

# 熔体静电纺丝研究进展

王肖娜,李 莘,王 宏,徐 阳,魏取福

(江南大学 生态纺织教育部重点实验室,无锡 214122)

**摘要:**静电纺丝法是制备超细/纳米纤维的一种有效方法。相对于研究已经较为深入广泛的溶液电纺,熔体电纺还处于研究的初级阶段。但其原料适用性广、无毒无污染及产品转化率高等特点,使其在过滤、生物医药等领域有着广阔的应用前景。同时,熔体电纺也存在装置较复杂、纤维直径较粗等缺陷。本文介绍了目前熔体电纺的各典型装置,总结了用于熔体电纺的聚合物种类、实验工艺,比较了各种聚合物纺丝过程中的参数对纤维物化性质的影响,探讨了熔体电纺纤维的应用,并对其发展方向进行了预测和展望。

**关键词:**熔体电纺;装置;聚合物;纤维物化性质;应用

## 引言

静电纺丝是指聚合物溶液或熔体在高压电场中拉伸成纤的过程。自 1902 年 Cooley 在其申请的专利<sup>[1]</sup>中阐明溶液的静电纺丝技术以来,已经 100 多年了。溶液电纺具有过程操作简单、易于控制等特点,且在适当的条件下可制备直径为几十纳米的纤维,因此备受关注,研究广泛。而熔体电纺虽然在 1936 年 Charles Norton 等的专利中就已提出<sup>[2]</sup>,但直到 1981 年才有相关的研究论文出现。Larrondo 和 Manley 发表的三篇系列论文中的第一篇以聚丙烯(PP)和聚乙烯(PE)为原料,探究了熔体电纺的可能性,对比了溶液电纺和熔体电纺的临界电压,并对射流成丝过程进行了摄像记录<sup>[3]</sup>。此后对熔体电纺的研究依然是持续的空白。21 世纪初,才真正掀起了熔体电纺的研究高潮。熔体电纺过程无毒无污染,克服了溶液电纺中溶剂残留和聚集的问题,可以弥补溶液电纺在某些对卫生、安全要求较高的领域如组织工程的应用缺陷。可能是受近年来生物工程研究热潮的推动,国内外学者都对熔体电纺展开了逐渐深入的研究。从 2005 年到 2012 年的研究论文达 60 余篇,并陆续有专利的申请。

## 1 熔体电纺装置

熔体电纺的装置目前均由各个研究机构自行搭建,尚无公认的成熟设备。其必要的组成部分是加热部件、高压电源及接收部件;表 1 中列出了目前报道的主要的熔体电纺装置及其特点。

下面就给料、加热、接收三个部件分别进行总结和介绍。

### 1.1 给料部件

激光熔体电纺装置单位时间的给料量由原料棒直径/原料片厚度和给料速度共同决定。非激光加热的装置,大多采用单孔喷丝头,控制熔体流速的方法多样:竖直放置的装置,有些是单靠熔体的重力将其挤出喷丝头<sup>[23]</sup>,有些是依靠熔体重力和活塞压力<sup>[17]</sup>,另一些则配备有可定量控制熔体流速的压力泵部件<sup>[7~11]</sup>;邓荣坚等将实验装置倾斜放置,熔体流速由柱塞与料筒的倾斜度控制<sup>[28]</sup>;水平放置的装置,均可定量控制熔体流速。平稳、定量的控制熔体流量是调控纤维直径及其分布均匀性的重要途径,因此是今后熔体电纺装置发展的必然要求。

溶液电纺中有无针头的纺丝装置,如纳米蜘蛛<sup>[29]</sup>。熔体电纺中也出现了类似的装置,图 1 所示为

收稿:2013-01-10;修回:2013-03-17;

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)资助课题(2012AA030313);江苏省科技支撑计划(工业)(SBE201201094);

作者简介:王肖娜(1988—),女,硕士研究生,主要从事熔体静电纺丝制备超细纤维膜的研究;

\* 通讯联系人,E-mail: zh3212@vip.sina.com.

表 1 熔体电纺装置分布图及特点

Table 1 Distribution and characteristics of melt-electrospinning devices

单位	首次报道	加热方式	电源类型	加压方式	纺丝方向	熔体控速	接收装置	参考文献
麦吉尔大学	1981	电	正	正	竖直	否	静/动	3
华盛顿大学	2005	电+水/油浴	正	反	竖直	否	动	5
	2006	电	正	正	竖直	否	静	6
康奈尔大学	2006	—	正	正	水平	可	静	7
南安普顿大学	2006	热风/水	正/负	正	水平/竖直	可	静	8
天津大学	2006	—	正	正	水平	可	动	9
亚琛工业大学	2006	—	负	反	竖直	可	静	10
福井大学	2007	激光	正/正+负	正	竖直	可	静/动	11
弗吉尼亚理工学院	2008	电	正	反	竖直	否	静	12
中国科学院	2008	电	正	反	竖直	可	静	13
信州大学	2008	激光	正	正	水平	可	静	14
北京化工大学	2009	电	正	反	倾斜	否	静	15
	2012	电	正	反	竖直	可	静	16
伊斯兰阿萨德大学	2009	油浴	正	正	竖直	否	静	17
韩国海洋大学	2009	电	正	正	竖直	否	静	18
山形大学	2009	电	正	反	竖直	否	静	19
同济大学	2010	电	正	反	竖直	否	静	20
昆士兰理工大学	2010	水浴	正	正	竖直	可	静	21
忠南国立大学	2010	油浴	正	正	水平	可	动	22
江南大学	2011	电	正/负	正/反	竖直	否	静/动	23
北京服装学院	2012	激光	正	正	竖直	可	动	24
韩京大学	2012	油浴	正	正	竖直	可	静	25
皇家墨尔本理工	2012	电	负	反	水平	可	静	26
迪肯大学	2012	—	正	反	竖直	否	静	27

\* 表 1 中的“加压方式”一栏中，“正”意为高压电源的正极加在喷丝头上，负极接在接收部件上并接地，“负”则与之相反。后文中均采用“正纺”、“反纺”来描述这两种加压方式。

Fang 等所使用的熔体电纺装置，整个装置置于氩气中，一个旋转的金属盘置于熔体槽中作为射流发生器，其上方的金属板作为电压正极。

刘勇等将喷丝头设计成了伞状<sup>[16]</sup>。2010 年非织造布创新大会上，Thomas Gries 等在文章中展示了一个拥有 64 个喷嘴的熔体静电纺丝装置，如图 2 所示。

