



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材
纺织科学与工程一流学科建设教材

非织造材料 及其应用



FEIZHIZAO CAILIAO
JI QI YINGYONG

王 洪 靳向煜 吴海波 编著



中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材
纺织科学与工程一流学科建设教材

非织造材料及其应用

王 洪 靳向煜 吴海波◎编著



中国纺织出版社有限公司

内 容 提 要

本书首先从应用要求、来源和结构性能等角度对非织造材料常用纤维原料进行分类并介绍,再从宏观和微观角度对非织造材料的结构特征进行介绍,以期使读者能够区分鉴别不同非织造材料样品的成网和加固工艺。最后按照应用领域,分别介绍了过滤用非织造材料、非织造基电池隔膜、医疗卫生用非织造材料以及车用、土工、建筑和农用等产业用非织造材料的结构性能、成网和加固工艺及发展趋势。

本书可作为高等院校非织造材料与工程专业本科生的专业教材,也可供非织造行业的工程技术人员和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

非织造材料及其应用 / 王洪, 靳向煜, 吴海波编著

— 北京: 中国纺织出版社有限公司, 2020.7

“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材. 纺织科学与工程一流学科建设教材

ISBN 978-7-5180-7462-4

I. ①非… II. ①王… ②靳… ③吴… III. ①非织造织物—高等学校—教材 IV. ①TS17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 085246 号

责任编辑: 孔会云 责任校对: 寇晨晨 责任印制: 何 建

中国纺织出版社有限公司出版发行

地址: 北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码: 100124

销售电话: 010 — 67004422 传真: 010 — 87155801

http: //www.c-textilep.com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 http: //weibo.com/2119887771

北京密东印刷有限公司印刷 各地新华书店经销

2020 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 12.75 插页: 2

字数: 228 千字 定价: 52.00 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 |

非织造材料作为主要的产业用纺织品，近十多年来一直保持两位数的增长，我国许多高等院校也相继开设了非织造材料与工程专业。但由于这一新兴学科教师和专业人才匮乏，目前相关的教材和书籍较少。本书是作者基于在非织造领域多年的研究与教学经验，结合当前非织造行业的最新发展，并在查阅大量参考文献基础之上编写而成。其中，部分技术仅处于实验室阶段，可以开拓在校本科生和研究生的专业视野，也有助于非织造行业的工程技术人员和管理人员参考使用。

非织造材料应用领域广泛，本书无法全部概览，特别是服用衬布和包装材料等。部分关于市场和终端应用的数据和案例来源于公开报道，可能在学术上缺少严谨性，请读者见谅。

在本书成稿过程中，东华大学张月、卢晨、左文静、吴燕金、高宇剑和杨煦等研究生对本书的资料收集、内容修订、绘图和文献校对做了大量的工作；本书成果也离不开东华大学非织造研究发展中心多年来的一贯支持，东华大学纺织学院对本书的出版提供了经费支持，在此一并表示感谢。

本书部分图片来自2020年初新型冠状病毒肺炎疫情的前方报道，谨以此致敬那些战斗在疫情一线默默无闻的英雄们。

本书主要写作期间，正是新冠肺炎疫情形势最为严峻时期，每天都在紧张、焦虑和不安中度过。“百无一用是书生”，本人无法在一线抗击疫情，谨将自己在非织造领域积累的一点经验与大家分享，通过读者将科技转化为生产力，推动我国非织造行业的创新发展。

王洪

2020年4月5日

| 目 录 |

第1章 非织造材料结构特征和所用纤维原料	1
1.1 前言	1
1.2 非织造材料常用纤维	2
1.2.1 概述	2
1.2.2 高温烟尘过滤用纤维	2
1.2.3 医疗卫生用常见纤维	13
1.2.4 生物质纤维	16
1.2.5 异形纤维	17
1.2.6 天然纤维素纤维	19
1.3 非织造材料的结构特征	22
1.3.1 概述	22
1.3.2 水刺非织造材料	22
1.3.3 针刺非织造材料	24
1.3.4 纺粘非织造材料	25
1.3.5 熔喷及其复合非织造材料	27
1.3.6 热轧非织造材料	30
1.3.7 热风非织造材料	32
1.3.8 湿法成网非织造材料	32
1.3.9 闪蒸纺非织造材料	34
1.3.10 覆膜非织造材料	35
参考文献	37
第2章 过滤用非织造材料	39
2.1 前言	39
2.1.1 概述	39
2.1.2 非织造过滤材料的分类	39
2.1.3 常见非织造过滤材料成形工艺技术	41

