.36 °C, 对比纯 PLA 聚合物冷结晶峰 123.83 °C^[15], 下降了 20%。随着 Era 质量分数增加到 2.0%, PLA/PEG@Era 共聚混合物冷却结晶峰降低至 93.20 °C。从图 2 中还可以看出随着温度升到 148.23 °C, PLA/PEG@Era 共聚物出现熔融峰。且随着 Era 的质量

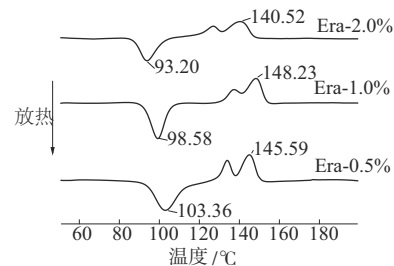


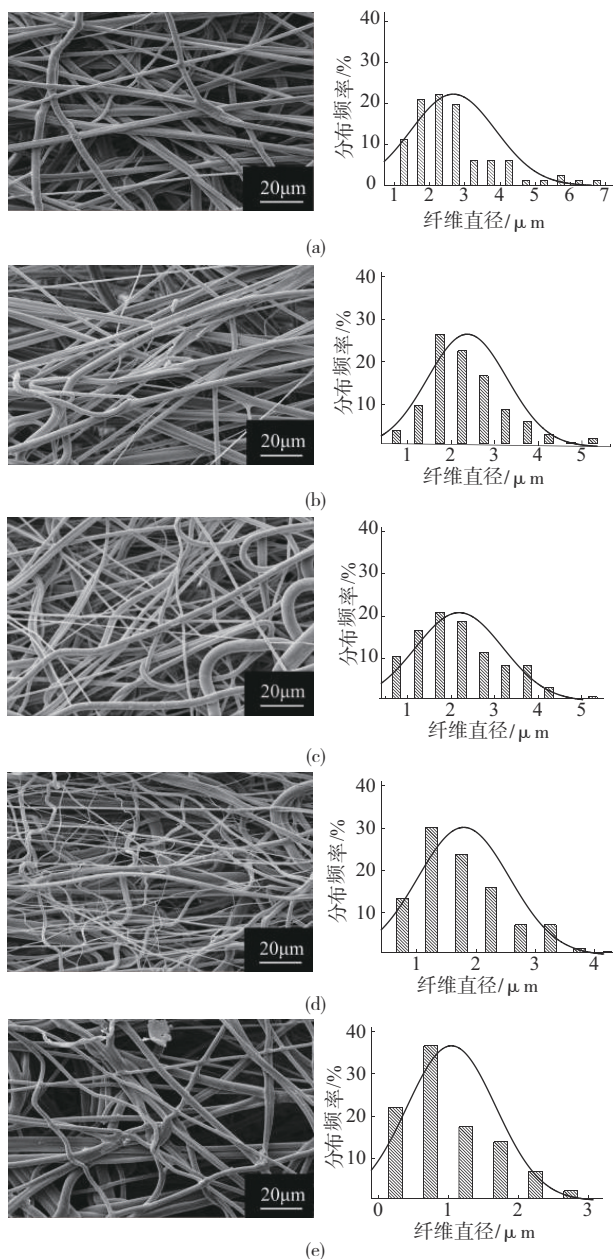
图2 不同Era质量分数的PLA/PEG@Era超细纤维材料的二次升温曲线

分数从0.5%增加到2.0%,熔融峰从145.59℃减小到140.52℃,减少了3.48%。这一现象说明,Era能减小PLA大分子链间阻力,促进PLA大分子链运动,使PLA大分子更加有序排列,进而提高结晶效率^[16],Era可以作为爽滑剂来提升PLA超细纤维材料的柔性。