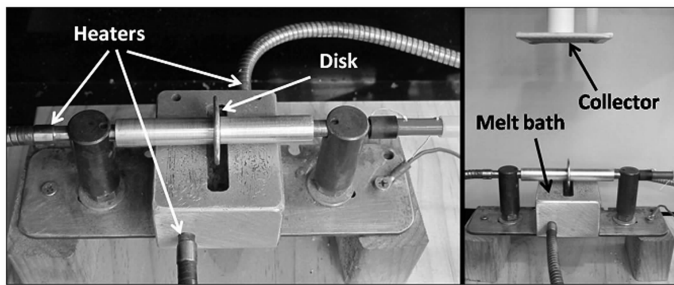


图 1 碟状熔体电纺装置图<sup>[27]</sup>

Figure 1 Photos of the disc melt-electrospinning setup

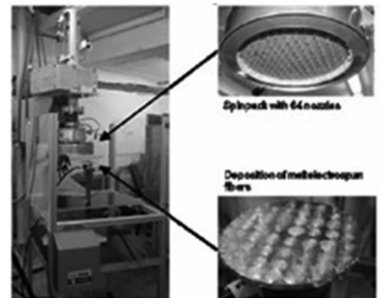


图 2 多针头熔体电纺装置<sup>[30]</sup>

Figure 2 Multi-jet melt electrospinning setup at ITA

## 1.2 加热部件

如表 1 所示，熔体电纺装置采取的加热方式有激光加热、电加热、流体加热、热风加热等。激光加热又可分为点状激光和线状激光，如图 3 所示。线状激光加热片状喂料可同时形成多个泰勒锥，进而提高纺丝的效率<sup>[31]</sup>。电加热是最普遍的加热方式，作者所在实验室搭建的熔体电纺装置采用的就是电加热的方式，如图 4 所示，使用电热圈加热，利用传感器和温控仪对熔体温度实现实时有效调控。Mitchell 等搭建的装置<sup>[5]</sup>采用流体加热的方法，根据聚合物熔点的不同分别采用水浴或油浴。热风加热的方式目前

只有 Dalton 等尝试过<sup>[8]</sup>,当用于实验的聚合物温度较低时,采用循环水加热,如图 5 中(A)所示;而当聚合物熔点较高时,则采用图 5 中(B)所示的热风加热方式。

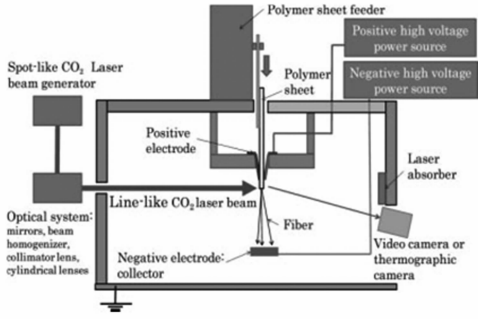


图 3 激光熔体电纺装置(线状激光)<sup>[31]</sup>

Figure 3 Line laser melt electrospinning system

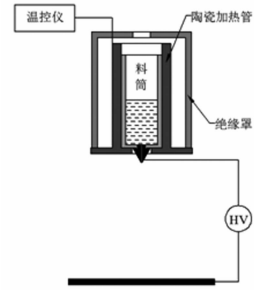


图 4 电加热熔体电纺装置示意图<sup>[23]</sup>

Figure 4 Electrical heating melt electrospinning device

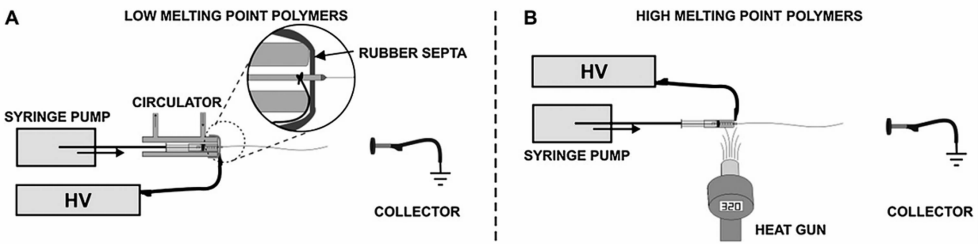


图 5 循环液体加热和热风加热熔体电纺装置示意图<sup>[32]</sup>

Figure 5 Heating configurations used for melt electrospinning for (A) low melting point and (B) high melting point polymers

以上各加热方式各有优缺点:激光加热装置加热点集中,加热时间短,且与高压不会互相影响,尤其适合热敏性聚合物<sup>[33]</sup>,但不能精确控温;电加热和流体加热可通过温控系统精确调控熔体温度,但加热时间长,可能引起聚合物降解;而热风加热可能会干扰熔体射流的运动和沉积。

值得注意的是,聚合物从熔融到形成射流并最终沉积到接收装置上的整个过程,都受到温度的重要影响。Lee 等搭建了一个可以分四段控温的熔体静电纺装置,将料筒、针头、控制室及接收板四处的温度分别控制<sup>[7]</sup>;Rajabinejad 等采用的装置可分别控制喷丝口的温度与射流成丝路径上的温度<sup>[17]</sup>;Kong 等则将成丝路径分成两段进行控制<sup>[18]</sup>;田胜等只对射流路径的上半部分进行了额外的加热<sup>[52]</sup>;而 Malakhov 等将料管分成四段进行加热<sup>[34]</sup>。

另外,Eduard 等在装置上添加了热风辅助装置,如图 7 所示。实验结果表明,气流本身对射流的牵伸以及气流提供的热量使纤维直径显著降低。

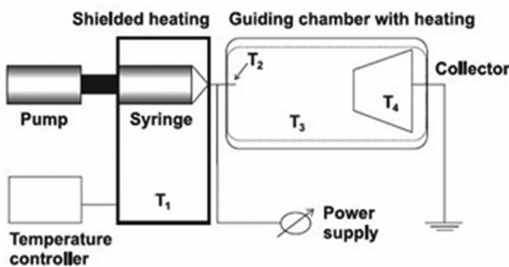


图 6 分段控温熔体静电纺丝装置示意图<sup>[7]</sup>

Figure 6 Four-section heating melt electrospinning device

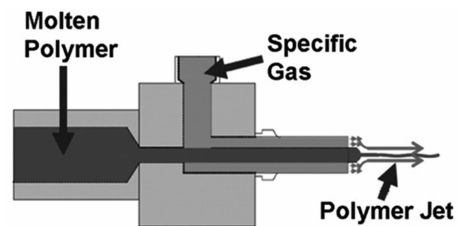


图 7 热风辅助熔体电纺装置<sup>[35]</sup>

Figure 7 Gas-assisted melt electrospinning nozzle

### 1.3 接收部件

接收部件对纤维分布及纤维膜形态有重要的影响。最常见的是平板/网(方形或圆形)接收和滚筒接收,其最大的区别在于纤维的排列,前者大都处于杂乱状态,而后者由于转动的滚筒对纤维沉积沿圆周方向有一定的诱导作用,会得到纤维排列较为规整的纤维膜。图 8 所示是笔者课题组李莘等在电压 21kV、接收距离 3cm、熔体温度 190℃的工艺条件下分别采用滚筒和平板接收时得到的 PP 纤维膜;实验中还发现,在其它工艺参数一致的情况下,滚筒收集的纤维直径比平板收集的要细,且滚筒转速越高,直径越小<sup>[36]</sup>。

