

本书受2012年辽宁省提升高等学校核心竞争力特色学科建设工程项目专项资金资助 (2012310)

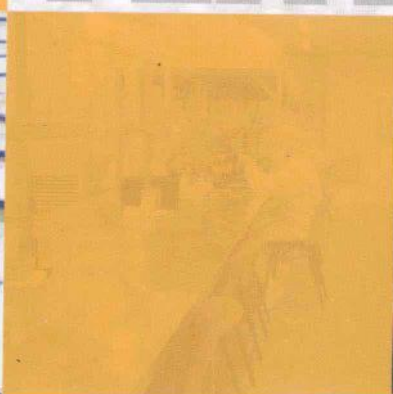
# 静电技术 在纺织领域的应用

JINGDIAN JISHU ZAI FANGZHI  
LINGYU DE YINGYONG

曹继鹏 孙鹏子 著

NEW

TEXTILES



 中国纺织出版社

2012年辽宁省提升高等学校核心竞争力特色学科  
建设工程项目专项资金资助(2012310)

# 静电技术在纺织领域的应用

曹继鹏 孙鹏子 著



中国纺织出版社

## 内 容 提 要

本书简要论述了静电技术在纺纱、纺丝、植绒及印花等方面应用研究的发展简史、基本原理和主要研究成果,着重对静电技术在梳理方面的应用研究进行了论述。通过在梳棉机前后罩板处分别加装静电型棉网清洁器进行实验,探讨了静电型棉网清洁器在梳棉机上的应用效果。在此基础上,通过自制静电装置,研究了静电场对棉结和杂质等的作用机理;应用ANSYS 软件对其进行了有限元分析,并得出结论。

本书可供相关专业师生研究、学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

静电技术在纺织领域的应用/曹继鹏,孙鹏子著. —北京:中国纺织出版社,2013.5

ISBN 978-7-5064-9630-8

I. ①静… II. ①曹… ②孙… III. ①静电—应用—纺织工业 IV. ①TS101.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 056330 号

---

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 策划编辑:孔会云 | 责任编辑:王军锋 | 特约编辑:符 芬 |
| 责任校对:楼旭红 | 责任设计:李 然 | 责任印制:何 艳 |

---

中国纺织出版社出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

邮购电话:010-64168110 传真:010-64168231

<http://www.c-textilep.com>

E-mail:faxing@c-textilep.com

三河市华丰印刷厂印刷 各地新华书店经销

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:9.5

字数:128 千字 定价:48.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

## 前 言

梳理是纺纱过程中一个重要的工艺过程,梳理质量的好坏直接影响成纱的质量。围绕如何提高梳理和成纱质量,前辈们和广大科技工作者做了大量而深入的研究。本书主要是基于静电技术应用在梳棉上的阶段性研究成果总结而完成的。为了使本书内容更为系统,还简要介绍了静电技术在纺织其他领域的应用研究进展情况。在本书的撰写过程中,参考了许多学者的研究成果,在此表示深深的谢意!

值得说明的是,本书的研究工作得到了众多研究人员的支持和帮助,在此要感谢天津工业大学的王瑞教授、钟智丽教授、王建坤教授及东华大学的郁崇文教授等给予的指导和建议,同时还要感谢辽东学院的鞠衍清、肖枫、张明光、于学智、韩贤国、郭昕、高友、王殿学等老师给予的大力支持和无私帮助。

