

# 在固液分离中熔喷滤芯（立体成型）的结构 与性能的研究

## 摘要

熔喷聚丙烯（PP）滤芯（立体成型），是近年发展起来的一种新型微孔式过滤介质。随着人民生活水平的提高，人民对环境、饮食、水质的要求也就越来越高，无论是工业废水处理，还是日常生活中的家庭净水，或是工业产品的净化和生活饮品的净化都离不开液体过滤。熔喷 PP 滤芯（立体成型）作为一种新型的液体过滤材料可广泛的应用于水质过滤当中，因此对滤芯材料和成型工艺研究的必要性也就日益突出。

本研究中根据课题工艺要求，对我们实验室的熔喷设备进行必要的改进。模头组件是聚合物喷丝成网系统的核心部件之一，它的改进将直接影响纤网结构、纤维性能的好坏，模头组件由三部分组成：喷头、气板和底板三部分。螺杆也是实验的重要部件之一，也进行了改进。由于熔喷滤芯（立体成型）的接收装置比较特殊，在实验阶段把传统的平网成型接收装置改进为立体成型接收装置。

研究中使用哈克流变仪、差动热分析仪、X 衍射分析仪对实验用（牌号为 Y2600T）的聚丙烯（PP）聚合物进行有关物理性能测试。经分析，本实验用的熔喷 PP 聚合物为假塑性切力变稀流体，在高温时的非牛顿指数  $n$  和 1 相比相差比较大，因此是典型的非牛顿流体。通过差动热分析仪分析，可以掌握聚合物的熔点性能，了解聚合物的熔点温度是生产熔喷滤芯控制工艺温度的一个重要的参数。通过对熔喷前后材料进行 X 衍射分析得出，熔喷后非织造熔喷材料的结晶度比熔喷前材料的结晶度要高，是因为聚合物在实验过程中收到高速气流的拉伸作用，从而对纤维材料的结晶度产生影响。

使用实验室自行研制的聚合物纺丝成网设备进行熔喷滤芯（立体成型）加工，通过改变七个熔喷实验工艺参数：螺杆转速、每个过滤层的

接收距离 (DCD)、每个过滤层的纤网层数来控制熔喷滤芯 (立体成型) 实验工艺。并且对熔喷纤网的结构性能进行分析, 如: 纤维细度、纤网的密度、孔隙率、以及孔径值, 来为更好的分析熔喷滤芯 (立体成型) 的性能提供依据。研究表明, 在接收距离不变的情况下, 随着螺杆转速的增加, 熔喷纤网的孔隙率、纤维的细度、纤网的孔径值均增加, 而纤网的密度却随之减小; 在螺杆转速不变的情况下, 随着接收距离的增加, 熔喷纤网的孔隙率、孔径值随着增加, 而纤维的细度、纤网的密度却随之减小, 纤维细度的减小幅度在本实验的接收距离范围内表现得很细微。根据多因子实验分析方法得到: 每个过滤层的纤网层数在实验的分析范围内变化, 对实验的结果如: 通量、浊度效率、压降-流量等性能的影响不大; 而每个过滤层的接收距离的变化会对每个过滤层的密度和孔径值产生影响, 因此对实验的结果如: 通量、浊度效率、压降-流量等性能有很大的影响; 螺杆转速的变化很大程度上影响纤维的细度变化, 因此对实验的结果也有很大的影响。

通过多因子的直观分析以及方差分析, 得出最佳的实验工艺参数为: 精滤层的接受距离: 260mm、精滤层的纤网层数: 4、中滤层的接受距离: 290mm、中滤层的纤网层数: 16、粗滤层的接受距离: 400mm、粗滤层的纤网层数: 6、螺杆转速: 7.0rpm。并对其进行实验验证。

对 Shambaugh 给出的气流拉伸模型进行研究, 发现在 Shambaugh 模型中其将熔体视为牛顿流体来进行考虑, 但是在本文熔喷滤芯研究过程中, 采用的 PP 聚合物的牛顿指数是一个和 1 相差很大的数值, 因此论文中对 Shambaugh 的气流拉伸模型进行了改进。通过对熔喷滤芯的过滤机理分析, 发现熔喷滤芯的过滤机理并不是一种单纯的机理起作用, 而是多种过滤机理同时对熔喷滤芯过滤产生作用, 但是起主导作用的是拦截机理; 在滤芯的过滤类型中也不是一种单纯的过滤类型在起作用, 而是多种过滤类型共同起作用, 但是起主导作用的是深层过滤。

**关键词:** 熔喷, 滤芯, 非织造材料, 过滤机理, 立体成型

**STUDY ON THE STRUCTURE AND PROPERTY OF  
MELTBLOWN CARTRIDGE (TRIDIMENSIONAL  
FORMATION) IN THE FILTRATION DOMAIN OF  
SOLID AND LIQUID**

**ABSTRACT**

The meltblown cartridge (tridimensional formation) is a new kind of filter medium in the recent years. With the living level improved, the people's request to the water quality also more and more higher. Regardless in the domain of industrial waste water, or purity water in the daily life, or the purity of the industrial products and drink all need the filtration. The meltblown cartridge ( tridimensional formation) as a new kind of filter material has been applied widely in these domain, therefore the necessity of researching on the cartridge become outstanding increasingly.

According to the request of article, the meltblown equipments were redesigned in our laboratory. The dies are one of the key part of the meltblown equipment, be composed of three parts: spray of head, airboard and scaleboard. The redesign of the dies improve the quality of fiber directly. The screw is also one of the key part during the experiment. Because the receive equipment of the meltblown cartridge ( tridimensional formation) is specially, I design the collector to match the expected results during the experiment.

The polymer of PP is used in the research. German HAAKE rheometer, DSC analyzer and X-ray diffractive instrument are used to analyze physical indexes. The polymer of PP is pseudoplastic fluid presenting shear-thinning property , the non- Newtonian index  $n$  of the

polymer of PP is bigger than number 1 in the high temperature, so the polymer of PP is typical non-Newtonian fluid. The polymer of PP absorbs the heat begin from 157.25 °C, end to 176.36 °C, the highest value is 170.39°C by the DSC analyzer. The temperature of melting point of the polymer is an important parameter for producing meltblown cartridge(tridimensional formation). X-ray diffractive method is used to measure the degree of crystallization. The result shows that the degree of crystallization of meltblowing nonwovens is higher than that of filament. The draw power of the high-speed air flow is the influence factor on the degree of crystallization of meltblowing nonwovens is higher than that of filament.

The production of meltblown cartridge(tridimensional formation) is carried out on the machine developed by our staff. The process is controlled by changing seven parameters: the speed of screw ,die-to-collector distance(DCD) of each filter part, the number of layer of each filter part. The capacities of the meltblown fiber web are analyzed, for instance, fiber fineness, the density of fiber web, permeability, the mean flow pore size. These parameters provide the basis for producing the meltblown cartridge(tridimensional formation). Under the condition of other parameters are constant, only with the increase of the speed of screw, the permeability and the mean flow pore size of meltblowing fiber web and fiber fineness are all increased, but the density of fiber web is decreased. Under the condition of other parameters are constant, only with the increase of DCD, the permeability and the mean flow pore size of meltblowing fiber web are increased, but fiber fineness and the density of the meltblowing fiber web are decreased. The decrease of fiber fineness is very little in the range of experiment. According to many factor analytical method: the layer number of each filter part within the scope of experiment, so have a little influence to the results of the experiment; But the DCD of each filter part

influence the density and the mean flow pore size, so have a big influence to the results of experiment; The change of the speed of screw will influence the fiber fineness, so also have a big influence to the results of the experiment.

According to the many factors analysis method and the intuitionistic analysis method can get the best process parameters: the DCD of the nice filter layer: 260mm; the layer number of the nice filter layer: 4; the DCD of the medium filter layer: 290mm; the layer number of the medium filter layer:16; the DCD of the thick filter layer: 400mm; the layer number of the thick filter layer:6; the speed of screw: 7.0 rpm. According to these best parameters, I found the results and the forecast results have a very consistency.

According to the model of Shambaugh about the draw of high air speed, the detection is in the model of Shambaugh it treats the polymer as Newtonian fluid, but the polymer of PP in my experiment is a typical non-Newtonian fluid, so I redesign the model about the draw of high air speed during the meltblown on the basis of the model of Shambaugh. And match the experiment number and model expected number in my article. According to the analysis about the mechanism of filtration, I found the mechanism of filtration during the filtration is very complicated, the mechnism of filtration during the filtration of meltblown cartridge is composed of several mechanisms of filtration. The type of filtration is composed of several types of filtration also, but the main type is the deep filtration according to the analysis in my article.

Written by: Rao JianHui(Textile materials)


Directed by: Vice-professor Jin XiangYu

Keyword: meltblown, cartridge, nonwovens material, the mechnism of filtration, tridimensional formation

附件一：

## 东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：2004年12月29日

## 附件二：

### 东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ，在 1 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 。

学位论文作者签名：饶利辉

指导教师签名：苏以皇

日期：2004年12月29日

日期：2004年12月29日

## 第一章 前言

### 第一节 固液分离技术的应用领域及发展趋势

#### 2.1 固液分离技术的应用领域

固液分离过程是工业上将一种物质从另一种物质中分开的基本操作过程，过滤是固液分离的基本手段，它以物理或机械的作用和方法使两相混合物通过多孔介质，达到固相和液相分离的目的<sup>[1]</sup>。

随着全球能源、环保行业的迅猛发展，食品、药剂、生化、冶金以及水处理等行业高纯净、高品质的需求和经济全球化，使得固液分离技术越来越受到全球各个国家的高度重视<sup>[2]</sup>。由于我国国民经济的超常规发展，我国已经成为钢铁、水泥、煤炭、纺织、服装等产品的世界第一生产大国，牛奶、水产品生产也居世界第一，这将大大地促进了我国过滤材料的迅猛发展。同时随着科学技术的进步，人们越来越认识到生活饮用水水质的优劣与人类健康密切相关，由此发展了一系列饮用水净水技术，相应地净水后饮用水地各项性能也日益提高。尤其是近二三年来不少家庭又青睐于桶装纯净水，但是桶装水一方面价格高于自来水数十倍，另一方面，桶装水容器及饮水机也存在二次污染问题，所以，许多长期追踪饮用水质量的专家仍旧认为家庭自行过滤净化自来水是最经济可行的选择，问题是如何将具有高效的过滤材料及滤芯的定期更换<sup>[3]</sup>。食品、药剂、生化、冶金以及水处理的过滤净化，实质上都包含有固液相分离的过程<sup>[4]</sup>。

#### 2.2 固液分离技术的发展趋势

随着科学技术和工业生产的发展，能源、资源、农业、三废治理、节能等问题将更受到重视，生物化工、新型材料、精细化工等高新技术领域的迅速发展，必然会对固液分离技术提出更高的要求<sup>[5]</sup>。预期今后固液分离技术的研究和开发将主要集中在以下几个方面<sup>[6]</sup>：

- ①、能源多元化中燃料（如煤、铀、油等）开采过程中物料的处理。
- ②、高品质，其生矿资源利用过程中提取精矿时，液体和固体的分离过程。
- ③、水处理，包括工业用水的处理，工业和生活用水处理和再生利



用。

- ④、生物化工，医药化工的高纯制品，半导体工业和微电子工业的高纯水处理技术。
- ⑤、现有传统工业生产中的如矿山、化工、冶金、轻工、食品、机电行业中过滤装置的改进等。

由于在以上领域中过滤材料或过滤器被广泛的应用，而在固液相分离过程中，由于被分离的固体颗粒中的粒径大小不均一的特点，使得固液分离过程是一个非常复杂的体系，为了提高固液相的分离效率，因此合理生产一种高过滤效率、低压降等性能的滤芯产品也就迫在眉睫。

## 第二节 国内外非织造过滤材料的现状与发展趋势

### 2.1 国内非织造过滤材料的现状与发展趋势<sup>[7]</sup>

中国是一个文明古国，早在 2000 多年以前，中国人就已经掌握了用真丝织造而成的筛网来过滤中药、染料等的过滤技术。而中国现代过滤技术的应用与发展还是在解放以后，随着大规模国民经济建设的开展而开始的。在 50 年代到 60 年代末我国的非织造技术还不是很发达，因而大部分过滤材料都是采用机织的方法制成，多数是用在化工、食品、医药等行业的液体过滤。60 年代末 70 年代初我国开始了非织造滤材的研制，首先研制成功的是湿法非织造滤材及饱和浸渍化学粘合的非织造滤材，以后是针刺加固及喷洒化学粘合的非织造滤材。70 年代末热粘合非织造滤材也研制成功，80 年代中期开始研制成功了一些功能性的过滤材料如：耐高温滤材。进入 90 年代以来，我国的非织造滤材进入了一个全面发展的时期，相继研制成功多种非织造滤材如：复合滤材、成型滤材（滤芯）、功能性滤材（抗静电、阻燃、耐高温等）等。到目前为止我国已建成一个较完整的非织造滤材生产体系。

今后 5~10 年中国的非织造滤料年增长速度将超过 10%，非织造滤料用量将肯定超过纺织滤料，成为滤材的第一大品种。预计 2010 年中国非织造产品量将超过 60~65 万吨，届时作为耐用型非织造材料主要产品之一的滤材产品将超过 3~4 万吨之间。

针刺法非织造布的产品主要为：土工布、过滤材料、合成革基布、鞋

材等，而针刺法的过滤材料是目前应用于最多的过滤材料，普遍应用于空气过滤以及液体过滤形式，其产品包括过滤袋式、平板式。我国的湿法非织造布从 60 年代初就开始生产，主要生产过滤材料。湿法非织造过滤材料的重要性和以前相比虽然有所降低，但是在一些领域特别是在廉价的通用型滤料及某些特种滤料方面，目前湿法仍是无法被其他非织造技术所取代的一种非织造滤料的重要手段。其原因是：湿法非织造技术可用较低成本生产出具有较高均匀度与一定强力的滤料，产品主要应用于茶叶滤袋、化学品过滤、汽车用滤料等。纺粘和熔喷过滤材料已经在世界范围内显著成长起来。即使在中国我们至少拥有 15 家公司可以生产熔喷超细纤维产品，通常与纺粘材料合成起来。此外，在中国还有至少 30~40 家相对小型的熔喷产品生产商，他们依靠自己的设备发展。几年前中国曾有大约 10000 吨的熔喷产品生产量，过滤产品占据了约 2700 吨。并且我们可以预言到 2010 年中国的熔喷产品产量将达到 20000~25000 吨<sup>[8]</sup>。纺丝成网非织造布由于其生产的产品纤维很细，但是产品的强力以及均匀性存在一定的局限性，因此其产品一般可以生产高滤效的复合滤料，主要应用于空气过滤。

在液体过滤上中国远落后于西方国家。原因是直至近 5~10 年城市的许多工厂都没有安装污水处理设备，所有这种设备都要使用过滤装置。然而自从中国政府改变政策以后，建起了许多城市及工业用水处理厂。因此过滤介质在液体过滤中的使用显著增加了。因此可以相信在未来的 5~10 年中国的非织造过滤材料市场将会更加的蓬勃发展。

## 2.2 国外的非织造过滤材料的现状与发展趋势

世界上目前生产与应用非织造布滤材最多的国家为美国，非织造滤材生产的主要公司也集中在美国，其次为西欧、日本。据有关报道，按地域分布，非织造滤材市场 41% 在美洲，欧洲（主要为西欧）占 35%，亚洲为 24%。生产非织造滤材的原料主要是聚酯、粘胶、聚丙烯以及许多高性能纤维。1993 年世界纤维材料型过滤系统与过滤器件的市场总额已达 20 亿美元，而 2003 年则预计可以达到 40 亿美元。其中过滤介质，也就是纤维材料制成的过滤系统占总销售额的四分之三以上，而且随着时

间的推移，其比重在上升<sup>[9]</sup>。

非织造滤材的生产手段几乎涵盖了所有的非织造加工技术，最早成功用于滤材生产的是湿法造纸非织造技术，还有化学粘合（浸渍法、喷洒法等）和针刺加固，纺丝成网、热粘合以及熔喷法，熔喷法发展较晚，但是由于其产品独特的特性使得熔喷法在现在的过滤材料市场上得到了强劲的发展趋势，并且成为仅次于针刺法的第二大类，而在熔喷法非织造布的应用领域中，滤料始终占主导作用。

作为非织造滤料的主要生产合成纤维或高分子聚合物的应用比例将继续上升，聚丙烯将成为使用最多的非织造滤料的原料。在以后，非织造滤料的生产手段百花齐放的局面仍将存在，但明显的趋势是熔喷法的应用将增加，纺丝成网，特别是细旦技术应用于滤料生产将有一定增加，针刺技术由于空气滤袋及家用吸尘技术的增加，仍将是一种主要的滤料生产手段。今后更多的将采用不同非织造技术组合生产滤料，非织造滤料将与其它过滤介质（如膜、纺织品、纸等）更多的复合使用，非织造滤料复合加工与其它深加工技术的结合也将增加。过去以大批量、单一品种形式出现的通用型普通非织造滤料的需求将会降低，代之以采用专门选择的原料，完全按使用要求设计的工艺生产的滤料。他们不仅要考虑质量、价格，更需要考虑使用效果、性价比。也就是说：非织造滤料的生产将从过去以取代新为主和少量专用型开发而完全转向更科学化、理性化的生产。反过来，就要求非织造滤料生产转向采用小批量、多品种、翻改品种方便的柔性生产系统（FMS）。

非织造滤料的应用将在高效微粒空气净化（HEPA）、超细微粒空气净化、液体过滤、汽车用过滤介质等方面取得更大市场。因此非织造滤料的应用前景十分光明，未来也将一定会蓬勃发展。各种工艺生产的非织造滤料由于其工艺不同生产的滤料的纤维尺寸也不尽一样，从而滤料的过滤特点也有所不同，具体见表 1-1：

表 1-1 各种过滤材料的结构和过滤特征<sup>[22]</sup>

过滤材料		纤维尺寸或滤材孔径	滤材特点
纤维介 质材料	非织造布	$0.1\mu\text{m} < \text{纤维尺寸} < 50\mu\text{m}$	纤维三维分布，曲径通道体系
	熔喷非织造布	$0.1\mu\text{m} < \text{纤维尺寸} < 10\mu\text{m}$	

	机织物或针织物	根据织物紧密度决定	滤材孔径均匀, 但深层过滤差
	玻璃纤维	$0.1 \mu\text{m} < \text{纤维尺寸} < 10 \mu\text{m}$	纤维细, 但滤材生产中易形成破洞
非纤维 介质材 料	膜或烧结材料	$0.01 \mu\text{m} < \text{滤材孔径} < 10 \mu\text{m}$	滤材孔径小, 但深层过滤差

### 2.3 熔喷非织造布滤材性能概述<sup>[10]</sup>

长久以来, 非织造布被广泛应用于空气及液体过滤, 近年来在世界范围内以每年高于 10% 的速度迅猛发展<sup>[11]</sup>。非织造布是一种具有三维杂乱分布, 熔喷非织造布又具有超细纤维结构的的多孔介质材料, 该三维杂乱网络可以通过拦截、惯性沉积、重力沉降、扩散沉积等机理分离所流经液流中的固相杂质<sup>[12]</sup>。因而近年来被国际上认为是一种优异的固液相分离材料<sup>[13]</sup>, 并在血液分离、水中有害物质分离与净化等领域显示着广阔的应用前景。

熔喷非织造布滤材的过滤性能包括表面过滤和深层过滤两种过滤机理<sup>[14]</sup>, 表面过滤即粒子随着流体运动, 在流线接近通过纤维时, 粒子与纤维发生接触, 被纤维捕获。一般来说, 大粒径粒子主要靠直接捕获作用过滤, 非球形的粒子较球形的粒子更易捕获; 深层过滤即: 悬浮液中的固相颗粒较细, 且固相颗粒含量又少, 滤液在通过过滤介质时, 这些微细的固相颗粒在过滤介质层内部被捕捉<sup>[15~19]</sup>。

## 第三节 国内外熔喷滤芯的现状与发展趋势

### 3.1 熔喷滤芯的立体成形方式以及概述

熔喷滤芯, 是采用特殊的熔喷工艺从一可拆换熔喷模头喷丝孔中挤出聚丙烯熔体细流, 经喷丝孔两侧高速热空气流拉伸形成扇形瀑布状纤维喷射, 并由接收装置上的芯棒连续不断地缠绕而成型, 其过滤层上的纤维为相反螺旋方向隔层交叉, 构成迷宫式过滤孔隙结构, 高热空气流同时还对纤维起载送和热量输送作用, 而且对到达芯棒的纤维丝起压紧作用, 保证隔层纤维结点处有良好熔焊<sup>[20]</sup>。

熔喷聚丙烯纤维滤芯外形为一中空管体状, 滤芯管壁厚度即是过滤层厚度, 根据有关资料表明, 过滤层可以分为精滤层、中滤层、粗滤层组成。工作原理过程是悬浮液从外圆表面进入, 滤液从内圆表面流入中

心集液腔而引至芯外。

滤芯泛指一切具有圆筒状外形的采用深层过滤机理的过滤介质。滤芯式过滤器结构简单，装置费用低，广泛应用于自动车辆和空间工业的保障液压和润滑系统，电镀工业的镀液的过滤，饮料、医药、化工生产以及气体的净化等领域。

滤芯种类繁多，按其使用性能可分为两大类，一是不可再生滤芯，包括棉花、羊毛、人造纤维、玻璃纤维、尼龙、石棉等经粘结、缠绕制成的疏松结合物。二是刚性可重复使用滤芯，包括多孔陶瓷、缠绕金属丝、烧结金属丝及多孔塑料等。

按介质结构又分为侧边式、深层式及表面式滤芯。侧边式滤芯是由开槽道的中心杆上重叠套置特殊加工的环片或将金属丝缠绕在一个圆柱体骨架上所形成的连续筒形刚性结构体，可以清洁再生。深层式滤芯适用于悬浮液中的固相颗粒较细且固相颗粒含量又少的液体过滤，滤液在通过滤芯时，这些微细的固相颗粒在滤芯内部孔隙被捕捉。粘结式及绕线式是深层式滤芯的主要形式，其结构简单、紧凑，一次性使用，容渣能力高，造价低廉，可以从液体中除去小至  $1\mu\text{m}$  的颗粒。表面式滤芯是用纤维素滤纸或经树脂处理的滤纸经过压皱或打褶形成，可以增加过滤面积或使用寿命。表面过滤中，粒子随着流体运动，在流线接近通过纤维时，粒子与纤维发生接触，被纤维捕获。一般来说，大粒径粒子主要靠直接捕获作用过滤，非球形的粒子较球形的粒子更易捕获。

一般情况下，滤芯具有一个完整的筒状结构，配上一个合适的外壳便形成一个滤芯式过滤器。当处理量比较大时，多个滤芯装入一个压力容器，如管壳状结构，称作滤筒<sup>[21]</sup>。

### 3.2 国内外滤芯的现状以及发展趋势

进入 90 年代以来，我国的非织造滤材进入了一个全面发展的时期，相继研制成功多种非织造滤材如：复合滤材、成型滤材(滤芯)、功能性滤材(抗静电、阻燃、耐高温等等)。从 90 年代开始我国对立体成型滤芯就有一定程度上的了解，但是大部分都只是在外观等方面的研究，对滤芯的具体性能方面的研究在文献中还未发现。国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心于 1995 年 8 月成功研制出活性炭纤维筒式滤芯，它以国产优

质活性炭纤维为原材料,采用无粘接剂的热熔焊封口技术制成通用型的滤芯单元,适合现有大多数微孔滤器的配合使用。与传统的压缩粒状活性炭滤芯相比,具有以下特点:纤维细、外表面积大,比表面积大。一般约为 $5\sim 20\mu\text{m}$ 的直径,比表面积为 $1200\sim 2500\text{m}^2/\text{g}$ 。纤维纯度高,不含杂质。这样处理水时没有溶出物,不引入新的污染。重量轻、体积小、填充密度高,流体阻力小;吸附、脱附速度快,接触时间短、透水速度大<sup>[23]</sup>。

纵观世界滤芯市场的发展情况可以看出,在20世纪初期,由于国外工业化进程的不断发展,人民生活水平的不断提高以及人类对环境的认识及要求也在不断的提高,西方国家的滤芯市场也逐步发展并且完善起来。在滤芯的使用初期主要是使用在一些工业领域如:石油的采掘、汽车方面等用的过滤滤芯。在20世纪50年代中期,由于非织造布领域中的熔喷技术的发展和兴起,使得熔喷的立体成型滤芯在饮用水处理方面得到了进一步的发展。但是在国内由于在改革开放之初,我国的国民经济水平不高,人民的生活水平也不高的局面,民用及家庭饮用水处理上使用的滤芯并没有得到长足的发展,大部分的滤芯使用集中在工业应用领域,也主要集中在石油的采掘、汽车过滤等方面,其滤芯大部分是由一些陶瓷、金属丝等烧结而成的,因此大部分的研究工作也集中在这方面。对熔喷技术生产的滤芯研究相对较少,并且对这方面的研究成果还未见有关文献报道。

有关非织造的专家预测,过滤材料是目前发展比较迅速的一个研究方向,非织造工业以其独特的加工工艺,将过滤材料运用于各个领域。过滤材料市场中滤芯是最大的一部分,其中非织造布滤芯又占有整个滤芯市场中的最大部分,其次是汽车过滤(包括一些应用在空气过滤中的滤材),最后是滤袋<sup>[24]</sup>。

在工业化的世界里,人民日益加强对环境和健康问题的重视。在世界上发展最快的国家——中国也是如此。这就需要数量多、品质多、质量优的过滤器产品来满足人民日益增强的卫生、饮食和环保需求。

#### 第四节 本课题的研究意义及研究内容

现今人类对环境、安全及健康的需要日益重视,特别是对水质的重

视，因此液体过滤是不可忽视的一个重要环节，无论是工业废水处理，还是日常生活中的家庭净水，或是工业产品的净化和生活饮品的净化都离不开液体过滤<sup>[25]</sup>。

非织造布技术的发展为滤芯的开发开拓了一个新的发展空间。非织造布，特别是熔喷工艺生产的非织造布，它具有独特的纤维网络结构、空隙小、分布均匀，使得过滤载体相在通过滤芯的纤维曲径时分散作用加强，载体相中欲分离的粒子有更多与纤维碰撞或粘附的机会<sup>[26]</sup>；非织造立体成型的熔喷滤芯的纤维呈三维杂乱分布结构，能有效提高过滤效率，也能提高载体相的流动速度，加速过滤的过程<sup>[27]</sup>。

由于熔喷工艺生产的滤芯具有独特的性能特点，因此滤芯被广泛的应用于固液分离领域中。熔喷聚丙烯（PP）滤芯，是近年发展起来的一种新型微孔式过滤介质。许多过滤器的过滤能力依赖于过滤介质的孔径<sup>[28]</sup>。在实验阶段，我对实验设备的关键部件进行改进，包括模头组件、螺杆、接收装置，使得能够生产出具有立体成型结构的熔喷滤芯。虽然在实际生产过程中，有关工程技术人员根据液体中固体颗粒的粒径大小不一的特点，而假设把滤芯生产成一种具有一定孔径梯度分布的滤芯<sup>[29]</sup>，但是在有关理论方面的研究还未见报道，因此在本课题的研究中将讨论具有孔径梯度的滤芯在过滤效率、压差特性和通量等影响滤芯性质的主要因素方面进行分析，从而得到实际生产中具有孔径梯度的滤芯的理论支撑点。过滤效率、压差特性以及通量可以利用本课题自己设计的实验装置试验和流量—压降试验来评定滤芯在这三方面的性能指标<sup>[30]</sup>。本课题将主要根据多因子多水平的最优化方法研究滤芯每层的结构参数与滤芯性能的关系，并试验分析选出一种最优的滤芯的生产工艺方法，为我国的滤芯生产厂商提供一个有关滤芯各层结构状况、性能与工艺的关系，滤芯的过滤理论与科学，更好地推动我国液体过滤技术发展。

