





Y1864285

## 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。所呈交的学位论文，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：刘杰英

日期：2010年1月14日



## 东华大学学位论文授权使用授权书

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 \_\_\_\_ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

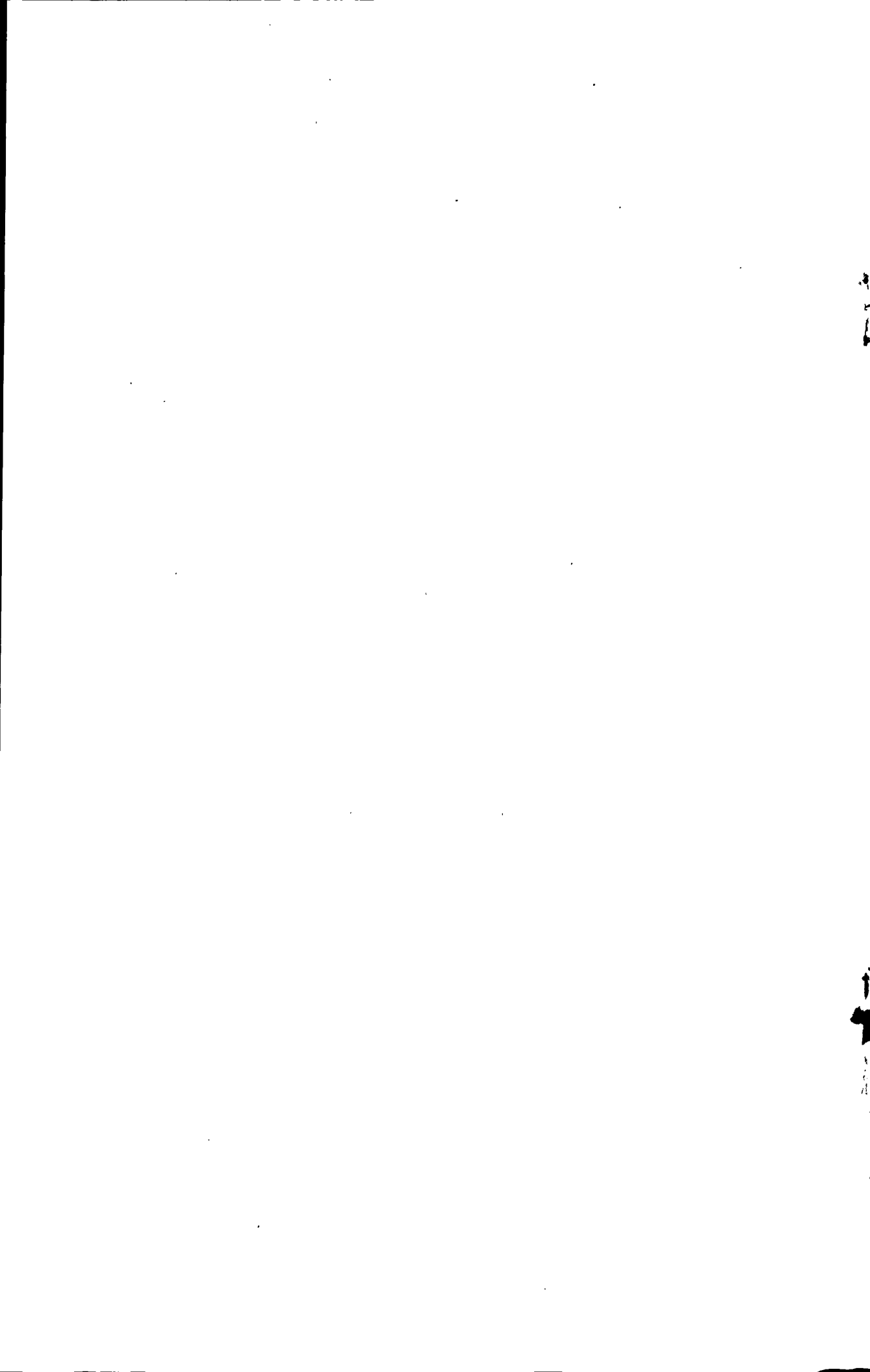
不保密

学位论文作者签名：刘杰英

指导教师签名：成克芳

日期：2010年1月14日

日期：2010年1月10日



# PBST 纤维及产品力学性能和织物风格研究

## 摘 要

聚丁二酸-共-对苯二甲酸丁二醇酯 (PBST) 由丁二酸、对苯二甲酸和 1,4-丁二醇三种单体通过缩合聚合反应制得。作为脂肪族/芳香族共聚酯的一种, PBST 纤维既具有脂肪族聚酯良好的生物降解性能, 又具有芳香族聚酯优良的机械性能。但到目前为止, 国内外关于 PBST 纤维的研究主要集中在 PBST 的合成、纺丝工艺及其对 PBST 纤维性能的影响等方面, 关于 PBST 纤维产品的研制和应用的研究尚属空白。

在本论文中, 我们选用了本课题组研制的 PBST 纤维长丝为原料, 通过研究 PBST 长丝、PBST/棉合股纱、PBST/棉包芯纱的拉伸性能、拉伸回复性能, 以及 PBST/棉织物的各项性能, 分析了纺纱工艺和织造工艺对 PBST 纤维产品性能的影响, 探讨了 PBST/棉产品的适用领域, 为 PBST 纤维产品的开发和应用提供了实验依据。

本论文主要完成了以下几个方面的工作:

首先, 分析了 PBST 长丝的拉伸性能, 探讨了定伸长率和拉伸循环次数对 PBST 长丝拉伸回复性能的影响, 以及 PBST 纤维与 PTT 纤维、PET 纤维拉伸回复性能的区别, 并在此基础上讨论了 PBST 纤维的力学模型。研究表明, 相比于 PTT 长丝, PBST 长丝在 9% 以下的小变形下具有较好的变形能力, 但当变形范围较大时, PTT 长丝的变形能力要优于 PBST 长丝; 在 10% 的定伸长范围内, 经过 5 次循环拉伸, PBST 长丝的弹性回复率仍保持在 98% 以上; 即使是在 20% 的定伸长情况下, 经过 5 次循环拉伸后, PBST 长丝的弹性回复率仍可达到 80.8%, 这表明 PBST 纤维具有优良的拉伸弹性回复性能以及抗疲劳性能。在定伸长率小于 15% 的情况下, PTT 纤维的拉伸弹性回复性能与 PBST 纤维相似, 但当定伸长率大于 15% 时, PTT 纤维的拉伸弹性回复性能要优于 PBST 纤维; PET 长丝具有较强的抗变形能力, 但拉伸回复性能较差。

其次,从捻度、混纺比和纱线结构等三个方面探讨了纱线加工方式及加工工艺参数对 PBST/棉纱线的力学性能影响,同时比较了 PBST/棉纱线与 PTT/棉纱线、PET/棉纱线拉伸回复性能的差异,研究表明, PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸性能主要取决于棉纤维部分的拉伸性能;捻度和棉纤维的含量对 PBST/棉纱线的拉伸回复性能具有一定的影响,在 500 捻/m 的捻度和 40/60 混纺比的条件下, PBST/棉纱线的拉伸回复性能较好; PBST 与棉单纱的合股纱的拉伸弹性回复性优于 PBST/棉的包芯纱。

最后,对 PBST/棉织物的抗皱性能、拉伸回复性能以及织物 KES 风格进行了分析,研究了这些性能与织物结构的关系,探讨了 PBST/棉织物在服装上的应用前景,为 PBST 纤维在服用领域的应用提供了一定的参考。研究表明,织物组织、经纬密度都会影响织物的拉伸回复性能和抗皱性能,此外,纱线的拉伸回复性能对织物的拉伸回复性能和抗皱性能也有较大的影响;相比于全棉织物和 PET/棉织物, PBST/棉织物和 PTT/棉织物具有较好的拉伸回复性能,且 PBST/棉与 PTT/棉织物的拉伸回复率基本相同; PBST/棉织物的柔顺度和蓬松丰满度较高,适合做女士宽松挺括类和悬垂型的轻薄型服装和男士冬季的轻薄型服装。

**关键词:** 聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二醇酯,包芯纱,力学性能,拉伸回复性能, PBST/棉织物,风格研究

# MECHANICAL PROPERTIES AND HANDLE STYLE RESEARCH OF PBST FABRIC

## ABSTRACT

Poly (butylenes succinate-co-butylene terephthalate) (PBST) copolyesters were efficiently synthesized from the starting materials of dimethyl succinate, dimethyl terephthalate and 1,4-butanediol. As one of aliphatic/aromatic copolymer, PBST is an important category for the balance of its biodegradability and physical properties. But now, the researches on PBST only focused on synthesis, spinning process, and its influence on PBST fibers. The researches on PBST fabrics and its application were still a blank.

In this paper, we used the new fiber PBST to develop PBST products. By researching the stretching properties and the elastic recovery of PBST filament, PBST cotton plied yarn, PBST/cotton core-spun yarn and the various properties of PBST products, analyzed the influence of spinning process and weaving process and the field of application of PBST/cotton fabric. It provided the experiment basis for the the development and application of PBST fabrics.

The following contents were studied in this paper.

Firstly, the stretching properties and the elastic recovery of PBST filament were researched and its influence of elongation and stratching times and the diffence of the elastic recovery of PBST filaments, PTT filaments and PET filaments. In this basis the mechanical matrix of PBST filaments was discussed. The result showed that the elastic recovery of PBST filaments was better than PTT filaments in about 9% small deformation, but in big deformation it was worse than PTT filaments. When PBST filaments were elongated to 15%, the elastic recovery rate up to over 98 percent; when set the elongation of 20% and elaongate repeatedly 5 times, the elastic recovery rate of PBST filaments still up to 88.3%. The elastic recovery of PTT filaments was the same as PBST filaments when it was elongated less than 15%, but it woule better than PBST filaments when elongated more than 15%. PET had better resistance to deformation, but it had bad elastic recovery.

Furthermore, the influence of spinning technological paramere on the mechanical properties of PBST cotton yarns was analyzed in three aspects of twist, blended ratio and yarn structure. And the diffence of the elastic recovery of PBST cotton yarns, PTT cotton yarns and PET cotton yarns was compared. The result showed that the stretching properties of PBST cotton plied yarn and PBST/cotton core-spun yarn lied on the stretching properties of cotton. Twist and cotton contents blocked the elastic recovery of PBST cotton yarns to a certain extent. When the twist was 500 T/m and the blended ratio was 40/60, the elastic recovery of PBST cotton yarns was better. Moreover, the elastic recovery of PBST cotton plied yarn was better than PBST core-spun yarn.

In addition, the wrinkle recovery, the elastic recovery and the KES style of PBST cotton fabrics were analyzed, the relation between these propreties and fabrics structure was researched, and the application in the future of PBST cotton fabrics was discussed. This provided certain basis for the application of PBST fibers in the costume field. The result showed that fabrics weave, density of warp and weft and yarn construction had an effect on the wrinkle recovery and the



elastic recovery of PBST cotton fabrics. Compared cotton fabric and PET cotton fabric, PBST cotton fabric and PTT cotton fabric had better elastic recovery. Moreover, their elastic recoveries were similar. PBST cotton fabrics had better softness and fullness, so it could weave women loose-fitting, stiff and smooth, suspended pattern and light weight fabrics and men winter light weight fabrics.

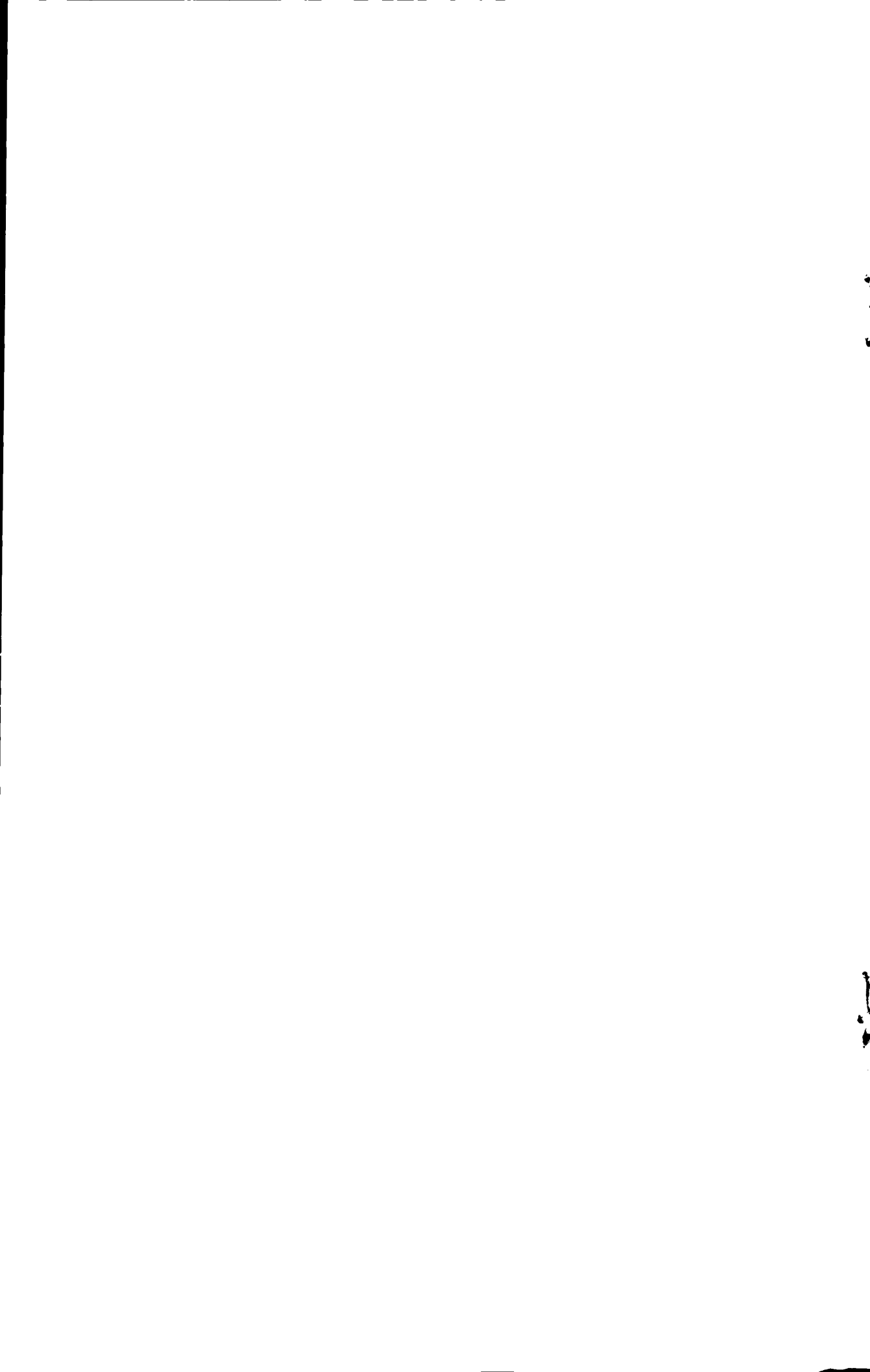
Liu Jieying (Textile Material and Textiles Design)

Supervised by Professor Qian Jingfang

**KEY WORDS:** poly(butylene succinate-co-butylene terephthalate), core-spun yarn, mechanical property, elastic recovery, PBST/cotton fabric, style research

# 目录

<b>1 前言</b> .....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 生物可降解聚酯的研究现状.....	2
1.3 弹性聚酯纤维的研究现状.....	4
1.4 PBST 纤维的概述.....	4
1.5 本论文研究的内容和意义.....	7
<b>2 PBST 长丝纤维力学性能研究</b> .....	8
2.1 实验 .....	8
2.2 拉伸性能的测试结果与讨论.....	9
2.3 拉伸弹性回复性能的测试结果与讨论.....	11
2.4 本章小结.....	14
<b>3 PBST/棉纱线的力学性能研究</b> .....	15
3.1 实验 .....	15
3.2 拉伸性能的测试结果与讨论 .....	16
3.3 拉伸回复性能的测试结果与讨论 .....	17
3.4 本章小结.....	24
<b>4 PBST/棉织物的性能分析及风格研究</b> .....	25
4.1 试样 .....	25
4.2 PBST/棉织物的力学性能分析 .....	25
4.3 PBST/棉织物抗皱性能分析 .....	30
4.4 PBST/棉织物的风格研究.....	31
4.5 本章小结.....	42
<b>5 结论与展望</b> .....	43
5.1 结论 .....	43
5.2 展望 .....	44
<b>参考文献</b> .....	45
<b>附录</b> .....	48
攻读硕士期间发表文章及申请专利情况 .....	52
<b>致谢</b> .....	53



## 第一章 前言

### 1.1 研究背景

近年来,各种合成纤维制品已经渗透到国民经济的各个领域和人民生活各个方面,然而,各种合成纤维制品在人们的生活带来便利、改善生活品质的同时,其生产过程或使用后的大量废弃物却对自然环境造成了不可忽视的负面影响,成为新的污染源<sup>[1]</sup>。如已经被广泛应用于服装中的氨纶纤维,其生产工艺中使用的溶剂二甲基甲酰胺为有害物质,直接排放会严重污染环境;涤纶、腈纶、丙纶等合成纤维虽然在生产中把有害物质含量控制的很低,但不能被生物降解,大大增加了环境负荷。随着社会的发展和人们生活水平的提高,人们愈来愈重视身体健康的维护和周围生存环境的保护,因此,在对废旧材料进行回收再利用研究的同时,清洁生产和对可生物降解材料的研究开发成为当今工作的热点。

目前,研究开发的可生物降解材料主要有三类:微生物型、化学合成型和天然型生物降解高分子。

微生物型降解高分子是指微生物可把某些有机物作为营养来源,通过发酵作用合成高分子。如 PHB 是本世纪 20 年代从微生物中分离出的羟基丁酸酯聚合物<sup>[2]</sup>。这类产品具有较高的生物分解性,但价格昂贵,而且熔点和分解点之间仅有十几度,加工难度大,目前只在高档消费品中应用。

化学成型生物降解高分子较微生物型具有更大的灵活性,容易控制产品结构和性能。目前这方面研究开发工作主要集中在合成具有类似于天然高分子结构的物质或含有容易生物降解的官能团的聚合物。其中脂肪族聚酯备受关注,如已成为研究开发热点的聚乙烯醇和主要活跃在医用材料领域的聚乳酸(PLA)等,另外还有美国 UCC 公司以聚己内酯(PCL)为原料开发的商品名为“Tone”的产品和日本昭和高分子商品名为“Bionolle”的 PBS 基聚合物。

天然可生物降解高分子是利用生物可降解的天然高分子如植物来源的生物物质和动物来源的甲壳质等为基材制造的材料。植物来源包括细胞壁组成的纤维素、半纤维素、木质素、淀粉类;动物来源就是虾、蟹等甲壳动物。纤维素和甲壳质在化学结构上相似,是分布在自然界的碱性多糖,可生物合成及分解,不会造成污染<sup>[3]</sup>。不过以纤维素、淀粉、甲壳素、单宁和树皮等多糖类物质为原料的天然高分子材料,虽然价格较低,但品种较少而且需要经过化学修饰或与其它具有生物降解性的合成高分子材料共混后才能达到使用目的。

因此利用化学法设计合成出满足实际应用需要的具有特殊结构和功能的高分子材料,在生物降解性高分子材料研究领域一直占有相当重要的地位。

PBST (聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二醇酯)是目前正在研究开发的一种新型的生物可降解材料,是丁二酸丁二醇酯(PBS)与对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)的无规共聚物<sup>[4]</sup>。作为脂肪族/芳香族共聚物中的一种,其既具有脂肪族聚酯容易在微生物作用下发生降解的特点,又具有芳香族聚酯良好的热稳定性和力学性能等优势<sup>[5-8]</sup>,因此更符合人们对纺织材料可循环性使用和安全性能的要求;此外,PBST所拥有的“软、硬链”以及BT链段的大分子结构,使其又具有独特的弹性。因此PBST材料在纺织领域应具有较广泛的应用前景。

但目前,国内外关于PBST的研究主要集中在PBST的合成、纺丝工艺以及其对PBST纤维性能的影响等方面,关于PBST纤维产品的开发和应用方面的研究尚属空白。

在本论文中,我们选用了本课题组研制的PBST纤维长丝为原料,通过研究PBST长丝、PBST/棉合股纱、PBST/棉包芯纱的拉伸性能、拉伸回复性能,以及PBST/棉织物的各项性能,分析了纺纱工艺和织造工艺对PBST纤维产品性能的影响,探讨了PBST/棉产品的适用领域,为PBST纤维产品的开发和应用提供了理论参考。

