

分类号: TS104

单位代码: 10363

密 级: 公 开

学 号: 2210420119

题 目: 基于Kubelka-Munk理论的原液着色涤/粘双组分纤维混配色预测研究

英文并列

题 目: RESEARCH ON THE PREDICTION OF FIBER
BLEND COLOR IN POLYESTER/VISCOSE
BICOMPONENT FIBERS DYED WITH DOPE
BASED ON KUBELKA-MUNK THEORY

学生姓名: 李 少 聪

导 师: 王 旭 (副 教 授)

企业导师: 张 文 强

专 业: 材 料 与 化 工

研究方向: 数 字 化 纺 织 技 术

论文答辩日期: 2024 年 5 月 24 日

安徽工程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后果由本人承担。

学位论文作者签名：

李少聪

日期：2024 年 6 月 3 日

安徽工程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。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部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：李少聪

日期：2024 年 6 月 3 日

指导教师签名：王旭

日期：2024 年 6 月 3 日

基于 Kubelka-Munk 理论的原液着色涤/粘双组分纤维混配色 预测研究

摘 要

纤维混配色是色纺行业重要的生产环节,纤维混配色的准确程度对纱线产品颜色是否满足要求至关重要。传统的纤维混配色过程主要依赖人工经验进行,为提高纤维混配色的准确度,配色打样往往需要反复多次进行,从而制约了企业的生产效率。本文以原液着色涤纶短纤维和原液着色粘胶短纤维为研究对象,基于 Kubelka-Munk 理论(K-M),通过计算机测色仪,分别测定单色涤纶短纤维、单色粘胶短纤维、混配后的双组分双色混色纤维以及双组分三色混色纤维的光谱反射率 R 、 K/S 值、 L 、 a 、 b 等颜色特征值等,结合最小二乘法等,实现混色纤维的配方预测,并对预测效果进行评价。主要研究内容及结论如下:

(1)为验证 K-M 理论针对涤/粘双组分混配纤维颜色预测的适用性,选取三种颜色的涤纶短纤维和三种颜色的粘胶短纤维为研究材料,按照一定比例互相混合形成 27 种双组分双色混纤样本,通过测量出的混色纤维 K/S 与单色纤维 K/S 数据,探究原液着色混色纤维 K/S 与单色纤维 K/S 之间是否呈现加和性关系。结果表明:在 400~700 nm 范围内,某一个波长下,涤/粘双组分不同比例混色样的 K/S 值,总是介于该波长下的 2 个不同组分单色纤维的 K/S 值之间,该结果进而说明基于 K-M 理论模型对涤/粘双组分纤维混配比例预测具有合理性。

(2) 为探究 K-M 单常数模型以及双常数模型的预测效果,以涤/粘双组分双色纤维混配比例预测为研究对象,分别采用两种方法进行实验。在 K-M 单常数理论模型内,构建 31 个方程组,通过测量出 K/S 数据,求解 K-M 单常数理论下的预测比例;其次,基于 K-M 双常数理论,利用最小二乘法,计算单色纤维的吸收系数 K 值和散射系数 S 值,通过全光谱算法,预测混色纤维中各单色纤维的质量分数,通过比较 K-M 单双常数理论下的比例预测情况、预测精度以及模型稳定性,最终确定适用于原液着色涤/粘双组分双色纤维混配色最佳配色模型。结果表明:用 K-M 单常数理论预测结果,红 T/黄 R、黄 T/蓝 R、蓝 T/红 R 的比例误差均值分别为 15.129%、12.911%、2.908%,用 K-M 双常数理论预测结果,三种组合的比例误差均值分别为 2.537%、0.950%、1.599%,无论是比例预测结果还是偏差百分比结果,都要优于 K-M 单常数理论的预测结果,且 K-M 双常数理论的稳定性较好,说明 K-M 双常数模型更适用于原液着色涤/粘双组分双色纤维混配色。

(3) 为了进一步探究涤/粘双组分多色混配纤维的预测,以三种单色涤纶短纤维和三种单色粘胶短纤维为基础,制备 54 种双组分三色混纤样,基于 K-M 双常数理论,采用最小二乘法结合全光谱算法,对原液着色涤/粘双组分三色纤维混配色的配方进行预测,并比对预测样和实际样之间的色差,探究 K-M 双常数在原液着色涤/粘双组分三色纤维混配色的适用性和精准性。结果表明:在原液着色涤/粘双组分三色实验中,原液着色涤/粘双组分 54 个混色纤维样品预测颜色

与实际颜色的色差均在 1.0 以下，按照纺织行业的色差标准，均在可接受范围内；原液着色涤/粘双组分 54 个混色纤维样品预测比例与实际比例的误差均在 5%以下，比例误差整体较小，说明运用 K-M 双常数模型预测原液着色涤/粘双组分三色混色纤维比例具有可行性，且预测精度较高，预测稳定性较好。

关键词：涤/粘双组分，原液着色纤维，纤维混配色，颜色预测，Kubelka-Munk 理论

RESEARCH ON THE PREDICTION OF FIBER BLEND COLOR IN POLYESTER/VISCOSE BICOMPONENT FIBERS DYED WITH DOPE BASED ON KUBELKA-MUNK THEORY

ABSTRACT

Fiber blending coloration is a crucial production step in the colored spinning industry, where the accuracy of fiber color blending significantly affects whether the yarn products meet color requirements. Traditionally, the process of fiber color blending has relied heavily on manual experience, and to improve the accuracy of fiber blending coloration, color matching and sampling often need to be repeated multiple times, thereby restricting the production efficiency of enterprises. This paper focuses on dope-dyed polyester staple fibers and dope-dyed viscose staple fibers as research subjects. Based on the Kubelka-Munk theory (K-M), using a computerized colorimeter, it measures the spectral reflectance R , K/S values, L , a , b , and other color characteristic values of monochromatic polyester staple fibers, monochromatic viscose staple fibers, and the mixed fibers of bi-component bi-color and bi-component tri-color blends. By employing methods such as the least squares method, it aims to predict the formula for color-blended fibers and evaluate the

prediction effectiveness. The main research contents and conclusions are as follows:

(1) To validate the applicability of the K-M theory for color prediction in polyester/viscose bi-component blended fibers, three colors of polyester staple fibers and three colors of viscose staple fibers were selected as research materials. These were blended in certain proportions to form 27 bi-component bi-color mixed fiber samples. By comparing the K/S values of the mixed fibers with those of the monochromatic fibers, the study investigates whether the K/S values of dope-dyed mixed fibers and monochromatic fibers exhibit an additive relationship. The results show that within the 400~700 nm range, at any given wavelength, the K/S values of the polyester/viscose bi-component blend samples in various proportions always fall between the K/S values of the two different component monochromatic fibers at that wavelength. This outcome further indicates that the prediction of blending ratios for polyester/viscose bicomponent fibers based on the K-M theoretical model is rational.

(2) To explore the predictive effectiveness of the K-M single constant model and the dual constant model, the study focused on predicting the blending ratios of polyester/viscose bi-component bi-color fibers using both approaches. Within the framework of the K-M single constant theory, 31 sets of equations were constructed. The blending

ratios under the single constant theory were predicted by solving these equations using the measured K/S data. Subsequently, based on the K-M dual constant theory, the absorption coefficient K values and scattering coefficient S values of monochromatic fibers were calculated using the least squares method. The mass fractions of each monochromatic fiber in the mixed fibers were predicted using a full-spectrum algorithm. By comparing the predicted ratios, prediction accuracy, and model stability under both the single and dual constant theories, the study aimed to determine the best color matching model for dope-dyed polyester/viscose bi-component bi-color fiber blending. The results indicated that the average percentage errors of the blending ratios for redT/yellowR, yellowT/blueR, and blueT/redR using the K-M single constant theory were 15.129%, 12.911%, and 2.908%, respectively. In contrast, using the K-M dual constant theory, the average percentage errors for the three combinations were 2.537%, 0.950%, and 1.599%, respectively. Both in terms of the ratio predictions and the percentage errors, the results were superior with the K-M dual constant theory, which also showed better stability. This indicates that the K-M dual constant model is more suitable for color blending of dope-dyed polyester/viscose bi-component bi-color fibers.

(3) To further investigate the prediction of multicolor blends in polyester/viscose bi-component fibers, three types of single-color

polyester staple fibers and three types of single-color viscose staple fibers were used as the base to prepare 54 bi-component tricolor blended fiber samples. Based on the K-M dual constant theory, the least squares method combined with a full spectrum algorithm was employed to predict the color formulae for dope-dyed polyester/viscose bi-component tricolor fiber blends, and the color differences between the predicted and actual samples were compared to explore the applicability and accuracy of the K-M dual constant in the color blending of dope-dyed polyester/viscose bi-component tricolor fibers. The results indicated that in the experiment with dope-dyed polyester/viscose bi-component tricolor fibers, the color differences between the predicted colors of the 54 blended fiber samples and their actual colors were all below 1.0, which, according to textile industry standards, are within acceptable limits; the errors between the predicted and actual blend ratios of the 54 mixed fiber samples were all below 5%, which indicates a generally low ratio error. This demonstrates the feasibility of using the K-M dual constant model to predict the blend ratios for dope-dyed polyester/viscose bi-component tricolor mixed fibers, with high prediction accuracy and good stability.

LI Shaocong(Materials and Chemicals)

Supervised by WANG Xu

KEY WORDS: polyester/viscose two-component, original liquid dyeing fibers, fiber blending color, color prediction, Kubelka-Munk theory

目 录

摘 要	IV
ABSTRACT	VII
目 录	XI
第 1 章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 研究背景及意义	1
1.3 计算机配色理论的发展	2
1.4 国内外研究现状	3
1.4.1 Kubelka-Munk 模型 (K-M 模型)	4
1.4.2 Stearns-Noechel 模型 (S-N 模型)	6
1.4.3 Friele 模型	7
1.4.4 其他配色模型	8
1.5 研究内容及创新点	9
第 2 章 实验部分	11
2.1 引言	11
2.2 实验内容	11
2.2.1 实验材料	11
2.2.2 实验仪器	14
2.2.3 混纤样本制备工艺	15
2.2.4 混色比例方案设计	17
2.2.5 颜色测量	19
2.3 测色影响因素及改进	19
2.3.1 残留纤维	19
2.3.2 样本的梳理	19
2.3.3 纤维排列方式	20
2.3.4 测色点的选择	21
2.4 纤维配色评价	21
2.4.1 色差公式	21
2.4.2 色差与视觉的关系	22
2.4.3 比例误差	22
2.5 本章小结	23
第 3 章 基于 Kubelka-Munk 理论模型双组分双色比例预测	24
3.1 引言	24
3.2 最小二乘法	24
3.3 全光谱配色算法	25
3.4 MATLAB 计算代码编写	27
3.4.1 计算单色纤维 K、S	27
3.4.2 计算单色纤维比例	28
3.5 实验结果	29
3.5.1 加和性研究	29

3.5.2 单常数预测比例结果及计算案例	29
3.5.3 单常数预测下偏差百分比及比例误差探究	30
3.5.4 单色纤维拟合结果	31
3.5.5 双常数预测下比例误差及色差探究	32
3.5.6 双常数预测下偏差百分比探究	34
3.5.7 预测样与实际样的色差比较	35
3.6 K-M 单常数和双常数预测比较	35
3.7 本章小结	39
第 4 章 基于 Kubelka-Munk 理论模型双组分三色比例预测	40
4.1 引言	40
4.2 实验结果	40
4.2.1 预测反射率与实际反射率比较	40
4.2.2 比例误差与色差探究	41
4.2.3 预测样与实际样的色差比较	44
4.3 本章小结	45
第 5 章 结论与展望	46
5.1 结论	46
5.2 展望	47
参考文献	48
附录	53
附录 1: 双色 MATLAB 计算 K、S 值代码	53
附录 2: 双色 MATLAB 计算单色纤维比例代码	54
附录 3: 三色 MATLAB 计算 K、S 值代码	55
附录 4: 三色 MATLAB 计算单色纤维比例代码	57
攻读硕士学位期间发表的论文	58
致谢	59