由于时间仓促,实验范围还比较有限,书中所论述的内容难免存在这样或那样的问题,恳请广大读者谅解并给予批评指正。

作 者  
2013 年 5 月

| 书 名                  | 作 者         | 定价(元) |
|----------------------|-------------|-------|
| <b>【纺织新技术书库】</b>     |             |       |
| 梳棉机工艺技术研究            | 孙鹏子         | 62.00 |
| 壳聚糖及纳米材料在柞蚕丝功能改性中的应用 | 路艳华 林杰 著    | 38.00 |
| 毛巾类家用纺织品的设计与生产       | 刘付仁 张康虎     | 29.00 |
| 针刺法非织造布工艺技术与质量控制     | 冯学本         | 30.00 |
| HXFA299 型精梳机的生产与工艺   | 周金冠         | 20.00 |
| 纺织品循环加工及其再利用         | [美]王佑江      | 35.00 |
| 运动用纺织品               | (瑞典)斯素      | 45.00 |
| 纺织纤维鉴别手册(第三版)        | 李青山         | 26.00 |
| 纱线形成与技术              | 刘国涛         | 38.00 |
| 横机羊毛衫生产工艺设计(第二版)     | 杨荣贤         | 38.00 |
| 经编工艺设计与质量控制          | 许期颐 陆明      | 28.00 |
| 梳理针布的工艺特性、制造和使用      | 费青          | 45.00 |
| 现代准备与织造工艺            | 郭兴峰         | 32.00 |
| 绒毛织物设计与生产            | 盛明善 陈雪珍     | 38.00 |
| 紧密纺技术                | 李济群 瞿彩莲     | 26.00 |
| 新型纺纱                 | 刘国涛 谢春萍 徐伯俊 | 18.00 |
| 转杯纺实用技术              | 马克永         | 26.00 |
| 现代精梳生产工艺与技术          | 周金冠         | 22.00 |
| 转杯纺系统生产技术            | 汤龙世         | 35.00 |
| 喷气织机引纬原理与工艺          | 张平国         | 30.00 |
| GA308 型浆纱机的原理与使用     | 汤其伟         | 18.00 |
| 喷水织造实用技术 300 问       | 裘愉发 吕波      | 35.00 |
| 喷水织造实用技术             | 裘愉发         | 38.00 |
| 新型纺织测试仪器使用手册         | 慎仁安         | 50.00 |
| 新型织造设备与工艺            | 毛新华         | 18.00 |
| 新型浆纱设备与工艺            | 萧汉滨         | 42.00 |
| 织造质量控制               | 郭嫣 王绍斌      | 25.00 |
| 亚麻生物化学加工与染整          | 史加强         | 25.00 |
| 喷气织机使用疑难问题           | 张俊康         | 16.00 |
| 纺织新材料及其识别            | 邢声远         | 27.00 |
| 棉纺质量控制               | 徐少范         | 25.00 |

注:若本书目中的价格与成书价格不同,则以成书价格为准。中国纺织出版社图书营销中心

门市函购电话:(010)64168110。或登陆我们的网站查询最新书目

中国纺织出版社网址:[www.c-textilep.com](http://www.c-textilep.com)

---

## 1 静电技术在纺织领域的应用概述 / 1

---

### 1.1 静电纺纱 / 1

#### 1.1.1 静电纺纱的发展简史 / 1

#### 1.1.2 静电纺纱的基本原理 / 2

#### 1.1.3 静电纺纱的主要研究成果 / 2

### 1.2 静电纺丝 / 6

#### 1.2.1 静电纺丝的发展简史 / 6

#### 1.2.2 静电纺丝的基本原理 / 8

#### 1.2.3 静电纺丝的主要研究成果 / 8

### 1.3 静电植绒 / 12

#### 1.3.1 静电植绒的发展简史 / 12

#### 1.3.2 静电植绒的基本原理 / 12

#### 1.3.3 静电植绒的主要研究成果 / 13

### 1.4 静电印花 / 15

#### 1.4.1 静电印花的发展简史 / 15

#### 1.4.2 静电印花的基本原理 / 15

#### 1.4.3 静电印花的主要研究成果 / 16

### 1.5 静电与梳理 / 17

#### 1.5.1 静电影响梳理罗拉的纤维负荷和转移作用的研究 / 18

#### 1.5.2 梳棉机静电去除短绒系统的研究 / 19

#### 1.5.3 静电在开纤除尘方面的应用研究 / 21

#### 1.5.4 利用静电改善非织造布梳理机成网质量的研究 / 23

### 参考文献 / 25

## 2 纤维的电学性质及其在静电场中的运动规律 / 30

- 2.1 纤维的电学性质 / 30
  - 2.1.1 纤维的导电性 / 30
  - 2.1.2 影响纤维导电性的因素 / 31
  - 2.1.3 纤维的介电性能 / 34
  - 2.1.4 影响介电常数的因素 / 34
  - 2.1.5 电介质的介电强度 / 35
- 2.2 纤维在静电场中的运动规律 / 36
  - 2.2.1 纤维静电分离装置 / 36
  - 2.2.2 纤维在静电场中的运动 / 39
  - 2.2.3 纤维在电场中的受力 / 40
- 参考文献 / 42

## 3 梳棉机后罩板处加装静电型棉网清洁器的实验研究 / 44

- 3.1 棉网清洁器的简要发展历程 / 44
- 3.2 电压对生条质量影响的实验研究 / 46
  - 3.2.1 实验原料 / 46
  - 3.2.2 实验条件 / 46
  - 3.2.3 实验方案 / 46
  - 3.2.4 实验装置及有关参数 / 46
  - 3.2.5 实验结果 / 47
  - 3.2.6 结果分析与讨论 / 48
- 3.3 电压和隔距对生条质量影响的实验研究 / 49
  - 3.3.1 实验原料 / 49
  - 3.3.2 实验条件 / 49
  - 3.3.3 实验方案 / 49
  - 3.3.4 实验结果 / 50
  - 3.3.5 结果分析与讨论 / 51
- 3.4 小结 / 57
- 参考文献 / 57



