http://pmse.scu.edu.cn

熔体静电纺丝纤维细化技术研究进展

王宇航[1]，杨卫民[1,2]，李好义[1]，谭 晶[1]
（1.北京化工大学 机电工程学院；2. 北京化工大学 有机无机国家重点实验室，北京 100029）

摘要：聚合物熔体静电纺丝技术是纳米纤维绿色高效制备的重要途径。但受限于熔体黏度高、导电性差和射流冷却快，制备纤维的平均直径往往分布在数百纳米至几十微米，远未达到直径小于100 nm的纳米材料。熔体电纺过程涉及驱动力、表面张力、熔体黏度和射流热交换速率等多种影响成型纤维直径的因素，各因素间相互影响，这使得熔体静电纺丝的纤维细化机理极其复杂。为此，文中从熔体泰勒锥形成和射流牵伸细化2个阶段出发，归纳分析了现有熔体电纺纤维细化研究的方法、工艺及材料体系对纤维直径的影响。研究表明，通过装置设计、材料体系调控和工艺优化来缩小泰勒锥尺寸、增大驱动力、降低熔体黏度并尽量延长射流牵伸细化时间是纤维细化的关键。射流运动状态与温度变化检测系统的设计、高电导率低黏度绿色纺丝专用料的开发以及吹-吸热气流辅助纺丝系统的设计等是熔体电纺纤维细化的研究趋势。

关键词：熔体静电纺丝；泰勒锥；射流牵伸细化；熔体黏度；驱动力
中图分类号：TQ340.64 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）08-0174-07

聚合物纳米纤维具备高比表面积和高孔隙率等特点[1]，相比于传统微米纤维，更容易发挥功能纳米材料的效能，在高效过滤、伤口愈合、组织再生、能源传感等领域表现出优异的性能[2,3]。广义的纳米纤维指的是直径小于1000 nm的亚微米纤维，其常见制备方法有海岛纺丝法、熔体/溶液静电纺丝法、闪蒸法、熔喷法和模板法等[4,5]。其中，静电纺丝技术具有可稳定制备连续长纤维、可纺原料丰富、装置及操作简单等优点，得到学术界与工业界的广泛研究，目前已实现静电纺亚微米纤维制备的产业化以及纤维的多功能化。但受限于纤维细化机理不明，静电纺丝技术仍难以实现平均直径小于100 nm的纳米纤维材料的高效绿色制备。

溶液/熔体静电纺丝法是聚合物溶液/熔体在静电力、重力、粘滞阻力和自身表面张力作用下，先形成泰勒锥，再从泰勒锥末端喷出射流，并牵伸细化成纤维的过程。其中溶液静电纺丝由于溶液电导率高、电子移动自由，使得溶质在复杂鞭动过程中很容易被牵伸至两三百纳米到几微米的纤维。但聚合物溶剂一般为氯仿、丙酮等有机溶剂，会造成严重的安全生产风险和环境保护隐患[6]。此外，对于商业广泛应用的聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）和聚酯（PET）等热塑性材料，常温下没有合适的溶剂。而熔体静电纺丝过程不涉及溶剂，原料完全转化成纤、产率高[7]、生产过程安全环保，是纳米纤维安全高效绿色制备的重要途径。但受熔体黏度高、导电性差，射流冷却快等限制造成射流鞭动弱、细化难，这使得相比于溶液电纺纤维，传统熔体电纺方法制备的纤维更粗，直径通常为数百纳米到几十微米[8,9]。

经过二十多年的发展，研究人员通过气流辅助、热环境和材料改性等方法进一步细化了纤维直径，但纤维平均直径仍未达到100 nm。聚合物熔体电纺过程中涉及阻碍聚合物分子链相对运动的粘滞阻力和表面张力、促使射流细化的电场力等驱动力、熔体

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0150
收稿日期：2023-08-19
基金项目：国家重点研发计划（2022YFB3804204）
通讯联系人：杨卫民，主要从事高分子聚合物成型加工原理与产业化研究，E-mail: yangwm@mail.buct.edu.cn