第 1 章 绪论

1.1 前言

色纺就是将不同颜色的纤维混合后纺制成纱线的技术,随着化学纤维的发展,我国色纺企业开始广泛应用原液着色纤维。原液着色纤维是指在纺织纤维的制造过程中,将不同颜色的色母粒直接添加到纤维原液中,使得纤维本身具有色彩,相比传统染色方法,原液着色纤维具有染色均匀、色牢度高、环保等优点,大大减少废水排放量,因此未来色纺行业的发展有着非常广阔前景^[1-3]。

如今,时尚潮流在快速变化,人们对色纺产品种类的需求也在不断提高。这种趋势迫使色纺行业从依赖有限种类的面料大批量生产模式,转向更加灵活地根据顾客需求进行个性化生产的模式。在这一转变中,对顾客提供的样品进行精确配色及快速打样的能力不仅是提高色纺企业竞争力的关键,也是色纺制造业面临的主要挑战之一^[4]。

在色纺纱颜色开发领域,配色过程不仅仅是技术性的环节,更是一种创新性的活动。服装行业每年会引入新的流行色彩趋势,国内领先的色纺纱企业也会定期发布其预测的流行色趋势。色纺纱生产企业若能有效跟进这些流行趋势,并快速有效的完成选色与色彩调配工作,创造出满足客户期望的色彩,这不仅能加强企业在市场中的竞争地位,还有助于提高其利润空间^[5]。

1.2 研究背景及意义

在中国秉持“绿水青山就是金山银山”的原则,坚定不移地推进生态文明建设和绿色发展道路这样的背景下^[6-7],绿色环保、多功能的纺织品越来越受消费者的喜爱,而色纺纱的理念正好符合了这样的发展趋势。

自 20 世纪 80 年代末色纺技术引进中国以来,在经历了 30 年的持续发展,已经形成了一个涉及众多企业的独立产品类别,并且这些企业的分布从最初的江浙地区扩散到全国各地。根据数据显示,到 2021 年为止,我国色纺纱市场规模达到 605.5 亿元,同比增长 5.1%,已经成为我国纱线产品中的主要品种之一。这一发展趋势不仅展现了色纺技术的成熟,也反映了色纺企业规模技术的进步。

在《纺织行业“十四五”科技发展指导意见》中,重点提及了原液着色等绿

色纤维的发展与应用^[8]。原液着色纤维，是在纺丝的溶液或熔体中添加着色剂，通过纺丝过程制得的有色纤维。这种纤维在加工成纺织品时无需额外染色步骤，从而降低了废水和二氧化碳排放，为传统印染产业中的高能耗、高污染和高排放问题提供了根本性解决方案^[9]。原液着色涤纶纤维因具有色泽均匀、色牢度高、耐老化、耐水洗、耐摩擦性好、能耗低、成本低等性能优势，被广泛的应用于色纺纱的生产^[10]。

色纺纱，就是先将纤维染成有色纤维，然后将两种或多种不同颜色的纤维经过充分混合后，进而纺制出具备特殊混色效应的纱线。因此做好调色、配色、对色工作就成为生产色纺纱的最重要环节之一^[11-12]。

色纺纱的混配色不同于传统染色纱的混配色，色纺纱的混配色过程主要依赖于经验丰富的配色技术人员，他们会根据客户提供的样品选择相应的有色纤维，并初步确定一定比例以制作小样。随后，在标准光源箱下进行色差比对，若观察色差超出客户的规定要求，便需重新调整各色纤维间的比例，并重新制作样品进行对色检验，反复此过程，直至产品色彩与客户样品间的色差满足要求^[13]。采用人工配色方法其准确率低、效率低、成本高，且受配色员工的经验、年纪、心情状态、天气等因素的影响，配色结果都会有所不同，还不能满足色纺企业“小品种、多批量、快交货”的特点，并且由于纱线捻度、粗细、种类以及纱线排列方式的不同，会形成色差，从而影响混配色结果^[14-15]。

随着计算机的发展，计算机技术凭借着低成本、效率高、准确性高等优点已经广泛用于各行各业。计算机测配色技术可以通过测色仪器对客户的来样进行测色，将测得的来样信息输入计算机，通过相应的配色模型后，可得出预测配方，该方法相较于传统人工配色来说，具有速度快、精确性高、且不受环境天气的影响等特点，不仅可以准确的获取织物的颜色，还可以在极短时间内给出配色方案^[16-17]。因此，研究计算机测配色技术对于降低人工打样频次、提升配色效率及精确度具有重大理论与实践意义。此外，该技术也将成为未来色纺纱测配色的主要研究方向。

1.3 计算机配色理论的发展

传统纤维和纺织品染料染色对配色人员的专业经验要求高，并且成本高、污染高，精确度低，难以达到工业生产需求^[18]，因此，众多学者对计算机测配色方向展开了研究，计算机测配色技术也由此发展而来。

20 世纪 30 年代，国际照明委员会建立了三刺激值的色度学体系，这一进展催生了计算机测配色技术的快速成长^[19]；同时，哈代开发的自动记录式反射率分光光度计，为颜色匹配技术提供了重要的实验基础^[20-21]；1931 年，P Kubelka 和 F Munk^[22]公开了他们的理论研究，阐述了光线在不透明介质中的吸收和散射机制；1943 年，Park 和 Stearns 发表的论文中具体论述了选择和吸收各种颜色的光线的光学性质，在染色样本的反射率和染色浓度之间可以建立过渡函数，还提出了两套计算染料浓度的公式^[23]。20 世纪 50 年代，科学家 Davidson 等联合设计了第一台适用于纺织产品颜色测量的配色计算机 COMIC，这提高了配色的效率，但仍要依赖人工配色的经验^[24]。这些科学进展共同推动了色彩科学领域的发展进程，为后续的技术创新奠定了坚实的理论与实验基础。

在 20 世纪 80 年代，计算机辅助配色技术由于纺织行业的快速发展而步入了一个加速发展的新阶段。其原因在于，传统的人工配色方法已无法满足当时市场对纺织品色彩的复杂需求。伴随着我国经济和科技的持续发展，色纺技术迎来了显著的进步，促使越来越多的色纺企业开始依赖于计算机辅助配色技术以提高效率和准确性，因此我国也加快了计算机辅助配色技术研究脚步，以促进该技术的创新和应用。

1.4 国内外研究现状

目前国内外关于色纺产品配色方面的研究主要有以下几个方面：

江新卫等^[25]在色纺纱配色方面进行了初步探索。他们首先通过利用已有的产品种类建立了一整套色彩标准卡，使得客户能够仅通过选定的色彩编号，依照预设的色比纪录，生产出符合要求的颜色。然后，当样品的颜色无法与标准色卡相匹配时，再需工人进行手动调配。

任安民等^[26]对配色方法进行初步改进。他们通过固定标准色棉的颜色与数量，并依据色纺纱的颜色标准，挑选适宜的标准色棉以配制出所需的色纺纱颜色。但随着计算机及配色模型的发展，运用计算机辅助测配色来提高色纺纱配色打样的效率及客观性，成为国内外该领域的研究热点。

目前在色纺纱混配色方面研究主要有两种：一是基于 Kubelka-Munk、Friele、Stearns-Noechel 三种配色模型以及对它们的算法改进进行配色预测，二是基于一些其他模型，如 Ga-BP 神经网络、人眼视觉特性、多维特征、HSV 色立体模型

等，用于研究色纺纱的配色预测。

1.4.1 Kubelka-Munk 模型（K-M 模型）

1931 年，Kubelka 与 Munk^[22]首次提出了一种集光吸收与光散射过程于一体的物理数学模型，随后 Kubelka 进一步对该模型进行了深入的理论推导与完善，最终形成了 Kubelka-Munk 理论。该理论基于对涂有颜料的基材表面色度与颜料浓度关系的细致研究，为理解和预测材料的光学性质提供了重要的理论。

物体反射率 R 与吸收系数 K 和散射系数 S 关系如式（1-1）：

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1-1)$$

式中： R 为不透明物体的反射率； K 为吸收系数； S 为散射系数。

K-M 单常数理论认为，混色样的 K/S 与其中各单色样的 K/S 存在着加和性关系，因此，色纺纱中存在式（1-2）关系：

$$\left(\frac{K}{S}\right)_0 = c_1 \left(\frac{K}{S}\right)_1 + c_2 \left(\frac{K}{S}\right)_2 + \cdots + c_m \left(\frac{K}{S}\right)_m \quad (1-2)$$

式中： $\left(\frac{K}{S}\right)_0$ 为混色样的 K/S 值； c_1 、 c_2 、 $\cdots$ 、 c_m 分别为混色样中第 m 个单色样的质量比； $\left(\frac{K}{S}\right)_1$ 、 $\left(\frac{K}{S}\right)_2$ 、 $\cdots$ 、 $\left(\frac{K}{S}\right)_m$ 分别为混色样中第 m 个单色样的 K/S 值。

目前，K-M 理论已在色料、涂料、油墨等领域中广泛应用且效果良好。由于 K-M 单常数理论将 K/S 视为整体进行加和性研究，因此在已知混色样、混色样中各单色样的 K/S 值，就可以计算出混色样的配方^[27]。

在 20 世纪 60 年代，Davidson 等^[28]将 K-M 理论与“色料混合理论”相结合，得到 K-M 单常数和 K-M 双常数理论。在色纺领域，K-M 单常数理论与 K-M 双常数理论均源自 K-M 理论，这两种理论分别基于不同的光学假设衍生出的两种理论推导。

研究发现，K-M 单常数理论应用于染料的染色配色中有较好的精确性，但是用于色纺纱的配色中却不能取得特别满意的效果。研究者们发现色纺纱中各单色样并不满足线性关系，因此又提出了 K-M 双常数理论。不同于 K-M 单常数理论的地方在于在进行加和性关系研究时，将 K/S 分为 K 、 S 来进行计算，混色样的 K/S 值与各单色样的 K 值和 S 值之间满足式（1-3）。

$$\frac{K}{S} = \frac{c_1 K_1 + c_2 K_2 + \cdots + c_i K_i}{c_1 S_1 + c_2 S_2 + \cdots + c_i S_i} \quad (1-3)$$

式中：K 为混色样的吸收系数，S 为混色样的散射系数， K_1 、 K_2 、 $\cdots$ 、 K_i 和 S_1 、 S_2 、 $\cdots$ 、 S_i 分别为混色样中各单色样的吸收系数和散射系数， c_1 、 c_2 、 $\cdots$ 、 c_i 为混色样中各单色样的质量比，且 $c_1 + c_2 + \cdots + c_i = 1$ 。

高新等^[29]基于 K-M 单常数理论对棉纤维进行颜色预测，为解决 K-M 单常数模型的不足，提出一种标准化映射方法，对此理论进行改进，消除在计算时一些错误 K/S 对结果的影响，结果显示改进后的 K-M 单常数模型对棉纤维混色预测精度大幅度提高。

王卓等^[30]基于 K-M 双常数理论对原液着色粘胶纤维三色混样进行颜色预测，利用最小二乘法和相对值法计算单色纤维的 K 值和 S 值再进行配方预测，结果显示最小二乘法计算出的结果色差以及离散程度更小，将最小二乘法用于 K-M 双常数颜色预测精度更高。

张婷婷等^[31]基于 K-M 双常数模型对环锭数码纺混色纱进行比例预测，利用相对值法求解，结果显示色差均值为 1.74，平均比例误差为 7.38%，说明 K-M 双常数理论对环锭数码纺混色纱具有适用性。