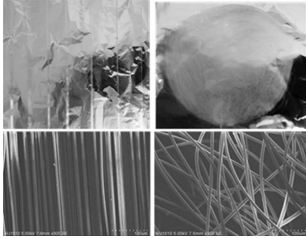


图 8 滚筒/平板收集纤维膜及其 SEM 图<sup>[36]</sup>

Figure 8 Fibers got from a roller/plate receiver

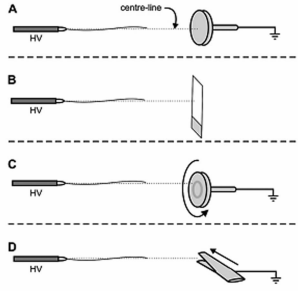


图 9 接收部件示意图<sup>[32]</sup>

Figure 9 Collection configurations

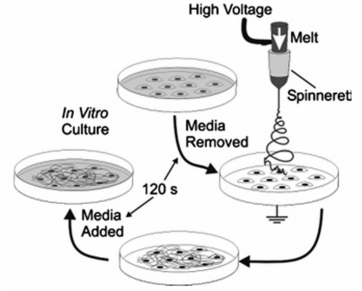


图 10 培养皿接收器<sup>[10][36]</sup>

Figure 10 Petri dish collector

Ogata 的研究小组用竖直放置的旋转圆盘作为接收部件,在转盘转速 1m/s 的情况下制得了部分直径在  $1\mu\text{m}$  以下的聚乳酸(PLA)纤维<sup>[11]</sup>。Dalton 采用的接收方式则更为新颖,如图 9 所示,扫描电镜样品台(图 A/C)、显微镜用载玻片(图 B)及一个具有锥形间距的二元接收器(图 D)都被用来进行纤维的接收;其中 D 装置收集的纤维,排列具一定规整性,且平均直径是目前报道中最细的,仅  $0.17\sim 0.37\mu\text{m}$ 。Dalton 采用的另一种很别致的接收方式是将熔体电纺纤维直接沉积在培养有纤维母细胞的培养皿中,作为细胞生长的支架,如图 10 所示,熔体电纺进行之前迅速将培养基及细胞移出培养皿,用培养皿接收纤维约 60s 后,再将培养基迅速移入培养皿,这个过程大约 120s 的时间,其间并未使细胞暴露于电场中。实验发现,整个纺丝过程中细胞保持活性,且纺丝六天以后,纤维母细胞脱离基板并粘附在纤维上。作者指出,非水溶性的聚合物进行熔体电纺时都可以尝试液相接收部件。还有报道说,采用液相接收装置可以进一步减小纤维的直径并提高纤维束的拉伸强度与模量<sup>[20]</sup>。

### 1.4 同轴熔体静电纺丝装置

同轴熔体静电纺丝装置的报道最早是在 2006 年,McCann 等采用了熔点较低的烷烃类作为芯材料,熔融后经侧导管通向溶液口进行同轴纺,通过调整熔体和溶液的流速来调整其各自在纤维中的含量<sup>[6]</sup>。之后,李凤玉等采取了将内外纺丝液同时加热的方法,以相变材料为芯聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为壳制备了具有良好形态的芯壳结构纤维<sup>[13]</sup>。2012 年,Cong 等搭建的装置则是利用一根导管将聚偏氟乙烯(PVDF)的溶液导入熔体的聚乙二醇(PEG)料筒底部,实现对 PEG 的封装<sup>[25]</sup>。

今后熔体电纺装置的发展趋势,除了进一步的集成化与多样化以外,也会更加注重对环境因素如温湿度、空气流动的控制;为了提高产率,必将向多喷头或者无喷头方向发展。

## 2 纺丝聚合物

理论上,只要分解温度大于熔点的聚合物均可进行熔体电纺。表 2 中列出了目前熔体电纺采用的聚合物、纺丝条件及得到纤维的平均直径。

由表 2 可知,目前熔体电纺尝试最多的是常规的熔体纺纤维如 PP 和 PET,因具有生物相容性和可降解性而有望应用于生物医学的 PLA,用于同轴熔体电纺以实现封装的相变材料等。同时,也有一部分研究者采用了共混聚合物或嵌段共聚物来探究混纺的特点。目前国内外的研究大多是在探索各种单一或共混聚合物的成丝能力和特点,而对成丝过程内在机理的研究还比较少。聚合物性质对纤维性能的影响

表 2 熔体静电纺丝聚合物列表

Table 2 Polymer list for melt-electrospinning

聚合物	加压方式	电压/kV	纺丝距离/mm	熔体温度/℃	接收装置	平均直径/ $\mu\text{m}$	参考文献
PCL	正	5~25	12~20	—	静	3~12	24
PMMA	正	15~25	3, 9	200~220	静	4~34	20
PE	正	10~23	10~30	200~220	静/动	30~400	3
POPE	反	30	—	200	静	4.5~8.5	12
EVOH	正	40	100	200	静	0.8~3.0	31
EVAL	正	15	20	—	静	0.74~2.84	37
LDPE	反	30~60	100~180	315~355	静	5~35	15
PLA	正	10~30	80~180	—	静	5~10	33
	正	16~41	10~50	—	动	0.8~2/0.7~3	11
	正	20	90/100	200	静	0.18/0.8	35/38
	正	12~15	70~100	185~195	静	4.8~12.6	23
	正	15~25	100	200	静	9.5~27.5	39
	反	60	110	210	静	7.65	16
	反	55.6	120~160	200~220	静	—	40
PLGA	正	17.5	80	210	动	14.6~28.0	22
P(LLA/CL)	正	20	50	—	静	1~2	41
PLA+EVOH	正	15~50	50~200	—	静	0.4~2 <sup>[a]</sup>	42
Polyalirite	正	18~20	25	—	静/动	2.58	43
PET	正	10~25	50	—	静	4~102	14
	正	25	3~9	245~255	静	61~93nm	17
	正	18~20	25	—	静/动	1.5~4	43
	正	16	100	270	静	5	44
PET+SiO <sub>2</sub>	正	5~30	160	—	静	0.5~7.0	45
PP	正	6~15	80	230	静	2~20	46
	反	40~60	95~165	210~250	静	4.5~41.7	47
	正	20	50	—	静	38	41
	正	-20	40	320/270	静	0.65~37.3	32
	正	10~20	50~70	230	静	>1	7
	正	10~23	10~30	220~240	静/动	30~150	3
	反	12	20	180/200	静	3~40	19
	反	50~90	110~160	280~360	静	0.4~8.7	27
	反	12~75	20~50	200	静	3.6~466.2	48
	正	35	100~180	330~410	静	20	18
	反	48	120~150	200	静	0.31~0.78	26
PP+PE	正	25	20	170	动	21.7~38.9	9
PU	反	25~35	—	225~243	静	5~18	5
	反	30	130	220~240	静	11.2	49
PA 6	正	15~20	50	—	静	1~4	14
	反	130	450	345*	动	18	34
	正	20~28	100	245~300	静	1~10	50
	反	130	450	345	动	0.5~6	34
PA 6/12	正	40	100	230	静	0.73~2.80	31
PEG- <i>b</i> -PCL	正	20	300	60~90	静	0.3~50	8
PCL+PEG- <i>b</i> -PCL	正	-20	100	90	静	1.7~2.3/0.17~0.37	32
	正	10~23	10~100	75	静	0.67~1.16	51
	正	4~12	20~90	90	静	1.8~33	21
PCL+PEO- <i>b</i> -PCL	正	-25	5~15	85	静	1.2~2.0	10
PVP+烷烃	反	—	—	16~68	静	1~1.5	6
PLLA&-EVOH	正	20~40	50~90	—	静	0.35~5.00	52
CBT&-PMMA	反	20~30	150~250	45	静	0.5~2.0	13
PEG&-EVOH	正	12	170	70	静	0.64~0.91	25