## 1.2 生物可降解聚酯的研究现状

聚酯纤维是指分子结构中含有酯基( $-\text{COO}-$ )的聚合物经直接纺丝或再熔融纺丝制取的合成纤维<sup>[9]</sup>。其中PET、PBT纤维因分子链中存在苯环结构而不能降解,脂肪族聚酯由于具有良好的生物降解潜力已成为世界范围内的开发热点。以下介绍几种可降解聚酯纤维的发展及研究现状。

PHA是由微生物产生的聚羟基链烷酸酯,是一种脂肪族聚酯,生物合成的PHA是一类高度结晶的热塑性物质,与聚丙烯、聚乙烯的物理性能和化学结构基本相近,能拉丝、压膜、注塑等,是制备可生物降解塑料的重要原料。它具有与通用高分子同样的热塑性,而且在环境中能生物降解,因此被当作环境协调型材料而受到重视;此外,因其还具有很好的生物相容性,因而在医用材料应用领域的研究开发也非常活跃。聚3-羟基丁酸(PHB)是PHA中存在最广、发现最早且研究也最为透彻的一种,其可采用微生物法和化学催化法合成<sup>[10-12]</sup>。其中,微生物合成法,由于本身的工艺路线和操作条件决定了其生产周期长、产量低、萃取和精制工艺成本高,使PHB生产成本太高。化学催化法可以降低成本,但是技术控制难度很高,同时,由于直接制成的是聚合物的混合物,对与其他物质共聚或共混带来不便,因此,这种方法要适合工业化生产还有待于技术的提高。

PHB是一种高度结晶(80%)的生物可降解聚酯,熔点为17°C,使得它的热稳定性差。一般在PHB中加入羟基戊酸(HV)共聚,实现内增塑作用,形成以英国的ICI公司为代表,其次是日本Monsanto公司开发的生物可降解共聚酯PHBV(3-羟基丁酸(HB)和3-羟基戊酸(HV)的无规共聚物),商品名为“Biopol”,随着

HV含量的增加,共聚物的可加工性能变好, HV含量为5-10 mol%的Biopol可熔融加工成纤维<sup>[13-15]</sup>。但由于HV单体的加入,大大降低了PHB的发酵效率,使得PHBV生产成本大大增加。此外,在发酵产物中,由于有死亡细菌的存在,必须对发酵物进行提纯,但仍会残留5%左右的杂质灰分,这导致在高温纺丝过程中,聚合物容易发生氧化降解,使纺丝失败<sup>[16-19]</sup>。因此,昂贵的价格及技术上的不成熟是该纤维开发目前急需解决的问题。

聚乳酸(PLA)是一种聚羟基酸,在化学结构上属于脂肪族聚酯。其原料乳酸可由玉米乳清、甜菜下脚、土豆废渣、奶酪下脚料等经发酵蒸馏获得。在常见的可生物降解聚合物中,聚乳酸的性能最为优越:其耐热性能良好、结晶度高、强度高、透明,且可热塑成形<sup>[20-21]</sup>。人们对它进行了大量的研究,并得到了较快的进展。目前,由熔融纺丝法生产的聚乳酸纤维已进入了商品化生产阶段。日本钟纺公司以高纯度、高分子量聚乳酸为原料,获得了性能优良的长丝,商品名为Lactron,其强度和伸长可通过工艺条件加以控制<sup>[22,23]</sup>。Lactron的物理性能与常规聚酰胺(PA)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纤维接近,密度和模量值介于PET和PA之间,回潮率很小<sup>[15,24]</sup>。

聚羟基乙酸酯(PGA)是最简单的线性脂肪族聚酯,于1970年进入市场。高分子量PGA可由交酯开环聚合得到,为半晶、疏水高聚物,结晶度大于50%,熔融湿度为224-226℃,玻璃化温度为36℃。PGA经熔融纺丝制成的纤维,可用作可吸收手术缝合线,但其降解速度很快。通常,PGA缝合线在体内不到一个月就丧失了机械强度。为改善其性能,可将其和乳酸(LA)进行共聚。PGLA可由乙交酯和丙交酯由共聚得到,但要得到高分子量PGLA有很大的难度,导致其纤维制品价格昂贵。目前,国内外市场上已有PGLA手术缝合线的商品。

聚己内酯(PCL)是一种水稳定性良好的疏水、高结晶聚合物,可由有机金属化合物催化环状单体ε-己内酯开环聚合而得到。PCL纤维可通过熔融纺丝制得,是一种价格较低的可生物降解合成纤维。由于PCL的熔点为60℃左右,玻璃化温度为60℃,结晶温度为22℃,非常接近室温,所以其熔融纺丝要比锦纶、涤纶困难,关键在于延缓其结晶,以提高初生纤维的可拉伸性能。目前,通过优化工艺,可以得到强度大于3g/d的PCL单丝、复丝和短纤维。PCL降解时首先在水解作用下分解为己内酸酯,然后由产生脂肪酶的微生物降解为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。

聚丁二酸酯是由丁二酸和脂肪族二元醇(如乙二醇、丁二醇等)缩聚得到的。尤尼吉卡公司将熔融指数为30 g/min、熔点为110-120℃的聚丁二酸丁二醇酯(PBS)熔融纺丝,在70℃下进行相当于最大拉伸比70%的拉伸,然后在堵塞箱中卷曲、切断,可以得到强度为3.6 g/d的短纤维,适合用作卫生材料和工业原料<sup>[25,26]</sup>。此外,由聚丁二酸乙二酯和聚乙二醇组成的嵌段共聚物(PES/PEG),以及由聚丁二酸乙二酯和聚1,3-丁二醇组成的嵌段共聚物(PES/PTMG),都可经

熔融纺丝加工成有弹性的纤维,且具有很好的可生物降解性能,在可吸收手术缝线方面有着良好的应用前景<sup>[27,28]</sup>。

PBST 的研究,就目前的报道来看,清华大学郭宝华采用熔融缩聚的方法,合成一系列无规共聚物 PBST,并对共聚物的序列结构及结晶性能进行了研究<sup>[1,29]</sup>; Honda 等报道了当 PBS 中引入适量的芳环共聚组分时,既可提高其熔点又能保留一定生物降解性,并且研究分子量为 48000 的 PBST 共聚物的降解机理<sup>[7,30]</sup>。Lee 等人研究了共聚物的力学性能对苯二甲酸丁二酯摩尔含量的影响<sup>[31,32]</sup>。

### 1.3 弹性聚酯纤维的研究现状

弹性纤维最早由 O.Bayer、H.Rinke 和他们的合作者在德国于 1937 年合成<sup>[33]</sup>,到 1962 年,杜邦(DuPont)公司推出了大规模工业化生产的产品,定名为 Lycra(莱卡),这是一种聚氨酯弹性纤维,国内称其为氨纶。聚氨酯弹性纤维具有橡胶丝的弹性,但强力、耐老化等性能优于橡胶丝,因而倍受青睐。但由于聚氨酯弹性纤维生产设备及工艺复杂,原料及加工成本高,污染严重等,其产品不能满足市场需要。为进一步满足市场需求,而且从降低成本和加工比较方便等方面考虑,人们又开发出聚酯类弹性纤维来代替造价昂贵的聚氨酯弹性纤维。

目前研究开发的聚酯类弹性纤维主要是聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)纤维和它的同类高聚物聚对苯二甲酸丙二醇酯(PTT)纤维,其中,PBT 纤维的综合性能优于 PET 纤维,而 PTT 纤维更是兼有 PBT 纤维和 PET 纤维的优点,作为弹性纤维,在性价比上可能要优于目前最常用的聚氨酯类弹性纤维,所以从经济角度和使用性能上考虑,PBT 纤维和 PTT 纤维有较大的研究与利用价值,但作为商业化和实用性产品,在弹性的实现和稳定性上,PBT 纤维和 PTT 纤维仍存在一些问题。

### 1.4 PBST 纤维的概述

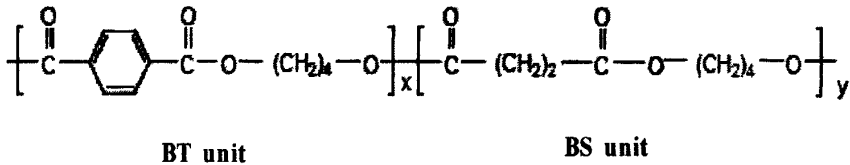
聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二醇酯(PBST)是丁二酸丁二醇酯(PBS)与对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)的无规共聚物<sup>[4]</sup>,脂肪族聚酯因其主链中含有易水解的酯键,且主链柔顺,很容易在微生物的作用下,通过酶的催化而发生降解;但脂肪族聚酯在使用过程中所暴露出的诸多缺陷,如熔点低、力学性能差、成本高等,限制了其作为材料的大量推广使用。芳香族聚酯具有热性能稳定、力学性能优良、价格低廉等优势,但使用后较难降解,极耐微生物的侵蚀。脂肪族/芳香族共聚物则结合了这两者的优点<sup>[5-8]</sup>。PBST 纤维,作为脂肪族/芳香族共聚物中的一种,是一种新型的生物可降解材料,其降解产物为二氧化碳和水,燃烧时不产生有毒气体,对环境无污染,符合人们对纺织材料的可循环性使用和安全性能的要求,属于 21 世纪的环境循环材料和生态性纤维。

此外, PBST 所拥有的“软、硬链”以及 BT 链段的大分子结构,使其又具有

独特的弹性，在纺织服装领域具有较广泛的应用前景。

### 1.4.1 PBST 纤维的结构与性能

PBST 共聚酯的化学结构式为：



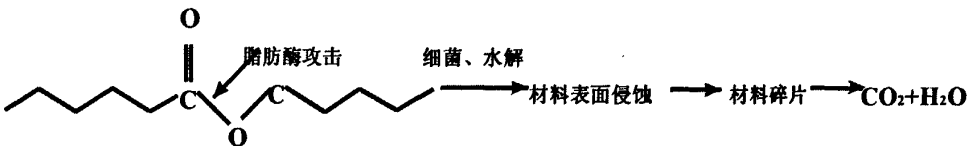
式中，BT unit 为芳香族聚酯对苯二甲酸丁二醇酯链段，BS unit 为脂肪族聚酯聚丁二酸丁二醇酯链段<sup>[34]</sup>。PBST 纤维中由于含有软链丁二酸丁二醇酯（BS），破坏了结晶度，所以 PBST 纤维的最大特点就是柔软性好，回弹性高，丝绸般的光泽，易染色，且染色温度低和染色牢度高。

许新建等人<sup>[35-37]</sup>对 PBST 纤维的结构与性能进行了研究，结果表明，经优化工艺制备的 PBST 纤维，强度可达 3.5cN/dex，断裂伸长 19.2%，熔点 179℃，结晶度 43.8%，晶区取向 86.9%。

此外，PBST 纤维具有较大的沸水收缩率，且随着 PBST 纤维牵伸倍数增大，沸水收缩率会逐渐增大，而当纺丝速度增大或热定型温度增加时，沸水收缩率会减小。

### 1.4.2 PBST 纤维的降解机理

脂肪族聚酯在微生物的作用下可发生降解，其微生物降解过程为：微生物首先侵蚀脂肪族聚酯表面，然后由微生物分泌的脂肪酶对聚酯中的酯键发生作用使其水解。脂肪族聚酯的微生物降解反应示意如下：



能够分解脂肪族聚酯的微生物种类很多，包括许多细菌和霉菌等，它们广泛分布在自然界中，其中以土壤中最多<sup>[38]</sup>。

与其它可降解脂肪族/芳香族共聚物一样，PBST 的可降解性主要通过脂肪族聚酯段实现。另外脂肪族/芳香族共聚酯的降解能力与其微观结构密切相关，大量研究表明，共聚酯中脂肪族链段和芳香族链段排列越无规，越有利于共聚酯的降解。当芳香族链段的链节数大于 2 时，芳香族链段基本丧失降解能力。因此，研究人员均致力于尽可能地将嵌段共聚酯转变为无规共聚酯，使芳香族链段的链节变短。PBST 属于无规共聚物，所以降解性良好。当共聚酯中 BT 的摩尔分数小于 20%时，经过 4 周实验，共聚酯膜完全碎裂<sup>[8,39]</sup>。

此外，与其它可降解聚酯一样，PBST 共聚物的降解性能随其结晶度、相对



分子质量的不同而发生变化。如共聚物分子量越高，生物降解性越小，但当分子量高到一定程度，其生物降解性的变化趋于稳定。

### 1.4.3 PBST 纤维的弹性机理

目前，关于 PBST 纤维的弹性机理还处于研究之中。有学者认为，PBST 纤维的弹性，类似于聚氨酯弹性纤维，主要来自于其 BS 软链段、BT 硬链段并存的大分子结构特征。其中，BS 软链段，也即低分子量的非结晶区，在较小的应力下能发生较大的形变，从而赋予 PBST 纤维容易被拉长的特性；而 BT 硬链段，由于苯环结构的存在，以及结晶度高，交联点多，防止了大分子链间发生滑移，为“软”链段的伸长和回弹提供了必要的结点条件，并赋予纤维一定的强度。

图 1-1 是 PBST 纤维在松弛和拉伸状态下的内部分子链结构示意图。

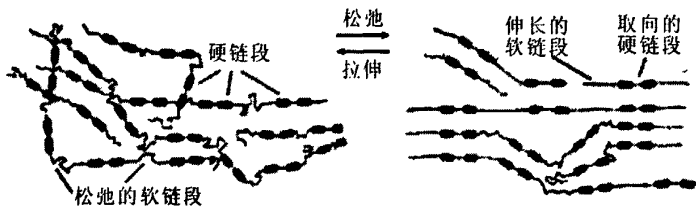


图 1-1 PBST 纤维在松弛和拉伸状态下的内部分子链结构示意图

也有学者认为 PBST 纤维的弹性类似于 PBT，可能还来自于大分子链中的 BT 链段。由于 BT 链段有四个亚甲基，可使内旋转增多，并在应变过程中产生  $\alpha$  与  $\beta$  晶型的可逆转变，松弛状态下为  $\alpha$  晶型，呈螺旋构象；拉伸状态下呈  $\beta$  晶型。通常情况下， $\alpha$  晶型为稳态， $\beta$  晶型为非稳态，并具有向  $\alpha$  晶型转变的趋势，因此使大分子链具有弹性机制。但  $\alpha$  构型与  $\beta$  构型的转变，因苯环的位阻作用，所需的能量较大，因此其伸长所需的外界张力较大，而且当外界张力约束作用消失后，其弹性回复可能较慢和回复性较小。

因此，综合上述观点可以认为，PBST 纤维的弹性机理是：当 PBST 纤维受到小应力拉伸时，其变形可能主要来源于 BS 软链段的伸长，此时拉伸模量较小；当外力增加到一定值后，此时 BT 硬链段开始出现变形，拉伸模量增大。当外力消失后，BS 软链段首先快速回复，此后，随着时间的推移，BT 硬链段逐渐回复。

### 1.4.4 PBST 纤维的研究现状

就目前的报道来看，关于 PBST 纤维的研究仍较少，所有有关 PBST 的报道还仅局限于对 PBST 薄膜、PBST 纤维可纺性及其纤维性能的研究。如清华大学郭宝华<sup>[40]</sup>采用熔融缩聚的方法，合成一系列无规共聚物 PBST，通过调节聚丁二酸丁二醇酯与对苯二甲酸二甲酯的百分比进行无规共聚的方式达到调节共聚物 PBST 的生物可降解性及力学性能，得到了具有优良机械性能和不同生物降解速度的一系列共聚物，并对共聚物的序列结构及结晶性能进行了研究；Honda N 等<sup>[41]</sup>介绍了当 PBS 中引入适量的芳环共聚组分时，既可提高其熔点又能保留一定

生物降解性,并且研究了分子量为 48000 的 PBST 共聚物的降解机理;许新建等<sup>[36]</sup>对不同分子量 PBST 共聚酯进行熔融纺丝实验,分析了分子量对其成纤性能的影响,通过优化其熔融纺丝工艺制得 PBST 纤维,并对纤维在不同环境下的降解性能进行了研究,研究表明 PBST 纤维只有在特定生物酶的环境中降解显著。Li 等<sup>[42-45]</sup>人合成了高分子量 PBST 树脂,并研究了其热学特性、降解特性能及 BT 链段含量对其性能的影响。Lee<sup>[46]</sup>等人研究了共聚物的力学性能对苯二甲酸丁二酯摩尔含量影响的情况。

但到目前为止,还未有学者对 PBST 纤维在纺织领域中的应用情况进行过探讨,关于 PBST 纤维如何应用于纺织产品、以及对纺织品性能影响的研究还处于空白状态。

### 1.5 本论文研究的内容和意义

本论文在分析了 PBST 长丝拉伸性能和拉伸回复性能的基础上,通过纺纱、织造工艺的改变,探讨了纺纱、织造工艺对 PBST/棉纱线及面料拉伸回复等性能的影响,比较了 PBST/棉与 PTT/棉、PET 低弹丝/棉的纱线和面料性能的差异,并对 PBST 纤维在服用方面的应用进行了探讨。

本论文研究的内容主要包括以下几个方面:

(1)PBST 纤维长丝的弹性回复性能研究:根据 PBST 纤维长丝的力学性能,研究其在不同的拉伸次数及不同伸长率下的拉伸弹性回复性能,并将其与 PTT、PET 低弹长丝的拉伸弹性回复性能进行对比。

(2) PBST/棉纱线弹性回复性能研究:通过改变纱线的捻度、混纺比以及纱线结构,探讨不同的工艺参数对 PBST/棉纱线拉伸回复性能的影响,并将其与 PTT/棉纱线、PET 低弹长丝/棉纱线的拉伸弹性回复性能进行对比。

(3) PBST/棉织物的性能及风格分析:对 PBST/棉织物的拉伸弹性、抗折皱性以及 KES 风格进行研究,探讨其变化规律和在服装上的应用展望。

本论文通过对 PBST/棉纱线和织物的拉伸回复等性能的研究,以及对纱线和织物加工工艺的探讨,为 PBST 纤维在纺织加工过程中工艺参数的确定和在服用领域中产品的开发提供了一定的理论依据。



## 第二章 PBST 长丝纤维力学性能研究

随着生活水平的提高,人类对服装舒适性的要求越来越高。弹性纤维,因为可以给服装面料带来良好的弹性舒适性能,因此也越来越受到人们的青睐。尽管不同款式和用途的服装对面料弹性的具体要求不同,如紧身并具有健美体形功能的服装要求面料的弹性伸长率大,且伸长时所需的负荷高,而一般的休闲服装要求面料的弹性伸长率适中,且所加负荷不应太大,但所有服装都要求面料具有高的弹性回复率,而面料的这些性能主要依赖于纤维的弹性。本章将通过实验分析 PBST 长丝纤维的拉伸性能和拉伸回复性能,并将其与 PTT 长丝、PBT 低弹长丝比较,为 PBST 弹性面料的开发提供参考。

### 2.1 实验

#### 2.1.1 试样及测试仪器

本论文使用的PBST长丝是由课题组合成的重均分子量为12.2万的PBST共聚酯切片,在2000 m/min纺丝速度下熔融纺丝制备的,牵伸倍数为1.65,细度为12tex。

实验仪器为莱州市电子仪器有限公司生产的YG061型电子单纱强力仪。

#### 2.1.2 拉伸性能测试条件

温度:  $20 \pm 2$  °C; 相对湿度:  $65 \pm 2\%$ ; 试样夹持距离 250 mm, 拉伸速度 250 mm/min, 预加张力  $0.05 \pm 0.01$  cN/dtex。

#### 2.1.3 定伸长一次拉伸弹性回复性能测试方法

先将试样拉伸至设定的定伸长数值,停顿30 s,然后回复,当纤维的内应力降低至设定的预加张力时,伸长回复值即为纤维的急弹性变形。此时,夹持器继续回复到原位,再停顿30 s,然后继续拉伸,当纤维的内应力等于设定的预加张力时,对应的拉伸值即为塑性变形。纤维的总变形与急弹性变形和塑性变形之差即为纤维的缓弹性变形<sup>[47]</sup>。