汪燕燕等^[32]为解决传统 K-M 双常数模型的问题，用插值替换的方法重新构建 K-M 双常数模型，结果显示平均色差从 1.48 降到 1.04，混合样的色差都在 2.0 以下，新的配色模型预测精度更高。

Zhang G 等^[33]基于改进的 K-M 双常数理论，提出了一种混合最小二乘法和网格搜索法用于预着色纤维混纺织物的分光光度配色。该方法能够快速有效地预测标准样品的配方，在为企业提供满意的配色效果方面优于其他方法。

Ma C 等^[34]提出了三种分析和比较灰纺纱线颜色的方法，使用配色软件 Datacolormatch 计算模拟染料匹配的配方，基于 K-M 双常数理论的混色模型，建立了纤维共混物的预测公式，最后根据灰纺纱线反射率值与有色纤维比例的关系，计算出基于已知反射率曲线的有色纤维配色公式。

Zhang G 等^[35]基于改进 K-M 双常数理论对预着色棉纤维混纺织物进行颜色预测，用最小二乘法计算了制备的纤维共混物样品的吸收系数（K）和散射系数（S），改进的 K-M 双常数理论可以更好地预测预着色纤维的混色效果。

Wei C 等^[36]人为了提高精确性, 采用新的可加性公式对 K-M 单常数模型进行了修正, 用于预着色纤维共混物的颜色预测, 结果显示该模型的平均色差为 0.91, 明显优于原模型。

1.4.2 Stearns-Noechel 模型 (S-N 模型)

1941 年, Duntley^[37]在对混色织物的研究中发现, 在纤维物理混合过程中, 混色纱的反射率与其组成的单色纤维反射率之间遵循特定的加和规律, 即式 (1-4)。

$$f[R(\lambda)] = \sum_i x_i f[r_i(\lambda)] \quad (1-4)$$

式中: $R(\lambda)$ 为 λ 波长下混色织物的反射率; $r_i(\lambda)$ 为 λ 波长下单色织物的反射率; $f[R(\lambda)]$ 为混色织物关于反射率的函数; x_i 表示第 i 组份单色纤维占混色纤维总质量比例, 且 $\sum_i x_i = 1$ 。

由于混色样反射率与单色样之间并不满足线性关系, 因此在实际应用中发现, 并不是简单的乘积加和关系^[38]。1944 年, Stearns 和 Noechel^[39]通过实验, 提出了一个描述反射率的中间函数的经验式, 其表达式为:

$$f[R(\lambda)] = \frac{1 - R(\lambda)}{M[R(\lambda) - 0.01] + 0.01} \quad (1-5)$$

式中: $R(\lambda)$ 为波长为 λ 下的反射率; M 为待求参数。

式 (1-5) 中待求参数 M , 它的大小受纤维颜色、纤维种类、混合方式、织物组织结构等影响。目前已有许多学者利用 S-N 模型得出不同纤维的最优 M 值, 如表 1-1 所示。

表 1-1 S-N 模型中不同纤维的最优 M 值

Tab.1-1 The optimal M value of different fibers in the S-N model

纤维种类	最优 M 值	作者
棉纤维	0.096	王泉等 ^[40]
涤纶纤维	0.189	Asplod 等 ^[41]
粘胶纤维	0.1474	程璐等 ^[23]
羊毛纤维	0.15	Stearns 等 ^[39]
腈纶纤维	0.25	Davidson 等 ^[42]
锦纶纤维	0.11	Friele 等 ^[43]

马崇启等^[44]基于 S-N 模型对涤纶纤维三色混纺进行颜色预测, 求解出最优

参数 M 值为 0.1842，结合人眼视觉特性对配色算法进行改进，求得平均色差只有 0.201，预测效果进一步得到提高。

沈加加等^[45]将约束最小二乘法的色纺纱光谱配色方法用到三种配色模型中，选取 5 个不同比例的样品进行预测，比较发现 S-N 模型的配色准确性较高，Friele 模型、K-M 模型准确性较差。

王玉娟等^[46]对色纺纱配色技术中配色和修色进行改进，对未知参数 M 值和对单色纤维初始配方进行赋值迭代，对单色纤维的调整量进行赋值，结果表明改进后的配色系统降低了对配色工人的依赖，提高了配色效率。

Wei C 等^[47]基于 S-N 模型通过最小化线性偏差建立了一个新的传递函数，应用于预着色纤维共混物颜色预测，改进后的配色模型预测的平均色差为 0.63，与 S-N 模型和 K-M 模型相比具有更高的颜色预测能力。

Shen J 等^[48]提出了一种人工神经网络与 S-N 模型相结合的混合模型，称为 Stearns-Noechel-ANN 模型，在相同的训练数据下，S-N-ANN 模型需要更少的训练时间，而且实现了更高的验证和相关系数。

Sun X 等^[49]基于三元耦合混合算法，构建了包含 166 个网格点的全色域混合模型，根据光谱波长和有色纤维的混合比例求解反射转换系数提高了 Stearns-Noechel 模型的预测精度。

1.4.3 Friele 模型

1952 年，Friele^[50]在式（1-4）的基础上确定了另外一种中间函数，即 Friele 模型，这一发现为纺织品颜色理论与实践提供了重要的科学依据，进一步深化了对纤维混合色彩效应理解的精度与深度。其表达式见式（1-6）。

$$f[R(\lambda)] = e^{-\sigma[1-R(\lambda)]^2 \cdot 2R(\lambda)} \quad (1-6)$$

式中： $R(\lambda)$ 为波长为 λ 下的反射率； σ 为待求参数。

Friele 模型是在光学理论与数理统计学领域提出，专门为了解决色纺测配色问题的颜色预测模型。然而，经过实证研究发现，该模型的预测精度不尽如人意。此外，模型在实际应用中还面临着参数计算的复杂性。

不同于 S-N 模型的是 Friele 模型是基于理论推导出来的公式而非基于经验，对常见纤维的最优参数 σ 值如表 1-2 所示。

表 1-2 Friele 模型中不同纤维的最优 σ 值Tab.2-1 The optimal values of different fibers in the Friele model σ value

纤维种类	最优 σ 值	作者
棉纤维	0.128	沈加加等 ^[51]
涤纶纤维	0.094	Asplod 等 ^[41]
粘胶纤维	0.280	B Philips-Invernizzi 等 ^[52]
羊毛纤维	0.300	Friele 等 ^[50]

马崇启等^[53]通过赋值迭代取最优值的方法得到最优待求参数 σ ，计算出的平均色差为 0.399，与通过大量实验计算出最优固定参数值的方法对比，发现前者方法计算出的平均色差最小，提高了配色效率。

沈加加等^[51]优化了 Friele 模型中待求参数 σ ，得到预测羊毛色纺纱时待求参数 σ 为 0.093，预测棉色色纺纱时待求参数 σ 为 0.128，并利用自制的配色软件进行配色预测，结果发现在配色时会出现同谱异色的情况。

杨瑞华等^[54]基于 Friele 模型对转杯纺原液着色粘胶混色针织物进行颜色预测，通过赋值法计算出最优参数 σ 值为 0.134，利用全光谱配色算法进行比例预测，结果显示平均色差为 0.4561，预测精度较好能满足配色要求。

Yang L 等^[55]基于 Stearns-Noechel 和 Friele 模型对彩色棉纤维纱线颜色预测进行优化设计，通过数据统计分析来确定参数。结果表明当纱线组分少于五种时，改进的 Stearns-Noechel 模型可用于颜色预测，Friele 模型可用于色差较小的五种组分，更好地满足实际生产中的配色要求。

Yang R 等^[56]基于 Friele 理论建立转纺纱多原色混纺纱的配色模型，为了提高模型的精度，采用在所有波长和在不同的波长下两种方法来计算 σ 值，结果表明在不同波长下计算的模型参数能较好地预测多通道转杯纺纱的颜色。

1.4.4 其他配色模型

Hemingray C 等^[57]比较了 Stearns-Noechel 模型、Friele 模型和两种神经网络模型，研究发现，两种神经网络的性能都超过了两种传统预测模型的性能。

沈加加等^[58]利用 BP 神经网络开发了一个色纺纱配色模型，探究了不同 BP 算法和隐含层节点数量对模型仿真效果与泛化性的影响。另一方面，马崇启等^[59]通过 BP 神经网络进行色纺纱的配方预测，同时引入遗传算法进行模型优化。两者都得出以下结果：当测试样本在训练样本中时结果精确，不在训练样本中时，

其色差较大，精度较低，因此其配色结果与样本容量大小有较大关系。

程璐等^[60]将人眼视觉特性对不同波长下反射光的敏感系数引入配色算法中进行加权计算，结合 Stearns-Noechel 理论模型，结果表明引入泊松分布赋值人眼敏感系数的配色算法结果最优。

Furferi R 等^[61]基于光谱相机的系统对色纺纱的颜色进行评估，该系统能够对梳理后的丝束进行基于光谱相机的实时测量，评估其与参考梳理织物的颜色对应关系，同时监测梳理过程中丝束的整体质量，通过对多种不同颜色的梳理织物的测试，该系统证明了其在实时可靠地评估颜色对应方面的有效性。

K-M 理论中的未知参数的求解过程相较于 S-N 模型和 Friele 模型中的未知参数，K-M 理论求解更方便。尤其是在新材料频繁涌现、产品迭代速率加快的市场环境下，模型的参数多样性、适用范围以及求解待定参数的复杂度成为评估指标的关键因素。K-M 双常数理论相比于 S-N 模型和 Friele 模型展示出显著优势，尤其是在应用于预测有色纤维混合物颜色方面。该理论不仅能够提供较为灵活和广泛的适用性，而且其参数求解的简洁性更符合快速发展的市场需求，进而为纤维混色预测提供了一种科学而有效的研究方法。

1.5 研究内容及创新点

在实际的配色过程中，由于涤纶与粘胶纤维在光谱特性上的差异，如何准确预测和调控混纺纤维的色彩效果成为一项挑战。因此，研究一种高效、准确的双组分纤维混配色模型对于实际生产具有重要的实际应用价值。

本文研究内容依托与滁州霞客无染彩色纺有限公司合作的企业横向项目“有色纤维测色标准化核心技术的研发及生产应用”，具体以原液着色双组分涤/粘纤维混配比例预测为研究对象，基于 K-M 理论，通过计算机测色仪，分别测定单色涤纶短纤维、单色粘胶短纤维，以及混配后的双组分双色混色纤维及双组分三色混色纤维的颜色特征值，结合最小二乘法等，实现混色纤维的配方预测，并对预测效果进行评价。本文章的主要研究内容有：

(1) 探究 K-M 理论模型在原液着色涤/粘双组分混配色中的 K/S 的加和性。为验证 K-M 理论针对涤/粘双组分混配纤维颜色预测的适用性，选取三种颜色的涤纶短纤维和三种颜色的粘胶短纤维为研究材料，按照一定比例互相混合形成 27 种双组分双色混纤样本，通过测量出的混色纤维 K/S 与单色纤维 K/S 数据，

探究原液着色混色纤维 K/S 与单色纤维 K/S 之间是否呈现加和性关系。

(2) 探究 K-M 理论模型在原液着色涤/粘双组分混配色中预测结果的精准性及适用性。以涤/粘双组分双色纤维混配比例预测为研究对象, 分别采用 K-M 单双常数理论两种方法进行实验。在 K-M 单常数理论模型内, 构建 31 个方程组, 通过测量出 K/S 数据, 求解 K-M 单常数理论下的预测比例; 其次, 基于 K-M 双常数理论, 利用最小二乘法, 计算单色纤维的吸收系数 K 值和散射系数 S 值, 通过全光谱算法, 预测混色纤维中各单色纤维的质量分数, 通过比较 K-M 单双常数理论下的比例预测情况、预测精度以及模型稳定性, 最终确定适用于原液着色涤/粘双组分双色纤维混配色最佳配色模型。