2.2 PLA/PEG@Era超细纤维材料的形态结构

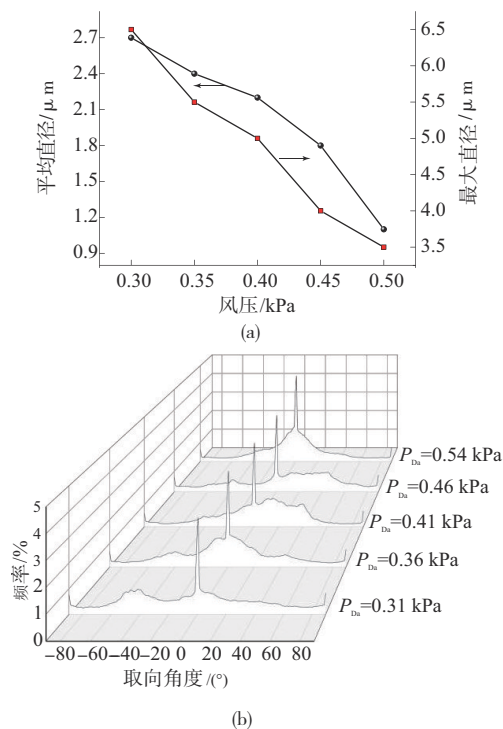
图3和图4为PLA/PEG@Era超细纤维材料表面SEM照片、纤维直径分布曲线和纤维取向分布曲线。由图3a~图3e可以看到,PLA/PEG@Era超细纤维材料是由粗细不一的纤维相互黏结而形成的多

孔网状结构。从图3和图4可以清晰看出,PLA/PEG@Era超细纤维材料样品的纤维直径分布在1~7 μm,为正态分布。随着 P_{Da} 从0.31 kPa增大到0.54 kPa,纤维直径分布曲线峰逐渐前移,从2.70 μm减小到1.10 μm,此时样品的超细纤维(直径<2 μm)的数量占比达到90.12%。造成这一现象的原因为牵伸气流速度随着 P_{Da} 增大而提高,因此纤维成形过程中受到的气流牵伸作用力有所增强而纤维直径变小。由图4中的纤维取向分布曲线可知, P_{Da} 为0.31 kPa时,样品的纤维取向角在-80°~80°间无规则分布;此后随着 P_{Da} 逐渐增大到0.54 kPa的过程中,纤维取向角在-20°~20°范围内占比为54.07%,纤维取向角在该范围内趋于集中分布。这可能是因为 P_{Da} 为0.31 kPa时,牵伸气流流速小、流量低、易被风机吸走,因此纤维在接收网帘表面沉积过程中受牵伸气流作用的“直上直下”作用强烈,而呈现随机分布的特征。随着 P_{Da} 增大到0.54 kPa,牵伸气流的流速增快、流量变大,难以短时间内被全部抽走而沿着网帘传输,因此纤维受牵伸气流作用而呈现出沿网帘方向取向分布的特征。