目前国内过滤器厂商很难为市场提供高质量的过滤产品，其主要原因包括测试技术和制造技术<sup>[31]</sup>。由于国内大多数生产滤芯的厂商都是一些小型的企业，资金有限，要他们每个企业都购制一套滤芯的测试仪器是不太现实的事，在课题阶段，将根据有关工艺参数，对其结构与性能

进行分析和研究。在以后生产过程中,企业工程技术人员就可以根据本课题的研究,指导工艺参数的改进,使得生产出更加高质量的滤芯产品。

参考文献:

- 【1】 张建伟 国外过滤技术的最新发展与应用 过滤与分离 1994、4 33~36。
- 【2】 梁金龙 章琪 国外过滤与分离机械发展概况 过滤与分离 2000、10 1~7。
- 【3】 洪雷 王新厚 黄秀宝 液固相组合过滤材料研究 1998 中国国际非织造布/产业用纺织品研讨会论文集 113~120。
- 【4】 大鞞 雷乐成编著 水处理新技术及工程设计 化学工业出版社 341~358。
- 【5】 姚公弼 固液分离的应用和发展概况 过滤与分离 1994、2 1~4。
- 【6】 James M. Chemical Engineering 4 May 38 1984。
- 【7】 王延熹 中国非织造过滤材料生产和应用的现状与发展 第一届中国国际过滤材料研讨会 1~4。
- 【8】 Lutz Bergmann Worldwide Filtration Outlook into the 21<sup>st</sup> century The 2<sup>nd</sup> China International Filtration Conference 1~4。
- 【9】 王延熹 国外非织造滤料发展现状与前景 产业用纺织品 2000 14~18。
- 【10】 王延熹 主编 非织造布生产技术 中国纺织大学出版社 1998, 273~292。
- 【11】 Peter P. Tsai 世界非织造过滤材料的现状和未来 新纺织 2001 年第五期 33。
- 【12】 Larry C Wadsworth, Young Chul Lee, Steven D Barboza. Relationships Among Melt Blown Web Structure , Air Permeability and Filtration Efficiency INDA Journal of Nonwovens Research , 2 (1), 43~48, 1990。
- 【13】 David L Lewis, Michaels, Dolomitic Activated Carbon Filter. USP 5, 198~114, 1993。
- 【14】 Ke Qinfei Study on the Leukocyte Filtration Model of Nonwoven Media, Journal of China Textile University 2000 17 (2), 77~11。
- 【15】 黄齐模 吴道正等编 纺织品过滤材料 纺织工业出版社 8~21 , 1990。
- 【16】 Mechanism of Filtering, Textiles, 1975, 4 (3), 72~77。
- 【17】 L. 斯瓦洛夫斯基 等著,固液分离 原子能出版社 213~241,1982年3月。
- 【18】 丁启圣 王维一 等编著 新型实用过滤技术 冶金工业出版社 25~28,2000。
- 【19】 罗茜 主编 固液分离 冶金工业出版社 105~128, 1997。
- 【20】 李毅、叶斯奕.熔喷聚丙烯纤维滤芯的特点及工作条件.过滤与分离 Filtration



& separation, 2001(11.1): 38~40。

【21】孙丰阁、朱企新. 精密过滤技术与设备. 化工装备技术, 1995(4): 38~41。

【22】柯勤飞. 面向 21 世纪熔喷非织造滤材的性能与设计 产业用纺织品, 2000, (5)。

【23】万春新等. 国产活性炭纤维性能测试 水处理技术 2001 27 (2) 115~117。

【24】李治 王伟民. 21 世纪非织造过滤材料的发展现状及趋势 2003, 11 (1) 13~15。

【25】张家祥. 非织造布在固液分离介质中的作用 产业用纺织品 2000 年第五期, 9~11。

【26】靳向煜 主编. 非织造工艺技术研究论文集 中国纺织大学出版社 1996, 240~244。

【27】Pan Ying, Wang Shanyuan, Relationships Between the Processing Parameters of Melt Blown Nonwoven Fabric and Its Structure and Filtration Property, Journal of Donghua University 2001, 18 (2), 79~84。

【28】Randy Delenikos. Separation vs Filtration: The Issue of Performance The 1<sup>st</sup> China International Filtration Conference Papers 13~18。

【29】黄来军. 液体过滤器的研究 化工装备技术 2000 21 (4), 4~6。

【30】Liu Yong. Filter Elements Verification and Analysis of Flow Fatigue Characteristic, The 1<sup>st</sup> China International Filtration Conference Papers 215~222。

【31】戴天翼. 我国过滤材料的标准亟待起草与颁发 第二届中国国际过滤材料研讨会论文集, 357~359。

## 第二章 实验系统的改进以及实验测试方法

## 第一节 熔喷滤芯的实验系统研制

熔喷滤芯（立体成型），是采用特殊的熔喷工艺从一可拆换熔喷模头喷丝孔中挤出聚丙烯熔体细流，经喷丝孔两侧高速热空气流拉伸形成扇形瀑布状纤维喷射，并由接收装置上的芯棒连续不断地缠绕而成型，其过滤层上的纤维为相反螺旋方向隔层交叉，构成迷宫式过滤孔隙结构，高热空气流同时还对纤维起载送和热量输送作用，而且对到达芯棒的纤维丝起压紧作用，保证隔层纤维结点处有良好熔焊。

熔喷聚丙烯纤维滤芯生产工艺流程如下：

空压机(或风机)→空气加热器→气体分配装置

聚合物原料准备→螺杆挤出机(熔融挤压)→过滤装置→计量泵→熔喷模头组合件→熔体细流拉伸→冷却→接收装置→卷绕成型装置→切割

东华大学非织造研究发展中心的整套熔喷滤芯试验系统由聚合物切片准备及输送、拉伸空气加压加热、聚合物熔融挤压、喷丝拉伸、接收成型以及电气控制等子系统组成<sup>[1]</sup>，如图 2-1 所示。

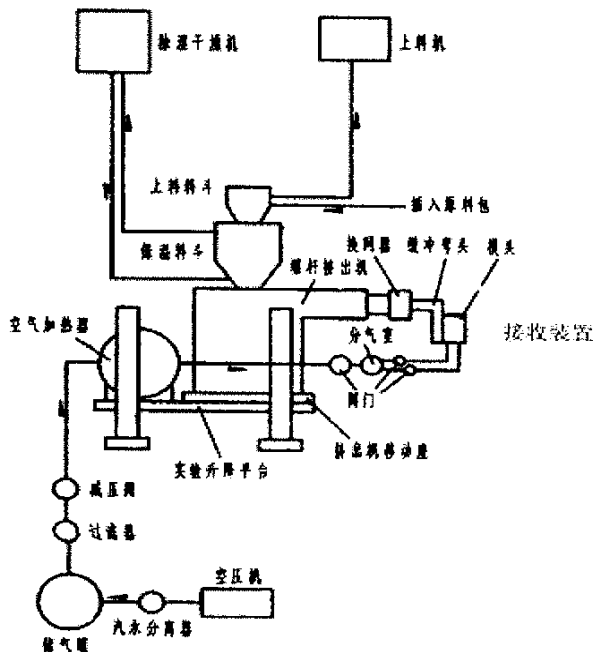


图 2-1 熔喷滤芯试验系统示意图

### 1.1 聚合物切片准备和输送系统

其主要作用是将聚合物切片从包装袋中吸至保温式热风干燥机, 并经过除湿干燥以供给聚合物熔融挤压系统。聚合物切片准备及输送系统由自动加料机 JL230、保温式热风干燥机 GZ108B 和电脑全功能除湿机 CS105 组成。

自动加料机 JL230 直接安装在保温式热风干燥机 GZ108B 上, 可将聚合物切片从储料箱或塑料包装袋中自动输送到保温式热风干燥机 GZ108B, 在输送过程中, 聚合物切片原料完全不受污染, 不带任何异物, 能使聚合物切片输送过程实现全封闭自动化。

电脑全功能除湿机 CS105 主要用于吸湿性较强的聚合物如 PET、PA、PBT 等, 并与保温式热风干燥机 GZ108B 配套使用。全功能除湿机 CS105 能源源不断输出干燥风至保温式热风干燥机 GZ108B, 干燥风带走聚合物切片的水分形成潮湿风后经过分子筛的干燥作用后形成干燥风, 再输出至保温式热风干燥机 GZ108B, 这是一个循环的过程。

保温式热风干燥机 GZ108B 安装在单螺杆挤压机 SF-30/28 上, 与电脑全功能除湿机 CS105 配套使用, 全封闭结构, 用于保持聚合物切片干燥状态并供给单螺杆挤压机 SF-30/28。

### 1.2 拉伸空气加压加热系统

其主要作用是加压加热喷丝成网所需的拉伸空气。拉伸空气加压加热系统主要由螺杆式空压机 HAS-22 和空气加热器 200L 等组成。

螺杆式空压机 HAS-22 采用一对螺杆压缩空气, 具有体积小, 运转平稳噪音小、无基础安装、搬运方便等特点。输出压缩空气经汽水分离器后进入储气罐, 再经过过滤减压后输送到空气加热器 200L。

空气加热器 200L 采用电加热形式, 压缩空气经过后最高可加热至 380℃, 温度控制采用工业 PC 控制, 具有升温快, 温控精度高等特点。加热后的压缩空气送往喷丝拉伸系统, 并配有相应的控制阀门。

### 1.3 聚合物熔融挤压系统

聚合物熔融挤压系统主要设备为实验专用单螺杆挤出机 SJ-30/28, 螺杆直径 30mm, 螺杆长径比为 28:1, 挤出量为 5~10kg/h。单螺杆挤出

机 SJ-30/28 采用变频驱动, 变频电机通过摆线针轮减速箱再传动螺杆。螺杆与套筒是单螺杆挤出机 SJ-30/28 的主要部件, 套筒外部设有 3 段加热区, 温度分别控制。加热温度设定可根据不同的聚合物原料来定, 通常从加料段到出料段温度逐渐提高。为了防止加料段温度过高, 使聚合物切片喂入困难, 单螺杆挤出机 SJ-30/28 的加料段设有循环水冷却。单螺杆挤出机 SJ-30/28 设有手动换网器。

#### 1.4 熔喷拉伸系统

其主要作用是使聚合物熔体从熔喷模头的毛细孔中挤出, 再由两侧的高速热空气流拉伸成为超细纤维。熔喷拉伸系统由缓冲弯头、熔喷模头组件及加热装置组成。熔喷模头组合件由底板、气板和三角模头组成。为了防止高温氧化和热变形, 其材料采用 1Cr18Ni9Ti。

#### 1.5 实验平台

主要作用是配合西门子 S7-200 工业控制计算机, 控制调节螺杆挤出机的高低位置和前后位置。实验平台主要由 4 根立柱、平台、传动部件、螺杆挤出机移动座等组成。实验平台上安装有空气加热器 200L, 单螺杆挤出机 SJ-30/28, 控制阀门、保温式热风干燥机 GZ108B 等。

#### 1.6 接收成型系统

其主要作用是接收喷丝拉伸系统形成的超细纤维。接收成型系统为模块化设计, 分平面块状、立体接收和卷状连续接收模块。在本实验时采用的是立体接收形成圆柱状的过滤芯棒—滤芯, 辊筒转速、横动速度以及接收次数均由西门子 S7-200 工业控制计算机控制, 此外, 西门子 S7-200 工业控制计算机还可以控制螺杆挤出机的前后移动距离, 来改变接收装置的接受距离。

#### 1.7 电气控制系统

其核心是西门子 S7-200 工业控制计算机, 并配有西门子 OP27 彩色液晶显示操作屏。其主要作用是自动控制空气加热器 200L 的温度、喷丝拉伸系统的温度、接收器转速和横动速度、接收次数以及接收距离按不同接收次数的调节。

### 第二节 熔喷滤芯实验系统关键装置的改进

根据本试验的要求以及生产熔喷滤芯对试验装置的要求,对下列试验装置进行了重新设计和安装。

## 2.1 模头组件

模头组件是聚合物喷丝成网系统的核心部件之一,它的改进直接影响纤网、纤维内外在质量的好坏。本课题实验采用 250mm 的模头,由 166 个喷丝孔组成。模头组件由喷头、气板、和底板三部分组成。

(1) 喷头 喷头是模头组件的中间部分,聚合物熔体是由喷头最终被挤出。如图所示为改进后的喷头,(因改进前的喷头在图形形状上和改进后的喷头相差不大,只有喷嘴上的微小改进,故图省略)。

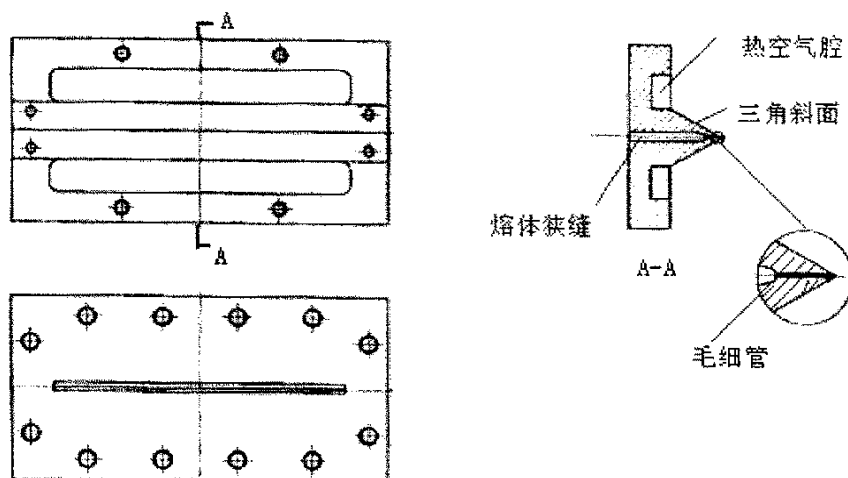


图 2-2 改进后的喷头示意图

喷头的喷丝孔的直径 0.2mm 没有改变,但是长度加长,由原来的 2mm 加长到 3mm,其结果是喷丝孔的长径比  $L/D$  加大为 15 了。由于聚丙烯熔体是较典型的假塑性流体,当它经喷丝孔流出时,产生巴拉斯效应,也称为挤出膨胀,是指被挤出时断面积远比喷嘴孔断面积大。它有时直接影响纺丝质量,结果直接影响纤网的质量。在实验纺丝温度低,熔体的粘度较大时,巴拉斯效应尤为明显。

由于当剪切速率恒定时,挤出膨胀比随喷丝孔长径比  $L/D$  的增大而降低,挤出膨胀随熔体在喷丝孔内停留时间呈指数关系地减小。其关系可表示为:

$$B - B_{\infty} = (B_0 - B_{\infty}) \exp(-kt) \quad (2-1)$$

式中  $B$ —为挤出膨胀比

$B_0$ 、 $B_{\infty}$ —时间为 0 和无穷大时的离模膨胀比  $B$  值

$t$ —为通过喷丝孔的时间

$k$ —为衰减速率常数

因此，加大喷头的长径比  $L/D$ ，可以有效地减小挤出膨胀比值，优化纤维的内外在质量，保证实验的顺利进行。

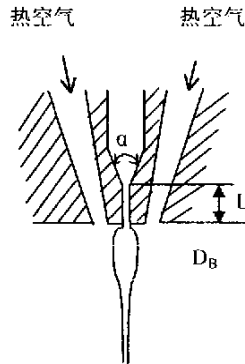


图 2-3 熔喷喷头孔模型图

(上图 2-3 中:  $D$ —孔径  $L$ —孔长度  $\alpha$ —导入角度  $D_B$ —吐出丝条的最大直径)

$$B = \frac{D_B}{D} \quad (\text{膨胀比}) \quad (2-2)$$

从熔喷工艺上要求  $B$  的值小，纤维欠伸平稳，断头减小，纤维条干均匀性好。实验表明，为减少挤出膨化对熔喷纺丝的区别因素，适当将喷丝模头的喷丝孔长径比  $L/D$  提高，提高模头的温度。

(2) 气板 气板是与喷头相配合的前面部分，两者的配合形成一个空气室，热空气在这里经合理分配后流出，对聚合物熔体形成牵伸。改进前后的气板如图 2-4、2-5 所示。

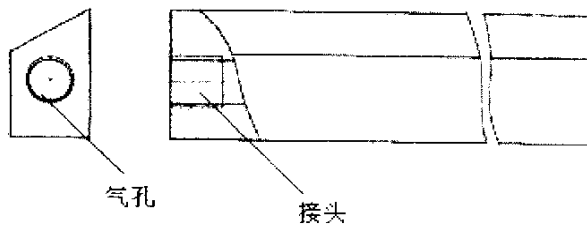


图 2-4 改进前的气板

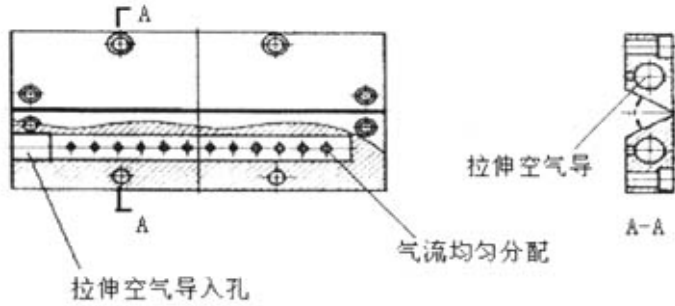


图 2-5 改进后的气板

上图 2-4 中,改进前的气板气流从一边进入空气室(空气室是一个尺寸不变化的气流通通道),再从出气狭缝流出来。流出的气流完全是自由分配,靠近进气的地方狭缝出气的压力大,在逐渐远离进气地方出气压力逐渐减小,因此,沿着模头纵向气流的流速由进气端到另一端逐渐递减,气流对熔体产生的牵伸力也逐渐减小,这样会引起熔喷出来纤维直径的差异。

改进后的气板如图 2-5 所示,进气的空气室尺寸不变,在分配气流时采用一排直径不同的圆形气孔,靠近进气的地方孔径最小,以后在逐渐远离进气的地方孔径逐渐加大,这样可以有效的改善旧式气板的气流分配不匀,均化纤维直径,改善纤网的质量。

(3) 底板 底板是与喷头后面配合的部分,聚合物熔体是由底板送入喷头的。改进前后的底板如图所示。

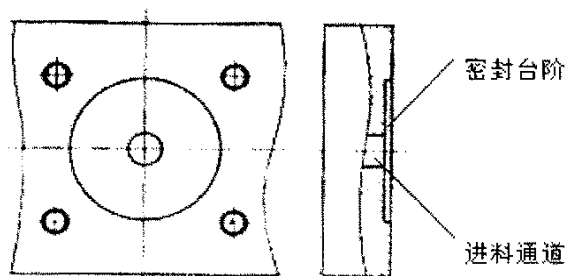


图 2-6 改进前的底板

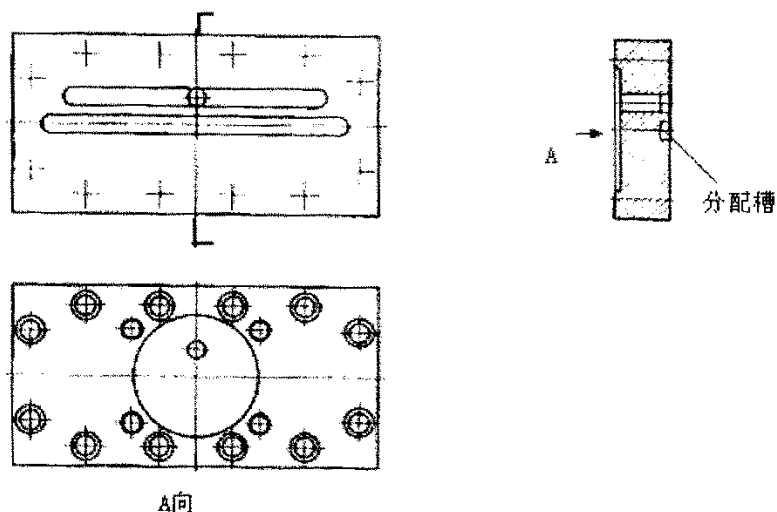


图 2-7 改进后的底板

上图 2-6 中,改进前底板这样的结构使聚合物熔融流体由底板直接进入喷头后面的中部,然后在压力的作用下向喷头的狭缝两边流动,再由口模被挤出。在这里也象气板一样,存在熔体的分布不匀和出口压力的不匀问题。

改进后的底板如图 2-7 所示,熔体偏心进入底板和喷头形成的第一条缝,在那里先得到一次熔体的均匀分配,再进入喷头的后面狭缝,经过口模被相对均匀压力挤出。改进的底板可以有均匀聚合物熔体的分布和压力,改善纤网的内在质量。

## 2.2 螺杆

螺杆是将聚合物熔体熔融挤出的主要动力部分。通过螺杆的转动,将聚合物熔体搅拌均匀、挤压排空,并以一定的体积流量挤出熔体。如图 2-8 所示螺杆的示意图。

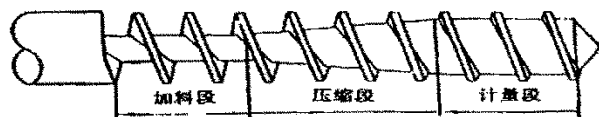


图 2-8 螺杆示意图

螺杆有四种形式:长区渐变型螺杆、短区渐变型螺杆、突变型螺杆和计量型螺杆。螺杆的结构特征如螺杆直径、长径比、螺杆分段与分段长



度、压缩比、螺距与螺槽深度等，决定了螺杆挤出机的使用特性。

螺杆分进料段、压缩段和计量段，三段长度的分配与被实验的聚合物切片性质有关。

螺杆的压缩比是指螺杆进料口处螺槽容积与计量段最后一个螺槽容积之比。它表示聚合物熔体通过螺杆的全程被压缩的程度。压缩比愈大，熔体受到挤压的作用也就愈大，排除熔体中所含空气的能力就大。压缩比的获得通常采用等距不等深螺杆的方法。等距不等深螺杆的压缩比可用下式(2-3)计算：

$$\varepsilon = \frac{D^2 - d_1^2}{D^2 - d_2^2}$$

式中：D—螺杆直径

$d_1$ —进料口螺杆根径

$d_2$ —出料口螺杆根径

压缩比  $\varepsilon$  主要取决于聚合物性质、状态和切片截面形状，通常为 2.5~3.5，加工本实验的 PP 聚合物时， $\varepsilon$  最小为 2.8。

### 2.3 接收装置

东华大学聚合物喷丝成网实验系统原有的接收装置是圆形光面滚筒，滚筒直径很大(如图 2-9)所示，但是在本实验中由于立体成型滤芯的形状等性能的独特性，因此在实验前期对试验的接收装置进行了重新设计，设计以后的接收装置由芯棒(直径 29.3mm)、压力辊以及切割装置组成(如图 2-10)所示。我们实验室的接收装置是间歇式立体接收装置，实际生产的接收装置有使用连续式立体接收装置。间歇式立体接收装置的特点是整个接收装置来回移动，熔喷成形的超细纤维多层次地缠绕在转动地芯轴上；成形时外表面采用成形压辊整形；通过改变接收距离，可以生产具有密度梯度地滤芯；改变芯轴尺寸，可以生产不同内径地滤芯；调节成形压辊位置，可以生产不同外径地滤芯。由于每根滤芯制成后需要更换芯轴，因此间歇式立体接收方式地制成率很低，连续式地立体接收装置地制成率相比要高。

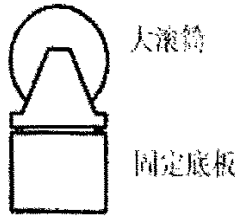


图 2-9 改进前的接收装置图

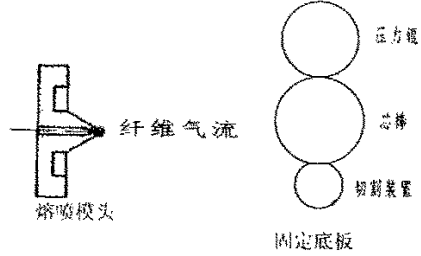


图 2-10 改进后的接收装置简图

### 第三节 熔喷滤芯立体成型原理

在生产熔喷(立体成型)滤芯和熔喷非织造布的主要区别之处就是两者的接收装置不同,在生产熔喷非织造布时接收装置是平网帘,而在生产熔喷立体成型滤芯的时候接收装置为经过特殊设计的芯棒形式。下面对在熔喷过程中接收距离与接收装置的直径大小关系进行探讨,并且对在接收过程中接收装置的直径大小对熔喷纤维的力学作用分析。

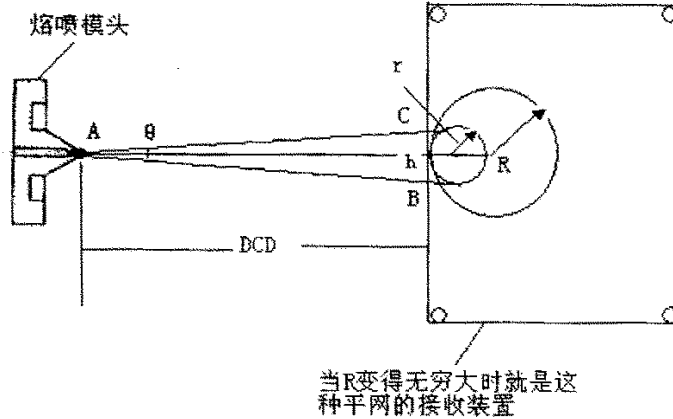


图 2-11 熔喷过程中接收装置原理分析图

上图 2-11 中半径为  $r$  的代表直径比较小的接收装置(本课题实验使用),半径为  $R$  的代表直径比较大的接收装置(本实验室实验平网熔喷材料使用), $R$  无穷大时为平网帘接收装置(实际工厂使用)。DCD 为接收距离, $h$  为熔喷过程中纤维的波动幅度, $\theta$  为模头附近的纤维“波动”角度。

$$\text{对上述三种情况假设 DCD 即接收距离都相同, } \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{\frac{h}{2}}{DCD} \quad (2-4)$$

$$\text{可知: } h = 2 \times DCD \times \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (2-5),$$

从式 2-5 中可以看出由于熔喷生产过程中模头的位置不动, 因此角度  $\theta$  不变, 而接收距离 DCD 增大时, 因此  $h$  也会增大, 即接收距离增大时, 纤维在到达接收装置时“波动”也会增大。因此在设计滤芯接收装置时可以利用这点而设计直径小的芯棒来利用纤维“波动”达到理想的纤维包覆作用。

在右图 2-12 中, 选择两个不同的点 A、B 来作为在接收装置上的分析点,  $V_1$  和  $v_1$  是沿着熔喷气流方向的速度,  $V_2$  和  $v_2$  是沿着接收装置方向的线速度。纤维在达到接收装置的过程中不断的“波动”, 在接触接收装置的时候

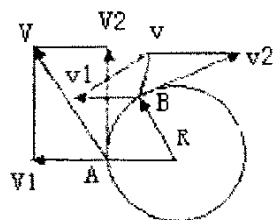


图 2-12 接收装置受力分析

的角度不一样, 纤维的运动方向也不一样。对于滤芯棒装置有部分纤维直接包覆着而不碰撞芯棒, 从而减少纤维“弹跳”几率, 更好的形成包覆良好的滤芯。在平网帘接收装置中, 纤维接触网帘时不会产生这种受力情况, 但是纤维可能会出现垂直的“溅射”然后平铺在网帘上。从上面可以看出在设计滤芯棒时直径小更加可以提高纤维的包覆以及形成更好的滤芯结构的原理。