注:PCL-聚己内酯,POPE-1-十六酰-2-油酰-sn-丙三醇-3-磷酸乙基醇磷脂,EVOH ,EVAL-乙烯-乙 烯醇共聚物,LDPE-低密度聚乙烯,PLLA-左旋聚乳酸,PLGA-右旋聚乳酸,PET-聚对苯二甲酸乙二醇酯, SiO<sub>2</sub>-二氧化硅,PU-聚氨酯,PA-聚酰胺,PEG-*b*-PCL-聚乙二醇-聚己内酯嵌段共聚物,PEO-*b*-PCL-聚环氧乙烷-聚己内酯嵌段共聚物,PVP-聚乙 烯吡咯烷酮,CBT-结晶紫内酯-双酚 A-肉豆蔻酸混合物; [a] 文中未提供准确的直径数据,此数据据文中图片估算得到。

响将在本文中下一节进行讨论。

### 3 熔体电纺纤维的物化性质

静电纺丝过程是由聚合物的材料参量和实验过程操作参量共同决定的。

#### 3.1 聚合物性质对纤维物化性质的影响

影响聚合物静电纺丝能力的两个最重要的性质是其粘弹性和电导性<sup>[53]</sup>。一旦这两个性质受到影响,必然会影响到纤维的物化性质。

当熔体受力被拉伸时,必须有足够的粘度来与这个拉伸力相平衡才不会使射流断裂;但若粘度过大,则不利于熔体在电场中被牵伸变细。一般来说,聚合物的粘度随温度的升高或分子量的降低而减小。熔体温度对纤维的直径、形貌和热学性质都有显著的影响,其内在机理即关系到熔体粘度的改变,已有数个研究小组在实验中专门测定了熔体温度与粘度之间的关系曲线<sup>[5,23]</sup>。另一种有效的方法是在聚合物中混入可降低其粘度的添加剂<sup>[20,32,34]</sup>,使实验在较低温度下顺利进行。Dalton等<sup>[8]</sup>合成了相对分子质量7000~26900g/mol的PEG-*b*-PCL进行熔体电纺时发现,使用7000的共聚物实验时只得到极少数纤维状的熔滴,而采用最高分子量的共聚物时得到的大部分是形状完好的纤维,仅有少部分纤维出现熔结现象。若升高熔体温度,则会有颗粒产生,升至一定温度后,只发生静电喷射,不能成丝。Hunley等<sup>[12]</sup>改变聚乳酸粘度的方法是在其分子结构中引入氢键,实验发现氢键的引入对聚乳酸粘度的影响不是单一的,具有突变性。Julia等<sup>[54]</sup>选用两种自组装小分子量组分——1,3,5-环己烷和1,3,5-三氨基苯,探索其通过熔体电纺成纤的可行性,实验表明这两种物质在向列相甚至光学各向同性相时都能进行熔体电纺,但其它液晶相由于粘度太大无法进行纺丝;而纺丝温度的升高使分子间的氢键作用减弱,形成了球状的液滴,而非纤维状。Nayak等<sup>[26]</sup>在PP中加入油酸钠/氯化钠,测试证明聚合物的导电性增强,实验观察发现射流的鞭动变得更加剧烈,最后得到纤维的平均直径比纯PP纺丝的小,且直径分布变窄。经比较,加入氯化钠比加入油酸钠更有效,这是由于前者的离子更小的缘故。加入以上添加剂也使得聚丙烯纤维的疏水性大大降低了。

聚合物的分子结构也会对纺丝结果产生影响。Jason等<sup>[48]</sup>在实验中发现无规立构的聚丙烯熔体电纺纤维的直径比全同立构聚丙烯的要粗,因为后者即使在较低的分子量下也可以实现大分子的规则排列,从而有利于熔体射流被牵伸拉细。Kadomae等<sup>[19]</sup>采用无规和全同立构聚丙烯的混合物进行纺丝,发现聚合物中全同立构聚丙烯的比例越大,纤维的直径就越细。

在熔体电纺中,一个不得不考虑的问题是聚合物的降解。刘勇等对减轻降解聚乳酸的方法进行了探索,发现最有效的方法是添加抗氧化剂<sup>[16]</sup>;Fang等<sup>[27]</sup>在PP中添加表面活性剂DTAB后发现不仅PP的降解被延缓了,且纤维的直径也减小了,添加3%时纤维平均直径最细,为 $0.40 \pm 0.29 \mu\text{m}$ ,一个原因是DTAB可以减小聚合物分子链之间的缠结,另一个是其可以为熔体提供额外的电荷。另外,熔体温度与纺丝距离对聚乳酸的降解也有显著作用<sup>[40]</sup>。

#### 3.2 工艺参数对纤维物化性质的影响

优化工艺参数是减小熔体电纺纤维直径的有效途径之一。而不同的装置和纺丝方法主要的工艺参数和工艺参数的可调节范围存在着较大的差别。

首先,静电电压的加压方式不同,临界电压及电压范围有很大区别;反纺的临界电压一般比正纺大很多;由表2,目前正纺方式下加压范围为4~41kV,而反纺中这个范围为12~130kV。电压在调控纤维直径方面的作用并不统一,在各自选定的电压范围内,大部分报道中纤维的直径随电压升高而减小<sup>[20,42,51]</sup>,有的则没有明显变化<sup>[24,27]</sup>,甚至有随电压升高纤维直径增大<sup>[14]</sup>或先减小再增大<sup>[5]</sup>的情况。纺丝距离对纤维直径的影响同样具有不确定性。

Dalton指出,与溶液纺最佳工艺参数相比,熔体纺的工艺参数中喂料速度小一个数量级,熔体粘度大一个数量级<sup>[10]</sup>。熔体流速对纤维的质量、形貌和直径都有重要影响。熔体流速越小,纤维直径越细,目前流速最小的是Dalton小组采用的 $5 \mu\text{L}/\text{h}$ <sup>[51]</sup>。图11为该研究小组在不同速率下纺丝得到纤维的扫描

电镜图<sup>[8]</sup>。可以看到,当速率过低时,成丝不连续,有很多颗粒出现,而当速率过高时,熔体不仅不能得到充分牵伸,而且在到达接收装置时未能完全冷却,出现了图(d)所显示的熔结性的条带状聚合物。

熔体温度升高可降低聚合物的粘度,有利于射流牵伸;但在竖直放置的装置中,熔体温度往往也在一定程度上决定了熔体流速;故温度过高或过低都会导致纤维直径变粗<sup>[23]</sup>。同时,熔体温度过高也可能会引起聚合物的降解。在激光熔体电纺装置中,熔体温度由激光电流或激光输出功率决定。