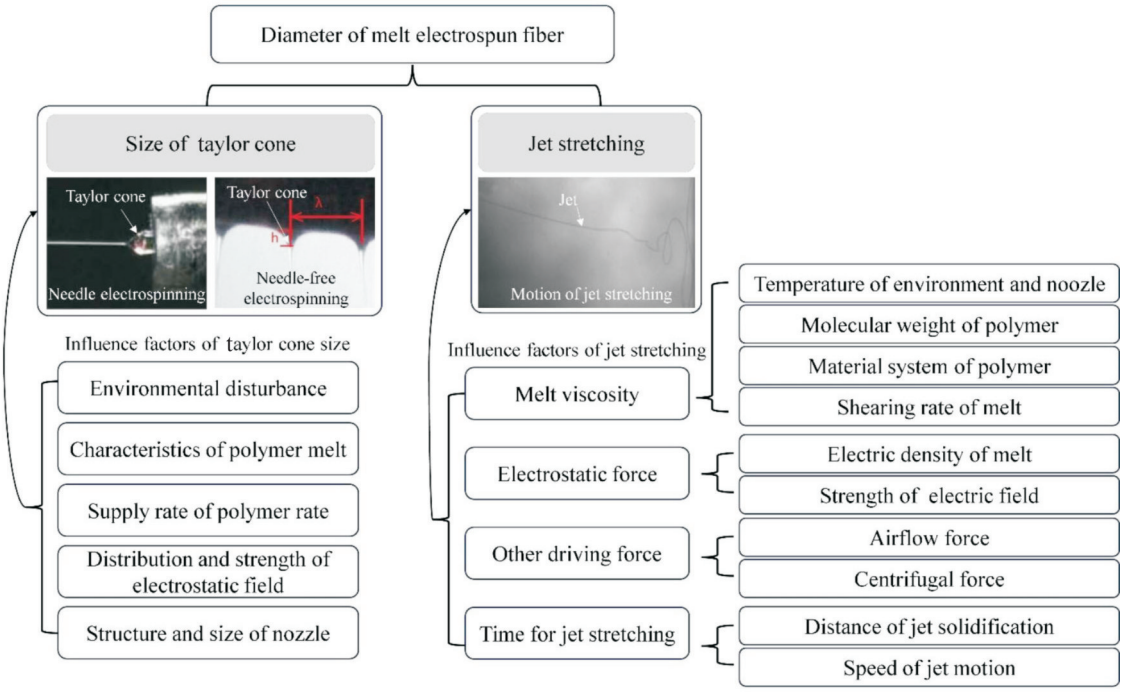


Fig. 1 Diagram of influencing factors on the diameter of polymer melt electrospinning fibers

射流与外界环境的热交换速率、射流牵伸细化时间和泰勒锥的尺寸与形状等多种影响成型纤维直径的因素，且各因素间相互影响。这使得熔体静电纺丝的纤维细化机理的研究极其困难，单一因素的实验研究难以得到统一的规律。为此，本文从熔体泰勒锥形成和射流牵伸细化2个阶段出发（如Fig.1），归纳分析现有熔体静电纺丝技术的装置结构设计、工艺及材料体系对纤维直径的影响，以期增加对熔体静电纺丝法制备纳米纤维机制及发展方向的认识，为聚合物100 nm纤维安全环保高效制备技术的发展提供一定的参考。

1　熔体泰勒锥

稳定熔体电纺过程中熔体从泰勒锥演变至射流，再进一步牵伸细化冷却成纤。因此，泰勒锥的尺寸与形状影响着成型纤维的直径。但由于高温高电场强度下熔体状态难以监测、熔体特性随时间变化、熔体电纺泰勒锥与射流的过渡区间难以界定以及熔体电纺装置相对复杂等因素的限制，目前研究人员对熔体泰勒锥形状及尺寸的研究较少。此外，熔体的高黏度与低电导率使溶液泰勒锥的相关研究难以直接应用于指导熔体静电纺丝。因此，本节根据泰勒锥形成原理，将熔体静电纺丝分为针头静电纺丝与无针静电纺丝，并讨论分析2种技术下熔体电纺泰勒锥的部分影响因素。

