

可伸缩针头的喷印规律研究

邱永荣,裴艳博,林桂丹,苏源哲,王凌云,孙道恒

(厦门大学 机电工程系,福建 厦门 361005)

摘要 设计了一种新型的基于电液动力学的喷头,该喷头内含一个可伸缩的针尖。由这种喷头组成的喷印系统,在不同的条件下可以产生离散的点和珠状结构两种喷射模式。结果表明:溶液浓度是区分这两种喷射模式的关键因素。当喷射溶液的浓度比较低时,喷印系统喷射出离散的圆点;当较高时,喷射出珠状结构。其珠状结构中珠子的直径随着系统供液速率的增加而变大,随着PEO溶液浓度的提高和针尖频率的增加而减小。改变收集板的移动速度,可以改变喷射沉积物形态,且该系统的喷射频率与可伸缩针尖的运动频率之间有很好的线性相关性。

关键词 喷印;可伸缩针尖;珠状结构

中图分类号 TN16

文献标识码 A

文章编号 1004-244X(2011)05-0087-04

Electrohydrodynamic printing for head with retractable needle

QIU Yongrong, PEI Yanbo, LIN Guidan, SU Yuanzhe, WANG Linyun, SUN Daoheng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract A novel electrohydrodynamic printing system with a retractable needle was designed, by which both ejection modes of dots and bead-on-string structures can be produced. Experimental results show that solution concentration is the key element to define the ejection mode. Dots can be obtained for lower solution concentration, otherwise bead-on-string structures would be produced. the diameter of deposition dots increases with the increasing of supply rate, and decreases with the increasing of PEO solution concentration and the frequency increasing of needle. By changing the speed of collector, different morphologies of depositions can be obtained. In addition, the deposition frequency has a close relationship with the retractable frequency of needle.

Key words electrohydrodynamic printing; retractable needle; bead-on-string structure

喷印是一种将液体由喷嘴直接喷射到介质表面特定位置以形成图形的技术。传统的喷印技术要求溶液黏度较低($<20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$),以便溶液能够形成液滴喷射。基于电液动力学耦合作用原理的静电喷印(EHD喷印)是由外部提供静电力,从而诱使液体射出的喷印技术。在直流高压作用下,EHD喷印能够喷出高黏度($\sim 15\ 000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)的溶液形成微滴或连续线,被认为是一种能够替代传统喷印的技术。EHD喷印不仅能够喷射黏度很高的溶液,而且其射流直径远小于喷嘴尺寸,且喷嘴不易堵塞。

近些年来,作为微纳米尺度的一种简单并且低成本的图案成形技术,EHD喷印已经引起了研究学者们的广泛关注^[1]。通过EHD喷印,一百多种材料已经被用来制作出微纳米结构^[2]。在电子学、生物工艺学,或者在微机电系统领域,EHD喷印技术都具有巨大的潜

在应用。EHD喷印包括两种喷射模式,分别是连续喷射模式^[3]和脉冲喷射模式^[4]。在脉冲喷射模式下,利用脉冲电压可以产生离散的圆点^[5],利用直流电压可以产生珠状结构^[6]。在传统的基于脉冲电压的喷射系统中,电压变化频率,溶液浓度和供液速度都会影响系统的喷射频率^[7],且很难准确地控制喷射频率,这就大大阻碍了EHD喷印在实际生产中的应用。为了实现更加精确地控制喷射频率,需设计一种新型的喷射系统,以加速EHD喷印技术的推广应用。

设计了一种新型的EHD喷射头,并对其喷射规律进行了实验研究,该喷射头的独特之处在于喷嘴内部设计有一根可伸缩的圆形针尖。利用这种喷射系统,可以同时产生分离的圆点和珠状结构,而且,基于此系统的喷射频率与针尖的伸缩运动频率有着密切的关联,同时研究了喷射过程中的参数,如收集板移动速

收稿日期:2011-07-27;修回日期:2011-08-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2010121039);国家自然科学基金(51035002;50875222)