#### 第四节 熔喷滤芯性能的测试方法

为了更加准确的从理论上对滤芯的结构和性能之间的关系进行分析, 必须掌握相当的实验数据, 只有充分掌握了相关资料, 从大量的实验事实的基础上, 来对研究对象作客观评价和理论分析。因此, 笔者对熔喷滤芯液体过滤材料做了孔径值、通量、压降—流量以及浊度效率等性能的实验以及测试工作, 下面将把实验的测试方法介绍如下:

##### 4.1 材料厚度<sup>[2]</sup>

熔喷材料是一种可压缩的材料, 当材料在一定外力作用下就会发现不同程度的压缩, 因此在测定材料厚度时要严格规定测试条件。实验采用 YG(B) 141D 型数字式织物厚度仪进行测试, 实验的测试依据为: GB/T3820—1997, 在测试过程中根据织物的类型选择合适的压脚面积和加压砝码, 在本测试过程中采用的加压砝码为 200CN, 压脚直径为 37mm,

选择压脚承压时间为 10s, 由于测试样品为小块样品, 因此在实验时选择为“单次”, 一般大块织物推荐为“连续”。仪器的调零为: 不放试样, 在压脚上放所需的加压砝码, 按下“启动”键, 在压脚压在底板上并保持一段时间后, 表头左侧“读数”指针灯亮, 此时, 按“零位按钮”置零, 随后该仪器就会自动复位。在测试时平整地无张力地将试样放置在底板上, 按下“启动”, 到表头“读数”指示灯亮时读取厚度值。

#### 4.2 孔径值与孔径分布的测试<sup>[3]</sup>

非织造材料中存在的孔可以分为三类: 密闭孔、通孔和盲孔。密闭孔是整个闭合的, 流体不能通过; 盲孔一端开放, 另一端闭合, 因此流体也不能通过; 通孔两端都开放, 因此流体可以通过。通常孔的横截面都是不规则的, 因此很难来定义孔径。我们通常说的孔径  $d$ , 被定义为<sup>[1]</sup>:

$$(dS/dV)_{\text{实际孔}} = (dS/dV)_{\text{当量圆形孔}}, d = 4/d \quad (2-6)$$

式中:  $dS$ —孔表面积;  $dV$ —孔体积;  $d$ —名义孔径。

上式也就是用圆形孔的孔径作为不规则孔的名义孔径, 这样有利于简化对孔径的描述。

由于熔喷材料是一种多孔分布的材料, 材料多孔而且比表面积大, 可以被用作为过滤材料。由于本课题的熔喷滤芯过滤材料是一种液体过滤材料, 因此对其进行孔径测试及其分布情况就显得很有实际意义。在本实验过程中, 采用的测试仪器是美国 PMI 公司生产的孔径仪。

该仪器由调节室、一组高低流量传感器、电动计量阀、进排气阀、样品室组成。压缩空气从调节器经流量传感器进入样品室, 其流量的增加、减小或等于零由调节器根据测试项目来确定, 流量的大小则由流量传感器监控, 见图 2-13、2-14、2-15。

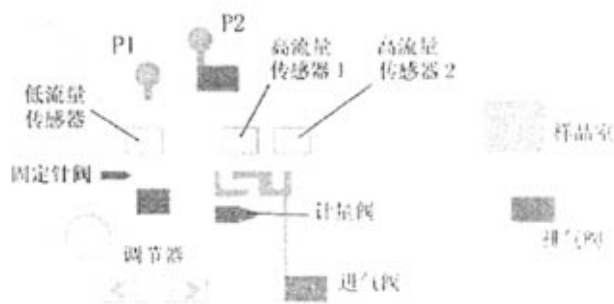


图 2-13CF-1100-A1 孔径仪结构示意图

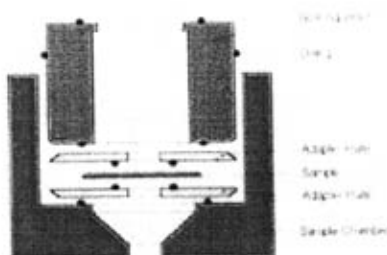


图 2-14 平面样品测试示意图

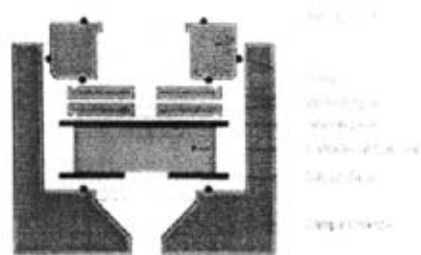


图 2-15 立体样品测试示意图

孔径分布测试可以获得样品的平均孔径、最大孔径、孔径分布、通过样品孔隙的累计流量等，对材料的孔隙结构能做出详尽的分析和判断。

PMI 流体孔率计对孔径分布的计算公式如下<sup>[4]</sup>：

$$FF\% = WF/DF \times 100$$

$$INCRFF\% = FF\%_i - FF\%_{i-1}$$

$$DIST = INCRFF\% / (D_{i-1} - D_i) \quad (2-7)$$

式中：FF%—材料干湿流量比；FF%<sub>i</sub>—第 i 个孔被打通时的干湿流量比；

WF—湿流量； DF—干流量； INCRFF%—材料干湿流量比增量；

DIST—材料的孔径分布。

由上述计算公式可以看出，仪器计算出的孔径分布就是孔的流体分布。

测试原理是在压力的作用下，气体通过干、湿（被已知表面张力的液体饱和润湿）样品毛细孔的流量变化来分析和计算孔径分布和孔径大小。孔径计算公式如下：

$$D = \frac{4\gamma_k \cos \theta}{p} \quad (2-8)$$

式中：D ——微孔直径

$\gamma_k$  ——表面张力(如汽—液界面自由能)

$\theta$  ——固液接触角

p ——微孔中通过的不同气压

饱和湿样品中的毛细孔道内充满液体，在压力作用下，孔径较大的孔道内液体较早被空气排除，即被打通吹干，孔径较小的则较晚被打通

吹干。随着被打通吹干的孔道的增加,空气流量逐渐增加,由此可以得到样品的压力—流量的干、湿曲线,从而获得样品的孔径分布曲线。

#### 4.3 液体浊度测试<sup>[5]</sup>

对于不同滤芯或相同滤芯使用过程中不同时间段,根据其上游(过滤前)液体中污染颗粒含量(浊度)与下游(过滤后)液体中污染颗粒含量(浊度)可得出该滤芯过滤能力的好坏。浊度单位一般为 NTU,可用浊度仪测量。

在实验中,采用上海悦丰仪器仪表有限公司生产的 SGZ—3 数显浊度仪,该仪器普遍用于对自来水的浊度测试。该仪器用于测量悬浮于水或透明液体中不溶性颗粒物质所产生的散射程度,并能定量表征这些悬浮颗粒物质的含量;采用国际标准 ISO7027 中规定的福尔马肼(Formazine)浊度标准溶液进行标定,采用 NTU 作为浊度计量单位。

表 2-1 浊度仪技术指标

型号	SGZ—3	
测定原理	90° 散射光	
最小示值(NTU)	0.01	
测量范围(NTU)	0-10, 0-150	
基本误差	±2%F.S	
重复性	1%F.S	
零点漂移(NTU/30min)	空腔	0.05
	零水	0.15
电压波动影响	0.5%F.S	
供电电源	220V ± 22V 50Hz 35W	
贮存环境	温度 0—45℃ 湿度 < 85%	

测量步骤:

- a. 开启仪器背后右下角的电源开关,预热 30min。
- b. 用不落毛软布擦净试样瓶上的水迹和指印,如不易擦净可用清洁剂浸泡,然后再用清水冲洗干净。
- c. 准备好校零用的零浊度水及配置校准用的福尔马肼标准溶液。
- d. 将零浊度水倒入试样瓶内到刻度线,然后旋上瓶盖,并擦净瓶体的水迹及指印,同时应注意启放时不可用手直接拿瓶体,以免留下指印,影响测量精度。
- e. 将装好的零浊度水试样瓶置入试样座内,并保证试样瓶的刻度线

应对准试样座上的白色定位线，然后盖上遮光盖。

f. 稍等读数稳定后调节调零旋钮，使显示为零。

g. 采用同样方法装置校准用的标准溶液，并放入试样座内，调节校准旋钮，使显示为标准值。

h. 重复 f、g、h 步骤，保证零点及校正值正确可靠。

i. 分别采集滤芯过滤前和过滤后具有代表性的样品，放入样品试样瓶，等读数稳定后即可记下水样的浊度值。

福尔马肼(Formazine)标准溶液的制备：

浊度仪检定中使用国家技术监督局颁布的 Formazine 标准物质，如 GBW12001 中 400 度(NTU、FTU)浊度(Formazine)标准物质，定值不确定度 $\pm 3\%$ ，有效使用期限 1 年。

不同浊度值的 Formazine 标准溶液是用零浊度水和经检定合格的容量器具按比例准确稀释 Formazine 浊度标准物质而获得。

400NTU 以上的 Formazine 标准物质需存放在电冰箱的冷藏室内(4—8℃)低温避光保存，已稀释至低浊度值的标准溶液不稳定，不宜保存，应随用随配。

浊度标准溶液稀释配制：

表 2-2 浊度标准溶液稀释配制(总配置量为 100ml)

需配溶液浓度(NTU)	原液 400NTU 吸取量(ml)
10	2.5

零浊度水的制备：

参照国际标准 ISO7027 中规定的方法，选用孔径为 0.1  $\mu\text{m}$ (或 0.2  $\mu\text{m}$ )的微孔滤膜过滤蒸馏水(或电渗析水、离子交换水)，需要反复过滤两次以上，所获的滤液即为检定用的零浊度水。该水贮存于清洁的、并用该水冲洗后的玻璃瓶中。零浊度水用于浊度仪的零点调整和福尔马肼(Formazine)标准溶液的稀释。

#### 4.4 浊度效率和压降—流量的测试

为测试流量—压降特性以及滤芯测试前后液体的浊度情况，作为本课程的研究内容之一：自行设计和搭建了一套过滤系统，用浊度仪测试过滤前后的水的浊度，可以算出这个滤芯的浊度效率。熔喷滤芯是一个具

有孔径梯度的多孔介质，在实验过程中流体方向和过滤方向是相互垂直的，这样有利于提高滤芯的使用寿命（在本文的第五章有研究）。滤芯的过滤机理（在本文第五章有详细研究）是：细小微粒随流体流过滤介时，一旦微粒直径大于多孔介质的孔隙时，微粒起到阻截作用，此作用称为筛分效应。当微孔被阻截时，个别孔径被阻塞，微粒之间相互不规则重叠，很快就形成“尘桥”结构，使稍大的孔径变小，微粒通路迅速变小，此现象称为架桥，时间一长堆积微粒就形成滤饼。在实验过程中滤芯的过滤效率呈现逐渐增大的趋势（见图 5-8），因此在实验的过程中在每隔一定的时间就测量以此滤芯的浊度效率，而滤芯的最后的浊度效率为滤芯每次测量的浊度效率的平均值。模拟现实中滤芯的使用条件，可通过阀门在线调节流量、压力、压差的大小，实时控制滤芯的使用状况。其原理示意图 2-16。

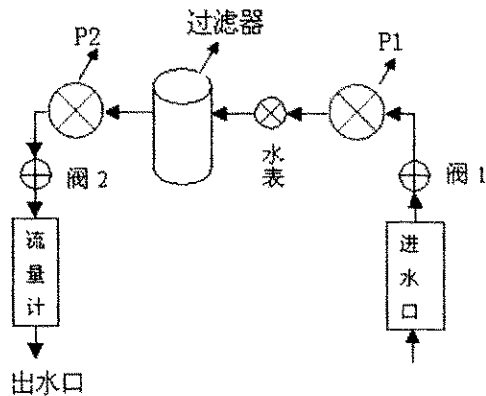


图 2-16 过滤系统示意图

图 2-16 中包括自来水进口、调节阀 1、软管、精密压力表 (P1, P2)，上海正宝仪表厂生产、普通自来水水表、过滤器(内置被测滤芯试样)、调节阀 2、玻璃转子流量计 (LZB-15) 余姚振兴流量仪表厂生产、出水口、水回收槽。

在测量压降—流量的过程中，根据需要给系统装置放气，以便把混入在整个回路中的空气减少到最少。在初步运行和放气之后，加大流量并针对递增的流量值取压力差，针对递减地流量值重复该程序，取递增组结果和递减组结果地平均值，计算并记录  $\Delta P = P_2 - P_1$ 。在测量压降—流



量的时候用阀 1 来控制水的流量，而不采用阀 2 来控制水的流量的方法，因为在考虑到滤芯的阻力等因素的条件下，认为用阀 1 来控制水的流量比用阀 2 来控制水的流量可以使系统能够更加符合系统的能量守恒定律。

由于每一个滤芯的压降—流量曲线并不是一条直线，因此在比较各个滤芯的压降—流量的性能优劣的时候就存在一定的困难。在本课题中根据笔者的研究结果表明（见图 5-6），滤芯的压降—流量的曲线是一条接近于直线的曲线。在实验中根据压降—流量的实验数据，可以把压降—流量的实验数据通过 matlab 数学实验的方法进行直线拟合，每一条拟合的直线的斜率就是这个滤芯的压降—流量的实验评价体系。

#### 4.5 滤芯的通量测试

滤芯的通量测试也即是滤芯的使用寿命测试是滤芯的一个很重要的考核指标。在本课题中，滤芯的使用寿命的测量也是采用图 2-14 的测试方法，由于每一个滤芯的结构的不同，在测试过程中其流过的水的总量肯定是不相同的，因此在实验中可以用每个滤芯在实验中所流过水的总量也成为水的通量来作为这个滤芯的使用寿命的评价指标。在测量滤芯的时候，实验的开始环境和最后的环境是相同的。开始环境通过实验系统的流量计来控制，每个滤芯在刚开始测量时候的流量都调到 400l/h，最后环境为压力表 P2 的压力为 0.02Mpa，此时水的流量很小，几乎可以忽略不计。

#### 4.6 孔隙率的测试

孔隙率在实验过程中属于间接测量指标。它是通过一些可以测量的指标，根据一定的公式来计算出非织造材料和滤芯的孔隙率的。非织造材料的孔隙率的计算公式<sup>[6]</sup>为：

$$\varepsilon = 1 - \frac{m}{z\rho} \quad (2.9)$$

式中： $\varepsilon$  为孔隙率，无量纲；

$m$  为样品的面密度， $g/m^2$ ；

$\rho$  为纤维的比重， $g/m^3$ ；

$z$  为样品的厚度，mm；

滤芯的孔隙率计算公式为:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4m}{\rho\pi(D^2 - d^2)h} \quad (2-10)$$

式中:  $\varepsilon$  为孔隙率, 无量纲;

$\rho$  为纤维的比重,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;

$h$  为滤芯的高,  $\text{mm}$ ;

$D$  为滤芯的外径,  $\text{mm}$ ;

$m$  为滤芯的重量,  $\text{g}$ ;

$d$  为滤芯的内径,  $\text{mm}$ ;

在本课题中, 上述两个计算孔隙率的公式都要用到, 非织造材料孔隙率的计算公式用于计算滤芯每一层中不同的工艺参数的孔隙率值, 滤芯的孔隙率计算公式用于计算滤芯的整体的孔隙率值。

#### 参考文献:

- 【1】 东华大学非织造研究发展中心喷丝成网实验系统说明书;
- 【2】 YG(B)141D 型数字式织物厚度仪说明书;
- 【3】 孔径仪操作手册 美国 PMI 公司;
- 【4】 Akshaya Jena, Krishna Gupta. Liquid Extrusion Techniques for Pore Structure Evaluation of Nonwovens. INTC2002. Atlanta, Georgia.
- 【5】 浊度仪测试手册 上海君悦仪器设备有限公司;
- 【6】 柯勤飞 靳向煜 主编 非织造学 东华大学出版社 2004 333;

## 第三章 熔喷滤芯材料性能的研究

### 第一节 熔喷滤芯聚合物的性能测试方法与聚合物的选择

#### 1.1 熔喷滤芯聚合物的性能测试方法

##### 1.1.1 流变性能测试仪

熔喷用 PP 切片的流变性能是在哈克转矩流变仪 (HAAKE TORQUE RHEOMETER) 上来测试的。产地: 德国。其主要部件有: 混合器、单螺杆挤出机、锥形双螺杆挤出机等。其毛细管直径 1.000mm, 长径比为 1: 40。主要应用领域有: 聚合物、弹性体、热固性塑料和陶瓷材料等混合、塑化。

##### 1.1.2 差动热分析仪 DSC

名称: METTLER TOLEDO

型号: DSC822°

产地: 瑞士

##### 1.1.3 X 射线衍射仪

名称: 理光

型号: D/MAX-B 型

产地: 日本

实验参数: 扫描范围:  $6^{\circ} \sim 36^{\circ}$ ; 步长  $0.03^{\circ}$ ; 扫描速度:  $8^{\circ}/\text{min}$ ; 靶型: Cu; 管流管压: 40kv40mA; 狭缝: 1&0.3&1; 滤波片: Ni。

#### 1.2 熔喷滤芯聚合物的选择

由于熔喷滤芯一般应用于液体过滤领域, 因此在选择熔喷滤芯材料的时候要综合考虑各种因素。聚丙烯 PP 具有耐溶剂性能好、在各种有机溶剂和油水中不溶解; 并且聚丙烯是一种耐酸碱性能良好的材料, 不腐蚀、不霉烂; 还能够耐高温、并且其价格也比较便宜。综上优点, 因此在熔喷滤芯的实验过程中选择聚丙烯 PP 材料。本实验采用上海石化的聚丙烯材料, 牌号为 Y2600T, 熔融指数 MFI 为  $26.0 \pm 2.5\text{g}/10\text{min}$ , 灰份  $\leq 0.03\%$ , 等规指数  $\geq 96\%$ 。

### 第二节 熔喷滤芯 PP 聚合物性能测试结果及讨论

流变学是研究材料流动与形变的科学。而纺丝流变学是研究纺丝流体

的流动和变形的基本规律以及流体流变的各种因素之间的关系的一门科学。高聚物流体是一种兼有粘性和弹性的粘弹体，它的流变性能与纯粘性的牛顿流体不同，为非牛顿流体。

高聚物的熔喷纺丝成型通常以熔体的状态进行，测定和研究高聚物流体的流动特性，并绘制流动曲线，可以了解其表观粘度（ $\eta_a$ ）对切变速率（ $\dot{\gamma}$ ）的依赖型、结构粘度和温度（ $T$ ）的关系等等，同时还可得导纺丝原液的粘度、流动中的切应力、切变速率等工程数据，这对设计最佳机械设备、制定合理工艺条件有着重要的指导意义。

## 2.1 高聚物流变性能的特点<sup>[1]</sup>

### 2.1.1 分子流动是通过链段的位移运动来完成的

一般液体的流动，可以用简单的模型来说明：低分子液体中存在着许多与分子尺寸相当的孔穴。当没有外力存在时，靠分子的热运动，孔穴周围的分子向孔穴跃迁的几率是相等的，这时孔穴与分子不断交换位置的结果是分子扩散运动；外力存在使分子沿作用力方向跃迁的几率比其他方向大。分子向前跃迁后，分在原来占有的位置变成了新的孔穴，又让后面的分子向前跃迁。分子在外力方向上的从优跃迁，使分子通过分子间的孔穴相继向某一方向移动，形成液体的宏观的流动现象<sup>[1]</sup>。

但是高聚物的融体流动与低分子液体的流动又不同，如果原封不动地将低分子流动的孔穴理论搬到高分子中，便会遇到困难。首先，在分子融体中要形成许多能容纳下整个大分子的孔穴是困难的；其次，按照低分子流动的活化能变化规律推算，高分子在流动之前早就被破坏了。所有这些事实说明，高分子的流动不是简单的整个分子的迁移，而是通过链段的相继跃迁来实现的。这种流动模型并不需在高聚物熔体中产生整个分子链那样大小的孔穴，而只要如链段大小的空穴就可以了。这里的链段液称流动单元，尺寸大小约含几十个主链原子。

### 2.1.2 分子流动不符合牛顿流体的流动规律

低分子液体流动时，流速越大，受到的阻力也越大，剪切应力 $\sigma$ 与剪切速率 $d\gamma/dt=\dot{\gamma}$ 成正比，即：

$$\sigma = \eta d\gamma/dt = \eta \dot{\gamma}$$

称为牛顿流体公式，比例常数  $\eta$  称为粘度。粘度不随剪切应力和剪切速率的大小而改变，始终保持常数的液体，通称为牛顿流体，低分子液体和高分子的稀溶液属于这一类。而凡是不符合牛顿流体公式的流体统称为非牛顿流体，其中流变行为与时间无关的有假塑性流体、胀塑性流体和宾汉(Bingham)流体<sup>[1]</sup>，它们的流动曲线见图 3-1。

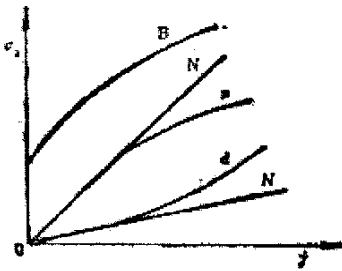


图 3-1 各种流体的流动曲线  
的关系

N 为牛顿流体，p 为假塑性流体，  
d 为膨胀性流体，B 为宾汉流体

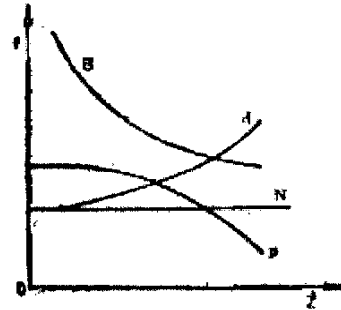


图 3-2 各种流体的表观粘度与剪切速率

N 为牛顿流体，p 为假塑性流体，  
d 为膨胀性流体，B 为宾汉流体

大多数高聚物熔体属假塑性流体，其粘度随剪切速率的增加而减小（见图 3-2），即所谓剪切变稀。这时因为高分子在流动时各液层层间总存在一定的速度梯度，细而长的大分子若同时穿过几个流速不等的液层时，同一个大分子的各个部分就要以不同速度前进，这样的情况显然是不能持久的。因此，在流动时，每个长链分子总是力图使自己全部进入同一流速的流层，不同流速液层的平行分布就导致了大分子在流动方向上的取向，从而使得粘度降低。除了形变和取向作用外，触变现象和因分子链的断裂而引起的相对分子量的下降也是表观粘度下降的原因。

膨胀性流体（或称胀流体）与假塑性流体相反，随着剪切速率的增大，粘度升高，即发生剪切变稠。这种流变行为在高聚物熔体和浓溶液中是罕见的，但常发生于各种分散体系，如高聚物悬浮液、胶乳和高聚物填料体系等。

假塑性和膨胀性流体的流动曲线都是非线型的，一般用指数关系来描述其剪切应力和剪切速率的关系，即所谓幂律公式

$$\sigma_s = K \dot{\gamma}^n$$

式中  $K$  是常数,  $n$  是表征偏离牛顿流动的程度指数, 称为非牛顿指数。假塑性流体  $n < 1$ , 而胀流体  $n > 1$ 。牛顿流体可以看成是  $n = 1$  的特殊情况, 此时  $K = \eta_0$ 。

另一种非牛顿流体是宾汉流体, 或称塑性流体, 具有名副其实的塑性行为, 即在受到的剪切应力小于某一临界值  $\sigma_y$  时不发生流动。相当于胡克固体, 而超过  $\sigma_y$  后, 则可象牛顿液体一样流动。

$$\sigma_s = G \gamma \quad (\sigma_s < \sigma_y)$$

$$\sigma_s - \sigma_y = \eta_p \dot{\gamma} \quad (\sigma_s \geq \sigma_y)$$

式中  $\sigma_y$  又称屈服应力,  $\eta_p$  称宾汉粘度或塑性粘度,  $G$  是剪切模量。宾汉流体的塑性行为和流动临界应力的存在。

### 2.1.3 高分子流动时伴有高弹形变

低分子液体流动时所产生的形变是完全不可逆的, 而高聚物在流动过程中所发生的形变中一部分是可逆的。因为高聚物的流动并不是高分子链之间简单的相对滑移的结果, 而是各个链段分段运动的总结果。高弹形变的恢复过程也是一个松弛过程, 恢复的快慢一方面与高分子链本身的柔顺性有关, 柔顺性好, 恢复的快, 柔顺性差, 恢复的慢; 另一方面与高聚物所处的温度有关, 温度高恢复的快, 温度低恢复的就慢。

高聚物的这个特点对高聚物的加工成型有一定的影响作用, 主要体现在两个方面。一方面, 即所谓的巴拉斯效应 (Barus Effect), 也称为挤出膨胀, 是指被挤出的聚合物熔体断面积远比口模断面积大。它有时直接影响生产是否正常进行, 也与纤网的质量直接相关。另一方面, 若用它制作其它产品时, 应尽量使各部分的厚薄相差不要过分悬殊, 否则, 由于冷却时间不一, 收缩不一, 导致各部分的开裂

## 2.2 熔喷滤芯 PP 聚物流变性能

由于流变曲线在较宽广的切变速率范围内描述了纺丝流体的剪切粘性。这种剪切粘性是其内在结构的反映。因此, 流变曲线可以作为衡量纺丝流体质量正常与否和波动程度的一种依据。

PP 聚合物在不同温度下的流变性能图如图 3-3 所示。从图中可以看

出熔体的剪切应力均随剪切速率的增大而增大，剪切粘度则均随剪切速率的增大而减小，是典型的切力变稀流体，属于假塑性流体。高聚物切力变稀的原因主要是：缠结点浓度的下降。高聚物流体可以看成为瞬间的网络结构体，该体系在达到动态平衡后的缠结点浓度与所处的条件有关，随着剪切应力大小的改变，动态平衡相应的发生移动。从图中还可以看出，在相同的剪切速率下熔体粘度随温度的升高而降低，这是由于随着温度的升高，熔体的自由体积增加，链段的活动能力增强，分子间的相互作用力减弱，使高聚物的流动性增大，表现为熔体粘度下降。