针头熔体电纺是针头强迫挤出的熔体在多场作用下形成一个泰勒锥。增大的施加电压会增大泰勒锥的曲率，使其细化程度增加，使得成型纤维直径降低。Liu等[10]在PP熔体针头电纺研究中，将施加电压从20 kV增大到35 kV，使泰勒锥曲率从169 m^{-1}增大到910 m^{-1}，使得成型纤维直径从32 μm降低到13 μm。泰勒锥初始直径一般为针头内径。因此，针头内径的适度降低，会降低成型纤维直径。Zhou等[11]保持熔体供给速率为0.01 mL/min，将针头直径从0.84 mm降低到0.13 mm，使得聚乳酸（PLA）纤维直径从4.3 μm降低到1.7 μm。但针头直径过细会导致针内压力激增，使得微流量难以精确控制，这对供料系统提出了严格的要求。此外，高压力往往导致大熔体供给速率，这使得纤维易变粗[11]。在针头溶液电纺中，能明显观测到随供给速率增大，泰勒锥尺寸增加[12]，使得纤维直径变粗。而在熔体电纺中熔体供给速率增大，纤维直径变粗是普遍的规律[11]，熔体供给速率的增大造成纤维变粗的原因应同样为泰勒锥尺寸增大。熔体温度对泰勒锥尺寸也有影响。Mu等[13]研究200 ℃，300 ℃和320 ℃不同温度下的PP熔体针头电纺，发现在320 ℃下泰勒锥尺寸最小、纤

维最细。

无针熔体电纺是开放式喷头内熔体极化后相互排斥形成泰勒锥。无针熔体电纺中喷头结构影响着电场分布，进而影响着泰勒锥的尺寸。Morikawa等[14]在直径1 mm导线上涂覆聚己内酯（PCL），以导线边缘作为纺丝头制备纤维。发现相比于内径1 mm的针头电纺，导线边缘产生了更小的泰勒锥，从而制备出比针头电纺更细的纤维。无针熔体静电纺丝中泰勒锥尺寸可以通过射流间距来反映（如Fig.1），喷头周长不变的条件下，泰勒锥数越多，泰勒锥尺寸越小。Li等[15]设计了外锥面与内锥面2种结构的无针电纺喷头，发现在相同工艺条件下，外锥面的射流间距更小，产生的纤维更细。还发现泰勒锥数量与尺寸还受到熔体供给速率、锥面尖端最大电场强度、熔体温度等因素的影响。这是由于无针电纺中泰勒锥的数量与熔体单位体积电荷成正相关，与熔体表面张力成负相关，而熔体供给速率的减小、最大电场强度的增加均会提高单位体积电荷密度，熔体温度的上升往往会降低表面张力。Chen等[16]设计了槽状的无针电纺装置，发现了类似的规律。对于自上而下布置的无针电纺装置，熔体黏度过大会造成喷头处流量难以控制，不利于纤维细化。这是由于在重力下熔体自流流率会随熔体黏度降低而增大，使得泰勒锥尺寸增大，而熔体黏度的降低有利于射流的牵伸变细，2种因素协同作用使熔体黏度的降低对纤维细化的影响有极限。

2 射流的牵伸细化阶段

熔体静电纺丝过程中射流的牵伸细化要依靠驱动力克服粘滞阻力，驱动高分子链在一段时间内发生相对运动。因此，增大驱动力、降低熔体粘滞阻力的同时延长牵伸细化时间，可有效增大射流牵伸细化程度。射流牵伸细化的主要驱动力是静电力，随着熔体静电纺新方法的开发，又引入了气流力与离心力。牵伸细化时间取决于射流凝固距离与射流运动速度。熔体粘滞阻力可通过熔体黏度反映。

2.1 静电驱动力

2.1.1 电场强度：静电力的大小与聚合物熔体单位体积电荷密度以及电场强度往往呈现正相关。增大施加电压是提高电场强度的主要方法。Lyons等[17]将施加电压从20 kV升高到30 kV，使电场强度从10 kV/cm升高到15 kV/cm，PP纤维直径从12 μm降低到3.55 μm。Chen等[18]将施加电压从20 kV增大到35 kV，使聚苯硫醚（PPS）纤维直径从6.76 μm降低到1.28 μm。电压过大可能会影响射流牵伸时间，导致纤维直径变粗。如Feng等[19]将电压从50 kV升高到90 kV，仅在70 kV时PP纤维的直径就达到最细的7 μm，随着电压继续增大到90 kV，纤维直径反而增大并稳定在8 μm左右。常规熔体电纺装置可施加的电场强度最大值为空气击穿场强，当施加电场强度超过此值，会发生静电击穿现象，甚至会中断纺丝过程。真空纺丝环境可进一步提高施加电压极限[20]。

