

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.08.010

熔体静电纺丝装置中内外锥面喷头电场的研究

刘兆香,李好义,陈宏波,丁玉梅,杨卫民

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

摘要:研制了一种新型熔体静电纺丝装置,研究其纺丝喷头为内外锥面不同形状时的电场分布规律及电场对纺丝过程和纤维直径的影响。采用有限元法(ANSYS软件)模拟纺丝电场,并与实验对照分析,发现两种情况下电场分布基本相同,外锥面喷头的最大场强明显比内锥面喷头大,纤维直径也较小,同时发现纺丝距离和外加电压对电场和纤维直径有较大影响。为进一步细化纤维,对内锥面喷头装置通入热风辅助纺丝,发现纺得纤维较外锥面更细,直径在10 μm 以内,最小平均直径约为3 μm 。

关键词:熔体静电纺丝;内外锥面喷头;电场;纤维直径

中图分类号: TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)08-0047-05

Study of Electric Field for Inner and Male Cone Nozzle in Melt Electrospinning Device

Liu Zhaoxiang, Li Haoyi, Chen Hongbo, Ding Yumei, Yang Weimin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : A new melt electrospinning device was developed. The electric field distribution of nozzle shapes of inner and external cone and effects of electric field on the process and fiber diameter were studied. The finite-element model with ANSYS software was built and a series of experiments were made. The results show that two kinds of nozzles have the same distribution of electric field basically, but the maximum field strength of external cone nozzle is significantly larger than that of inner cone nozzle, so its fiber diameter is also smaller. What's more, the spinning distance and applied voltage have great influence on electric field and fiber diameter and fiber diameter. In order to obtain thinner fibers, the inner cone nozzle device assisted by hot gas was carried out and resultant fiber diameter is kept less than 10 μm , and the minimum average fiber diameter is about 3 μm , which are smaller than that made by external cone nozzle.

Keywords : melt electrospinning ; inner and male cone nozzle ; electric field ; fiber diameter

目前,静电纺丝法作为一种制备超细纤维的方法,已经取得较多研究成果。静电纺丝法包括溶液静电纺丝法和熔体静电纺丝法两种,溶液静电纺丝法在纺丝过程中有溶剂挥发,对环境有一定影响,而且所得纤维多孔、不光滑;而熔体静电纺丝法在纺丝过程中无溶剂挥发,不仅环保、高效而且所得纤维光滑^[1],因此,熔体静电纺丝法不断得到诸多研究人员的青睐^[2]。熔体静电纺丝法的原理是:经熔融后的聚合物在电场力作用下,克服表面张力,形成泰勒锥,当电压增大到一定值时,泰勒锥形成喷射射流,并不断被拉伸形成纤维,但是,由于聚合物熔体的黏度较高,且需要加热,难以控制,因此获得纳米纤维比较困难^[3],为控制纤维直径,提高产量,许多研究人员着力于通过控制电场来细化纤维,增大产量。Yang Ying等^[4]通过在针头上添加辅助板研究了电场分布对静电纺丝射流鞭动角度、射流长度、纤维直

径等的影响,得出纤维直径不仅取决于原材料性质而且取决于电场分布;Hao Mingfeng等^[5]利用自行设计的静电纺丝设备,在两个带电平行金属板产生的电场下,研究了聚丙烯的静电纺丝过程,两个带电平行金属板可产生稳定的电场,且两个带电平行金属板的面积对电场强度和纤维直径有较大影响。可见,电场分布对于纺丝过程影响较大,不仅影响纤维下落的鞭动过程,而且在一定程度上也能控制纤维的直径,但是,大部分的研究都是基于单针头的纺丝研究,其产量低,不利于产业化。

电场是影响纤维下落过程的重要因素,为考察电场对纤维下落过程的影响,并提高产量,笔者设计了不同的微分型纺丝喷头,并在自行研制的熔体静电纺丝装置上进行了实验研究,通过实验和模拟对

联系人:刘兆香,硕士,主要从事熔体静电纺丝研究

收稿日期:2013-05-18

照,分析了电场的分布规律和不同纺丝喷头对电场的影响,以及电场对纺丝过程和纤维直径的影响,以期对纤维的细化和纺丝产业化起到一定的铺垫和推动作用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚丙烯:PP6820,熔体流动速率为 2 000 g/(10 min),上海伊士通新材料发展有限公司。