纤维一次拉伸回复典型曲线如图2-1所示,拉伸弹性回复性能各项指标的计算方法见公式2-1。

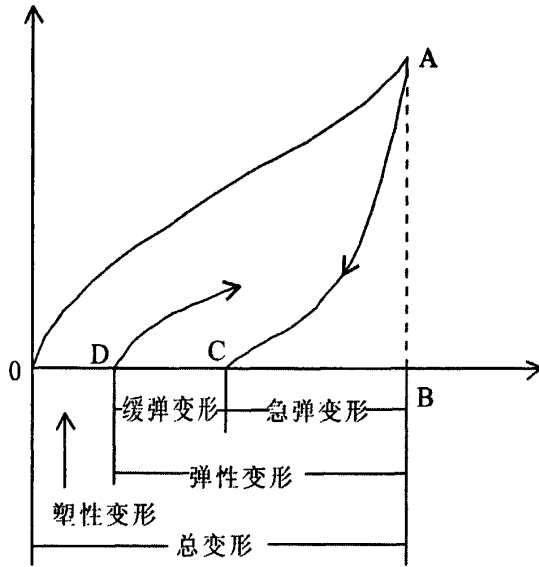


图2-1 一次拉伸回复曲线示意图

$$\begin{aligned}
 \text{急弹性变形 (\%)} &= \frac{\text{急弹性变形}}{\text{总变形}} \times 100\% \\
 \text{缓弹性变形 (\%)} &= \frac{\text{缓弹性变形}}{\text{总变形}} \times 100\% \\
 \text{弹性回复率 (\%)} &= \frac{\text{弹性变形}}{\text{总变形}} \times 100\% = \frac{\text{急弹性变形} + \text{缓弹性变形}}{\text{总变形}} \times 100\% \\
 \text{塑性变形率 (\%)} &= \frac{\text{塑性变形}}{\text{试样原长}} \times 100\%
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

定伸长一次拉伸弹性回复性能的测试条件是：温度  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度  $65 \pm 2\%$ ，试样夹持距离  $500 \text{ mm}$ ，预加张力  $0.05 \pm 0.01 \text{ cN/dtex}$ ，拉伸速度  $500 \text{ mm/min}$ 。定伸长值分别为夹持距离的  $10\%$ 、 $15\%$  和  $20\%$ 。

#### 2.1.4 定伸长反复拉伸弹性回复性能测试方法

先将试样拉伸至设定的定伸长值，停顿  $30\text{s}$ ，然后回复到原位，停顿  $30\text{s}$ ，开始第二次拉伸，重复第一次拉伸过程直至完成规定的循环次数，记录试样的急弹性变形和塑性变形，计算拉伸弹性回复性能的各项指标。定伸长反复拉伸的测试条件与定伸长一次拉伸的测试条件相同。

### 2.2 拉伸性能的测试结果与讨论

图 2-2 是 PBST、PTT 和 PET 长丝的拉伸曲线。

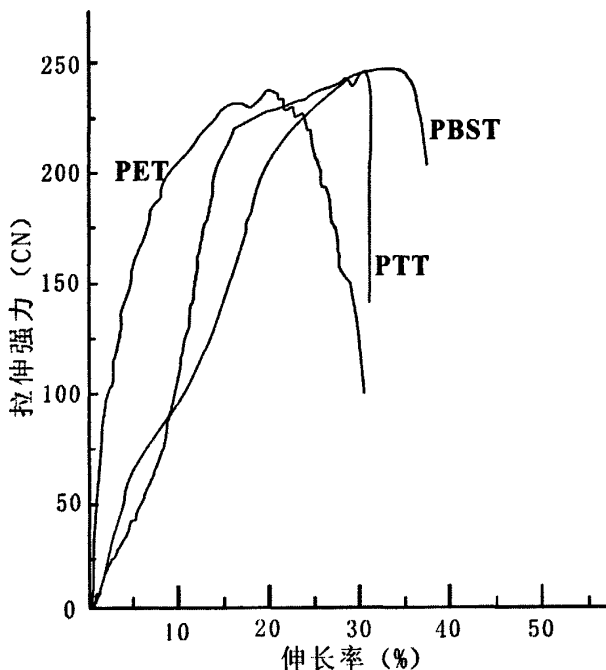


图 2-2 PBST、PTT 和 PET 纤维长丝的拉伸曲线

从图 2-2 中可看出，PET 长丝具有最大的拉伸模量，且没有明显的屈服点。这表明 PET 长丝抵抗变形的能力要远远大于 PBST 长丝和 PTT 长丝，在实际使用中，PET 的纺织品不易变形。产生 PET 长丝这种现象的原因是因为 PET 大分子链是僵直型的，具有较少的折叠结构。

PTT 长丝相对于 PBST 长丝，在小变形下具有较大的模量，但当伸长率达到 5% 左右时，其拉伸曲线出现了屈服点。此后，PTT 长丝的拉伸模量低于 PBST，纤维表现出良好的变形能力。

PTT 长丝之所以具有如此的拉伸性能，可能与其大分子构型有关。PTT 的空间结构是由曲折的亚甲基链段和硬直的对苯二甲酸单元组合而成，形成沿纤维轴向的“Z”字形结构。此外，在 PTT 的大分子中，存在着 3 个亚甲基单元，这种奇数亚甲基结构提供了更多的空间使苯环能与 3 个亚甲基处于同一平面，而临近两个羰基的斥力不能呈 180° 平面排列，只能以空间 120° 错开。PTT 分子构象的“Z”弹簧特征与易改变的三亚甲基的空间构型，使 PTT 具有较好的螺旋弹簧结构，当 PTT 纤维受力时，大分子链能比较容易拉伸或是压缩。但是，由于苯环的位阻作用，可能使 PTT 大分子在初始变形时所需的能量较大。

PBST 长丝的拉伸性能则与 PTT 相反，呈现出 S 的形状。在纤维受力变形初始阶段，可能是因为 BS 软链段的伸长，PBST 长丝的拉伸模量最小，此时曲线段接近于一直线，应变量大，纤维表现出较好的变形能力。此后，随着外力的增大，BS 软链段逐步趋于“伸展”，当伸长率达到 8% 左右时，BT 硬链段可能开始变形。由于 BT 硬链段的曲折部分较少，且苯环刚硬，位阻较大，因此 PBST

长丝的拉伸模量增大，变形能力减弱。当 PBST 长丝的伸长率达到 16% 左右时，拉伸曲线出现了明显的屈服点。此后，大分子链出现了抽拔现象，同时也有少部分大分子断裂，这在拉伸曲线上表现为纤维的应力增加幅度明显减小，而应变增加很快，伸长率迅速增大。当外加负荷达到最大值时，纤维分子变形达到极限，大量的大分子被抽拔或拉断，纤维发生断裂。

根据上述 PBST 长丝在拉伸性能方面的表现，其拉伸性能类似于图 2-3 的四元件力学模型，其中，弹簧  $E_0$  类似于 PBST 长丝中由于软、硬链段并存而产生的弹性，弹簧  $E$  与粘滞杯  $\eta$  类似于 BT 硬链段所反映的弹性特征，粘滞杯  $\eta_0$  类似于 PBST 大分子结构中大分子链之间的相对滑移。

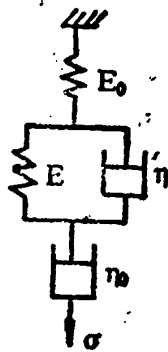


图 2-3 PBST 的力学模型

当 PBST 长丝被拉伸时，在小应力情况下，由于弹簧  $E_0$ （软链段）的弹性常数较小，因此首先发生变形，此时 PBST 长丝的拉伸模量最小，应变量较大，纤维表现出较好的变形能力。此后，随着应力的增大，弹簧  $E$  与粘滞杯  $\eta$ （BT 硬链段）出现变形，由于粘滞杯的阻尼力（苯环位阻的影响），PBST 长丝的拉伸模量增大，变形能力减弱。当 PBST 长丝的伸长率达到 16% 左右时，此后纤维的变形可能主要来自于粘滞杯  $\eta_0$  的变形（大分子链之间的相对滑移），因此拉伸曲线出现了明显的屈服点，应力增加幅度明显减小，而应变增加很快，伸长率迅速增大，直至纤维断裂。

综上所述，由于 PBST 长丝、PTT 长丝和 PET 长丝的大分子结构不同，因此它们在拉伸时所表现出的性能也有较大的差异。PET 长丝具有较强的抗变形能力，PBST 长丝在 9% 左右的小变形下，其变形能力要优于 PTT 长丝，但当变形范围较大时，其变形能力则低于 PTT 长丝。

### 2.3 拉伸弹性回复性能的测试结果与讨论

PBST 长丝、PTT 长丝和 PET 长丝的拉伸弹性回复性能测试结果见表 2-1 和表 2-2。

表 2-1 PBST 长丝的拉伸弹性回复率

拉伸次数	定伸长 (%)	急弹性回复率 (%)	缓弹性回复率 (%)	弹性回复率 (%)	塑性变形 (mm)
1次	10	94.3	5.1	99.4	0.25
3次		93.7	4.8	98.5	0.25
5次		93.5	4.7	98.2	1
9次		92.7	3.6	96.3	1.75
1次	15	89.5	8.4	97.9	0.75
3次		87.6	7.1	94.7	1.75
5次		87.1	6.9	94.0	2
9次		85.4	5.2	90.6	3.5
1次	20	84.1	4.2	88.3	5.75
3次		78.5	3.7	82.2	8.5
5次		77.4	3.4	80.8	9.75
9次		69.8	2.9	72.7	13.75

表 2-2 PBST、PTT 纤维和 PET 纤维的 1 次拉伸弹性回复率 (%)

定伸 长率	PBST 纤维			PTT 纤维			PET 纤维		
	急弹性 回复率	缓弹性 回复率	弹性回 复率	急弹性 回复率	缓弹性 回复率	弹性回 复率	急弹性 回复率	缓弹性 回复率	弹性回 复率
10%	94.3	5.1	99.4	93.7	4.3	98	69.2	2.8	72
15%	89.5	8.4	97.9	89.4	8.4	97.8	68.8	2.6	71.4
20%	84.1	4.2	88.3	89.3	8.3	97.6	67.7	2.3	70

从表 2-1 可以看到，在定伸长率不变的情况下，随着拉伸循环次数的增加，PBST 长丝的急弹性回复率、缓弹性回复率以及弹性回复率均呈现下降的态势，尤其是缓弹性回复率下降明显；此外，在拉伸循环次数不变的情况下，随着定伸长率的增加，PBST 长丝的弹性回复率也呈现下降的态势。

在拉伸循环次数不变的情况下，随着定伸长率的增加，PBST长丝伸长的增加可能主要源自缓弹性变形和塑性变形的增加，特别是当定伸长率超过16%后，PBST长丝的变形可能主要来自于塑性变形，因此，最终也会导致PBST长丝的弹性回复率下降。

另外，从表2-1还可以发现，在定伸长率小于15%的情况下，PBST长丝的缓弹性回复率是随着定伸长率的增加而增加，这也验证了前面对PBST弹性机理的



推测。在小变形下, PBST长丝的伸长主要来源于BS软链段的伸长。但当PBST长丝的伸长达到一定范围后, 此时由于BS软链段趋于“伸展”, 变形更多的是来自于BT硬链段的伸长。由于BT硬链段的回复受到苯环位阻的影响, 比较缓慢, 因此导致PBST长丝的缓弹性回复率增加。

不过, 当定伸长率大于20%时, 从拉伸曲线上可以看到, 此时PBST的大分子出现了抽拔现象, 纤维变形主要以塑性变形为主, 因此导致PBST长丝的急弹性回复性能与缓弹性回复性能变差。

PBST长丝在拉伸回复性能方面的表现, 也可以用图 2-3 的四元件力学模型来描述其拉伸回复性能。其中, 由弹簧  $E_0$  产生的变形, 在外力除去时会马上消失, 这部分变形为急弹性变形; 粘滞杯  $\eta_0$  产生的变形, 随外力作用时间的增加而积累, 当外力除去后将长久保持而不恢复, 构成了 PBST 长丝的塑性变形; 弹簧  $E$  与粘滞杯  $\eta$  形成的变形, 当外力除去后, 可以由弹簧  $E$  的作用而恢复, 但由于  $\eta$  的阻力, 变形的恢复是逐渐的, 所以形成了 PBST 长丝的缓弹性变形。

在定伸长多次循环拉伸中, 随着循环次数的增加, 外力作用在粘滞杯  $\eta_0$  上的时间也在增加, 最终导致 PBST 长丝塑性变形增加, 在伸长相同情况下, PBST 长丝的急弹性变形和缓弹性变形 (特别是缓弹性变形) 减少, 导致急弹性回复率和缓弹性回复率呈现下降的态势, 尤其是缓弹性回复率下降明显, PBST 长丝的弹性回复率也呈现下降的态势。

在拉伸循环次数不变的情况下, 随着定伸长率的增加, 弹簧  $E_0$  产生的变形会趋于稳定, 此后 PBST 长丝的伸长可能主要源自于弹簧  $E$  与粘滞杯  $\eta$  以及粘滞杯  $\eta_0$  的变形。其中, 当定伸长率小于 16% 时, PBST 长丝的变形可能主要源自于弹簧  $E$  与粘滞杯  $\eta$  的变形, 这使得 PBST 长丝的缓弹性变形增加, 最终导致 PBST 长丝的缓弹性回复率增加; 当定伸长率大于 16% 时, PBST 长丝的变形可能主要来自于粘滞杯  $\eta_0$  的变形, 这使得 PBST 长丝的塑性变形大大增加, 最终导致 PBST 长丝急弹性回复率、缓弹性回复率以及弹性回复率下降。

但总体而言, PBST 长丝仍具有较好的拉伸回复性能。在 10% 的定伸长范围内, 经过 9 次循环拉伸, PBST 长丝的弹性回复率仍保持在 96% 以上; 即使是在 20% 的定伸长情况下, 经过 9 次循环拉伸后, PBST 长丝的弹性回复率仍可达到 72%, 这充分显示了 PBST 纤维所具有的优良的弹性回复性能以及抗疲劳性能。

此外, 由表 2-2 可以看出, PET 长丝具有较低的拉伸回复性能, 而 PTT 长丝相对于 PBST 长丝, 急弹性变形较弱, 但缓弹性变形能力较强。因此当定伸长率小于 15% 时, PBST 长丝的拉伸回复性能略好于 PTT 长丝; 但当定伸长率大于 15% 后, PBST 长丝的拉伸回复性能则差于 PTT 长丝。PBST 长丝、PTT 长丝和 PET 长丝拉伸回复性能的差异也主要来自于其大分子结构的差异。对于 PET 长丝而言, 由于其分子链接近于直线, 具有较少的折叠结构 (见图 2-4), 其弯曲时

的链段长度为完全伸直时的 99.5%，因此弹性回复性较差；PTT 长丝，由于大分子链“Z”弹簧特征与易改变的三亚甲基的空间构型（见图 2-4），使其具有较好的拉伸回复性能，且缓弹性变形能力较强；而 PBST 长丝，则由于其软、硬链段并存以及 BT 硬链段的大分子结构特征，使其在较小的应力下能发生较大的形变，急弹性变形能力较大，但缓弹性变形能力较弱，当 PBST 长丝变形较大时，其拉伸回复性能却反而略低于 PTT 长丝。

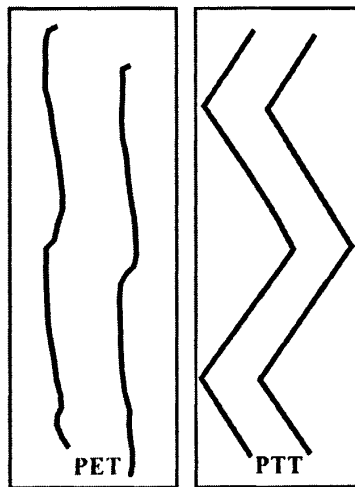


图2-4 PTT、PET大分子结构构象示意图

## 2.4 本章小结

本章研究了 PBST 长丝的拉伸性能和回复性能，以及定伸长率和拉伸循环次数的影响，比较了 PBST 纤维与 PTT 纤维和 PET 纤维拉伸回复性能的区别，并根据 PBST 纤维的力学模型分析了它的力学性能。

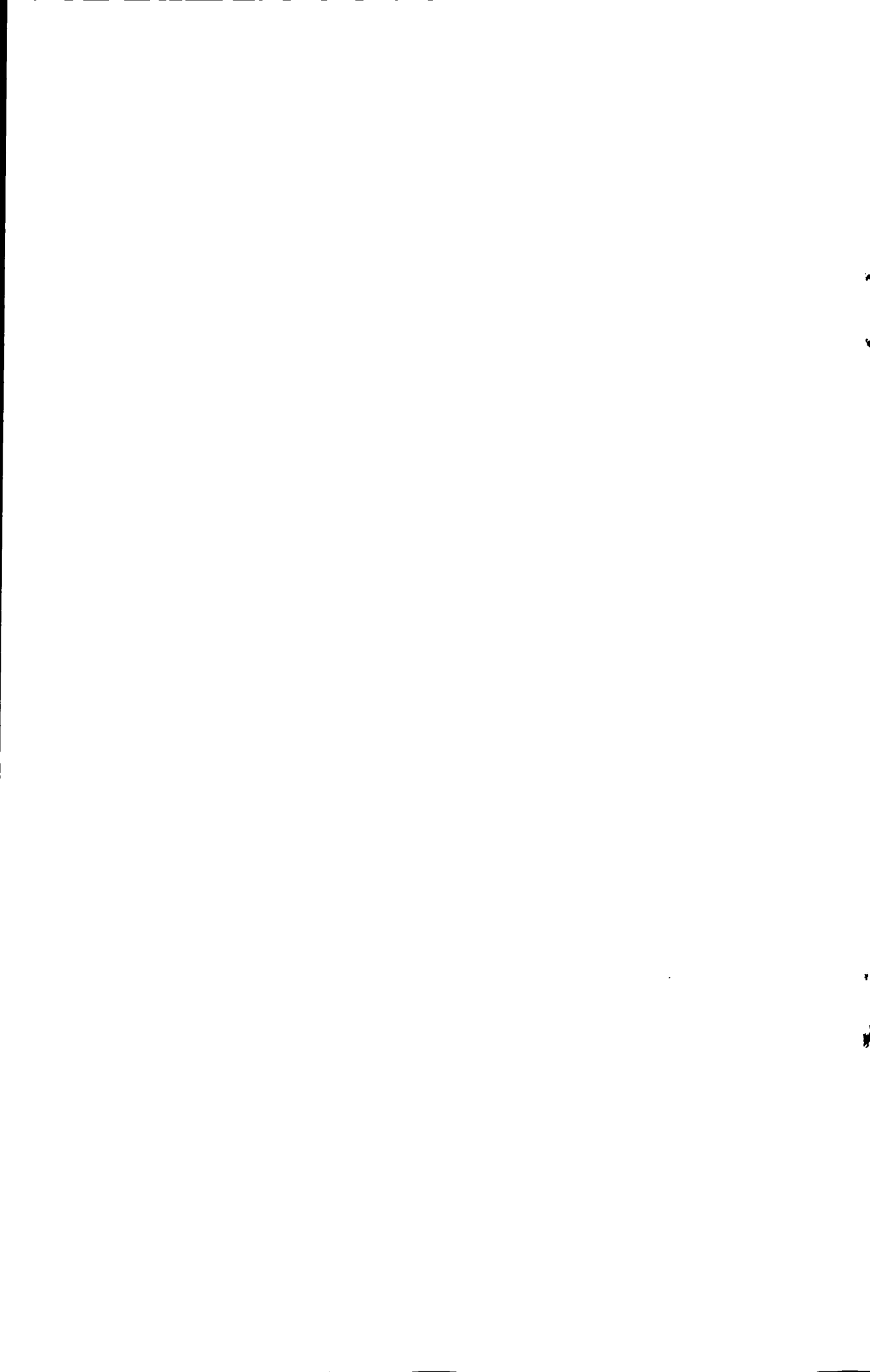
本章主要得出以下结论：

(1) PBST 长丝在 9% 左右的小变形下，其变形能力要优于 PTT 长丝，但当变形范围较大时，其变形能力则低于 PTT 长丝，PET 长丝具有较强的抗变形能力。

(2) 在定伸长率不变的情况下，随着拉伸循环次数的增加，PBST 长丝的急弹性回复率、缓弹性回复率以及弹性回复率均呈现下降的态势，尤其是缓弹性回复率下降明显；此外，在拉伸循环次数不变的情况下，随着定伸长率的增加，PBST 长丝的回复率也呈现下降的态势。

(3) PBST 纤维在多次拉伸条件下仍具有较为优良的弹性回复性能和优良的抗疲劳性能。

(4) PET 长丝具有较低的拉伸回复性能。



### 第三章 PBST/棉纱线的力学性能研究

纤维力学性能是影响面料力学性能的基本因素，但同时，由于纱线结构和加工工艺参数会影响或改变纤维的力学性能，因而也会影响面料的力学性能。第二章的分析表明 PBST 纤维具有良好的拉伸回复性能，那么，PBST/棉纱线的力学性能如何呢，因此，本章将通过实验从捻度、混纺比和纱线结构等三个方面来探讨纱线加工方式及加工工艺参数对 PBST/棉纱线的力学性能影响，同时比较 PBST/棉纱线与 PTT/棉纱线、PET/棉纱线拉伸回复性能的差异，为 PBST 长丝在棉弹性面料的开发应用中提供相关技术资料。