降低纺丝距离也可提高电场强度，但同时影响着射流细化时间，当纺丝距离过小，由于射流未能充分牵伸细化往往较粗，甚至可能会造成纤维间相互粘连，失去纤维的形貌。随着纺丝距离的增大，射流牵伸时间延长，使纤维变细。Nayak等[21,22]维持电压在48 kV，将纺丝距离从12 cm增加到15 cm，PP纤维直径从3.9 μm降低到3.1 μm。当纺丝距离过大，电场强度变小，使射流受到的静电牵伸力减弱，纤维变粗。Qin等[23]发现随着纺丝距离从2 cm增加到14 cm，PCL纤维直径先从44.97 μm降低到21.36 μm，随后又增加到46.59 μm。

2.1.2 单位体积电荷密度：纯聚合物熔体的单位体积电荷密度取决于极化电荷量与熔体量，常通过熔体射流电导率来表征。聚合物溶液含有自由移动的离子，而熔体仅依靠极化电荷，因此熔体电导率相比于聚合物溶液小10个数量级左右[22,24]。为此，研究者采用极性填料，如氯化钠、油酸钠和硬脂酸盐等改性聚合物，增加熔体内自由移动的离子，提高熔体的单位体积电荷密度，进而细10^{-12}化纤维。Nayak等[22]分别通过7%的油酸钠和7%的氯化钠共混改性PP，尽管聚合物的黏度上升，但导电率从10^{-12} S/m分别升高到10^{-8} S/m和10^{-7} S/m，使纤维直径分别从3.39 μm将低到0.606 μm和0.78 μm。Malakhov等[25]通过硬脂酸钠改性PP，使PP熔体电导率提升5倍，协同硬脂酸盐的降黏效果，使PP纤维直径从23 μm降低到1.2 μm。极性添加剂的混入增大了熔融聚合物的导电性，促进射流的牵伸细化，但随着极性填料含量的增多，易出现填料团聚、分布不均等现象。过大的导

电性还会造成射流传输电流超过静电电源的临界电流值,导致纺丝终止。射流剧烈的鞭动被认为纤维细化的重要原因。Zhou等[11]通过高速摄像观测到,随着熔体供给速率的减小,射流鞭动加剧,这可能是射流熔体量减少导致单位体积电荷量增多,促使射流易发生瑞利不稳定现象。

2.2　其他驱动力

2.2.1　气流力:随着研究人员对纤维细化机理认识的加深,在熔体静电纺丝过程中引入了气流力与离心力,在细化纤维直径的同时,还增大了纤维产率。气流力取决于气流速度沿纺丝方向分量和射流速度的差值,并与差值呈正相关。当气流速度大于电场作用下熔体射流速度,气流会对射流表面施加剪切力[26],减小熔体射流直径。现有的气流辅助装置有吸气流辅助和吹气流辅助[27]。Zhmayev等[28]最先提出吹气流辅助的熔体静电纺丝,在喷丝孔周围设置气流孔,使得压缩气体从气流孔喷出,细化电纺射流。Chen等[29]同样利用吹气流细化熔体电纺纤维,制备了直径1.5 μm的PP纤维。但吹气流的紊乱程度大,对射流的剪切作用不稳定,因此吹气流速度的增加对纤维细化的增强效果并不显著[28]。Yang等[29]首先提出吸气流辅助的熔体微分静电纺丝,在电极铜板的中心孔处放置吸气流装置,使多射流在纺丝区域的后半段受到吸气流的剪切作用。Ma等[30]研究吸气流速度对纤维直径的影响,随吸气流速度从10 m/s上升到30 m/s,PP纤维直径从2.2 μm降低到500 nm。

2.2.2　离心力:离心力通过模头高速旋转加载到熔体上,离心力与模头的转速呈正相关[31]。Liu等[32]在4000 r/min,45 kV下制备出平均直径0.79μm的PP纤维。模头转速的增大,会增加熔体供给速率,使得泰勒锥尺寸增大,还会提高射流初始速度,使得射流细化时间缩短,2种因素对纤维直径的细化起相反作用,因此通过装置设计及工艺调控,尽量提高离心力,减小对其他因素的影响是离心熔体电纺的关键。此外,模头的高转速对装置的动平衡提出了高要求[6]