一些研究小组由于采用的装置本身的特点,有一些独特的工艺参数。Mitchell 等搭建的装置中,接收板在正负电极之间,接收板性质的变化会显著影响电场分布的强度和方向,实验结果证明众多工艺参数中,接收板的介电常数和面积是对纤维直径影响最显著的两个参数,而不是电压或熔体温度<sup>[5]</sup>。而图 1 中的无针头熔体电纺装置中,作为接收装置的圆盘的材质对纤维的直径和形貌有显著的影响:使用铁盘时得到的纤维表面粗糙,有珠结,平均直径  $8.69\mu\text{m}$ ;而使用铝盘时得到的纤维表面光滑,珠结很少,平均直径  $3.31\mu\text{m}$ 。为了探求原因,文中采用了红外热成像仪,测量了两种材质圆盘同样温度时的温度分布,发现有很大的区别<sup>[27]</sup>。

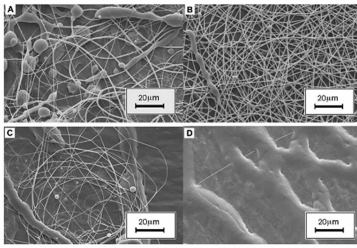


图 11 不同速率行下熔体电纺 PEG119-*b*-PCL189 纤维 SEM 图

(a) 0.02mL/h, (b) 0.05mL/h, (c) 0.1mL/h and  
(d) 0.5mL/h<sup>[8]</sup>

Figure 11 Representative images of electrospun  
PEG119-*b*-PCL189

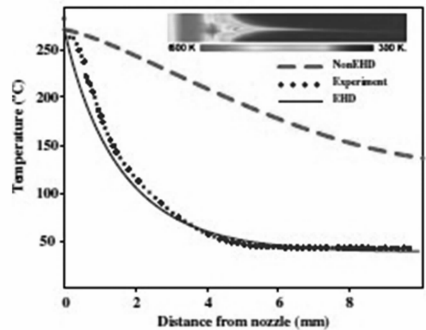


图 12 尼龙 6 熔体射流温度实际分布与模拟<sup>[55]</sup>

Figure 12 Experimental temperature profiles of  
N6 polymer compared to model predictions

熔体射流在到达接收器时,若还处于熔体状态,则纤维之间很可能会出现粘结,这对纤维膜的形状稳定性及强力都有益处<sup>[23,24,32]</sup>。而对于射流冷却速率的控制,需借助于对熔体温度及射流空间路径周围温度的控制来完成<sup>[18,52]</sup>。另外, Malakho 等<sup>[34]</sup>指出环境湿度对实验的影响也很大,应该控制在尽量低的状态。

### 3.3 后处理对纤维物化性质的影响

对熔体电纺纤维的后处理主要是为了改善纤维膜的热学和力学性能。最常见的后处理方法是退火处理,即将纤维膜曝露于高温一段时间,然后再慢慢冷却。

熔体电纺中,由于熔体射流从喷丝口射出后快速的冷却,得到的纤维大多处于无定形状态,结晶度很低,而热处理可以显著的提高纤维的结晶度<sup>[26,38,42]</sup>。Daehwan 等<sup>[55]</sup>对比了溶液与熔体电纺尼龙 6 纤维的结晶性,发现熔体电纺纤维主要呈现亚稳定性的  $\gamma$  结晶,分子取向很低;而溶液电纺纤维既有  $\alpha$  结晶也有  $\gamma$  结晶,分子取向较高一些;经高温热处理后,熔体纺纤维的  $\gamma$  结晶很容易就转变成热力学上更稳定的  $\alpha$  结晶,而溶液纺中的结晶却具有较好的热学稳定性。Cho 利用红外热成像仪记录了射流的温度分布,如图 12 所示,在从喷丝口射出约仅 6mm 时射流温度已经下降至环境温度,如此快的降温速度无法用自然对流或辐射来解释。Cho 于是尝试用带电流体动力学(EHD)来解释这一现象:由于喷丝头加上高压静电,其周围的空气被离子化后在电场的作用下被加速形成离子风,导致了热传递的效率提高了约一个数量级。在常规热传递关系式中附加由于 EHD 引起的热传递后得出的模拟曲线与试实验所得曲线吻合度很好。

熔体纺丝得到的纤维因直径较粗、表面形貌较好,而被普遍认为具有较好的力学性能。但作者在实

验中发现很多情况下熔体电纺纤维膜不够贴伏、致密,采用热压的方法可以在一定程度上提高纤维膜的机械性能。

### 3.4 共混纺丝

多种聚合物共混或者聚合物与纳米颗粒共混进行纺丝,可以在某些方面改进纤维的性质,如 PCL 和 PEG-*b*-PCL 混纺得到的纤维直径比 PCL 纯纺的细<sup>[21]</sup>,故熔体电纺中对混纺的研究逐渐增多。

袁晓燕等<sup>[9]</sup>将 PE 与 PP 以液体石蜡为稀释剂在加热和高速搅拌下按一定比例共混,电纺后纤维以丙酮洗除液体石蜡并干燥后得到的最终纤维样品表面均较粗糙,这一方面是 PP 和 PE 不相容所导致的相分离,另一方面也受稀释剂的影响;实验同时发现,提高接收速度有助于减轻纤维粗糙程度,也可使纤维直径下降;而纤维的结晶程度随 PE/PP 质量比的不同而发生了较大的变化。Ogata 等<sup>[37]</sup>在熔体电纺实验中不断改变聚乙烯醇共聚物中乙烯的含量,发现纤维直径随乙烯含量增大而变粗。李秀艳等<sup>[45]</sup>利用原位聚合的方法制成了 PET/SiO<sub>2</sub> 复合纤维棒,进行激光熔体电纺,得到的纤维经 EDS 表征证明了 SiO<sub>2</sub> 的存在,且纤维的热稳定性没有受到明显的影响。Shimada 研究小组<sup>[42]</sup>通过加捻的方法制造了 PLA/EVOH 混合纤维束,如图 13 所示,PLA 与 EVOH 的体积比分别为(a)PLA/EVOH=3/7,(b)PLA/EVOH=5/5,(c)PLA/EVOH=7/3;通过对工艺参数的优化,制备了直径 400nm 左右的纤维;为探索纤维的成分,用各自的溶剂将 PLA 或 EVOH 溶解出来,发现制备的纤维有三种情况——只含 PLA、只含 EVOH,以及两种聚合物都含;实验还证明,EVOH 组分的存在有效地降低了纤维的直径<sup>[42]</sup>。该研究小组还曾尝试过将 EVOH 包覆在 PLLA 外面制成棒状原料进行纺丝,实验结果证明 EVOH 的存在使纤维的直径显著减小,且在纺丝过程中有 PLLA 从原料棒中心向纤维表面转移的现象<sup>[52]</sup>。

## 4 射流运动规律与数学模型

熔体电纺最终的发展方向必然是要实现纤维物化性质的有效控制。要达到这一目标不能只靠实验工艺研究,深入研究熔体在电场中的带电和运动机理,并最终得到一个可广泛适用的数学模型,是最根本的控制方法。