#### 3.1 实验

##### 3.1.1 试样

本课题共纺制了 28 种纱，具体的试样规格见表 3-1。

表 3-1 试样品种与规格

品种	纱线细度	PBST/棉 混纺比	捻度(捻/m)
PBST 合股丝	12tex×2	100/0	500
PBST 与棉单纱的合股纱	(12+18) tex	40/60	400, 450, 500, 550, 600
PBST/棉包芯纱	24tex	50/50	400, 450, 500, 550, 600
PBST/棉包芯纱	30tex	40/60	400, 450, 500, 550, 600
PBST/棉包芯纱	40tex	30/70	400, 450, 500, 550, 600
PBST/棉包芯纱	60tex	20/80	400, 450, 500, 550, 600
PTT 与棉单纱的合股纱	30.7tex	40/60	500
PET 与棉单纱的合股纱	27.7tex	35/65	500

##### 3.1.2 拉伸性能测试条件

温度：20±2℃；相对湿度：65±2%；试样夹持距离 250 mm，拉伸速度 250 mm/min，预加张力 0.05±0.01 cN/dtex。

##### 3.1.3 定伸长一次拉伸弹性回复性能测试方法

先将试样拉伸至设定的定伸长数值，停顿30s，然后回复，当纱线的内应力降低至设定的预加张力时，伸长回复值即为纱线的急弹性变形。此时，夹持器继续回复到原位，再停顿30 s，然后继续拉伸，当纱线的内应力等于设定的预加张

力时，对应的拉伸值即为塑性变形。纱线的总变形与急弹性变形和塑性变形之差即为纱线的缓弹性变形<sup>[47]</sup>。具体计算公式同2.1.3。

定伸长一次拉伸弹性回复性能的测试条件是：温度  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度  $65 \pm 2\%$ ，试样夹持距离  $500 \text{ mm}$ ，预加张力  $0.05 \pm 0.01 \text{ cN/dtex}$ ，拉伸速度  $500 \text{ mm/min}$ 。定伸长值分别为夹持距离的  $3\%$ 、 $6\%$ 。

### 3.1.3 定伸长反复拉伸弹性回复性能测试方法

先将试样拉伸至设定的定伸长值，停顿  $30\text{s}$ ，然后回复到原位，停顿  $30\text{s}$ ，开始第二次拉伸，重复第一次拉伸过程直至拉伸  $9$  次，记录拉伸弹性回复性能的各项指标。定伸长反复拉伸的测试条件和计算公式与定伸长一次拉伸时相同。

## 3.2 拉伸性能的测试结果与讨论

图 3-1 是棉单纱、PBST 长丝、PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸曲线图。

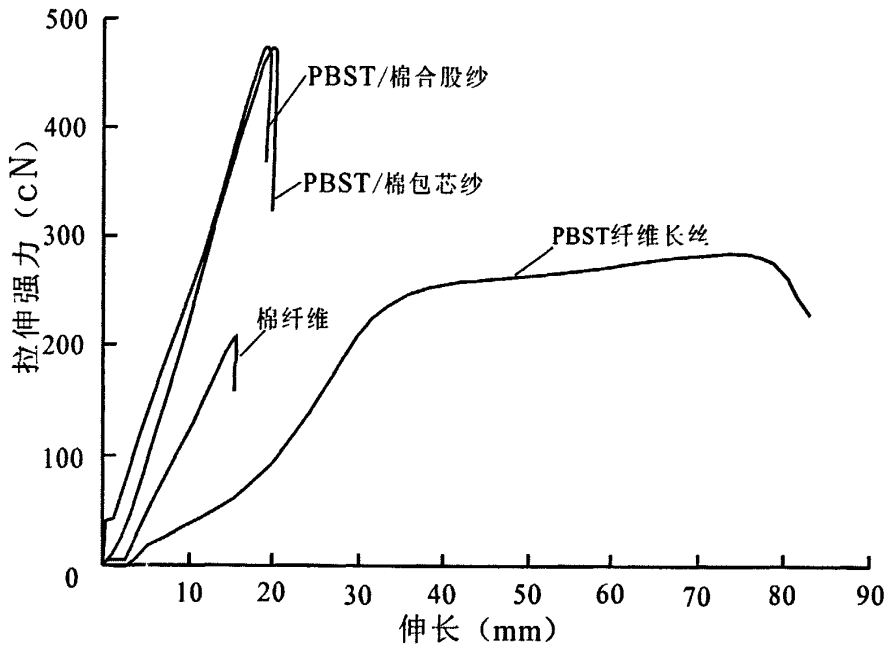


图 3-1 棉单纱、PBST 长丝、PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸曲线

从图 3-1 中可看出，PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸曲线形状与棉单纱相同，拉伸模量较大，且没有明显的屈服点。这表明相对于 PBST 长丝，PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸性能更主要的是取决于棉纤维部分的拉伸性能。此外，相对于 PBST/棉包芯纱，PBST/棉合股纱的初始模量较大，在小负荷下，PBST/棉包芯纱更易变形。

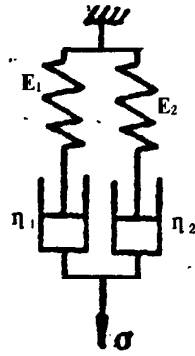


图 3-2 PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的力学模型

PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸性能类似于图 3-2 的力学模型。其中，弹簧  $E_1$  类似于 PBST 长丝的弹性变形，粘滞杯  $\eta_1$  类似于 PBST 长丝的塑性变形，弹簧  $E_2$  类似于 PBST 长丝与棉单纱的合股纱中棉单纱或 PBST/棉包芯纱中棉纤维的弹性变形，粘滞杯  $\eta_2$  代类似于 PBST 长丝与棉单纱的合股纱中棉单纱或 PBST/棉包芯纱中棉纤维的塑性变形。由于弹簧  $E_2$  的弹性常数远大于弹簧  $E_1$ ，而粘滞系数  $\eta_2$  相对较小，因此当纱线受力伸长时，将主要表现出弹簧  $E_2$  和粘滞杯  $\eta_2$  的拉伸性能。随着纱线伸长的增加，由于弹簧  $E_2$  所能产生的变形较小，粘滞杯  $\eta_2$  将产生较大的塑性变形，当棉纤维发生相互抽拔而无法承受外加负荷时，此时所有的负荷都将由 PBST 长丝单独承受，由于该负荷已超过了 PBST 长丝的承受能力，因此最终导致纱线的立即断裂。

当纱线伸长到一定值后，去除外力，此时纱线将在弹簧  $E_1$  和  $E_2$  的作用下发生拉伸回复，由于弹簧  $E_1$  所产生的变形要大于弹簧  $E_2$ ，因此当弹簧  $E_2$  恢复原位后，弹簧  $E_1$  仍将继续回缩，但由于  $\eta_2$  的阻力，使弹簧  $E_1$  的回缩受阻，弹簧  $E_1$  受阻的程度取决于  $\eta_2$  阻力的大小。当棉纤维产生的塑性变形越大， $\eta_2$  的阻力越大，因此纱线的拉伸回复率越小。

综上所述，由于 PBST 长丝与棉单纱的合股纱与 PBST/棉包芯纱的结构不同，因此它们在拉伸时所表现出的性能也有一定的差异。相对于 PBST/棉包芯纱，由于 PBST 长丝与棉单纱的合股纱中棉纤维之间的抱合力较大，因此粘滞系数  $\eta_2$  相对较大，当纱线受力伸长时，PBST 长丝与棉单纱的合股纱的拉伸模量较大，断裂强度较高，而 PBST/棉包芯纱的断裂伸长率则相对较大。

### 3.3 拉伸回复性能的测试结果与讨论

#### 3.3.1 捻度对 PBST/棉纱线拉伸回复性能的影响

捻度是纺纱生产工艺的一个重要参数，捻度选择适当与否，直接影响着纱线质量、产量和使用性能。随着捻度的增大，纱线中纤维之间的径向压力也增大，这对纱线的拉伸回复性能会产生一定的影响。因此研究捻度对 PBST/棉纱线拉伸

回复性能的影响显得尤为重要。

PBST 长丝与 PBST 合股丝、不同捻度的 PBST 长丝与棉单纱的合股纱和 PBST/棉 (40/60) 包芯纱的拉伸弹性回复性的测试结果见图 3-3~图 3-5。

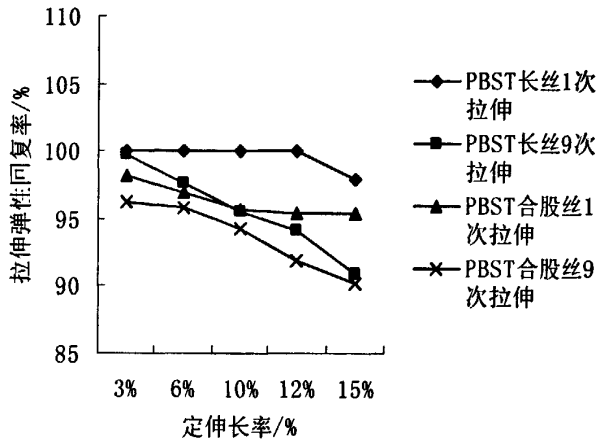


图3-3 PBST长丝与PBST合股丝拉伸弹性回复率

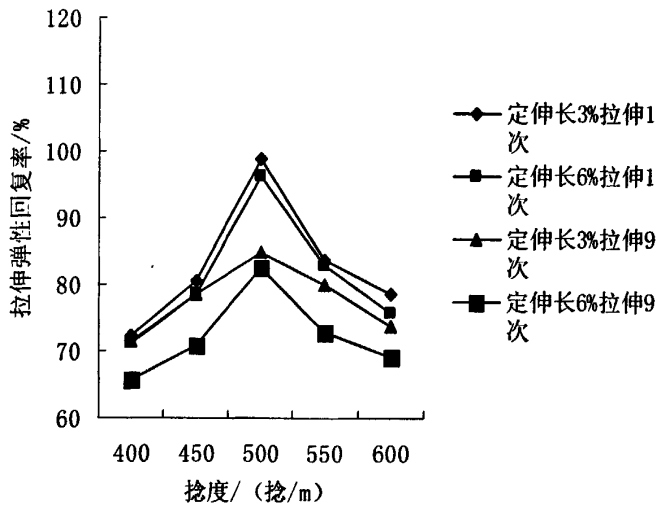


图3-4 PBST与棉单纱的合股纱的拉伸弹性回复率

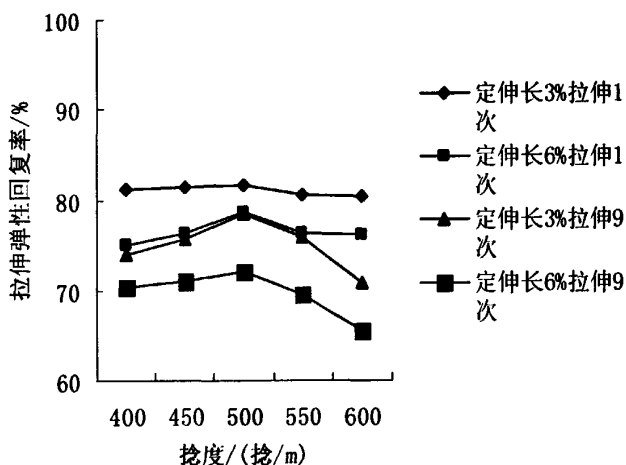


图3-5 PBST/棉(40/60)包芯纱的拉伸弹性回复率

在第二章的分析中得知，当定伸长率小于16%时，PBST长丝在一次拉伸中的变形主要以弹性变形为主，具有很高的拉伸回复率。但从图3-3可以看到，无论是1次拉伸还是循环9次拉伸，PBST合股丝的拉伸弹性回复率都小于PBST长丝，这说明捻度在一定程度上阻碍了合股丝的拉伸回复性能。产生这种现象的原因，可能是因为捻度的存在使得纤维之间产生了径向压力，纤维之间的摩擦力增大。当合股丝伸长较小时，纤维之间的相对滑移较少，则纤维之间的摩擦力对纤维伸长回复的阻碍作用也较小，也即捻度对合股丝拉伸弹性回复率的影响较小；当合股丝伸长较大时，由于合股丝中单根纤维性能的差异，使纤维之间发生较大的滑移，此时纤维之间的摩擦力对纤维伸长回复就会起到较大的阻碍作用，使PBST长丝的伸长回复率降低。因此，随着纱线伸长的增大，捻度的影响作用越明显，PBST合股丝的拉伸回复率也越低。但在捻度一定时，这种阻碍作用也是一定的，因此随着纱线伸长的增大，捻度对合股丝拉伸回复性能的影响也会趋于稳定。从图3-3可以看到，当定伸长率超过10%后，PBST合股丝的拉伸回复率不再出现明显下降的趋势。

而在多次拉伸时，从第二章的分析得知，随着拉伸次数的增加，PBST长丝的塑性变形增加，特别是当定伸长率增大时，PBST长丝的塑性变形更大，因此9次拉伸后的PBST长丝的拉伸回复率要低于1次拉伸，且随着定伸长率的增加，这种差异也在不断增加。此外，在多次拉伸中，由于PBST长丝的变形有较大幅度是塑性变形，且随着定伸长率的增大，PBST长丝的塑性变形也在增大，因此随着塑性变形对PBST合股丝拉伸回复率影响作用的加大，捻度对弹性回复率的影响而导致的对PBST合股丝拉伸回复率的影响作用就会减弱，最终随着塑性变形的增大，PBST长丝和PBST合股丝的拉伸回复率趋于一致。



PBST/棉合股纱的拉伸回复性能则取决于棉单纱和PBST长丝拉伸回复性能的综合作用。从图3-2中PBST/棉纱线的力学模型可以得知,当PBST/棉合股纱受到拉伸时,由于棉单纱的变形能力较弱,因此合股纱的伸长变形主要取决于棉单纱的伸长变形;但当外力去除后,合股纱的拉伸回复率则取决于棉单纱的变形情况以及PBST长丝的拉伸回复能力。当合股纱捻度较低时,由于合股纱中纤维之间的抱合力较弱,纤维之间易产生滑移,即阻尼系数 $\eta_2$ 较小,因此棉单纱的塑性变形较大,外力去除后,合股纱在PBST长丝的回弹作用下发生回复,但由于棉单纱塑性变形较大,影响了合股纱的回复,使PBST/棉合股纱的拉伸回复率降低。随着合股纱捻度的增加,合股纱中棉纤维之间的抱合力以及PBST长丝与棉单纱之间的抱合力增强,阻尼系数 $\eta_2$ 变大,棉单纱易产生更多的弹性变形,但同时由于PBST长丝之间的抱合力增加,也使PBST长丝的回弹性能减弱。当捻度小于一定值时,此时影响PBST/棉合股纱拉伸回复率的因素可能主要是棉单纱的塑性变形,因此随着捻度的增加,PBST合股纱的拉伸回复性能呈现增强的趋势;但当捻度达到一定值后,由于捻度对PBST长丝回弹性的阻碍作用加大,最终使PBST/棉合股纱的拉伸回复率降低。从图3-4可以看到,在本实验中,这个临界捻度值是500捻/m。

PBST/棉包芯纱的拉伸回复机理与PBST/棉合股纱相似,但由于两者纱线结构不同,捻度对纱线拉伸回复性能的影响程度也不一样。由图3-5可知,在PBST/棉包芯纱中,随着捻度的增加,由于棉纤维包覆PBST长丝的包缠结构,使得包芯纱中纤维之间的抱合力不会有较大幅度的提高,因此棉纤维不会产生较大的弹性回复率,PBST长丝的拉伸回复性能也不会受到较大的影响,从而使得PBST/棉包芯纱的拉伸回复率变化不明显。但与PBST/棉合股纱相同,PBST/棉包芯纱也有一个500捻/米的临界捻度值,当捻度小于临界值时,随着捻度的增加,PBST/棉包芯纱的拉伸回复率呈现上升的趋势,而当捻度大于临界值时,随着捻度的增加,PBST/棉包芯纱的拉伸回复率呈现下降的趋势。

### 3.3.2 混纺比含量对PBST/棉纱线拉伸回复性能的影响

混纺比含量是纺纱生产工艺的另一个重要参数,混纺比选择是否适当,对纱线的质量、产量和使用性能,特别是纱线的质量产生较大的影响。PBST/棉包芯纱中的PBST长丝与棉纤维的拉伸回复性能不同,因此它们的含量直接影响着包芯纱的拉伸回复性能。不同混纺比含量的PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率如图3-6。

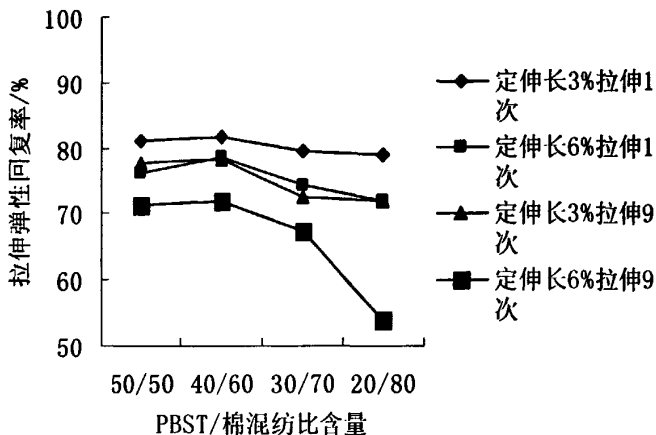


图3-6 PBST/棉包芯纱（500捻/m）混纺比含量不同时的拉伸弹性回复率

图3-6是不同混纺比的PBST/棉包芯纱在500捻/m时的拉伸弹性回复率。根据3.2的分析得知，PBST/棉包芯纱的拉伸回复性能取决于棉纤维和PBST长丝拉伸回复性能的综合影响。从图3-6可以看到，棉纤维的存在在较大程度上阻碍了PBST长丝的回复，影响了PBST长丝的拉伸回复性能。如在500捻/m、定伸长率为6%的条件下，1次拉伸，PBST/棉包芯纱（20/80）的拉伸弹性回复率只是PBST长丝的72%；9次拉伸，PBST/棉包芯纱（20/80）的拉伸弹性回复率由PBST长丝的95.7%降到了52%。

此外，从图3-6还可以发现，当棉的含量从50%增大到60%时，PBST/棉包芯纱的拉伸回复率略有增大，但当棉的含量超过60%时，PBST/棉包芯纱的拉伸回复率又呈下降的态势。这说明在捻度相同、PBST长丝细度不变的情况下，棉纤维含量对PBST/棉包芯纱拉伸弹性回复率的影响作用有二个方面：一方面，随着棉纤维含量的增加，PBST长丝回复时所要克服的阻力增大，从而影响了PBST长丝的拉伸回复性能，降低了PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率；而另一方面，棉纤维含量的增加，使纱线变粗，棉纤维之间的抱合力加大，棉纤维之间相对滑移的容易程度减少，从而当包芯纱被拉伸时，棉纤维会产生更多的弹性变形，又会提高PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率。棉纤维含量对PBST/棉包芯纱拉伸弹性回复率的影响正是这二方面综合作用的结果。如在1次和9次循环拉伸、定伸长率3%的情况下，随着棉纤维含量的增加，PBST长丝回复时所要克服的阻力增大，但同时，由于棉纤维之间抱合力提高，使PBST/棉包芯纱的塑性变形减少，因此，最终导致PBST/棉包芯纱的拉伸回复率受棉纤维含量的影响并不大。而在9次循环拉伸、定伸长率6%以及棉纤维含量80%的情况下，由于多次拉伸和定伸长率较大，使棉纤维在拉伸过程中产生较多的相对滑移，再加上PBST长丝回复时所要克服的阻力很大，因此使PBST/棉包芯纱的拉伸回复率急剧下降。

综上所述，在小变形下，PBST/棉包芯纱能保持良好的拉伸回复性能，但在变形较大的情况下，多次拉伸会使PBST/棉包芯纱的拉伸回复性能受到较大程度的破坏。

### 3.3.3 纱线结构对 PBST/棉纱线拉伸回复性能的影响

根据 3.3.1 的分析得知，不同的纱线结构，棉纤维对 PBST/棉纱线拉伸回复性能的影响也不同。图 3-7 是 PBST 长丝与棉单纱的合股纱以及 PBST/棉包芯纱的拉伸回复率。