2.1.4	过滤材料性能评价	42
2.2	空气净化与个体防护材料	44
2.2.1	概述	44
2.2.2	空气过滤机理	44
2.2.3	驻极机理和驻极方法	49
2.2.4	驻极工艺技术研究现状	52
2.2.5	空气净化和个人防护材料产品分类	54
2.3	工业烟尘过滤—袋式除尘过滤材料	62
2.3.1	概述	62
2.3.2	常见工业烟尘过滤工况简介	63
2.3.3	袋式除尘器结构及过滤除尘机理	66
2.3.4	新型工业烟尘过滤材料及工艺技术	70
2.3.5	过滤材料发展趋势	78
2.4	液体过滤材料	79
2.4.1	概况	79
2.4.2	液体过滤机理	80
2.4.3	典型液体过滤材料	82
2.4.4	液体过滤前景与展望	86
	参考文献	87
第3章	非织造基电池隔膜	90
3.1	前言	90
3.1.1	概述	90
3.1.2	充电电池	90
3.1.3	燃料电池	92
3.1.4	电池隔膜	93
3.2	镍氢电池隔膜	94
3.2.1	镍氢电池	94
3.2.2	电池隔膜	94
3.2.3	镍氢电池隔膜的非织造成形工艺技术	96
3.2.4	镍氢电池隔膜的亲水改性	98
3.3	锂离子电池隔膜	104
3.3.1	概述	104
3.3.2	电池	105
3.3.3	锂离子电池隔膜	106
	参考文献	114

第4章 医疗卫生用非织造材料	116
4.1 前言	116
4.1.1 概述	116
4.1.2 医疗卫生用非织造材料的分类	116
4.1.3 常见医疗卫生用非织造材料	117
4.1.4 医疗卫生用非织造材料的性能评价指标	117
4.2 敷料	117
4.2.1 概述	117
4.2.2 基于“伤口湿性愈合理论”的新型敷料特性	119
4.2.3 新型敷料	120
4.3 阻隔防护非织造材料	122
4.3.1 概述	122
4.3.2 阻隔防护非织造材料的分类	122
4.3.3 阻隔防护非织造材料的成形工艺技术	125
4.3.4 新型非织造阻隔防护材料	127
4.3.5 阻隔防护产品标准	129
4.4 纸尿裤	131
4.4.1 概述	131
4.4.2 纸尿裤结构性能及新型工艺技术	132
4.4.3 产品标准	138
4.5 非织造擦拭材料	139
4.5.1 概述	139
4.5.2 非织造擦拭材料的分类及性能要求	140
4.5.3 常见擦拭材料	141
4.6 面膜	145
4.6.1 概述	145
4.6.2 面膜分类和基布性能要求	146
4.6.3 面膜基布研究开发现状	146
参考文献	149
第5章 其他产业用非织造材料	151
5.1 前言	151
5.2 农用麻纤维非织造材料	151
5.2.1 麻纤维性能	151
5.2.2 农用非织造材料	152
5.3 车用非织造材料	157

5.3.1	概述	157
5.3.2	车用吸声隔声非织造材料	158
5.3.3	车用非织造过滤材料（空调过滤器、发动机滤清器）	162
5.3.4	其他车用非织造材料	163
5.4	建筑用非织造材料	165
5.4.1	概述	165
5.4.2	墙纸（壁纸）	166
5.4.3	保温和吸声建筑材料	167
5.4.3	屋顶防水卷材胎基布	170
5.5	土工合成材料	170
5.5.1	概述	170
5.5.2	土工合成材料的作用	171
5.5.3	土工合成材料分类及特性	173
5.5.4	土工合成材料的应用	174
5.6	超细纤维合成革基布	176
5.6.1	概述	176
5.6.2	天然皮革结构	177
5.6.3	超细纤维合成革基布结构	178
5.6.4	超细纤维开纤机理	179
5.6.5	超细纤维合成革研究现状	182
5.7	防刺非织造材料	183
5.7.1	概述	183
5.7.2	防刺服产品标准和成形工艺技术简介	184
5.7.3	超高分子量聚乙烯纤维（UNMWPE）非织造防刺材料	185
5.7.4	剪切增稠液体防刺工艺技术	186
5.8	其他小众应用非织造材料	186
5.8.1	微孔膜支撑材料	186
5.8.2	吸油材料	188
5.8.3	吸水非织造材料	189
5.8.4	重金属吸附材料	189
	参考文献	191