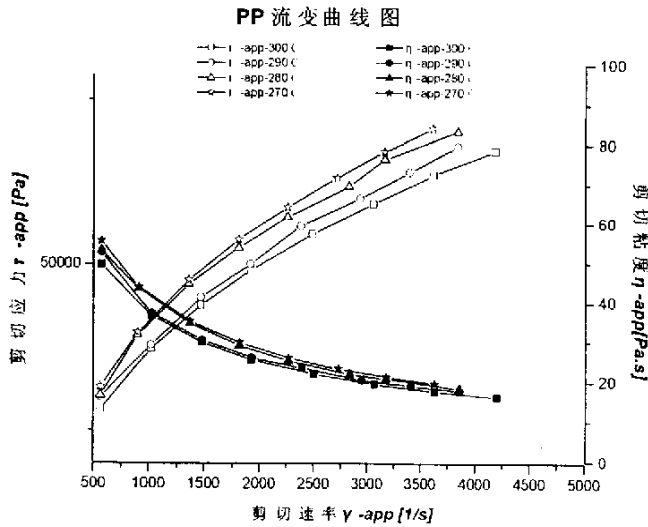


图 3-3 本实验 PP 聚合物流变性能图

### 2.3 非牛顿指数 n

非牛顿指数 n 是判断高聚物流体偏离牛顿流体的程度，n 值的大小具有温度、分子量、分子结构、分子链间的相互作用力以及切变速率的依赖性。同时非牛顿指数 n 与高聚物在纺丝加工中的可纺性存在一定的关系。非牛顿流体的表现粘度和剪切速率关系符合幂次律流体方程<sup>[1]</sup>：

$$\sigma = k \dot{\gamma}^{n-1}$$

取其对数形式： $\lg \sigma = \lg k + (n - 1) \lg \dot{\gamma}$

因此，从曲线  $\lg \sigma \sim \lg \dot{\gamma}$  的斜率可以求出非牛顿指数 n。

表 3-1 本实验 PP 聚合物的非牛顿指数

温度(°C)	270	280	290	300
PP	0.43397	0.43247	0.43159	0.43541

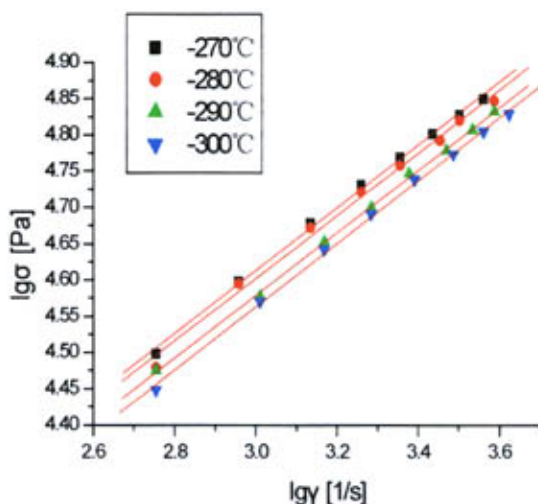


图 3-4 本实验 PP 聚合物熔体在不同温度下的  $\lg \sigma \sim \lg \dot{\gamma}$  关系

从图 3-4 可以看出，熔喷 PP 聚合物的非牛顿指数  $n$  是一个和 1 相比相差很大的数值，但是整体上是随着温度的升高略有升高的，可以说明升高温度能够提高聚合物的流动性能，使熔体弹性减少，逐渐向牛顿体靠近。这是因为高聚物熔体的流动不仅仅是高分子之间简单的相对滑移结果，还有分子链之间很多缠结点的运动的结果。

#### 2.4 熔喷滤芯 PP 聚合物的差动热分析 DSC

差动热分析法是测量在保证温差为零时输入到试样和参比物之间的功率  $\Delta W$  随程控温度变化的技术。有热流式和功率补偿式两种。实验用的 METTLER TOLEDO 是热流式的，实际上与定量型的 DTA 相似。

DSC 的工作原理是<sup>[2]</sup>：试样和参比物分别装两个坩锅内，在同一加热器内程控升温。当试样不发生吸热或放热反应时，试样温度与参比物温度相等，两者温差  $\Delta T = T_s - T_r = 0$ 。当试样内部产生物理或者化学变化而吸收或者放出热量时，试样温度与参比物温度产生差异  $\Delta T \neq 0$ ，出现吸热峰或放热峰，该变化完成后  $\Delta T$  又回复到零。在差动分析曲线中，横坐标为测量系统的温度，纵坐标为功率差  $\Delta W$ 。当  $\Delta W$  为正时，试样吸热，热焓  $H$  增加； $\Delta W$  为负时，试样放热，热焓  $H$  减少。



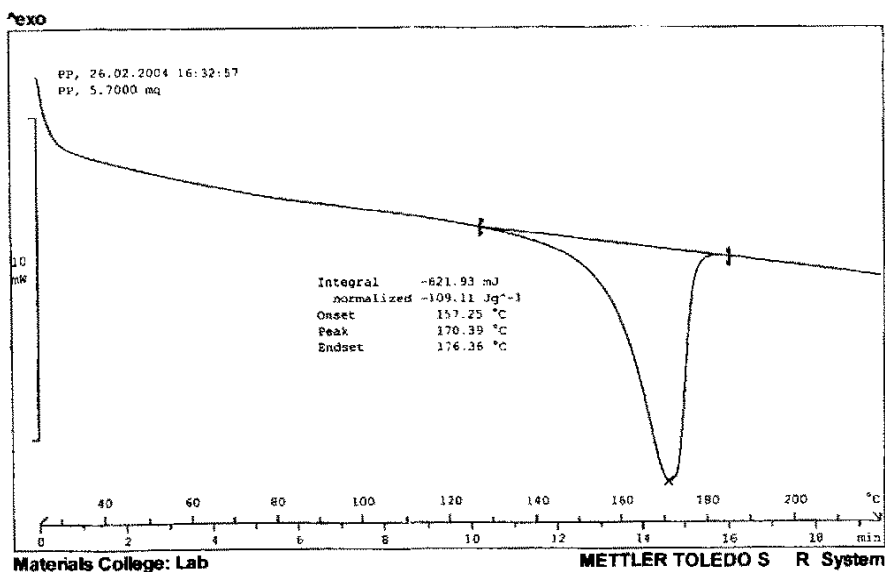


图 3-5 本实验 PP 聚合物 DSC 曲线图

在生产熔喷滤芯的时候加工温度是一个很重要的控制参数,对最终的滤芯的成网性能有很大的影响,因此测量熔喷用 PP 聚合物的热熔性能就很重要。DSC 实验只在 20~200℃ 范围内进行。从图中可以看出,切片的吸热开始于 157.25℃,结束于 176.36℃,峰值在 170.39℃ 的位置,而这也是聚合物的熔点所在。聚合物的熔点对熔喷工艺具有指导作用。

## 2.5 熔喷滤芯 PP 聚合物的 X 射线衍射

按照两相模型,结晶高聚物中通常是同时包含晶区和非晶区两个部分。当 X-射线照到纤维样品上时,晶区将产生一系列独立的衍射环或弧,非晶区则产生弥散的连续的晕圈。结晶度是结晶部分的含量。在本实验中用 X 射线衍射仪来测定没有经过熔喷的 PP 聚合物的结晶度以及经过熔喷以后的纤维的结晶度,并且比较其结晶度情况的变化。并且对熔喷 PP 纤维的 X 衍射与纺丝成网 PP 纤维进行比较。

由于纤维中晶区与非晶区的重量含量分别与其相应的 X-射线衍射强度成比例。采用分峰方法将 X-射线衍射强度曲线中的晶区与非晶区的部分分开,由下列公式计算出样品的结晶度。

$$X_c = \frac{I_c}{I_0} = \frac{I_c}{I_c + I_a} \quad (3-1)$$

式中:  $X_c$ —结晶度;

$I_c$ —结晶衍射的强度;

$I_0$ —总的衍射强度;

$I_n$ —非晶衍射的强度。

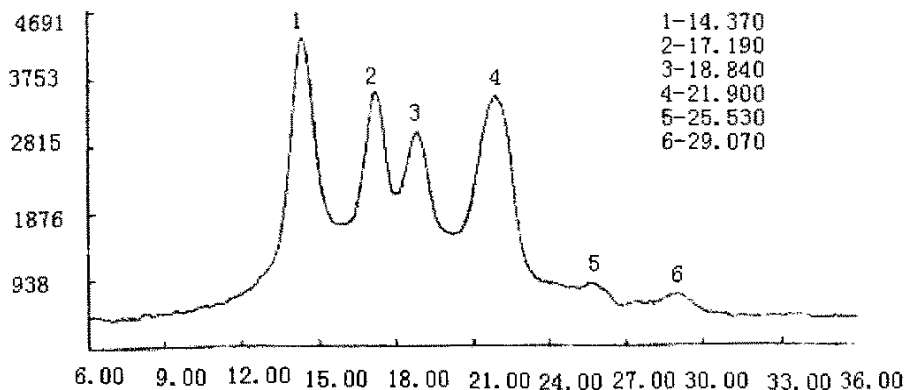


图 3-6 本实验 PP 聚合物 X 射线衍射图

从上图 3-6 以及图 3-7 中可以看出,熔喷 PP 聚合物和熔喷 PP 纤维的 X 射线衍射图的衍射角  $2\theta$  和  $d$  值的差异可以分析得出 PP 聚合物在熔喷工艺前后的性质是不一样的。从上图可以看出聚合物 PP 的峰值很尖锐,而熔喷 PP 纤维的峰值很宽、很平缓,可以看出经过熔喷以后的 PP 聚合物的结晶度要高,并且通过上式 3-1 计算可以得到 PP 聚合物的结晶度为 57.4%, 经过熔喷以后的 PP 纤维的结晶度为 60.7%。熔喷以后的结晶度要高其原因是由于在熔喷过程中,从模头挤出的聚合物熔体受到了高速热空气的拉伸,使得聚合物熔体中的大分子取向,应力与取向的作用会影响高聚物的结晶动力学平衡,从而提高了纤维的结晶度<sup>[11]</sup>。此外,拉伸温度的提高也会使得结晶度的提高。

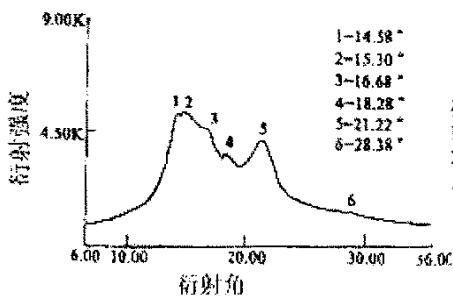


图 3-7 熔喷 PP 纤维 X 射线衍射图

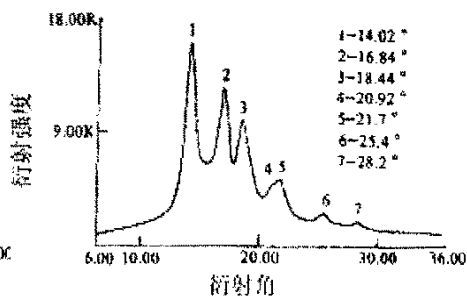


图 3-8 纺丝成网 PP 纤维 X 射线衍射图

偏光显微镜观察表明,熔喷和纺丝成网纤维尽管都存在球晶形态,但它们的球晶型有所不同。熔喷聚丙烯纤维的 X 光衍射图只有 2 个明显的衍射峰,参见图 3-7,峰形不尖锐,且有平台出现,所表征的晶胞结构主要是近于拟六方酞晶结构和  $\alpha$  晶型的 2 种变体,其中酞晶变体占优势。这种情况完全取决于熔喷自身的工艺条件,聚合物熔体从熔喷模头喷丝孔挤出后受到急冷,冷却工艺温度小于  $70^{\circ}\text{C}$  产生的变态的晶胞结构是不稳定的,属近晶态,而不是人们熟悉的如单斜晶系的 4 个衍射峰。纺丝成网聚丙烯纤维具有 4 个明显的衍射峰,参见图 3-8,比较尖锐衍射峰所表征的晶胞结构主要是  $\alpha$  晶型,属单斜晶系。同时纺丝成网聚丙烯纤维的 X 衍射强度显著高于熔喷聚丙烯纤维。研究表明,外界工艺条件显著影响不同晶型的生成,喷头拉伸和张力越大,以及在纺丝线上通过的时间越短,纤维的结构越不稳定。在各种拉伸速度和流动速率下,结晶开始的温度取决于高冷却速率所造成的过冷作用的影响和纤维分子取向所产生的结晶速率增加之间的平衡。熔喷工艺与纺丝成网工艺相比,具有较高的聚合物熔体挤出温度和冷却速率,均会造成结晶度减小。

### 第三节 本章小节

在熔喷实验进行之前,对熔喷材料的性能测试是非常必要的。知道材料的各项性能就能够很好的制定熔喷的实验工艺参数,通过实验测试得出本章结论为:

- 1、本实验用 PP 聚合物熔体的剪切应力均随剪切速率的增大而增大,剪切粘度则均随剪切速率的增大而减小,是典型的切力变稀流体,属于假塑性流体。
- 2、本实验用 PP 聚合物在高温时的非牛顿指数  $n$  和 1 相比相差比较大,因此 PP 聚合物是典型的非牛顿流体。
- 3、在 DSC 分析中本实验用 PP 聚合物切片的吸热开始于  $157.25^{\circ}\text{C}$ ,结束于  $176.36^{\circ}\text{C}$ ,峰值在  $170.39^{\circ}\text{C}$  的位置,这个峰值温度即是聚合物的熔点温度,了解聚合物的熔点温度是生产熔喷滤芯控制工艺温度的一个重要的参数。
- 4、通过对熔喷前后材料进行 X 衍射分析得出,熔喷后非织造纤维材料的

结晶度比熔喷前材料的结晶度要高，是因为聚合物在实验过程中收到高速气流的拉伸作用，从而对纤维材料的结晶度产生影响。

**参考文献：**

- 【1】 何曼君等 高分子物理 复旦大学出版社 1990年10月 261~264；
- 【2】 陈稀 黄向安 化学纤维实验教程 纺织工业出版社 1988年12月 87~95；
- 【3】 靳向煜 张慧光 熔喷聚丙烯纤维非织造布生产工艺参数与性能的影响，中国纺织大学非织造工艺技术研究论文集，中国纺织大学出版社，1997 220~224。

## 第四章 熔喷滤芯 PP 聚合物成网工艺与性能研究

### 第一节 熔喷滤芯 PP 聚合物成网工艺与性能研究

熔喷工艺较为复杂,包含了許多参数,直接影响产品质量。这些参数大致可以分为两类:在线参数和离线参数。在线参数是指在生产过程中可按需调节的变量,如螺杆转速、空气流量、聚合物温度、喷头温度及热空气温度、喷头至接收装置的距离以及纤维的冷凝环境。在本课题实验阶段,经过大量的试验性实验,为了确保滤芯的成型性能,我们只是考虑了其中的一部分影响因素,另外一部分的影响因素选择一个定值。离线参数是指只能在设备不运转时才能调节的变量,如微孔的尺寸、喷头后座、空气通道尺寸、热空气导入角、接收装置。在课题进行过程中,根据课题的要求和实际需要,我们对模头、底板、气板等关键设备进行了改进设计,并使实验效果达到一个很好的状态。

在生产滤芯的过程中我们根据生产滤芯的实验条件,生产出 PP 熔喷纤网。因为课题在生产滤芯时调节的参数有螺杆转速、接收距离、还有每个滤芯过滤层的层数,但是在考虑纤网的性质的时候滤芯过滤层的层数就不便考虑,因此在讨论 PP 熔喷纤网时就主要考虑螺杆转速以及接收距离对纤网性能的影响。在本课题中主要考虑滤芯纤网的纤维细度、纤网的孔隙率以及纤网的孔径值以及密度等性能。实验的工艺参数和一些过程测试数据以及最后的测试结果见表(4-1)。

表 4-1 实验的工艺参数及评价指标数据

实验代码	接收距离(mm)	螺杆转速(rpm)	厚度(mm)	重量(g)	孔隙率	平均细度(um)	平均孔径(um)	体积密度(g/cm <sup>3</sup> )
1#	220	5.2	0.97	0.43	0.7806	3.8438	7.4726	0.1997
2#	240	5.2	1.08	0.39	0.8078	3.7793	8.5859	0.1749
3#	260	5.2	1.13	0.51	0.8149	3.7631	9.3514	0.1684
4#	290	5.2	0.95	0.38	0.8164	3.7162	9.4159	0.1671
5#	310	5.2	0.98	0.30	0.8196	3.6741	9.5563	0.1641
6#	330	5.2	0.95	0.38	0.8339	3.6541	11.0202	0.1512

7#	380	5.2	0.90	0.28	0.8532	3.6411	15.2936	0.1336
8#	400	5.2	0.75	0.20	0.8546	3.6130	15.5955	0.1323
9#	420	5.2	1.77	0.41	0.8604	3.6047	16.7540	0.1270
10#	220	7.0	1.12	0.51	0.7949	4.9664	8.84128	0.1866
11#	240	7.0	1.22	0.54	0.8129	4.8964	9.3398	0.1702
12#	260	7.0	1.01	0.42	0.8156	4.8133	9.4338	0.1678
13#	290	7.0	0.84	0.38	0.8190	4.7542	11.2508	0.1647
14#	310	7.0	1.01	0.37	0.8265	4.7094	12.1412	0.1579
15#	330	7.0	1.03	0.44	0.8380	4.6819	13.5776	0.1474
16#	380	7.0	0.89	0.29	0.8544	4.6704	17.5551	0.1325
17#	400	7.0	1.05	0.43	0.8696	4.6574	21.5338	0.1187
18#	420	7.0	0.98	0.35	0.8805	4.6391	22.8104	0.1087
19#	220	8.2	1.15	0.58	0.8189	5.9867	8.96904	0.1648
20#	240	8.2	0.97	0.56	0.8226	5.9641	12.8862	0.1614
21#	260	8.2	1.02	0.51	0.8234	5.9297	14.1330	0.1607
22#	290	8.2	1.00	0.53	0.8260	5.8987	15.1680	0.1583
23#	310	8.2	1.03	0.43	0.8442	5.8811	15.5849	0.1418
24#	330	8.2	1.24	0.72	0.8460	5.8543	17.1134	0.1401
25#	380	8.2	0.98	0.42	0.8687	5.8014	20.4135	0.1194
26#	400	8.2	1.55	0.40	0.9016	5.7743	27.3468	0.0896
27#	420	8.2	1.45	0.41	0.9049	5.7230	28.3999	0.0866

### 1.1 熔喷纤网孔隙率分析

非织造布是一种高孔隙率的材料，特别是熔喷非织造材料。由于它的高孔隙率，因此熔喷非织造布经常应用于一些过滤领域，包括空气过滤以及液体过滤等方面。随着生活水平以及社会发展的不断进行，人类对社会环境、生活环境、以及健康环境也有更高的认识和要求，熔喷非织造材料经常应用在血液过滤领域。非织造过滤材料的孔隙率是指材料的孔隙体积与总体积的比值<sup>[1]</sup>。孔隙率的确定不需要直接进行测试，而是通过计算可以得到，根据论文公式(2-9)可以计算得出。

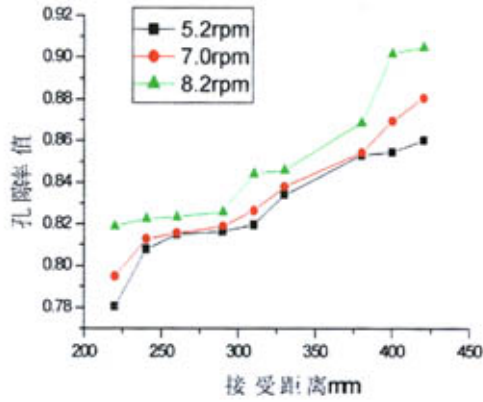


图 4-1 接收距离与孔隙率的关系

在图 4-1 中可以看出，在螺杆转速一定的条件下，随着接受距离的增加纤网的孔隙率也逐渐的增加，最大增幅为 10.77%。从接受距离 220mm 到 240mm 之间，纤网的孔隙率增加比较大，但是从接受距离 240mm 到 290mm 之间，纤网的孔隙率的增加比较缓慢，但是还是存在增加的趋势，从 290mm 以后的接受距离，纤网的孔隙率也增加很大。这是由于在熔喷工艺过程中，在其它条件相同的情况下，随着接受距离的增加高压热空气流的牵伸作用力逐渐的减小，气流的牵伸环境也会受到影响，纤维细度虽然有逐渐变细的趋势，但是根据图 5-2 的研究可知，在这个阶段细度的变化趋于平缓，起主导作用的是接收距离增加纤维在空气中运动的时间变长，使得纤维在到达接收装置的时候已经得到充分的冷却，因而纤维与纤维之间的热粘合作用减弱，纤维与纤维之间的相互接触空隙也将逐渐增加，纤网变得蓬松使得纤网的孔隙率有增加的趋势。

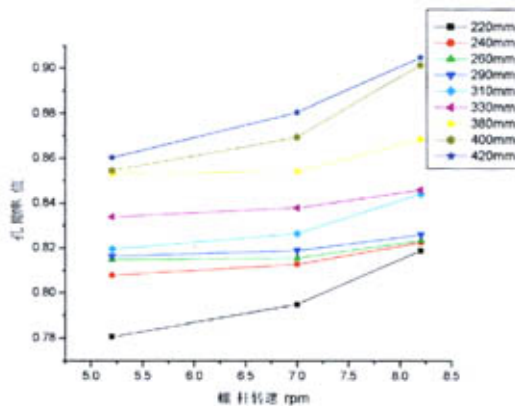


图 4-2 螺杆转速与孔隙率的关系

从图 4-2 中可以看到,在接受距离一定的条件下,随着螺杆转速的增加,纤网的孔隙率也将逐渐的增加,最大的增幅达到 4.9%。根据图 5-5 的分析可知,随着螺杆转速的增加,螺杆挤出量也随之增加,在同样的热空气气流压力的拉伸作用下,熔体被热空气气流拉伸的加速度也就减小,因而纤维直径有增大的趋势,纤维与纤维之间的粘合点的数量也减少,纤维与纤维之间的接触空隙也就加大,因而纤网的孔隙率也有增大的趋势。

### 1.2 熔喷纤网的纤维细度分析

在熔喷生产过程中,对熔喷非织造材料的纤维直径的影响因素很多,也比较复杂。经过前人的研究表明,熔体挤出量(螺杆转速)和温度、拉伸热空气温度和速度(压力)以及熔喷的接收距离都会对熔喷非织造材料的纤维细度产生影响。但是在本课题中主要根据生产滤芯的工艺以及根据在熔喷设备上的方便控制的参数作为我们的研究影响因素。

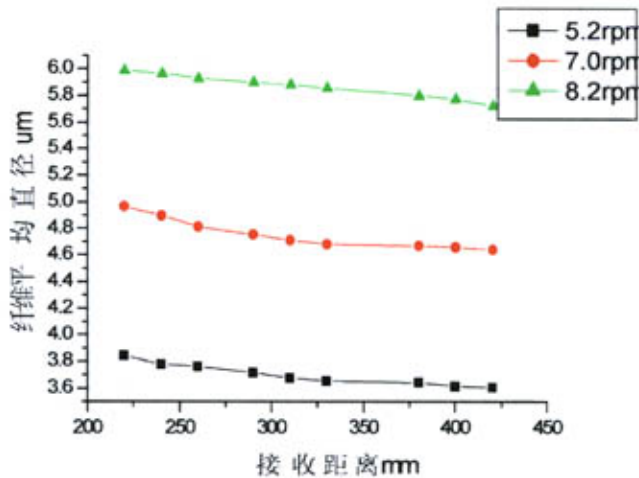


图 4-3 接受距离与纤维平均细度的关系

从图 4-3 中可以看出,随着熔喷工艺中接受距离的增加,纤维的细度也逐渐的增加,并最终将趋于稳定。熔喷工艺中,在纺程上接近喷丝孔处的纤维细度大约为其原始尺寸即喷丝孔直径的 15%,纤维得到了迅速的拉伸,随后纤维拉伸速度减慢,最终达到稳定。从运动学的角度来分析,在喷丝孔附近,熔体受到高速热空气气流的拉伸,加速度很大,初生纤维速度很快地达到最大值;随着纤维的运动,纤维离熔喷模头的距离越来越远,受到气流地拉伸力也越小,纤维的加速度也逐渐减小,



但是纤维的速度继续增加，直径继续减小；聚合物初生纤维直径的变化与高速气流牵伸力有关、与熔体的冷却凝固位置有关。当初生纤维在纺程上超过凝固点以后，虽有速度但是纤维的直径已经几乎不再发生实质变化。根据图 5-2 中可以看出，在接收距离在 100mm 以内纤维细度变化比较大，但是在 100mm 以外纤维的细度变化趋于平缓，因此可以看出在同一的螺杆转速条件下，纤维的细度变化几乎不大。

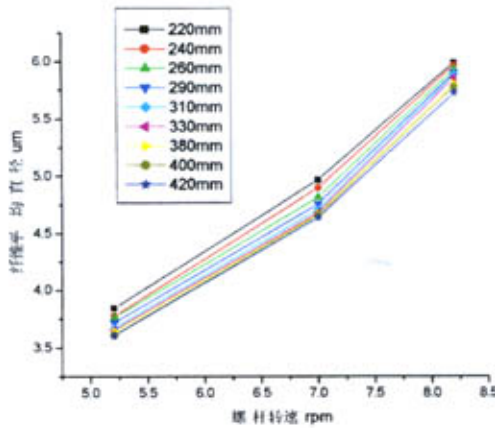


图 4-4 螺杆转速与纤维平均细度的关系

从图 4-4 中可以看出，在接受距离一定的条件下，随着螺杆转速的增加，纤维直径也随之增加。挤出量的增加使得聚合物熔体在一定的热空气压力作用下，拉伸力不变但是局部聚合物熔体的质量增加，加速度减小，纤维的运动速度降低，因此纤维的直径也将逐渐的增加。从上图可以看出，随着螺杆转速的增加纤维的细度变化比较大，增幅最大值达到 55.75%，而且比接收距离的增加对纤维细度的影响更为显著。

### 1.3 熔喷纤网的平均孔径分析

熔喷非织造材料的平均孔径主要与熔喷工艺的纤维直径、接收距离相关。随着熔喷工艺接收距离增大，熔喷纤维运行速度趋缓，在接收滚筒上凝聚时形成了蓬松的纤网结构。纤网蓬松度增加，将造成熔喷非织造材料的最大孔径和平均孔径值变大。孔径值的测试方法根据第二章的第四节方法测试，其原理图为图 2-13，在平面纤网的测试过程中，样品的放制方法参考图 2-14。熔喷滤芯的每个过滤层纤网的孔径干湿曲线图以及孔径分布图如下：

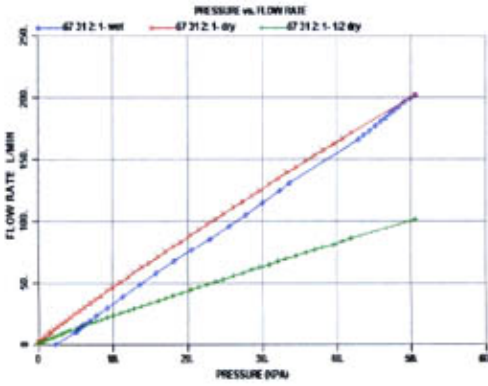


图 4-5 精滤层纤网的干湿曲线

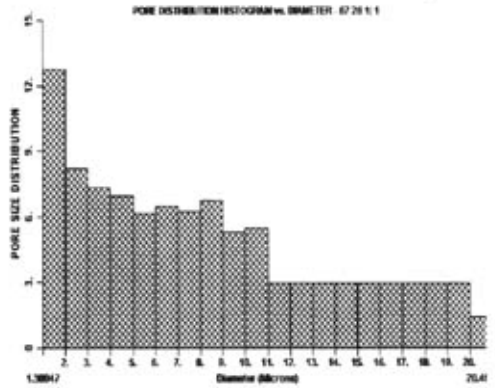


图 4-6 精滤层纤网的孔径分布

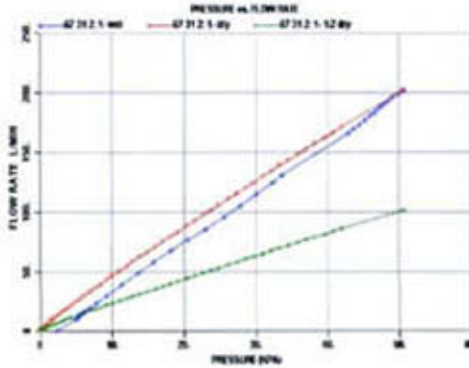


图 4-7 中滤层纤网干湿曲线

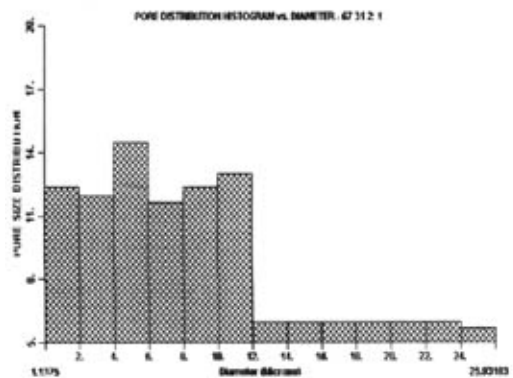


图 4-8 中滤层纤网孔径分布

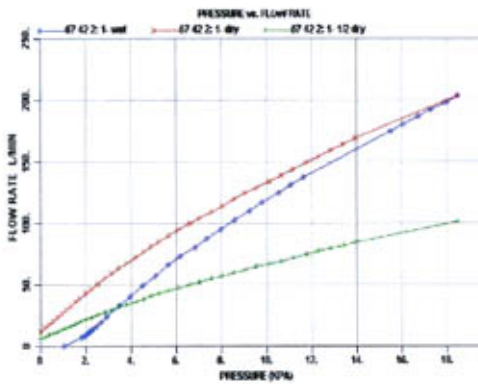


图 4-9 粗滤层纤网干湿曲线

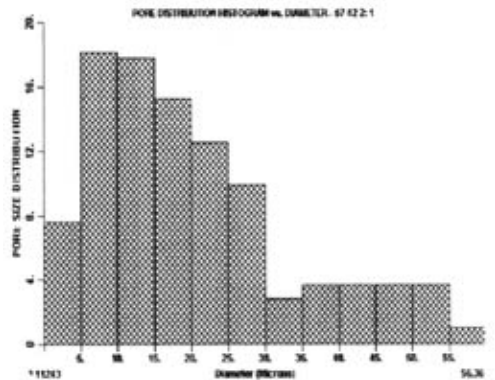


图 4-10 粗滤层纤网孔径分布

从上图 4-5 至图 4-10 中可以看出，在熔喷滤芯的三个过滤层中精滤层的孔径分布集中在孔径值稍小的范围内，其平均孔径值最小，依次为中滤过滤层，最后是粗滤过滤层的平均孔径值为最大，符合课题的熔喷滤芯具有孔径梯度的思想。从各个过滤层的孔径分布图可以看出，每个过滤层的孔径分布都近似符合正态分布。

