

离子浓度对电纺纤维沉积形态及表面形貌的影响*

漆东岳¹ 刘延波^{1,2**} 陈威亚¹ 肖友华¹

(¹ 天津工业大学 纺织学部 天津 300387)

(² 天津工业大学 教育部先进纺织复合材料重点实验室 天津 300387)

摘要 通过采用传统电纺丝装置(接收板接地或连接负压电源)、逆向电场及非接触式电纺丝装置等4种不同的电纺丝装置,在相同电压、接收距离、纺针直径、温湿度条件下,对20%的聚乙烯醇溶液进行电纺丝实验,观察不同装置中制得的纤维的沉积形态与形貌.还采用ANSYS有限元模拟对电纺丝装置的场强分布进行分析,并引入电化理论解释了采用不同电纺装置时离子浓度的不同对所得电纺纤维形貌的影响,分析了产生差异的原因.

关键词 静电纺丝, 离子浓度, 非接触式电纺丝, 电化学, 双电层

美国科学家 Formhals 在 1934~1943 年期间,先后发明了4项关于静电纺丝的专利^[1~4],并于1934年首次提出了可以利用直流、交流、多相电流等进行无针头静电纺丝的方法;此后他又在1940年的专利中提及了采用逆向电场的静电纺丝技术,但他并没有对此种电纺丝的物理学原理做出合理的解释,且对于其它形式的电流及逆向电场纺丝的描述也只是一笔带过. Kessick^[5]和 Yeo 等^[6]在研究过程中也发现交流电可以用于静电纺丝,但并没有就其原理进行分析. 在之后的研究中,交流及多相电流纺丝并没有引起学者们的足够关注,而采用正向电场的传统针头式静电纺丝则得到了广泛而深入的研究.

Theron^[7]采用经典电纺丝装置进行研究,提出射流形成的根本原因是阳离子受到的电场力拉伸作用,并提出了可以通过接收板与接地端之间的电流计算射流中离子电荷浓度;Thompson^[8]通过研究传统静电纺丝装置中13个参数对纤维细度的影响,建立了关于电纺纤维直径的模型,并认为初始射流直径、溶液浓度、接收距离、黏度、黏弹弛豫时间是最重要的影响因素,电压次之,纺丝环境温湿度更次之,但这个模型中并没有考虑溶液是如何带上离子电荷的.

覃小红等^[9~11]发现向溶液中添加 LiCl,会使

电纺丝纤维变细,鞭动区更为剧烈,这说明向电纺丝溶液中添加离子,可以改变纺丝液的带电性能,从而控制射流的状态,但并未从本质上说明原因. Kalayci^[12]等通过使用负压直流电源以及非接触式电纺丝装置进行静电纺丝实验,认为在使用正压电源时,溶液会带上阳离子电荷;使用负压电源时,溶液会带上电子电荷,但依然没有说明溶液中电荷的来源,他们观察到在使用感应静电纺丝装置时,射流呈现出间歇性,并认为非接触式静电纺丝溶液中的电荷来源是空气的电离. Uyar^[13]在溶液中加入少量 TBAB(四丁基溴化铵),用以提高溶液的电导率,在几乎没有改变溶液黏度的情况下,得到了粗细均匀,没有珠丝的电纺纤维; Lee^[14~16]等通过研究不同溶剂对纤维形貌的影响,发现不同溶剂的介电常数对静电纺有重大影响,如加入介电常数相对其他有机溶剂较大的 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF),可以改善纤维形态. 这些发现均说明电纺丝纤维的形貌与溶液的带电性质有极其紧密的关系.

本文通过改变经典电纺装置,如逆向电场、非接触式静电纺丝装置等,采用20%的聚乙烯醇(PVA)溶液,在相同的电压绝对值条件下进行电纺丝实验,并结合ANSYS模拟,从电化角度讨论溶液的带电方式,分析了电纺丝装置中电场设

* 2013-06-28 收稿,2013-09-30 修稿;国家自然科学基金(基金号 51373121)资助项目.

** 通讯联系人, E-mail: yanboliu@gmail.com

doi:10.3724/SP.J.1105.2014.13222

置对纤维形貌及沉积形态的影响,为新型静电纺丝装置的研发奠定了基础。

1 实验部分

1.1 实验设备

电纺丝装置采用自行组装的电纺丝试验台(如图 1(a)),其中支架为绝缘 PVC 塑料管,针板为绝缘 PTFE 塑料,接收极板为表面附有铝箔的铜板(如图 1(b));内径为 0.8 mm 的不锈钢点胶针头;溶液储存在 5 mL 的一次性绝缘 PP 注射器

中。本研究采用浙江史密斯医学仪器有限公司生产的 W2L-506 型六通道微量注射泵作为喂液装置,东文高压电源(天津)有限公司生产的 DW-P603-2ACF2 型和 DW-N603-2ACF2 型便携式高压直流电源作为高压静电发生器,可分别施加直流正压和直流负压,电压可调范围为 0 ~ 60 kV。为便于观察,采用深圳市帝欧威科有限公司制造的 DOV HID 坐式金卤灯作为光源;纤维形貌采用 Hitachi S-4800 型扫描电镜拍摄的 SEM 照片进行观测。