第1章 非织造材料结构特征和所用纤维原料

1.1 前言

非织造材料又称无纺布、非织造布、非织造织物或无纺布，它是将定向或随机排列的纤维通过机械缠结、热熔黏合或者化学作用而制成的纤维集合体。非织造材料是产业用纺织品的重要组成部分，被誉为纺织工业中的“朝阳产业”。鉴于非织造工业的持续快速发展和广泛应用，国际标准化组织于2019年重新定义了非织造材料，认为它是一种通过物理或者化学手段赋予其所需结构、性能和/或功能的以平面状为主、但除机织物、针织物和纸张以外的工程纤维集合体（ISO 9092：2019）。

非织造材料具有工艺流程短、产量高、成本低等优点，是全球纺织行业中成长最迅速、创新最活跃的领域之一。非织造材料广泛用作医疗卫生用材料及制品、土工与建筑用材料及制品、过滤与分离用材料及制品、汽车用非织造、包装材料、结构增强用材料、各类鞋材、擦拭布等，其中妇女卫生巾、婴儿纸尿裤、手术衣等一次性用品的用量非常大。

2019年全球范围内对非织造材料继续保持旺盛的需求，全年行业规模以上企业的非织造材料产量达到503万吨，同比增长9.9%。2019年，我国产业用纺织品行业规模以上企业（非全口径）实现主营业务收入2359.3亿元，同比增长1.2%，利润总额为118.8亿元，同比下降4.3%，企业的平均利润率为5.9%，较上年同期降低0.3个百分点。其中，过滤、土工、安全防护、交通和复合材料等产业用纺织品的主营业务收入增长3.7%，利润总额降低1.7%，毛利率和利润率分别达到16.1%和7.2%，在行业内处于领先水平。

2019年，我国出口产业用纺织品价值273.4亿美元，同比增长2.1%，进口67.3亿美元，同比下降5.7%。从主要产品市场看，产业用涂层织物、非织造材料以及毡布/帐篷是排名前三的出口产品，出口额分别增长0.4%、5.4%和2.7%，占产业用纺织品总出口额三成以上。其中，非织造材料的出口量为105.1万吨，同比增长9.1%，而产业用涂层织物和毡布/帐篷的出口量则分别下降3.2%和1.2%。一次性卫生用品的出口继续保持活跃，出口额和出口量分别较上年同期大幅增长16%和18.8%。

纺织工业作为世界各国工业化先导产业，在解决就业、发展经济、促进贸易等方面具有重要的地位。当前世界正面临百年未有之大变局，全球科技突破正加速改变一切，经济力量发生着历史性变化，发展动能深度调整，世界多极化、经济全球化深入发展，全球产业分工格局正在重塑。新中国成立70年来，纺织工业沐风栉雨，砥砺前行，始终保持支柱产业地位不动摇。作为带动纺织行业转型升级和结构调整的重要力量之一，我国产业用纺织品行业步

入战略发展的快车道，技术进步成效显著。

本章将围绕非织造材料常用纤维、非织造结构及其鉴别方法展开讨论，为本书后面几章非织造材料的具体应用提供先导知识支撑。

1.2 非织造材料常用纤维

1.2.1 概述

广泛用于医疗卫生、土工建筑、过滤分离等领域的非织造材料，其主要性能包括力学性能、过滤和阻隔性能、吸液性、耐温性、耐化学腐蚀性等，虽然说可以通过成网和加固工艺的优化得到不同力学性能、过滤和阻隔性能的非织造材料，但其化学性能和耐温性能等则是由所用纤维的自身特性所决定。在力学性能方面，可以用纤维强度利用系数来反映纤维和由其制成的非织造材料强力之间的关系。纤维强度利用系数 K 的计算公式如下所示：

$$K = \frac{\sigma_p}{\sigma_b \cdot m} \times 100\%$$

式中： K 为纤维强度利用系数； σ_p 为非织造材料的强度； σ_b 为单纤维强度； m 为通过非织造材料 1cm^2 截面的纤维根数。

通常，黏合法非织造材料的纤维强度利用系数不超过20%，针刺法非织造材料的纤维强度利用系数可达30%，而普通机织物的纤维强度利用系数高达40%~50%。可见，相对于传统机织物，非织造材料的成形工艺对其力学性能的影响更大。