(3) 为了深入研究涤/粘双组分纤维在三色混配过程中颜色的预测准确性, 以三种单色涤纶短纤维和三种单色粘胶短纤维为基础, 制备 54 种双组分三色混纤样, 基于 K-M 双常数理论, 利用最小二乘法预测单色纤维的 K 值和 S 值, 以及利用全光谱配色算法预测比例配方, 对原液着色涤/粘双组分三色纤维混配色的配方进行预测, 并比对预测样和实际样之间的色差, 探究 K-M 双常数在原液着色涤/粘双组分三色纤维混配色的适用性和精准性。

创新点:

(1) 使用原液着色涤纶纤维和原液着色粘胶纤维双组分多色为研究对象, 探究其混配预测结果。

(2) 采用 MATLAB 编写代码形式, 计算预测结果, 保证结果的准确性, 以及使用偏差百分比和比例误差等作为评价指标。

三种常用的配色模型, 即 Kubelka-Munk 模型、Friele 模型和 Stearns-Noechel 模型, 由于 Friele 模型与 Stearns-Noechel 模型中含有未知参数, 其预测结果与参数有很大关系, 且不同纤维材料的参数不同, 对配色结果影响较大, 而 K-M 模型具有对研究材质不敏感的优点, 故本实验以 K-M 模型为基础, 对原液着色涤/粘双组分进行纤维混色比例预测实验。

第 2 章 实验部分

2.1 引言

涤纶纤维是由聚酯类聚合物通过高速纺丝工艺形成的合成材料，其特性包括优秀的耐磨性、良好的透气性、较强的抗褶皱能力、快速干燥、以及对酸碱具有较高的抵抗力和具备阻碍细菌生长的能力。此外，涤纶纤维在触感上柔软，重量轻盈，同时具有较高的透明度。而粘胶纤维，则是由自然来源的纤维素，如木浆或棉花，经过化学处理过程转化而成的合成纤维，以其柔软的手感、亲肤效果，以及卓越的吸湿性能而著称。由于涤纶和粘胶纤维具备的独特物理与化学性质，被广泛运用于色纺纱生产中。因此本研究采用涤/粘双组分混色纤维为对象，对双组分混色纤维在颜色测量过程中影响测量结果准确性等因素进行分析和改进，制备不同比例混合的纤维样本，为预测原液着色涤/粘双组分纤维组成比例，提供准确的纤维样品颜色数据作为研究基础。

2.2 实验内容

2.2.1 实验材料

涤纶的主要成分是聚对苯二甲酸乙二醇酯，其分子结构式如图 2-1 所示。

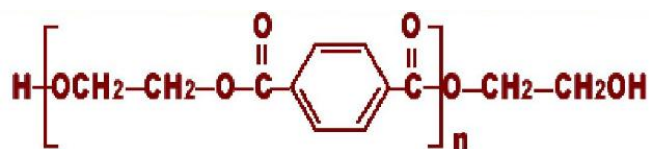


图 2-1 涤纶分子结构式

Fig.2-1 Polyester molecular structure formula

涤纶机械性能和化学性能主要有以下几点：

涤纶的分子结构特征为聚酯链通过酯键形成的长线性分子链，这些链条通过范德华力与部分结晶区相结合，赋予涤纶纤维独有的物理属性。耐磨性：其线性分子构造和高度取向赋予了涤纶优良的强度与耐磨性，使其在工业应用、户外装备及日常服装中得到广泛应用。伸缩性和回复性：尽管涤纶的伸缩性略逊于某些合成纤维，但其出色的弹性恢复能力保证了织物拉伸后能有效恢复形状，有助于服装形状的长期稳定。

耐化学品性:涤纶纤维对多数化学物质具有良好的抵抗能力,包括多种溶剂、漂白剂和其他化学品。这种耐化学品性主要归因于其分子结构的稳定性和密封的结晶区域,使得化学物质难以穿透分子链。吸湿性和透气性:相比于天然纤维,涤纶的吸湿性较低,这使得它在湿润环境下的舒适度较差,但也因此具有快干特性。其透气性主要取决于纤维的结构设计,如微孔结构可以提高其透气性。

染色性:涤纶的染色性较差,需要使用特定的染料和染色工艺。这是因为涤纶分子结构中缺乏能与染料形成牢固结合的活性位点。**耐热性:**涤纶的耐热性相对较好,能够承受较高的加工温度,但在过高温度下仍然会发生软化和熔化。这种特性使得涤纶适合于需要热处理的应用。

粘胶纤维的基本组成是纤维素,这是一种天然的高分子聚合物,其分子结构式如图 2-2 所示。粘胶由于其独特的结构和物理性能,在纺织、医药、化工等领域得到了广泛应用。

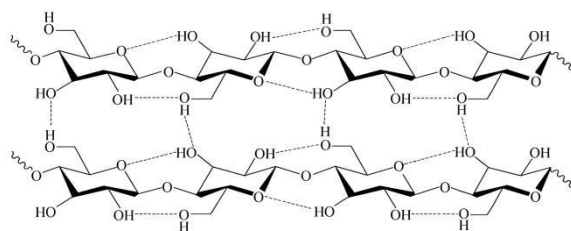


图 2-2 粘胶分子结构式

Fig.2-2 Polyester molecular structure formula

粘胶力学性能和化学性能主要有以下几点:

强度和伸长率:粘胶纤维的线性纤维素分子通过氢键相互作用,这种相互作用在一定程度上提供了纤维的强度和柔韧性。然而,当这些纤维暴露于湿润环境时,水分子会干扰纤维素分子间的氢键,从而导致强度下降和伸长率增加。**初始模量:**纤维素分子天然倾向于形成较为松散的结构,这解释了为什么粘胶纤维在初始拉伸阶段表现出较低的初始模量,即它在开始时较为柔软并且易于伸展。

耐酸碱性:强碱会破坏纤维素分子间的氢键,导致纤维弱化。**吸湿性:**纤维素分子内的羟基与水分子之间的亲和力是粘胶纤维高吸湿性的原因。这种结构特性使粘胶纤维在潮湿或汗湿环境中提供了额外的舒适感。**耐热性:**粘胶纤维的耐热性较低主要是因为纤维素分子在高温下容易发生热分解。这种结构敏感性导致在加工和使用过程中需要特别注意温度控制。

涤粘两者混纺后,可以克服各自的缺点,提高了织物的整体性能和应用范围。涤粘混纺的力学性能和化学性能有以下几点:

强度和耐用性:涤纶本身具有很高的强度和耐磨性,混纺粘胶纤维后,这些特性得到了增强,尤其是在遇水时,它比单纯的粘胶纤维表现出更优异的强度保持能力,从而显著提高了织物的整体耐久性和强度。**伸缩性:**涤纶的加入增加了织物的伸缩性,使得涤粘混纺纤维比纯粘胶纤维更加适应于需要一定伸缩性的应用场景,如运动服装。**抗皱性和形状稳定性:**涤纶纤维具有很好的抗皱性和形状恢复能力,这些特性在混纺纤维中得到了保留,使得涤粘混纺织物在经过清洗和烘干后,能够更好地保持其原始形状和外观。

耐化学品性:聚酯纤维对大多数化学品具有良好的耐受性,这种特性在涤粘混纺纤维中得以保留,提高了织物在各种环境下的使用寿命和耐用性。**吸湿性和透气性:**粘胶纤维的高吸湿性与涤纶的低吸湿性结合,可以根据具体的混纺比例调整织物的吸湿性和透气性。这种调整使得涤粘混纺纤维能够在保持适度舒适性的同时,减少湿感和黏腻感。**耐热性:**涤纶的耐热性优于粘胶纤维,因此涤粘混纺纤维的耐热性比纯粘胶纤维有所提高,但仍需注意高温处理时的条件,以避免损伤织物。

总的来说,涤粘混纺纤维综合了聚酯纤维和粘胶纤维的特性,提供了一种既耐用又相对舒适的纺织材料选择,涤粘混纺方式可以制造出适应广泛应用需求的织物。

本文选用原液着色涤纶纤维大红、宝兰 G、金黄,长度为 38 mm,细度为 1.5 dtex 规格,分别记 A、B、C;原液着色粘胶纤维大红、蓝色、黄色,长度为 38 mm,细度为 1.5 dtex 规格,分别记 D、E、F,实验材料如图 2-3 所示。图 2-3 (a) - (f) 分别为涤纶纤维大红、宝兰 G、金黄和粘胶纤维大红、蓝色、黄色。

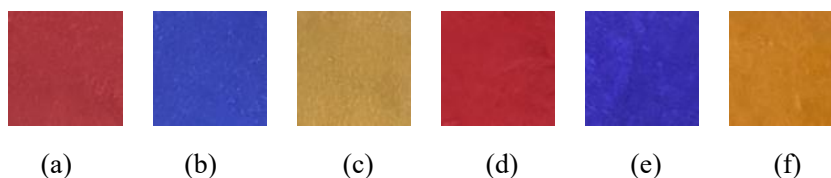


图 2-3 六种单色纤维

Fig.2-3 Six monochrome samples

Hunterlab 测色仪测量六种单色纤维的颜色特征参数如表 2-1 所示, K/S 值如图 2-4 所示。

表 2-1 六种单色纤维的颜色特征参数

Tab.2-1 The color characteristic parameters of six monochromatic fibers

单色纤维	L	a	b	X	Y	Z
红 T	47.5	40.04	15.56	23.43	16.4	11.12
红 R	51.4	49.85	22.29	29.91	19.62	11.12
黄 T	75.76	15.44	48.37	52.65	49.49	17.78
黄 R	72.38	30.47	52.79	52.83	44.23	13.26
蓝 T	42.66	0.96	-22.98	12.4	12.93	25.66
蓝 R	42.03	1.16	-26.67	12.04	12.52	27.31

表 2-1 中 L 为明亮度；a 为从绿色到红色的色度；b 为从蓝色到黄色的色度；X、Y、Z 为三刺激值。

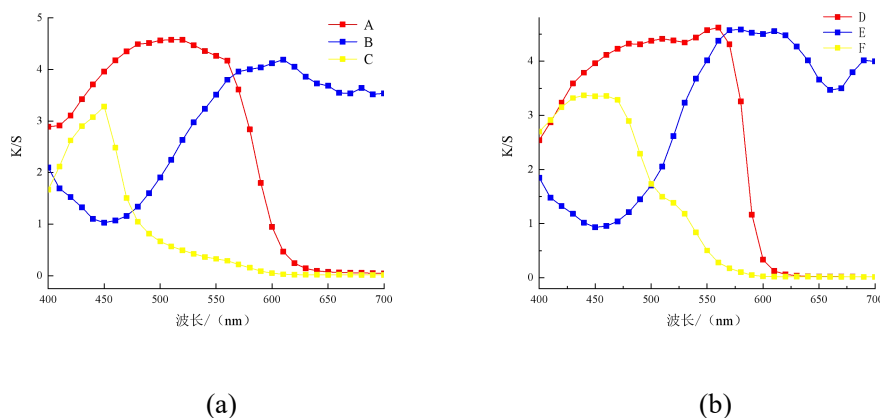


图 2-4 六种单色纤维的 K/S 图

Fig.2-4 K/S diagram of six monochromatic fibers

图 2-4 (a) 为三种单色涤纶纤维的 K/S，图 2-4 (b) 为三种单色粘胶纤维的 K/S。从图 2-4 中可以看出，对于 3 种涤纶纤维来说，不同颜色 K/S 值明显存在区别，如：A 在 400~550 nm 时的 K/S 较大，而在 600 nm 之后 K/S 很小，基本不吸收此波段的光，故呈现红色。同时，色系接近的涤纶纤维和粘胶纤维，K/S 值在 400-700 nm 波长范围内的分布趋势相似。研究表明^[62]，直接利用不同颜色纤维的反射率，进行混配色纤维反射率加权平均，其实际反射率并不准确。而通过 K-M 理论，将反射率转换为 K/S 值后，进行混配色纤维比例的估算具有可行性^[63]。