1.2 主要仪器与设备

熔体静电纺丝装置:自制,其原理图如图 1 所示。该装置包括挤出输料装置、纺丝喷头、温度控制部分、高压电供电装置、接收板等。其中,加热部分采用加热圈,通过温控箱和温度传感器检测和控制温度。该装置的特点在于放弃了传统纺丝装置使用的单针头毛细管喷头或多针喷头,采用自由表面成丝的微分型纺丝喷头,并设计有内锥面喷头和外锥面喷头,大大提高了纺丝效率,一定程度上使纤维得到了细化。

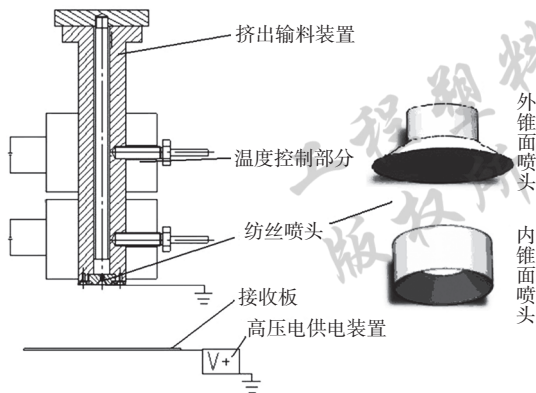


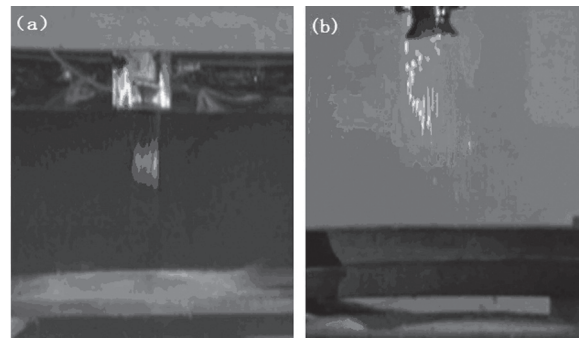
图 1 熔体静电纺丝装置原理图

扫描电子显微镜 (SEM): Hitachi S4700 型,日本日立公司。

1.3 实验步骤

采用熔体静电纺丝法,首先对料筒加热,待聚合物熔融后,由于聚合物熔体具有一定的流动性,当聚合物熔体由流道流至纺丝喷头时,开启高压电,喷头和接收板之间形成电场,在电场力的作用下,聚合物熔体在喷头处形成泰勒锥,随着电压的增加,当电场力大于聚合物熔体的表面张力时,泰勒锥收缩,喷射形成射流,并不断被拉伸,沉积到接收板上形成纤维。设置不同形状的纺丝喷头(分别为内锥面喷头和外锥面喷头),观察纺丝现象,泰勒锥分布于喷头边缘,形成多股环向分布的射流,实验过程中观察纺丝现象,并跟踪拍照。不同形状的纺丝喷头的纺丝

过程如图 2 所示。



(a) (b)
a—内锥面喷头; b—外锥面喷头

图 2 不同形状的纺丝喷头的纺丝过程

1.4 性能测试

纺得纤维经过喷金处理后,用 SEM 观察纤维并拍照,采用图像处理软件 Image J 处理和测量 SEM 照片中纤维的直径,并计算其平均直径。

2 模拟部分

2.1 模型参数

根据有限元原理分析实验装置中电场的分布情况,模拟采用 ANSYS 软件对实验装置进行简化,建立模型,设定模型的边界条件和参数见表 1。

表 1 模型分析的边界条件和参数

项 目	参 数
单元类型	PLANE121
电压 /kV	喷嘴 0 接收板 50
材料相对介电常数 ϵ	空气 1 喷头 2 接收板 2
电极间距 /mm	70
接收环直径 /mm	150

2.2 有限元模型简化

对熔体静电纺丝装置进行简化,着重考虑喷头和接收板之间的电场情况。由于纤维较纤细,质量较轻,因此本模型忽略带电荷纤维对电场的影响并忽略各种控制元件如物料输送装置、加热装置、支架平台等对电场分布的影响,建立的二维熔体静电纺丝电场 ANSYS 分析模型如图 3 所示。该简化模型主要包括纺丝喷头、接收板和空气介质。