另外，相对于机织和针织等传统纺织工艺，非织造材料成形工艺的纤维适应面广，传统纺织品所用纤维都可以用于成形非织造材料。像工艺黄麻纤维和木棉纤维等太粗和太短的纤维难以纺纱，无法采用机织和针织工艺成形，通常只能加工成非织造材料。另外，由于医疗卫生、过滤等产业用非织造材料的特殊应用工况和性能要求，只能采用非织造专用纤维。因此，本节将重点介绍非织造材料专用纤维。

据统计，短纤维成网加固非织造材料所用纤维原料中，丙纶占20%，涤纶占22%，双组分纤维占3%，黏胶纤维占7%，剩余为其他品种纤维。另外，纺粘和熔喷非织造材料中，聚丙烯占69%，聚对苯二甲酸乙二醇酯占19%，聚乙烯占10%，其他占2%。但是，由于纺粘和熔喷非织造材料是采用聚合物树脂切片为原料，本节对树脂性能不做介绍。

由于本节涉及的纤维品种多，现根据应用、纤维来源和截面结构等，将其分为高温烟尘过滤用纤维、医疗卫生用纤维、天然纤维、异形截面纤维等几种。

1.2.2 高温烟尘过滤用纤维

在国家环保政策的推动下，工业烟尘高温过滤材料行业继续保持快速增长，尤其是耐

热、耐腐高端过滤材料市场发展迅猛，自 2005 年以来，我国相继自主研发成功间位芳纶、芳砜纶、聚苯硫醚纤维、聚四氟乙烯纤维、聚酰亚胺纤维等高性能纤维，极大地提高了我国环保治理能力，使我国的空气质量得到了根本好转。目前，国产苯硫醚纤维、聚四氟乙烯纤维、聚酰亚胺纤维及芳纶的质量已经接近国外先进水平，具有很强的市场竞争力。

下面分别介绍高温烟尘过滤常用聚四氟乙烯纤维、聚酰亚胺纤维、芳香族聚酰胺纤维、芳砜纶、聚苯硫醚纤维和亚克力纤维等。

1.2.2.1 聚四氟乙烯（PTFE）纤维

PTFE 的介电常数和介电损耗低，是电线电缆的理想绝缘包覆材料。PTFE 纤维化学稳定性好，耐高温（熔点 327℃）、耐酸碱化学腐蚀、耐候（耐紫外线）、抗老化以及阻燃性等优良性能，在环保、航空航天、军工国防、机械、电子、化工、医疗、纺织、建筑等各个领域得到了广泛应用，是高温烟尘过滤领域的理想纤维。

没有合适的溶剂能够溶解 PTFE 树脂，所以 PTFE 纤维不是采用溶液纺丝法生产的。又因为 PTFE 熔体的黏度很高（350℃时黏度为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ），将其加热至 415℃时仍不能转变为黏流态，所以也不能采用熔体纺丝的方法将其加工成纤维。现今制备 PTFE 纤维的方法主要有膜裂纺丝法、糊料挤出纺丝法和乳液纺丝法三种，其中膜裂法是非织造材料用 PTFE 纤维的主要生产方法。三种纺丝方法的优缺点和主要生产厂商信息如表 1-1 所示。从表 1-1 可以看出，膜裂法、乳液纺丝法和糊状挤出法各有优缺点，所制备的 PTFE 纤维形态和性能也有所不同。

20 世纪 90 年代，Lenzing 公司采用拉伸 PTFE 薄膜的膜裂法制备了平均线密度为 2.6dtex 的 PTFE 短纤维，用于耐高温针刺非织造材料的加工。该公司同时生产了线密度为 440dtex 的膜裂法 PTFE 长丝，用于针刺非织造材料的增强机织基布。而线密度为 1350dtex 的三合股 PTFE 长丝缝纫线则用于耐高温针刺过滤袋的缝制。膜裂法 PTFE 纤维的表面和截面结构如图 1-1 所示。

表 1-1 PTFE 纤维制备方法对比及国内外生产商信息

纺丝方法	技术特点	纤维特点	国外主要生产商	国内主要生产商
膜裂法	先加工薄膜，然后分切、拉伸、加捻	长丝，强度高，均匀性差，细度大	美国戈尔、奥地利 Lenzing	浙江格尔泰斯、上海金由氟材料、台湾宇明泰
	先加工薄膜，然后拉伸、开纤、卷曲	短纤，强度中等，均匀性差，细度偏大	美国戈尔、奥地利 Lenzing	浙江格尔泰斯、上海金由氟材料、台湾宇明泰
乳液纺丝	载体纺丝、热处理、拉伸、切断	短纤，强度偏低，均匀性好，细度中等	日本东丽	常州兴诚、南京 3521
	载体纺丝、热处理、拉伸	长丝，强度偏低，均匀性好，细度中等	日本东丽	
糊状挤出	PTFE 糊料直接挤出	纤维较粗，细度均匀，单丝为主	美国戈尔	上海灵氟隆