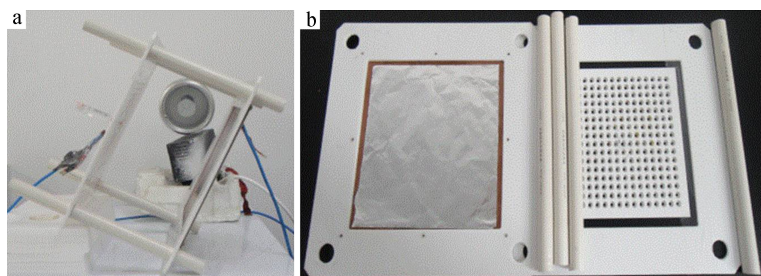


Fig. 1 (a) Electrospinning setup used in this study; (b) Component parts of the current electrospinning setup

1.2 实验材料

PVA(分子量 74800,醇解度为 99%,上海石油化工股份有限公司 1799D);去离子水(天津科密欧化学试剂厂)。

1.3 配制纺丝溶液

称取 4 g PVA 粉末,放入 16 g 去离子水中,在 50℃ 条件下搅拌至颗粒完全溶解,配制出质量分数为 20% 的 PVA 水溶液。

1.4 采用不同电纺丝装置进行纺丝实验

实验所用电纺丝装置包括:传统纺丝装置①(图 2(a)),即溶液通过金属针头与高压直流正电相连接,接收板接地;接收板负压装置②(图 2(b)),即溶液通过金属针头而接地,钢质接收板与高压直流负电相连接;针头负压装置③(图 2(c)),即溶液通过金属针头与高压直流负电相连接,接收板接地;接收板正压装置④(图 2(d)),即溶液通过金属针头接地,铜质接收板与高压直流正电相连接。

本研究中所有纺丝装置的接收距离,即从针尖到接收板之间的距离均设为 15 cm,控制温度为 25℃,相对湿度为 12%。在组装好各纺丝装置后,打开微量注射泵,设置注射量为 0.2 mL/h,在 25 kV 电压绝对值条件下,采用以上 4 种电纺丝装置进行电纺丝实验,20 min 后制得电纺丝膜,采

用数码相机对各装置中所纺的纤维膜沉积形态进行记录,并采用 Hitachi S-4800 型扫描电镜得出的 SEM 照片观测纤维形貌。

在电纺丝装置①条件下,分别采用 20 kV,25 kV,30 kV 进行电纺丝实验 20 min,对其 SEM 照片进行观测对比。

1.5 采用 ANSYS 模拟各种电纺丝装置下的电场分布

本文中采用 PLANE121 电磁场专用单元对以上 4 种电纺丝装置模型进行场强分布模拟,单元划分采用自由划分与映射划分相结合的形式,对于较为规整的组件,如针身、接收板、针板,采用四边形单元;对于异性的组件,如空气介质和溶液液滴,采用三角形单元。单元划分过程中,需要精确值的位置采用映射划分,如针身、针头,其他位置采用自由划分,在保证计算精度的同时减小计算量^[17,18]。

对于电纺丝装置中各组件的材料属性,主要定义介电常数和电阻率。静电纺丝装置中导体和电介质是同时存在的,所以本文中对电纺丝装置中的非导体(即电介质)定义介电常数,但不定义其电阻率,而对电纺丝装置中的导体定义介电常数和电阻率。本文中所采用的电纺丝装置中的所有组件均为公知材料,故定义各材料介电常数如