#### 4 梳棉机前罩板处加装静电型棉网清洁器的实验研究 / 59

- 4.1 实验原料 / 59
- 4.2 实验条件 / 59
- 4.3 实验方案 / 60
- 4.4 实验结果 / 61
- 4.5 结果分析与讨论 / 62
  - 4.5.1 隔距为 1mm 方案的实验分析 / 62
  - 4.5.2 隔距为 2mm 方案的实验分析 / 63
  - 4.5.3 隔距为 3mm 方案的实验分析 / 63
  - 4.5.4 不同因素间影响的显著性差异分析 / 64
  - 4.5.5 导板隔距对生条质量的影响 / 67
  - 4.5.6 加装前后静电型棉网清洁器的效果对比 / 70
- 4.6 小结 / 71
- 参考文献 / 72

#### 5 静电对棉结和杂质等的作用机理研究 / 73

- 5.1 静电对棉结的作用 / 73
  - 5.1.1 棉结的定义 / 73
  - 5.1.2 棉结的测试方法 / 73
  - 5.1.3 棉结去除的研究概述 / 74
  - 5.1.4 实验装置的制作 / 75
  - 5.1.5 实验方法及结果 / 76
  - 5.1.6 结果分析与讨论 / 84
  - 5.1.7 小结 / 88
- 5.2 棉结在静电场中运动与棉结尺寸的关系 / 89
  - 5.2.1 实验部分 / 89
  - 5.2.2 实验结果分析 / 91
  - 5.2.3 结论 / 93
- 5.3 湿度对棉结在静电场中运动影响的进一步研究 / 93
  - 5.3.1 实验部分 / 93
  - 5.3.2 实验结果与分析 / 94



|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 5.3.3 | 结论 /                | 98  |
| 5.4   | 静电对杂质的作用 /          | 98  |
| 5.4.1 | 杂质的定义及危害 /          | 98  |
| 5.4.2 | 杂质去除的研究概述 /         | 98  |
| 5.4.3 | 实验方法及结果 /           | 99  |
| 5.4.4 | 结果分析与讨论 /           | 101 |
| 5.5   | 棉结和杂质在电场中受力的比较分析 /  | 104 |
| 5.6   | 静电对纤维束的作用 /         | 110 |
| 5.6.1 | 实验方法 /              | 110 |
| 5.6.2 | 不同粗细棉条喂入时纤维束的定向效果 / | 110 |
| 5.6.3 | 分梳辊不同转速下纤维束的定向效果 /  | 111 |
| 5.7   | 小结 /                | 111 |
|       | 参考文献 /              | 113 |

## 6 锡林与静电板间静电场的有限元分析 / 116

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 6.1   | 介电常数 /            | 116 |
| 6.1.1 | 定义 /              | 116 |
| 6.1.2 | 影响介电常数的因素 /       | 117 |
| 6.2   | 电介质的介电强度 /        | 118 |
| 6.3   | 静电场的有限元分析 /       | 118 |
| 6.4   | 不同介电常数下静电场的受力分析 / | 128 |
| 6.5   | 不同隔距下静电场的受力分析 /   | 130 |
| 6.6   | 有限元分析结果的讨论 /      | 134 |
| 6.7   | 小结 /              | 136 |
|       | 参考文献 /            | 137 |

## 7 总结和展望 / 138

|     |           |     |
|-----|-----------|-----|
| 7.1 | 总结 /      | 138 |
| 7.2 | 研究设想及展望 / | 141 |
|     | 参考文献 /    | 142 |

# 1 静电技术在纺织领域的应用概述

古希腊哲学家塔勒斯(Thales)在研究天然磁石的磁性时,发现用丝绸、法兰绒摩擦琥珀(Amber)之后也有类似于磁石能吸引轻小物体的性质。所以,塔勒斯成为有历史记载的第一个静电实验者。“电”这个词起源于希腊语  $\epsilon\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ (琥珀)。

在中国,东汉王充在《论衡·乱龙》中就提到过一种现象,叫做“顿牟掇芥”。“顿牟”即琥珀;“芥”指芥菜子,统喻干草、纸等的微小屑末;“掇芥”的意思是吸引芥子之类的轻小物体。本词意指带有静电的物体能够吸引轻小物体的现象。晋朝张华的《博物志》中也有记载:“今人梳头,解著衣,有随梳解结,有光者,亦有咤声”,这里记载头发因摩擦起电发出的闪光和噼啪之声。在今天的科学眼光看来,这就是静电,古人虽然发现了这种现象,却没有进一步探究。