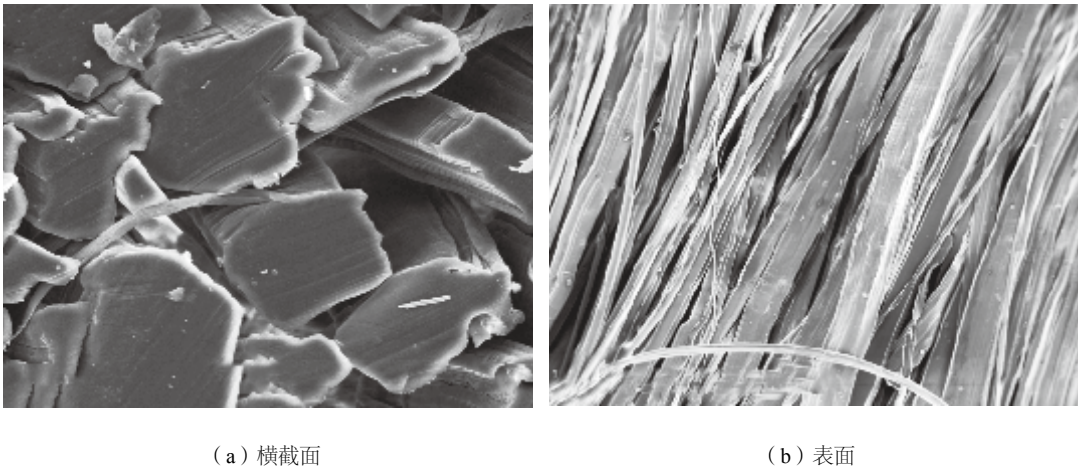


图 1-1 膜裂法 PTFE 纤维的横截面和表面电镜图

由图 1-1 可见，膜裂法 PTFE 纤维为扁平状且表面不光滑，用作过滤材料时可以增加纤维的比表面积，提高了纤维对于粉尘的拦截效果。但由其制成的针刺非织造过滤材料密度较高，纤维间难以相互缠结，强力较低。可以经受持续 250℃、瞬时 280℃ 的高温过滤工况，适合在各种炉窑特别是电力燃煤锅炉、垃圾焚烧炉上使用，寿命一般在 4 年以上，但产品价格较贵。其缺点是纤维在梳理过程中容易产生静电，纤网均匀性差。另外，由于 PTFE 聚合物分子间的作用力较弱，纯 PTFE 纤维在外力作用下会发生明显的蠕变或冷流现象，影响滤袋在长期使用中的尺寸稳定性，一般需要有基布增强。

表 1-2 为膜裂法 PTFE 纤维的物理机械性能。由于膜裂法 PTFE 纤维制备过程环保、加工效率高，可以生产不同细度的长丝和短纤维，制品力学性能可控度较高，目前产量最大。

表 1-2 PTFE 纤维特性一览表

项目	指标
线密度 / dtex	$(3.52 \pm 0.33) [(3.2 \pm 0.3) \text{旦}]$
断裂强度 / $(\text{cN} \cdot \text{dtex}^{-1})$	≥ 2.5
断裂伸长率 / %	≤ 23
干热收缩率 / %	≤ 3
卷曲个数 / 25mm	6~12
耐磨性 / %	1.07
LOI / %	94

糊料挤出纺丝法一般是将 PTFE 粉未经筛选后与易挥发的润滑助剂（如煤油、石油醚等）均匀混合，调制成糊状物，将其加压得到预制胚，然后在 15~20MPa 的压力下使胚料从一个模孔狭长的喷头中挤出，即得到单丝，经高温烧结使润滑助剂挥发，再进行拉伸，就可得到

PTFE长丝。或者将糊状物由模头挤出，制成薄膜或细条，通过压轧工序去除润滑助剂得到PTFE薄膜，再经纵向切割、拉伸得到PTFE纤维。糊料挤出法主要用于制备PTFE长丝，此方法所得PTFE纤维强度较高，通常用于高强的机织布的经纬纱、缝纫线和单丝等。糊状挤出法PTFE纤维力学强力较高，但加工效率偏低，一般用于制备特殊用途和性能要求的PTFE单丝，产量较低。