2.3　熔体的粘滞阻力

熔体黏度越大,分子链缠结越紧密,越难以发生相对运动,使得射流的牵伸变细困难。当黏度过大时,甚至会无法纺丝,但黏度过小,使分子链间无法保持连接,又会导致串珠结构[33]。因此,黏度是影响纤维细度与特性的重要参数。常通过熔体流动指数或特性黏度来表征。研究者目前从材料特性(相对分子质量与改性剂)、熔体温度(喷头温度与环境温度)等方面调控熔体黏度。此外,对于高聚物熔体,剪切变稀也是可用于降低熔体黏度,降低纤维细度[18]。

2.3.1　材料特性:聚合物相对分子质量大小影响聚合物熔体黏度的重要因素。Kadomae等[34]在180 ℃分别对2.05×10^5(M_w)和1.96×10^4(M_w)的PP进行熔体电纺,高分子量PP由于黏度过大(1200 Pa·s)无法挤出针头,难以纺丝,低分子量PP具有极小的黏度0.8 Pa·s,并制备得到直径2.5 μm的纤维。Lyons等[17]发现随着重均分子量由5.8×10^5降低到1.2×10^4时,PP纤维直径由466 μm降低到3.55 μm。为降低熔体黏度,研究人员将分子链润滑剂与分子链剪切剂等改性剂添加到聚合物基体内。Dalton[35]利用lrgatec将PP黏度从75 Pa·s降低到33 Pa·s,使PP纤维直径从35.6 μm减小到840 nm。Nayak等[21]研究了聚乙二醇(PEG)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)对熔体降黏的效果,在200 ℃时,7%PEG和7%PDMS将PP熔体黏度从65 Pa·s分别降低到42 Pa·s和35 Pa·s,使纤维直径从3.39 μm降低到3.25 μm和1.49 μm。Qin等[36]采用乙酰柠檬酸三丁酯(ATBC)润滑PLA,在240 ℃时,PLA随ATBC含量从0%提高到6%,黏度从18 Pa·s降低到1.5 Pa·s,电纺出的纤维直径从1.76 μm降低到236 nm。改性剂可能会导致材料体系分解点降低,从而对纺丝工艺产生影响,如硬脂酸钠造成PLA的提前降解,导致纺丝温度在195 ℃时便会有大量的熔滴[37],因此,在选择改性剂时,除了要考虑对纤维特性的影响外,还要考虑改性剂的物性转变点和对材料体系可加工性的影响,并优先考虑绿色环保安全无毒的改性剂。

聚合物分子链的空间结构对纤维直径的影响很大。Ogata等[38]研究了聚乙烯-聚乙烯醇(EVAL)共聚物中乙烯单体含量对纤维直径的影响,发现随着乙烯单体含量的增加,纤维直径呈现先增加后降低的趋势,但这个趋势与黏度的变化无关。熔体电纺过程中,等规立构PP比无规立构PP更容易纺出更细的

纤维，PP分子结构同样与熔体黏度无关[17,34]。目前分子结构对纤维直径的影响机理尚不明确。

2.3.2 熔体温度：随着熔体温度升高，分子链间的运动加快，促进分子链的解缠，导致熔体黏度降低，有利于纤维变细。因此，可通过提高喷头温度来提高初始熔体温度，细化纤维。Zhou等[11]将喷头温度从185 ℃提升到240 ℃，使PLA的黏度从1100 Pa·s降低到120 Pa·s，纤维直径从4.3μm降低到1.9 μm，但当进一步温度升高到255 ℃，熔体黏度过低难以维持连续射流的形状，从而产生串珠现象。Morikawa等[39]将空气纺丝氛围替换为氮气纺丝氛围，使低密度聚乙烯（LDPE）的分解温度从310 ℃（空气氛围）提高到360 ℃（氮气氛围），通过将针头温度从300 ℃提升到360 ℃，使纤维直径从25.7 μm降低到9.4 μm。Ogata等[33]设计了激光线型熔体电纺装置，激光功率的上升使熔体黏度大幅降低，但熔体自流速率的上升增大了泰勒锥尺寸，2种因素的协同作用使纤维直径呈不规律变化。