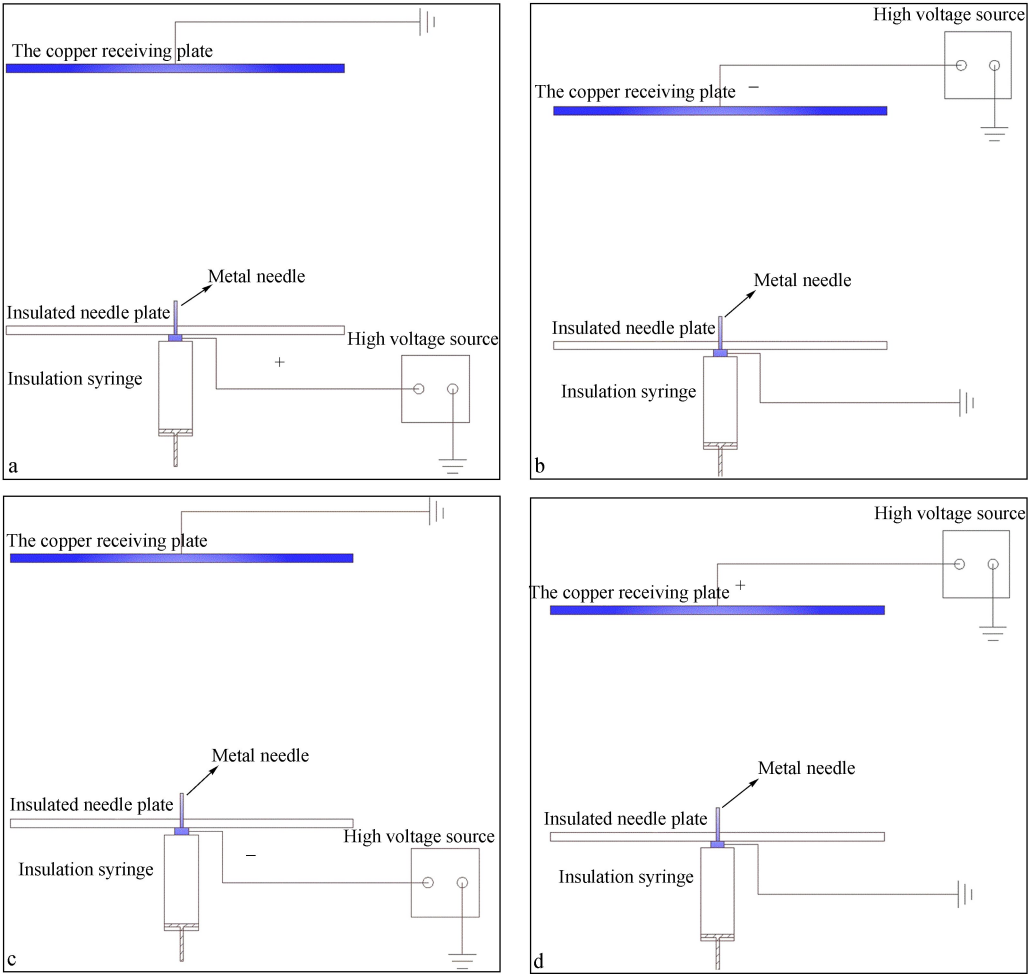


Fig. 2 Schematics of different electrospinning setups, with (a) , (b) , (c) and (d) corresponding to electrospinning setups of ①,②,③ and ④, respectively

下:空气介质的相对介电常数为 1 F/m,不锈钢点胶针头的相对介电常数为 10 F/m^[19~21],PP 点胶针头的相对介电常数为 2.2 F/m^[24],铜质接收板的相对介电常数为 10 F/m^[22],不锈钢套管的相对介电常数为 10 F/m,PTFE 针板的相对介电常数为 2.0 F/m^[23]. 由于本文采用 PVA 水溶液作为纺丝溶液,且浓度不高,所以将其设置为水的相对介电常数,即 78.5 F/m^[22];定义各材料电阻率如下:对电纺丝装置中的非导体(即电介质)不定义其电阻率,对电纺丝装置中的导体定义介电常数和电阻率. 根据前人的经验,由公式(1)计算电阻率:

$$\rho = 1/\sigma \tag{1}$$

其中 σ 为电导率, ρ 为电阻率.

钢质针头、以及套管电导率为 1.0×10^7 S/m,根据 PVA 溶液的实测电导率为 500 μ S/cm,根据计算得其电阻率分别为 $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 和

$20 \Omega \cdot \text{m}$,铜的电阻率为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

2 结果与讨论

2.1 电纺场强的 ANSYS 模拟结果

电纺丝装置①、②、③、④中的电场矢量分布的模拟结果如图 3 所示. 电纺丝装置①、③中,电场线分布和场强大小完全相同,但方向相反;电纺丝装置②、④中,电场线分布和场强大小完全相同,但方向相反;这说明当相同的电压施加到同一个电纺丝装置上时,施加在接收板上还是纺针上,仅影响电场的方向,并不影响电场的分布情况和场强大小;在电压绝对值相同时,电源的极性仅改变电场的指向,不改变其场强大小.

2.2 电纺丝装置与所纺纤维的沉积形态

电纺丝装置①、②、③和④在 25 kV 电压绝对值、15 cm 接收距离条件下所纺纤维沉积面积如图 4 所示.