2.2.2 实验仪器

实验仪器如表 2-2 所示：

表 2-2 实验仪器

Tab.2-2 Experimental instrument

实验仪器	生产厂家
XPR204S/AC 型电子天平	梅特勒托利多科技（中国）有限公司
Hunterlab ColorQuest XE 型测色仪	上海信联创作电子有限公司
JWF1203 型梳棉机	青岛宏大纺织机械有限责任公司
HFX-A2 型并条机	南通三思机电科技有限公司

2.2.3 混纤样本制备工艺

表 2-3 实验材料

Tab.2-3 Experimental material

实验材料	规格	生产厂家
对苯二甲酸	纯度 99%	山东多聚化学有限公司
乙二醇锑	纯度 99%	江苏普乐司生物科技有限公司
乙二醇	纯度 99%	济南聚兴化工有限公司
二氧化钛	纯度 99.5%	河南优创化工产品有限公司

聚酯工艺流程如图 2-5 所示。

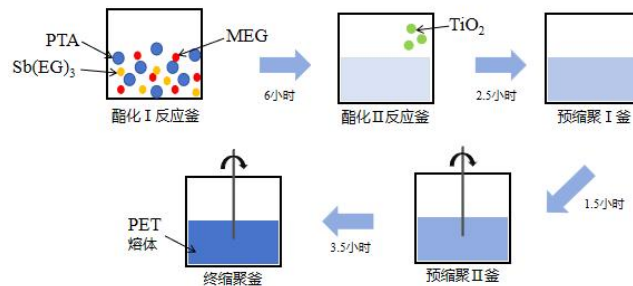


图 2-5 聚酯工艺流程图

Fig. 2-5 Polyester production process flow chart

(1) 将对苯二甲酸 PTA 计量后加入到浆料配制罐，同时加入催化剂乙二醇锑 Sb(EG)_3 及乙二醇 MEG。EG/PTA 浆料摩尔比为 1.13 左右。

(2) 将配制好的浆料连续计量送入酯化 I 反应釜，在压力 60 KPa、温度 255℃ 和搅拌下进行酯化反应，酯化率达到 89% 左右。

(3) 在停留约 6 小时后，将物料送入酯化 II 反应釜。在压力 7 KPa、温度 257℃ 和搅拌下继续酯化，同时在反应釜上方加入二氧化钛 TiO_2 ，酯化率达到 96% 左右。

(4) 在酯化 II 物料停留约 2.5 小时后,再以压差送入预缩聚 I 釜,在压力 12 KP、温度 264℃下进行预缩聚,停留时间约 1.5 小时,聚合度约 6 左右。

(5) 将预聚物再送入预缩 II 反应釜,在压力 1.5 KPa、温度 272℃和搅拌下继续缩聚,停留时间约 1.8 小时,聚合度约 16 左右。

(6) 缩聚产物经齿轮泵送入终缩聚釜,在压力 150—250 Pa、温度 280℃和搅拌下达到缩聚终点,停留时间约 3.5 小时,生成聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET,聚合度 100 左右。

(7) PET 熔体通过齿轮泵送至化纤纺丝和铸带冷却切粒。

原液着色涤纶纤维工艺流程如图 2-6 所示。

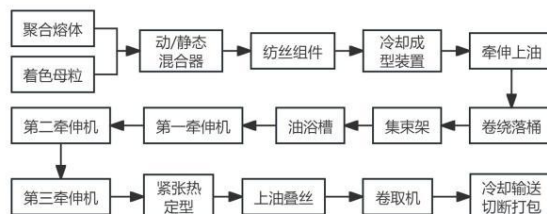


图 2-6 原液着色涤纶纤维工艺流程图

Fig. 2-6 Process flow chart of stock dye polyester fiber

原液着色粘胶纤维工艺流程如图 2-7 所示。

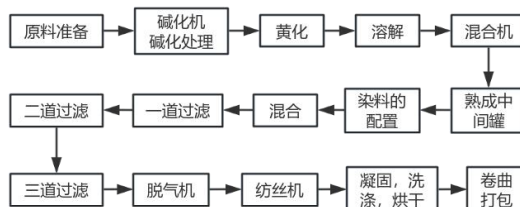


图 2-7 原液着色粘胶纤维工艺流程图

Fig. 2-7 Process flow chart of stock solution coloring viscose fiber

混色纤维样品的制备工艺。

开松: 使用毛刷对各单色纤维进行手动梳理,使单色纤维中的纤维束达到分离的状态。

称重: 设定每个混色纤维样品的总质量为 100 g,采用电子天平,按照既定比例准确称量混合纤维样品的质量,确保样品的重量严格控制在千分之一范围内。

混合: 将称重好的单色纤维采用手工方式混合,尽可能达到均匀的混合效果。

梳理：每种混色样品均需被送入梳棉机进行三到五次梳理处理，以确保纤维分布均匀。在梳棉机梳理期间，梳棉机上应有盖板，避免飞花现象，尽量减少纤维损失，从而影响最终实际混色比例。

并条：经梳理处理后的棉网送入并条机，最终形成均匀一致的棉条。对混纤棉条进行多次并条，进一步使混纤样品混合均匀，减少误差。

2.2.4 混色比例方案设计

双组分双色实验：将三种颜色的原液着色涤纶纤维与三种颜色的原液着色粘胶纤维进行两两混搭，形成双组分双色组合，分别为 AF、CE、BD，由于比例设定既要考虑实际应用，又要满足实验需求，因此每对组合按 1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1 比例混合，分别记作 AF1、AF2、…、AF9；CE1、…、CE9；BD1、…、BD9，具体双组分双色混纤样见表 2-4 所示。

表 2-4 双色混纤样品比例

Tab.2-4 Two-tone mixed fiber sample ratio

编号	颜色	比例	编号	颜色	比例	编号	颜色	比例
AF1	红 T/黄 R	1:9	CE1	黄 T/蓝 R	1:9	BD1	蓝 T/红 R	1:9
AF2	红 T/黄 R	2:8	CE2	黄 T/蓝 R	2:8	BD2	蓝 T/红 R	2:8
AF3	红 T/黄 R	3:7	CE3	黄 T/蓝 R	3:7	BD3	蓝 T/红 R	3:7
AF4	红 T/黄 R	4:6	CE4	黄 T/蓝 R	4:6	BD4	蓝 T/红 R	4:6
AF5	红 T/黄 R	5:5	CE5	黄 T/蓝 R	5:5	BD5	蓝 T/红 R	5:5
AF6	红 T/黄 R	6:4	CE6	黄 T/蓝 R	6:4	BD6	蓝 T/红 R	6:4
AF7	红 T/黄 R	7:3	CE7	黄 T/蓝 R	7:3	BD7	蓝 T/红 R	7:3
AF8	红 T/黄 R	8:2	CE8	黄 T/蓝 R	8:2	BD8	蓝 T/红 R	8:2
AF9	红 T/黄 R	9:1	CE9	黄 T/蓝 R	9:1	BD9	蓝 T/红 R	9:1

双组分三色实验：将三种颜色的原液着色涤纶纤维与三种颜色的原液着色粘胶纤维进行双组分三色混合，组合形式共有 6 种组合。经过企业调研，发现企业倾向于在色纺纱打样过程中使用尽可能少的颜色种类，原因在于，颜色种类过多将导致特定颜色的比例偏低，这在纺纱混合过程中，会使得低比例颜色的纤维无法在混色纤维中均匀分布。因此单色纤维比例设定最低 10%，最高 50%，每种组合设置 9 种混色比例(5:4:1、5:3:2、5:2:3、5:1:4、4:1:5、4:2:4、4:3:3、4:4:2、4:5:1)，具体双组分三色实验材料见表 2-5、图 2-8 所示。

表 2-5 三色混纤样品比例

Tab.2-5 Three-color mixed fiber sample ratio

编号	颜色	比例	编号	颜色	比例	编号	颜色	比例
1	黄 R/蓝 T/红 T	5:1:4	19	蓝 R/红 T/黄 T	5:1:4	37	红 R/黄 T/蓝 T	5:1:4
2	黄 R/蓝 T/红 T	5:2:3	20	蓝 R/红 T/黄 T	5:2:3	38	红 R/黄 T/蓝 T	5:2:3
3	黄 R/蓝 T/红 T	5:3:2	21	蓝 R/红 T/黄 T	5:3:2	39	红 R/黄 T/蓝 T	5:3:2
4	黄 R/蓝 T/红 T	5:4:1	22	蓝 R/红 T/黄 T	5:4:1	40	红 R/黄 T/蓝 T	5:4:1
5	黄 R/蓝 T/红 T	4:1:5	23	蓝 R/红 T/黄 T	4:1:5	41	红 R/黄 T/蓝 T	4:1:5
6	黄 R/蓝 T/红 T	4:2:4	24	蓝 R/红 T/黄 T	4:2:4	42	红 R/黄 T/蓝 T	4:2:4
7	黄 R/蓝 T/红 T	4:3:3	25	蓝 R/红 T/黄 T	4:3:3	43	红 R/黄 T/蓝 T	4:3:3
8	黄 R/蓝 T/红 T	4:4:2	26	蓝 R/红 T/黄 T	4:4:2	44	红 R/黄 T/蓝 T	4:4:2
9	黄 R/蓝 T/红 T	4:5:1	27	蓝 R/红 T/黄 T	4:5:1	45	红 R/黄 T/蓝 T	4:5:1
10	黄 T/红 R/蓝 R	5:1:4	28	蓝 T/红 R/黄 R	5:1:4	46	红 T/蓝 R/黄 R	5:1:4
11	黄 T/红 R/蓝 R	5:2:3	29	蓝 T/红 R/黄 R	5:2:3	47	红 T/蓝 R/黄 R	5:2:3
12	黄 T/红 R/蓝 R	5:3:2	30	蓝 T/红 R/黄 R	5:3:2	48	红 T/蓝 R/黄 R	5:3:2
13	黄 T/红 R/蓝 R	5:4:1	31	蓝 T/红 R/黄 R	5:4:1	49	红 T/蓝 R/黄 R	5:4:1
14	黄 T/红 R/蓝 R	4:1:5	32	蓝 T/红 R/黄 R	4:1:5	50	红 T/蓝 R/黄 R	4:1:5
15	黄 T/红 R/蓝 R	4:2:4	33	蓝 T/红 R/黄 R	4:2:4	51	红 T/蓝 R/黄 R	4:2:4
16	黄 T/红 R/蓝 R	4:3:3	34	蓝 T/红 R/黄 R	4:3:3	52	红 T/蓝 R/黄 R	4:3:3
17	黄 T/红 R/蓝 R	4:4:2	35	蓝 T/红 R/黄 R	4:4:2	53	红 T/蓝 R/黄 R	4:4:2
18	黄 T/红 R/蓝 R	4:5:1	36	蓝 T/红 R/黄 R	4:5:1	54	红 T/蓝 R/黄 R	4:5:1