乳液纺丝法包括干法纺丝、湿法纺丝和静电纺丝，常以纤维素、聚乙烯醇或聚丙烯腈为载体。一般将PTFE粉末和载体混合均匀后进行溶液纺丝，所制得的初生纤维经380~400℃的高温烧结，去除载体，即得到PTFE超细纤维，纤维强度较高。目前该方法较为成熟，缺点是载体用量较大、损耗多，且纺丝原液不太稳定。乳液纺丝PTFE长丝目前主要由日本东丽公司生产，可用于增强基布、缝纫线和填料密封，长丝强度和膜裂法长丝相比稍低一些。

PTFE纤维具有极强的耐高温特性和优良的耐化学稳定性，在高温和腐蚀性过滤工况下的使用寿命长，特别适合垃圾焚烧等高温腐蚀性烟尘的过滤，图1-2是PTFE纤维针刺非织造过滤材料的电镜照片。但在制备纯PTFE针刺非织造过滤材料时，需要从工艺技术和装备上解决PTFE纤维在开松和梳理过程中的摩擦静电问题。另外，还可将PTFE纤维与芳纶、聚苯硫醚、玻璃纤维等混合后制成针刺非织造过滤材料，部分解决纯PTFE纤维成网均匀性差的问题，还可以协同发挥各种纤维的优点。

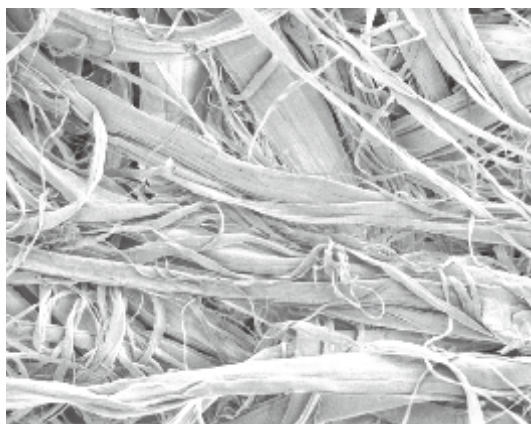


图1-2 PTFE纤维针刺非织造材料

1.2.2.2 聚酰亚胺纤维（P84纤维和铁纶）

聚酰亚胺是指主链上含有酰亚胺（ $-\text{CO}-\text{N}-\text{CO}-$ ）重复结构单元的一类聚合物，通常是通过缩合聚合而成。聚酰亚胺纤维呈金黄色，纤维具有突出的耐高温性、难燃性、电绝缘性和耐辐照性，长期使用温度为230℃，瞬时温度260℃，纤维受热时不会产生熔滴。不同公司生产的聚酰亚胺采用的单体不尽相同，其聚酰亚胺聚合物的结构也不同。奥地利赢创（Evonik）公司生产的聚酰亚胺纤维俗称P84纤维，纤维的大分子结构式如图1-3所示，纤维

截面结构如图 1-4 所示。

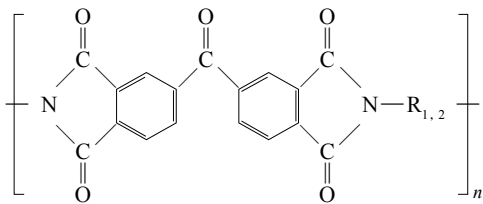


图 1-3 赢创公司生产的聚酰亚胺纤维的分子结构式

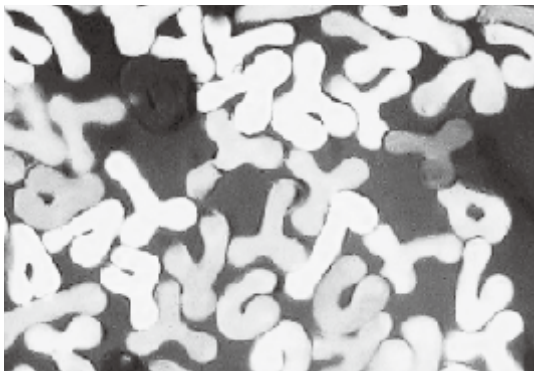


图 1-4 赢创公司生产的聚酰亚胺纤维的截面结构

P84 纤维截面为不规则的三叶瓣形，与常见的圆形截面纤维相比，P84 纤维具有更大的比表面积，可以有效地捕集颗粒，过滤效率高（比其他纤维高 15%~20%）。同时，过滤时粉尘不容易渗透，滤袋表面粉尘的剥离性能好，适合用于水泥厂、热式焚化炉、钢铁高炉等烟尘浓度高的过滤工况。P84 纤维的物理化学性能如表 1-3 所示。