### 4.1 射流运动观察

无论是溶液还是熔体,在静电纺丝过程中都要先形成液滴/熔滴,在电场作用下逐渐拉成锥状并最终形成射流,射流经过一段距离的空间运动后沉积在接收器上。不论是正反纺,只有一个泰勒锥或者同时形成许多泰勒锥(如激光电纺片状喂料),从一个锥中只会形成一条射流,而不是如溶液电纺中时有多条射流出现<sup>[10]</sup>。Shimada 等<sup>[31]</sup>在激光熔体电纺中用热成像仪记录了泰勒锥内部的温度变化,发现起伏很大。而对于射流的空间运动,目前观察与记录到的较为普遍的一个规律是射流经历一定长度直线运动后在接近接收器时发生不规则鞭动<sup>[23,32]</sup>。图 14 是笔者采用聚乳酸进行熔体电纺时拍摄下的射流运动的一张典型图,从图中可以清楚的看到射流在空间运动的两个不同阶段。作者在实验中还发现,电压越大,射流下冲的速度越快,直线段运动所占的比例越大。且熔体纺射流的直线段比溶液纺的要长,这与熔体粘度较大有关。Zhou 等指出空间温度对射流鞭动也有重要影响——空间温度在聚合物玻璃化温度以上时射流鞭动剧烈,反之则鞭动较弱<sup>[38]</sup>。

然而,也有研究人员称熔体射流在纺丝过程中并未出现弯曲不稳定现象<sup>[45]</sup>。

利用射流的运动沉积特点,采用不同的接收方法,可以控制纤维的沉积形态,实现用纤维直接进行“书写”<sup>[56]</sup>。如通过控制接收装置的运动速度来调整接收装置与射流的相对速度:当接收装置转速与射流运动速度一致时,形成直线状态的沉积;也可使其小于射流运动速度,使纤维重叠堆砌,形成三维结构。

### 4.2 数学模型

对于熔体射流在电场中的运动模型,Larrondo 在 1981 年第一个开展熔体电纺实验后就进行了相关探索<sup>[57,58]</sup>:测量了实验开始时半球状液滴的变形,并采用硅油为模拟流体,以玻璃微珠为示踪颗粒分析熔体在电场中运动的速度场,得到了射流某一点速度的数学计算公式。Larrondo 通过测量不同电场强度

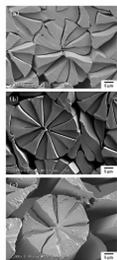


图 13 PLA/EVOH  
纤维束<sup>[42]</sup>  
Figure 13 (a-c) Pie  
wedge fibers

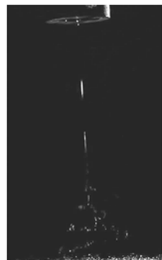


图 14 射流运动  
规律<sup>[23]</sup>  
Figure 14 Melt jetting  
motion

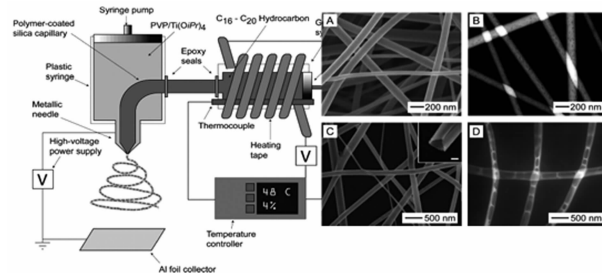


图 15 同轴装置示意图及纤维 SEM、TEM 图<sup>[6]</sup>  
Figure 15 The coaxial setup and fiber SEM, TEM photos

下的点速度,研究了电场强度对速度场的影响,发现熔体速度随电场强度增大而增大;示踪颗粒离喷丝口的轴向距离越远,速度越快;越靠近射流中心,速度越快;且射流自喷丝口射出后有一个“过渡区域”,是由边界条件的突变导致的。

Eduard 等根据能量公式、高斯定律和 Giesekus 模型首先建立了非等温条件下熔体静电纺丝稳定射流段的数学模型,并通过实验对模型进行了验证<sup>[59]</sup>;此后,又将上述模型与 Ziabichi 的 FIC 模型结合,得出了新的数学模型,借以推断纤维微观结构信息,如结晶度和平均直径<sup>[50]</sup>;之后为进一步减小纤维直径,改进了实验装置如图 7 所示,并针对该装置特点建立了一个数学模型来分析热气流对熔体射流的作用效果。

Carroll 等<sup>[60]</sup>对粘弹性射流在电场中被拉伸时的轴对称稳定性进行了分析,建立了一个数学模型来预测轴对称不稳定性出现的临界条件,数学模型和实验都表明,增大射流的粘度到一定的程度,射流的轴对称稳定性会得到急剧提升。刘勇等<sup>[61]</sup>利用耗散粒子动力学模拟了熔体电纺中纤维下落的过程,模拟和实验结果显示,纤维下落速度与电场力紧密相关,分子链长在下落的不同阶段不断变化。

## 5 应用

熔体电纺有许多潜在应用领域,但目前对其应用的研究主要集中在组织工程、过滤防护和储能封装这三大方面。

### 5.1 组织工程

组织工程的支架材料,须满足诸多条件,如纤维直径需跟细胞外基质中的原纤维直径相当,具有一定大小的孔洞,表面的化学性能要做到对细胞很好的吸附并利于细胞的分裂增殖等。熔体电纺在理论上是制造组织工程支架材料的绝佳方法。Dalton 等使用图 10 的接收装置进行了 PEO-*b*-PCL & PCL 的熔体电纺,成功进行了纤维母细胞的培养,并提出了一个新的概念——“试管静电纺”,指出限制“试管静电纺”的主要技术原因是溶剂的毒性和水相条件对纤维间粘结性的要求;同时,采用两亲共聚物将适用于多种药物的引入<sup>[10]</sup>。之后,该研究小组又使用 PEG47-*b*-PCL95 和 PCL 的混合物进行熔体电纺,并将用载玻片收集得到的纤维用以老鼠胚胎纤维母细胞的培养,一定时间在荧光显微镜下观察到纤维母细胞骨架粘附并包裹住了周围的纤维,纤维分布在细胞的四周,呈现出立体构架的形态<sup>[51]</sup>。Karchin 等<sup>[49]</sup>自行合成了聚氨酯,经过净化后进行熔体电纺,以可做同心圆运动的贴有铜条的载玻片为接收器,制得的纤维膜转移到培养皿中,经细胞毒性试验等诸多步骤处理后用于培养胎儿包皮成纤维细胞。Kim 等<sup>[22]</sup>在制备细胞支架的时候,采取了“混合纺丝法”——溶液电纺和熔体电纺同时进行,得到了力学性能与人体皮肤力学性能相似的纳米/微米纤维复合三维支架,用其培养人类表皮角质细胞和纤维母细胞时,细胞在纤维上的附着和扩散速率比对应的微米纤维支架快几倍。Mitchell 等<sup>[5]</sup>搭建了一个熔体电纺系统,来制备纤维直径和纤维间隙均可控的纤维支架,实验得到了纤维直径 5~18 $\mu\text{m}$ (变化率<1.8%)、纤维间隙 4~90 $\mu\text{m}$ (变化率<20.2%)的聚氨酯纤维膜。李秀艳等<sup>[62]</sup>在 PLLA 中掺杂了 *n*HA 纳米颗粒,经熔体纺