1907年, Frederik G. Cottrell 制造了世界上第一台实际应用的静电除尘器。1923年, Detroit Edison 公司安装了第一台静电除尘器。从此,静电进入了工业应用领域。此后,随着电—磁现象的理论和电物理学的蓬勃发展,虽然打开和扩大了电磁感应的应用范围,但在一定程度上,忽略了静电方面的研究和应用,导致静电的理论和应用在电技术理论中发展相对缓慢和滞后。

在静电场中的物体会因电极的作用而带电,而纤维本身是由许多分子所组成,所以纤维在电场中也会受到影响而产生电离现象。外加电场后,纤维内部分子便产生逆电场,使纤维受到电场极板的电力作用,而将纤维拉引伸直。基于此原理,近几十年国内外的许多研究者将静电技术应用到了纺织领域。关于静电在纺织领域中的应用,历史记载不过百年。下面分几个方面加以简要论述。

## 1.1 静电纺纱

### 1.1.1 静电纺纱的发展简史

静电纺纱为自由端纺纱方法之一,由于在纺纱过程中利用静电场使纤维伸直、

平行排列和凝聚而称为静电纺纱。静电纺纱的研究起源于美国。1949 年美国 E. S. Kennedys 申请世界第一台静电纺纱装置的专利,这是关于静电纺纱最早的记载。之后 S. 奥格尔斯比、A. L. 托马斯 1955 年提出静电纺纱装置的专利,其后美国不少纺织企业进行静电纺纱研究。20 世纪 60 年代, J. Shaw<sup>[1]</sup> 也提出了在自由端纺纱中有可能用静电力运送、定向和凝集纤维的设想。1971 年美国电纺公司在国际纺织机械展览会上曾展出一台 20 锭样机(ESPⅢ型),引起了世界各国对静电纺纱研究的重视。除美国外,德国、日本、俄罗斯等十多个国家也都从事过静电纺纱的研究,但大部分都没有实质性的进展。

据《上海纺织工业志》<sup>[2]</sup> 介绍,1958 年,我国上海市静电纺纱技术研究协作组丁力等以上海第九棉纺织厂为科研试验基地,开始探索静电纺纱工艺及设备,将经过松解除杂后的单纤维借气流定量均衡流向高压静电场,使纤维沿纱轴方向排列、加捻卷绕成筒纱,具有速度快、工序短、大卷装、少飞花等特点,而且用电节省、噪声低。1980 年,在上海建成 1400 头静电纺纱中试车间。1981 年,开始全面投产,纺制 9.7 ~ 97tex (6 ~ 60 英支) 纯棉纱和苧麻纱等。1982 年,车间开始盈利。同年,静电纺纱产品研究获上海市重大科技成果三等奖,1984 年,静电纺纱新技术获国家发明三等奖。但生产中仍存在棉条给湿困难,制成率低和成纱疵点多,手感差,应用范围有局限性等问题。

### 1.1.2 静电纺纱的基本原理

静电纺纱属自由端纺纱的一种,它以条子喂入,通过分梳辊的梳理,使纤维束被分梳成单纤维状态,依靠吸风管的气流作用,将单纤维输入静电场<sup>[3]</sup>。静电场由高压电极(+)、加捻器电极(-)和封闭罩壳组成。因纤维本身带有水分,在静电场作用下产生电力或极化,使纤维两端产生与电极极性相反的电荷,于是在电场力的作用下,纤维受到伸直、排列,凝集形成自由端纱尾,利用引纱从加捻器吸入电场与自由端纱尾接触,经加捻器高速回转加捻成纱后,由槽筒卷绕成筒子。具体示意图见图 1-1 所示<sup>[4]</sup>。

### 1.1.3 静电纺纱的主要研究成果

实际上,关于静电纺纱的研究并不是很多。据文献<sup>[5]</sup> 介绍,上海第九棉纺织厂静电纺纱车间自 1979 年建成后,曾纺过 9.7 ~ 97tex (6 ~ 60 英支) 的纯棉纱、58.3tex (10 英支) 的废纺棉纱、53tex (11 英支) 麻棉混纺纱等品种,但在各种纯棉纱纺制过程中,一方面由于在当时的生产条件下,强力等某些质量指标达不到要求,另一方