作者简介:邱永荣,男,本科生。E-mail:1013212621qq.com。

通信作者:王凌云,男,博士;讲师;主要研究方向为微惯性器件的设计、制备工艺和测试以及微制造技术。E-mail:rabitwangly@yahoo.com.cn。

通信作者:孙道恒,博士生导师,教授;主要从事微米/纳米集成与封装、聚合物纳米结构及其应用、微纳生物医学传感器与执行器等领域的研究。

E-mail:sundh@xmu.edu.cn。

度、系统供给溶液的速率、PEO溶液的浓度和针尖频率等对喷射的影响。

1 喷射系统结构和原理

1.1 喷头结构

图1a为具有可伸缩针尖的新型喷印系统的示意图。高压直流电源(DW-P403-1AC, 天津东文, 中国)的正极连接至喷嘴, 负极连接至接地的收集板。喷嘴采用不锈钢的毛细管制备而成, 内径为0.4 mm, 在喷嘴的内部正中间, 放置着尖曲率半径是10 μm 的不锈钢针。在可编程控制X-Y运动平台(Googol GXY 1515-GT4)上放置了一块硅片, 作为喷射结构的收集板。精密注射泵(Harvard 11 Pico Plus, USA)作为供液源, 将聚环氧乙烷(PEO, $M_w=300$ kg/mol, 大地精细化工股份有限公司, 中国)溶液输送至喷头。喷嘴至收集板的距离控制在3.5 mm; 用与PC机相连接的CCD(SSC-DC80, Sony)观察和测量沉积下来的微纳米结构。

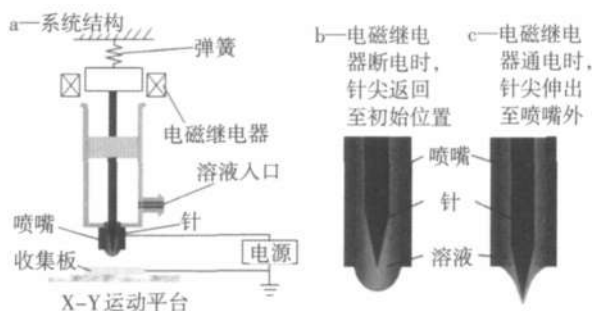


图1 实验系统结构和喷射过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system and jetting process

1.2 喷射原理

传统的EHD喷印技术中, 当泰勒锥顶点处的电场力超过了溶液的表面张力时, 喷嘴出口处的溶液即从泰勒锥顶点处喷射而出^[8]。在所设计的具有可伸缩针尖的EHD喷印系统中, 喷头内部放置着一根细小的实心针头, 通过电磁继电器和弹簧的作用, 可以控制喷射过程中针尖有规律的伸出喷嘴和收缩回原位。如图1b所示, 当电磁继电器没有通电时, 针尖隐藏在溶液所形成的泰勒锥内, 由于此时的电压小于临界喷射电压, 所以不会喷射液滴。电磁继电器通电后, 针尖向下运动, 伸出喷嘴外, 从而刺破月牙形的泰勒锥表面, 喷印系统产生喷射。这是由于通过针尖的作用, 泰勒锥顶点处的电场力突然增大打破了溶液表面张力与静电力的受力平衡, 从而使溶液克服表面张力诱发喷射, 如图1c所示。接着, 由于电磁继电器断电, 针尖又缩回至初始位置。借助于细小针尖的刺破作用,

使该EHD喷印系统的喷射临界电压比传统的不具有可伸缩针尖的喷印系统的喷射电压更低, 并且, 通过调整针尖的伸缩运动频率来控制系统的喷射频率, 从而大大提高了喷射过程的可控性。