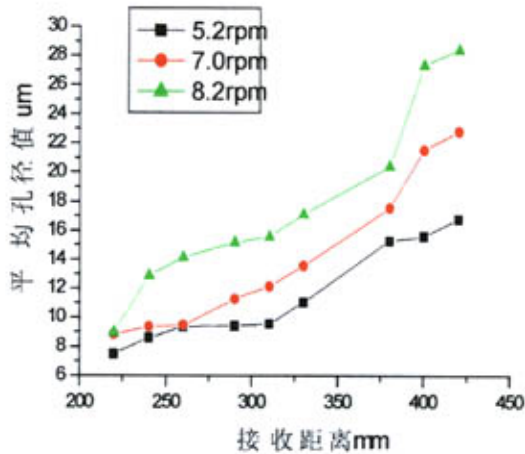


图 4-11 接收距离与平均孔径值的关系

从图 4-11 中可以看出，在螺杆转速一定的条件下，随着接受距离的增加，纤网的平均孔径值也随之增加，最大增幅达到 216.64%。这主要是因为接受距离的增加，聚合物纤维在空气流场中运动的时间增加，同时周围冷空气的热交换加大，所以纤维最终到达接收装置时所形成的纤网会更加的蓬松，这样就导致了纤网的最大孔径以及平均孔径的增大。在这个阶段纤维的细度也会有所减小，但是减小的幅度很小，而且在这个阶段随着接受距离的增加纤网蓬松程度的增加影响要比细度的减小幅度更为显著。

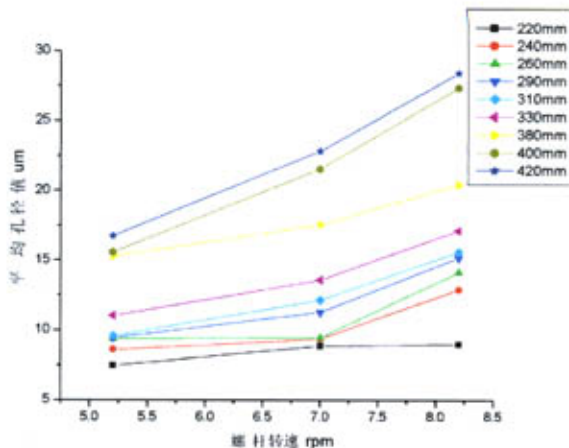


图 4-12 螺杆转速与平均孔径值的关系

从图 4-12 中可以看出，在接收距离一定的条件下，随着螺杆转速的增加，纤网的平均孔径值也随之增加，最大增幅为 69.51%。这是由于随

着螺杆转速的增加，熔喷机器的螺杆挤出量也随之增加。挤出量增加，聚合物熔体在一定的热空气压力条件作用下，聚物流在热空气流场中的加速度将减小、运动速度也将变得缓慢，使得纤维的直径也将增加，因此在接收装置上纤网的蓬松度也将增加，这将直接影响纤网的最大孔径值以及平均孔径值。

#### 1.4 熔喷纤网的体积密度分析

在生产熔喷滤芯的时候考虑到滤芯的体积密度梯度结构，因此在进行滤芯试验的前期实验中进行实验验证。影响纤网的密度的因素很多，如：螺杆转速、接收距离、熔喷模头温度等等都会对纤网的密度产生影响，但是在本实验中主要根据实验中生产滤芯的因素进行实验考虑，经过计算得到的密度数据如上表（4-1）。

下面对纤网的密度实验测试数据进行分析：

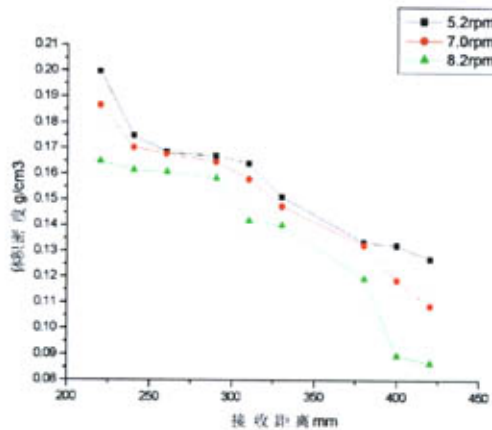


图 4-13 接收距离与体积密度的关系图

从上图可以看出，当螺杆转速一定的时候，实验纤网的密度随着接收距离的增加而逐渐的减小，其最大降幅达到 47.45%。螺杆转速一定时，接收距离增大聚物流在空气中收到热空气流的拉伸的时间越长，但是根据上面纤维细度实验中的分析可以看出，在这个接收距离范围内纤维的细度虽有一定的减小趋势，但是减小的幅度并不是很大，只是细微的减小。接收距离增大，纤维在热空气的运动时间变长，热空气和周围冷空气的对流时间变长，纤维在空气中冷凝的时间变得更加充分，影响在接收装置上纤维与纤维之间的接触并不是很紧密，使得纤网随着接收距

离的增加有变得更加蓬松的趋势，进而纤网的密度有减小的趋势。

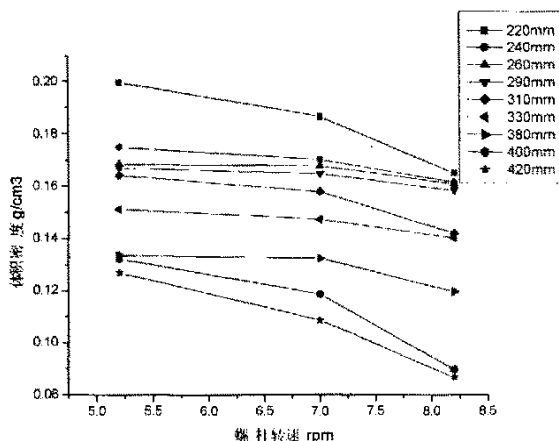


图 4-14 螺柱转速与体积密度的关系图

从上图可以看出，在接收距离一定的时候，随着螺柱转速的增加，纤网的密度值有降低的趋势，其最大降幅达到 31.81%。随着螺柱转速的增加，对纤网密度影响的原因主要是由于螺柱转速的变化对纤维细度会有影响，进而影响纤网的密度变化。

### 1.5 熔喷滤芯纤网的结构分析

在熔喷滤芯生产过程中，由于每一个过滤层与成型装置的接触情况不一样，使得滤芯纤网的每个过滤层的结构也不一样。

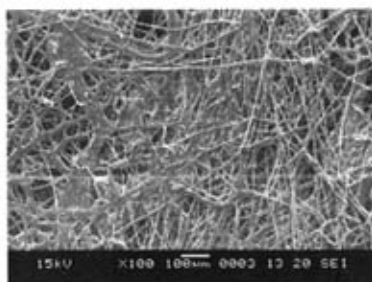


图 4-15 滤芯最内层纤网结构

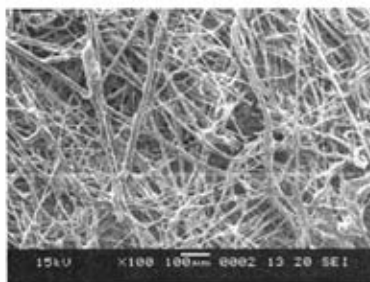


图 4-16 滤芯中间层纤网结构

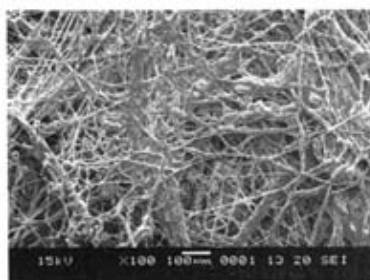


图 4-17 滤芯最外层纤网结构

在图 4-15 中可以看出, 由于滤芯纤网在实验过程中与芯棒直接接触, 高温热空气流在运动过程中使得接收芯棒的温度也急剧升高, 因此最内层的纤网有粘合的趋势。从图 4-16 中可以看出, 中间层的熔喷滤芯纤网没有明显的粘合现象, 纤维与纤维之间形成杂乱的排列结构, 并且形成有效的孔隙结构。从图 4-17 中可以看出, 滤芯的最外层纤网的结构也存在明显的纤维粘合现象, 这是由于在滤芯生产过程中, 为了保证滤芯的成型性, 在接收装置中安装了一个压辊装置, 压辊与最外层不断的挤压以及高温热空气流的作用, 从而使得最外层滤芯纤网结构有一定的粘合现象出现。

## 第二节 熔喷滤芯工艺中纤维形成的拉伸力分析

在熔喷工艺中超细纤维的形成不是靠机械牵伸力的作用, 而是利用高速运动的热空气流的拉伸而形成的。其原理是基于拉伸装置提供的高速运动气流, 通过模头喷嘴达到气流速度的极大值, 对初生纤维表面的粘性摩擦力和气流场中紊流造成丝条按一定频率“波动”所出现的气流对初生纤维的附加推动力等作用拉伸丝条。其特点是: 气流拉伸纤维的介质是经过压缩的高速热空气, 空气质量小且易于扩散, 拉伸气流对纤维没有直接的握持作用。作用在纤维上的作用力见下图 4-18 所示。

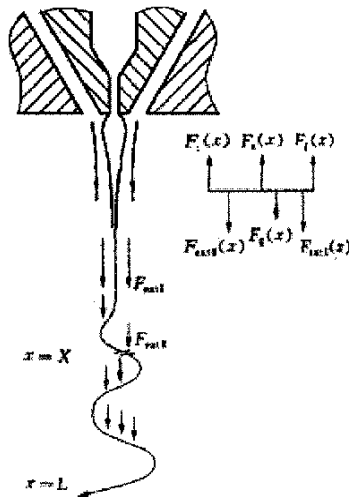


图 4-18 有“波动”时气流拉伸

在熔喷生产过程中, 聚合物熔体从喷丝孔挤出以后, 立即受到拉伸气

流粘性摩擦力轴向拉伸作用，聚合物熔体即被拉长细化，初生纤维上的各种作用力的动平衡<sup>[1]</sup>为：

$$F_{\text{extI}} + F_{\text{extII}} = F_r(0) + F_s + F_i + F_f - F_g \quad (4-1)$$

式中： $F_{\text{extI}}$ ：拉伸气流的粘性摩擦力所产生的外加张力； $F_{\text{extII}}$ ：气流对纤维的推动力引起的外加张力； $F_r(0)$ ：熔体细流在喷丝孔出口处作轴向拉伸流动时所克服的流变阻力； $F_s$ ：纤维在运动中的表面张力； $F_i$ ：使纤维作轴向加速度运动所需克服的惯性力； $F_f$ ：空气对运动中的纤维表面所产生的摩擦阻力； $F_g$ ：重力场对纤维的作用力。

在稳定的熔喷生产条件下，各阻力与惯性力之合力和纤维重力与保持相对一定的拉伸气流速度的粘性摩擦力所产生的外加张力  $F_{\text{extI}}$  和气流对纤维的推动力引起的外加张力  $F_{\text{extII}}$  相平衡。纤维在空气中粘性摩擦力也被称气流拉伸力，它随着拉伸气流速度的增加而增加。在相同的气流速度条件下，气流对初生纤维的推动力有利于提高拉伸效率。气流拉伸与机械拉伸的最大区别是，气流拉伸不是通过一定的拉伸辊速度差来实现对纤维的拉伸，而是取决于气流相对速度，气流对纤维的粘性摩擦作用力与气流相对速度的平方成正比关系。粘性摩擦作用力在气流中对丝条起主导拉伸作用。在熔喷工艺过程中，熔体在喷头附近受到高速热空气流的拉伸作用，纤维直径迅速变小，在纤维的运动过程中，热空气流和周围冷空气流迅速对流，纤维在拉伸的过程中存在一个凝固点，在超过凝固点以后纤维的直径就不会有很大的改变。

### 第三节 熔喷滤芯超细纤维形成的拉伸气流模型理论的研究

熔喷滤芯是通过高温高速气流喷吹牵伸 PP 熔体使其得到迅速高倍拉伸形成超细纤维，再通过一定的铺网接收方式凝聚接收而成的一种柱状的过滤材料。因而对聚合物熔体拉伸的研究对加工滤芯过滤材料具有重要作用，弄清楚气流拉伸机理，具有非常重要的意义。本节通过数学模型搞清熔喷气流拉伸机理，对于优化和改进熔喷工艺与设备，对于制取更细的纤维和降低能耗，具有根本性的意义。

熔喷气流拉伸数学模型有两类：一维模型（基本模型）和二维模型（组合喷射模型）。Shambaugh 等<sup>[1]</sup>提出的 Uyttendaele—Shambaugh 模型在一

维模型中比较有代表性。本节主要研究的是 Uyttendaele—Shambaugh 模型在熔喷 PP 聚合物非织造网膜的应用，同时针对 PP 聚合物熔体的具体特点对该模型作了相应的改进。

### 2.1 Uyttendaele—Shambaugh 模型

本模型由连续方程、动量方程、能量方程和本构方程组成。

连续方程：

$$A_z v_f = Q = \text{const} \quad (4-2)$$

式中： $A_z$  —— 纤维横截面积；

$v_f$  —— 纤维速度；

$Q$  —— 聚合物体积流量。

动量方程：

$$\frac{d}{dz} \left[ \pi \frac{d_f^2}{4} (\tau^z - \tau^x) \right] = j \pi d_f C_f \rho_a \frac{v_{rel}^2}{2} + \rho_f Q \frac{dv_f}{dz} - \frac{\pi d_f^2}{4} \rho_f g \quad (4-3)$$

式中： $z$  —— 聚合物熔体轴向位置；

$\tau^z$  —— 聚合物熔体径向拉伸应力；

$\tau^x$  —— 聚合物熔体轴向拉伸应力；

$C_f$  —— 气流拉伸系数；

$\rho_a$  —— 气体密度；

$v_{rel}$  —— 气流与纤维速度之差；

$\rho_f$  —— 聚合物熔体密度；

$d_f$  —— 纤维直径；

$g$  —— 重力加速度。

$j$  是符号因子。当离喷头较近时，气流速度大于纤维速度，气流拉伸力方向向下， $j$  取 -1；当离喷头较远时，气流速度小于纤维速度，气流拉伸力方向向上， $j$  取 1。

气流拉伸系数  $C_f$  由 Matsui 经验公式<sup>[1]</sup>给出：

$$C_f = \beta \cdot (\text{Re}_{rel})^{-n} \quad (4-4)$$

式中： $\beta$ ,  $n$  —— Matsui 经验公式中的常数；



$Re_{rel}$  —— 雷诺数。

在空气阻力研究中,存在着比较复杂的影响因素,它会导致数据出现分散性较大的情况。随  $Re_{rel}$  范围越大,分散性越大。本模型中聚丙烯材料取  $\beta$  为 0.37, 取  $n$  为 0.61。

能量方程:

$$\rho_f C_p v_{fz} \frac{dT_{fz}}{dz} = -\frac{4h_z}{d_z} (T_{fz} - T_{az}) \quad (4-5)$$

式中:  $h_z$  —— 传热系数;

$T_{fz}$  —— 纤维温度;

$T_{az}$  —— 气流温度;

$C_{pr}$  —— 聚合物熔体比定压热容。

本构方程:

Shambaugh 等引入牛顿流体的本构方程:

$$\tau^{zz} = 2\eta \frac{dv_{fz}}{dz} \quad (4-6)$$

$$\tau^{xx} = -\eta \frac{dv_{fz}}{dz} \quad (4-7)$$

式中:  $\eta$  —— 剪切粘度。

Shambaugh 等定义了“凝固点”边界条件,认为凝固点处累计作用在熔体凝固部分上的重力和气流拉伸力之和等于该点处的流变力。超过凝固点,纤维直径保持恒定。Shambaugh 等规定凝固点在喷头下方 5 cm 处。有了凝固点的位置,就可以确定流变力的初值。

一维模型存在着两个方面的不足之处:一是将熔体密度和比定压热容看成与温度变化无关。二是将熔体简单看成牛顿流体。所以运用此模型计算的结果与实际相差较大。考虑到本课题研究的 PP 聚合物熔体是非牛顿流体,  $n$  与 1 相差较大,温度虽对粘度影响不大,但是需积极考虑其对密度和热容的影响,并将两因素引入方程之中,引入 Zieiminski 等<sup>[4]</sup>给出的关系式:

$$\rho_f = \frac{1}{0.891 + 0.000486T} \quad (4-8)$$

$$C_{pf} = 0.33 + 0.0014 T \quad (4-9)$$

$$\eta = 1.1 \times 10^{-11} Mn^{3.5} \exp\left\{\frac{-8.86(T-280)}{7-178.4}\right\} \quad (4-10)$$

聚合物熔体是非牛顿流体,因此在本研究中引入非牛顿流体的本构方程。幂律流体的本构方程为

$$\tau^{zz} = 2\eta \left( \frac{dv_z}{dz} \right)^m \quad (4-11)$$

$$\tau^{xx} = -\eta \left( \frac{dv_z}{dz} \right)^m \quad (4-12)$$

建立 PP 聚合物熔体材料喷丝成网的数学模型 4-2、4-3、4-6、4-7、4-8、4-9、4-10、4-11 和 4-12。从理论上讲,这种修正后的模型更反应了实际的熔喷工艺状况,所得的数值更贴近熔喷纤维直径的实际值。

## 2.2 模型预测结果和实验结果比较

本实验采用的原料是 PP 聚合物,实验设备是东华大学非织造研究发展中心的聚合物喷丝成网实验系统。采用一台螺杆直径为 29mm 的螺杆挤压机,一台电加热炉及自动温度控制装置,一台空气压缩机和宽度为 250mm 的喷头,喷头的喷丝孔采用毛细管焊接或其他打孔工艺,孔径为 0.20mm。实验结果如下:

将 PP 聚合物熔体视为牛顿流体,且不考虑温度 T 的变化对熔体密度  $\rho_r$  和比定压热容  $C_{p,r}$  的影响。纤维直径的预测结果与实际测得结果如图 4-19 所示。

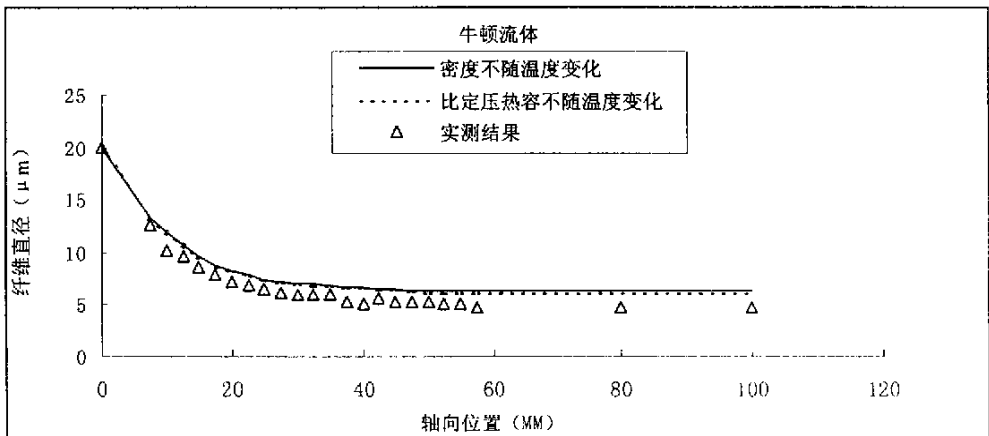


图 4-19 牛顿体密度和比定压热容不随温度变化时纤维的直径曲线

由图可知, 实测的纤维直径较预测的小, 说明经典的数学模型预测纤维的直径时存在较大的误差。原因是将聚合物熔体的流变性看得过于简单化, 首先将粘弹性熔体看成牛顿体, 其次将熔体的密度和比定压热容简化成不随温度变化的常量, 这样的计算结果必然与实际结果存在较大的误差。

在本构方程中以幂律流体替代牛顿流体, 同时将熔体密度和比定压热容随温度变化关系引入方程, 经计算预测纤维直径结果与实测的结果如下图所示 4-20 所示。

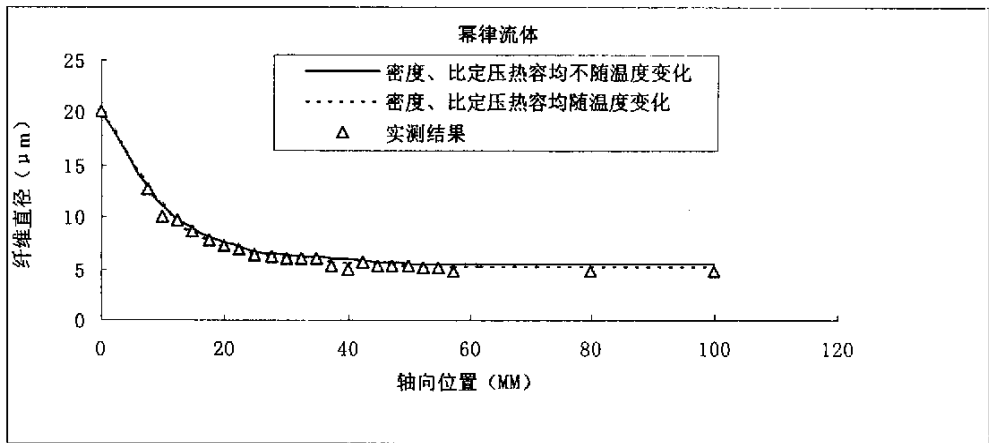


图 4-20 幂律流体密度和比定压热容随温度变化时纤维的直径曲线

由图可知, 实测的纤维直径和预测的数据非常接近, 说明改进后的模型更接近于实际情况, 可以较好地预测纤维的直径。综合两个图形曲线可知, 幂律流体对纤维直径的预测结果较牛顿体接近于实际, 聚合物熔体的密度和比定压热容随温度变化对纤维直径的预测结果影响不大。

#### 第四节 本章小结

非织造材料特别是熔喷非织造材料是一种高孔隙率、纤维细度细等具有诸多优点的一种高附加值的材料。由于熔喷非织造材料的独特性能, 使其可以应用于过滤领域等诸多工业行业当中。从结构特点上来说, 非织造材料是一种介于传统纺织品、塑料、皮革与纸四种系统之间的一种新材料系统。本章在一定的参考文献和实验结果分析的基础上得到以下结论:

- 1、熔喷非织造生产工艺复杂, 在实验过程中根据滤芯的成型性以及

实际工厂生产过程中的一些实际经验，我们选定螺杆转速以及从喷丝孔到接收装置的接收距离作为我们讨论 PP 聚合物纤网性能的主要考虑因素。

- 2、在接收距离、纤网接收层数不变的情况下，随着螺杆转速的增加，PP 熔喷滤芯纤网的孔隙率随之增加。并且可以看出熔喷纤网是一种高孔隙率的产品，其最小值都在 0.78 以上。在螺杆转速、纤网接收层数不变的条件下，随着接受距离的增加，PP 熔喷滤芯纤网的孔隙率也随之增加。
- 3、在接收距离、纤网接收层数不变的情况下，随着螺杆转速的增加，PP 熔喷滤芯纤网的纤维直径随之增加。在接收距离大于 100mm 时，在螺杆转速、纤网接收层数不变的条件下，随着接受距离的增加，PP 熔喷滤芯纤网的纤维直径则随之减小，但是减小的趋势很微弱。
- 4、美国 PMI 公司研制的流体孔率计是测量多孔材料孔隙特征的优秀工具，可以测出一系列的值。在测试过程中可以得到气流通过样品过程中干、湿以及半干曲线，并且可以得到在这个非织造材料中的孔径值分布情况。
- 5、在接收距离、纤网接收层数不变的情况下，随着螺杆转速的增加，PP 熔喷滤芯纤网的孔径值随之增加。在螺杆转速、纤网接收层数不变的条件下，随着接受距离的增加，PP 熔喷滤芯纤网的孔径值也随之增加。
- 6、在接收距离、纤网接收层数不变的情况下，随着螺杆转速的增加，PP 熔喷滤芯纤网的密度随之减小。在螺杆转速、纤网接收层数不变的条件下，随着接受距离的增加，PP 熔喷滤芯纤网的密度也随之减小。
- 7、在接收距离在低于 100mm 左右的时候，接收距离对纤维细度的影响很大，参考图 5-2 中可以得知。在课题中的接收距离范围内，接收距离对纤维的细度影响很小，它主要是使得纤维与纤维之间的密度影响很大，并且对其的影响显著于对纤维细度的影响，这

也为在课题的滤芯的精、中、粗滤层的设置做了前期研究。

- 8、对 Shambaugh 模型进行研究，发现在 Shambaugh 模型中其将熔体视为牛顿流体来进行考虑，但是在本课题的研究中聚合物的牛顿指数是一个和 1 相差很大的数值，是典型的非牛顿流体。在 Shambaugh 模型中的熔体本构方程为  $\tau^z = 2\eta \frac{dv_z}{dz}$ 、 $\tau^{xx} = -\eta \frac{dv_z}{dz}$ ，改进后的熔体本构方程为  $\tau^z = 2\eta \left( \frac{dv_z}{dz} \right)^m$ 、 $\tau^{xx} = -\eta \left( \frac{dv_z}{dz} \right)^m$ 。通过实验对改进前的模型与改进后的模型进行实验拟合发现，改进后的模型对本课题的实验材料具有很好的拟合性。

参考文献：

- 【1】柯勤飞 靳向煜 主编 非织造学 东华大学出版社 2004 333；
- 【2】靳向煜 张慧光 熔喷聚丙烯纤维非织造布生产工艺参数对其性能的影响 非织造工艺技术研究论文集 中国纺织大学出版社 1996 220~224；
- 【3】Uyttendaele M A J, Shambaugh R L.. Melt blowing: general equation development and experimental verification. AICHE Journal, 1990,36(2): 175~186；
- 【4】Matsui M. Air Drag on a Continuous Filament in Melt Spinning. Transactions of the Society of Rheology, 1976, 20(3): 465-473；
- 【5】Zieiminski K F, Spruiell J E. 结晶性成纤高聚物的数学模型. 合成纤维, 1986, 4；

