

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.11.007

聚乳酸 / 纳米载银磷酸锆熔纺纤维制备及性能^{*}

傅超^{1,2}, 高明亮³, 韩阜益⁴, 李仲^{1,2}, 甘学辉^{1,2}

(1. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620; 2. 东华大学机械工程学院, 上海 201620;

3. 濮阳永金化工有限公司, 河南濮阳 457004; 4. 东华大学资产管理处, 上海 201620)

摘要: 利用双螺杆挤出机将聚乳酸 (PLA) 切片和纳米载银磷酸锆颗粒共混制备纳米载银磷酸锆质量分数为 20% 的 PLA 母粒。将母粒和纯 PLA 切片按照不同比例共混熔纺制备 PLA / 纳米载银磷酸锆共混纤维。研究了共混纤维的制备方法, 运用扫描电子显微镜观察了纤维束外部形貌, 测试了纤维的力学及抗菌性能。结果表明, 纳米载银磷酸锆在纤维中有少量凝聚, 总体分散均匀; 随着纳米载银磷酸锆含量提升, 纤维断裂强度先增大后降低, 同时纤维的抗菌性不断增加。当载银磷酸锆含量达到 1.5% 时, 纤维的断裂强度最大为 0.85 cN/dtex, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑菌率达 99.9%。

关键词: 聚乳酸; 纳米载银磷酸锆; 母粒; 共混; 熔纺; 力学性能; 抗菌性能

中图分类号: TQ314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)11-0032-04

Preparation and Properties of Polylactic Acid / Nano Silver Loaded Zirconium Phosphate Melt-Spun Fibers

Fu Chao^{1,2}, Gao Mingliang³, Han Fuyi⁴, Li Zhong^{1,2}, Gan Xuehui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Shanghai 201620, China; 2. College of Mechanical Engineering,

Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Puyang Yong Jin Chemical Co. Ltd., Puyang 457004, China;

4. Administration of Assets Management, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The polylactic acid (PLA) slice and nano silver loaded zirconium phosphate particles were mixed to prepare PLA masterbatch containing 20% mass fraction nano silver loaded zirconium phosphate by twin screw extruder. The masterbatch and pure PLA slice mixed at a different proportion were blended and melt spun to obtain different PLA / nano loaded silver zirconium phosphate blend fibers. The preparation of these blend fibers were discussed. The external morphology of the fiber bundles was observed by scanning electron microscope. The mechanical and antibacterial properties of these fibers were tested. The results indicate that nano silver loaded zirconium phosphate particles are dispersed evenly in the blend PLA, though few particles aggregation appears. With the increase of the content of nano silver loaded zirconium phosphate, the fracture strength of the fiber increases first and then decreases. When the content of silver zirconium phosphate is 1.5% by mass fraction, the maximum breaking strength of the fiber is 0.85 cN/dtex, and the antibacterial rate of the Escherichia coli and Staphylococcus aureus reaches 99.9%.

keywords: PLA; nano silver loaded zirconium phosphate; master batch; blend; melt spinning; mechanical property; antibacterial property

聚乳酸 (PLA) 是由乳酸为主要原料聚合而成的高聚物, 是聚酯材料的一种, 乳酸来源于玉米、小麦等可再生材料, 因而 PLA 是一种可再生环保绿色材料。PLA 在人体可被水解为乳酸, 最终产物为无毒的二氧化碳和水, 因而 PLA 成为美国食品与药物管理局 (FDA) 批准的生物降解医用材料^[1], PLA 制品还可应用于 3D 打印、家居日用品等领域。在生物医用领域可用在药物缓释体系^[2]、医用缝合线^[3-5]、人工敷料^[6-8]、组织工程材料^[9-10]等; 3D 打印领域主要是指 3D 高性能耗材^[11], 推动了 3D 打印的快速发展; 在家居日常用品领域可用作包装^[12-13]、

湿纸巾、无纺布、太空杯、一次性餐盒等。

PLA 纤维由乳酸或其丙交酯缩聚纺丝而成, 具有无毒性和生物降解性因而在生物医学领域的应用尤其引人注目。为了充分利用 PLA 纤维优良的性能, 需要在 PLA 纤维中增加功能性, 如抗菌性、耐热性等。目前国内外针对 PLA 纤维增加功能性方面有很多方法^[14-16], 分为物理改性、化学改性等方法,