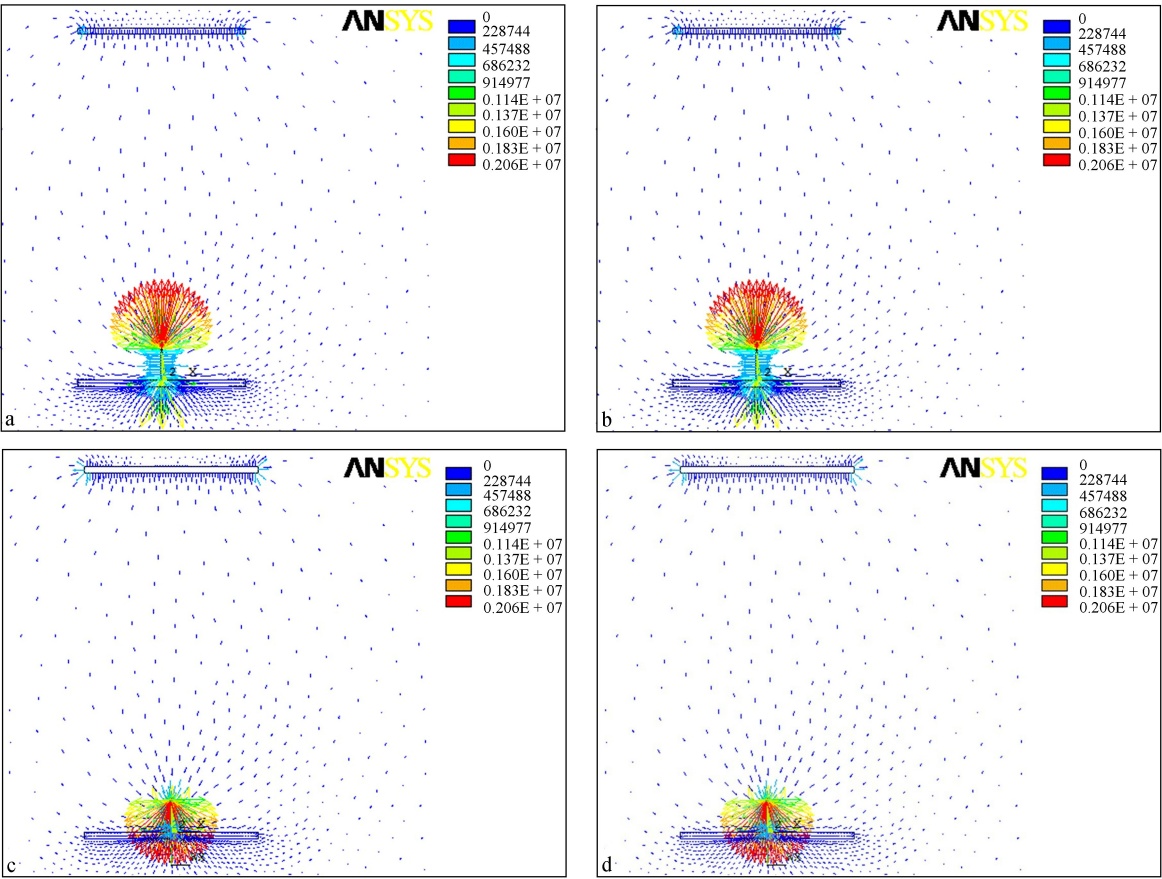


Fig. 3 Electric field vector distribution of different electrospinning setups (V/m) with (a), (b), (c) and (d) corresponding to setups ①, ②, ③ and ④, respectively

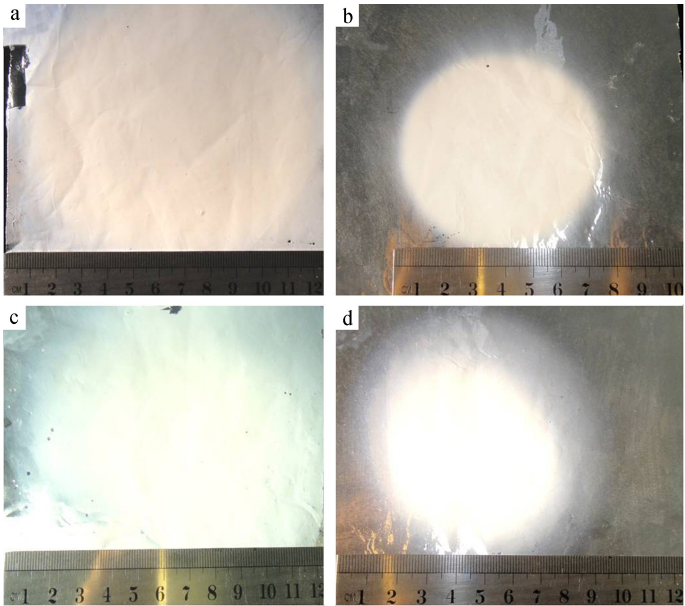


Fig. 4 Fiber deposition morphology from different electrospinning setups, with photos (a), (b), (c), and (d) corresponding to setups ①, ②, ③ and ④, respectively

实验结果显示,上述的4种电纺丝装置在相同电压绝对值、相同接收距离的情况下所纺纤维的面积是不相同的,即说明不同装置中射流的排斥程度是不同的.如图4,电纺丝装置①、③所纺

纤维的沉积面积相似,均为直径约 12 cm 的圆形;电纺丝装置②、④所纺纤维的沉积面积相似,均为直径约 8 cm 的圆形.但是模拟的结果显示,电纺丝装置①和②电场分布完全相同,电纺丝装置③和④电场分布完全相同,这说明除电场强度之外,纺丝液中离子电荷的来源及运动也对电纺纤维的沉积有重要的影响.

静电纺丝溶液中,溶质在溶剂的溶剂化作用下溶解,这个过程将会促进溶剂分子的电离,而這些电离出的离子将于溶质分子形成离子配合物^[24].当溶液受到强电场作用时,溶质作为大分子难以电离,但在与溶剂小分子电离出的相应离子形成离子配合物后,在相应离子的裹挟下形成射流,得到拉伸,最终沉积在接收板上形成纳米纤维膜.