## 第五章 PP 熔喷滤芯的结构与性能的研究

### 第一节 PP 熔喷滤芯的实验方案确定

#### 1.1 熔喷滤芯的基本设计方案的选择

方案一：采用特殊的熔喷生产工艺从一可拆换喷丝头喷出聚丙烯纤维束，经高热空气流载送成扇形状纤维瀑布喷射，并由接收装置上的接收辊连续不断地缠绕而成型，其过滤层上的纤维为相反螺旋方向隔层交叉，以表面熔体接触固体焊接，构成迷宫式过滤孔，高热空气流不仅对纤维起载送和保温作用，而且对到达接收辊的纤维起到紧压的作用，从而保证隔层纤维结点处有良好的熔焊效果。

方案二：采用特殊的熔喷生产工艺从一可拆换喷丝头喷出聚丙烯纤维束，经高热空气流载送成扇形状纤维瀑布喷射，保持接收装置上的接收辊不动，而使模头不断做圆周运动而成型。

方案三：采用特殊的熔喷生产工艺从一可拆换喷丝头喷出聚丙烯纤维束，经高热空气流载送成扇形状纤维瀑布喷射，并由接收装置接收成为一个圆柱型，再利用切割装置切成中空的滤芯结构。

根据东华大学非织造研究发展中心自行研制的实验设备以及实际生产情况，我在课题的研究过程中选用方案一进行实验研究。熔喷聚丙烯纤维滤芯外形为一中空管体状，滤芯管壁厚度即是过滤层厚度，根据有关资料表明，过滤层可以分为精滤层、中滤层、粗滤层组成。工作是悬浮液从外圆表面进入，滤液从内圆表面流入中心集液腔而引至芯外，具体见图 5-1、5-2。

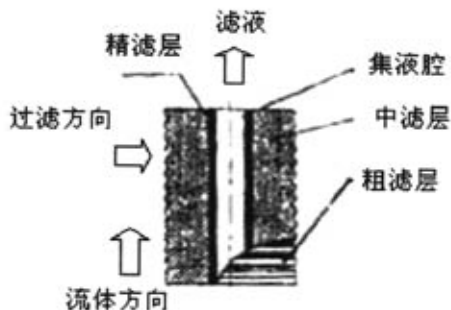


图 5-1 熔喷聚丙烯纤维滤芯结构视图



图 5-2 熔喷聚丙烯滤芯实物图

## 1.2 熔喷滤芯的实验参数的选择

实验设备是东华大学非织造研究发展中心自行研制设计的熔喷非织造成网系统, 参见图 2-1。采用一台螺杆直径为 29mm 的螺杆挤压机, 一台电加热炉及自动温度控制装置, 一个在本实验前期工作中设计的滤芯成型接收装置, 一台空气压缩机和一个喷头装置。实验用的喷头的喷丝孔采用毛细管焊接工艺, 孔径为 0.20mm。

在实验以前, 笔者通过一些试验性的实验来确定在课题进行阶段的工艺参数, 熔体经螺杆区加热后进入模头区, 包括法兰、弯头、模头三部分。这三部分的温度设定主要是考虑到在保持前段温度的基础上在稍微上升一点温度, 既要提高熔体的流动性能使熔喷变得容易又要保证温度不要太高, 以免使 PP 聚合物不能喷出丝束。在实验过程中模头区的温度设定从 200℃到 350℃做了很大范围的变化。从模头的喷丝孔到接收装置的距离也在实验以前做了很多的试验性的探索, 使得在生产滤芯的时候既要考虑到熔喷的一些工艺参数又要考虑到滤芯的成型方面, 因为在滤芯的实验过程中有些接受距离可以成为非织造布, 但是在滤芯成型方面很差。实验过程中实验机的一些固定参数见表 5-1。

表 5-1 实验机的固定参数

项目	加 热 器	分 气 室	弯 头 一 区	弯 头 二 区	喷 头 一 区	喷 头 二 区	喷 头 三 区
温 度 (℃)	934	412	270	285	205	350	350

在实验过程中, 除了实验机的一些参数对实验的影响很大之外, 实验的接收装置的一些参数对实验也有一定的影响, 根据在实验以前的试验性的探索, 选择一些合适的参数来作为本实验的接收装置的参数。接收装置的一些固定参数见表 5-2。

表 5-2 接收装置的固定参数

项目	滚筒转速	横动速度
参数	3.0rpm	6.5cm/min

在实验时表 5-1、表 5-2 的工艺参数是固定不变的, 在实验阶段发现

风压太大，熔体在喷出喷丝孔以后被迅速的拉伸，纤维很快被拉伸的很细，纤维断裂速度加快，容易产生飞花，使得很难使滤芯成型；假如风压大小，在一定的螺杆转速条件下，热空气流对熔体产生的拉伸力就变小，使得在接收装置上的纤维变粗，虽然滤芯的成型性变好，但是又失去 PP 滤芯作为精细过滤的意义。所以为了使实验具有可操作性使风压保持在一个合适值不变，实验发现为 0.36Mpa 比较合适，其它的一些参数，如滤芯的接受距离、每一层的接收层数、螺杆转速等根据工艺需要进行必要的调整，以寻求这些参数的变化对滤芯的性能的影响，包括滤芯的压降—流量、滤芯的使用寿命、滤芯的浊度效率、滤芯的孔径值、滤芯的孔隙率等性能。

### 1.2.1 接收距离对性能的影响

接受距离 DCD 的大小是影响纤维质量和纤网结构性能的一个重要参数。DCD 越小，纤维之间粘结越好，产品较为紧密。但是进一步缩小 DCD 则会使纤维来不及成型凝固，在熔融状态下就聚集在接收装置上，纤维界限不清楚，并丝现象严重。DCD 越大，热空气与周围冷空气的对流就越充分，纤维冷凝也越充分，粘结效果就越差，产品结构就比较蓬松；由于纤维在运动过程中是不断“波动”着的，经过长距离的飞行，纤维间相互缠结效果更充分，使得纤网的杂乱性较好。选取 DCD 值时，聚丙烯加工时的模头温度比熔点高出 100 多度，聚丙烯熔喷需要足够大的 DCD 值以使得聚丙烯纤维冷却凝固。此外，DCD 值还与纤维的拉伸变细有关。一般认为，根据图所示，在模头喷丝孔处，空气的速度为最大值，而此时熔体的速度为零，在高速热空气的作用下，熔体很快被牵伸拉细，纤维在贴近模头的很小距离内，大概 10mm，迅速从 370um 下降到 60um，达到原直径的 16%。在近模头距离 100mm 的地方，纤维被加速到与热空气几乎同等的速度，他们之间几乎不再存在相对速度，所以拉伸力就基本没有了，纤维的细度值就不会再发生太大的变化<sup>[1]</sup>。纤维的细度变化可以用图 5-3 来表示。



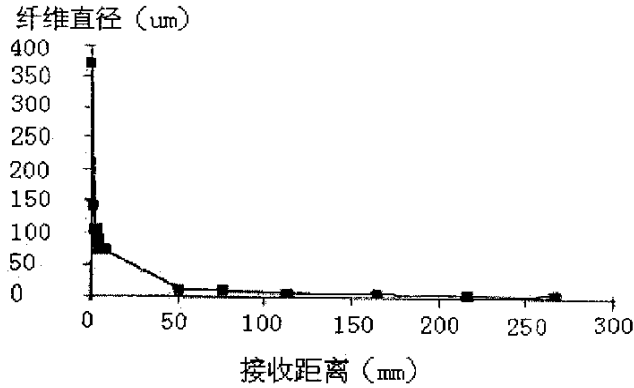


图 5-3 纤维直径随距模头距离的变化关系图

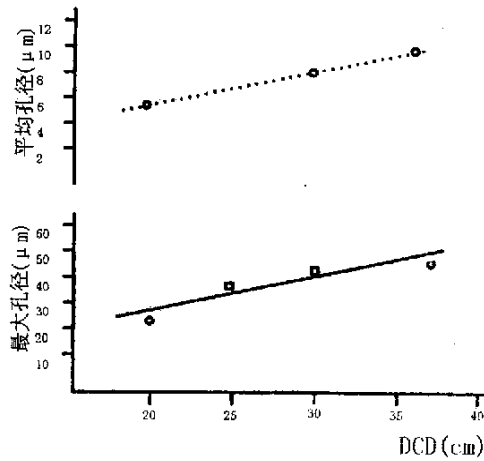


图 5-4 孔径值随接收距离变化的关系图

DCD 的变化不但会对纤维的直径产生影响,而且会对纤维成网的蓬松性产生影响,从上图 5-3 中可以看出,当接收距离大于 100mm 以后,改变接收距离对纤维的直径影响将减小。在图 5-4 中可以看出,随着接受距离的增加,纤网的平均孔径值和最大孔径值均成近似线性的增加,因为在接收距离达到一个值以后,这个值就是熔体的凝固点以后,纤维的细度改变将变得很细微,但是接收距离增加,纤维在空气中冷凝的时间变长,冷凝变得更加充分,当纤维达到接收装置的时候,纤维与纤维之间的粘合作用减弱,纤网将变得很蓬松,因此纤网的孔径值也会变大。纤网变得蓬松,也会使得纤网的体积密度变小(如图 4-13 研究所示)、纤网的孔隙率值变大(如图 4-1 研究所示)。

### 1.2.2 螺杆转速对性能的影响

对于一定的熔喷设备，其拉伸热空气速度存在极限。在其它工艺参数不变的条件下，增加聚合物熔体挤出量，参见图 5-5，将导致拉伸空气对每个喷丝孔挤出的熔体细流拉伸作用的削弱，最终使制成的纤维平均直径变大。由于纤维直径变粗，纤维根数减少，使纤维在接收装置上凝聚时相应的接触面积变小，发生自粘的部位也相应减小。

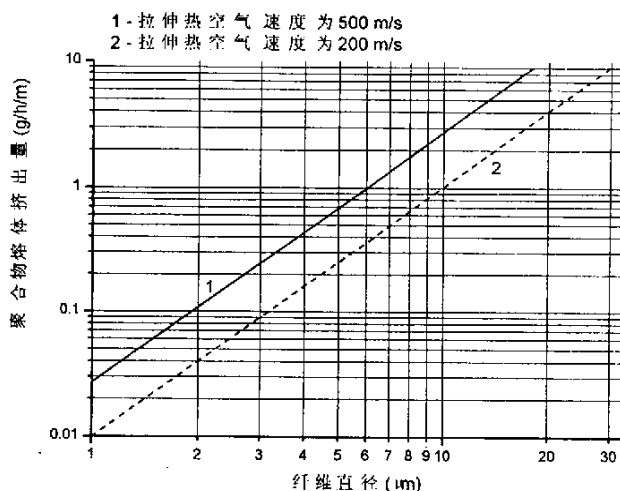


图 5-5 熔喷纤维直径与聚合物熔体挤出量的关系<sup>[2]</sup>

从图 5-5 中可以看出，纤维直径随着螺杆挤出量的增加而增加。当聚丙烯熔体从喷丝孔被挤出时，在一定的热空气流压力条件下，也即对聚合物熔体的气流拉伸力一定条件下，根据动力学分析，螺杆转速增加也即挤出量增加，使得局部的聚物流质量增加，因此这段局部的聚物流在运动过程中的加速度减小，在到达熔体的凝固点的时间变长，纤维就变得比较粗。

### 1.2.3 层数对性能的影响

在实验阶段，由于滤芯在生产过程中具有精滤层、中滤层和粗滤层之分，因此在实验中我们把精滤层、中滤层和粗滤层中的每一个过滤层的纤网层数都不一样进行考虑和实验。层数的不同不会对纤维细度产生影响，但是会引起材料的一些其他性能的变化，首先是面密度、厚度的变化，厚度的变化就会影响到每一个过滤层的厚度变化，面密度的变化进而会影响到滤芯的整体孔径值、浊度效率、孔隙率以及压降—流量的变

化,也会影响到每一个过滤层的孔径值、孔隙率的变化。

### 1.3 熔喷滤芯的实验方案的确定

对 PP 熔喷滤芯来说,在生产过程中对其影响的因素非常复杂,如:原料树脂的熔融指数(MFI)、喷丝板的结构以及喷丝孔的形状、热空气压力、螺杆转速(螺杆挤出量)、风压、接受距离、模头温度、接收小车的来回层数等等。熔喷聚丙烯纤维滤芯外形为一中空管体状,滤芯管壁厚度即是过滤层厚度,根据有关资料表明,过滤层可以分为精滤层、中滤层、粗滤层组成。但是为了研究方便以及根据现实生产中工厂的经验,我们确定了螺杆转速、滤芯的每个过滤层的接受距离、以及滤芯每个过滤层的接收层数作为我们课题研究的工艺参数,并且每个影响因素确定为三个水平,采用正交实验法。

本课题的实验正交方案如下表 5-3:

表 5-3 不同因子的水平分布表

	A	B	C	D	E	F	G
水平	精滤层接受距离 mm	精滤层层数	中滤层接受距离 mm	中滤层层数	粗滤层接受距离 mm	粗滤层层数	螺杆转速 rpm
1	220	2	290	12	380	4	5.2
2	240	4	310	14	400	6	7.0
3	260	6	330	16	420	8	8.2

在实验中,我们不考虑各个因素之间的相互交互作用,仅仅考虑各个因素对滤芯的最终考察指标的影响。正交实验表如下表 5-4:

表 5-4 实验正交表

实验代码	A	B	C	D	E	F	G
1#	1	1	1	1	1	1	1
2#	1	2	2	2	2	2	2
3#	1	3	3	3	3	3	3
4#	2	1	1	2	2	3	3
5#	2	2	2	3	3	1	1

6#	2	3	3	1	1	2	2
7#	3	1	2	1	3	2	3
8#	3	2	3	2	1	3	1
9#	3	3	1	3	2	1	2
10#	1	1	3	3	2	2	1
11#	1	2	1	1	3	3	2
12#	1	3	2	2	1	1	3
13#	2	1	2	3	1	3	2
14#	2	2	3	1	2	1	3
15#	2	3	1	2	3	2	1
16#	3	1	3	2	3	1	2
17#	3	2	1	3	1	2	3
18#	3	3	2	1	2	3	1

## 第二节 PP 熔喷滤芯结构与性能分析

### 2.1 数据分析方法

#### 2.1.1 单目标值分析方法

对正交试验结果的分析，通常采用两种方法，一种是直观分析法或称极差分析法，另一种是方差分析法。极差分析方法的优点是方法简单、直观，计算较少，便于普及和推广，对于生产实际中的一般问题用极差分析方法能够得到很好的解决。但极差分析法不能估计试验过程中以及试验结果测定中必然存在的误差的大小，因而不能真正区分某因素各水平对应的试验结果的差异究竟是由于水平的改变所引起的，还是由于试验误差引起的。而方差分析方法能够弥补直观分析法的不足，而且能够给出各因素重要程度的精确的数值估计，能够提供一个标准来考察、判断因素对试验结果的影响是否显著。因此本试验选择方差分析法<sup>[3]</sup>。

为了考察某个因素对指标的作用，必须将总误差分解为条件误差和试验误差，并比较之，作出因素对指标的作用是否显著的结论，这种分析方法称为方差分析法<sup>[4]</sup>。

正交试验结果方差分析：用正交表  $L_{18}(3^7)$  安排试验，试验结果为  $y_1, y_2, \dots, y_{18}$ ，则

$K_{ij}$  = 第  $j$  ( $j=1, 2, \dots, 7$ ) 列上水平号为  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 的各试验结果之和;  
试验结果的总和

$$T = \sum_{i=1}^n y_i \quad (5-1)$$

试验结果的总平均

$$\bar{y} = T/n = T/18 \quad (5-2)$$

任一列的偏差平方和  $S_j$  与自由度  $f_j$  为

$$S_j = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r K_{ij}^2 - \frac{T^2}{n} \quad (\text{其中 } r=3, n=18) \quad f_j = r-1 \quad (5-3)$$

总的偏差平方和  $S_T$  为

$$S_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (x_{ij})^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 x_{ij} \right)^2 = Q_T - \frac{T^2}{n} = Q_T - C_T \quad (5-4)$$

式中  $Q_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (x_{ij})^2$  称各数据平方之和;

$$C_T = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 x_{ij} \right)^2 = \frac{T^2}{n} \text{ 称修正项。}$$

因素的偏差平方和 (如因素 A) 为

$$S_A = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{j=1}^3 x_{ij} \right)^2 - \frac{T^2}{n} = Q_A - C_T \quad (5-5)$$

误差的偏差平方和  $S_e$  为

$$S_e = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (x_{ij})^2 - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{j=1}^3 x_{ij} \right)^2 = Q_T - Q_A \quad (5-6)$$

或者  $S_e = S_T -$  各因素的偏差平方和之和

将各偏差平方和分别除以各自相应的自由度, 即得到各因素的平均偏差平方和及误差的平均偏差平方和

$$\text{即 } V_A = \frac{S_A}{f_A}, V_B = \frac{S_B}{f_B}, V_C = \frac{S_C}{f_C}, V_e = \frac{S_e}{f_e} \quad (5-7)$$

$$\text{对于 } S_T = S_A + S_B + S_e \quad (5-8)$$

$$\text{可有 } f_T = f_A + f_B + f_C + f_D + f_e \quad (5-9)$$

其中,  $f_T$ =总的试验次数-1;  $f_A$ =因素 A 的水平数-1;  
 $f_B$ =因素 B 的水平数-1;  $f_C$ =因素 A 的水平数-1;  
 $f_D$ =因素 B 的水平数-1。

当所有因子的偏差均方和  $\bar{S}_a$  大于误差均方和  $\bar{S}_e$  时, 用式 10 去检验某因子对试验结果影响的显著性

$$F_A = \frac{S_a / f_a}{S_e / f_e} = \frac{\bar{S}_a}{\bar{S}_e} \sim F(f_A, f_e) \quad (5-10)$$

式中,  $S_a$  为  $a$  中因子的偏差平方和,  $f_a$  为  $a$  中因子的自由度。

当  $a$  中有因子的偏差均方和  $\bar{S}_a$  小于误差的偏差均方和  $\bar{S}_e$  时, 则应该把这些  $S_a$  并入误差平方和中而成  $S_e^\Delta$ , 然后用式 11 去检验没有并入  $S_e$  之中因子( $S_a$ )影响的显著性, 就可以得出个各因素对试验结果影响是否显著的结论。

$$F_A = \frac{S_{\text{因}} / f_{\text{因}}}{S_e^\Delta / f_e^\Delta} \sim F(f_{\text{因}}, f_e^\Delta) \quad (5-11)$$

式中,  $\bar{S}_{\text{因}}$  为偏差均方和大于误差的偏差均方和  $\bar{S}_e$  的因子,  $f_{\text{因}}$  为因子的自由度。

于是对于给定的显著水平  $\alpha$ , 由样本值  $y_1, y_2, \dots, y_{18}$  算的统计量的观察值  $F_A$ , 检验  $H_A$  的法则为:

若  $F_A \geq F_{1-\alpha}(f_A, f_e)$ , 则拒绝  $H_A$ , 认为在显著性水平  $\alpha$  下, 因素 A 对试验结果的影响显著;

若  $F_A \leq F_{1-\alpha}(f_A, f_e)$ , 则接受  $H_A$ , 认为在显著性水平  $\alpha$  下, 因素 A 对试验结果的影响不显著;

根据因子影响的显著性计算试验结果的最优工程:

$$\text{第 } j \text{ 列因素的第 } i \text{ 水平效应 } a_{ij} = (rK_{ij} - T) / n = (3K_{ij} - T) / 18 \quad (5-12)$$

最优工程平均  $\mu_{ik}$  = 总平均值 + 显著因素在该条件下出现的水平效应值  
 (5-13)

式中,  $\bar{y}$  为试验结果的总平均,  $K_{ij}$  = 第  $j$  ( $j=1, 2, 3, \dots, 7$ ) 列上水平号为  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 的各试验结果之和,  $T$  为试验结果的总和,  $r$  为正交试验的水

平数,  $n$  为正交试验的次数<sup>[5]</sup>。

### 2.1.2 多目标试验结果综合分析方法

多指标试验设计问题在实际工作中是大量存在的, 对其试验结果的分析比单指标试验要复杂, 在多指标试验设计中, 各指标的最优方案之间可能存在一定的矛盾, 必须兼顾各指标, 找出使每个指标尽可能好的方案, 本试验将通过最优工程方法来分析实验的最佳实验方法。

## 2.2 熔喷滤芯各个性能分析

### 2.2.1 熔喷滤芯通量性能分析

熔喷滤芯的通量是考核滤芯性能的一个重要指标。在现行的考核指标中一般都使用容垢量或者使用寿命来作为最终考核目标, 由于课题的经费以及测试方法等原因, 我们在实验初期设计并搭建了一套滤芯过滤性能的实验测试仪器如图 2-16, 经过大量实验证明我们认为用滤芯的通量这个概念来代替滤芯的容垢量在本课题更加具有实际操作性和客观性。由于每一个滤芯的工艺结构的不同, 在测试过程中其流过的水的总量肯定是不相同的, 因此在实验中可以用每个滤芯在实验中所流过水的总量来作为这个滤芯的通量或使用寿命的评价指标。在测量滤芯通量的时候, 实验的开始环境和最后的环境是相同的。开始环境通过实验系统的流量计来控制, 每个滤芯在刚开始测量时候的流量都调到 400l/h, 最后环境为压力表 P2 的压力为 0.02Mpa, 此时水的流量很小, 几乎可以忽略不计。使用寿命用流过的水的总量来表示, 单位  $m^3$ 。测试实验数据如下表 5-5:

表 5-5 通量实验测试结果

实验代码	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
使用寿命	5.742	7.948	5.289	8.579	4.694	9.248	8.972	3.403	7.247
实验代码	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
使用寿命	4.666	6.743	7.974	6.127	9.651	4.170	7.532	10.39	2.238

从下图 5-6 中可以看出, 因素 G 即螺杆转速对滤芯的通量的影响最大,

并且水平 3 为最佳；在因素 A 即精滤层的接受距离中，各水平的影响差别不是很大，水平 2 为最佳；在因素 B 即精滤层的层数中，水平 2 为最佳；在因素 C 即中滤层的接受距离中，水平 1 为最佳；在因素 D 即中滤层的层数中，水平 1 为最佳；在因素 E 即粗滤层的接受距离中，水平 1 为最佳；在因素 F 即粗滤层的层数中，水平 2 为最佳。

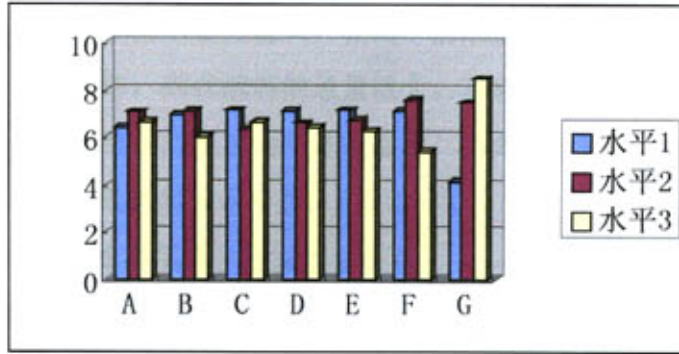


图 5-6 各因素对滤芯通量的影响趋势图

(A—精滤层接受距离、B—精滤层层数、C—中滤层接受距离、  
D—中滤层层数、E—粗滤层接受距离、F—粗滤层层数、G—螺杆转速。下同)  
因素水平方差分析见下表 5-6:

表 5-6 因素水平方差分析表 (\* \* 表示  $n=0.05$  时, \* 表示  $n=0.10$  时)

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	$F_A$ 比值	显著性 ( $F_A \geq F_{1-\alpha}$ )
A	1.450	2	1.000	
B	4.199	2	2.896	
C	2.059	2	1.420	
D	1.546	2	1.066	
E	2.510	2	1.731	
F	15.853	2	10.933	
G	61.466	2	42.390	
误差 $e^{\wedge}$	2.230	2		

查 F 分布表, 取  $n=0.05$ , 得  $F_{1-n}(2,2)=19.00$ ; 假如取  $n=0.10$ , 得  $F_{1-n}(2,2)=9.00$ 。

从上表中可以看出, 对熔喷滤芯的通量的影响, 因素 G 即螺杆转速最为显著。随着螺杆转速的增加, 滤芯的通量有不断增加的趋势。螺杆



转速的大小直接会影响到熔喷的纤维直径的大小，而纤维直径的大小将会影响到滤芯的轴向承载能力以及孔径值的大小。当  $n=0.10$  时，因素 F 即粗滤层的层数对滤芯的通量影响也显著，表明滤芯的最外层的层数会对滤芯的成型性以及滤芯的轴向承载力产生影响。在滤芯使用过程中，成型性以及滤芯的轴向承载力会对滤芯的使用寿命产生很大的影响，成型性好，滤芯地轴向承载力就大，在同一的水压条件下滤芯的成型完整性就不容易被破坏，因此滤芯的通量就大。其它的影响因素的差别不是很大，对滤芯的通量的影响也不是很显著。因此可以看出：对单指标滤芯的通量而言的最优实验水平为： $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_1$ 、 $F_2$ 、 $G_3$ 。

### 2.2.2 熔喷滤芯压降—流量性能分析

熔喷滤芯的压降—流量特性也是滤芯的一个重要的考核指标。压降—流量特性越好表示这个滤芯的通量大或者使用寿命好，滤芯的容垢量性能比较优越。但是由于滤芯的测试方法限制以及课题经费的原因，在本课题实验初期设计并搭建了一套实验测试系统如图 2-16，在测试过程中我们根据测试系统前后的压力差以及系统中水的流量来做出滤芯的压降—流量的特性曲线。根据测试的数据所做出的压降—流量特性图并不是一条直线，而是一条曲线，从图 5-7 中可以看出，压降—流量的实测数据在拟合后的直线周围，因此可以用这个拟合值作为评价滤芯压降—流量的近似值。由于在所有的滤芯中对压降—流量特性进行比较时没有一个直观的参数可以说明，因此为了对课题研究的方便以及实验数据处理的方便，我们对每个滤芯的压降—流量特性参数用 Matlab 软件进行直线拟合，用这条拟合后直线的斜率作为这个滤芯的压降—流量特性的评价指标。压降—流量数值的典型 Matlab 程序拟合直线见下图 5-7。

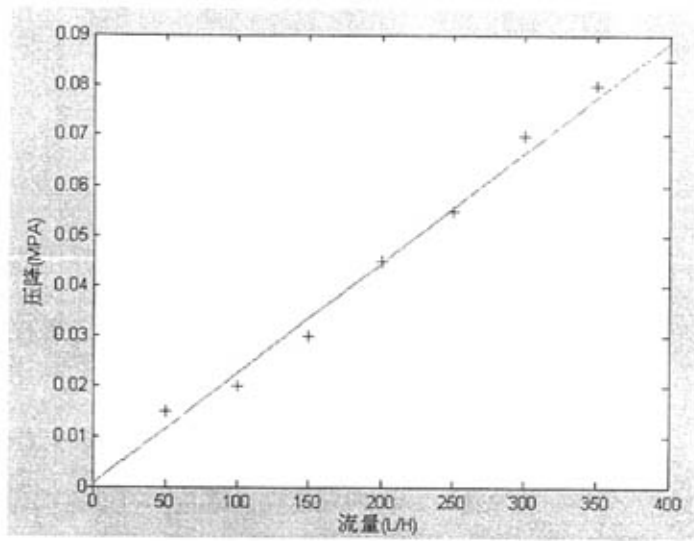


图 5-7 压降—流量的典型拟合直线

压降—流量 Matlab 程序拟合值是一个无单位量纲。测试实验数据如下表：

表 5-7 压降—流量特性拟合数据

实验	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
代码									
压降	0.2433	0.2317	0.2450	0.2200	0.2550	0.2017	0.2083	0.3433	0.23
流量									
实验	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
代码									
压降	0.2583	0.2333	0.2350	0.2350	0.1833	0.2633	0.2383	0.1283	0.50
流量									