表 1-3 P84 纤维的物理化学性能

性能	指标
密度 / (g·cm ⁻³)	1.41
断裂强度 / (cN·dtex ⁻¹)	3.5~4
回潮率 / %	4.5
玻璃化温度 / °C	280
安全使用温度 / °C	230
LOI / %	36~38
耐化学腐蚀性	好
耐酸性	中

P84 纤维的价格昂贵，因而通常将其与玻璃纤维或其他耐高温纤维混合后制成针刺非织

造过滤材料。有报道称,当玻璃纤维的含量在10%左右时,不仅产品原有性能没有发生太大改变,其耐磨性反而有所提高。

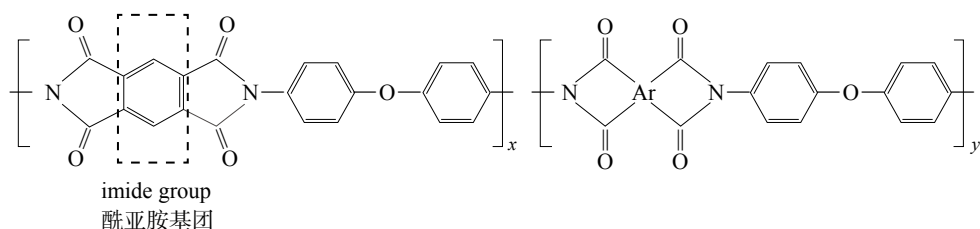


图1-5 铁纶的分子结构式

国产聚酰亚胺纤维生产企业中,较为知名的是长春高琦聚酰亚胺材料有限公司,其产品的商品名称为铁纶,分子结构式如图1-5所示。

另外,铁纶具有圆形横截面,纤维线密度可达1dtex,热收缩率小。有文献将该纤维与P84纤维做了对比分析,发现该纤维的静态、动态力学性能皆优于P84纤维,且长期使用温度要高于P84纤维。另外,该纤维的价格低于P84纤维,近几年在国内高温过滤材料领域得到了较好的应用。

聚酰亚胺纤维的耐酸、抗水解性能稍差,适合在低含硫量的炉窑烟气处理工况使用。但其抗氧化性能比聚苯硫醚纤维好。聚酰亚胺纤维常与PTFE纤维、玻璃纤维等混合制成针刺非织造高温过滤材料。其中,商品名为氟美斯(FMS)的高温过滤材料,就是将玻璃纤维与聚酰亚胺纤维混合而成,该过滤材料中纤维间高效缠结,适用于过滤风速较高的特殊工况。PTFE纤维混合20%聚酰亚胺纤维的针刺非织造材料,适用于石油焦玻璃生产时的烟气过滤。

1.2.2.3 芳香族聚酰胺纤维(芳纶)

芳香族聚酰胺纤维是以芳香族单体为原料,经缩聚后形成大分子主链中含有芳香酰胺重复结构单元的聚合物,再经纺丝制得的合成纤维。根据酰胺键在苯环上的相对位置,可以进一步将芳纶分为聚间苯二甲酰间苯二胺纤维(简称间位芳纶或芳纶1313)和聚对苯二甲酰对苯二胺纤维(简称对位芳纶或芳纶1414)。间位芳纶的大分子结构如图1-6所示。

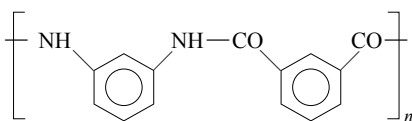


图1-6 间位芳纶的大分子结构式

美国杜邦公司于1965年开始工业化生产间位芳纶,商业名称为Nomex。由于间位芳纶分子内部的旋转位能相对不高且共价键没有共轭效应,其大分子链呈现出较好的柔性。对位芳纶也由美国杜邦公司研制成功,并于1993年实现工业化生产,商品名为Kevlar。对

位芳纶为刚性链结构，且酰胺键呈反式构型，具有高度的对称性和规整性，目前多用于军工领域。相比于kevelar纤维，Nomex纤维成本低，近几年在高温烟尘过滤领域得到了较好应用。