丝后  $n$ HA 颗粒在纤维中分散得很均匀,改善了支架材料的亲水性。

鉴于细胞培养需在液相条件下进行,若可控制熔体电纺中纤维之间的自粘结状况,形成具有适度自粘结的形态稳定的三维支架结构,将增强其可应用性。

## 5.2 过滤与防护

熔体电纺制得的超细纤维无溶剂残留,很适合用做过滤或防护材料。为解决防护服防护性与热湿舒适性之间的矛盾, Lee 等<sup>[7]</sup>将熔体电纺纤维网进行了两种处理——层压或与非织造布复合;实验结果表明,层压纤维膜对具有高表面张力的液体具有极佳的屏蔽功能,非织造复合纤维膜对各种表面张力的液体屏蔽率为 90%~100%;两者的透气率和透湿率都有所下降,但下降幅度较小,不会对热湿舒适性影响太大。Zhou 等<sup>[38]</sup>将熔体电纺 PLA 纤维(0.8 $\mu$ m)直接沉积到纤维素滤材上,PLA 纤维跟基底粘附的很好,部分熔结在一起,大幅提升了滤材对亚微米大小的粉尘颗粒的过滤效应。Cho 等<sup>[63]</sup>以聚丙烯为原料,进行了高温下的溶液电纺(140 $^{\circ}$ C~170 $^{\circ}$ C)和熔体电纺,并等重量沉积在聚丙烯非织造布上;结果无论是溶液纺还是熔体纺纤维膜都表现出了超疏水性,比非织造 PP 纤维水接触角大很多,尽管后者拥有更大的孔径;沉积了溶液/熔体电纺纤维的非织造 PP 纤维膜表现了出色的阻隔功能,透湿透气性也在实际应用要求的范围内,不仅可用于防护材料,也有望应用于电池隔膜中;不足之处是电纺 PP 纤维表面吸附化合物的滞留性相对于非织造纤维而言更强。

## 5.3 储能与封装

近年来纺织服装的发展趋势之一就是智能化,譬如要求服装对服用者的体温具有智能调节作用,其实现途径之一就是利用相变材料来实现能量的储藏和释放。由于在能量的储藏和释放过程中会发生相的转换,通常可以用同轴纺的方式将相变材料封装在另一种热学性质稳定的材料中。Jesse 等是最先采用熔体同轴电纺的方法来实现相变材料的封装的,实验装置如图 15 所示。尽管其采用的是熔点很低的十八烷和二十烷,但这一将熔体和溶液结合起来进行静电纺丝的全新尝试为封装提供了一种新的途径。图 15 中的图(A)、(C)分别为含 7%和 45%十八烷的纳米纤维的 SEM 图,图(B)、(D)则分别为与(A)、(C)对应的去除十八烷后的纳米纤维的 TEM 图。可以看出,十八烷含量较小时在纤维中分布小而分散,而含量较大时分布则比较集中,几乎占据了纤维的内部。此后,李凤玉等选用 PMMA 为壳,相变温度范围可对人体温度变化作出反应的材料熔体为芯,制得的储能材料在 10~50 $^{\circ}$ C 之间有良好的可逆性和循环性,作者指出,此类功能纤维在温度传感器方面也有很好的应用前景。最近,Cong 等<sup>[25]</sup>以 PEG 熔体为芯材料、PVDF 溶液为壳材料进行了熔体静电同轴纺,制得了具有良好的热稳定性和储能能力的复合纤维,直径 637~911nm。为了表征复合纤维的封装性能,研究人员测试了不同熔体喂给速度下得到的复合纤维的水接触角,发现当喂给速度达 210mL/h 时 PEG 可被完全封装,且此时的 PEG 含量达 42.5% (wt),储能情况为 68J/g。

封装不仅可以应用在储能材料上,也可应用于医药领域制作微胶囊以实现药物的传递与释放,化妆品中某些疏水性的化合物封装于亲水性外壳中增强吸收能力与作用效果<sup>[64]</sup>。这些都有望于借助熔体同轴静电纺的方式得以实现。

## 6 结论

熔体电纺作为一种制备超细纤维的重要方法,相对于溶液电纺而言有着独特的优势,在生物医药、过滤、封装等领域有着广阔的应用前景。目前已经有数十种聚合物或混合聚合物用于熔体纺丝实验,制得的纤维直径从数百纳米到几十微米不等。多样性的熔体电纺装置使得各工艺参数对纤维物化性质的调控也具有多样性,很难找到统一的规律。为了保证良好的重复性并最终实现工业化生产,熔体电纺装置需要向精细化、成熟化和多喷头的方向发展。对于纺丝过程中射流运动规律及机理的研究,目前还处于初级阶段,尚未形成一定的理论体系,将是今后研究的重点之一。另外,将熔体电纺与其他纺丝方法协同应用,共同构建具有一定功能性的材料体系,是拓宽熔体电纺纤维应用的重要途径之一。