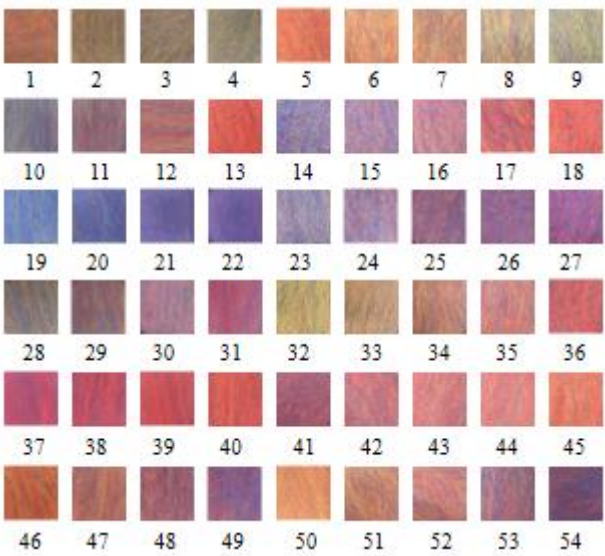


图 2-8 三色混纤样品

Fig. 2-8 Three-color mixed fiber sample

2.2.5 颜色测量

取纤维样品定重 1.18 g，将样品的重量误差控制在 ± 0.001 g 范围内，使用毛刷多次梳理纤维，将纤维团按照不同方向放入测试盒中，保证测试盒中纤维处于不透光状态，放入 Hunterlab 测色仪测色。为了确保颜色测量的精准性，采用以下具体的实验参数与方法：波长范围设定为 400~700 nm，以 10 nm 间隔进行测量；采用 CIELAB 标尺；选用 D65 作为标准光源；按照 10° 标准观察者视角进行颜色观测；测量孔径定为 25.4 mm。此外，为了减少实验误差并提高数据的可靠性，对每个样品从不同角度进行 4 次测量，并计算这些测量值的平均值作为最终的颜色数据记录。

2.3 测色影响因素及改进

2.3.1 残留纤维

梳棉机在梳理完一组混纤样本后，梳棉机的某些零部件，通常会遗留些许纤维，如果不及时清出残留纤维，那么这些遗留的纤维可能会掺入新样本之中，从而会导致混色样本的纤维组分及其占比发生变化，进而影响色彩测定的精度。因此，为确保测色数据的精确度，在每次梳理混纤样本前都应彻底清理梳棉机易残留纤维的零部件，防止残留纤维对后续样本测试造成影响。

为防止梳棉机残留纤维影响样本颜色，在梳棉机梳理完后，先让梳棉机梳理少许白色纤维，然后用刷子将梳棉机容易残留纤维的部位刷洗干净后，再让梳棉机空转半分钟，进一步排空残留纤维。为了让混色纤维样品能够混合均匀，多次对混纤样品进行梳理，直到颜色分布均匀。

2.3.2 样本的梳理

纤维在生产切断阶段会形成大量纤维束，在单色纤维颜色测量时，这些纤维束若不经妥善梳理，将影响颜色测量的准确性。原因在于纤维束中的纤维紧密集合，未能充分展开，可能会导致光线在颜色测量时的散射和吸收发生变化，从而影响颜色测定的结果。

纤维梳理和未梳理状态如图 2-9 所示，从图 2-9 可见，梳理前的纤维中有大量纤维束的存在，这些纤维束分布杂乱无序。相比之下，梳理后的纤维分布显著均匀。此外，梳理过程的效果从微观层面上改善了纤维的排列状态，为后续的颜色测量和纺纱工艺提供了更为理想的物理条件。因此，纤维在颜色测量前需要经

过适当的分散和梳理。

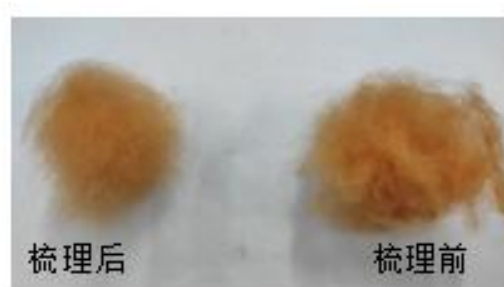


图 2-9 纤维梳理和未梳理状态图

Fig. 2-9 Fiber carding and non-carded state diagram

纤维在经过不同梳理次数梳理后，其状态如图 2-10 所示。



图 2-10 不同梳理次数纤维状态图

Fig. 2-10 Fiber state diagrams for various carding frequencies

当梳理次数少于 4 次时，纤维中的纤维束不能有效地被分散，导致纤维束无法被充分梳理开，这会对颜色测定的准确性产生影响。当梳理次数为 5 至 10 次时，纤维束完全分散，纤维分布达到均匀状态，此时的颜色测量效果最佳。然而，当梳理次数超过 10 次时，纤维由于经历过多次的梳理处理，可能会出现过度处理现象，如纤维打结等，这种情况下的纤维排布会降低颜色测量的质量。因此在纤维预处理过程中，控制梳理次数在 5~10 次以达到纤维分布的最优状态，从而确保颜色测量结果的准确性。

2.3.3 纤维排列方式

在测色仪的测色操作过程中，由于纤维的排列方式不同从而影响光束的入射路径，进而改变光束在纤维样品内部的传播方向，对测得的纤维颜色参数产生影响。因此，在将纤维放入测试盒中，需要规定其排列方式，使得测量结果一致。

在测量过程中，将称量好的纤维，按照纵向排列、横向排列以及左右斜向排列方式，将梳理好的纤维按四种排列顺序依次放入测试盒中。纤维排列方式见图 2-11 所示。



图 2-11 纤维排列方式

Fig. 2-11 Fiber arrangement methods

2.3.4 测色点的选择

在对均匀混色样本的颜色测量时，由于测色仪会存在测量错误的情况，只测量一次不能准确测定混色样本的颜色，且测试盒前段镜片不同位置颜色不同，因此须在多个不同区域进行多次测量，通过汇总这些测量点的数据，可以综合得出一个反映混色样本真实颜色的更精确的测量值。

在进行样本颜色测定时，每完成一次测量后，将样本顺时针旋转 90 度进行下一次的测量，以确保数据的全面性和准确性。在这一过程中，设定这组数据的极差为 0.15，若测量结果的极差大于此值，将进行数据校正，即移除偏差最大的测量值后重新进行测量。最终，通过对校正后的数据进行平均计算，得出样本的最终测量值。

2.4 纤维配色评价

2.4.1 色差公式

色差指的是在颜色感知上两个样本之间的区别，它是由明度、彩度及色相三者差值的总体所决定的。有色纤维的预测颜色和实际颜色之间的色差是评价配色模型准确性的一个重要指标。常用色差公式有 CIELAB^[64]、CMC_(l:c)^[65]、JPC79^[66]、CIDDE2000^[67]、ISO 等，而纺织行业中常用 CMC 色差公式且 $l:c=2:1$ 。本文均选用 CMC_(2:1) 色差公式对样本进行色差计算，其色差公式如式 (2-1) 所示。

$$\Delta E_{CMC} = \left[\left(\frac{\Delta L}{lS_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{cS_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

$$S_L = \frac{0.040975L_{std}^*}{1 + 0.01765L_{std}^*} \quad (2-2)$$

当 $L_{std}^* < 16$ 时:

$$S_L = 0.511$$

$$S_C = \frac{0.0638C_{std}^*}{1 + 0.0131C_{std}^*} + 0.638 \quad (2-3)$$

$$S_H = S_C(tf + 1 - f) \quad (2-4)$$

$$f = \left(\frac{C_{std}^{*4}}{C_{std}^{*4} + 1900} \right)^{1/2} \quad (2-5)$$

当 $164^\circ \leq H_{std}^* < 345^\circ$ 时: $t = 0.56 + |0.2 \cos(h_{std}^* + 168)|$

其余部分: $t = 0.36 + |0.4 \cos(h_{std}^* + 35)|$

式中: ΔL 、 ΔC 、 ΔH 分别为明度差、饱和度差、色相差; S_L 、 S_C 、 S_H 分别为 ΔL 、 ΔC 、 ΔH 的加权系数; l 、 c 分别为调整明度和饱和度相对宽容量的两个系数且 $l = 2$, $c = 1$ 。

通过最小二乘法计算, 可得到三种单色涤纶纤维和三种单色粘胶纤维在 400~700 nm 波长下的 K 值和 S 值, 将其代入式 (1-3), 进而求出一定混色比例下混色纤维的预测 K/S 值, 将其代入式 (2-6) 则可以计算出对应的预测反射率 R 值。再将混色纤维的预测色度值与实际色度值代入 $CMC_{(2,1)}$ 色差公式, 若色差结果越小, 说明预测颜色与实际颜色越接近, 预测效果越好, 预测精度越高。

$$R = 1 + \frac{K}{S} - \left[\left(\frac{K}{S} \right)^2 + 2 \frac{K}{S} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-6)$$

2.4.2 色差与视觉的关系

色差与视觉的关系见表 2-6。

表 2-6 色差与视觉之间的关系

Tab.2-6 The relationship between color difference and vision

色差(NBS)	感觉	色差(NBS)	感觉
0~0.5	几乎没有感觉	3.0~6.0	显著感觉
0.5~1.5	稍有感觉	6.0~12.0	非常显著感觉
1.5~3.0	明显感觉	--	--

2.4.3 比例误差

为了直观评估预测的混色配方比例的精确性以及深入评价配色模型的准确

度，本研究采纳了广泛认可的比例误差 Δr 作为评价指标，该值越小，说明预测的混色配方比例越精确，其计算如式（2-7）所示。

$$\Delta r = \sum_i |x_i - x'_i| \quad (2-7)$$

式中： Δr 为预测与实际混色配方比例之间误差； x_i 和 x'_i 分别为混色样本中第 i 个纤维的实际比例和预测比例。

2.5 本章小结

本章详细讲述了实验材料的选择及其制备过程。在实验测量过程中，多种因素可能会对测色结果产生影响，因此需要对测色方法进行改进。首先，对残留在梳棉机上的纤维进行清理，并在测色前对纤维进行梳理，梳理次数控制在 5 到 10 次；经过梳理的纤维将按照四种不同的排列顺序置于测试盒中进行颜色测量；在测量过程中，样本需顺时针旋转 90 度进行下一次测量，以确保测色结果的准确性。在色差评估方面，本研究采用了 $CMC_{(2:1)}$ 色差公式，并引入了比例误差作为评估标准。

第 3 章 基于 Kubelka-Munk 理论模型双组分双色比例预测

3.1 引言

在色纺纱行业，涤纶和粘胶纤维因其特有的物理和化学属性，被广泛运用于色纺纱生产中。Kubelka-Munk 理论模型具有对研究材质不敏感的优点，这使它在处理不同材料时展现出优越性，故以 K-M 理论模型为基础，对原液着色涤/粘双组分进行纤维混色比例预测实验。为了探究 K-M 理论模型对原液着色涤/粘双组分混配色中预测结果的适用性及精准性，在本章实验中，选取三种单色涤纶短纤和三种单色粘胶短纤为对象，并制备 27 种不同比例的双组分双色混纤样，基于 K-M 理论模型，探究 K-M 理论模型在原液着色涤/粘双组分混配色中各单色组分之间的加和性；通过 K-M 单双常数理论模型对实验数据进行分析，预测不同混合比例，并对两种方法在原液着色涤/粘双组分混配色预测的适用性和准确性进行对比研究。

3.2 最小二乘法

最小二乘法^[68]是通过最小化误差平方和来确定数据最佳拟合函数，是一种数学优化方法，在数据量充分，确保方程组为超定情形之下，此方法能有效解超定系统，为多个未知量找到最优近似值。本研究中，将利用测色仪获取的混色纤维 K/S 值，运用最小二乘法求解式 (3-1) 中的混色纤维中单色纤维的 K 值和 S 值，及混色纤维中单色纤维的质量分数。

假设有线性独立方程组：

$$\begin{cases} y_1 = x_1 a_{1,1} + x_2 a_{1,2} + \cdots + x_n a_{1,n} \\ y_2 = x_1 a_{2,1} + x_2 a_{2,2} + \cdots + x_n a_{2,n} \\ \vdots \\ y_m = x_1 a_{m,1} + x_2 a_{m,2} + \cdots + x_n a_{m,n} \end{cases} \quad (3-1)$$