2 结果和分析

2.1 溶液浓度的影响

在所设计的喷印系统中, 通过改变PEO溶液的浓度, 分别可以喷射得到离散的液滴或者珠状结构。实验中保持收集板移动速度20 mm/s、针尖伸缩频率8 Hz不变, PEO溶液的质量分数、供液速率和供给电压分别为1%、140 $\mu\text{L/h}$ 、2.5 kV和10%、120 $\mu\text{L/h}$ 、2.75 kV, 对喷射系统进行试验。结果表明, 当PEO溶液的质量分数为1%时, 喷射得到不连续的液滴(小圆点), 如图2a所示; 当溶液的质量分数为10%时, 喷印系统喷射出珠状结构, 如图2b所示。这是因为当喷射溶液的质量分数比较低时, 溶液黏弹性较弱, 不足以抑制溶液毛细现象的破坏, 因此低浓度溶液喷射出不连续的小圆点。珠状结构中的纤维细丝相对于珠子非常细小, 故此称为珠状结构。溶液质量分数不仅对系统喷射模式产生不同影响, 而且影响珠状结构中珠子直径的大小。图3为收集板的供液速率, 移动速度, 供给电压, 针尖频率分别是140 $\mu\text{L/h}$ 、20 mm/s、2.90 kV、15 Hz液滴直径与溶液质量分数的关系。在该EHD喷印系统中, 随着PEO溶液质量分数的提高, 珠状结构中的液滴直径减小, 这与传统的直流电压下的EHD喷印规律相同。

2.2 收集板移动速度的影响

在柔性电子的制造中, 这种珠状结构有着巨大的

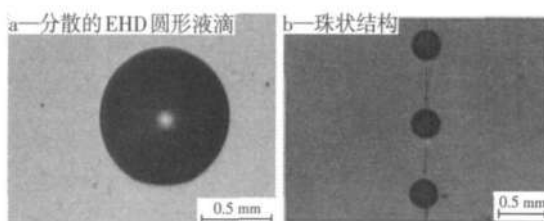


图2 沉淀在收集板上的两种喷射模式

Fig.2 Two jet modes

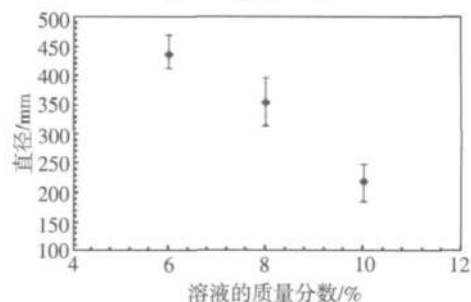


图3 珠状结构中液滴直径与溶液质量分数的关系

Fig.3 Relationship between diameter and concentration

潜在应用价值,珠状结构之间的纳米纤维可制作微纳米结构,而珠状液滴可以与基底形成较大的接触面积,从而减小微纳结构的接触电阻。为此,研究了喷射过程的参量对珠状结构物理形态的影响。图4为不同收集板速度的珠状结构变化。保持PEO溶液的质量分数6%,针尖伸缩频率15 Hz,施加电压2.90 kV,系统供液速率180 $\mu\text{L}/\text{h}$ 不变,当收集板移动速度为10 mm/s时,由于每个液滴之间距离接近,所以各个液滴直接连接成一条直线。当移动速度为20,40,60 mm/s时,收集板上得到珠状结构,随着速度增大,珠状结构中圆形液滴与液滴之间距离增大。当速度增大到一定程度时,液滴与液滴之间容易出现小的卫星液滴,速度越大,小液滴数量越多,如图4c、d所示。这是由于喷射至收集板上的液滴与收集板表面间存在一定的粘滞

力,当收集板移动速度较大时,会带动刚刚沉积的液滴发生局部的微小跳动,结果出现小液滴,移动速度越快,这种跳动现象越明显,所以小液滴越多。

2.3 不同供液速率的影响

图5是PEO溶液质量分数8%,针尖脉冲频率15Hz,施加电压3.0 kV,收集板移动速度20 mm/s,不同供液速率下得到的珠状结构。可以看出,供液速率的改变不会影响液滴与液滴之间的距离,但改变珠状结构中液滴的大小。图6是收集板的移动速度,供给电压,针尖伸缩频率为20 mm/s,3.00 kV,15 Hz液滴直径的统计结果。可见,随着系统供液速率的增加,珠状结构中液滴的直径增大。这是因为随着供液速率的增加,射流速率也会同时增加,导致在每一次的喷射中会产生更多的溶液积聚物,结果使得喷射出的液滴直径