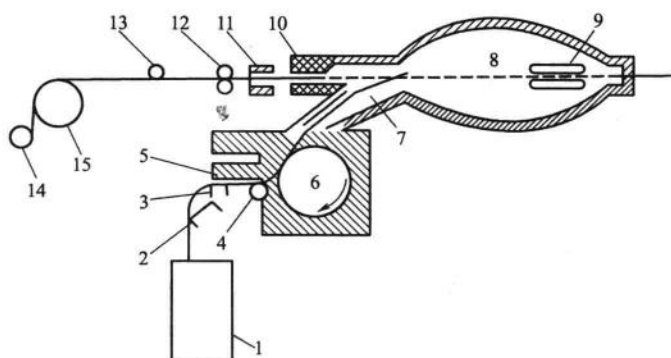


图 1-1 静电纺纱工作原理图

- 1—棉条桶 2—棉条 3—喇叭口 4—给棉罗拉 5—给棉板 6—刺辊 7—输棉管 8—静电场  
9,10—高压电极 11—加捻器 12—张力装置 13—自停杆 14—筒子纱 15—槽筒

面其总制成率较低（静电纺纱机本身的制成率仅 94% 左右）导致成本高等原因，此项技术没有进行大规模推广应用。

某文献<sup>[6]</sup>介绍了国外对静电纺纱机静电区域内的纤维转移力学的研究。在文章中作者作出了在均匀和非均匀静电场内有关纤维运动的理论分析。结果表明，空气阻力系数对纤维运动的任何计算参数几乎都无影响。随着静电场强度的增加，纤维输入锭子（电极）的进入速度和加速度都增加了。假定在接近锭子（电极）区域内的纤维流量保持恒定，机器产量随着静电场强度的增加而增加。对于 10 根的纤维流量来说，电场强度为  $10 \times 10^5$  和  $20 \times 10^5$  V/m 时产量分别为环锭纺纱产量的 18 倍和 37 倍。事实上，采用  $10 \times 10^5$  V/m 的电场强度是没有问题的。假定锭子（电极）进口处的纤维流量保持恒定，增加前罗拉的速度就可增加产量，但这种效应只在电场强度低时才更为明显。保持电场梯度恒定而扩大两极的间距是有利的，因为这种间距放大时可以提高纤维输入锭子（电极）的进入速度。

该文对非均匀电场内的纤维运动也作了分析，所得结果可以用来确定纤维移动的轨迹。从文献研究结果来看，非均匀电场有助于加强对纤维分离的控制，同时还可以利用这些研究成果来确定锭子（电极）所需的形状和结构。按斯托克司定律得出的数据同按空气阻力的速度平方规律所得的数值几乎完全一致。

为了使静电纺纱达到实用的目的，日本的静电纺纱研究人员在实验和研究过程中作出了很多努力<sup>[7,8]</sup>。岛津制造厂的研究人员将静电纺与气流纺作了比较研究，

得出下列结论。

(1)气流纺虽然在生产率方面是优越的,但是纺制的纱线在粗细度上受到了限制,不适应纺高支纱,而且纱线的捻度过大,致使气流纱的外观不是很好,并且在气流纱的粗细度和长度与静电纱相同时,气流纱略重;以相同数量的原棉纺制气流纱和静电纱时,气流纱的产量略低。

(2)与此相反,采用静电纺纱方法时,由于纤维的均匀度好,捻度也略低,所以静电纱以良好的外观而著称。

岛津制造厂的研究人员还将静电纺与环锭纺作了比较,得出的结论是:

(1)静电纺与环锭纺相比,虽然静电纺的成纱捻度稍低,但是成纱输出速度略高,而且单纱强力、伸长率、均匀度以及光泽度等方面都与环锭纺的成纱相同或略高。

(2)静电纺虽然能够廉价地提供不低于环锭纺的优质纱,但由于纺制环境(尤其是湿度)等要求较高,因而取代环锭纺而推广使用仍会有一段距离。

20世纪80年代中期,中国纺织大学研究人员对静电纺纱进行了一系列的研究。邵申梅等<sup>[9]</sup>对静电纺纱的加捻机理和加捻效率进行了分析,通过实验测得了加捻管的机械加捻效率,从而得出了影响纱线捻度和加捻效率的主要因素,并采用二次回归通用旋转组合设计方法建立成纱捻度与加捻效率的回归方程。通过实验结果和理论分析得出,在自由端须条上的假捻是影响加捻效率的主要因素,而机械滑溜相对来说影响比较小。影响纱线捻度和加捻效率的主要工艺参数是加捻管的转速和引纱速度。这两个速度越高,总的加捻效率越低。蒋长贵、张渠<sup>[10]</sup>应用边界元法分析了静电纺纱三维电场,介绍了多层介质三维电场的边界元法离散化方程,并通过具有解析解实例的计算对该方法进行了论证。然后用该方法计算静电纺纱电极系统三维电场,获得两个剖面上等位线的分布,并对纺纱电场作了分析。文中所采用的边界元法,在当时来说是一种较为实用的方法,其最大特点是可以降低求解问题的维数,从而减少计算前的数据准备,特别是三维多层介质,更有利于计算机求解的实现。