^{*} 中央高校基本科研项目 (16D110312)

联系人: 甘学辉, 教授, 博士生导师, 主要从事新型纺织机械及新型纤维成型理论研究

收稿日期: 2016-08-12

物理改性主要是母粒法。

母粒首先是在改性塑料中应用,其制作过程将需要的各种助剂、填料与少量载体树脂先进行混合混炼,经过挤出机等设备计量、混合、熔融、挤出、切粒等获得母粒。母粒法获得的具有某种功能的母粒,在化纤生产过程中应用可以高效、快速制备含有不同比例改性添加剂的纤维。

熔融纺丝工艺是将高聚物熔融,纺丝,拉伸成纤维,纺丝过程中要经过喷丝板,而熔纺喷丝板孔径一般为 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ ^[17],所以为了防止颗粒堵塞喷丝板,在熔融过程中添加的功能粒子的粒径要远小于喷丝板直径,一般为纳米级;熔融纺丝过程要经过高温,所以添加的粒子要具备良好热稳定性,在纺丝过程中尽量不要分解,且不能与高聚物发生化学反应;化学性能稳定,在洗涤时不与纤维及制品上助剂发生反应。纳米载银磷酸锆是金属离子抗菌剂的一种^[18],是在纳米磷酸锆载体上进行离子交换而制得,解决了其他银系抗菌制品在化纤中易变色、抗菌效果随洗涤次数增加而下降的问题,具有稳定、安全、广谱抗菌性。

笔者利用类似改性塑料的方法,将纯 PLA 干燥切片和改性添加剂混合均匀,利用具有高剪切、混炼双螺杆挤出机熔融挤出造粒制备高浓度的抗菌 PLA 母粒。将母粒和纯净的切片按照一定的配比,按照原有熔纺工艺条件,熔纺可制备含不同质量分数改性添加剂的 PLA 纤维。

1 实验部分

1.1 原材料

纳米无机载银磷酸锆粉末: 6S-NP1C, 耐高温, 上海六立纳米科技有限公司;

PLA 切片: 4032D 型, 密度 1.24 g/cm^3 , 含水率 0.5% , 重均分子量 1.1×10^5 , 玻璃化转变温度 (T_g) 为 60°C , 熔点为 $150 \sim 170^\circ\text{C}$, 美国 Nature Work 公司。

1.2 仪器及设备

双螺杆挤出机: SHJ-35 型, 上海化工机械四厂;

造粒机: SQ 型, 上海化工机械四厂;

真空转鼓干燥箱: JM-500ZDGX 型, 上海金玛电光技术研究所;

纺丝机: 上海金纬化纤机械制造有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-4800 型, 日本日立公司;

精密电子秤: FA2004A 型, 上海精天电子仪器

有限公司;

缕纱测长机: YG086 型, 南通宏大实验仪器有限公司;

全自动单纱强力机: YG023C 型, 常州市双固纺织仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) 共混挤出造粒过程。

将纯 PLA 切片放在 80°C 真空干燥箱中干燥 4 h, 然后与 6S-NP1C 粉末均匀混合, 匀速放入在氮气保护下的双螺杆挤出机中, PLA 切片与 6S-NP1C 粉末质量分数分别为 80% 和 20% 。共混物通过挤出机水平安装的出口模形成条状熔融物, 经水浴冷却, 通过一个干燥段, 用强制通风吹除水分, 然后将条料送至造粒机, 制成 PLA/6S-NP1C 母粒。共混造粒制备工艺参数如表 1 所示。

表 1 共混母粒制备工艺参数

螺杆温度 / $^\circ\text{C}$					造粒机转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
一区	二区	三区	四区	五区	
130	218	218	218	218	400

(2) 共混 PLA 纤维。

将干燥后的纯 PLA 切片和高浓度 PLA/6S-NP1C 母粒, 按照表 2 进行配比, 获得共混切片 PLA1, PLA2, PLA3, PLA4, 再放入 80°C 真空干燥箱中干燥 4 h, 使共混切片含水量降低至 0.005% ^[19], 然后进行熔融纺丝。熔体纺丝加工参数如下: 喷丝板孔数 48; 喷丝板孔径 0.25 mm ; 泵供量 $33.6 \text{ cm}^3/\text{min}$; 纺丝速度 1000 r/min ; 冷却条件为侧吹风, 25°C 冷却。在相同纺丝工艺条件下熔纺制备初生纯 PLA, PLA1, PLA2, PLA3, PLA4 纤维。