3 结果与讨论

3.1 内外锥面喷头形状对纺丝过程的影响

实验和模拟设定相同的参数,纺丝接收距离为 70 mm,电压为 50 kV,纺丝温度分别设定为:料口温度 200℃,中间温度 220℃,喷嘴温度 210℃,环境温度为 19℃。料筒供应装置的电机转速为 20 r/min,

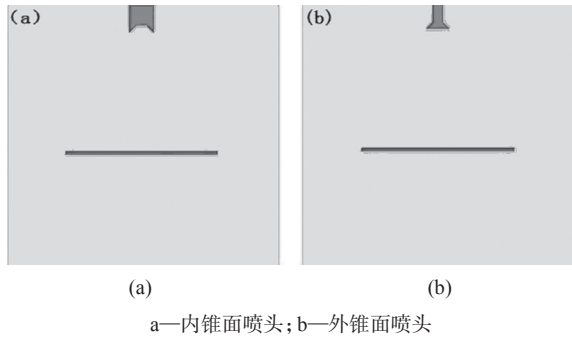


图3 熔体静电纺丝简化模型

电机转速为 20 r/min,内外锥面喷头熔体静电纺丝装置均不采用中间通风风并保证在其它工艺参数相同的情况下进行纺丝,所得纤维经 SEM 观察并拍照,得 SEM 照片如图 4 所示。

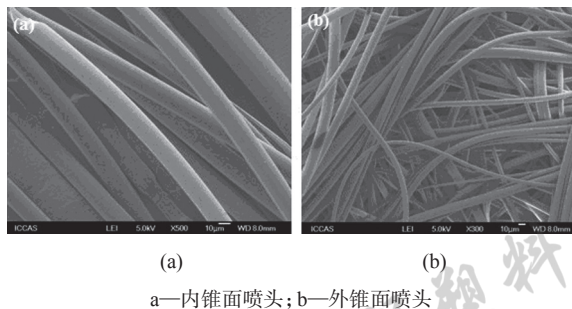


图4 相同工艺参数下内外锥面喷头纺得纤维的 SEM 照片

实验发现,内外锥面喷头都不通热风时,外锥面喷头的纺丝射流更均匀,纺丝过程中形成的射流股数多,下落速度大,但鞭动较大。由图 4 可以看出,外锥面喷头纺得的纤维纤细、均匀,其平均直径比内锥面喷头纺得的纤维稍细。这可能是因为外锥面喷头的场强较大且集中,使纤维带电荷较多,纤维所受电场力大,鞭动较大,使纤维被拉伸的程度更大,因此所得纤维更细。

3.2 内外锥面喷头的模拟电场分布和场强变化

通过纺丝过程实验发现,纺丝装置采用内外锥面喷头时,在喷头处产生的泰勒锥的个数和均匀程度不同,纤维直径也不同。可见喷头形状不同对纺丝过程有很大影响。这主要是因为不同形状的喷头与同一形状接收板两者之间形成的电势和电场分布不同。因此,根据分析进一步对该装置作模拟分析,以期获得电场对纺丝影响的原理和影响程度模拟结果。

图 5 为不同喷头形状的电势云图,图 6 为不同喷头形状的电场强度矢量图。由图 5、图 6 可以看出,电势和电场都成轴对称分布。在图 5 中,电势云图成层状分布,存在电势梯度,因此存在非匀强电场,

但在喷头和电极板之间的中间局部区域趋于均匀,有利于稳定纺丝,这与图 6 中电场强度的矢量图相对应。图 6 中的箭头代表场强方向,总电场方向向上,而纤维带负电荷,因此电场力向下,对纤维具有拉伸作用,这与实际相符。另外,最大场强都出现在喷头处,场强方向有所不同,从后处理得到的场强值可知,外锥面喷头的最大值 (2.47×10^6 kV/m) 比内锥面喷头的最大值 (1.6×10^6 kV/m) 略大。可见,在喷头处射流所受拉伸力较大,一部分是克服表面张力,使泰勒锥收缩形成射流,同时对射流有进一步拉伸作用,而喷头处场强方向不同决定了泰勒锥的喷射方向不同,从而使得纤维沉积面积不同。