P_{Da} : a—0.31 kPa; b—0.36 kPa; c—0.41 kPa; d—0.46 kPa; e—0.54 kPa

图3 PLA/PEG@Era超细纤维材料的表面SEM照片及直径分布图

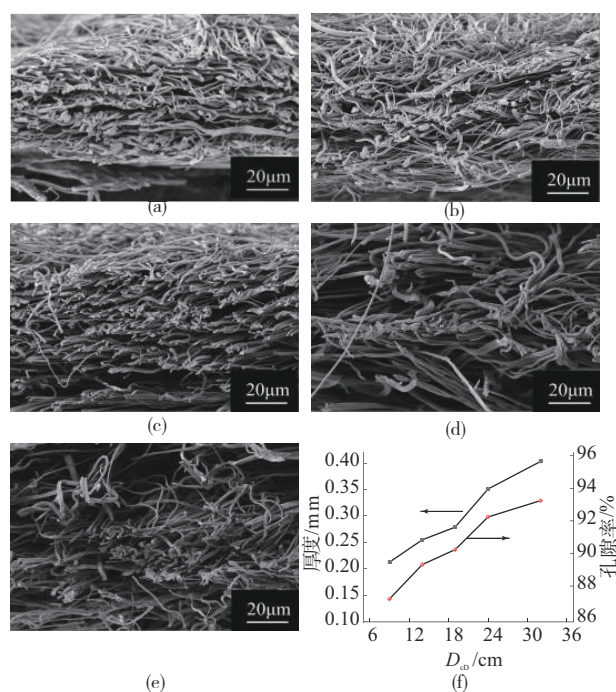


a—平均直径以及最大直径;b—纤维取向分布

图4 PLA/PEG@Era超细纤维材料平均直径及纤维取向分布曲线

图5为PLA/PEG@Era超细纤维材料的截面SEM照片、厚度和孔隙率。从图5a~图5e可以看出,样品在厚度方向表现为多层堆叠的纤维网组合

结构。并且随 D_{CD} 增大,纤维结构逐渐变得蓬松。由图5f可知, D_{CD} 为9 cm时,样品厚度为0.21 mm,孔隙率为87.21%。此后,随着 D_{CD} 增大到32 cm时,样品厚度增大到0.40 mm(增加了90.48%),孔隙率增大到93.24%(增加了6.03%)。这是因为 D_{CD} 增大造成纤维在空气中停留时间变长,纤维表面温度降低,纤维自黏合效率降低,纤维间孔隙结构增大,纤网结构更为蓬松,这为提升柔性提供了结构基础^[17]。

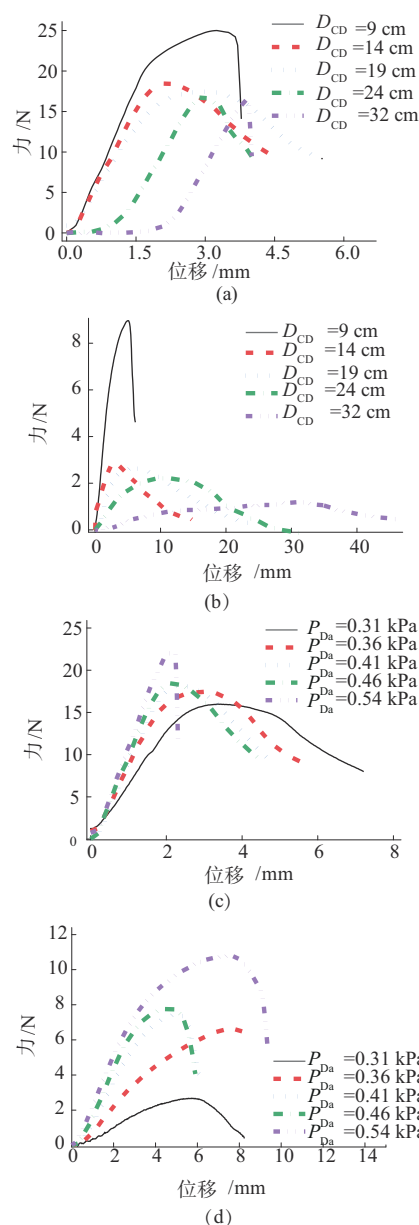


D_{CD} : a—9 cm; b—14 cm; c—19 cm; d—24 cm; e—32 cm;
f—厚度及孔隙率

图5 PLA/PEG@Era超细纤维材料的截面SEM照片、厚度及孔隙率

2.3 PLA/PEG@Era超细纤维材料拉伸断裂性能

PLA/PEG@Era超细纤维材料样品的应力-位移曲线如图6所示,数据汇总于表2。根据图6a~图6b可知,当位移较小时,曲线斜率较小,此时样品受力而产生纤维间的滑移。此后,随着位移逐渐增大,曲线斜率逐渐增大并趋于稳定。随着位移逐渐增大,纤维内应力已达到最大而发生纤维的断裂与滑脱,此时曲线斜率保持。结合表2可知,当 D_{CD} 增大到32 cm,样品纵、横向断裂强力分别从24.40 N和8.96 N减小到16.52 N(减小32.30%) and 1.18 N(减小86.83%)。而纵、横向断裂伸长率随着 D_{CD} 增大分别增大到39.06%和28.60%。PLA/PEG@Era超细纤维材料力学性能也受到 P_{Da} 的影响。从图6c~图6d可知,随着 P_{Da} 从0.31 kPa增大0.54 kPa,样品纵、横