表 2 不同共混切片配比 %

共混切片	PLA	PLA/6S-NP1C 母粒	6S-NP1C
PLA1	97.5	2.5	0.5
PLA2	95	5	1
PLA3	92.5	7.5	1.5
PLA4	90	10	2

1.4 性能测试

将制备的纯 PLA 纤维及 PLA4 纤维样品用导电胶固定在试样台上, 喷金后用 SEM 观察并拍照。

使用精密电子秤和缕纱测长机, 按照 GB/T 14343-2008 进行线密度测试, 每组纤维实验次数为 3 次, 结果取均值。

力学性能按 GB/T 14344-2008 测试, 每组纤维试验 10 次, 夹持长度 100 mm , 试验速度 200 mm/min , 结果取平均值。

采用振荡法按 GB/T 21510-2008 检测纤维

的抗菌性能。所用的菌种分别为大肠杆菌 (ATCC 25922) 和金黄色葡萄球菌 (ATCC 6538), 均由广州工业微生物研究所提供, 样品的抗菌性能通过式 (1) 计算抑菌率进行评价。

$$R = \frac{A - B}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R ——抑菌率;

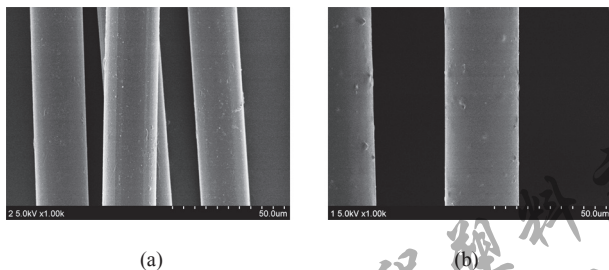
A ——空白对照样(纯棉平纹白布)与受试菌接触 18 h 后平均回收菌数, cfu/mL;

B ——实验样与受试菌接触 18 h 后平均回收菌数, cfu/mL。

2 结果与讨论

2.1 纤维表面样貌分析

纤维表面样貌 SEM 照片如图 1 所示。



a—纯 PLA; b—PLA4

图 1 纤维表面样貌 SEM 照片 (放大 1000 倍)

从图 1 可以看出纯 PLA 纤维束的外表面较为光滑; 而 PLA4 纤维外表面较为粗糙, 形成“凸起”, 这是由于在 PLA 中添加了纳米无机载银磷酸锆颗粒导致的。共混纺丝过程中, 纳米颗粒被包裹在纤维内部, 导致纤维“凸起”, 进而导致外形表面不光滑, 颗粒在纤维中总体分散性好; 从图 1b 中可以观察到纳米粒子在纤维中有部分凝聚现象, 凝聚粒子尺寸大约在 $1 \mu\text{m}$ 。两者均为采用相同的纺丝工艺熔纺得到的纤维, 少量添加纳米载银磷酸锆基本没有改变其可纺性。

2.2 力学性能结果分析

表 3 示出不同试样的力学性能测试结果。

表 3 力学性能测试结果

纤维	断裂强力 / cN	断裂强度 / (cN · dtex ⁻¹)	断裂伸长 率 / %	纤维细度 / dtex
纯 PLA	190.08	0.57	293.83	334.25
PLA1	199.95	0.58	262.83	345.43
PLA2	245.52	0.69	254.43	357.04
PLA3	312.84	0.85	235.12	369.38
PLA4	300.96	0.76	270.43	381.74

由表 3 可知, 随着载银磷酸锆颗粒质量分数的增加, 纤维的断裂强度先增加后减少, 而断裂伸长率

先减少后增加。断裂强度先增加可能是由于少量纳米载银磷酸锆颗粒和 PLA 之间的界面作用力上升, 纳米载银磷酸锆粒子的分散和细化使应力集中得到更好的分散, 但当纳米载银磷酸锆纤维含量超过 1.5% 时断裂强度下降, 这是因为粒子在 PLA 中分散性差导致部分团聚, 容易引发结构缺陷, 易出现应力集中, 导致断裂强度下降; 而断裂伸长率先减少后增加, 这可能是由于纳米载银磷酸锆颗粒增加, 使纤维大分子链发生变形或者滑移, 导致断裂伸长率出现这样变化。随着载银磷酸锆含量的增加, 初生纤维细度一直增加, 这是由于纳米载银磷酸锆密度大于 PLA 密度, 当纳米银磷酸锆含量增加时, 共混纤维细度随之增加。