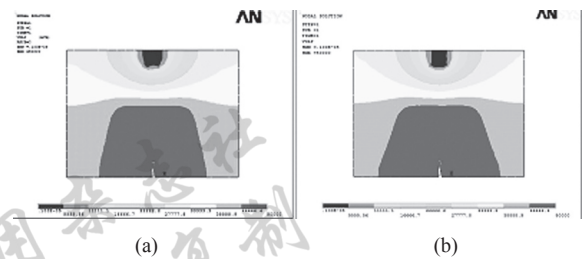


图5 不同喷头形状的电势云图

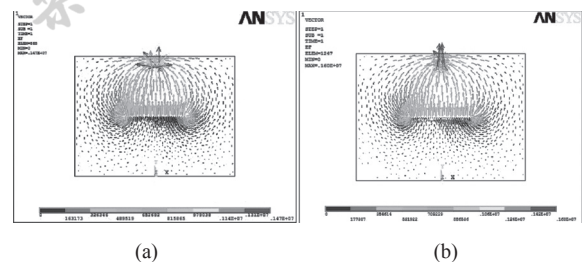


图6 不同喷头形状的电场强度矢量图

为研究这种拉伸作用在射流下落路径上的变化,进一步统计了射流下落竖直距离上场强的变化情况,结果如图 7 所示。

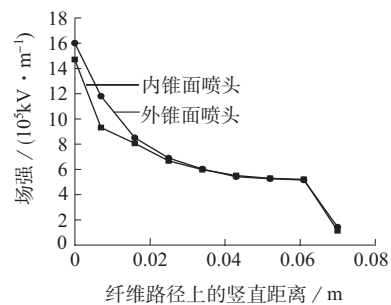


图7 在对称轴上纤维路径上的竖直距离对电场强度的影响

由图 7 可以看出,内外锥面喷头的场强均随竖直距离的增大而不断减小,当竖直距离在 0 ~ 0.025 m 范围时,场强下降较快,鞭动较大;当竖直

距离在 0.025 ~ 0.06 m 范围时,场强变化缓慢,为稳定区;靠近接收板时,场强急剧下降并趋于零,为衰减区。从整体看,外锥面喷头的场强始终比内锥面喷头大,说明外锥面喷头更有利于拉伸,更适合纤维细化,这验证了实验现象分析。

3.3 内外锥面喷头电压对纤维直径的影响

上述实验和模拟对照分析,验证了电场力为纺丝过程中的主要拉伸力,对纺丝过程和纤维直径具有很大影响。外锥面喷头虽然场强大、纤维细,但是外锥面喷头不容易通风、控温困难,对于有高温要求的物料无能为力,而且鞭动大、不稳定。因此将内锥面喷头辅助通热风纺丝与外锥面喷头不通风纺丝进行比较,设置纺丝电压为 28, 35, 42, 49, 56 kV, 其它条件不变,进行实验纺丝和模拟分析,所得纤维的 SEM 照片如图 8 和图 9 所示。

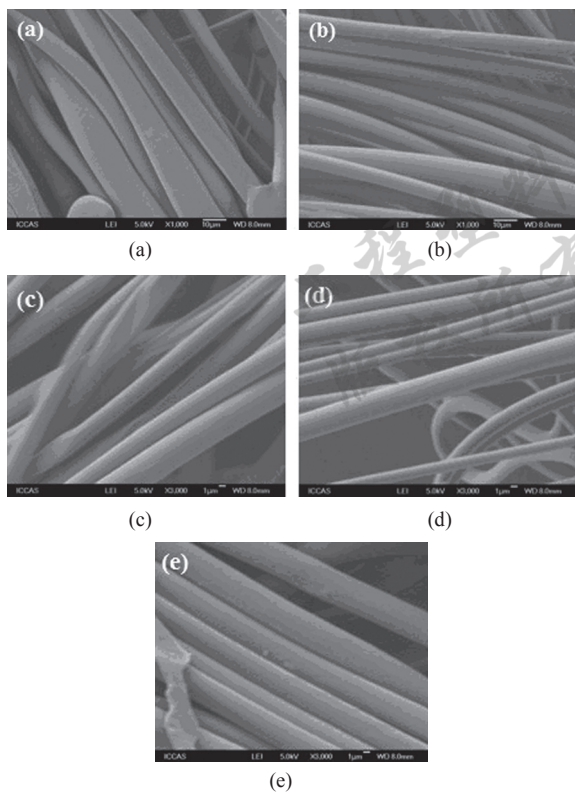


图 8 不同电压下内锥面喷头纺得纤维的 SEM 照片 (放大 1000 倍)