已知线性独立方程组有 n 个未知数，为了使线性方程组有解，就需要保证独立方程组的个数要大于等于未知数，即 m 要大于等于 n 。

将式 (1-3) 移项变形可得式 (3-2)。

$$\left(\frac{K}{S}\right)(c_1S_1 + c_2S_2 + \cdots + c_iS_i) - (c_1K_1 + c_2K_2 + \cdots + c_iK_i) = 0 \quad (3-2)$$

假设共有 m 个混色样品，由最小二乘法原理，可将式（3-2）中的系数常量做以下定义。

$$\begin{aligned} a_{m,1} &= c_1\left(\frac{K}{S}\right) & a_{m,2} &= c_2\left(\frac{K}{S}\right) & \cdots & a_{m,i} &= c_i\left(\frac{K}{S}\right) \\ a_{m,i+1} &= -c_1 & a_{m,i+2} &= -c_2 & \cdots & a_{m,2i} &= -c_i \end{aligned}$$

并令：

$$Y = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$B = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,2i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,2i} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$X = \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \\ K_1 \\ \vdots \\ K_i \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

由于 Y 矩阵是零矩阵，为了使线性方程组有解，需要在末尾增加一行并赋值为 1， B 矩阵与 Y 矩阵同理，也需要在末尾增加一行并赋值为 1。

由此线性方程组可由式（3-6）表示。

$$Y = BX \quad (3-6)$$

为了得到混色纤维中各单色纤维的 K 值与 S 值，即 X 矩阵，通过最小二乘法进行矩阵运算，可得式（3-7）。

$$X = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3-7)$$

3.3 全光谱配色算法

式（3-7）中 X 为混色纤维中各单色纤维的 K 值和 S 值，根据 K - M 双常数

理论的全光谱配色算法, 利用最小二乘法计算混色纤维中各单色纤维的预测比例, 使得预测样与实际样之间的色差最小。

已知 K-M 双常数理论的全光谱配色算法在任意波长下满足:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda}^S = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda}^m \quad (3-8)$$

式中: $\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda}^S$ 为预测样的 K/S 值; $\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda}^m$ 为实际样的 K/S 值。

则:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda}^S = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda}^m = \frac{c_1 K_1 + c_2 K_2 + \cdots + c_i K_i}{c_1 S_1 + c_2 S_2 + \cdots + c_i S_i} \quad (3-9)$$

令:

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_i \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

$$A = \begin{bmatrix} K_{1,400} - \left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S S_{1,400} & K_{2,400} - \left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S S_{2,400} & \cdots & K_{i,400} - \left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S S_{i,400} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{1,700} - \left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S S_{1,700} & K_{2,700} - \left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S S_{2,700} & \cdots & K_{i,700} - \left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S S_{i,700} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

式中: $K_{1,400}$, $K_{2,400}$, $\cdots$, $K_{i,400}$ 和 $S_{1,400}$, $S_{2,400}$, $\cdots$, $S_{i,400}$ 分别为混色纤维中各单色纤维在 400 nm 处的吸收系数和散射系数; $\left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S$ 为混色纤维在 400 nm 处的 $\frac{K}{S}$ 值; $K_{1,700}$, $K_{2,700}$, $\cdots$, $K_{i,700}$ 和 $S_{1,700}$, $S_{2,700}$, $\cdots$, $S_{i,700}$ 分别为混色纤维中各单色纤维在 700 nm 处的吸收系数和散射系数; $\left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S$ 为混色纤维在 700 nm 处的 $\frac{K}{S}$ 值。

则式 (3-9) 通过最小二乘法及矩阵运算转换可由式 (3-13) 表示。

$$C = (A^T A)^{-1} A^T D \quad (3-13)$$

由于实验中混色纤维中各单色纤维的质量比例之和为 1，但是在实际预测比例时，求得的纤维的质量比例之和不为 1，故需对计算出的比例做归一化处理。

3.4 MATLAB 计算代码编写

在比例分析时，采用最小二乘法与全光谱算法对成分比例进行精确计算。由于设定的比例变量较多，导致方程组数量庞大，涉及的未知参数众多，进而增加了计算的复杂性和工作量。为解决此问题，选用 MATLAB 作为编程环境编写专门的计算脚本来执行这些计算任务。MATLAB 提供了强大的数值分析功能，能够有效地解决复杂的数学问题，特别是在涉及大规模数据处理和复杂算法实现时。因此，利用 MATLAB 来实现这些计算不仅能提高计算的效率，还能确保结果的准确性。

3.4.1 计算单色纤维 K、S

由最小二乘法可知，已知不同比例混色纤维的 K/S 值和混纤中单色纤维的比例，可求出单色纤维的 K、S 值。

新建变量，执行 save 命令，保存九种比例下混色纤维的 K/S 值，形成维度为 9×31 的矩阵，如图 3-1 所示。矩阵的行表示不同的比例混纤样，列代表相应的光谱数据点。

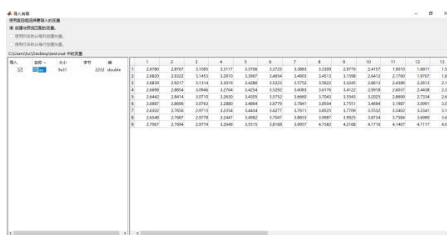


图 3-1 保存不同比例混色纤维的 K/S 值

Fig3-1 Record the K/S values of fibers blended in different proportions

由最小二乘法知，在 400 nm 处，有 B 矩阵为：

$$B = \begin{bmatrix} 0.1(K/S)_{400} & 0.9(K/S)_{400} & -0.1 & -0.9 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.9(K/S)_{400} & 0.1(K/S)_{400} & -0.9 & -0.1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

因此这样的矩阵共有 31 个。令 AB 为维度 310×4 的全 1 矩阵。

编程逻辑设计中引入了双层循环控制结构，其中外层循环的迭代范围设定为 1 至 31，内层循环则设置为 1 至 9，使得 31 个不同的 B 矩阵，按照预定的顺序将这些矩阵有序地排列 AB 中。

为了确保计算结果的有序性和便于分析的数据结构，令 GG 为 4×31 的全 0 矩阵。设置一个范围从 1 至 31 的循环迭代过程，以对 AB 中的相应矩阵段进行精确访问和处理。在每次迭代中，按顺序选取 AB 中的 10 行构成 A 矩阵，定义 F 矩阵为 10×1 的维度，其中前九行元素设为 0，而最后一行元素设为 1，进行式 (3-7) 矩阵运算，输出 GG，其为计算结果中每一列元素，即单色纤维 31 个波长点下的 K、S 值，代码见附录 1。

3.4.2 计算单色纤维比例

基于全光谱算法的推导，已知混色纤维的 K/S 值以及各单色纤维的 K、S 值，通过求解线性方程组的方式推导出混色纤维中各单色纤维的质量分数。

由 3.4.1 小结中的方法可以得到单色纤维的 K、S 值。创建新的变量，执行 save 命令，以保存九种比例下混色纤维的 K/S 值以及各单色纤维的 K、S 值，形成维度为 9×31 和 4×31 的矩阵。 4×31 的矩阵行为 S_1 、 S_2 、 K_1 、 K_2 ，列为相应 31 个波长下的光谱数据，如图 3-2 所示。

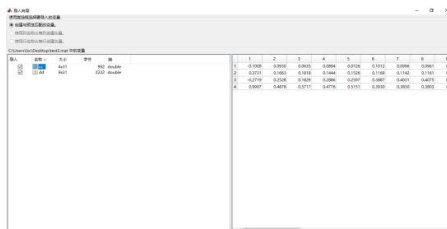


图 3-2 保存混色纤维 K/S 值及单色纤维 K、S 值

Fig3-2 Record the K/S values for mixed-color fibers and the K, S values for single-color fibers

由全光谱算法可知，A 矩阵为 31 行循环矩阵，因此令 AB 为维度 288×2 的全 1 矩阵。设计双层循环控制结构，其中外层循环的迭代范围设定为 1 至 9，内层循环则设置为 1 至 31。

令 GG 为 2×9 的全 0 矩阵。设置一个范围从 1 至 9 的循环迭代过程，以对 AB 中的相应矩阵段进行精确访问和处理。在每次迭代中，按顺序选取 AB 中的 32 行构成 A 矩阵，定义 F 矩阵为 32×1 的维度，其中前 31 行元素设为 0，而最

后一行元素设为 1，进行式 (3-13) 矩阵计算，输出 GG，其为计算结果为单色纤维的预测比例值，代码见附录 2。

3.5 实验结果

3.5.1 加和性研究

图 3-3 所示为双组分混配纤维从九种比例混色样中任意取三个与单色样的 K/S 和波长作图，其中图 3-3 (a) 中 AF2、AF5、AF7 分别表示红色涤纶和黄色粘胶的质量比为 2:8、5:5、7:3，图 3-3 (b) 中 CE3、CE5、CE8 分别表示黄色涤纶和蓝色粘胶的质量比为 3:7、5:5、8:2，图 3-3 (c) 中 BD1、BD5、BD9 分别表示蓝色涤纶和红色粘胶的质量比为 1:9、5:5、9:1。

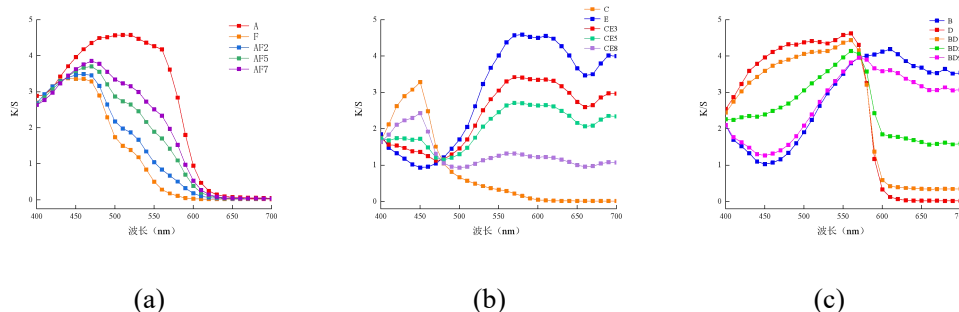


图 3-3 三种双组分双色混配纤维在不同比例下的 K/S 值

Fig.3-3 K/S values of three two-component and two-color mixed fibers at different ratios

由图 3-3 (a) 可看出 AF2、AF5、AF7 三条曲线在 400~700 nm 范围内基本都处于 A、F 两条曲线之间；图 3-3 (b)、(c) 均表现出类似的特征，即在 400~700 nm 范围内，某波长下，双组分不同比例混合的 K/S 值，总是介于该波长下的 2 个不同组分单色纤维的 K/S 值之间。同时，混色样 K/S 值曲线会偏向其中比例较大的单色样，外观上也会与占比例大的单色样颜色接近。

3.5.2 单常数预测比例结果及计算案例

上述研究结果说明，在涤/粘双组分中，基于单色纤维与混配色纤维的 K/S 值的加和性进行混配色纤维比例的估算具有可行性。其原理是运用不同比例纤维混配后的 K/S 值，与单色纤维 K/S 值的加和性，通过联立方程对混合比例进行求解，并与实际混配比例进行比较，从而验证混配模型的可行性。

基于 K/S 值的单色纤维与混配色纤维的加和性，在 400~700 nm 范围内，可以列出简易二元一次方程组。方程组如下：

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = C_1 \left(\frac{K}{S}\right)_\lambda + C_2 \left(\frac{K}{S}\right)_\lambda \quad (3-14)$$

$$C_1 + C_2 = 1 \quad (3-15)$$

例 1：当 AF（红 T/黄 R）在实际 1:9 比例时，以波长 $\lambda=630\text{ nm}$ 为例，计算 A 纤维的预测比例 C_1 ，已知：

$$\left(\frac{K}{S}\right)_A = 0.1413, \left(\frac{K}{S}\right)_F = 0.018, \left(\frac{K}{S}\right)_{AF} = 0.032 \quad (3-16)$$