在熔体电纺中射流与外界环境进行热交换，使射流温度持续降低至室温，熔体黏度持续升高，当温度低于玻璃化温度，射流无法细化。因此，可通过设置高纺丝环境温度减少熔体射流向环境的热量传输，减缓熔体温度的降低。此外，高环境温度下，射流的凝固点更靠近收集板[40]，可延长射流的牵伸细化时间。Zhou等[11]将纺丝环境温度从25 ℃升高到80 ℃，PLA平均纤维直径从1 μm降低到800 nm，并在高速摄像下观测到射流鞭动更剧烈。Eduard等[28]通过高温吹气流对射流进行剪切拖拽和环境保温，研究发现热气流的保温作用使纤维直径细化20倍，而气流剪切细化作用仅使纤维细化1倍。

2.4 射流牵伸细化时间

射流的牵伸细化时间与射流凝固距离呈正相关，与射流运动速度呈负相关。随着时间延长，射流的牵伸细化程度越充分，成型纤维越细。但由于熔体电纺射流的运动速度快，常规高速摄像机难以捕捉，使得射流运动速度无法直接观测。射流过细产生的热辐射较小，红外照相机难以拍摄到射流的温度分布，使得射流凝固距离也无法直接观测到。因此，目前关于熔体电纺射流运动状态的研究极少。纺丝距离、环境温度以及射流所受驱动力大小均会对射流凝固距离与运动速度产生影响，但无法定量解释。

3 结语与展望

聚合物熔体静电纺丝技术是纳米纤维绿色高效制备的重要途径。针对聚合物熔体黏度高、导电性差、射流冷却快等限制造成射流鞭动弱、细化难等问题，研究者通过电压、纺丝距离和针头温度等工艺参数的调控、向聚合物基体添加极性填料或分子链剪切剂、提高环境温度和施加气流力等措施细化纤维至数百纳米。原理是缩小泰勒锥尺寸、增大驱动力、降低熔体黏度并延长射流牵伸细化时间。但目前熔体静电纺丝技术仍面临着纤维平均直径未达100 nm，泰勒锥尺寸与形状的影响因素的研究不足，射流运动状态与运动过程中熔体特性变化难检测等难题。为此，本文提出以下熔体电纺纤维细化措施以供参考：(1) 构建纺丝区域热环境，将高温吹气流与吸气流相结合细化纤维；(2) 进行装置结构设计包括供料系统、喷头结构与装置布局等，实现微小流量的独立精准控制，避免自流的影响；(3) 系统研究泰勒锥尺寸及稳定性相关影响因素，开发空间精准测温装置与射流运动状态检测系统，对泰勒锥与射流牵伸细化阶段进行准确测量；(4) 开发高电导性低黏度绿色聚合物材料体系，也可采用水溶性材料与聚合物共混电纺，通过后续萃取实现纳米纤维的细化。

参考文献：

[1] Kenry, Lim C T. Nanofiber technology: current status and emerging developments[J]. Progress in Polymer Science, 2017, 70: 1-17.

[2] 肖迎波, 何佳城, 袁凯, 等. 基于静电纺丝碳纳米纤维的超级电容器电极材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程，2021, 37(1): 317-326.
Xiao Y B, He J C, Yuan K, *et al*. Progress of electrode materials for supercapacitors based on electrostatically spun carbon nanofibers[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(1): 317-326.

[3] 杨宇晨, 覃小红, 俞建勇. 静电纺纳米纤维功能性纱线的研究进展[J]. 纺织学报, 2021, 42(1): 1-9.
Yang Y C, Qin X H, Yu J Y. Research progress of electrostatically spun nanofiber functional yarns[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(1): 1-9.

[4] 王紫行, 伍先安, 陈明军, 等. 聚合物熔体静电纺纳米纤维技术研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(3): 29-32.
Wang Z X, Wu X A, Chen M J, *et al.* Advances in polymer melt electrostatic spinning nanofiber technology[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(3): 29-32.

[5] 张翔, 伍先安, 李长金, 等. 基于微纳层叠技术的聚合物纳米纤维制备及应用研究进展[J]. 中国塑料, 2022, 36(10): 159-166.
Zhang X, Wu X A, Li C J, *et al*. Progress in the preparation and application of polymer nanofibers based on micro- and nano-layered technology[J]. China Plastics, 2022, 36(10): 159-166.