从表 3 可以得出, 当载银磷酸锆含量为 1.5% 时, 断裂强度为 0.85 cN/dtex, 比纯 PLA 纤维的断裂强度提高了 49%; 断裂伸长率为 235.12% 比纯 PLA 纤维有所减少, 此时力学性能最佳。

2.3 抗菌性结果分析

(1) 理论依据。

抗菌纤维的抗菌测试方法有很多, 采用适当的评价方法可以正确反映物品的抗菌效果。抗菌测试实验方法分为溶出性抗菌测试方法和非溶出性测试方法, 方法的选择和制作抗菌纤维的工艺有关。溶出性测试方法一般适用于后整理法 (如在纤维或者针织品上镀银得到), 非溶出性测试方法一般适用于固着型抗菌剂纺织品^[20]。实验采用的纳米载银磷酸锆, 是银离子在纳米磷酸锆上交换而得, 只有在潮湿状态 (如出汗条件等) 才能释放出银离子, 扩散性差, 因此在使用溶出性测试 (如琼脂平皿扩散法) 时表现不出来抗菌性, 所以应该采用非溶出性方法 (如振荡法) 可以很好地评价纤维的抗菌性。

(2) 纤维抗菌性结果分析。

表 4 为对照组和实验组对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌测试结果。

表 4 抗菌测试结果

试样	对大肠杆菌抑菌率	对金黄色葡萄球菌抑菌率
纯棉平纹白布	0	0
纯 PLA	19.5	12.6
PLA1	40.6	50.8
PLA2	84.6	77.5
PLA3	99.9	99.9
PLA4	99.9	99.9

由表 4 可知, 空白对照组没有抑菌效果, 纯 PLA 有一定的抗菌效果, 随着纳米载银磷酸锆含量

上升,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抗菌效果明显增强。从 PLA3 和 PLA4 纤维可以看出,当纳米载银磷酸锆含量在 1.5% 以上时,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑菌率达到 99.9%,由于纳米载银磷酸锆成本比较高,为了有效控制成本,制备抗菌 PLA 纤维时,载银磷酸锆的含量为 1.5% 左右较为理想。

3 结论

(1)介绍了一种制备共混抗菌 PLA 纤维的方法,采用共混造粒制备的共混母粒与纯 PLA 切片混合熔纺得到共混纤维,具有良好的可纺性。纳米载银磷酸锆颗粒虽在纤维中有少量团聚,但在纤维中总体分散均匀。

(2)适当添加纳米载银磷酸锆,可以提高 PLA/载银磷酸锆熔纺纤维的力学性能,当纳米载银磷酸锆质量分数为 1.5% 时力学性能最佳,断裂强度为 0.85 cN/dtex,比纯 PLA 纤维提高了 49%。

(3)添加纳米载银磷酸锆提高了纤维的抗菌性,当纳米载银磷酸锆含量在 1.5% 以上时,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑菌率达到 99.9%。