实验发现,内锥面喷头通热风辅助纺得纤维的平均直径范围为 2.99~9.97 μm ,外锥面喷头纺得纤维的平均直径范围为 7.32~16.5 μm ,前者纺得的纤维较细。对比图 8、图 9 也可以看出,在相同电压下,与外锥面喷头纺得纤维相比,内锥面喷头通热风辅助纺得纤维明显更均匀、更细。这是因为在热风的辅助下,风力不仅具有让射流顺直下落的作用,

而且一定程度上也具有吹拉作用。从纺丝现象看,通热风后的内锥面喷头纺丝过程更稳定,鞭动减小,纤维几乎成直线下落,且下落更均匀、更快。

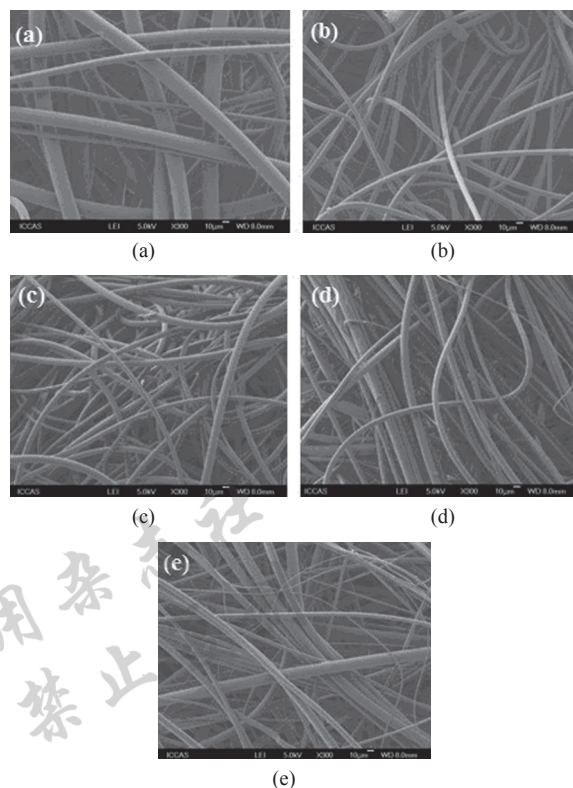


图 9 不同电压下外锥面喷头纺得纤维的 SEM 照片 (放大 300 倍)