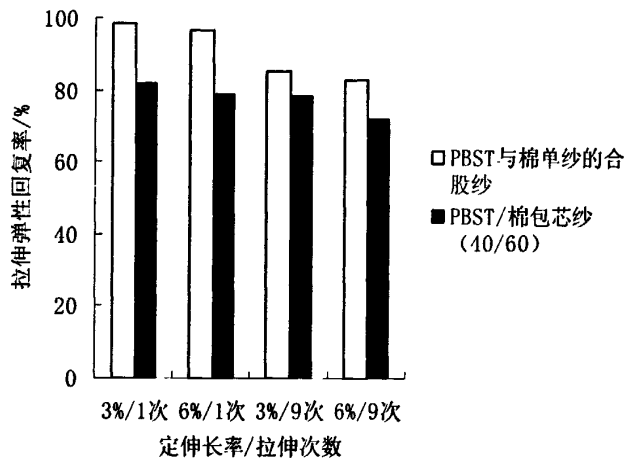


图 3-7 不同结构纱线的拉伸弹性回复率

从图3-7可以看出，在混纺比相同的情况下，PBST与棉单纱的合股纱的拉伸弹性回复率要远大于PBST/棉的包芯纱。造成这种现象的原因正如3.3.1所分析的，在PBST长丝与棉单纱的合股纱中，由于棉纤维之间首先包缠形成单纱，然后再与PBST长丝包缠，相对于PBST/棉包芯纱，棉纤维之间的抱合力较强，当合股纱受力伸长时，在相同的拉伸条件下，棉纤维之间的相对位移较少，并能产生一定的弹性变形，因此当外力去除后，在PBST长丝回弹性的作用下，合股纱能产生较大的弹性回复率。而在PBST/棉包芯纱中，由于棉纤维之间的抱合力相对较弱，当包芯纱受力伸长时，棉纤维之间容易产生相对位移，且弹性变形较小，因此当外力去除后，PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率就较低；而且由于在第一次拉伸时，PBST/棉包芯纱就产生了较大的塑性变形，因此在此后的多次拉伸中，当伸长率不变时，PBST/棉包芯纱新产生的塑性变形就较小，使得拉伸循环次数对PBST/棉包芯纱的拉伸回复率的影响相对于PBST与棉单纱的合股纱而言较小。

### 3.3.4 PBST/棉与 PTT/棉及 PET/棉合股纱的拉伸回复性能的比较

相同捻度（500 捻/m）的 PBST/棉、PTT/棉和 PET/棉合股纱的拉伸弹性回复率的测试结果见图 3-8 和图 3-9。

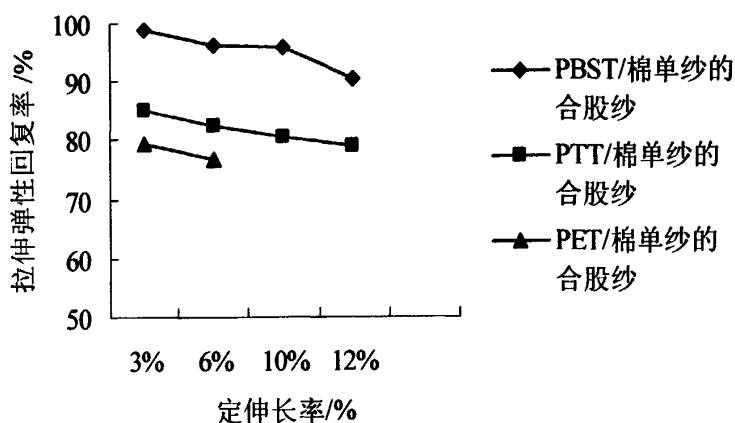


图 3-8 试样拉伸 1 次时的拉伸弹性回复率

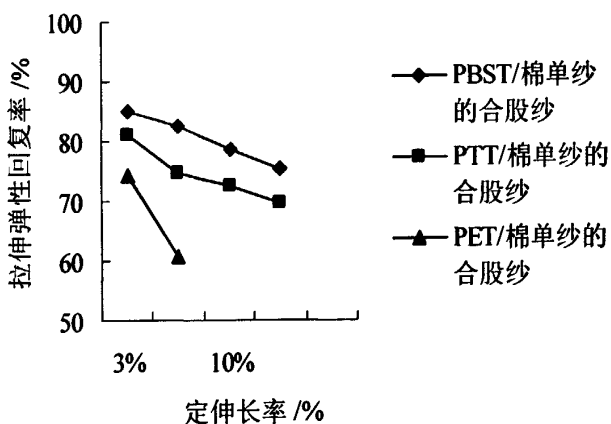


图 3-9 试样拉伸 9 次时的拉伸弹性回复率

从第二章的分析中已经知道，相对于 PBST 和 PTT，PET 长丝的拉伸回复性能最差，而在定伸长率小于 15% 时，PBST 长丝的拉伸回复性能略好于 PTT 长丝。因此当 PET、PTT 和 PBST 长丝与棉单纱形成合股纱后，其拉伸回复率也会产生一定的差异。由图 3-8 和图 3-9 可以看出，不管是拉伸 1 次还是拉伸 9 次，以及随着定伸长率的增加，在定伸长率小于 12% 的条件下，PBST/棉合股纱的拉伸弹性回复性均要好于 PTT/棉和 PET/棉的合股纱。其中，PET/棉合股纱的拉伸回复性最差，并且在定伸长达到 10% 时就产生了疲劳断裂。此外，相对于 PTT/棉合股纱，多次拉伸对 PBST/棉合股纱拉伸回复性能的影响较大。在 1 次拉伸时，PBST/棉合股纱的拉伸回复性能要远优于 PTT/棉合股纱；但当 9 次循环拉伸后，PBST/棉合股纱的拉伸回复性能则与 PTT/棉合股纱接近。这说明 PBST 长丝耐多次拉伸的能力较 PTT 长丝弱。

### 3.4 本章小结

本章从捻度、混纺比和纱线结构三个方面探讨了纱线加工方式及加工工艺参数对PBST/棉纱线的力学性能影响,同时比较了PBST/棉纱线与PTT/棉纱线、PET/棉纱线拉伸回复性能的差异,得出如下结论:

(1) PBST长丝与棉单纱的合股纱以及PBST/棉包芯纱的拉伸曲线形状与棉单纱相同,拉伸模量较大,且没有明显的屈服点。这表明相对于PBST长丝,PBST长丝与棉单纱的合股纱以及PBST/棉包芯纱的拉伸性能更主要的是取决于棉纤维部分的拉伸性能。

(2) 捻度在一定程度上阻碍了合股丝的拉伸回复性能,其中,在一次拉伸中,随着定伸长率的增加,PBST合股丝的拉伸回复率呈现下降的趋势,并最终趋于稳定。而在多次拉伸时,随着拉伸次数的增加,PBST长丝的塑性变形增加,捻度对弹性回复率的影响而导致的对PBST合股丝拉伸回复率的影响作用就会减弱。经试验得知,500捻/m的捻度比较合适。

(3) 在捻度相同、PBST长丝细度不变的情况下,一方面,随着棉纤维含量的增加,PBST长丝回复时所要克服的阻力增大,从而影响了PBST长丝的拉伸回复性能,降低了PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率;而另一方面,棉纤维含量的增加,使纱线变粗,棉纤维之间的抱合力加大,棉纤维之间相对滑移的容易程度减少,从而当包芯纱被拉伸时,棉纤维会产生更多的弹性变形,又会提高PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率。当PBST/棉包芯纱采用40/60的混纺比时,纱线的拉伸弹性回复率较好。

(4) 在混纺比相同的情况下,PBST与棉单纱的合股纱的拉伸弹性回复率要远大于PBST/棉的包芯纱。

(5) 不管是拉伸1次还是拉伸9次,以及随着定伸长率的增加,在定伸长率小于12%的条件下,PBST/棉合股纱的拉伸弹性回复均要好于PTT/棉和PET/棉的合股纱。其中,PET/棉合股纱的拉伸回复性最差,并且在定伸长达10%时就产生了疲劳断裂。

## 第四章 PBST/棉织物的性能分析及风格研究

舒适性为当今纺织品加工的主流方向,而织物弹性作为影响服装舒适性的一个重要指标,目前也越来越受到人们的重视,弹性纤维的开发应用日趋增多。本章通过对PBST/棉织物的抗皱性能、拉伸回复性能以及织物风格的分析,以期PBST纤维在服用领域的应用提供一定的参考。

### 4.1 试样

本次共织造了9种样布,其上机工艺如表4-1所示。

表4-1 样布上机工艺

序号	经纱	纬纱	纬纱混纺比	纬纱捻度 (捻/m)	纱线线密度(tex)	织物密度	织物组织
1#	纯棉股线	PBST/棉单纱的合股线	40/60	500	19.4×30.0	389×178	平纹
2#	纯棉股线	PBST/棉单纱的合股线	40/60	500	19.4×30.0	300×178	平纹
3#	纯棉股线	PBST/棉单纱的合股线	40/60	500	19.4×30.0	300×102	平纹
4#	纯棉股线	PBST/棉单纱的合股线	40/60	500	19.4×30.0	300×102	1/2斜纹
5#	纯棉股线	PBST/棉单纱的合股线	40/60	500	19.4×30.0	300×102	5/3经面 缎纹
6#	纯棉股线	PBST/棉包芯纱	40/60	500	19.4×30.0	300×102	1/2斜纹
7#	纯棉股线	纯棉股线	100	500	19.4×19.4	300×102	1/2斜纹
8#	纯棉股线	PTT/棉单纱的合股线	40/60	500	19.4×30.7	300×102	1/2斜纹
9#	纯棉股线	PET/棉单纱的合股线	35/65	500	19.4×27.7	300×97	1/2斜纹

### 4.2 PBST/棉织物的力学性能分析

## 4.2.1 PBST/棉织物拉伸性能分析

### 4.2.1.1 PBST/棉织物拉伸性能测试方法

本实验按照国家标准 GB/T 3923.1-1997 织物拉伸性能第 1 部分“断裂强力 and 断裂伸长率的测定条样法”测试织物纬向的拉伸性能。

测试条件为：温度 20℃、相对湿度 65%，预调湿 48 小时后进行测试，试样有效宽度为 50mm，夹距为 200mm，预加张力为 2N，等速拉伸速度为 100mm/min。试样在测试前，先在温度为 20℃、相对湿度 65% 的标准大气条件下预调湿 48 小时。测试仪器为 YG065 型电子织物强力仪。

### 4.2.1.2 PBST/棉织物拉伸性能测试结果及分析

图 4-1 是不同织物的纬向拉伸曲线。

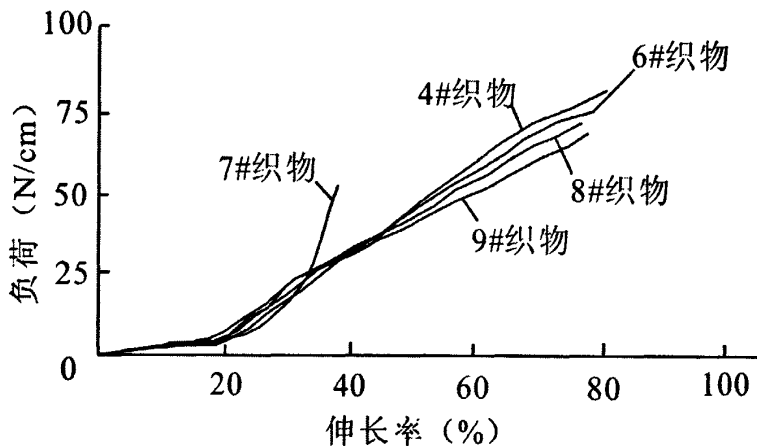


图4-1 试样的纬向拉伸曲线

由图4-1可知，不同织物，其纬向拉伸的初始模量基本相同，且除全棉织物以外，其它织物的拉伸曲线也基本相似。全棉织物在拉伸过程的变形能力较弱，因此其断裂伸长率远远小于其它织物；PBST/棉包芯纱织物的断裂伸长率则最大，其次是PBST/棉合股纱织物，PTT/棉合股纱织物与PET/棉合股纱织物的断裂伸长率则基本相同。此外，在伸长率小于40%的情况下，PBST/棉包芯纱织物、PBST/棉合股纱织物的变形能力要略大于PTT/棉合股纱织物与PET/棉合股纱织物，但当伸长率大于40%时，PTT/棉合股纱织物与PET/棉合股纱织物的变形能力要略大于PBST/棉包芯纱织物和PBST/棉合股纱织物。

## 4.2.2 PBST/棉织物拉伸回复性能分析

### 4.2.2.1 PBST/棉织物拉伸回复性能测试方法

本实验按照国家标准 FZ/T 01034-2008 《纺织品 机织物拉伸弹性实验方法》，采用定伸长反复拉伸方法测试织物纬向的拉伸回复性。

测试条件为：温度 20℃、相对湿度 65%，试样有效宽度为 50mm，夹距为 200mm，预加张力为 0.3N，拉伸速度为 20mm/min，反复拉伸次数为 3 次和 5 次，拉伸保持时间为 1min，回复停顿时间为 3min。

此外，试样在测试前，先在温度为 20℃、相对湿度 65%的标准大气条件下预调湿 48 小时，测试仪器为 YG065 型电子织物强力仪。

#### 4.2.2.2 PBST/棉织物拉伸回复性能测试结果及分析

当织物纬向被拉伸时，纬纱首先由弯曲状态逐渐伸直，并对经纱产生挤压，使经纱更加弯曲；此后，如纬纱所承受的负荷大于经纬纱线之间的摩擦阻力，则纬纱发生滑移；如经纬纱线之间的摩擦阻力较大，影响了纱线之间的滑移，或织物的伸长长度超过了纬纱的伸长程度，则纬纱和纬纱中的纤维出现变形，直至最后纬纱断裂。因此织物纬向的变形主要来源于纬纱的伸直、纬纱和纤维的变形。其中，纬纱的伸直长度取决于纬纱的屈曲波高，经纱的密度越大，纬纱的屈曲波就越高，在拉伸中纬纱能产生的伸长也就越大；此外，经纬纱的交织点越多，纬纱的屈曲波也越高，在拉伸中纬纱也能产生较大的伸长。

当织物所受的外力去除后，织物也会产生拉伸回复。影响织物拉伸回复率的因素除了纱线和纤维的拉伸回复性能以外，经纬纱之间的摩擦阻力也起到了一定的影响作用。一方面，如经纬纱之间的摩擦阻力阻碍了纱线之间的滑移，则当织物所受的负荷去除后，纬纱在经纱挤压力的作用下，会恢复其屈曲波状态，从而使织物的变形成为弹性变形；但同时，经纬纱之间的摩擦阻力也会阻碍纱线和纤维本身结构的拉伸回复。影响织物经纬纱之间摩擦阻力的因素主要是经纬纱之间的交织点，因此织物组织、经纬密度都会影响织物的拉伸回复率。

图 4-2 是不同组织结构的 3#、4#和 5#PBST/棉合股纱试样的拉伸弹性回复性能测试结果。

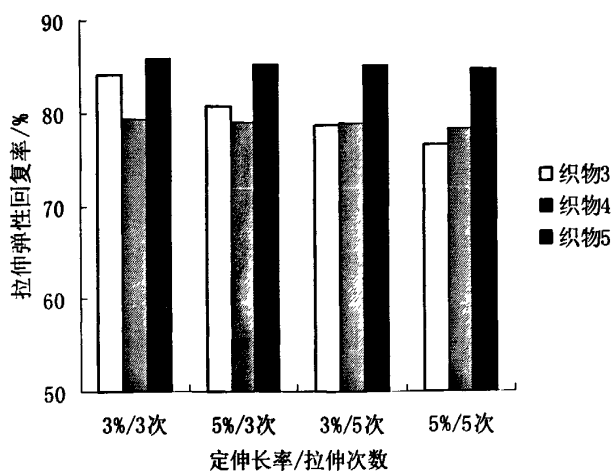


图 4-2 不同组织结构的 PBST/棉织物的拉伸弹性回复率



从图 4-2 可以看出,在相同的经纬密度下,5#试样由于是缎纹组织,纱线之间的交织点最少,使得纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能得以较好实现,从而表现出较好的拉伸回复性能。3#平纹织物,纱线之间的交织点较多,纱线不易滑移,尽管阻碍了纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能,但同时也使得纬纱由于伸直而产生的变形能得以回复,因此,在拉伸次数较少的情况下,仍具有较好的拉伸回复性能。但随着拉伸次数的增加,由于纱线之间的滑移增多,使经纬纱之间的挤压力减弱,经纬纱的屈曲结构趋于稳定,从而使纱线由于伸直而产生的变形成为塑性变形,织物的弹性变形减少,从而降低了织物的拉伸回复性能。4#斜纹试样的交织点少于 3#试样,因此纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能受到的影响相对较少,当 3#试样的织物弹性变形减少后,其拉伸回复性能就要好于 3#试样。

图 4-3 是经纬密不同的 1#、2#和 3#PBST/棉合股纱试样的拉伸弹性回复性能测试结果。

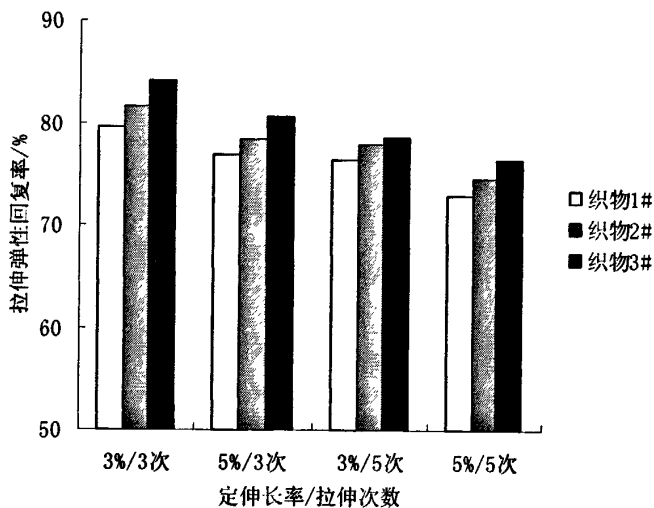


图 4-3 不同密度的 PBST/棉织物的拉伸弹性回复率

在图 4-3 中,试样 1#的经密大于试样 2#,试样 2#的纬密大于试样 3#,而且试样 1#、2#和 3#均为平纹织物,纱线之间的交织点较多。从上面的分析我们已经得知,3#试样中经纬纱之间的摩擦阻力已经能够使得织物具有较好的弹性变形,因此当 2#试样纬密增加时,尽管纱线之间的摩擦阻力增大,但对进一步提高织物弹性的作用有限,反而却阻碍了纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能,因此最终导致织物的拉伸回复性能下降。同样,1#试样经密的进一步增加,又使这种阻碍作用加剧,试样的拉伸回复性能进一步降低。

图 4-4 是经纬密度和组织结构相同,纱线结构不同的 4#和 6#试样的拉伸弹

性回复率测试结果。

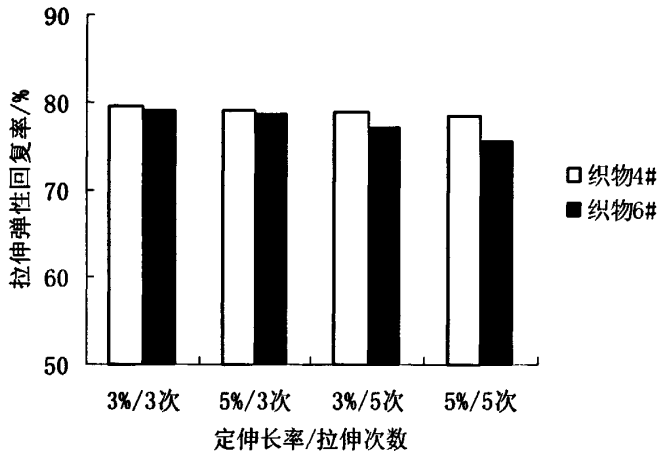


图 4-4 不同纱线结构的 PBST/棉织物的拉伸弹性回复率

在第三章的分析中已经知道, PBST/棉合股纱的拉伸回复性能要好于 PBST/棉包芯纱, 图 4-4 的测试结果也反映了这一情况。但相对于 PBST/棉合股纱和 PBST/棉包芯纱拉伸回复率的差异, 织物之间拉伸回复率的差异较小。这也说明了影响织物拉伸回复性能的因素, 除了纱线的性能外, 还有织物的结构。而随着拉伸循环次数的增加, 纱线之间的相对滑移程度增加, 此时纱线对织物拉伸回复性能的影响加大, 因此织物之间的拉伸回复率的差异变大。