a— D_{CD} -纵向; b— D_{CD} -横向; c— P_{Da} -纵向; d— P_{Da} -横向

图6 PLA/PEG@Era超细纤维材料纵、横向拉伸断裂曲线

表2 PLA/PEG@Era超细纤维材料力学性能

项目	纵向		横向	
	断裂强力/ N	断裂伸长 率/%	断裂强力/ N	断裂伸长 率/%
$D_{CD}=9$ cm	24.40	36.00	8.96	5.00
$D_{CD}=14$ cm	18.45	21.09	2.90	2.90
$D_{CD}=19$ cm	17.42	26.74	2.66	5.85
$D_{CD}=24$ cm	16.90	29.40	2.21	9.75
$D_{CD}=32$ cm	16.52	39.06	1.18	28.60
$P_{Da}=0.31$ kPa	15.94	36.06	2.64	5.97
$P_{Da}=0.36$ kPa	17.25	29.74	6.65	7.60
$P_{Da}=0.41$ kPa	18.24	23.75	7.49	5.17
$P_{Da}=0.46$ kPa	18.45	21.09	7.79	4.57
$P_{Da}=0.54$ kPa	22.03	20.75	10.79	7.57

向断裂强力分别增大到22.03 N和10.79 N。造成这一现象的原因主要为纤维直径随着 P_{Da} 增大而减小,样品抵御外力的纤维数量增多,使得样品断裂强力增加。同时,样品纵向断裂伸长率随 P_{Da} 增大而从36.06%减小到20.75%(减小了15.31%)。这是因为 P_{Da} 增大促使纤维沿接收网帘方向定向排列,样品结晶度提高限制了大分子间滑移。随着 P_{Da} 从0.31 kPa增大到0.54 kPa,样品横向断裂伸长率从5.97%增大到7.57%。此原因是纤维沿接收网帘定向排列时,横向纤维数量较少,纤维间的黏结点较少,纤维受到拉伸作用时易发生形变。

2.4 PLA/PEG@Era超细纤维材料的柔软性能

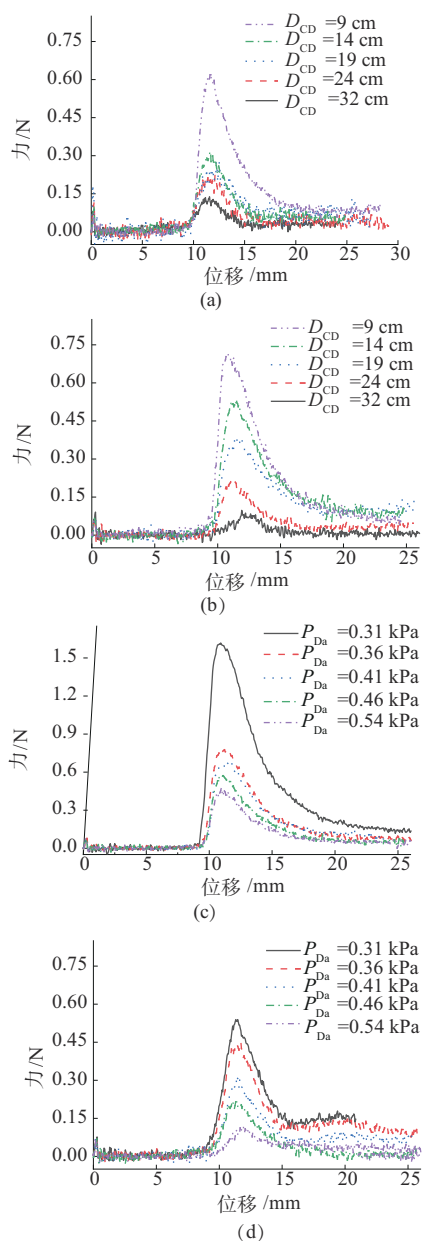
图7为基于Handle-O-Meter测试方法对PLA/PEG@Era超细纤维材料样品的柔软力值进行测试分析。由图7可知, D_{CD} 为9 cm时,样品纵、横向柔软力值分别为0.62 N和0.71 N;随着 D_{CD} 增大到32 cm,样品纵、横向柔软力值分别减小到0.12 N和0.08 N。同时,样品纵、横方向柔软力值均随 P_{Da} 增大而减小。当 P_{Da} 从0.31 kPa增大到0.54 kPa,纵向柔软力值从1.62 N减小到0.45 N(减小了72.22%),横向柔软力值从0.54 N减小到0.11 N(减小了79.63%)。