[6] 陈明军, 张有忱, 杜琳, 等. 聚合物熔体法制备纳米纤维技术研究现状[J]. 纺织学报, 2018, 39(12): 166-174.
Chen M J, Zhang Y Z, Du L, *et al.* Current research status of nanofiber preparation technology by polymer melt method[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(12): 166-174.

[7] Brown T D, Dalton P D, Hutmacher D W. Melt electrospinning today: An opportune time for an emerging polymer process[J]. Progress in Polymer Science, 2016, 56: 116-166.

[8] Bachs- Herrera A, Yousefzade O, Del Valle L J, *et al.* Melt Electrospinning of Polymers: Blends, Nanocomposites, Additives and Applications[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 1808.

[9] Ibrahim Y, Hussein E, Zagho M, *et al.* Melt electrospinning designs for nanofiber fabrication for different applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20: 2455.

[10] Liu K, Zheng Y, Newton M A A, *et al.* Simulation and experimental study of Taylor cone and jet evolution process parameters in electrohydrodynamics[J]. Textile Research Journal, 2022, 93: 004051752211406.

[11] Zhou H, Green T B, Joo Y L. The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts[J]. Polymer, 2006, 47: 7497-7505.

[12] Singh S K, Sarma S. Taylor cone height as a tool to understand properties of electrospun PVDF nanofibers[J]. Journal of Electrostatics, 2022, 120: 103770.

[13] Mu X, Zheng Y, Li X, *et al*. Effects of temperature on melt electrospinning: experiment and simulation study[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22: 964-971.

[14] Morikawa K, Vashisth A, Grimme C J, *et al.* Wire melt electrospinning of thin polymeric fibers via strong electrostatic field gradients[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 304: 1800417.

[15] Li H, Chen H, Zhong X, *et al*. Interjet distance in needleless melt differential electrospinning with umbellate nozzles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131: 40515.

[16] Chen M, Zhang Y, Chen X, *et al.* Polymer melt differential electrospinning from a linear slot spinneret[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 48922.

[17] Lyons J, Li C, Ko F. Melt- electrospinning part I: processing parameters and geometric properties[J]. Polymer, 2004, 45: 7597-7603.

[18] Chen Q, Liu Y, Deng H, *et al.* Melt differential electrospinning of polyphenylene sulfide nanofibers for flue gas filtration[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60: 2887-2894.

[19] Hao M F, Liu Y, He X T, *et al.* Factors influencing diameter of polypropylene fiber in melt electrospinning[J]. Advanced Materials Research, 2011, 221: 129-134.

[20] Mitchell S B, Sanders J E. A unique device for controlled electrospinning[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2006, 78A: 110-120.

[21] Nayak R, Padhye R, Kyratzis I L, *et al.* Effect of viscosity and electrical conductivity on the morphology and fiber diameter in melt electrospinning of polypropylene[J]. Textile Research Journal, 2012, 83: 606-617.

[22] Nayak R, Kyratzis I L, Truong Y B, *et al.* Melt-electrospinning of polypropylene with conductive additives[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47: 6387-6396.

[23] Qin C C, Duan X P, Wang L, *et al.* Melt electrospinning of poly (lactic acid) and polycaprolactone microfibers by using a hand-operated Wimshurst generator[J]. Nanoscale, 2015, 7: 16611-16615.

[24] Wang X, Zhang K, Zhu M, *et al*. Continuous polymer nanofiber yarns prepared by self- bundling electrospinning method[J]. Polymer, 2008, 49: 2755-2761.

[25] Malakhov S N, Belousov S I, Orekhov A S, *et al.* Electrospinning of nonwoven fabrics from polypropylene melt with additions of stearates of divalent metals[J]. Fibre Chemistry, 2018, 50: 27-32.

[26] Kwon Y, Yoon J, Jeon S, *et al.* Numerical simulation of gas - assisted polymer - melt electrospinning: parametric study of a multinozzle system for mass production[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60: 2111-2121.

[27] Zhang C, Chen M, Li H, *et al*. The critical roles of the gas flow in fabricating polymer nanofibers: a mini- review[J]. Advanced Fiber Materials, 2021, 4: 162-170.