图 4-5 是同样紧度及组织结构条件下, 采用不同原料作为纬纱的 4#、7#、8# 和 9# 试样的拉伸弹性回复率测试结果。

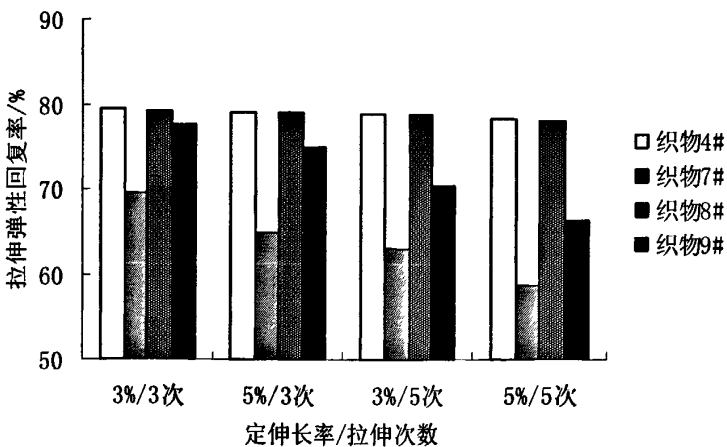


图 4-5 PBST/棉织物与全棉和 PTT/棉及 PET/棉织物的拉伸弹性回复率

从图 4-5 可以看到, 由于棉纱的拉伸回复性能较差, 因此纯棉织物的拉伸回

回复率最小，其次是 PET/棉织物。从第三章得知，PET 长丝的耐疲劳性能较差，因此拉伸循环次数的增加大大降低了其织物的拉伸回复率。PBST/棉与 PTT/棉织物的拉伸回复率基本相同，这说明两者都具有较好的拉伸回复性能。

### 4.3 PBST/棉织物抗皱性能分析

#### 4.3.1 PBST/棉织物抗皱性能测试方法

本实验按照国家标准 GB/T 3819-1997《纺织品 织物折痕回复性的测定 回复角法》，采用垂直法测量织物的抗皱性。

测试条件为：温度 20℃，相对湿度 65%，压力负荷 10N，受压面积 18mm×15mm，受压时间 5min ± 1s。先测量急弹性回复角，过 5 分钟后，再测量缓弹性回复角。

此外，试样在测试前，先在温度为 20℃、相对湿度 65%的标准大气条件下预调湿 48 小时，测试仪器为 YG541B 织物折皱弹性测试仪。

#### 4.3.2 PBST/棉织物抗皱性能测试结果及分析

9 种样布的纬向折皱回复性能测试结果见表 4-1。

表 4-1 样布的折皱回复角

织物品种	纬向急弹性回复角	纬向缓弹性回复角	平均回复角
1#	64°	69.4°	66.7°
2#	64.4°	74.4°	69°
3#	76°	87.4°	81.7°
4#	89.8°	104°	96.9°
5#	83.2°	92.8°	88°
6#	66.4°	77.6°	72°
7#	55.2°	63°	59.1°
8#	89°	95°	92°
9#	67°	74°	70.5°

织物的折皱回复性能取决于纱线的弹性回复性能，此外，纱线相对移动时阻力的大小将影响纱线的受力和变形，因此织物的抗皱性也与纱线之间的摩擦阻力有关。

从表 4-1 可以看到，尽管经纬密度相同，但 5#试样由于是缎纹组织，纱线之间的交织点最少，纱线之间容易产生滑移，当织物产生折痕时，尽管纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能得以较好实现，但由于纱线弹性变形不大，因此织物的折皱回复角要低于 4#试样；3#平纹织物，纱线之间的交织点较多，虽然纱线不

易滑移,但纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能也受到了影响,同时,由于纱线不易滑移,在相同的弯曲伸长中,纱线可能会产生更多的塑性变形,从而也影响了织物的折皱回复性。4#斜纹试样的交织点介于 3#与 5#之间,即使纬纱 PBST/棉合股纱能保持一定的弹性回复性能,同时又在一定程度上阻碍了纱线之间的相对滑移,使织物产生折痕时,纱线具有较大的弹性变形,因此,在三种织物中具有最好的折皱回复性。

2#织物,由于纬密大于 3#织物,因此纱线之间的摩擦阻力较大,尽管纬纱增多有利于提高织物的抗皱性能,但总体而言,其抗皱性能要低于 3#试样。

1#试样,由于经密大于 2#试样,因此纱线之间的摩擦阻力更大,这也使织物的抗皱性能进一步降低。当相比于 2#试样,其抗皱性能降低的并不多,这说明经纬密度对织物抗皱性能的影响会趋于稳定。

6#试样与 4#试样的织物结构相同,但由于纬纱是 PBST/棉包芯纱,其拉伸回复性能要低于 PBST/棉合股纱,因此 6#试样的抗皱性能也低于 4#试样。同样,由于 PTT/棉与 PBST/棉合股纱的拉伸回复率基本相同,PET/棉合股纱的拉伸回复率较低,因此 8#试样的抗皱性能与 4#试样相似,而 9#试样的抗皱性能较差。此外,由于棉纱的拉伸回复性能最差,因此 7#纯棉织物的抗皱性能也最低。

#### 4.4 PBST/棉织物的风格研究

织物风格是一种感觉效应,是织物本身固有的物理、机械性能作用于人的感觉器官所产生的综合效应,是一项反映织物外观特征、美感和服用舒适性的综合指标,是人们评价服用纺织品品质好坏的一个重要依据<sup>[48]</sup>。从本质上讲,织物风格是织物客观物理性质与人的主观意识交互作用而产生的复杂的生理、心理方面的综合反应。

织物的风格评价是很复杂的,它不仅涉及到组成织物本身的物理机械性能包括纤维性能、织物结构,以及后整理加工等,还与人们的生理、心理因素有关。同时对不同季节、不同用途的织物,风格要求也各不相同。织物风格通常被分为广义风格和狭义风格。广义风格是指织物对人体的触觉、视觉和听觉感官所产生的综合效应,包括手感(触觉)风格、形态风格、光泽风格、图像风格和声音风格等;狭义风格是织物作用于人体触觉所产生的综合效应,主要是指手感<sup>[49]</sup>。本章主要研究 PBST/棉织物的狭义风格,即手感。采用 KES-F 系列风格仪对 PBST/棉织物的各项物理机械性能进行测试,并计算织物的基本风格(HV)值。

##### 4.4.1 PBST/棉织物风格(手感)的评价方法

织物风格(手感)的评价,不仅涉及到组成织物本身的物理机械性能,包括纤维性能、织物组织结构与性能及后加工等,还与人们的生理、心理影响有关,因此要确切研究织物风格特征与织物结构参数间的关系比较复杂,并具有不确定性。目前对织物风格(手感)的评价主要有主观评价法和客观评价法两种。

主观评价法是通过人的感觉对织物风格(手感)做出的评价,用语义来描述或评定出所评价内容的秩位来判断风格的优劣。该法虽然具有简便、快速的优点,但该方法也不可避免地存在一些问题。首先,无法排除主观任意性,判断结果将因人、因时而异,局限性大;其次,缺乏理论指导和定量的描述,只能根据人的主观感觉给出评语或秩位数,数据可比性差。因此,为了消除主观因素对织物风格(手感)评定结果的影响,从20世纪20年代开始就有不少学者着手研究织物风格(手感)的客观评定方法。

客观评价法是通过仪器测定织物相关的物理、力学量,然后与感观评价联系起来,根据测定织物的物理量和力学量,计算得到织物风格的特性和等级。由于织物的狭义风格与织物的某些力学性质密切相关,因此可以通过仪器测量织物的力学特性来判断织物的风格(手感)特性。

本章采用的 KES 织物风格仪能测定影响织物手感的各项力学性能指标,属于多台多测多指标式的织物风格仪。KES 测试系统有四部分组成:拉伸剪切测试仪、纯弯曲测试仪、压缩测试仪、表面性能测试仪。其中,拉伸剪切测试仪通过设定对试样进行反复循环拉伸、剪切试验,最后给出试样的拉伸应力—应变曲线、线性度、伸张功、伸张回复性以及剪切力—剪切角曲线、斜度、剪切力滞后等指标,这些指标主要是反映面料在低负荷下的拉伸剪切力学行为;纯弯曲测试仪将试样沿固定轨迹作正反向曲率移动,最后给出扭矩—曲率的关系曲线以及弯曲刚度、弯曲滞后等指标,这些指标主要是反映面料受到与自身平面垂直的力或力矩作用时发生的弯曲变形;压缩测试仪通过对试样的恒速加压,得出试样的厚度—压力曲线以及压缩功、回复功、回弹性等指标,这些指标主要是反映单位面积所受压力与受压织物厚度间的关系曲线;表面性能测试仪通过采用测试探头、探针,测量试样移动时的摩擦力和粗糙度的积分电压,得出试样摩擦力—粗糙度的试验曲线以及摩擦系数、平均粗糙度等指标,这些指标主要是反映面料表面的滑糯度或滑爽度。

#### 4.4.2 PBST/棉织物手感的力学性能

服装在日常被穿用的过程中,人体往往要对面料施加各种力。如胸背部、肘膝部位的面料要承受拉伸负荷、剪切负荷、弯曲和压缩负荷的作用,这些负荷的量很小,绝大多数情况下不会超过断裂负荷的5%,通常将这类负荷称为低负荷。在低负荷作用下,服装面料会发生弯曲变形、剪切变形、拉伸变形、压缩变形以及它们的复合变形。面料在低负荷下的变形行为将确定服装的穿着舒适性、成形性、手感等服用性能。所以,要把握好面料的手感、成形性、穿着舒适性等服用性能,归根结底是要控制面料在低负荷下的拉伸、弯曲、剪切、压缩性能和表面摩擦性能,通常将这些性能统称为低负荷下面料的基本力学性能<sup>[50-51]</sup>。本章将着重研究 PBST 纤维织物在低负荷下的拉伸、弯曲和剪切性能。

面料在低负荷下的拉伸曲线及回复曲线都是单调的下凹型曲线,而且由于粘性与弹性共存,拉伸曲线与回复曲线不重合。图 4-6 的拉伸曲线可以完整准确地表征面料在低负荷下的拉伸力学行为,但是这类曲线在应用中有很多不便,通常用拉伸指标组合表征面料的拉伸性能。

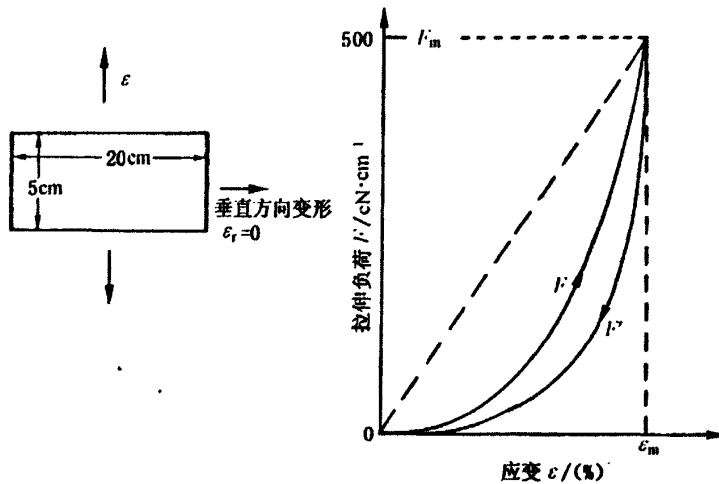


图 4-6 拉伸特性

拉伸特性的测量指标:

(1) 拉伸比功  $WT$  ( $cN \cdot cm/cm^2$ ): 拉伸过程中外力对单位面积试样所做的功,一般拉伸功越大,面料越容易变形。即

$$WT = \int_0^{\epsilon_m} F d\epsilon \quad (4-1)$$

式中  $\epsilon$  为试样伸长率,  $\epsilon_m$  为最大拉伸负荷下的伸长率,  $F$  为单位宽度试样上的拉伸负荷。

(2) 拉伸功回复率  $RT$  (%): 回复功占拉伸功的百分数,表示面料的拉伸弹性回复性能。 $RT$  越大,织物拉伸弹性越好。

$$RT = \frac{WT'}{WT} \times 100\% \quad (4-2)$$

(3) 拉伸曲线的线性度  $LT$  (无单位): 拉伸曲线下面积与假设拉伸曲线为直线时的面积之比。反映织物的柔软活络程度。令虚线构成的直角三角形的面积为

$$WOT = F_m \cdot \frac{\epsilon_m}{2}, \text{ 则}$$

$$LT = \frac{WT}{WOT} \quad (4-3)$$

有时也用第 4 个指标  $\epsilon_m$ ，表示最大拉伸负荷  $F_m$  下的伸长率。

试样 4#、7#、8#和 9#的拉伸测试结果如下：

表 4-2 织物的拉伸特性

试样编号	LT	WT (gf·cm/cm <sup>2</sup> )	RT (%)	$\epsilon_m$ (%)
4#	0.705	12.550	63.350	7.120
7#	0.487	6.500	55.380	1.300
8#	0.583	7.400	78.380	5.080
9#	0.463	7.650	62.750	6.610

面料的剪切变形性能是面料能够被制作成服装的许多复杂曲面的最主要原因，也反映了织物成形性的优劣。当服装面料受到自身平面内的力或力矩的作用时，经纬向的交角发生变化，原本矩形的试样可能会变成平行四边形，这种变形被称作剪切变形。图 4-7 为织物的剪切变形曲线，反映了剪切力与剪切变形角度的关系。

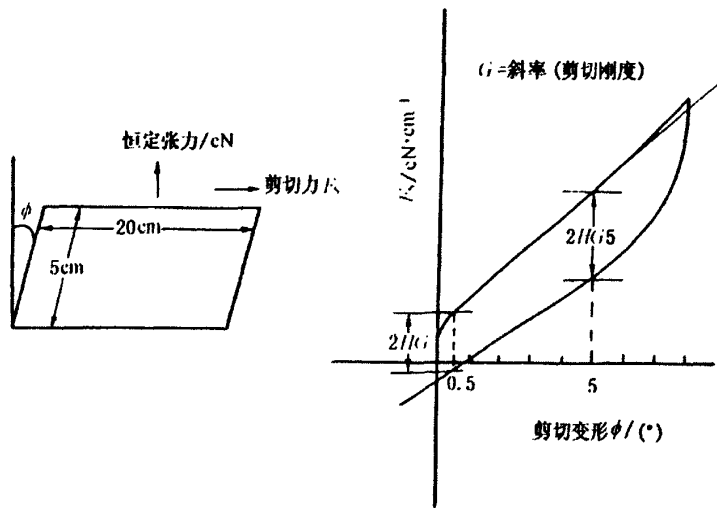


图 4-7 剪切特性

剪切特性的测量指标：

(1) 剪切刚度  $G\{cN/[cm \cdot (^{\circ})]\}$ ：表示面料抵抗剪切变形的能力。剪切刚度定义为单位剪切变形时单位宽度试样上所受的剪切力。即

$$G = \frac{dF_s}{d\phi} \tag{4-4}$$

式中： $F_s$ —单位宽度试样上的剪切力，cN/cm；

$\phi$ —面料的剪切变形 角度， $(^{\circ})$ 。

(2) 剪切滞后量 2HG(cN/cm): KES 标准试验条件下, 剪切角为 0.5°时, 剪切变形曲线与回复曲线的纵坐标差值。

(3) 剪切滞后量 2HG5(cN/cm): KES 标准试验条件下, 剪切角中为 5°时, 剪切变形曲线与回复曲线的纵坐标差值。

2HG 与 2HG5 都反映织物剪切变形时的粘性大小, 即剪切弹性变形的大小, 反映织物剪切变形后的回复能力, 其值越小, 则剪切回复能力越好, 反之越差。

试样 4#、7#、8#和 9#的剪切特性测试结果如下:

表 4-3 织物的剪切特性

试样编号	G gf/cm(°)	2HG5(gf/cm)	2HG(gf/cm)
4#	0.33	0.38	0.48
7#	0.77	0.53	0.53
8#	1.16	0.53	0.63
9#	0.33	0.35	0.50

面料受到与自身平面垂直的力或力矩的作用时将发生弯曲变形, 弯曲变形的大小与所受力矩有关, 也与面料的弯曲性能有关。面料的曲率与所受力矩的关系曲线如图 4-8 所示。

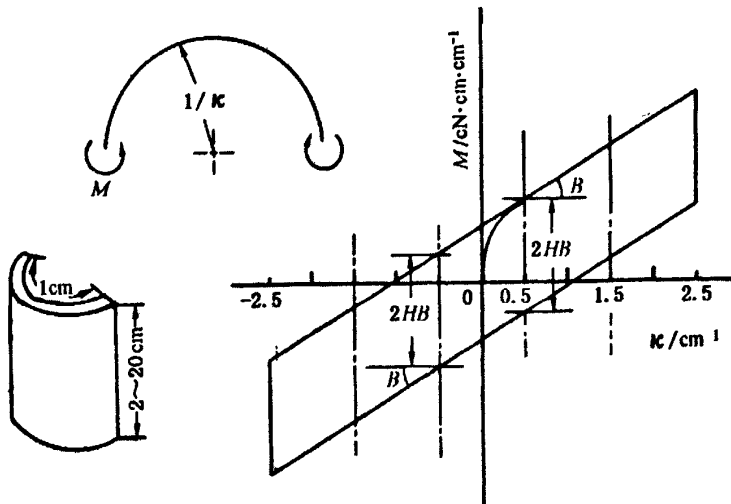


图 4-8 弯曲特性

弯曲特性的测量指标:

(1) 抗弯刚度或弯曲刚度 B (cN · cm<sup>2</sup>/cm): 表示面料抗弯变形的能力, 定义为面料的曲率发生单位变化时单位宽度试样所受的弯矩, 即

$$B = \frac{dM}{d\kappa} \quad (4-5)$$



式中： $M$ —单位宽度试样所受弯矩， $cN \cdot cm/cm$ ；

$\kappa$ —试样的曲率， $cm^{-1}$ 。

$B$  越大，反映织物越硬，抗弯变形能力越大。

(2) 弯曲滞后量  $2HB(cN \cdot cm/cm)$ ：反映面料弯曲变形中粘性的大小。KES 标准试验条件规定用弯曲变形曲线和回复曲线上  $\kappa=0.5cm^{-1}$  时弯矩(纵坐标)的差值表示，表示织物的活络、弹跳性， $2HB$  值越小，织物弯曲变形后的回复能力越好。

试样 4#、7#、8#和 9#的弯曲特性测试结果如下：

表 4-4 织物的弯曲特性

试样编号	$B(gf \cdot cm^2/cm)$	$2HB(gf \cdot cm/cm)$
4#	0.0047	0.0450
7#	0.0159	0.0237
8#	0.0049	0.0387
9#	0.0218	0.0356

面料的表面滑糯或滑爽度主要由面料的表面摩擦性能确定。所以在手感的客观评价中表面摩擦性能是必不可少的内容。KES 系统采用两个测头联合测试织物的表面性能。测得动摩擦系数  $\mu$  是位移  $x$  的函数，并且测得织物厚度  $T$  随位移  $x$  的变化曲线，如图 4-9 所示：

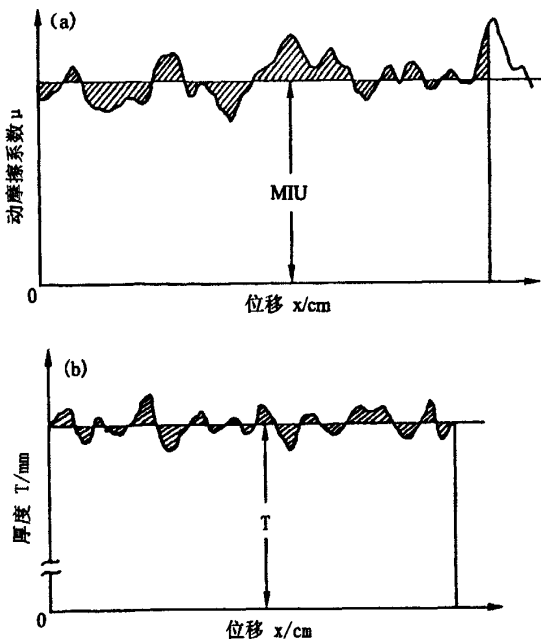


图 4-9 表面特性

表面特性的测量指标:

(1) 平均摩擦系数 MIU(无单位): 即摩擦系数曲线的平均值, 即织物正反向移动时的摩擦系数(摩擦力与正压力之比)的平均值。

$$MIU = \frac{1}{x} \int_0^x \mu dx \quad (4-6)$$

(2) 摩擦系数的平均差不匀率 MMD(无单位): 摩擦系数的平均差不匀率, 即摩擦系数瞬时值与平均值之绝对差值的平均, 与平均摩擦系数之比。

$$MMD = \frac{1}{x} \int_0^x |\mu - MIU| dx \quad (4-7)$$

(3) 表面粗糙度 SMD ( $\mu\text{m}$ ): 即所测织物厚度瞬时值与平均值之绝对差值的平均, 亦即织物表面高低变化的平均差系数。

$$SMD = \frac{1}{x} \int_0^x |T - \bar{T}| dx \quad (4-8)$$

MIU, MMD 表示织物的滑糯、清爽、匀整等特性, SMD 表示织物表面粗糙平坦的程度。

试样 4#、7#、8#和 9#的表面特性测试结果如下:

表 4-5 织物的表面特性

试样编号	MIU	MMD	SMD
4#	0.4165	0.0085	7.395
7#	0.4125	0.00975	6.890
8#	0.4135	0.00775	7.540
9#	0.4215	0.00860	7.505