2.5 PLA/PEG@Era超细纤维材料的XRD分析

图8为PLA/PEG@Era超细纤维材料样品的XRD曲线。从图8可以看出, P_{Da} 为0.31 kPa所制备的样品仅在 $2\theta=16.48^\circ$ 处出现一个衍射峰,且衍射峰面积较大,其对应PLA的 α 晶型(200/110)^[18]。 P_{Da} 从0.31 kPa增大到0.54 kPa过程中,PLA/PEG@Era超细纤维材料样品在 $2\theta=22.00^\circ$ 和 $2\theta=29.01^\circ$ 出现新的衍射峰。其中 $2\theta=22.00^\circ$ 的衍射峰对应(015)晶面的 α 型晶体^[19], $2\theta=29.01^\circ$ 的衍射峰对应 β 型晶体^[20]。由此可见,增加 P_{Da} 不仅可以使衍射峰强度增加,还会改变PLA/PEG@Era超细纤维材料的晶型和位置。

2.5 PLA/PEG@Era超细纤维材料的通透性能

通过上述分析可知, D_{CD} 和 P_{Da} 对PLA/PEG@Era超细纤维材料的透气率和透湿率亦有显著影响,因此,笔者以透气率和透湿率作为响应指标进行二次多元回归拟合,得到 D_{CD} 和 P_{Da} 对透气率和透湿率的二次多项回归方程,分别为:透气率 $=765.767\ 83-703.960\ 13\times D_{CD}-36.724\ 14\times P_{Da}+1.204\ 06\times P_{Da}^2$ 以及透湿率 $=2\ 845.981\ 51-1\ 707.715\ 36\times D_{CD}-51.554\ 04\times P_{Da}+1.853\ 37\times P_{Da}^2$ 。透气率和透湿率的二次多项回



a— D_{CD} -纵向;b— D_{CD} -横向;c— P_{Da} -纵向;d— P_{Da} -横向

图7 基于Handle-O-Meter测试方法测试样品纵、横向柔软力值

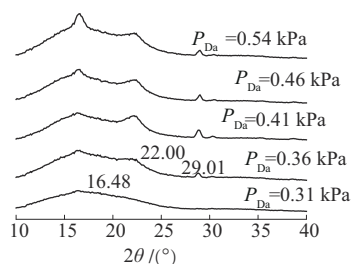


图8 PLA/PEG@Era超细纤维材料的XRD曲线

归方程置信度分别为0.95和0.94。这表明二次多项回归方程的拟合度和可信度均较高,可以用于分析 D_{CD} 和 P_{Da} 对透气性和透汽性的影响。

图9为透气率和透湿率与 D_{cd} 和 P_{da} 的响应曲面。当 D_{cd} 为9 cm,样品的透气率和透湿率分别为241.96 mm/s和1 853.89 g/(m²·24 h),此后,透气率和透湿率随 D_{cd} 的增加分别增大到567.06 mm/s和2 463.36 g/(m²·24 h)。这是因为样品的孔隙率随 D_{cd} 的增大而增大,纤网结构蓬松,样品的透气率和透湿率增大。而 P_{da} 增大到0.54 kPa,样品的透气率和透湿率分别减小到168.46 mm/s和1 630.27 g/(m²·24 h)(分别减小了43.39 %和19.21 %)。造成这一现象的原因是 P_{da} 增大时,纤维沿气流牵伸方向定向排列,纤维间缠结增多,孔隙减小,因此透气率和透湿率有所降低。