滤芯的压降—流量特性拟合直线是拟合的斜率值越小，表示滤芯在同一的流量情况下压降值最小，也就是这个滤芯的使用效果越好。从下图 5-8 中可以看出，因素 G 即螺杆转速对滤芯的压降—流量特性的影响最大，并且水平 3 为最佳；在因素 A 即精滤层的接受距离中，水平 2 为最佳；在因素 B 即精滤层的层数中，水平 2 为最佳；在因素 C 即中滤层的接受距离中，水平 1 为最佳；在因素 D 即中滤层的层数中，水平 3 为最佳；在因素 E 即粗滤层的接受距离中，水平 1 为最佳；在因素 F 即粗滤层的层数中，水平 2 为最佳。

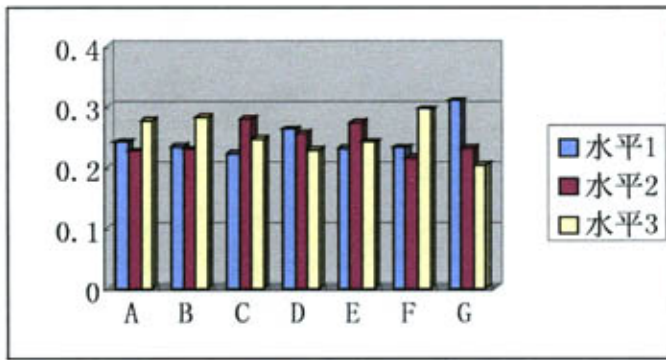


图 5-8 各因素对滤芯压降—流量的影响趋势图

因素水平方差分析见下表 5-8:

表 5-8 因素水平方差分析表 (\* 表示  $n=0.10$  时)

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	$F_A$ 比值	显著性 ( $F_A \geq F_{1-\alpha}$ )
A	0.008	2	2.000	
B	0.010	2	2.500	
C	0.010	2	2.500	
D	0.004	2	1.000	
E	0.006	2	1.500	
F	0.022	2	5.500	
G	0.038	2	9.500	
误差 $e^\Delta$	0.00	2		

查 F 分布表, 取  $n=0.10$ , 得  $F_{1-n}(2,2)=9.00$ 。

从上表 5-8 中可以看出, 因素 G 即螺杆转速对滤芯的压降—流量特性的影响为最显著。螺杆转速的变化也即是熔喷模头的挤出量的变化, 在同一的风压作用下, 气流拉伸作用力不变, 根据牛顿第二定律  $F=m \times a$ , 把在空气拉伸过程中的一段聚物流看成是由很多细小段的聚物流组成, 在每一细小段聚物流中挤出量增加也就是  $m$  增加, 使得作用在这段聚物流的加速度就必然减少, 从而纤维的细度必然会受到影响。并且随着螺杆转速的增加, 纤维细度增加, 因此在一定表面积内纤维的根数减少, 纤维与纤维相互粘合的机会减小, 使得滤芯的孔径值有变大得趋势。其它的因素对最后评价指标的影响相差不大, 并且对其影响也不是很显著。因此可以看出: 对单指标滤芯的压降—流量特性指标而言的

最优实验水平为：A<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>1</sub>、D<sub>3</sub>、E<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>。

### 2.2.3 熔喷滤芯浊度效率性能分析

熔喷滤芯的浊度效率是滤芯使用的一个最重要的评价指标。滤芯浊度效率的测试仪器也是由自己设计并搭建的装置如图 2-16 测试所得，应用浊度仪测试通过滤芯前后的水的浊度，在测试过程中每隔一定时间就测一次，在滤芯的整个使用时间内的所有过滤后的浊度值之和与所有过滤前的浊度值之和的比值作为滤芯的过滤通过率。因此滤芯的浊度效率为：

$$\text{浊度效率} = \left(1 - \frac{\text{所有过滤后的浊度值之和}}{\text{所有过滤前的浊度值之和}}\right) \times 100\% \quad (5-14)$$

滤芯的典型浊度效率曲线如下图 5-9，从下图可以看出，随着过滤时间的增加，滤芯的浊度效率整体上是有所增加的趋势。由于熔喷滤芯材料是一种多孔隙的材料，在过滤过程中具有多种过滤机理在起作用，但是大体上可以认为从过滤开始阶段大的固体颗粒首先被材料截留，原有的孔隙被逐渐的阻塞，随着过滤时间的增加，被截留的固体颗粒和材料在这时一起起到过滤阻挡的作用，使得滤芯的浊度效率整体上具有上升的趋势。但是可能有时随着过滤液体压力的改变，原先被截留的固体颗粒可能被冲出滤芯，从而使得在某一阶段，滤芯的浊度效率有局部的下降趋势。因此在评价滤芯的浊度效率时就比较困难，为了在评价过程中更加具有客观性和可比较性，我们采用公式 5-14 作为评价这个滤芯的浊度效率值。

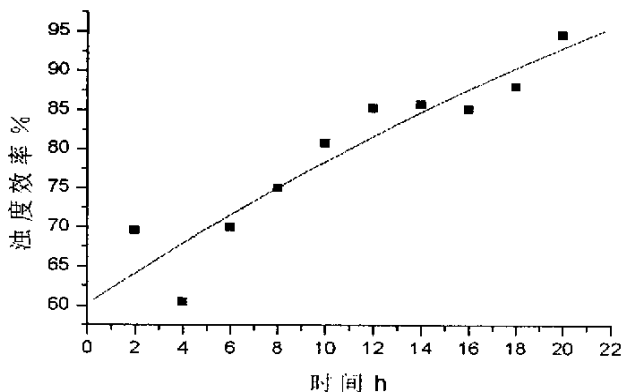


图 5-9 滤芯的典型浊度效率曲线趋势

熔喷滤芯的浊度效率值的实验单位为%。实验测试数据如下表:

表 5-9 实验测试浊度效率数据表

实验代码	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
浊度效率	83.931	85.182	79.954	85.666	79.682	86.313	84.618	88.639	92.6
实验代码	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
浊度效率	89.948	91.044	85.473	87.010	79.470	87.013	87.900	90.172	88.8

熔喷滤芯的浊度效率表示滤芯在使用的过程中可以阻挡固体颗粒的能力,浊度效率值越大表示这个滤芯的阻挡颗粒的性能越好,一般在实际应用过程中,在其它性能不差的条件下希望浊度效率越大越好。从下图 5-10 中可以看出,因素 A 即精滤层的接受距离对浊度效率的影响最大,并且水平 3 为最佳;其次因素 G 即螺杆转速对滤芯的浊度效率的影响为次之,并且水平 2 为最佳;在因素 C 即中滤层的接受距离中,可以看出其对滤芯浊度效率的影响也很明显,水平 1 为最佳;在因素 B 即精滤层的层数中,水平 3 为最佳;在因素 D 即中滤层的层数中,水平 2 为最佳;在因素 E 即粗滤层的接受距离中,水平 2 为最佳;在因素 F 即粗滤层的层数中,水平 2 为最佳。

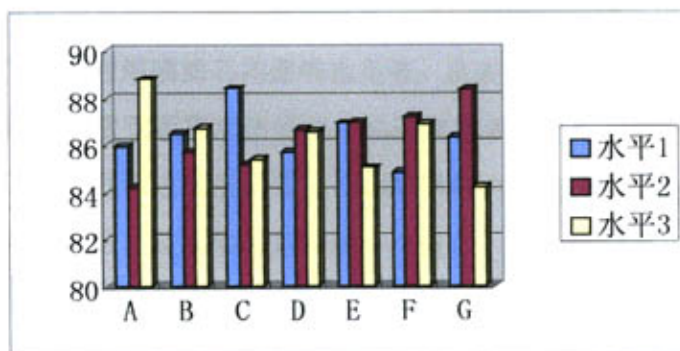


图 5-10 各因素对滤芯浊度效率的影响趋势图

因素水平方差分析见下表 5-10:

表 5-10 因素水平方差分析表 (\* \* 表示  $n=0.05$  时, \* 表示  $n=0.10$  时)

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	$F_A$ 比值	显著性 ( $F_A \geq F_{1-\alpha}$ )
A	64.831	2	19.580	* *
B	3.394	2	1.025	
C	40.068	2	12.101	*
D	3.311	2	1.000	
E	14.464	2	4.368	
F	19.462	2	5.878	
G	50.930	2	15.382	*
误差 $e^{\Delta}$	3.310	2		

查 F 分布表, 取  $n=0.05$ , 得  $F_{1-n}(2,2)=19.00$ ; 假如取  $n=0.10$ , 得  $F_{1-n}(2,2)=9.00$ 。

从上表 5-10 中可以看出, 当  $n=0.05$  时, 因素 A 即精滤层的接收距离对熔喷滤芯的浊度效率影响最为显著。接收距离变化会导致纤维在热空气流场中运动时间的增加, 同时周围冷空气的热交换变大, 接收距离的增加会使得纤维与纤维之间的孔隙增加, 纤网的蓬松性会增加。由于熔喷工艺的复杂性, 接受距离对滤芯的浊度效率的影响也很复杂, 特别是由于滤芯结构的复杂性使得接受距离对滤芯的使用寿命并不是一个规律的上升或者下降的趋势; 当  $n=0.10$  时, 因素 G 即螺杆转速对滤芯的浊度效率的影响也显著, 螺杆转速的变化会影响到纤维直径的变化, 纤维直径得变化会影响到纤维在熔喷过程中的成型排列问题; 因素 C 即中滤层的接受距离对熔喷滤芯的影响也显著; 从表 5-10 中可以看出, 滤芯的每个过滤层的接受距离对熔喷滤芯的浊度效率都有很大的影响, 但是每个过滤层的层数即过滤层的厚度在实验数据内对滤芯的浊度效率的影响不是很明显, 这个是实验过程中的一个发现。因此可以看出: 对单指标滤芯的浊度效率指标而言的最优实验水平为:  $A_3$ 、 $B_3$ 、 $C_1$ 、 $D_2$ 、 $E_2$ 、 $F_2$ 、 $G_2$ 。

#### 2.2.4 熔喷滤芯孔径值性能分析

熔喷滤芯的孔径值也是影响滤芯的一个重要指标。在实际生产中, 由于测试滤芯的孔径值的方法不一, 所以很多产品没有一个规范比较方

法。本课题的孔径测试是在我们实验室的美国进口仪器 MPI 公司生产的孔径测试仪中测试所得。滤芯的孔径值的大小对滤芯的使用寿命以及浊度效率、压降—流量等性能均有一定的影响。孔径测试原理如图 2-13、滤芯的孔径测试样品的安装如图 2-15。滤芯的孔径测试的典型的干湿曲线如图 5-11、以及典型的滤芯孔径分布图如图 5-12。

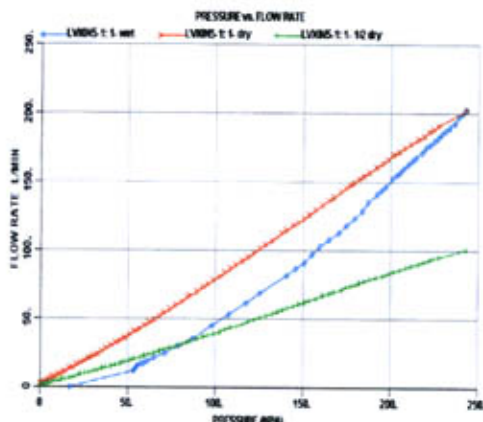


图 5-11 滤芯的干湿曲线图

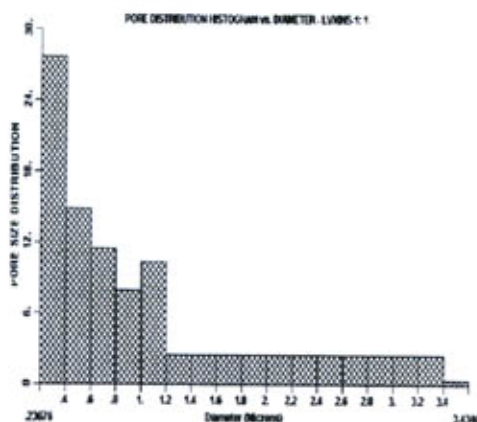


图 5-12 滤芯的孔径分布图

熔喷滤芯的孔径值单位为  $\mu\text{m}$ 。实验测试数据如下表 5-11:

表 5-11 孔径值实验测试数据

实验 代码	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
孔径 值	1.5110	1.9764	1.5451	2.5321	0.7588	0.7358	2.7692	1.3798	1.1619
实验 代码	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
孔径 值	0.9393	0.8311	3.0191	0.5331	2.9197	1.2312	0.8680	1.3240	0.9976

熔喷滤芯的孔径值在一定的条件下是孔径值越小表明滤芯可以阻挡的固体颗粒的直径值也就越小，在一定的条件下可以说滤芯的阻挡固体颗粒的能力越强，滤芯的浊度效率也将越好。孔径值是越小越好，从下图 5-13 中可以看出，因素 G 即螺杆转速对滤芯的孔径值的影响最大，并且水平 2 为最佳；在因素 A 即精滤层的接受距离中，水平 3 为最佳；在

因素 B 即精滤层的层数中, 水平 1 为最佳; 在因素 C 即中滤层的接受距离中, 水平 3 为最佳; 在因素 D 即中滤层的层数中, 水平 3 为最佳; 在因素 E 即粗滤层的接受距离中, 水平 3 为最佳; 在因素 F 即粗滤层的层数中, 水平 3 为最佳。

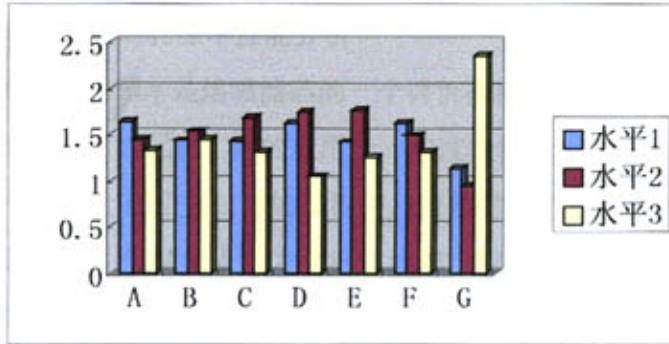


图 5-13 各因素对滤芯孔径值的影响趋势图

因素水平方差分析见下表 5-12:

表 5-12 因素水平方差分析表 (\* \* 表示  $n=0.05$  时, \* 表示  $n=0.10$  时)

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	$F_A$ 比值	显著性 ( $F_A \geq F_{1-\alpha}$ )
A	0.624	2	9.600	*
B	0.065	2	1.000	
C	0.227	2	3.492	
D	1.082	2	16.646	*
E	0.512	2	7.877	
F	0.103	2	1.585	
G	8.561	2	131.708	* *
误差 $e^A$	0.070	2		

查 F 分布表, 取  $n=0.05$ , 得  $F_{1-\alpha}(2,2)=19.00$ ; 假如取  $n=0.10$ , 得  $F_{1-\alpha}(2,2)=9.00$ 。

从上表 5-12 中可以看出, 当  $n=0.05$  时, 因素 G 即螺杆转速对熔喷滤芯的孔径值的影响最为显著, 螺杆转速的变化会影响熔喷纤维直径的变化, 并且在滤芯的成型过程中纤维与纤维之间的粘合情况都会发生一定的变化, 但是并不是单一的纤维直径的变化会直接影响到滤芯的孔径值的变化, 其成型过程中纤维与纤维之间的粘合、空隙也会产生一定的



影响。当  $n=0.10$  时, 因素 D 即中滤层的层数对滤芯得孔径值影响显著, 因素 A 即精滤层的接受距离对滤芯的影响也显著。因此可以看出: 对单指标滤芯的孔径值指标而言的最优实验水平为:  $A_3$ 、 $B_1$ 、 $C_3$ 、 $D_3$ 、 $E_3$ 、 $F_3$ 、 $G_2$ 。

### 2.2.5 熔喷滤芯孔隙率性能分析

熔喷滤芯的孔隙率是熔喷滤芯的一个评价指标。熔喷非织造布是一个高孔隙率的材料, 因此被广泛的应用于一些过滤领域如在一些空气过滤、液体过滤等行业, 在空气过滤的过程中, 可能材料的孔隙率对过滤的性能有很大的影响, 但是笔者认为在液体过滤过程中, 在材料的孔隙率值达到一个值以后再改变材料的孔隙率对其过滤性能的影响不会很大, 因为在液体过滤中液体的雷诺系数的存在使得孔隙率对过滤性能的作用减弱。并且液体和材料之间也会产生一种粘合力以及压力产生的拽力等复杂力系也会模糊材料孔隙率的概念。滤芯的孔隙率也是一个间接指标, 通过公式 2-10 的计算就可以得出, 是一个无量纲的指标, 在本课题中用其的百分率来表示, 滤芯的孔隙率数据见下表 5-13:

表 5-13 滤芯的孔隙率数值

实验	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
代码									
孔隙率	80.350	81.692	79.759	79.208	78.220	79.604	77.865	80.223	78.999
实验	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
代码									
孔隙率	78.302	79.470	78.184	79.431	79.879	78.032	79.401	76.955	78.235

熔喷滤芯的孔隙率值越大越好。从下图 5-14 中可以看出, 因素 G 即螺杆转速对滤芯的孔径值的影响最大, 并且水平 2 为最佳; 在因素 A 即精滤层的接受距离中, 水平 1 为最佳; 在因素 B 即精滤层的层数中, 水平 2 为最佳; 在因素 C 即中滤层的接受距离中, 水平 3 为最佳; 在因素 D 即中滤层的层数中, 水平 2 为最佳; 在因素 E 即粗滤层的接受距离中,

水平 2 为最佳；在因素 F 即粗滤层的层数中，水平 3 为最佳。

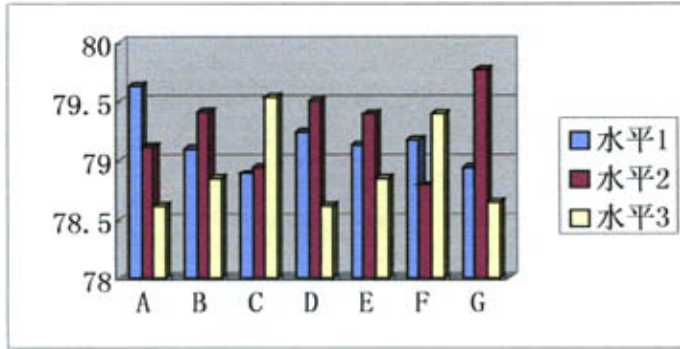


图 5-14 各因素对滤芯孔隙率的影响趋势图

因素水平方差分析见下表 5-14:

表 5-14 因素水平方差分析表

方差来源	偏差平方和 S	自由度 f	$F_A$ 比值	显著性 ( $F_A \geq F_{1-\alpha}$ )
A	3.090	2	2.764	
B	0.938	2	0.839	
C	1.549	2	1.386	
D	2.496	2	2.233	
E	0.902	2	0.807	
F	1.118	2	1.000	
G	4.064	2	3.636	
误差 $e^{\Delta}$	1.120	2		

查 F 分布表，取  $n=0.05$ ，得  $F_{1-n}(2,2)=19.00$ 。

从上表 5-14 中可以看出，各个因素对熔喷滤芯的孔隙率的影响均不显著。在这些因素水平范围之内，熔喷滤芯的孔隙率值变化不是很大，所以在方差分析时就会出现不显著的情况。从表 5-14 中的 F 比值中可以看出，因素 G 即螺杆转速对滤芯的孔隙率的影响最大，其次因素 A 即精滤层的接受距离对滤芯的孔径值为次之。每个过滤层的接收距离对滤芯孔隙率的影响均比每个过滤层的层数的影响大，是因为接收距离变化对蓬松性有很大的影响。因此可以看出：对单指标滤芯的孔隙率指标而言的最优实验水平为： $A_1$ 、 $B_2$ 、 $C_3$ 、 $D_2$ 、 $E_2$ 、 $F_3$ 、 $G_2$ 。

### 2.3 数值综合分析

由前面对各个最终的评价体系的分析,我们可以知道对各个的评价指标来说各个因素的水平值不尽相同。本实验就是在通过分析单一评价指标的基础上,找出的最优实验工艺,在考虑滤芯的最终评价体系时,滤芯的浊度效率值作为主要的考核指标,滤芯的使用寿命以及压降—流量特性指标、滤芯孔径值作为考核滤芯性能的辅助指标。

通过对实验数据的直观分析以及方差分析,我们可以确定最优的实验工艺。

对滤芯的浊度效率性能分析来说最优组合为:  $A_3B_3C_1D_2E_2F_2G_2$ ;

对滤芯的使用寿命性能分析来说最优组合为:  $A_2B_2C_1D_1E_1F_2G_3$ ;

对滤芯的压降—流量性能分析最优组合为:  $A_2B_2C_1D_3E_1F_2G_3$ ;

对滤芯的孔径值性能分析来说最优组合为:  $A_3B_1C_3D_3E_3F_3G_2$ ;

对滤芯的孔隙率性能分析来说最优组合为:  $A_1B_2C_3D_2E_2F_3G_2$ ;

在考核滤芯的性能时,浊度效率作为主要的考核指标,根据方差分析的显著性以及直观分析的因素趋势图,可以得出实验的最优方案为:  $A_3$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $D_3$ 、 $E_2$ 、 $F_2$ 、 $G_2$ ,即因素精滤层的接受距离: 260mm、精滤层的层数: 4、中滤层的接受距离: 290mm、中滤层的层数: 16、粗滤层的接受距离: 400mm、粗滤层层数: 6、螺杆转速: 7.0rpm。

综合分析工程最优值:

$$\begin{aligned} \text{滤芯通量: } Q_{\bar{x}} &= \bar{y} + \sum a_{ij} = \bar{y} + A_3 + B_2 + C_1 + D_3 + E_2 + F_2 + G_2 = \\ &= \frac{120.613}{18} + \frac{3 \times 39.782 - 120.613}{18} + \frac{3 \times 42.829 - 120.613}{18} + \frac{3 \times 42.871 - 120.613}{18} + \\ &= \frac{3 \times 38.413 - 120.613}{18} + \frac{3 \times 40.329 - 120.613}{18} + \frac{3 \times 45.374 - 120.613}{18} + \frac{3 \times 44.845 - 120.613}{18} \\ &= 8.8693 \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{滤芯压降—流量特性: } R_{\bar{x}} &= \bar{y} + \sum a_{ij} = \bar{y} + A_3 + B_2 + C_1 + D_3 + E_2 + F_2 + G_2 = \\ &= \frac{4.4631}{18} + \frac{3 \times 1.6582 - 4.4631}{18} + \frac{3 \times 1.3749 - 4.4631}{18} + \frac{3 \times 1.3265 - 4.4631}{18} + \\ &= \frac{3 \times 1.3599 - 4.4631}{18} + \frac{3 \times 1.6333 - 4.4631}{18} + \frac{3 \times 1.2916 - 4.4631}{18} + \frac{3 \times 1.3783 - 4.4631}{18} \\ &= 0.1788 \end{aligned}$$

$$\text{滤芯浊度效率: } \eta_{\bar{x}} = \bar{y} + \sum a_{ij} = \bar{y} + A_3 + B_2 + C_1 + D_3 + E_2 + F_2 + G_2 =$$

$$\frac{155345}{18} + \frac{3 \times 532764 - 155345}{18} + \frac{3 \times 514189 - 155345}{18} + \frac{3 \times 530449 - 155345}{18} + \frac{3 \times 519389 - 155345}{18} + \frac{3 \times 521701 - 155345}{18} + \frac{3 \times 523246 - 155345}{18} + \frac{3 \times 530072 - 155345}{18}$$

$$= 94.149\%$$

滤芯的孔径值:  $N_{\alpha} = \bar{y} + \sum a_{ij} = \bar{y} + A_3 + B_2 + C_1 + D_3 + E_2 + F_2 + G_2 =$

$$\frac{27.0332}{18} + \frac{3 \times 8.5005 - 27.0332}{18} + \frac{3 \times 9.1898 - 27.0332}{18} + \frac{3 \times 8.5913 - 27.0332}{18} + \frac{3 \times 6.2622 - 27.0332}{18} + \frac{3 \times 10.527 - 27.0332}{18} + \frac{3 \times 8.9759 - 27.0332}{18} + \frac{3 \times 6.1063 - 27.0332}{18}$$

$$= 0.6811 \mu\text{m}$$

滤芯的孔隙率:  $\eta \%_{\alpha} = \bar{y} + \sum a_{ij} = \bar{y} + A_3 + B_2 + C_1 + D_3 + E_2 + F_2 + G_2 =$

$$\frac{1423.809}{18} + \frac{3 \times 471.678 - 1423.809}{18} + \frac{3 \times 476.439 - 1423.809}{18} + \frac{3 \times 473.565 - 1423.809}{18} + \frac{3 \times 471.666 - 1423.809}{18} + \frac{3 \times 476.315 - 1423.809}{18} + \frac{3 \times 472.45 - 1423.809}{18} + \frac{3 \times 478.597 - 1423.809}{18}$$

$$= 78.8487\%$$

通过分析可以得出滤芯的实验最优工艺:  $A_3$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $D_3$ 、 $E_2$ 、 $F_2$ 、 $G_2$ , 通过综合分析法—工程最优分析, 我们可以计算出最优实验工艺的理论值, 在课题的最后阶段我们通过实验验证最优实验方案, 最优方案的工程理论值与实验测试值见下表 5-15:

表 5-15 最优方案的工程理论值与实验测试值

项目	浊度效率%	通量 $\text{m}^3$	压降—流量	孔径值 $\mu\text{m}$	孔隙率%
理论值	94.149	8.8693	0.1788	0.6811	78.8487
测试值	93.246	9.028	0.1693	0.7426	79.7864

从上表可以看出, 根据多因子分析的最佳工艺参数进行实验, 在滤芯的各项性能测试结果中和工程最优计算结果的理论值有很高的一致性。在诸多评价指标中各项指标之间具有一定的矛盾性, 浊度效率、使用寿命以及压降—流量作为实验的主要考虑指标。从最佳理论值和测试值之间可以看出, 最佳工艺参数具有很好的合理性。

#### 2.4 实验数据的直观分析表

5-16 实验数据直观分析表

编号	因素水平										孔径值 ( $\mu\text{m}$ )	孔隙率 (%)
	A	B	C	D	E	F	G	通量 ( $\text{m}^3$ )	压降一流 量(斜率 值)	浊度效率 (%)		
1	1	1	1	1	1	1	1	5.742	0.2433	83.931	1.5110	80.350
2	1	2	2	2	2	2	2	7.948	0.2317	85.182	1.9764	81.692
3	1	3	3	3	3	3	3	5.289	0.2450	79.954	1.5451	79.759
4	2	1	1	2	2	3	3	8.579	0.2200	85.666	2.5321	79.208
5	2	2	2	3	3	1	1	4.694	0.2550	79.682	0.7588	78.220
6	2	3	3	1	1	2	2	9.248	0.2017	86.313	0.7358	79.604
7	3	1	2	1	3	2	3	8.972	0.2083	84.618	2.7692	77.865
8	3	2	3	2	1	3	1	3.403	0.3433	88.639	1.3798	80.223
9	3	3	1	3	2	1	2	7.247	0.2383	92.623	1.1619	78.999
10	1	1	3	3	2	2	1	4.666	0.2583	89.948	0.9393	78.302
11	1	2	1	1	3	3	2	6.743	0.2333	91.044	0.8311	79.470
12	1	3	2	2	1	1	3	7.974	0.2350	85.473	3.0191	78.184
13	2	1	2	3	1	3	2	6.127	0.2350	87.010	0.5331	79.431
14	2	2	3	1	2	1	3	9.651	0.1833	79.470	2.9197	79.879
15	2	3	1	2	3	2	1	4.170	0.2633	87.013	1.2312	78.032
16	3	1	3	2	3	1	2	7.532	0.2383	87.900	0.8680	79.401
17	3	2	1	3	1	2	3	10.390	0.1283	90.172	1.3240	76.955
18	3	3	2	1	2	3	1	2.238	0.5017	88.812	0.9976	78.235
K <sub>1</sub>	6.392	6.936	7.145	7.099	7.147	7.140	4.152					
K <sub>2</sub>	7.078	7.138	6.325	6.601	6.721	7.566	7.474					