[28] Zhmayev E, Cho D, Joo Y L. Nanofibers from gas- assisted polymer melt electrospinning[J]. Polymer, 2010, 51: 4140-4144.

[29] Chen H, Li H, Ma X, *et al.* Large scaled fabrication of microfibers by air- suction assisted needleless melt electrospinning[J]. Fibers and Polymers, 2016, 17: 576-581.

[30] Ma X, Zhang L, Tan J, *et al.* Continuous manufacturing of nanofiber yarn with the assistance of suction wind and rotating collection via needleless melt electrospinning[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134: 44820.

[31] Li X, Liu J, Lu Y, *et al.* Melting centrifugally spun ultrafine poly butylene adipate-*co*-terephthalate (PBAT) fiber and hydrophilic modification[J]. RSC Advances, 2021, 11: 27019-27026.

[32] Liu Y, Tan J, Yu S, *et al*. High - efficiency preparation of polypropylene nanofiber by melt differential centrifugal electrospinning[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 137: 48299.

[33] Ogata N, Yamaguchi S, Shimada N, *et al*. Poly(lactide) nanofibers produced by a melt- electrospinning system with a laser melting device[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104: 1640-1645.

[34] Kadomae Y, Maruyama Y, Sugimoto M, *et al*. Relation between tacticity and fiber diameter in melt- electrospinning of polypropylene[J]. Fibers and Polymers, 2009, 10: 275-279.

[35] Dalton P D, Grafahrend D, Klinkhammer K, *et al.* Electrospinning of polymer melts: phenomenological observations[J]. Polymer, 2007, 48: 6823-6833.

[36] Qin Y, Cheng L, Zhang Y, *et al*. Efficient preparation of poly (lactic acid) nanofibers by melt differential electrospinning with addition of acetyl tributyl citrate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135: 46554.

[37] Koenig K, Hermanns S, Ellerkmann J, *et al.* The effect of additives and process parameters on the pilot- scale manufacturing of polylactic acid sub- microfibers by melt electrospinning[J]. Textile Research Journal, 2020, 90: 1948-1961.

[38] Ogata N, Lu G, Iwata T, *et al.* Effects of ethylene content of poly (ethylene- co- vinyl alcohol) on diameter of fibers produced by melt- electrospinning[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104: 1368-1375.

[39] Morikawa K, Vashisth A, Bansala T, *et al.* Melt electrospinning polyethylene fibers in inert atmosphere[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305: 2000106.

[40] Xu H, Yamamoto M, Yamane H. Melt electrospinning: Electrodynamics and spinnability[J]. Polymer, 2017, 132: 206-215.

Development of Melt Electrospun Fiber Thining Technology

Yuhang Wang[1], Weimin Yang[1,2], Haoyi Li[1], Jing Tan[1]

(*1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology; 2. State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

ABSTRACT: Polymer melt electrospinning is a crucial approach for the green and efficient preparation of nanofibers. However, due to limitations such as high melt viscosity, poor electrical conductivity, and rapid jet cooling, the average diameter of the resulting fibers tends to range from hundreds of nanometers to tens of micrometers, which falls short of achieving nanomaterials with diameters less than 100 nm. The process of melt electrospinning involves various factors that influence fiber diameter, including driving force, surface tension, melt viscosity, and jet heat exchange rate. These factors interact with each other in a highly complex manner, making the fiber refinement mechanism in melt electrospinning extremely intricate. To address this issue comprehensively, this paper focused on two stages: Taylor cone formation and jet drafting refinement. It provided an inductive analysis of existing research mechanisms related to fiber refinement in melt electrospinning processes as well as explored relevant processes and materials involved. The study reveals that key aspects for achieving fiber refinement lie in device design aimed at reducing Taylor cone size; regulation of material systems to increase driving force while decreasing melt viscosity; and attempts to extend the time frame for jet drafting refinement. Additionally suggested research trends include designing a system for monitoring jet motion state and temperature change; developing special materials with high conductivity and low viscosity suitable for green spinning; as well as designing a blowing-absorbing airflow-assisted electrospinning system.

Keywords: melt electrospinning; Taylor cone; jet drafting refinement; melt viscosity; driving force