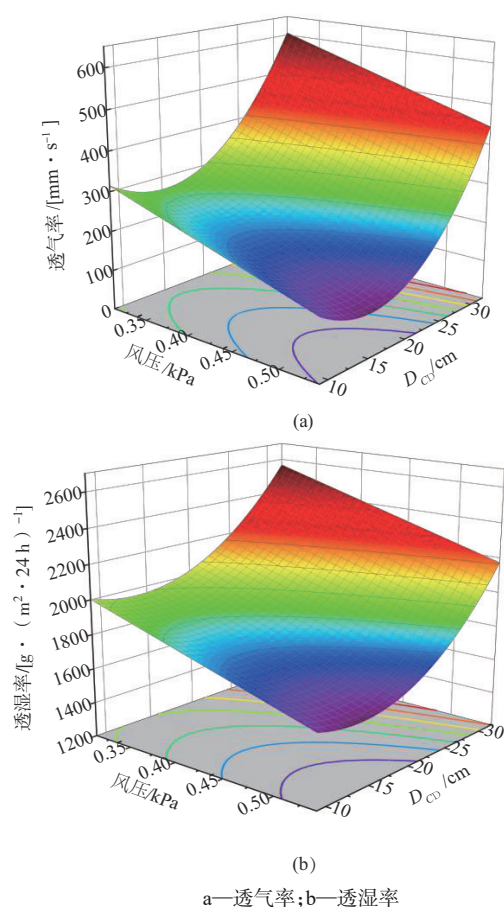


图9 透气率和透湿率与 D_{cd} 和 P_{da} 的响应曲面

3 结论

通过共混熔喷的原位牵伸工艺制备了一种定向排列PLA/PEG@Era超细纤维材料,并分析 D_{cd} 和 P_{da} 对PLA/PEG@Era超细纤维材料形貌结构、柔软性和透气性的影响规律,得到如下结论。

(1) PLA的结晶性能较差,Era的加入促进了PLA大分子链的运动,提高了PLA/PEG@Era超细

纤维材料的结晶效率。

(2) P_{da} 和 D_{cd} 对PLA/PEG@Era超细纤维材料的纤维直径和孔隙率有显著影响。 P_{da} 增大到0.54 kPa,样品的超细纤维(直径<2 μm)的数量占比达到90.12%,并且纤维取向角在-20°~20°间趋于集中分布,样品表现为高取向结构。孔隙率随 D_{cd} 的增大而增大到93.24%,纤网结构蓬松,为提升材料柔性提供结构基础。

(3) PLA/PEG@Era超细纤维材料柔软性和通透性亦受 D_{cd} 和 P_{da} 的显著影响。随着 P_{da} 增大到0.54 kPa,样品纵向柔软力值减小到0.45 N。当 D_{cd} 增大到32 cm,样品透气率增大到567.06 mm/s,为PLA超细纤维材料在贴肤领域的应用提供新的可能性。

参考文献

- [1] Wajid A, Hazrat A, Sayed G, et al. Polylactic acid synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21(3). DOI: 10.1007/S10311-023-01564-8.
- [2] Anguo W, Jeffrey V, Simon M D. Enhancing the corrodibility of biodegradable iron and zinc using poly (lactic) acid (PLA) coating for temporary medical implant applications[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 174. DOI:10.1016/J. PORGOAT.2022.107301.
- [3] Yadav V, Singh S, Chaudhary N, et al. Dry sliding wear characteristics of natural fibre reinforced poly-lactic acid composites for engineering applications: Fabrication, properties and characterizations [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23:1 189–1 203.
- [4] 乔虎,张胜,谷晓昱,等.聚乳酸/聚乙醇酸共混合金界面改性研究[J].工程塑料应用,2020,48(1):8–12.
Qiao Hu, Zhang Sheng, Gu Xiaoyu, et al. Study on interface modification of polylactic acid/polyglycolic acid blend alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):8–12.
- [5] 秦子轩,张恒,甄琪,等.贴肤用熔喷非织造材料柔韧化改性及应用研究进展[J].丝绸,2023,60(3):73–81.
Qin Zixuan, Zhang Heng, Zhen Qi, et al. Research progress of flexible modification and applications of skin-fitting melt-blown nonwovens[J]. Journal of Silk, 2023, 60(3):73–81.
- [6] Daniel C, Dominique M, Fabian A, et al. Preparation and characterization of novel poly (lactic acid)/calcium oxide nanocomposites by electrospinning as a potential bone tissue scaffold[J]. Biomaterials Advances, 2023, 153. DOI:10.1016/J. BIOADV.2023.213578.
- [7] Zhang T, Tian H, Yin X, et al. Solution blow spinning of polylactic acid to prepare fibrous oil adsorbents through morphology optimization with response surface methodology[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2020, 28(3). DOI: 10.1007/s10924-019-01617-6.
- [8] Zhang J, Chen G, Bhat G, et al. Electret characteristics of melt-