K <sub>3</sub>	6.635	6.028	6.631	6.402	6.233	5.397	8.476
R	0.686	1.110	0.820	0.697	0.914	2.169	4.324
K <sub>1</sub>	0.241	0.234	0.221	0.262	0.231	0.232	0.311
K <sub>2</sub>	0.226	0.229	0.278	0.255	0.272	0.215	0.230
K <sub>3</sub>	0.276	0.281	0.245	0.227	0.241	0.296	0.203
R	0.050	0.052	0.057	0.035	0.041	0.081	0.108
K <sub>1</sub>	85.922	86.512	88.408	85.698	86.923	84.846	86.337
K <sub>2</sub>	84.192	85.698	85.129	86.646	86.950	87.208	88.345
K <sub>3</sub>	88.794	86.698	85.371	86.565	85.035	86.854	84.226
R	4.602	1.000	3.279	0.948	1.0915	2.362	4.119
K <sub>1</sub>	1.637	1.437	1.432	1.627	1.417	1.618	1.136
K <sub>2</sub>	1.452	1.532	1.676	1.746	1.754	1.496	0.930
K <sub>3</sub>	1.329	1.448	1.310	1.044	1.246	1.303	2.352
R	0.328	0.095	0.366	0.702	0.508	0.315	1.422
K <sub>1</sub>	79.628	79.093	78.881	79.234	79.124	79.172	78.939
K <sub>2</sub>	79.107	79.407	78.938	79.502	79.386	78.787	79.766
K <sub>3</sub>	78.613	78.849	79.530	78.613	78.838	79.389	78.643
R	1.015	0.558	0.649	0.889	0.548	0.602	1.123

### 第三节 熔喷滤芯的过滤机理研究

在过滤过程中可能是一种或者几种过滤类型起作用，但是在实际的模型的建立和对机理的研究过程中，人们往往对其条件进行简化，使其在过滤过程中具有支配地位的过滤机理作为研究的依据。下面对熔喷滤芯的过滤机理进行分析。

#### 3.1 过滤过程类型<sup>[6]</sup>

##### 3.1.1 介质过滤

介质过滤时，由于颗粒大于过滤介质的微孔，它们就会被截留。此时滤芯就起了一种筛网的作用。通常人们在筛滤粗大颗粒时才会考虑这种装置。

##### 3.1.2 深层过滤

深层过滤时，分离过程只发生在介质的“内部”，微粒小于一经常远远小于介质的微孔。如果把介质视作许多弯曲的通道，那么过滤时出现的微粒就会碰撞到通道的壁上，然后由某种力使其保持在那里。



图 5-15 深层过滤

当微粒撞到通道壁上时，就有可能脱离液流——是否能达到这一点，决定于微粒收到的惯性力和阻力的平衡。在深层过滤过程中，仅仅适用于去除少量的固体颗粒。

##### 3.1.3 滤饼过滤

滤饼过滤时，固体物质聚集在介质的表面，这样，经过一段很短的初始期，就通过沉积的固体层进行过滤。这个过程一直继续到滤饼两侧的压降超



图 5-16 滤饼过滤

过经济或技术允许的最大值，或填满有效的间隙。这种过滤方法广泛应用于加工工业，并且特别适于过滤浓缩的悬浮体和回收大量的固体。

从上面分析可知，在滤芯过滤过程中的过滤类型可能是几种的复合——若干或者全部的过滤机理同时或者相继发生。在本实验中，假如在水中存在比 PP 熔喷滤芯过滤介质孔隙大的固体颗粒时，这时介质过滤就起到作用。但是由于熔喷滤芯的独特特点，在过滤过程中滤壁的厚度范围内，整个介质的孔径分布具有不同的剃度，因此过滤的类型主要为深

层过滤。但是随着深层过滤的不断进行，介质的微孔将不断缩小，直至又出现介质过滤并且接着可能出现滤饼过滤的情形。



图 5-17 过滤前滤芯图



图 5-18 过滤后滤芯图

从上图 5-17、5-18 中可以看出，过滤后的滤芯与过滤前的滤芯相比滤芯的过滤层分布的更加明显。由于在过滤过程中大的固体颗粒总是在粗滤层阶段就被阻挡，然后是小的固体颗粒逐渐被中滤层、精滤层过滤，在图 5-18 中最外面一层黄色部分是在过滤过程中水中的铁锈杂质被过滤所形成的。

### 3.2 熔喷滤芯的过滤机理研究

在液体过滤中，液体呈层流状，有一个速度梯度—从孔壁的零速度到接近孔中心的最大值。因为微孔的形状不规则，故流动状态远比圆型通道复杂的多，这个可以用一个修正的雷诺数—布莱克数来描述，其公式如下：

$$B = \frac{6d_m u}{(1-\varepsilon)u} \quad (5-15)$$

式中： $d_m$ —过滤介质中的微粒直径；

$u$ —过滤器每单位面积的流动速率。 $B$  的常用值是 0.2。

熔喷滤芯过滤器在过滤过程中的过滤机理特别复杂，根据其微孔特性以及非织造过滤材料的性能可以认为熔喷滤芯过滤器是属于一种深度型过滤，在深度型过滤中各种微粒的捕集机理有：拦截、惯性、扩散、沉降（重力）和各种流体动力作用<sup>[6]</sup>。



### 3.2.1 拦截

如果没有其它力的作用,微粒能通过滤层随液流运动。因为滤层中的液流是层流,故液流能分开一绕过介质微粒而流动,接着又转到介质微粒的后面汇合。在任何地点,当液流中的微粒绕过介质微粒运动时,如果前者处于这样的位置:它的中心和介质微粒中心之间的距离小于他们的碰撞直径即  $(d_p + d_m)/2$  — 其中  $d_p$  是微粒的斯托克斯直径,那么拦截就发生。出现这种碰撞的概率与直径比  $d_p/d_m$  有关。



图 5-19 拦截形式

### 3.2.2 惯性

如果微粒比它悬浮其中的液体有较大的密度,它就会受到惯性力的影响;当液流的流线在介质微粒前面拐弯时,这种惯性力将使它横过流线。戴维斯<sup>[7]</sup>已经证明:此力与一个无量纲群—斯托克斯数有关,表达式为:

$$S_i = \frac{(\rho_s - \rho_f)d_p^2 \bar{u}}{18\mu d_m} \quad (5-16)$$



图 5-20 惯性形式

式中:  $\bar{u}$  是通过微孔的液体的平均速度。斯托克斯数越大,惯性力对于微粒的影响就越大。根据对于捕集到各种气体过滤器纤维上微粒的理论研究和实验研究,哈罗普和斯坦豪斯<sup>[8]</sup>得出结论:捕集效率可以与  $S_i$  和直径比  $d_p/d_m$  有密切关系。

### 3.2.3 扩散

由于悬浮流体分子的碰撞产生能量转换,使悬浮的细小微粒出现无规则的扩散运动。与这种布朗扩散有关的扩散系数  $D$  由下式给出:

$$D = \frac{KT}{3\pi\mu d_p} \quad (5-17)$$

式中:  $K$ —波耳兹曼常数;

$T$ —绝对温度。



图 5-21 扩散形式

对于环境温度下各种含水悬浮液中的微粒,如果其直径为 1 微米或者小于 1 微米,那么布朗扩散是值得注意的。

### 3.2.4 沉降

艾索和艾夫斯<sup>[9]</sup>已经证明：直径为 2~10 微米的微粒，其重力沉降速率对于快速过滤是重要的。这种作用的意义可以用斯托克斯沉降速度和微粒的接近速度相联系的无量纲群来表示：

$$S = \frac{(\rho_s - \rho_f)d_p^2 g}{18\mu u} \quad (5-18)$$

式中：S—沉降系数；  
g—重力。



图 5-22 沉降形式

### 3.2.5 流体效应

当微粒悬浮在有剪切梯度的液体中时，他们将受到使其横越液流的各种力的影响。因为各种影响相互作用，故人们对于在圆柱形微孔流动的液流中的微粒的合成运动尚未充分了解。



图 5-23 流体效应

由于增大微粒尺寸能使惯性碰撞，流体动力作用和沉降得到加强，而减少微粒尺寸会导致扩散作用的加强，故可以预料：对于这些机理，当微粒尺寸处于那些尺寸之间的一个中间值时，深度过滤的功能将显示某种最低效率。

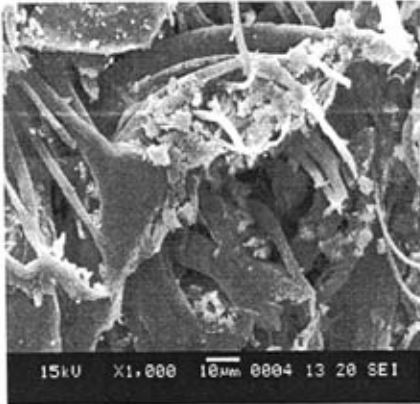


图 5-24 滤芯粗滤层断面电镜

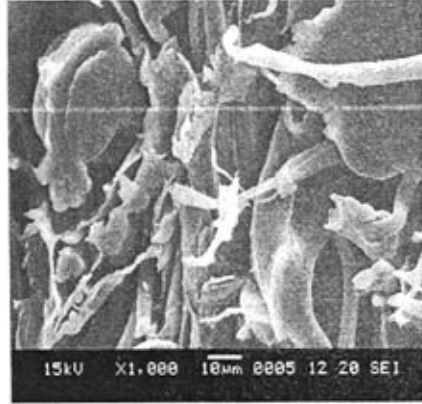


图 5-25 滤芯中滤层断面电镜

从图 5-24 中可以看出，在过滤以后的滤芯的断面结构中粗滤层断面的固体颗粒最多，很不规则的分布在整個粗滤层断面范围内，并且很多固体颗粒相互粘结在一起，主要是拦截机理在起作用；从图 5-25 可以看

出，在滤芯中滤层的断面结构中固体颗粒的含量很少，但是还是存在的，并且其直径要比粗滤层断面的固体颗粒要小；从图 5-26 中可以看出，在滤芯精滤层断面结构中固体颗粒的含量也很少。从上面电镜结构图中可以看出，分离过程只发生在介质的“内部”，当微粒直径小于在过滤介质中的微孔通道时，当微粒撞到通道壁上时

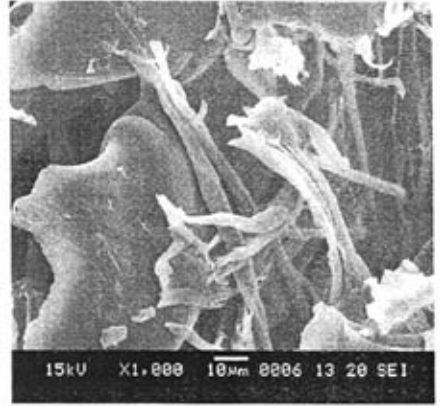


图 5-26 滤芯精滤层断面电镜

，就有可能脱离液流——能达到这一点，决定于微粒受到的惯性力包括扩散力和阻力的平衡；当微粒直径大于过滤介质的微粒通道时，阻挡作用就很明显；所以在本实验的滤芯过滤过程中起主导作用的过滤类型为深层过滤。在过滤过程中，根据微粒的大小不同，在过滤中其主导机理也就不同，在本实验中，水中的微粒直径大小有限，起主导作用的是介质对固体颗粒的拦截机理。由于实验自来水中微粒直径不可能很大，所以在过滤过程中沉降机理的作用是最小的。

### 3.3 通过熔喷滤芯壁的液流机理的研究<sup>[6]</sup>

在固液分离过程中，通过过滤层的液流是一个很重要的研究对象。很多学者对其进行过大量的研究，在 1856 年达西（Darcy）就根据对通过砂层的液流的研究，提出了一个经验关系式——现在通称为达西定律。

$$u = K' \frac{\Delta p}{L} \quad (5-19)$$

式中：u：总的流体速度  $\left[ = \frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} \right]$ ；

L：砂层厚度；

$\Delta p$ ：砂层两侧的压降；

$K'$ ：砂层和液体的特性常数；

$\theta$ ：时间；

V：时间  $\theta$  流过的液体体积；

A：砂层的横截面积；

在达西发表论文之前不久，对于通过圆形截面毛细管的液流量，泊萨伊提出了一个方程：

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta p \pi r^4}{8uL} \quad (5-20)$$

式中：r：毛细管的半径；

u：液体的粘度；

泊萨伊的方程表明：通过毛细管的液流速率与液体的粘度成反比。把这个关系式用于填充层，则达西方程可以写为：

$$u = \frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{K\Delta p}{uL}$$

式中：K：填充层的透过度；

填充层的另外两个重要参数是孔隙率  $\varepsilon$  和比表面积 S。假设一个具有单位长度和单位比表面积的填充层，含有 n 根与表面相垂直的毛细管，则泊萨伊的方程可以写为：

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{n\pi r^4 \Delta p}{8uL} \quad (5-21)$$

而对于这一特定的假设条件下的填充层：

$$\varepsilon = n\pi r^2 \text{ 以及 } S = 2n\pi r$$

所以泊萨伊方程可以简写为：

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\varepsilon^3 \Delta p}{2S^2 Lu} \quad (5-22)$$

科泽尼综合这些因素，并且把任意填充层中的微孔间隙的等效直径  $\delta$  定义为每单位内表面的空隙体积，即  $\delta = \frac{\varepsilon}{S}$ 。科泽尼根据水力直径理论，对于圆形管，把任意填充层的等效直径  $\delta$  代入泊萨伊方程，得出：

$$\bar{u} = \frac{\delta^2 \Delta p}{K' u L'} \quad (5-23)$$

式中： $\bar{u}$ ：流过微孔的液体平均流速；

$K'$ ：表征填充层结构的无量纲常数；

L：微孔长度；

再根据杜普伊特 (Dupuit)、皮里 (Pirie)、库尔森 (Coulson) 和理查德森 (Richardson) 德研究以及论证可以得到著名的科泽尼-卡曼 (Kozeny-Carman) 方程:

$$K'' = \frac{1}{u} \frac{\varepsilon^3}{S^2} \frac{\Delta P}{uL} \quad (5-24)$$

式中  $K''$  为常数, 其值的取决于微粒的形状和尺寸以及滤层的充填物; 在科泽尼-卡曼 (Kozeny-Carman) 方程中, 透过度与某个由水力半径确定的等效微孔的直径有关, 修正的科泽尼-卡曼 (Kozeny-Carman) 方程可以被广泛的应用和探讨, 但是液存在着某些不足, 今年来也有大量的学者对其进行研究, 但是大部分都是在科泽尼-卡曼 (Kozeny-Carman) 方程的基础上进行的, 如: 斯卡利特就通过对不规则微孔的几何形状进行立体逻辑描述, 得到了一个关于层流得方程, 该方程给出得科泽尼-卡曼常数值是  $\frac{\pi^2}{2}$ , 非常接近对不规则微粒充填层的测量值—5。

### 3.4 熔喷滤芯的过滤方向的研究

在对熔喷滤芯进行实验测试的时候 (实际使用中也是一样), 液流是从装置的底端向上进入一个密封底装置中, 然后液流通过熔喷滤芯后, 过滤后液体通过滤芯空腔进入一个导管装置从而完成整个过滤的过程。但是液流的进入方向不一样都会影响到滤芯的使用寿命, 因此下面对液流和过滤的方向进行分析, 可以分为下面两种情况来说明。

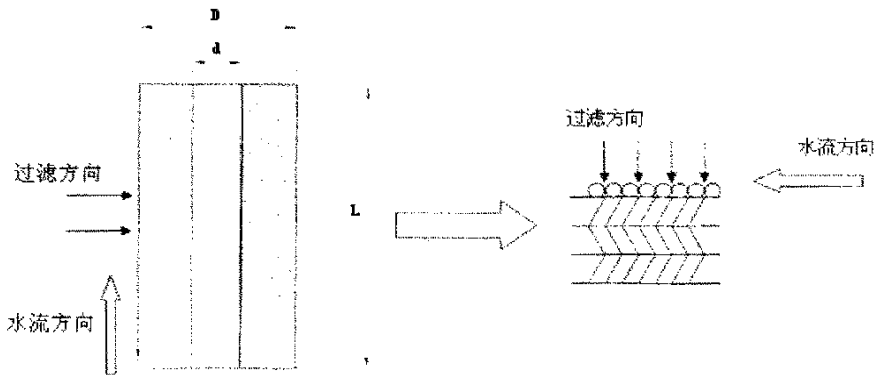


图 5-27 过滤方向与水流方向垂直

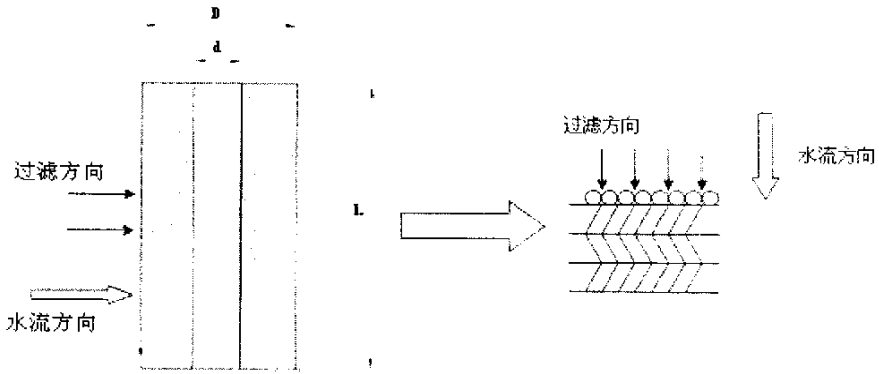


图 5-28 过滤方向与水流方向平行

上图中右侧均是滤芯壁的剖面图结构。在图 5-27 中可以看出，过滤方向和水流方向是垂直的也即是 Cross-Flow 过滤方式，因此在过滤过程中水流对滤芯壁的流体作用力只是沿着过滤方向的一个分作用力  $F_{分}$ ；而在图 5-28 中所示，过滤方向和水流方向是平行的，因此在过滤过程中水流对滤芯壁的流体作用力是整个流体的作用力  $F_{总}$ ；由于熔喷滤芯壁是一个由聚合物经过高温熔融后经过高速气流作用而在特殊的接收装置上成型的纤维组成，因此滤芯壁是一个具有一定程度的蓬松结构，当在外力作用下，滤芯壁会产生一定的压缩。在过滤过程中假设流体的流量相同也即流体总作用力相同，上面两种情况的受力  $F_{分} < F_{总}$ ，也就是在过滤过程中流体对滤芯壁的作用力过滤方向与流体方向相垂直的要比过滤方向与流体方向相水平的小，这样对滤芯的具有密度剃度结构的破坏性就不大，滤芯壁就不会在高度压缩的情况下工作，因此过滤方向与流体方向相垂直的过滤方式要比过滤方向与流体方向相平行方式的使用寿命要长。在实际使用中过滤方向与流体方向应该是属于上图 5-27 所示，因此这种过滤方式的使得熔喷滤芯具有更长的使用寿命。

#### 第四节 本章小节

通过大量的实验测试以及对实验测试数据的直观分析和方差分析可以得出以下结论：

- 1、在实验中对熔喷滤芯（立体成型）的压降—流量的特性表征方法进行研究，发现应用 Matlab 软件对实验数据进行直线拟合得出的直线斜率值是对滤芯的压降—流量特性的一个很好的表征值。

- 2、实验分析发现，每个过滤层的纤网层数在实验的分析范围内变化，对实验的结果影响不大；而每个过滤层的接收距离的变化会对每个过滤层的纤网密度和孔径值产生变化，因此对实验的结果有很大的影响；螺杆转速的变化很大程度上影响纤维的细度变化，因此对实验的结果也有很大的影响。
- 3、通过多因子的直观分析以及方差分析，得出最佳的实验工艺参数为：精滤层的接受距离：260mm、精滤层的层数：4、中滤层的接受距离：290mm、中滤层的层数：16、粗滤层的接受距离：400mm、粗滤层层数：6、螺杆转速：91rpm。并实验对其进行验证，发现和预测的结果具有很高的一致性。
- 4、通过对熔喷滤芯的过滤机理分析，发现熔喷滤芯的过滤机理并不是一种单纯的机理起作用，而是多种过滤机理同时对熔喷滤芯过滤产生作用，但是根据实验的水质条件在实验中起主导作用的是拦截机理；在过滤类型中也不是一种单纯的过滤类型在其作用，而是多种过滤类型共同起作用，但是起主导作用的是深层过滤。
- 5、根据实验测试条件以及实际中熔喷滤芯（立体成型）的使用条件进行分析，流体方向与过滤方向垂直时的使用寿命要比流体方向与过滤方向相平行时要长。

#### 参考文献：

- 【1】 Hong Yin, ZanYao and Randall R. Bresee, Experimental Study of the Meltblowing Process, International Nonwovens Journal, Spring, 1999;
- 【2】 柯勤飞 靳向煜 主编 非织造学 东华大学出版社 2004 288;
- 【3】 庄楚强, 吴亚森编, 应用数理统计基础, 华南理工大学出版社, 1999;
- 【4】 中国科学院数学研究所统计组编, 方差分析, 科学出版社, 1977;
- 【5】 吴贵生, 试验设计与数据处理, 北京冶金工业出版社, 1997;
- 【6】 克莱德·奥尔 编 过滤理论与实践 国防工业出版社 1982 4;
- 【7】 C.N.Davies, Proc. Inst. Mech. Eng., B, I, 1952 185;
- 【8】 J. A. Harrop and J. I. T. Stenhouse, Chem. Eng. Sci., 24, 1475 1969;
- 【9】 C. R. Ison and K. J. Ives Chem. Eng. Scin., 24 717 1969

## 第六章 结 论

本研究采用的纤维级聚丙烯（PP）聚合物是上海石化生产的，牌号为 Y2600T。本文对熔喷滤芯材料 PP 聚合物的一些实验性能进行研究，根据这些性能的研究可以确定生产滤芯的实验工艺参数；在实验初期根据滤芯结构的特殊性，对实验设备进行了必要的改进；在实验过程中，考虑到滤芯是一个具有密度和孔径制度的结构，因此在实验中对熔喷纤网的性能进行大量的实验研究；根据多因子分析熔喷滤芯的结构和性能的关系，并且根据工程最优方法分析得出最佳的实验工艺参数，并进行实验验证。

通过实验研究以及对大量的实验数据进行分析可以得出以下结论：

- 1、本实验用 PP 聚合物熔体的剪切应力均随剪切速率的增大而增大，剪切粘度则随剪切速率的增大而减小，是典型的切力变稀流体，属于假塑性流体。且非牛顿指数 0.43247 和 1 相比相差比较大，因此本实验用 PP 聚合物是典型的非牛顿流体。
- 2、在 DSC 分析中本实验用 PP 聚合物吸热开始于 157.25℃，结束于 176.36℃，峰值在 170.39℃的位置，而这也是聚合物的熔点所在，了解聚合物的熔点温度是生产熔喷滤芯控制工艺温度的一个重要的参数。通过对熔喷前后材料进行 X 衍射分析得出，熔喷后非织造纤维材料的结晶度 60.7% 比熔喷前材料的结晶度 57.4% 要高，是因为聚合物在实验过程中收到高速气流的拉伸作用，从而对纤维材料的结晶度产生影响。
- 3、在接收距离、纤网接收层数不变的情况下，随着螺杆转速的增加，熔喷纤网的孔隙率、纤维的细度、纤网的孔径值均增加，而纤网的密度却随之减小；在螺杆转速、纤网接收层数不变的条件下，随着接收距离的增加，熔喷纤网的孔隙率、孔径值随着增加，而纤维的细度、纤网的密度却随之减小，纤维细度的减小幅度在本实验的接收距离范围内表现得很细微。
- 4、实验分析发现，每个过滤层的纤网层数在实验的分析范围内变化，对实验的结果影响不大；而每个过滤层的接收距离的变化会对每个过滤层的纤网密度和孔径值产生变化，因此对实验的结果有很大的影响；



螺杆转速的变化很大程度上影响纤维的细度变化，因此对实验的结果也有很大的影响。

- 5、通过多因子的直观分析以及方差分析，得出最佳的实验工艺参数为：精滤层的接受距离：260mm、精滤层的纤网层数：4、中滤层的接受距离：290mm、中滤层的纤网层数：16、粗滤层的接受距离：400mm、粗滤层的纤网层数：6、螺杆转速：7.0rpm。最佳工艺参数的结果理论值以及实验结果测试值见下表：

项目	浊度效率%	通量 $m^3$	压降—流量	孔径值 $\mu m$	孔隙率%
理论值	94.149	8.8693	0.1788	0.6811	78.8487
测试值	93.246	9.028	0.1693	0.7426	79.7864

- 6、通过对熔喷滤芯的过滤机理分析，发现熔喷滤芯的过滤机理并不是一种单纯的机理在起作用，而是多种过滤机理同时对熔喷滤芯过滤产生作用，但是起主导作用的是拦截机理；在过滤类型中也不是一种单纯的过滤类型在其作用，而是多种过滤类型共同起到作用，但是起主导作用的是深层过滤。

- 7、对 Shambaugh 模型进行研究，发现在 Shambaugh 模型中其将熔体视为牛顿流体来进行考虑，但是在本课题的研究中聚合物的牛顿指数是一个和 1 相差很大的数值，是典型的非牛顿流体。在 Shambaugh 模型中

的熔体本构方程为  $\tau^{zz} = 2\eta \frac{dv_{fz}}{dz}$ 、 $\tau^{xx} = -\eta \frac{dv_{fz}}{dz}$ ，改进后的熔体本构

方程为  $\tau^{zz} = 2\eta \left( \frac{dv_{fz}}{dz} \right)^m$ 、 $\tau^{xx} = -\eta \left( \frac{dv_{fz}}{dz} \right)^m$ 。通过实验对改进前的模型

与改进后的模型进行实验拟合发现，改进后的模型对本课题的实验材料具有很好的拟合性。

## 致 谢

本论文是在靳向煜副教授的悉心指导下完成的。靳老师敏锐的洞察力、乐观向上的心态及严谨的治学态度给我留下深刻的印象。在论文实验阶段，靳老师给我提出了很多建设性的意见，特别是在我的论文遇到困难的时候，正是靳老师对学术的态度和精神激励着我、引导着我，我才能完成这篇论文，在此表示深深的谢意！

在本论文的实验过程中，得到了东华大学非织造研究发展中心的黄健华老师、吴海波老师和殷保璞老师的热情指导和支持，在此也向他们表达我最诚挚的谢意。

最后还要感谢我的家人以及我的朋友、同学，正是在他们的关心和支持下我才得以顺利完成我的硕士研究生学业。

## 攻读学位期间发表的学术论文：

- 1、饶剑辉，靳向煜. 负离子纤维在非织造领域的应用. 北京纺织. 2003 (3);
- 2、饶剑辉，靳向煜，张静峰. 纺粘水刺与浆粕复合非织造布的性能初探. 非织造布. 2005 (1);
- 3、张静峰，靳向煜，饶剑辉. 浆粕及木浆纸水刺非织造布的结构与性能. 纺织学报. 2005 (4) .