在电纺丝装置①、③条件下,溶液通过针头与高压电源相连接,金属针头作为电子导体,与溶液之间存在相间电位,在金属针头内壁与溶液的界面间将形成“双电层”^[25](如图 5(a)),由于双电层的存在,界面金属一侧的电源电荷对溶剂分子的偶极子有吸引作用,同时也能加速电极反应.在这种情况下,除形成射流所需的离子(可用离子)外,其余与之电性相反的离子(异性离子),部分将发生电极反应,这将使溶剂的电离向正方向进行,电离更容易发生,液滴表面的电荷积聚速度接近射流带走离子电荷的速度,所以电纺丝装置①、③中射流所带的离子电荷量最大,射流鞭动区的排斥最明显,电纺纤维沉积面积最大.

在②、④条件下,溶液与金属针头内壁之间同样存在相间电位^[25],只是这个电位差远小于①、③时的,由于没有电源电荷吸引力的作用,双电层之间的相位差较小(如图 5(b)),电极反应较为缓慢,异性离子浓度会不断上升,电离较①、③困难,可用离子电荷的积聚速度较射流带走离子电

荷的速度更慢,所以其电纺射流中所带的离子电荷量较①、③更小,射流鞭动区的排斥较小,故电纺纤维沉积面积较①、③时更小.

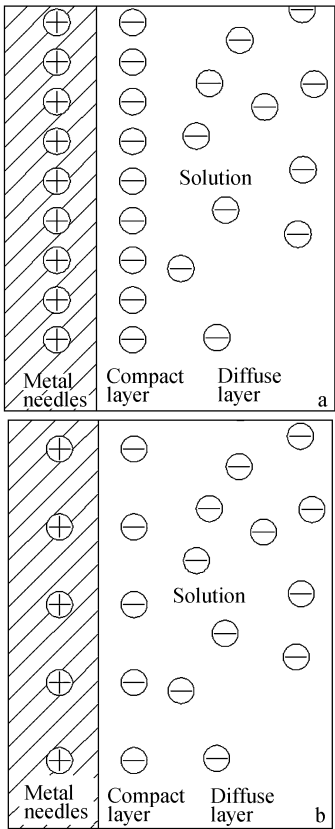


Fig. 5 Double electrode layer structure and ion charge distribution on the interface between metal needle and solution for electrospinning setups ① (a) and ② (b), respectively

结合本节的实验结果与分析,可以得出结论:电纺丝过程中,并非只有将电源直接施加于溶液时才能形成射流,当溶液所处位置有足够大的电场存在时,电纺丝就可以顺利进行;电纺丝射流所带的离子浓度与溶液所处的环境有直接联系,当溶液直接受到电源作用时,射流所带离子浓度较高,当溶液仅受到电场的作用时,射流所带离子浓

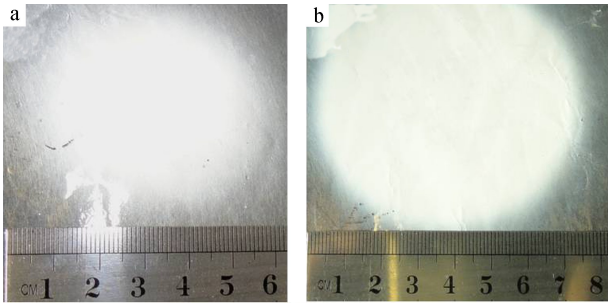


Fig. 6 Fiber deposition morphology of (a) nanofiber membrane made by electrospinning setup ① under 20 kV (b) and nanofiber membrane made by electrospinning setup ② under 25 kV, respectively

度较低.

2.3 电纺丝装置与所纺纤维的表面形貌

2.3.1 各电压条件下所纺纤维的表面形貌

采用电纺丝装置①在 20 kV 条件下制备的电纺丝纳米纤维膜沉积形态及装置②在 25 kV 条件下制备的电纺丝纳米纤维膜沉积形态如图 6.

如图 6 所示,电纺丝装置①在 20 kV 条件下制备的电纺丝纳米纤维膜与装置②在 25 kV 条件下制备的电纺丝纳米纤维膜沉积面积积极其相似,同时电纺丝装置①在 20 kV 条件下制备的电纺丝

纳米纤维膜沉积面积明显小于在 20 kV 条件下制备的电纺丝纳米纤维膜(如图 4(a)). 这说明随着电压的升高,射流中的同种离子电荷量有明显上升;同时也说明接收板加压式的静电纺丝装置可以得到与传统静电纺丝装置相似的纤维沉积效果,但需要更高电压,形成更大的电场,以使射流中所带离子电荷产生足够的斥力.

采用电纺丝装置①,分别在 20,25,30 kV 所得纤维的 SEM 图像见图 7.