- blown polylactic acid fabrics for air filtration application[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(4). DOI: 10.1002/app.48309.
- [9] 杨文娟,李晨暘,程博闻. 锂电池用非织造布隔膜研究进展[J]. *塑料科技*, 2023, 51(2):120–124.
- Yang Wenjuan, Li Chenyang, Cheng Bowen. Research progress of nonwoven fabric based separator for lithium-ion batteries[J]. *Plastic Science and Technology*, 2023, 51(2):120–124.
- [10] Rui H, Qiwei H, Gao Hui L, et al. Polylactic acid/calcium stearate hydrocharging melt-blown nonwoven fabrics for respirator applications[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(6). DOI: 10.1021/ACSAPM.3C00500.
- [11] Bikiaris D N, Ioanna K, Christina S, et al. Recent advances in the investigation of poly(lactic acid)(PLA) nanocomposites: Incorporation of various nanofillers and their properties and applications[J]. *Polymers*, 2023, 15(5). DOI:10.3390/POLYM15051196.
- [12] Wei H S, Heng Z, Qi Z, et al. Large-scale preparation of polylactic acid/polyethylene glycol micro/nanofiber fabrics with aligned fibers via a post-drafting melt blown process[J]. *Journal of Polymer Research*, 2022, 29(8). DOI: 10.1007/S10965-022-03184-2.
- [13] Chen Xiaojie, Ruanquan Z, Yixuan M, et al. Development of a toughened and antibacterial poly (lactide acid) (PLA) with preserved strength by elemental sulfur-based bio-renewable dynamically crosslinked elastomers[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 467. DOI:10.1016/J. CEJ.2023.143419.
- [14] 王榕琛,张恒,翟倩,等. 仿生高取向结构聚乳酸/聚乙二醇/十二烷基硫酸钠熔喷非织造材料的原位牵伸制备及定向导液特性[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(5):134–144.
- Wang Rongchen, Zhang Heng, Zhai Qian, et al. Preparation and liquid directional transport properties of the biomimetic oriented PLA/PEG/SDS melt blown nonwovens via in-situ drafting progress[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(5): 134–144.
- [15] 孙辉,咸玉龙. TiO_2 -Ag/聚乳酸纳米复合纤维的制备及其抗菌性能[J]. *纺织学报*, 2019, 40(4):1–6.
- Sun Hui, Xian Yulong. Preparation and antibacterial Properties of TiO_2 -Ag/poly (lactic acid) nano-composite fibers[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(4):1–6.
- [16] 孙焕惟,张恒,崔景强,等. 聚乳酸非织造材料的后牵伸辅助熔喷成形工艺及其力学性能[J]. *纺织学报*, 2022, 43(6):86–93.
- Sun Huanwei, Zhang Heng, Cui Jingqiang, et al. Preparation and mechanical properties of polylactic acid nonwovens via post-drafting assisted melt blown process[J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(6):86–93.
- [17] 金关秀,祝成炎. 制备工艺对熔喷非织造布基平面网结构的影响[J]. *纺织导报*, 2018(1):67–70.
- Jin Guanxiu, Zhu Chengyan. Influence of preparation process on basal plane structure of meltblown nonwovens[J]. *Textile Herald*, 2018(1):67–70.
- [18] Yan W, Xue Q Z, Xiao J G, et al. Construction of stable beta-cyclodextrin grafted polypropylene nonwoven fabrics for the adsorption of bisphenol A[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, 198. DOI:10.1016/J. RADPHYSCHEM.2022.110223.
- [19] 曲玉婷,王立梅,齐斌. 聚乙二醇对聚乳酸/淀粉纳米晶复合材料性能的影响[J]. *中国塑料*, 2022, 36(8):56–61.
- Qu Yuting, Wang Limei, Qi Bin. Effect of poly (ethylene glycol) on properties of poly (lactic acid)/starch nanocrystal composites [J]. *China Plastics*, 2022, 36(8):56–61.
- [20] 陈豪,吴志强,姜启运,等. 聚乳酸/聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯共混发泡材料的制备及性能研究[J]. *中国塑料*, 2023, 37(7): 1–8.
- Chen Hao, Wu Zhiqiang, Jiang Qiyun, et al. Preparation and properties of Poly (lactic Acid)/Poly (butylene adipate terephthalate) complex foaming materials[J]. *China Plastics*, 2023, 37(7):1–8.