图 10、图 11 分别为内锥面喷头通热风辅助与外锥面喷头不通风情况下,场强和纺得纤维平均直径随电压变化的曲线。

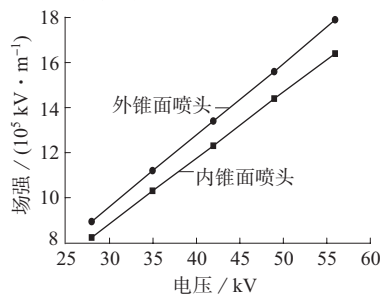


图 10 场强随电压的变化曲线

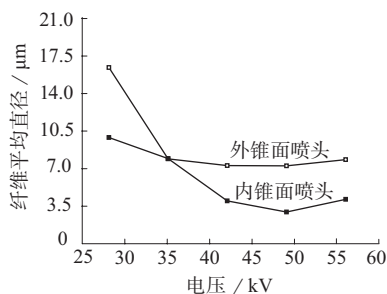


图 11 纤维直径随电压的变化曲线

由图 10 可以看出,外锥面喷头的场强比内锥面喷头的大,这与前面的预测相吻合,同时两者都随电压的增加成线性增大趋势。虽然从模拟结果分析看成线性变化,且外锥面喷头的场强大,拉伸力大,但是,由图 11 可以看出,内锥面喷头辅助通风后,纤维的平均直径随着电压的增加并不成线性减小趋势,而是先减小后增大。这主要是因为电压较小时,随着电压的增加,场强增大,射流得到的拉伸力增大,使纤维直径不断减小;当电压增大到一定程度时,射流速度增大,纤维可能得不到足够的拉伸,而使纤维直径有所增大。由图 11 可以看出,内锥面喷头通热风辅助的最佳电压约为 50 kV,此时纤维的最小平均直径约为 3 μm ,明显比外锥面喷头不通风纺得的纤维细。另外,在相同电压情况下,内锥面喷头通热风辅助的纤维直径更小,这和前面的研究相吻合,主要是受通热风辅助作用的结果。综合以上分析,兼顾设备和工艺,内锥面喷头通热风辅助纺得纤维更佳,且加热温度简单可控,纺丝过程稳定,鞭动小,所得纤维更细,纤维直径基本在 10 μm 之内,有利于纺丝。

4 结论

(1) 在未通风情况下,外锥面喷头纺得的纤维较内锥面喷头的细,其喷头处泰勒锥较均匀、密集,纺丝射流下落速度较快,鞭动较大;通热风辅助后,内锥面喷头纺丝过程更稳定,鞭动减小,纤维几乎成直线下落,且下落更均匀、更快。

(2) 内外锥面喷头的电势分布相似,外锥面喷头的场强最大值比内锥面喷头的大,场强沿射流下落

路径不断减小,在接收板处急剧下降并趋于零,在纺丝路径上不同位置,外锥面喷头的场强始终较大。

(3) 对照模拟和实验结果分析发现,在相同工艺条件下,外锥面喷头纺得纤维较细、较均匀,纤维分散沉积面积大,而热风辅助后的内锥面喷头纺得纤维较外锥面喷头更细,直径在 10 μm 以内,最小平均直径约为 3 μm 。

(4) 在工艺条件相同、不加热风辅助的情况下,外锥面喷头纺得纤维较佳,但是,外锥面喷头不容易通风,控温困难,不能满足需要高温的其它材料的纺丝需求,而内锥面喷头不仅控温容易,还可以利于中心通热风辅助纺丝,纤维下落鞭动小,纤维更细,因此更有利于纺丝,具有更好的前景。

参考文献

- [1] 赵娜,刘太奇,刘瑞雪. 熔体静电纺丝法制备 mLLDPE 纤维的研究[J]. 新技术新工艺,2013(2):94-97.
Zhao Na, Liu Taiqi, Liu Ruixue. Research on preparation of mLLDPE fibers by melt electrospinning technique[J]. New Technology & New Process, 2013(2):94-97.
- [2] Reneker D H, Chun I. Nanometer diameter fibres of polymer produced by electrospinning[J]. Nanotechnology, 1996, 7(3):216-223.
- [3] Zhou Huajun, Green T B, Joo Y L. The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts[J]. Polymer, 2006, 47(21):7497-7505.
- [4] Yang Ying, Jia Zhidong, Liu Jianan, et al. Effect of electric field distribution uniformity on electrospinning[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(10):1-11.
- [5] Hao Mingfeng, Liu Yong, He Xuetao, et al. Experimental study of melt electrospinning in parallel electrical field[J]. Advanced Materials Research, 2011, 221:111-116.

鞍山君利工程塑料有限公司

鞍山君利工程塑料有限公司是股份制企业,生产以工程塑料为主的改性材料。由教授级高工、中国塑协专家委员会专家负责生产技术。可为用户提供增强、增韧、复合、阻燃、环保阻燃、抗静电、耐磨、塑料合金类系列改性工程塑料。公司竭诚为用户“量身订做个性化需求的产品,为客户创造价值”。公司通过 ISO9001:2000 国际质量管理体系认证。公司宗旨:信誉第一;质量第一。

欢迎新老客户前来指导、合作!

- 改性品种:PA66、PA6、PP、PE、ABS、AS、HIPS、POM、PC、PC/ABS、PBT、PET、PVC 等系列改性塑料。
- 适用行业:家电、汽车、机械、铁路、纺织、石油化工、煤矿、农业等。

经理:徐长旭 13604228259, xuchangxu315@163.com

总工:赵文聘 13804910274, zhaowenpin315@163.com

地址:辽宁省鞍山市旧堡 邮编:114041 电话:0412-8935903 传真:0412-8935803 网址:www.asjls.com