在静电纺纱过程中,加捻须条由于受到各种力的作用,会形成小型气圈。原中国纺织大学的谢征恒等<sup>[11]</sup>对静电纺纱加捻过程中气圈形态进行了较为深入的研究,通过计算分析得出,该气圈形态与加捻过程中纺纱张力的大小密切相关。静电纺纱加捻过程中的气圈有两部分,在加捻管内称为“约束气圈”,而出了加捻管以后则称为“自由气圈”。作者从力学分析出发,通过对加捻过程中纱线微段上所受到的各种作用力数量级的比较,分别建立了描述以上两种气圈形态的微分方程组,并应用

龙格—库塔法进行了求解。在数值求解的基础上,对各工艺参数的影响进行了分析讨论。值得一提的是,他们还采用高速摄影的方法对实际纺纱过程中的自由气圈形态和模拟的约束气圈形态分别进行了拍摄。结果表明,两种气圈形态与理论分析结果基本符合。

国内学者肖震东等分别用有限元法来求解静电纺纱的电场分布情况<sup>[12-13]</sup>,但由于当时计算机条件所限及缺少功能强大的有限元分析软件,使得计算比较繁琐,同时精确度也差。

在纺纱器结构的探讨上,刘裕瑄等<sup>[14]</sup>发明了一种由电场罩壳、电极等组成的静电纺纱器,其特征是在静电场中装有控制自由端纱尾装置的高速静电纺纱器。该装置通过在静电场中安装在底线上有通孔的V形槽,可在静电和气流的共同作用下对自由端纱尾起着积极控制和托持作用,从而提高纺纱速度。宋桂玲<sup>[15]</sup>等申请的专利“可调高压静电电压的静电纺纱装置”也是对静电纺纱器结构的又一个探讨。这种可调高压静电电压的静电纺纱装置如图1-2所示。该装置具体包括棉条筒9、给棉喇叭7、给棉罗拉8、给棉板5、分梳辊6、静电场容器10、吸风管11、加捻器4、罗拉3、槽筒2、筒管1、高压电极12,其特征是在槽筒2、筒管1下方的罗拉3上方有一电容式传感器14,该电容式传感器14的电信号输出端与预处理器15的输入端连接,预处理器15的信号输出端通过信号线与A/D转换器16的输入端相连,A/D转换器16的信号输出端与载有PID控制程序的8031单片机17的信号输入端连接,8031单片机17的输出端与史密特触发器18的输入端连接,史密特触发器18的输出端与三极管19的基极连接,三极管19的集电极与高压静电发生器13的LM317三端稳压电源的可调端相连,三极管19的发射极接地,高压静电发生器13的高压输出的两个端子分别接在静电场容器10的高压电极12和加捻器4电极上。据介绍,该装置可以根据纱线细度的变化而