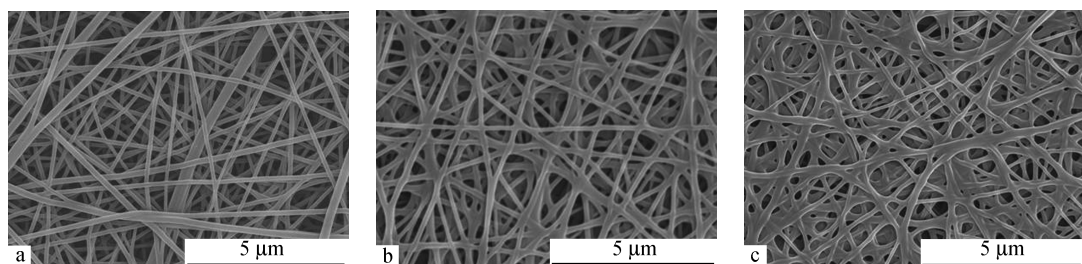


Fig. 7 SEM photos of 20% PVA nanofibers prepared with different voltages under the same setup and time; (a) 20 kV, (b) 25 kV and (c) 30 kV

如图 7 所示,在电纺丝装置①中,采用不同的电压进行纺丝时,所纺纳米纤维膜的表面形貌有显著差异,随着电压的升高,25 kV 时纤维直径变得均匀,但开始出现溶剂残留,30 kV 时溶剂残留更为明显.这说明溶剂的残留量随着电压的升高而变多,说明电压的升高会导致溶剂分子电离的加速,当电离速度过快,电场强度过大时,射流将带出更多的溶剂,形成纳米纤维膜上的溶剂残留;同时电纺丝装置①中 20 kV 条件下所纺纤维形貌(图 7(a))与电纺丝装置②中 25 kV 条件下所纺纤维形貌(如图 8(b))相似,说明在接收板加压式的静电纺丝装置可以得到与传统静电纺丝装置相似的纤维形貌,但需要更高电压,形成更大的电场,以使射流带上足够的离子电荷.

2.3.2 各电纺丝装置所纺纤维的形貌

利用电纺丝装置①、②、③、④在 25 kV 电压绝对值、15 cm 接收距离的条件下所纺纤维形貌及直径分布如图 8 所示.在相同溶液、电压绝对值、接收距离、针头内径的条件下,不同电纺丝装置所纺纤维的形貌各异,且直径分布也存在较大差异.电纺丝装置①、③所纺纤维有明显溶剂残留,纤维直径分布较为集中,平均直径分别为 158 nm 和 154 nm,变异系数(CV 值)分别为 19.38% 和 20.14%,均较为接近;电纺丝装置②、④所纺

纤维基本没有溶液残留,纤维直径分布十分集中,平均直径分别为 154 nm 和 152 nm,CV 值分别 13.84% 和 11.74%,均较为接近.

在电纺丝装置①、③中,溶液直接与高压电源相连接,在金属针头内壁与溶液的界面间将形成“双电层”(如图 5(a))^[24],溶液分子同时受到电场力对偶极子的分离作用和电源电荷的吸引作用,电离出的离子电荷较多,泰勒锥表面电荷积累较快,且电荷积累密度较大,在相同的电场强度条件下,射流带出的溶剂较多,故所纺纤维上有部分溶剂残留;笔者之前的研究表明在电纺丝装置①、③,20% PVA 溶液形成电纺丝射流的临界电压仅需 8.6 kV 左右,此时溶液分子电离的速度略小于射流带走离子电荷的速度,随电压绝对值升高时,溶液的电离将加速.当电压绝对值升高到 25 kV 时,溶液分子电离的速度较快,将超过射流带走离子电荷的速率,射流中的离子浓度几乎没有明显的变化,射流所受到的拉伸作用几乎一致,故所纺纤维直径分布较为集中,CV 值分别为 19.38% 和 20.14%,较②、④时更大,这是由于射流中的离子浓度过大,带出过多的溶剂,电纺纤维受到了残留溶剂的影响.