(4)综合考虑力学性能和抗菌性能,当纳米载银磷酸锆含量在 1.5% 时,力学性能和抗菌性能最佳。

参考文献

- [1] 樊国栋,张春梅. 聚乳酸在医学领域应用研究进展[J]. 科技导报, 2010,28(19):103-107.
Fan Guodong, Zhang Chunmei. Medical applications of polylactic acid:Recent advances in research[J]. Science and Technology Review, 2010,28(19):103-107.
- [2] 王浚,汪朝阳,赵耀明. 二异氰酸酯扩链合成聚乳酸类药物缓释材料的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2003,32(1):4-7.
Wang Jun, Wang Zhaoyang, Zhao Yaoming. Studies on the synthesis of polylactic acids drug delivery material through diisocyanate chain extension[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2003,32(1):4-7.
- [3] Ellman P I, Brett Reece T, Maxey T S, et al. Evaluation of an absorbable cyanoacrylate adhesive as a suture line sealant[J]. Journal of Surgical Research, 2005, 125(2):161-167.
- [4] 郭红霞,王笑星,刘淑强,等. 聚乳酸医用缝合线载药微球附载效果测试与优化[J]. 合成纤维, 2015,44(12):25-27.
Guo Hongxia, Wang Xiaoxing, Liu Shuqiang, et al. The test and optimization of drug microsphere load effect on polylactic acid medical suture[J]. Synthetic Fiber in China, 2015,44(12):25-27.
- [5] Lou C W, Yao C H, Chen Y S, et al. Manufacturing and properties of PLA absorbable surgical suture[J]. Textile Research Journal, 2008,78(11):958-965.
- [6] 崔巍巍,刘娅,王宗良,等. 纳米银/二甲基砒/聚乳酸-乙醇酸静电纺丝人工敷料的制备及生物评价[J]. 高等学校化学学报, 2013,34(3):679-685.
Cui Weiwei, Liu Ya, Wang Zongliang, et al. Preparation and biological evaluation of electrospun MSM / PLGA dressing containing nano-silver[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2013,34(3):679-685.
- [7] 顾书英,邹存洋,张春燕,等. 聚乳酸复合纳米纤维创面敷料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2008(11):187-190.
Gu Shuying, Zou Cunyang, Zhang Chunyan, et al. Preparation and characterization of wound dressing from electrospun poly(lactic acid) composite nanofibers[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2008(11):187-190.
- [8] Ignatova M, Manolova N, Markova N, et al. Electrospun non-woven nanofibrous hybrid mats based on chitosan and PLA for wound-dressing applications[J]. Macromolecular Bioscience, 2009, 9(1):102-11.
- [9] 徐国富,牟申周,周灵平,等. 仿生增强制备聚乳酸基骨组织工程复合材料[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2006,33(2):86-89.
Xu Guofu, Mou Shenzhou, Zhou Lingping, et al. Biomimetic strengthening PLA scaffold materials for bone tissue engineering[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006,33(2):86-89.
- [10] 朱惠光,计剑,高长有,等. 聚乳酸组织工程支架材料[J]. 功能高分子学报, 2001,14(4):488-492.
Zhu Huiguang, Ji Jian, Gao Changyou, et al. Poly(lactic acid) (PLA) as tissue engineering scaffold[J]. Journal of Functional Polymers, 2001,14(4):488-492.
- [11] 唐通鸣,陆燕,聂富强,等. 环境友好型 3D 打印材料聚乳酸的制备及性能[J]. 合成树脂及塑料, 2015,32(6):21-23.
Tang Tongming, Lu Yan, Nie Fuqiang, et al. Preparation and properties of PLA for environment-friendly 3D printing material[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2015,32(6):21-23.
- [12] 李志杰,李倩倩. 聚乳酸包装材料合成研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010(2):52-56.
Li Zhijie, Li Qianqian. Research on synthesis of polylactic acid packaging material[J]. China Printing and Packaging Study, 2010(2):52-56.
- [13] 钮金芬,姚秉华,闫焱. 生物降解塑料聚乳酸研究进展[J]. 工程塑料应用, 2010,38(4):89-92.
Niu Jinfen, Yao Binghua, Yan Ye. The research progress of biodegradable plastics polylactic acid[J]. Engineering Plastics Application, 2010,38(4):89-92.
- [14] 姚军燕,杨青芳,马强. 生物高分子材料聚乳酸的改性研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2004,20(4):28-32.
Yao Junyan, Yang Qingfang, Ma Qiang. Recent researches of biodegradable poly(lactic acid):Plasticization, copolymerization, blend and composite[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2004,20(4):28-32.