## 参考文献:

- [1] Cooley J F. USP, 692631. 1902-02-04.
- [2] Norton C L. USP, 2048651. 1936-07-21.
- [3] Larrondo L, Manley R ST J J. Polym Sci Pt B-Polym Phys, 1981, 19(6):909~920.
- [4] Yang Y, Zahn M, Jia Z D, Li Q, Hou L, Liu J N, Wang L N, Guan Z C. IEEE Trns Dielectr Electr Insul, 2010, 17(5):1592~1601.
- [5] Mitchell S B, Sanders J E. J Biomed Mater Res Part A, 2006,78(1):110~120.
- [6] McCann J T, Marquez M, Xia Y N. Nano Lett, 2006,6(12):2868~2872.
- [7] Lee S, Obendorf S K. J Appl Polym Sci, 2006,102(4):3430~3437.
- [8] Dalton P D, Calvet J L, Mourran A, Klee D, Moller M. Biotech J, 2006,1(9):998~1006.
- [9] 袁晓燕,吴卫星,盛京. 天津大学学报,2006,39(10):1232~1236.
- [10] Dalton P D, Klinkhammer K, Salber J, Klee D, Moller M. Biomacromolecules, 2006, 7 (3):686~690.
- [11] Ogata N, Yamaguchi S, Shimada N, Lu G, Iwata T, Nakanr K, Ogihara T. J Appl Polym Sci, 2007, 104(3):1640~1645.
- [12] Hunley M T, Karikari A S, McKee M G, Mather B D, Layman J M, Fornof A R, Long T E. Macromol Symp, 2008,270(1):1~7.
- [13] Li F Y, Zhao Y, Wang S, Han D, Jiang L, Song Y L. J Appl Polym Sci, 2008,112(1):269~274.
- [14] Takasaki M, Fu H, Nakata K, Ohkoshi Y, Hirai T. Sen-I Gakkaishi, 2008,64(1):29~31.
- [15] Deng R J, Liu Y, Ding Y M, Xie P C, Luo L, Yang W M. J Appl Polym Sci, 2009, 114(1):166~175.
- [16] Liu Y, Zhao F W, Zhang C, Zhang J M, Yang W M. J Serb Chem Soc, 2012,77(8):1071~1082.
- [17] Rajabinejad H, Khajavi R, Rashidi A, Mansouri N, Yazdanshenas M E. Int J Environ Res, 2009,3(4):663~670.
- [18] Kong C S, Jo K J, Jo N K, Kim H S. Polym Eng Sci, 2009,49(2):391~396.
- [19] Kadomae Y, Maruyama Y, Sugimoto M, Taniguchi T, Koyama K. Fiber Polym,2009,10(3):275~279.
- [20] Wang X F, Huang Z M. Chin J Polym Sci, 2010, 28(1):45~53.
- [21] Detta N, Brown T D, Edin F K, Albrecht K, Chiellini F, Chiellini E, Dalton P D, Hutmacher D W. Polym Int,2010, 59(11):1558~1562.
- [22] Kim S J, Jang D H, Park D H, Min B M. Polymer,2010, 51(6):1320~1327.
- [23] Wang X N, Xu Y, Wei Q F, Cai Y B. Adv Mater Res, 2011, 332~334, 1550~1556.
- [24] Li X Y, Liu H C, Wang J N, Li C J. Polymer,2012,53(1):248~253.
- [25] Vando C, Nguyen T T T, Park J S. Sol Energy Mater Sol Cells, 2012,104(9):131~139.
- [26] Nayak R, Kyratzis I L, Truong Y B, Padhye R, Arnold L. J Mater Sci, 2012,47(17):6387~6396.
- [27] Fang J, Zhang L, Sutton D, Wang X G, Lin T. J Nanomater,2012.
- [28] 邓荣坚. 熔体静电纺丝法制备微纳米纤维的实验研究. 北京:北京化工大学,2009.
- [29] El-Newehy M H, Al-Deyab S S, Kenawy E, Abdel-Megeed A. J Nanomater, 2011,2011:1~8.
- [30] Gries T, Hacker C, Jungbecker P, Seide G, Thomas H, Moller M. 2010 Innovative Nonwovens Conference.
- [31] Shimada N, Tsutsumi H, Nakane K, Ogihara T, Ogata N. J Appl Polym Sci, 2010,116(5):2998~3004.
- [32] Dalton P D, Grafahrend D, Klinkhammer K, Klee D, Moller M. Polymer,2007,48(23):6823~6833.
- [33] 李秀艳,刘会超,李从举. 化工新型材料,2011,39(10):42~44.
- [34] Malakhov S N, Khomenko A Y, Belousov S I, Prazdnichnyi A M, Chvalun S N, Shepelev A D, Budyka A K. Fibre Chem, 2009,41(6):355~359.
- [35] Zhmayev E, Cho D, Joo Y L. Polymer,2010,51(18):4140~4144.
- [36] 李莘,徐阳,魏取福,王爱民,王肖娜,杜远之. 工程塑料应用,2012,40(12):41~45.
- [37] Ogata N, Lu G, Iwata T, Yamaguchi S, Nakane K, Ogihara T. J Appl Polym Sci, 2007,104(2):1368~1375.
- [38] Zhou H J, Green T B, Joo Y L. Polymer, 2006,47(21):7497~7505.
- [39] Carroll C P, Zhmayev E, Kalra V, Joo Y L. Korea-Aust Rheol J, 2008, 20(3):153~164.
- [40] Zhao F W, Liu Y, Yuan H L, Yang W M. J Appl Polym Sci, 2012, 125(4):2652~2658.
- [41] Takasaki M, Fu H, Nakata K, Ohkoshi Y, Hirai T. Sen-I Gakkaishi, 2008, 64(1):29~31.
- [42] Shimada N, Ogata N, Nakane K, Ogihara T. J Appl Polym Sci, 2012,125(S2): E384~E389.
- [43] Ogata N, Shimada N, Yamaguchi S, Nakane K, Ogihara T. J Appl Polym Sci, 2007,105(3):1127~1132.
- [44] 徐阳,王肖娜,杜远之,张亚曦,魏取福. 纺织学报,2012,33(9):1~5.
- [45] Li X Y, Liu H C, Wang J N, Li C J. J Appl Polym Sci, 2012, 125(3):2050~2055.

- [46] 李莘,王肖娜,徐阳,张德传,蔡以兵. 化工新型材料,2012,40(3):49~51.
- [47] Liu Y, Deng R J, Hao M F, Yan H, Yang W M. Polym Eng Sci, 2010,50(10):2074~2078.
- [48] Lyons J, Li C, Ko F. Polymer, 2004,45(22):7597~7603.
- [49] Karchin A, Simonovsky F I, Ratner B D, Sanders J E. Acta Biomater, 2011,7(9):3277~3284.
- [50] Zhmayev E, Cho D, Joo Y L. Polymer, 2010, 51(6):274~290.
- [51] Dalton P D, Joergensen N T, Groll J, Moeller M. Biomed Mater, 2008,3(3):1~11.
- [52] Tian S, Ogata N, Shimada N, Nakane K, Ogihara T, Yu M H. J Appl Polym Sci, 2009,113(2):1282~1288.
- [53] Hutmacher D W, Dalton P D. Chemistry, 2011, (6): 44~56.
- [54] Singer J C, Giesa R, Schmidt H W. Soft Matter, 2012, 8(39):9972~9976.
- [55] Cho D, Zhmayev E, Joo Y L. Polymer, 2011,52(20):4600~4609.
- [56] Brown T D, Dalton P D, Hutmacher D W. Adv Mater, 2011, 23(47):5651~5657.
- [57] Larrondo L, Manley R ST J. J Polym Sci Pt. B-Polym Phys, 1981, 19(6):921~932.
- [58] Larrondo L, Manley R ST J. J Polym Sci Pt B-Polym Phys, 1981, 19(6):933~940.
- [59] Zhmayev E, Zhou H J, Joo Y L. J Non-Newton Fluid Mech, 2008, 153(2/3):95~108.
- [60] Carroll C P, Joo Y L. J Non-Newton Fluid Mech, 2008, 153(2/3):130~148.
- [61] Liu Y, Wang X, Yan H, Guan C F, Yang W M. J Mater Sci, 2011, 46(24):7877~7882.
- [62] Li X Y, Liu H C, Wang J N, Li C J. Mater Lett, 2012,73:103~106.
- [63] Cho D,Zhou H J,Cho Y, Audus D, Joo Y L. Polymer, 2010, 51(25):6005~6012.
- [64] Díaz J E, Barrero A, Márquez M, Loscertales I G. Adv Funct Mater,2006,16(16):2110~2116.

## Progress in Research of Melt-electrospinning

WANG Xiao-na, LI Shen, WANG Hong, XU Yang, WEI Qu-fu

(Key Laboratory of Eco-textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Electrospinning is one of the effective ways to prepare ultra-fine or nano fibers. Research on melt electrospinning is at the primary stage compared to that on solution electrospinning which is deep and broad. Since the process of melt electrospinning is non-toxic, pollution free and can give high product conversion rate, it has wide application prospects, especially in the area of filtration and biomedicine. What's more, theoretically, any polymer whose decomposition temperature is higher than its melt temperature can be used to melt electrospin. Meanwhile, melt electrospinning also has weak points such as more complex device and thicker fiber diameter. In this paper focusing on melt electrospinning, typical devices are introduced; polymer types and spinning parameters are summarized; effects of spinning parameters on fiber properties are compared; applications are discussed; and at last the developing direction is forecasted.

**Key words:** Melt-electrospinning; Devices; Polymers; Fiber properties; Applications