织物在厚度方向的压缩性能与手感风格中的蓬松丰满度、表面滑糯性关系密切。用面积为  $2\text{cm}^2$  的圆形测头以恒定速度垂直压向织物, 测得单位面积织物所受压力(P)与受压织物厚度(T)之间的关系曲线如图 4-10 所示:

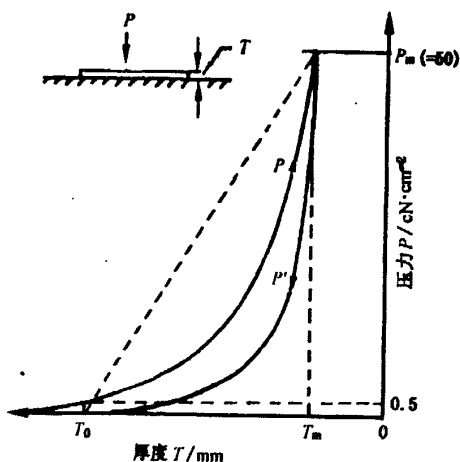


图 4-10 压缩特性

压缩特性的测量指标:

(1) 压缩功  $WC(cN\cdot cm/cm^2)$ : 压缩曲线下的面积, 指压缩过程中外力对单位面积试样所做的功, 一般压缩功越大, 面料越蓬松。

$$WC = \int_{T_0}^{T_m} PdT \tag{4-9}$$

式中:  $T_0$ —表观厚度, 即织物在  $0.5cN/cm^2$  压力作用下的厚度, mm;

$T_m$ —最大压力下的试样厚度, mm。

(2) 压缩弹性  $RC(\%)$ : 压缩回复功  $WC'$ 与压缩功  $WC$ 之比, 表示面料的压缩弹性回复性能, 反映织物的丰满感。

$$RC = \frac{WC'}{WC} \times 100\% \tag{4-10}$$

(3) 压缩线性度  $LC$ (无单位): 压缩曲线下的面积与假设压缩曲线为直线时的面积之比, 表示面料压缩曲线的屈曲程度, 反映织物的可压缩性即柔软感。

$$LC = \frac{2WC}{P_m(T_0 - T_m)} \tag{4-11}$$

试样 4#、7#、8#和 9#的压缩特性测试结果如下:

表 4-6 织物的压缩特性

试样编号	LC	WC(cN·cm/cm <sup>2</sup> )	RC(%)	T <sub>0</sub> (mm)	T <sub>m</sub> (mm)
4#	0.56	0.59	42.40	0.96	0.54
7#	0.59	0.59	40.70	0.87	0.47
8#	0.53	0.64	40.60	1.00	0.52
9#	0.60	0.62	41.90	0.93	0.52

#### 4.4.3 PBST/棉织物风格的评定

在评定织物风格时,川端季雄教授等把织物风格的客观评定分为三个层次:即织物的力学、物理量和基本风格。客观评定的具体步骤为:

[织物基本力学、物理性能] → [基本风格的 HV 值]

上述评定过程表示了由 KES 系列织物风格仪测得织物的 16 个力学、物理性质指标后,可由计算转换成该织物的基本风格值。

KES-F 所测得的力学量与基本风格(HV)值的关系式为:

$$HV = C_0 + \sum_{i=1}^{16} C_i \frac{X_i - m_i}{\sigma_i} \quad (4-12)$$

其中,不同种类面料基本风格计算公式的参数  $m_i$ 、 $\sigma_i$  不同,不同项目基本风格的  $C_0$ 、 $C_i$  也不同,但公式形式相同。

综上所述,对于任意给定的织物试样,只要利用 KES 风格仪测出其力学性能指标,分别代入上述方程,就可以算出该织物手感风格的 HV 值。

公式 4-12 中回归常数  $C_i$  的排列顺序是逐步回归计算时 KES 各性能指标被选入的顺序,它反映出各类性能指标对基本风格的影响。由附录可知,硬挺度主要与面料的弯曲刚度、剪切刚度、试样厚度有关,弯曲刚度 B、剪切刚度 G 越大,厚度越薄,面料越硬挺;滑爽感要求织物表层纤维处于张紧状态,若织物表层的纤维表面有沟槽或表面凹凸不平,也可使织物获得较好的滑爽感。因此,织物的滑爽度主要与织物的表面摩擦性能有关;平展度是指面料抗悬垂、自身能张成挺展平面的性能,与弹性无关,是设计衬衣风衣等宽松类服装的关键,它主要与面料的弯曲刚度、剪切刚度、拉伸功有关,弯曲刚度 B、剪切刚度 G 越大,拉伸功越小,面料的平展度越大;面料的蓬松丰满度主要与面料在厚度方向的压缩性能有关。压缩功 WC 越大,压缩弹性 RC 越大,则织物的蓬松丰满度越高。同时还受表面性能的影响,MIU、MMD 越大,织物的蓬松丰满度也越高;柔顺度是指跟随身体曲面柔软变形的性能,是悬垂类面料风格评价的重要指标,它主要与面料的弯曲性能、表面性能、剪切性能等有关,弯曲刚度 B、剪切刚度 G 越大,MIU 越小,面料的柔顺度越小。

本文开发的 PBST/棉织物和作为对比的全棉织物、PTT/棉织物、PET/棉织物为轻薄型面料,预期用于轻薄型服装。利用公式 4-12、附录表和本章上小节所得的 KES 各项基本物理、力学性能指标,分别计算男士衬衣面料和女士轻薄型外衣面料中各织物的 HV 风格值如表 4-7 和表 4-8 所示:

表 4-7 织物用于男士衬衣面料 HV 值

试样编号	硬挺度	滑爽度	平展度	丰满度
4#	5.223	-5.173	-2.883	19.621
7#	4.619	-3.716	-0.402	17.696
8#	4.955	-4.342	-1.260	17.730
9#	3.895	-3.211	-1.280	17.605

表 4-8 织物用于女士轻薄型外衣面料 HV 值

试样编号	硬挺度	平展度	柔顺度	丰满度	滑爽度
4#	3.293	2.538	9.484	10.515	3.395
7#	5.946	5.550	7.046	10.124	2.579
8#	4.669	4.680	7.849	10.842	0.521
9#	6.024	5.845	6.869	10.269	3.558

根据表 4-7 和表 4-8 的计算结果可以看出,对于作为男士衬衣面料,4#PBST/棉织物的硬挺度和丰满度较高,7#全棉织物的平展度较高,8#PTT/棉织物的硬挺度、平展度和丰满度居中,9#PET/棉织物的滑爽度较高;对于作为女士轻薄外衣面料,4#PBST/棉织物的柔顺度较高,滑爽度和丰满度居中,7#全棉织物的硬挺度、平展度居中,8#PTT/棉织物的丰满度较高,柔顺度居中,滑爽度较差,9#PET/棉织物的滑爽度、硬挺度和平展度较高。这与组成织物的纤维的结构有关。PBST 纤维和 PTT 纤维的变形能力大,使得其织物的柔顺度较好,棉纤维和 PET 纤维的变形能力较差,使得其织物的平展度和滑爽度较好。

目前,根据女性服装外形轮廓特征可将女性服装分为合体型、悬垂型、宽松挺括型三大类。合体型的代表服装为制服或西服,其主要特征是服装的表面积略大于人体表面积,服装的外形轮廓可以体现人体的体形特征。悬垂型和宽松挺括型服装的表面积均远大于人体表面积,体现服装自身形态。其中,合体型服装要求面料比较硬挺,即弯曲刚度 B 大,剪切刚度 G 大;宽松挺括类服装要求面料更容易产生弯曲、剪切变形;而悬垂类服饰要求面料的柔顺度大,悬垂性优良。根据前面测试数据和织物风格特征可知,PBST/棉织物适合做宽松挺括类和悬垂型的轻薄型服装,如女士衬衣等;男士服装有休闲服面料、冬季西服面料和衬衣面料,冬季衬衣要求面料的蓬松丰满度高、滑爽度低,夏季衬衣要求面料的滑爽度高、蓬松丰满度低,由于丰满度较高,PBST/棉织物适合做为冬季的轻薄型面料,如衬衣、外衣等。

#### 4.4.4 PBST 纤维在服装上运用的展望

近年来,随着社会的发展和人们生活水平的提高,环保、舒适的纺织品已成为服用面料的开发热点。在2009年的面辅料博览会上,具有环保和功能性特性的面料成为了本季休闲装面料的热点产品。如天津天纺投资控股有限公司主推的休闲女装面料,采用棉与天丝混纺,既具有生态环保性,又充分利用了纤维原料的优势,使得面料光泽柔亮、手感糯滑、凉爽舒适。此外,适度弹性也成为开发休闲装面料的基本要求,PTT、XLA、新型氨纶等弹性纤维在服用面料中的运用越来越普遍。

根据本文的研究,PBST纤维在小变形下具有较好的拉伸回复性能,因此可用以生产一些弹性面料,使其既具有良好的环保性,又具有较好的舒适性和其它服用性能。如PBST纤维与棉混纺、交织,通过纱线的搭配和整理,可以使产品既具有棉的风格,又具有良好的尺寸稳定性和抗皱性能,此外,通过单染棉纱和PBST纤维留白可赋予织物色织效果;利用PBST纤维与麻交织或混纺,可提升织物的柔软性、抗皱性和尺寸稳定性好,拓展了麻产品的应用领域。

常规的毛/涤面料具有挺括、有身骨、清爽等特性,但在使用过程中还存在抗皱性、弹性差,部分高紧度面料手感过于板硬、毛感不足等问题。PBST纤维良好的拉伸回弹性可满足制服面料对微弹的需求,将PBST纤维和毛混纺或交织,开发高弹呢绒面料,可弥补了纯羊毛或羊绒产品易起皱的缺点,使呢面细腻丰满、悬垂挺括、平整,手感活络,尺寸稳定,具有独特的外观和风格,贴合目前环保健康、舒适的流行趋势。

此外,PBST纤维也可以用以开发丝绸产品。如丝绸记忆面料的开发,在丝绸产品中加入低比例的PBST纤维,或使用丝纤维的PBST包芯纱,赋予织物自然的弹性,主体上不影响丝绸织物的手感、光泽和舒适性,却能极大地改善丝绸面料的穿着性能,提高面料的保型性;还可以利用PBST弹性纤维的特性,结合纹样设计,开发出具有局部褶皱感或在某些图案的局部形成褶皱的面料。

PBST纤维良好的弹性特性,使其还能与其它纤维相结合。如将PBST纤维与Tencel交织开发面料,使产品既具有细腻的桃皮绒手感,又具有良好的悬垂性、舒适性和吸湿性;用PBST纤维与Richcel纤维织造的小提花织物,经PU涂层后既具有动物毛皮般的纹理,又具有良好的伸展性;利用碱减量海岛纤维与PBST纤维结合纺制麂皮绒,能克服氨纶断裂强度低、抗拉伸疲劳性差等缺点。

二十一世纪是以绿色产品主导消费的时代,人们追求花型美观、大方的同时,将更加重视纺织品、服装的舒适、生态环保和功能特性。因此,PBST纤维及其纺织品,既顺应了当今舒适性面料的潮流,也符合环保要求,在国内外市场将具有很大的开发潜力,有很好的发展前景。

## 4.5 本章小结

本章对 PBST/棉织物的抗皱性能、拉伸回复性能以及织物 KES 风格进行了分析,研究了这些性能与织物结构的关系,探讨了 PBST/棉织物在服装上的应用前景,得出如下结论:

(1) 不同织物,其纬向拉伸的初始模量基本相同,且除全棉织物以外,其它织物的拉伸曲线也基本相似。全棉织物在拉伸过程的变形能力较弱,因此其断裂伸长率远远小于其它织物;PBST/棉包芯纱织物的断裂伸长率则最大,其次是 PBST/棉合股纱织物,PTT/棉合股纱织物与 PET/棉合股纱织物的断裂伸长率则基本相同。

(2) 在相同经纬密度下,4#斜纹试样的交织点少于 3#试样,因此纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能受到的影响相对较少,当 3#试样的织物弹性变形减少后,其拉伸回复性能就要好于 3#试样。5#试样是缎纹组织,纱线之间的交织点最少,使得纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能得以较好实现,从而表现出较好的拉伸回复性能。3#平纹织物,在拉伸次数较少的情况下,仍具有较好的拉伸回复性能。

(3) 在相同组织结构下,密度较大的 1#试样的拉伸回复性低于密度较低的 3#试样;由于棉纱的拉伸回复性能较差,因此纯棉织物的拉伸回复率最小,其次是 PET/棉织物, PBST/棉与 PTT/棉织物的拉伸回复率基本相同,两者都具有较好的拉伸回复性能。

(4) 4#斜纹试样在 3#、4#和 5#三种织物中具有最好的折皱回复性。2#织物,由于纬密大于 3#织物,其抗皱性能要低于 3#试样。6#试样与 4#试样的织物结构相同,但由于纬纱是 PBST/棉包芯纱,其拉伸回复性能要低于 PBST/棉合股纱,因此 6#试样的抗皱性能也低于 4#试样。同样,由于 PTT/棉与 PBST/棉合股纱的拉伸回复率基本相同, PET/棉合股纱的拉伸回复率较低,因此 8#试样的抗皱性能与 4#试样相似,而 9#试样的抗皱性能较差。此外,由于棉纱的拉伸回复性能最差,因此 7#纯棉织物的抗皱性能也最低。

(5) PBST/棉织物的柔顺度和蓬松丰满度较高,因此适合做女士宽松挺括类和悬垂型的轻薄型服装和男士冬季的轻薄型服装。

## 第五章 结论与展望

### 5.1 结论

本文在前人的基础上对 PBST 纤维长丝的拉伸性能和弹性回复性能进行研究,进一步的探究了 PBST 纤维的弹性机理,建立了 PBST 纤维的力学模型,着重分析了纺纱工艺参数中捻度、混纺比、织造工艺参数织物密度、组织结构和纱线结构对 PBST/棉纱线和 PBST/棉织物的拉伸回复性能的影响,并初步研究了 PBST/棉织物的风格以及它在未来服装上的应用。综合上述研究工作,本文得出以下结论:

(1) PBST 纤维的弹性,主要来自于其 BS 软链段、BT 硬链段并存的大分子结构特征。当 PBST 纤维受到小应力拉伸时,其变形可能主要来源于 BS 软链段的伸长,此时拉伸模量较小;当外力增加到一定值后,此时 BT 硬链段开始出现变形,拉伸模量增大。当外力消失后,BS 软链段首先快速回复,此后,随着时间的推移,BT 硬链段逐渐回复。

(2)对 PBST 纤维的拉伸性能和拉伸回复性能以及力学模型分析表明,PBST 长丝在 9%左右的小变形下,其变形能力要优于 PTT 长丝,但当变形范围较大时,其变形能力则低于 PTT 长丝,PET 长丝具有较强的抗变形能力,但具有较低的拉伸回复性能;在定伸长率不变的情况下,随着拉伸循环次数的增加,PBST 长丝的急弹性回复率、缓弹性回复率以及弹性回复率均呈现下降的态势,尤其是缓弹性回复率下降明显;在拉伸循环次数不变的情况下,随着定伸长率的增加,PBST 长丝的弹性回复率也呈现下降的态势。在 15%的定伸长率下,PBST 长丝的拉伸回复性能略好于 PTT 长丝;但是当定伸长率大于 15%后,由于 PBST 纤维的大分子结构发生了相对滑移,其拉伸回复能力开始低于 PTT 长丝,并且 PBST 纤维在反复拉伸至定伸长 20%的情况仍未发生拉断现象,表明其在多次拉伸条件下仍具有较为优良的弹性回复性能和优良的抗疲劳性能。PBST 长丝、PTT 长丝和 PET 长丝拉伸回复性能的差异也主要来自于其大分子结构的差异。对于 PET 长丝而言,由于其分子链接近于直线,具有较少的折叠结构,其弯曲时的链段长度为完全伸直时的 99.5%,因此弹性回复性较差;PTT 长丝,由于大分子链“Z”弹簧特征与易改变的三亚甲基的空间构型,使其具有较好的拉伸回复性能;而 PBST 长丝,则由于其软、硬链段并存以及 BT 硬链段的大分子结构特征,使其在较小的应力下能发生较大的形变。

(3) PBST长丝与棉单纱的合股纱以及PBST/棉包芯纱的拉伸性能更主要的是取决于棉纤维部分的拉伸性能。捻度在一定程度上阻碍了合股丝的拉伸回复性



能, 从本实验来看, 500捻/m的捻度比较合适。在捻度相同的情况下, 棉纤维的含量对PBST/棉包芯纱的拉伸弹性回复率有着较大的影响, 当PBST/棉包芯纱采用40/60的混纺比时, 纱线的拉伸弹性回复率较好。在混纺比相同的情况下, PBST与棉单纱的合股纱的拉伸弹性回复率要远大于PBST/棉的包芯纱。PBST/棉合股纱的拉伸弹性回复均要好于PTT/棉和PET/棉的合股纱。其中, PET/棉合股纱的拉伸回复性最差, 并且在定伸长达到10%时就产生了疲劳断裂。

(4) 全棉织物在拉伸过程的变形能力较弱, 因此其断裂伸长率远远小于其它织物; PBST/棉包芯纱织物的断裂伸长率则最大, 其次是 PBST/棉合股纱织物, PTT/棉合股纱织物与 PET/棉合股纱织物的断裂伸长率则基本相同。在相同经纬密度下, 4#斜纹试样的交织点少于 3#试样, 因此纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能受到的影响相对较少, 5#试样是缎纹组织, 纱线之间的交织点最少, 使得纬纱 PBST/棉合股纱的弹性回复性能得以较好实现, 从而表现出较好的拉伸回复性能。3#平纹织物, 在拉伸次数较少的情况下, 仍具有较好的拉伸回复性能。在相同组织结构下, 密度较大的 1#试样的拉伸回复性低于密度较低的 3#试样; 由于棉纱的拉伸回复性能较差, 因此纯棉织物的拉伸回复率最小, 其次是 PET/棉织物, PBST/棉与 PTT/棉织物的拉伸回复率基本相同, 两者都具有较好的拉伸回复性能。

4#斜纹试样在 3#、4#和 5#三种织物中具有最好的折皱回复性。2#织物, 由于纬密大于 3#织物, 其抗皱性能要低于 3#试样。6#试样与 4#试样的织物结构相同, 但由于纬纱是 PBST/棉包芯纱, 其拉伸回复性能要低于 PBST/棉合股纱, 因此 6#试样的抗皱性能也低于 4#试样。同样, 由于 PTT/棉与 PBST/棉合股纱的拉伸回复率基本相同, PET/棉合股纱的拉伸回复率较低, 因此 8#试样的抗皱性能与 4#试样相似, 而 9#试样的抗皱性能较差。此外, 由于棉纱的拉伸回复性能最差, 因此 7#纯棉织物的抗皱性能也最低。

(5) PBST/棉织物的柔顺度和蓬松丰满度较高, 因此适合做女士宽松挺括类和悬垂型的轻薄型服装和男士冬季的轻薄型服装。

## 5.2 展望

鉴于时间关系, 本论文只进行了上述工作, 就本课题而言, 尚可以继续以下研究:

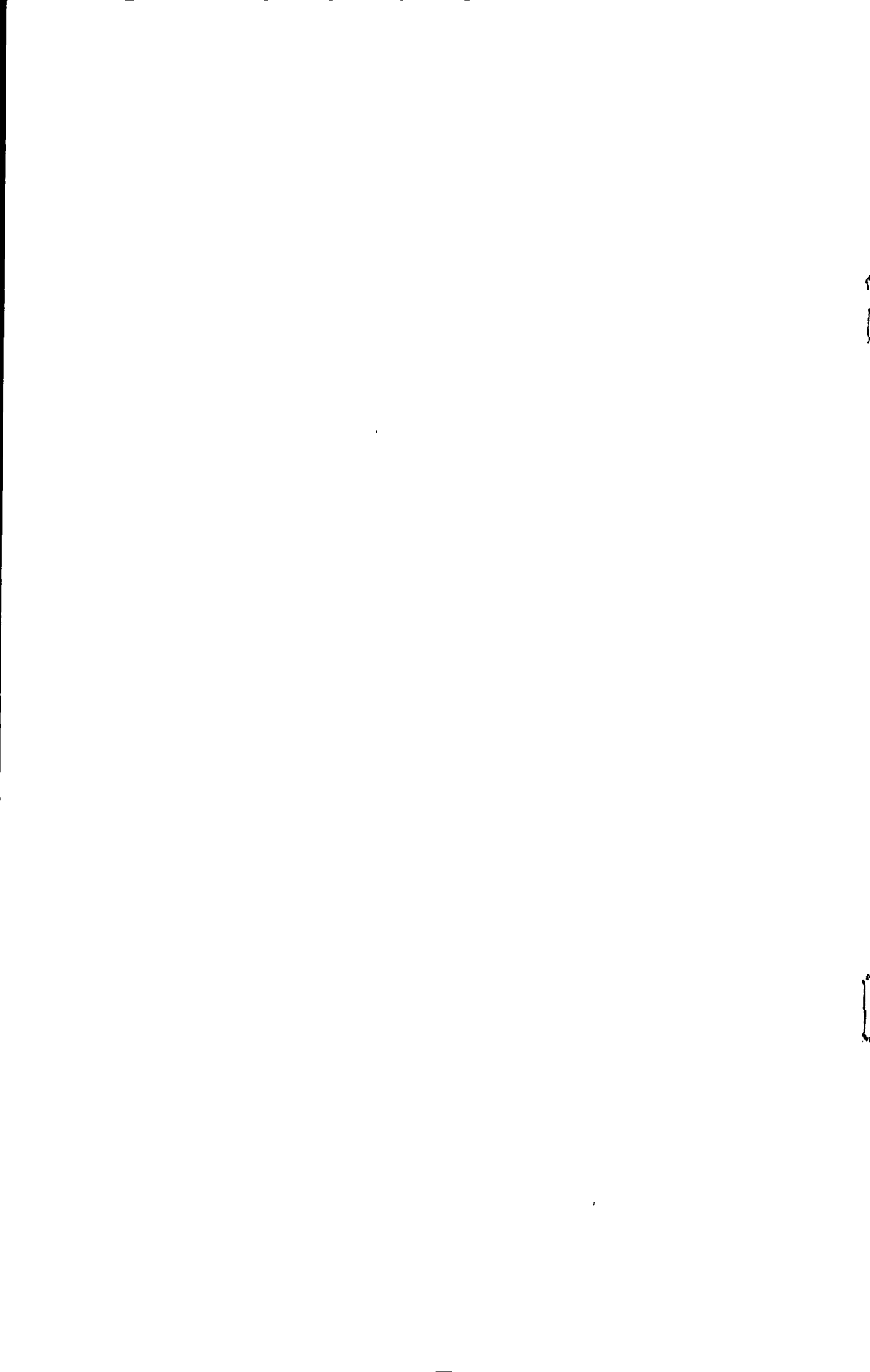
- (1) PBST 纤维的分子结构和弹性机理可做更深入的研究。
- (2) 在纺纱方面, 对工艺参数的选择和工艺的优化可做进一步的研究。
- (3) 在织物方面, PBST 纤维可以与其他的纤维进行混纺, 开发相应的面料, 如可开发 PBST/毛精纺面料。
- (4) 在风格方面, 本文只做了初步的探讨, 对于其在服装上的应用需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 戈进杰. 生物降解高分子材料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 苏家齐. Biopol 细菌合成塑料[J]. 化工科技动态, 1995, 2:4.
- [3] 陈礼跷, 魏金芳, 赵玲. 利用甲壳素制取生物降解塑料的探讨[J]. 中国塑料, 1996, 2:6~7.
- [4] 许新建, 李发学, 余燕平, 俞建勇. 聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二酯等温结晶性能[J]. 合成纤维. 2007, 5:27~29,32.
- [5] 李发学. 成纤用生物降解聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二酯 (PBST) 的合成及结构性能研究. [学位论文], 东华大学, 2006.
- [6] Li Fa Xue, Xu Xin Jian, etc. Thermal Degradation and Their Kinetics of Biodegradable Poly(butylene succinate-co-butylene terephthalate)s Under Nitrogen and Air Atmospheres[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(8): 1685~1693..
- [7] 顾晶君, 李婷婷, 张瑜, 陈彦模. 生物可降解共聚物 PBST 和 PBS 的结构与结晶性能[J]. 合成纤维工业, 2007, 2:17~19.
- [8] 李婷婷, 顾晶君, 李发学, 王学利, 张瑜, 俞建勇. 聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二酯流变性能研究[J]. 合成纤维, 2007, 2:1~4.
- [9] 郭大成, 王文科. 聚酯纤维科学与工程[M]. 北京:中国纺织出版社, 2003, 6.
- [10] Zhao HB etc. Carbohydrate Polymers, 2007, 67:97~103.
- [11] Peter J. Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable [J]. Resources, 2007: 119~130.
- [12] Cathryn O.etc. Bioresource Technology, 2006, 97(18):2356~2363.
- [13] 赵家森等. 纺织学报, 2004, Vol.25 No.5:124~126.
- [14] 张幼维, 吴承训等. 纺织科学研究, 2001, 1:33-36.
- [15] 于伟东. 纺织材料学[M]. 中国纺织出版社, 2006, 5.
- [16] Yamanaka K. Chem Fib Int, 1999,49, 501.
- [17] Vacanti JP, Langer R. Molec Med 1999, 354:32~34.
- [18] Benicewicz BC, Hopper PK. Polymers for absorbable surgical sutures [J]. Bioact Compat Polym 1990; 5:453~472.
- [19] Davis SS, Illum L, Stolnik S. Polymers in drug delivery[J]. Curr Opin Colloid Interf Sci 1996, 1:660~666.
- [20] Tatiana V, etc. Biochemical Engineering Journal. 2003, 16:125~133.
- [21] Zhao K, etc. Biomaterials. 2003, 24:1041~1045.
- [22] Albuquerque M, etc. Journal of Biotechnology. 2007, 130:41~421.

- [23] 龙尼吉卡. JP. J8-158154, 1996, 6, 18.
- [24] 可乐丽. JP. J7-316378, 1995, 12, 5.
- [25] Okada M. *Progress in Polymer Science*, 2002, 27:87~133.
- [26] 高利斌, 王澜. 生物降解聚酯研究进展及应用[J]. 上海塑料, 2005, 4:9~13.
- [27] 孙彤彤. 生物降解聚合物的现状及发展前景[J]. 塑料包装, 2002, 4:49~53,57.
- [28] 廖葵. 生物可降解纤维[J]. 河北纺织, 2005, 2:11-19.
- [29] 马萌萌, 元进英, 曾安成. 缩聚法合成生物可降解聚酯研究进展[J]. 化学工业与工程, 2005, 3:220~223.
- [30] 李明霞. 新型功能化生物可降解聚酯和聚酯酰胺的合成及性能研究[J]. 武汉大学, 2002.
- [31] Shi XQ, Ito H, Kikutani T. Characterization on mixed-crystal structure and properties of poly (butylenes adipate-co-terephthalate) biodegradable fibres[J]. *Polymer*. 2005, 46:11442~11450.
- [32] Shi XQ, Ito H, Kikutani T. Structure development and properties of high-speed melt spun poly(butylenes terephthalate)/poly(butylenes adipate-co-terephthalate) bicomponent fibers[J]. *Polymer*. 2006, 47:611~616.
- [33] Stan, D. World markets for elastane (spandex) yarns[J]. *Textile Outlook International*, 2001, (91):9~20
- [34] 邓力民. PBS 及其共聚物的结构与表征[J]. 四川大学, 2004.
- [35] 顾晶君. 生物降解性聚酯聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 和聚对苯二甲酸-共-丁二酸丁二醇酯 (PBST) 的性能研究和纤维制备[硕士学位论文]. 2007.
- [36] 许新建. 生物可降解脂肪族/芳香族共聚酯 (PBST) 纤维的制备及其性能研究[博士学位论文], 2007.
- [37] 马驰. 生物可降解 PBST 纤维成型及染色性能研究[硕士学位论文], 2009.
- [38] 高绪珊, 吴大诚. 纤维应用物理学[M]. 中国纺织出版社. 2001, 2(1).
- [39] Sung HL, Sung WL, etc. Properties of Potentially Biodegradable Copolyesters of (succinate acid-1,4-butanediol)/(dimethyl terephthalate-1,4-butanediol) [J]. *Polymer International*, 1999, 48:861~867.
- [40] 郭宝华, 丁慧鸽, 徐晓琳, 徐君, 孙元碧. 生物可降解共聚物聚丁二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PBST) 的序列结构及结晶性研究[J]. 高等学校化学学报. 2003, 12:2312~2316.
- [41] Honda N, Taniguchi I, Miyamoto M, Kimura Y. Reaction Mechanism of Enzymatic Degradation of Poly (butylene succinate-co-terephthalate) (PBST) with a Lipase Originated from *Pseudomonas cepacia*[J]. *Macromol Biosci*. 2003, 3:189~197.

- [42] Li Faxue, Xu Xinjian, Hao Qinghui, etc. Effects of comonomer sequential structure on thermal and crystallization behaviors of biodegradable poly (butylene succinate-co-butylene terephthalate)s[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 2006, 44, 1635~1644
- [43] Li FX, Zhang HY, Yu JY. Studies on sequential structure of the biodegradable poly(butylene succinate-co-butylene terephthalate)s(PBST) [J]. Proceedings of 2005 International Conference on Advanced Fibers and Polymer Materials (ICAFPM 2005). 2005, 2:987~990.
- [44] Li Faxue, Yin Lingzhi, Yu Jianyong. DSC study of thermal properties of biodegradable poly(butylene succinate-co-terephthalate)s[J]. Journal of Donghua University 2006, 23, 5~7
- [45] Faxue Li, Xinjian Xu, Jianyong Yu, AminCao. The morphological effects upon enzymatic degradation of poly(butylene succinate-co-butylene terephthalate)s(PB ST) [J]. Polymer Degradation and Stability, 2007 (92) 1053~1060.
- [46] Sung Hyo Lee, Sung Wook Lim, Kwang Hee Lee. Properties of Potentially Biodegradable Copolyesters of (succinate acid-1, 4-butanediol) / (dimethyl terephthalate-1, 4-butanediol) [J]. Polymer International, 1999 (48) :861~867
- [47] 于伟东, 储才元, 纺织物理[M], 东华大学出版社, 2002.1: 71~130.
- [48] 王府梅, 服装面料的性能设计[M], 中国纺织大学出版社, 2000.12
- [49] 川端季雄, 风格的标准及其分析(第二版) [M]. 大阪, 日本纤维机械学会, 1980.
- [50] CSIRO Australia, Fast Instruction Manual, 1994.
- [51] Kawahata S, The Standardisation and Analysis of Hand Evaluation[J], 2nd ed. Osaka: Textile Machinery Society of Japan, 1980, 19~66.



## 附录

表 1 男士衬衣面料基本性能指标的分布特征值

序号	性能指标	单位	男士衬衣面料	
i	Xi		$m_i$	$\sigma_i$
1	LT	—	0.9158	0.0629
2	lgWT	cN·cm/cm <sup>2</sup>	-0.5552	0.1832
3	RT	%	61.6058	6.3627
4	lgB	cN·cm <sup>2</sup> /cm	-1.3802	0.1724
5	lg2HB	cN·cm <sup>2</sup> /cm	-1.4342	0.2216
6	lgG	cN/[cm·(°)]	-0.1690	0.1748
7	lg2HG	cN/cm	-0.0347	0.2626
8	lg2HG5	cN/cm	0.3180	0.2266
9	LC	—	0.6391	0.0451
10	lgWC	cN·cm/cm <sup>2</sup>	-1.3188	0.1590
11	RC	%	42.7402	3.8260
12	MIU	—	0.1831	0.0243
13	lgMMD	—	-1.6171	0.2183
14	lgSMD	μm	0.6709	0.1889
15	lgT	mm	-0.3349	0.1208
16	lgW	mg/cm <sup>2</sup>	1.0207	0.0828

表2 男士衬衣面料基本风格计算公式的回归常数

硬挺度		清爽度		平展度		丰满度	
i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>
0	5.4634	0	4.8480	0	5.5448	0	4.8970
6	0.9407	14	1.1399	8	1.1016	10	0.9401
8	0.0151	13	0.1485	6	0.0508	11	0.3259
7	0.0016	12	-0.1527	7	-0.0439	9	-0.2784
4	0.6830	10	-0.5692	4	0.6165	4	-0.5344
5	-0.1706	11	-0.2623	5	-0.1510	5	0.0209
16	0.1527	9	0.1401	9	0.1586	2	0.3485
15	-0.0731	4	0.5975	11	-0.1346	1	-0.2130
2	-0.0783	5	-0.1113	10	-0.0886	3	-0.1451
1	0.0392	1	0.1786	1	0.2018	6	-0.2295
3	-0.0353	3	0.0492	2	-0.0432	7	-0.0096
9	0.0301	2	-0.0307	3	0.0248	8	0.0039
10	-0.0256	16	-0.1966	16	0.1085	16	0.2170
11	0.0205	15	-0.0113	15	-0.0625	15	-0.0783
14	0.0943	8	0.1770	14	0.0512	14	-0.2101
13	-0.0021	6	-0.0284	12	-0.0286	12	-0.0537
12	0.0095	7	0.0135	13	0.0384	13	0.0027

表3 女士外表面料基本性能指标的分布特征值

序号	性能指标	单位	女士轻薄型外表面料	
i	X <sub>i</sub>		m <sub>i</sub>	σ <sub>i</sub>
1	LT	—	0.5906	0.0939
2	lgWT	cN·cm/cm <sup>2</sup>	1.0551	0.2728
3	RT	%	43.6828	12.0448
4	lgB	cN·cm <sup>2</sup> /cm	-1.7749	0.3592
5	lg2HB	cN·cm <sup>2</sup> /cm	-2.0351	0.5126
6	lgG	cN/[cm·(°)]	-0.3731	0.3044
7	lg2HG	cN/cm	-0.2733	0.5586
8	lg2HG5	cN/cm	0.0295	0.4506
9	LC	—	0.4483	0.1109
10	lgWC	cN·cm/cm <sup>2</sup>	-0.9951	0.3174
11	RC	%	49.4168	11.6778
12	MIU	—	0.2258	0.0452
13	lgMMD	—	-1.6832	0.2191
14	lgSMD	μm	0.4892	0.3999
15	lgT	mm	-0.4253	0.2209
16	lgW	mg/cm <sup>2</sup>	0.9623	0.1768

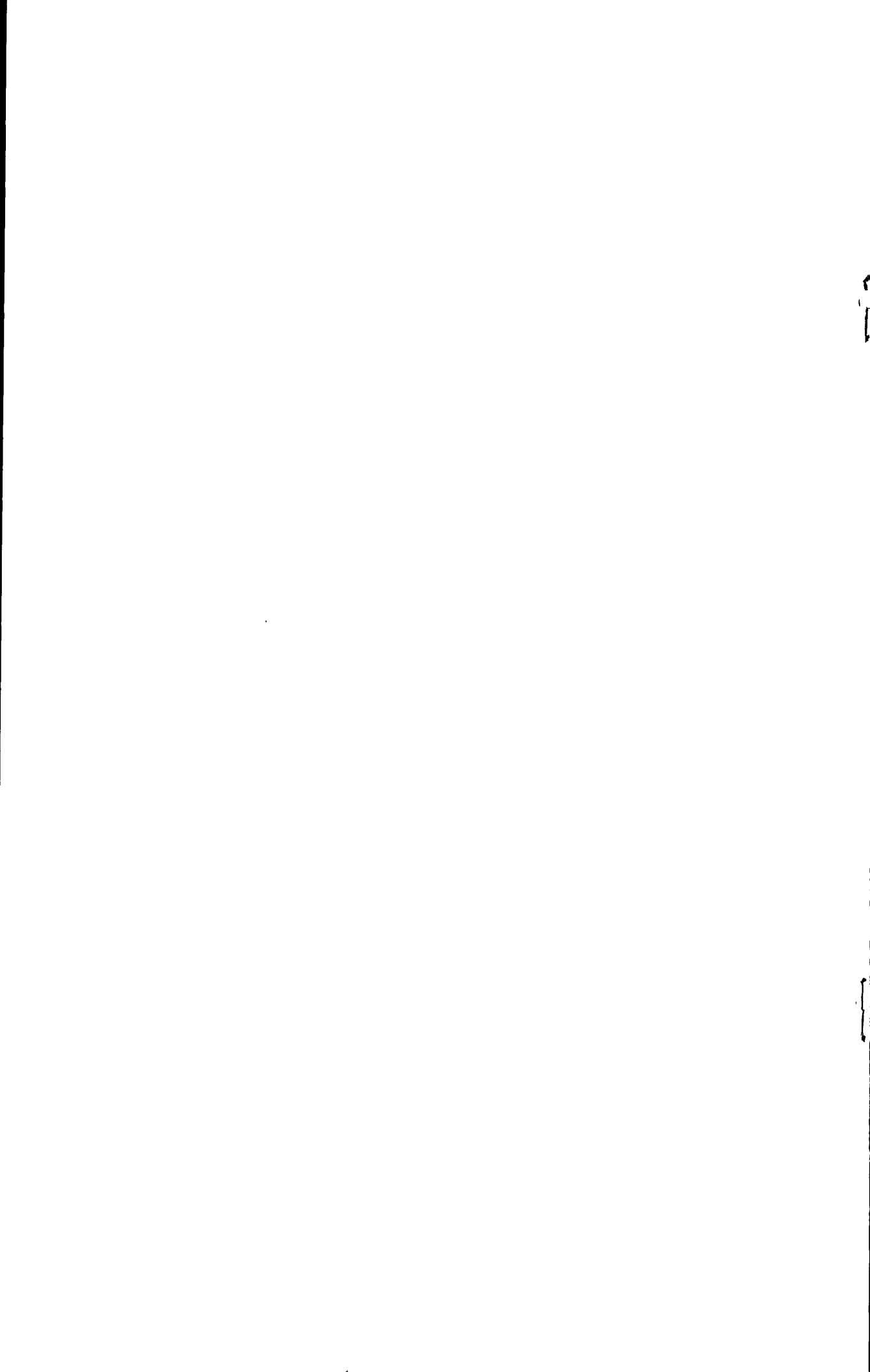


表4 女士轻薄型外衣面料基本风格计算公式的回归常数

硬挺度		平展度		柔顺度		丰满度		清爽度	
i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>	i	C <sub>i</sub>
0	5.1991	0	5.0816	0	5.3474	0	4.7891	0	4.6833
4	1.2622	4	1.8527	4	-1.6807	13	-0.6889	13	1.085
5	-0.3961	5	0.0462	5	-0.287	12	0.5535	14	0.3082
7	-0.4317	6	0.2238	13	-0.3788	14	-0.1246	12	-0.1014
8	0.1781	7	-0.1366	14	0.2827	10	0.4589	6	-1.1854
6	-0.0247	8	0.1281	12	0.0648	9	-0.282	7	-0.0112
15	-0.2405	2	-0.2409	6	-0.3688	11	-0.1401	8	0.0012
16	0.0281	3	0.1212	7	-0.0826	16	0.3154	11	0.2745
13	0.176	1	0.1272	8	0.0784	15	-0.1367	9	0.0674
14	-0.0537	13	0.0999	1	-0.181	3	0.1264	10	0.0469
12	-0.0596	14	-0.1379	3	0.0795	1	0.0399	2	-0.1181
1	0.0003	12	-0.0119	2	-0.0263	2	0.1015	3	-0.0982
2	-0.3688	15	-0.099	9	-0.0203	6	-0.0018	1	0.0189
3	0.0242	16	0.0332	10	0.1411	7	0.0134	16	0.1958
10	0.1096	9	0.1163	11	-0.0382	8	0.0104	15	-0.0748
9	0.0561	11	0.0164	16	0.1019	4	0.0474	4	0.077
11	0.0285	10	-0.0361	15	-0.0534	5	0.0199	5	-0.0602

## 攻读硕士期间发表文章及申请专利情况

- [1] 一种纤维长丝包芯纱, 实用新型专利, 申请号: 200920211389.9
- [2] Liu Jieying, Qian Jingfang, Li Faxue. Comparison of the stretching resiliency of PBST cotton plied yarn and other elastic fibers cotton plied yarn, Proceedings of 2009 International Conference on Advanced Fibers and Polymer Materials, china, 2009.10(2): 924~926



## 致 谢

首先，衷心感谢俞建勇教授。俞老师对我的论文从选题到实验工作的开展、阶段性研究成果的讨论和论文的方向给予了重要的指导，在此向俞老师表示衷心的感谢。

在本课题研究的一年多时间里，无论从资料的收集、整理，还是实验的进行、结果的论证都得到钱竞芳老师的关怀和支持，她的治学态度和谆谆教导，不仅在学业上，更在做人上，使我受益匪浅。值此论文完成之际，谨向她致以衷心的感谢和深深的敬意。

在整个论文的研究过程中，李发学老师给予我很多的指导和极大的帮助，提出了许多宝贵建议，可以说本论文研究的顺利进行是和他的帮助分不开的，在此向他表示衷心的感谢。

此外论文的完成还得益于实验室老师的指导及同课题组老师、同学和朋友家人的帮助，在此向所有关心和帮助我的老师和同学表示深深的感谢。

刘杰英

2009年12月