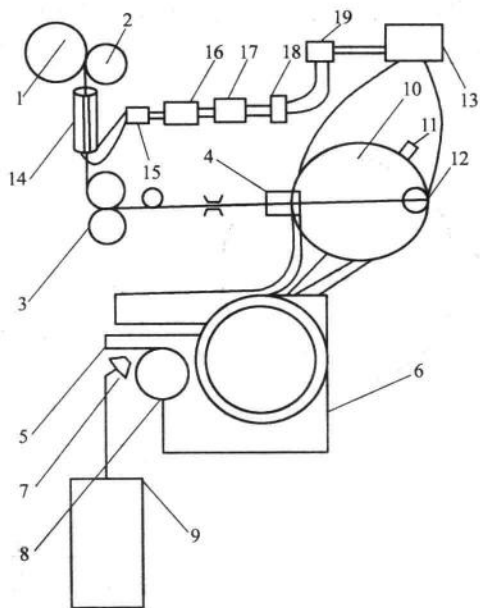


图1-2 可调高压静电电压的静电纺纱装置

对高静电压进行自动调节,同时可以减少由于更换原料种类而改变高压静电发生器所带来的麻烦。

## 1.2 静电纺丝

### 1.2.1 静电纺丝的发展简史

“静电纺丝”一词来源于“electrospinning”或更早一些的“electrostatic spinning”,国内一般简称为“静电纺”、“电纺”等。1934年,Formalas发明了用静电力制备聚合物纤维的实验装置并申请了专利<sup>[16]</sup>(图1-3),该专利公布了聚合物溶液如何在电极间形成射流的方法,这是首次详细描述利用高压静电来制备纤维的装置的专利,被公认为是静电纺丝技术制备纤维的开端。但是,也有不少研究者认为静电纺丝技术起源于1902年 cooler 等人的静电喷雾装置的专利<sup>[17]</sup>,这可能是根据两者工艺原理上的相似性而得出的结论(图1-4)。从生产装置上看,目前无论是科研单位的实验室还是有关利用静电纺丝技术生产纳米纤维的企业,其中大部分生产装置均为带有微喷射系统的针筒式静电纺丝装置。这与早期的 Formalas 的第一份专利实际上几乎没有任何相似之处,却与静电喷雾技术在工艺装置上具有天然的相似性,从另一个侧面也证实了两者的渊源。因此,如果从这个角度考虑,静电纺丝技术(electrospinning)

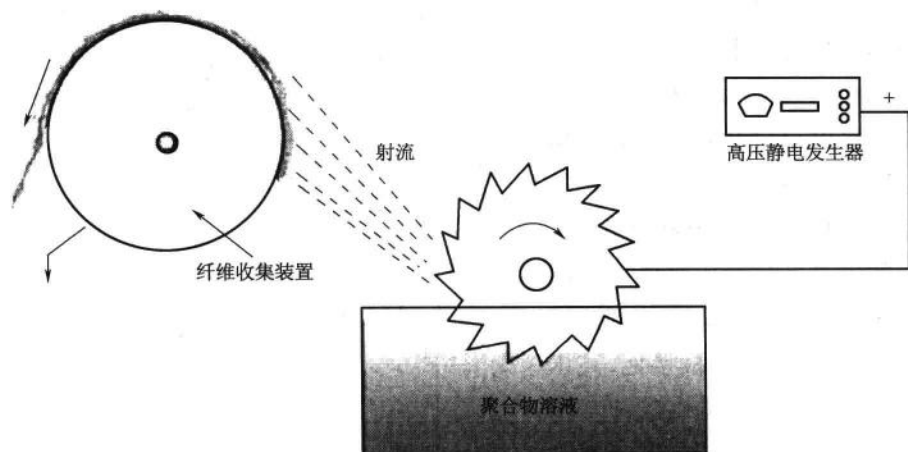


图1-3 Formalas 于1934年申请专利的世界上第一台静电纺丝机示意图



应该算是静电喷雾(或静电喷涂 electro spraying)的一个分支。从科学基础来看,这一发明可视为静电雾化或静电喷雾的一种特例,其概念可以追溯到 1745 年。静电雾化与静电纺丝的最大区别在于两者采用的工作介质不同,静电雾化采用的是低黏度的牛顿流体,而静电纺丝采用的是较高黏度的非牛顿流体。这样,静电雾化技术的研究也为静电纺丝体系提供了一定的理论依据和基础。对静电纺丝过程的深入研究涉及静电学、电流体力学、流变学、空气动力学等领域。如果从工艺原理上讲,早在 1882 年,Raleigh 在研究带电液体微滴产生的不稳定性问题时,就指出了当静电力克服表面张力时即可产生液体射流。因此,Raleigh 无疑是最先对这种液滴分裂成带电电射流进行研究的学者。但如果从连续纺丝的角度来说,Formalas 则无疑应该算是静电纺丝技术的第一发明人。