Nomex纤维的常见力学性能如表1-4所示。Nomex纤维耐热性和绝缘性好，化学性能稳定，对于弱酸、弱碱及大部分有机溶剂有很好的抵抗性。Nomex纤维的热分解温度高达371℃，可在205℃以下长期使用，瞬间温度不超过260℃，是过滤180~220℃高温腐蚀性气体的良好材料。国外除在各种工业窑炉烟气净化中普遍应用外，在燃煤锅炉烟气净化方面也取得满意效果。由Nomex纤维制成的过滤材料的耐温性能优于聚苯硫醚纤维过滤材料。同时，其力学性能和耐碱性优于芳腈纶。

表 1-4 Nomex 纤维的力学性能

性能	参数
密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.38
断裂强度 / ($\text{cN} \cdot \text{dtex}^{-1}$)	3.5~6
拉伸模量 / GPa	22~45
断裂伸长率 / %	28
回潮率 / %	5
玻璃化温度 / °C	270
安全使用温度 / °C	200
LOI / %	26~32
热收缩率 / %	1~4
耐酸性	中等
耐碱性	中等

芳纶滤料适合在高温、无酸、含水较少的烟气工况下使用，广泛应用于水泥窑头、窑尾的烟气过滤。Nomex纤维的缺点是会发生水解反应，当烟气中含有SO₂且经常出现露点温度时，或者在烟气的含湿量大于10%时，由Nomex纤维制成的针刺非织造过滤材料的使用寿命会大大缩短。

在国产化芳纶生产企业当中最知名的是烟台泰和新材料股份有限公司，其生产的间位芳纶已经在市场广泛应用，该公司在宁夏投资6亿元人民币的对位芳纶项目，计划年产能3000t，年初已经纺丝试车成功，推动了芳纶全球供应格局的改变。

1.2.2.4 苯硫醚（PPS）纤维

聚苯硫醚（PPS）是由对二氯苯和硫化钠缩聚而成的聚合物，其聚合物分子结构式如图1-7所示。PPS具有阻燃、耐辐射、耐化学腐蚀、绝缘性好、机械好等优点。PPS纤维可以在

200~220℃温度下长期使用，其热变形温度为260℃，熔点为285℃，在温度高达400℃环境下才会发生分解。PPS纤维的力学性能如表1-5所示。

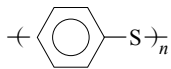


图1-7 PPS分子结构式

表 1-5 PPS 纤维的力学性能

性能	参数
密度 / (g · cm ⁻³)	1.37
断裂强度 / (cN · dtex ⁻¹)	2.5~3.6
初始模量 / (cN · dtex ⁻¹)	26~35
断裂伸长率 / %	25~40
回潮率 / %	0.6
熔点 / °C	285
安全使用温度 / °C	190
线密度 / dtex	2~2.7
LOI / %	35
耐酸碱性	好

研究发现，将PPS纤维分别放入93℃的盐酸和硫酸中浸泡24h，发现其拉伸强力保持率皆为100%。我国PPS纤维曾一度依赖进口，近几年来在各大科研院所和企业的共同努力下，国产 PPS 纤维在性能上有了长足的进步，目前已能满足国内市场的大部分需求，价格也有大幅度的下降，已成为耐高温除尘滤料产业最普遍采用的合成纤维之一，其滤料产品广泛用于燃煤锅炉、城市垃圾焚烧炉、公用工程锅炉等含湿高温烟气工况。

但是，PPS 聚合物大分子主链上的苯环与硫原子形成了共轭结构，使得硫原子处于不饱和状态，高温下容易与氧气反应，使苯环和相邻大分子发生氧桥支化及交联。进一步的氧化作用则会使主链断裂降解并释放出 SO₂，其降解机理如图 1-8 所示。

PPS 纤维的氧化降解最终会导致滤袋性能下降，宏观表现为滤料变脆发硬，出现破损，使用寿命缩短。尤其是在 NO₂、NO 和臭氧的环境下，PPS 滤料老化速度加快，使用寿命迅速下降。因此，一般建议其 PPS 过滤袋的长期使用工况为：O₂ 浓度小于 8%、NO₂ 浓度小于 16mg / Nm³。

为了克服 PPS 纤维耐氧化的不足，近几年市面上出现了一种改性抗氧化 PPS 纤维。它对 PPS 大分子结构中活性较强的硫原子进行饱和化处理，使其成为芳砜基团或亚砜基团，并保留部分硫原子，以保证 PPS 大分子链的柔韧性，然后再进行大分子长链之间的硫—砷—硫部