电纺丝装置②、④中,溶液与金属针头内壁之间同样有双电层存在(如图 5(b)),只是由于没

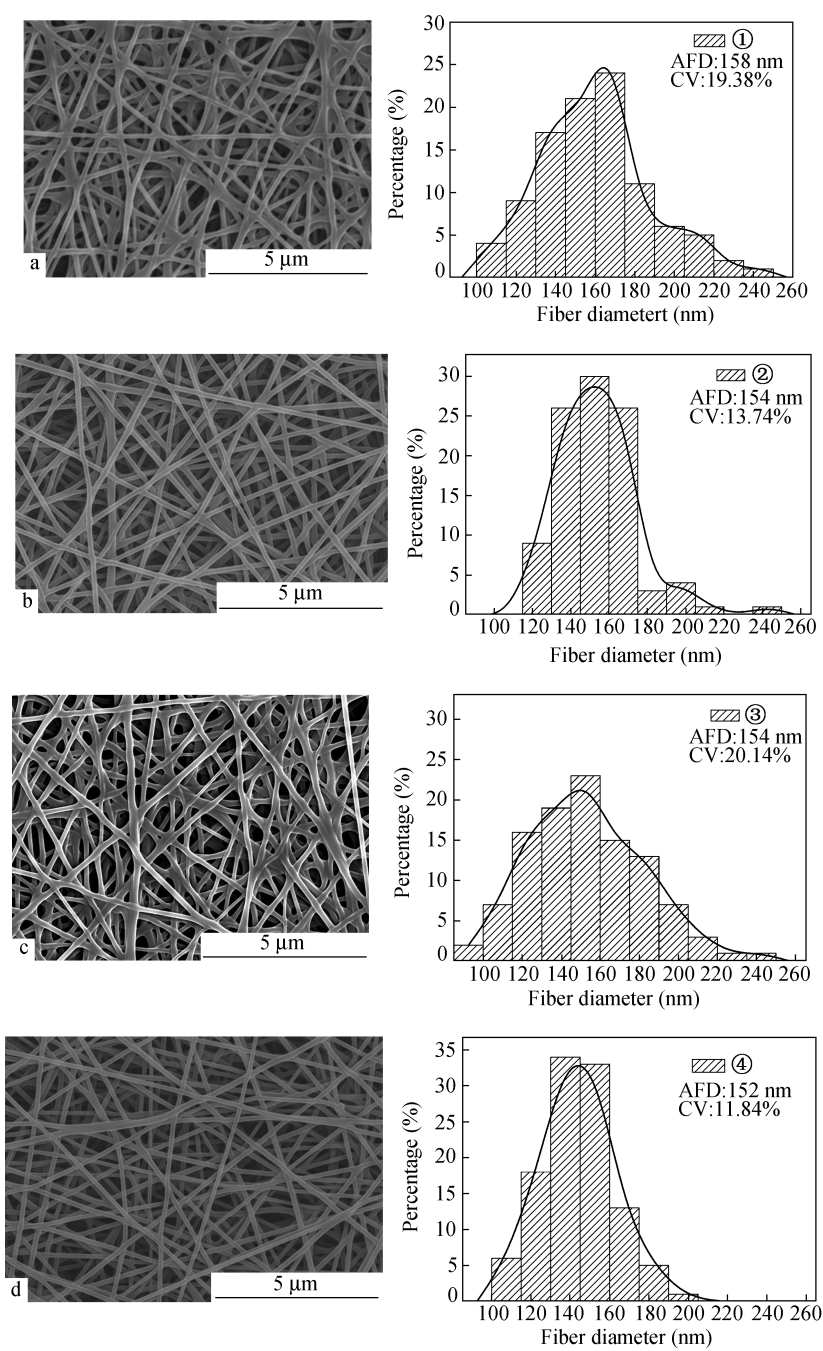


Fig. 8 SEM photos and diameter distribution of 20% PVA nanofibers prepared with different electrospinning setups at absolute value of 25 kV voltage: (a) setup ①, (b) setup ②, (c) setup ③ and (d) setup ④

有直接与电源发生作用,其相间电位差远小于①、③时的,溶液并未受到电源电荷的吸引作用,但所处位置场强与①、③时无异(如图3),相同电压绝对值条件下,电离出的离子电荷较①、③时少,射流带出的溶剂较少,故所纺纤维上没有明显的溶剂残留;由于溶液分子的电离速度会随着电压绝对值的升高而加快,而笔者之前的研究表明 20% 的 PVA 溶液在电纺丝装置②、④中形成稳定纺丝射流的临界电压绝对值仅为 15.5 kV 左右. 在电

纺丝装置②、④中,当电压绝对值升高到 25 kV 时,溶液分子电离的速度将达到或超过射流带走离子电荷的速度,整个纺丝过程中,射流中的离子浓度几乎没有明显的变化,射流所受到的拉伸作用几乎一致,同时由于溶液中的离子电荷较①、③时更少,不至于带出过多的溶剂,没有溶剂残留的影响,所纺纤维直径分布最为集中,CV 值仅为 13.74% 和 11.84% .

由以上结果与分析可得出结论:纤维的直径

分布及其形貌与电纺丝过程中溶液分子的电离速度有紧密联系:当溶液分子的电离速度远大于射流带走离子电荷的速度时,射流中的离子浓度将保持恒定,但高于正常纺丝所需,带出过多的溶剂,在所纺纤维上形成溶剂残留,影响纤维形貌;当溶液分子的电离速度接近射流带走离子电荷的速度时,射流中的离子浓度变化较小,溶液受到的电场力拉伸作用几乎不变,所纺纤维直径分布均匀,且没有溶剂残留。

3 结论

本文应用电化学的双电层理论对静电纺丝过程中纺丝液的离子浓度与电纺纤维沉积形态及表面形貌的关系进行了系统研究,得出如下结论:(1)在溶液所处位置的电场强度相同时,电纺丝

射流中的离子浓度与溶液所处的环境有直接联系,当溶液直接受到电源作用时,射流所带离子浓度较高,当溶液仅受到电场作用时,射流所带离子浓度较低;(2)在相同的电压绝对值条件下,将电源电压施加在接收板上,可以得到与传统的静电纺丝装置相同的电场分布及场强,且同样可以得到形态良好的纳微米级电纺丝纤维;(3)由于针头与溶液之间双电层的相间电位差不同,相对于传统的静电纺丝装置,接收板加压式的电纺丝装置,需要更高的电压,形成更强的电场才能得到与传统电纺丝装置所纺纤维相似的效果;(4)在电纺丝过程中,当施加的电压绝对值过高时,溶液分子的电离速度过快,射流中过剩的离子电荷将带出过多的溶剂,形成溶剂残留,不利于得到形态良好的电纺丝纤维。