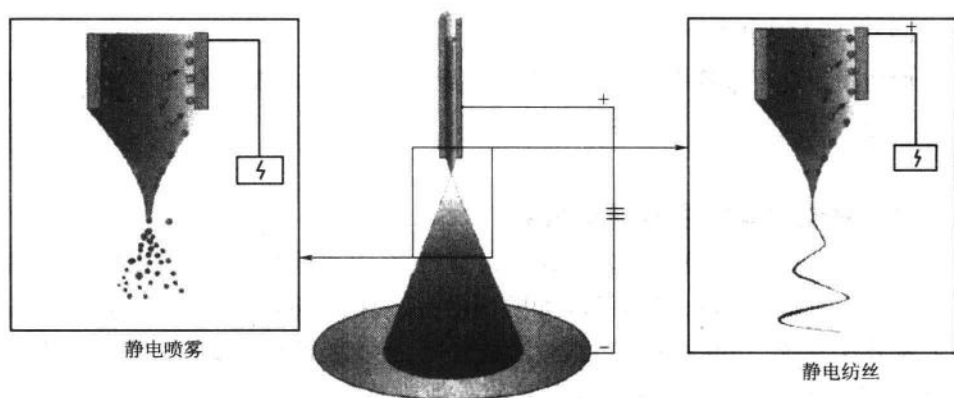


图 1-4 静电纺丝技术与静电喷雾技术示意图

20 世纪 30 ~ 80 年代期间,静电纺丝技术发展较为缓慢,科研人员大多集中在静电纺丝装置的研究上,发布了一系列的相关专利,但是尚未引起广泛的关注。进入 90 年代,美国阿克隆大学 Reneker 研究小组对静电纺丝工艺和应用展开了广泛和深入的研究。特别是近年来,随着纳米技术的发展,静电纺丝技术获得了快速发展,世界各国的科研界和工业界都对此技术表现出了极大的兴趣。此段时期,静电纺丝技术的发展大致经历了四个阶段:第一阶段主要研究不同聚合物的可纺性和纺丝过程中工艺参数对纤维直径及性能的影响以及工艺参数的优化等;第二阶段主要研究静电纺纳米纤维成分的多样化及结构的精细调控;第三阶段主要研究静电纺纤维在能源、环境、生物医学、光电等领域的应用;第四阶段主要研究静电纺纤维的批量化生产问题。上述四个阶段相互交融,并没有明显的界线<sup>[18]</sup>。

### 1.2.2 静电纺丝的基本原理

一般静电纺丝装置包括:高压电源、溶液储存装置、喷射装置(如内径为1mm的毛细管)和收集装置(如金属平板、铝箔等)。高压静电场(一般在几千到几万伏)在毛细喷丝头和接地极间瞬时产生一个电位差,使毛细管内聚合物溶液或者熔融体(一般为非牛顿流体)克服自身的表面张力和黏弹性力,在喷丝头末端呈现半球状的液滴。随着电场强度增加,液滴被拉成圆锥状,即Taylor锥。当电场强度超过一临界值后,将克服液滴的表面张力形成射流(一般流速为每秒数米),在电场中进一步加速,射流进一步得到拉伸,直径减小,伴随溶剂挥发或熔融体冷却固化,终落在收集板上形成纤维,直径一般在几十纳米到几微米之间<sup>[19]</sup>。近年来,有关静电纺丝原理的研究越来越受学者们的关注<sup>[20~23]</sup>,其研究主要集中在两个方面<sup>[19]</sup>:

- (1) Taylor锥的形成及其喷射机理;
- (2) 静电场中射流的弯曲非稳定性。

而纺丝液在毛细管中的流体动力学问题,特别是非牛顿流体的管流,在现有的关于静电纺丝文献中涉及较少。

### 1.2.3 静电纺丝的主要研究成果

与静电纺纱相比,静电纺丝的研究报道很多,其涉及领域也更广泛。传统的静电纺丝机主要由纺丝液供给系统(如贮液器、微量推进泵或其他形式的溶液推进装置)、喷丝头系统(一般是金属微细管)、纺丝区、接收装置和高压静电发生器等组成,如图1-5所示。由于传统静电纺丝机的改进技术层出不穷,因而从细节上看,这些改进型的静电纺丝工艺种类繁多。从用电类型上看,绝大多数静电纺丝工艺过程使用的都是高压直流电,但是Kessick等<sup>[24,25]</sup>将直流电改成交直流电也成功制备出纳米纤维,因而有直流静电纺与交流静电纺之分。根据纺丝时使用原料状态不同,静电纺又可分为溶液静电纺和熔融静电纺。

围绕着静电纺丝装置的改进,如纺丝方式、贮液系统、喷丝头的形状、供给电压的形式、纤维的接收装置等方面的改进,国内外研究者做了大量的研究工作,并取得了很大的成绩。目前,静电纺丝技术的研究越来越多,有关研究手段和装置也日趋完善和先进。在静电纺丝工艺过程中,聚合物溶液或熔体一般被装入贮液器中,贮液器头端有微细喷丝孔。在外加压力的作用下,溶液或熔体在喷丝孔处形成圆球状小液滴,液滴处于高压静电场中,受电场诱导,溶液中电荷被极化聚集在液滴顶端。在静电力作用下,圆球状液滴被拉伸成圆锥体,当电场力大于表面张力时,有射流从圆锥顶端射出。射流开始阶段以稳定状态飞行,在经历初始阶段的稳定飞行后,射