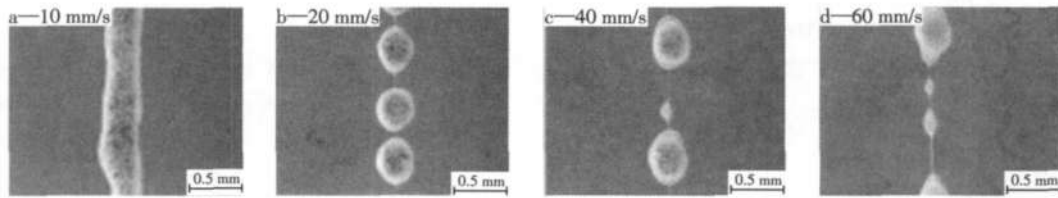


图4 不同收集板速度下沉积物形态

Fig.4 Deposition morphologies under different speeds of collector

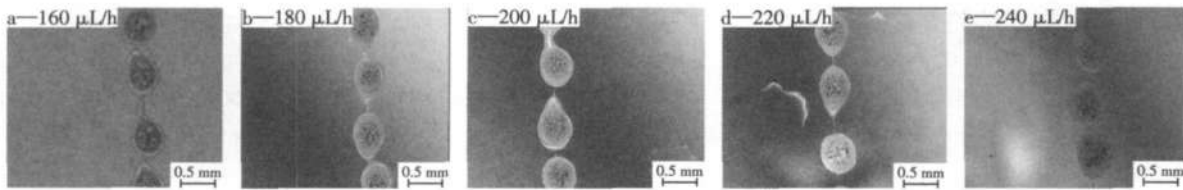


图5 不同供液速率下沉积物的形态

Fig.5 Deposition morphologies under different supply rates

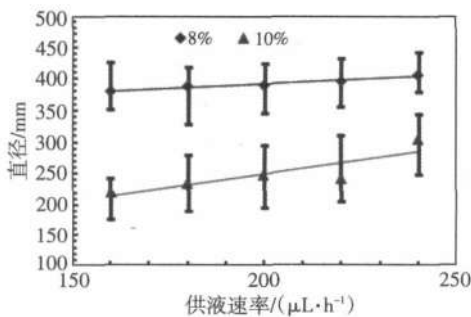


图6 珠状结构中珠子直径与供液速率的关系

Fig.6 Relationship between diameter and supply rate

增大。

2.4 针尖伸缩频率的影响

实验中保持施加电压3.00 kV,供液速率140 $\mu\text{L}/\text{h}$,收集板移动速度20 mm/s,PEO溶液的质量分数6%等参数不变,不同针尖伸缩频率下喷射得到的珠状结构,如图7所示。可见,针尖伸缩频率改变时,不仅影

响液滴与液滴之间的距离,而且同时改变了液滴直径的大小,图8a为PEO溶液的质量分数,供液速率,收集板的移动速度和供给电压分别是6%,140 $\mu\text{L}/\text{h}$,20 mm/s和3.00 kV时,随着针尖伸缩运动频率的增加,系统喷射出的圆点的直径越来越小。这是由于针尖伸缩运动频率的增加加快喷射频率,在一定时间内,系统供液量不变,喷射次数增加,分配到每次喷射中的溶液量就相对减少,每次喷射中溶液积聚物减少,所以液滴直径减小。对比图3、6、8a,可以看出,在系统供液速率、PEO溶液浓度和针尖伸缩频率3个参数之中,PEO溶液浓度对沉积物的直径影响是最大的。

喷头内部针尖的伸缩运动是该EHD喷印系统的独特之处,针尖伸缩运动频率与喷印系统喷射频率之间的关系,如图8b为PEO溶液质量分数,供液速率,收集板的移动速度和供给电压分别是10%,120 $\mu\text{L}/\text{h}$,20 mm/s和2.75 kV时的拟合方程式:

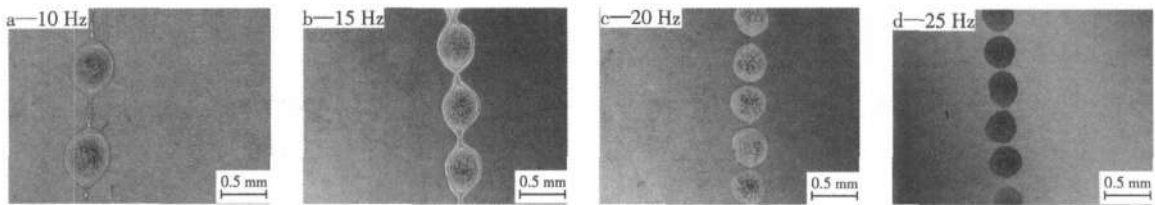


图7 不同针尖频率对应的珠状结构图

Fig.7 Deposition morphologies under different frequencies of needle

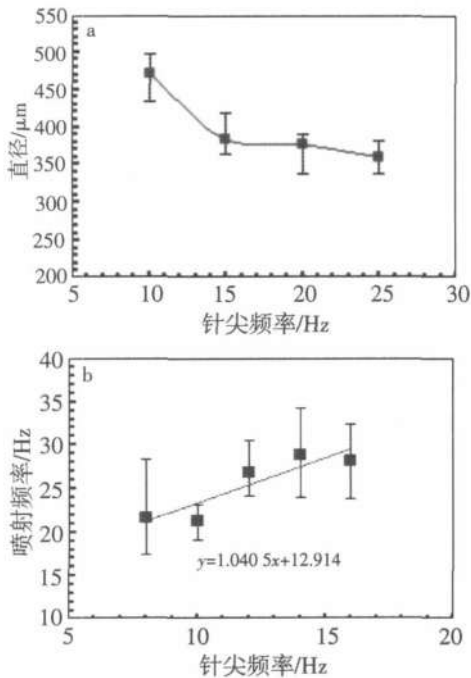


图8 针尖频率与沉积物形态关系图

Fig.8 Relationship between deposition morphology and frequency of needle

$$y = 1.0405x + 12.914 \quad (1)$$

其中: x 代表针尖的伸缩频率; y 代表喷头喷射频率。可以得出:在该EHD喷印系统中,喷射频率与针尖频率有直接的关系,它们之间有着较好的线性相关性,可以方便通过控制针尖频率控制喷射频率。由此可见,只要通过外部系统改变电磁继电器的动作使针尖按一定规律伸缩运动,就可以达到控制喷射系统按照需求进行喷射的目的。

4 结论

设计了一种具有可伸缩针尖的EHD喷印头。收集板的移动速度可以改变珠状结构形态;在珠状结构

中,随着供液速率的增大、PEO溶液浓度的减小或者针尖伸缩运动频率的减小,珠子直径均会增大。此外,该种EHD喷印头的喷射频率与可伸缩针尖的运动频率之间有很好的线性相关性,方便人们通过改变针尖频率来控制系统喷射频率,从而精确地控制EHD喷印。

4 参考文献

- [1] Wu Ning, Russei W B. Micro- and nano-patterns created via electrohydrodynamic instabilities [J]. *Nano Today*, 2009, 4 (2):180-192.
- [2] Huang Z M, Zhang Y Z, Kotaki M, et al. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63 (15):2223-2253.
- [3] Lee D Y, Shin Y S, Park S E, et al. Electrohydrodynamic printing of silver nanoparticles by using a focused nanocolloid jet [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(8):0819051-0819053.
- [4] Paine M D, Alexander M S, Smith K L, et al. Controlled electrospray pulsation for deposition of femtoliter fluid droplets onto surfaces [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(3):315-324.
- [5] Li J L. On the meniscus deformation when the pulsed voltage is applied [J]. *Journal of Electrostatics*, 2006, 64(1):44-52.
- [6] Huang Yongfang, Zheng Gaofeng, Xu Lei, et al. Bead-on-string structure formed by electrohydrodynamic printing [C]. 5th IEEE Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, China: Xiamen, 2010:537-540.
- [7] Xu L, Wang X, Lei T P, et al. Electrohydrodynamic deposition of polymeric droplets under low-frequency pulsation [J]. *Langmuir*, 2011, 27(10):6541-6548.
- [8] Reneker D H, Yarin A L. Electrospinning jets and polymer nanofibers [J]. *Polymer*, 2008, 49(10):2387-2425.