REFERENCES

1 Formhals A. US patent 1,975,504. 1934-10-02

2 Formhals A. US patent 2,160,962. 1939-06-06

3 Formhals A. US patent 2,187,306. 1940-01-16

4 Formhals A. US patent 2,323,025. 1943-06-29

5 Kessick R, Fenn J, Tepper G. Polymer, 2004, 45(9): 298 ~ 2984

6 Yeo L Y, Gagnon Z, Chang H C. Biomaterials, 2005, 26(31): 6122 ~ 6128

7 Theron S A, Yarin A L, Zussman E, Kroll E. Polymer, 2005, 46(9): 2889 ~ 2899

8 Thompson C J, Chase G G, Yarin A L, Reneker D H. Polymer, 2007, 48(23): 6913 ~ 6922

9 Li N, Qin X H, Yang E I, Wang S Y. Mater Lett, 2008, 62(8-9): 1345 ~ 1348

10 Qin X H, Wan Y Q, He J H, Zhang J, Yu J Y, Wang S Y. Polymer, 2004, 45(18): 6409 ~ 6413

11 Qin X H, Wang S Y, Sandra T, Lukas D. Mater Lett, 2005, 59(24-25): 3102 ~ 3105

12 Kalayci V E, Patra P K, Kim Y K, Ugblolue S C, Warner S B. Polymer, 2005, 46(18): 7191 ~ 7200

13 Uyar T, Besenbacher F. Polymer, 2008, 49(24): 5336 ~ 5343

14 Lee K H, Ryu Y J, Kim K W, Choi S W. Polymer, 2003, 41: 1256 ~ 1262

15 Lee K H, Kim H Y, Khil M S, Ra Y M, Lee D R. Polymer, 2003, 44: 1287 ~ 1294

16 Lee K H, Kim H Y, Khil M S. Polymer, 2003, 44: 4029 ~ 4034

17 Dang Shasha(党沙沙), Xu Yang(许洋), Zhang Hongsong(张红松). ANSYS 12.0 Physical Coupling Field Finite Element Analysis from Entry to the Master(ANSYS 12.0 多物理耦合场有限元分析从入门到精通). Beijing(北京): China Machine Press(机械工业出版社), 2010. 21 ~ 54

18 Deng Fanping(邓凡平). ANSYS 12.0 Finite Element Analysis of Self-study Handbook(ANSYS 12.0 有限元分析自学手册). Beijing(北京): Postsand Telecom Press(人民邮电出版社), 2011. 67 ~ 89

19 Liang Baixian(梁百先). General Physics(普通物理学). Beijing(北京): Science Press(科学出版社), 1983. 46 ~ 51

20 Liu Huien(刘惠恩). Dielectric Constant of Metal(金属的介电常数). College Physics(大学物理), 1983, (02): 3 ~ 6

21 Qi Xiangjun(邱向军). Journal of sichuan institute of technology(JCR-SCI)(四川理工学院学报(自然科学版)), 2006, (2): 75 ~ 78

22 Lide D. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Cleveland: CRC Press, 1998. 34 ~ 36

23 Zhao Wenyan(赵文远), Zhao Wenming(赵文明), Wang Yijun(王亦军). Electrical Properties and Application of Polymer Materials(聚合材料的电学性能及其应用). Beijing(北京): Chemical Industry Press(化学工业出版社), 2006. 67 ~ 75

24 Liang Hui(梁晖), Lu Jiang(卢江). Polymer Science(高分子科学基础)[M]. Beijing(北京): Chemical Industry Press(化学工业出版社), 2005. 29 ~ 31

25 Li Di(李荻). Principles of Electrochemistry(电化学原理). Beijing(北京): Beijing Aerospace University Press(北京航空航天大学出版社), 1999. 45 ~ 56

The Impact from Ion Charge Concentration on the Deposition and Morphology of the Electrospun Nanofibers

Dong-yue Qi¹, Yan-bo Liu^{1,2*}, Wei-ya Chen¹, You-hua Xiao¹

(¹ School of Textiles, Tianjin Poltechnic University,

² Key Laboratory of Advanced Textile Composites of Ministry of Education, Tianjin 300387)

Abstract The relationship between electric field setup and the resultant electrospun nanofiber deposition shape and morphology was studied by using totally four types of electrospinning apparatus including conventional electrospinning setup (the receiver is grounded or connected with negative power), inverse field electrospinning setup, non-contact electrospinning setup, and the 20% PVA (polyvinyl alcohol) solution was electrospun at the same applied voltage, receiving distance, spinning needle diameter, temperature and relative humidity, and the resulting nanofiber deposition shape and morphology were observed *via* photography. Also in this study, ANSYS finite element software was employed to simulate and analyze the field distribution on the four types of setups, and the influence from ion concentration of spinning solution on the resultant nanofiber morphology on different electrospinning apparatus was interpreted by introducing the electrochemistry theory. The reasons for the differences were analyzed, laying theoretical foundation for the development of new type of electrospinning equipment.

Keywords Electrospinning, Ionic concentration, Non-contact electrospinning, Electrochemistry, Electric double layer

* Corresponding author: Yan-bo Liu, E-mail: yanboliu@ gmail. com