- 南京:南京理工大学,2015.
- Chen Dong. Study on the preparation and properties of polymer-based composites reinforced by graphene materials[D]. Nanjing University of Science & Technology,2015.
- [4] 林逸凡. 氧化石墨烯改性/复合材料性能研究 [D]. 镇江:江苏科技大学,2015.
- Lin Yifan. Modification of graphene oxide and preparation and properties of modified graphene oxide/epoxy resin composites[D]. Zhenjiang:Jiangsu University of Science and Technology,2015.
- [5] 叶国锐,晏义伍,曹海琳. 氧化石墨烯改性玄武岩纤维及其增强环氧树脂复合材料性能 [J]. 复合材料学报,2014,31(6):1402-1408.
- Ye Guorui, Yan Yiwu, Cao Hailin. Basalt fiber modified with graphene oxide and properties of its reinforced epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2014,31(6):1402-1408.
- [6] 张竞,王洪亮,叶瑞. 水热法氧化石墨烯改性环氧树脂的制备与性能 [J]. 高分子材料科学与工程,2015(6):167-171.
- Zhang Jing, Wang Hongliang, Ye Rui. Preparation and properties of hydrothermal graphene oxide modified epoxy resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2015(6):167-171.
- [7] 周宏,朴明昕,李芹,等. 氧化石墨烯纳米片/环氧树脂复合材料的制备与性能 [J]. 复合材料学报,2015,32(5):1309-1315.
- Zhou Hong, Pu Mingxin, Li Qin, et al. Preparation and properties of graphene oxide nanosheets/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(5):1309-1315.
- [8] 王玉,高延敏,韩莲,等. 偶联剂改性氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的研究 [J]. 现代塑料加工应用,2015(5):44-48.
- Wang Yu, Gao Yanming, Han Lian, et al. Study on coupling agent-modified graphene oxide/epoxy resin composites[J]. Modern Plastics Processing and Applications,2015(5):44-48.
- [9] 谢卫刚,赵东林,景磊,等. 石墨烯/环氧树脂复合材料的制备与力学性能 [J]. 高分子材料科学与工程,2012(9):129-132.
- Xie Weigang, Zhao Dongling, Jing Lei, et al. Graphene/epoxy preparation and mechanical properties of composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2012(9):129-132.
- [10] 唐功庆. 环氧树脂/石墨烯功能纳米复合材料制备及其性能研究 [D]. 北京:北京化工大学,2014.
- Tang Gongqing. Function and properties of epoxy/graphene functional nano composites[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2014.
- [11] 王中锋,张鹏可,杨素青,等. 浇铸成形环氧树脂基复合材料板的制备技术 [J]. 河南科学,2015,33(6):924-928.
- Wang Zhongfeng, Zhang Pengke, Yang Suqing, et al. Preparative Technique of epoxy resin matrix composite panel by casting[J]. Henan Science,2015,33(6):924-928.
- [12] 徐淑权,蔡建,秦旭锋,等. 液晶环氧树脂增韧改性E-51树脂体系性能研究 [J]. 包装工程,2016,37(5):99-102.
- Xu Shuquan, Cai Jian, Qin Xufeng, et al. Performance of resin system of E-51 toughened by liquid-crystalline epoxy resin[J]. Packaging Engineering,2016,37(5):99-102.
-
- (上接第35页)
- [15] 高翠丽,夏延致,纪全,等. 聚乳酸的改性研究 [J]. 材料导报,2006,20(s1):372-374.
- Gao Cuili, Xia Yanzhi, Ji Quan, et al. Research of poly(lactic acid) modification[J]. Materials Review,2006,20(s1):372-374.
- [16] 李雅明,卢伟,杨钢,等. 聚乳酸的改性研究及应用 [J]. 胶体与聚合物,2009,27(1):45-47.
- Li Yaming, Lu Wei, Yang Gang, et al. Modification and apply of biodegradable polyester[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer,2009,27(1):45-47.
- [17] 甘学辉,马晓建,刘强,等. 基于 Polyflow 十字形纤维挤出成形过程的模拟计算 [J]. 纺织学报,2011,32(7):132-136.
- Gan Xuehui, Ma Xiaojian, Liu Qiang, et al. Numerical simulation research of extrusion-forming process of cross fibers based on Polyflow[J]. Journal of Textile Research,2011,32(7):132-136.
- [18] 王燕,高林. 缓释型无机抗菌材料的研究与应用 [J]. 化工中间体,2009,32(4):13-17.
- Wang Yan, Gao Lin. The research and applications of the sustained-release type inorganic antibacterial agents[J]. Chemical Intermediate,2009,32(4):13-17.
- [19] 刘淑强,戴晋明,贾虎生,等. 纺长丝用聚乳酸切片的干燥工艺 [J]. 纺织学报,2012,33(7):21-25.
- Liu Shuqiang, Dai Jinming, Jia Husheng. Drying process of polylactic acid chip for spinning filaments[J]. Journal of Textile Research,2012,33(7):21-25.
- [20] 邢彦军,宋阳,吉友美,等. 银系抗菌纺织品的研究进展 [J]. 纺织学报,2008,29(4):12-13.
- Xing Yanjun, Song Yang, Ji Youmei, et al. Advances in antimicrobial finishing for textiles based on silver[J]. Journal of Textile Research,2008,29(4):12-13.