联立式（3-14）~（3-16）求解出 $C_1=0.114$ 。

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{AF,630} = C_1 \left(\frac{K}{S}\right)_{A,630} + C_2 \left(\frac{K}{S}\right)_{F,630} \quad (3-17)$$

$$C_2 = 1 - C_1 \quad (3-18)$$

而实际 A 纤维占比为 0.1，存在一定的误差。类似上述方法，在每个波长采样点可列 1 个方程，共 31 个二元一次方程，去除部分不符合要求的数值后取均值作为最终的预测占比。同理 CE、BD 也可预测 C_1 值。类似方式可求解 AF、CE、BD 在九种不同比例下的计算的平均 C_1 值，如表 3-1 所示。

表 3-1 AF、CE、BD 在九种比例下 C_1 的平均值

Tab.3-1 The average value of C_1 for AF, CE, and BD in nine different ratios

	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
AF	0.099	0.199	0.283	0.367	0.380	0.500	0.527	0.652	0.813
CE	0.100	0.176	0.246	0.338	0.399	0.512	0.611	0.715	0.824
BD	0.133	0.226	0.303	0.420	0.508	0.601	0.686	0.781	0.906

3.5.3 单常数预测下偏差百分比及比例误差探究

为综合评价在不同比例下预测占比 C_1 的偏差情况，令偏差百分比 t ，其计算如式（3-19）。

$$t = \frac{(C'_1 - C_1)}{C_1} \times 100\% \quad (3-19)$$

其中 C_1 为某比例下实际值； C'_1 为计算值。

三种混配在不同比例下的偏差百分比如图 3-7 所示。

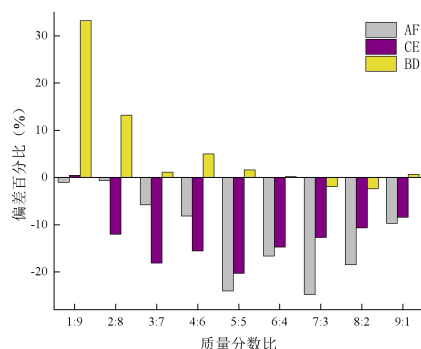


图 3-4 AF、CE、BD 在不同比例下的偏差百分比

Fig.3-4 The percentage deviation of AF, CE, and BD at different ratios

由图 3-4 可看出，在单常数预测下，AF、CE 在单一组分比例低或高的时候，计算出的结果误差较小，在两者比例接近时，误差较大；而 BD 的误差最大值处于 1:9 时，其余比例时，误差都较小。利用比例误差公式可以算出 AF、CE、BD 三种组合的平均比例误差，结果如下：

$$\Delta r_{AF}=15.129\%; \Delta r_{CE}=12.911\%; \Delta r_{BD}=2.908\%$$

由此可以看出三组搭配中预测和实际配方综合差异：BD（蓝 T/红 R）比例预测差异最小，AF（红 T/黄 R）最大，CE（黄 T/蓝 R）介于两者之间。

3.5.4 单色纤维拟合结果

通过最小二乘法可以得到六种单色纤维的散射系数和吸收系数的拟合值，将拟合值代入式（2-11）进而可以计算出对应的反射率拟合值，六种单色纤维的拟合反射率值与其实测反射率值对比结果如图 3-5、图 3-6、图 3-7 所示。

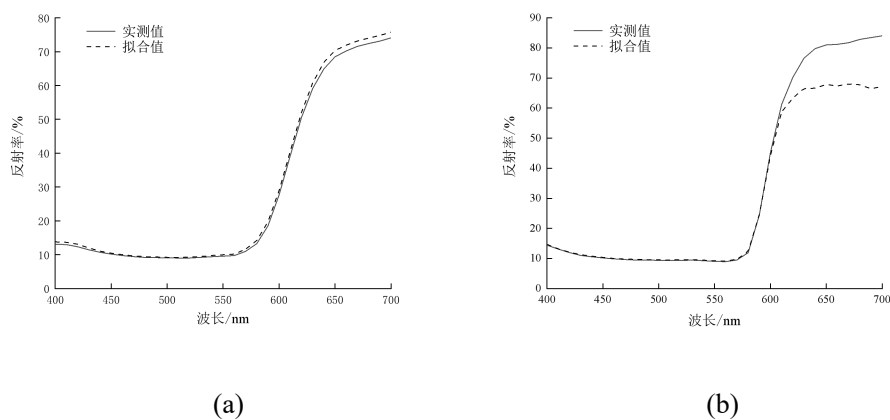


图 3-5 红色纤维实测值与拟合值对比图

Fig.3-5 Comparison between measured and fitted values of red fibers

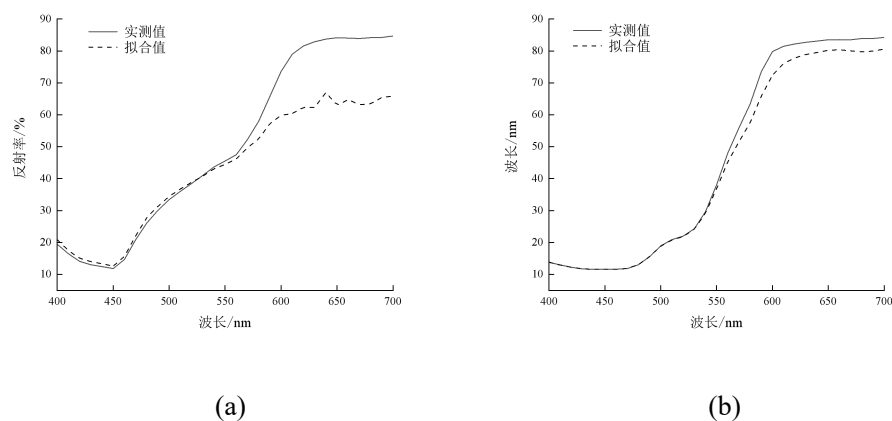


图 3-6 黄色纤维实测值与拟合值对比图

Fig.3-6 Comparison between measured and fitted values of yellow fibers

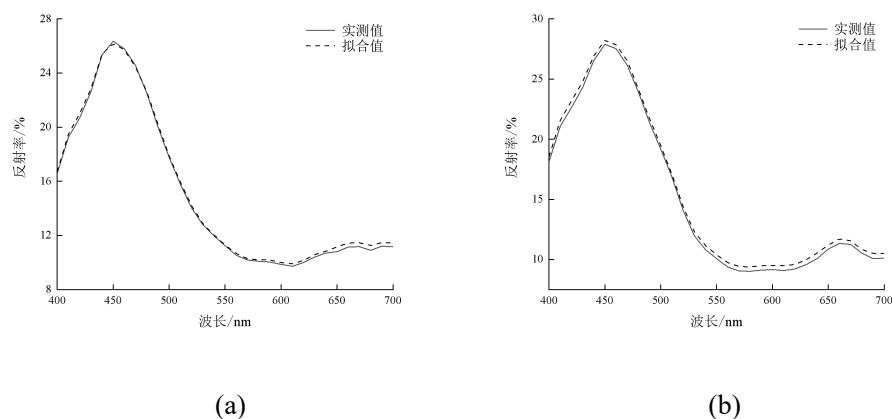


图 3-7 蓝色纤维实测值与拟合值对比图

Fig.3-7 Comparison between measured and fitted values of blue fibers

图 3-5 到图 3-7 中 (a) 为对应颜色的涤纶纤维, (b) 为对应颜色的粘胶纤维。蓝色涤纶和粘胶纤维的拟合决定系数 R^2 分别为 0.999、0.997, 说明蓝色纤维的拟合效果最好, 其拟合值与实测值在全波段上基本呈现重合的趋势; 黄色涤纶和粘胶纤维的拟合决定系数 R^2 分别为 0.824、0.989, 说明黄色涤纶纤维的拟合效果较差, 黄色粘胶纤维的拟合效果较好; 红色涤纶纤维和粘胶纤维的拟合决定系数 R^2 分别为 0.998、0.946, 说明红色涤纶纤维的拟合效果较好。因此, 在对混色纤维中单色纤维的反射率进行拟合时, 会因纤维的颜色及种类的不同, 其拟合效果也不同。

3.5.5 双常数预测下比例误差及色差探究

已知最小二乘法中式 (3-7) 结果为混色样中单色样的 K 值、S 值, 通过最

小二乘法及全光谱配色算法，可得到双常数下的预测比例 C_1 值。三种组合混色样的预测比例、比例误差及色差结果见表 3-2、表 3-3、表 3-4 所示。

表 3-2 红 T 与黄 R 混色样预测结果

Tab.3-2 Prediction results of mixed samples of red T and yellow R

编号	实际比例		预测比例		$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	红 T	黄 R	红 T	黄 R		
1	0.1	0.9	0.0796	0.9204	4.070	0.4475
2	0.2	0.8	0.2086	0.7914	1.728	0.1045
3	0.3	0.7	0.3211	0.6789	4.227	0.2058
4	0.4	0.6	0.3986	0.6014	0.279	0.2411
5	0.5	0.5	0.4971	0.5029	0.568	0.1525
6	0.6	0.4	0.6158	0.3842	3.161	0.1448
7	0.7	0.3	0.6663	0.3337	6.736	0.2810
8	0.8	0.2	0.7996	0.2004	0.076	0.0867
9	0.9	0.1	0.9099	0.0901	1.984	0.0817
均值					2.537	0.1940
标准差					2.088	0.1108

由表 3-2 可以看出红 T 与黄 R 的预测比例与实际比例差距与其余两种组合相比差异较大，比例误差均值为 2.537%，标准差为 2.088，红 T 与黄 R 组合与其他组合相比比例预测误差较大，且离散程度也偏大；九种比例下的色差均值为 0.1940，标准差为 0.1108，结合表 2-6 可知，红 T 与黄 R 组合的整体色差处于 0.5 以下，即视觉上处于几乎没有感觉，离散程度与其他两个组合相比几乎没有差别。

表 3-3 黄 T 与蓝 R 混色样预测结果

Tab.3-3 Prediction results of mixed samples of yellow T and blue R

编号	实际比例		预测比例		$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	黄 T	蓝 R	黄 T	蓝 R		
1	0.1	0.9	0.0946	0.9054	1.071	0.0409
2	0.2	0.8	0.2063	0.7937	1.265	0.0933
3	0.3	0.7	0.2978	0.7022	0.434	0.1173
4	0.4	0.6	0.4122	0.5878	2.451	0.2576
5	0.5	0.5	0.4863	0.5137	2.741	0.3086
6	0.6	0.4	0.6012	0.3988	0.297	0.1220
7	0.7	0.3	0.7000	0.3000	0.005	0.0704
8	0.8	0.2	0.8014	0.1986	0.283	0.0476
9	0.9	0.1	0.9000	0.1000	0.002	0.0140
均值					0.950	0.1721
标准差					0.972	0.0945

由表 3-3 可以看出黄 T 与蓝 R 组合的预测比例与实际比例相差较小，比例误差

均值为 0.950%，标准差为 0.972，其比例误差均值较小，说明黄 T 与蓝 R 组合比例预测误差与其他组合相比比例预测误差较小，离散程度相比偏小；黄 T 与蓝 R 组合的色差均值为 0.1721，标准差为 0.0945，结合表 2-6 可知，黄 T 与蓝 R 组合的整体色差在视觉上也是处于几乎没有感觉，离散程度较小。

表 3-4 蓝 T 与红 R 混色样预测结果

Tab.3-4 Prediction results of mixed samples of blue T and red R

编号	实际比例		预测比例		$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	蓝 T	红 R	蓝 T	红 R		
1	0.1	0.9	0.0966	0.9034	0.672	0.1876
2	0.2	0.8	0.2019	0.7981	0.379	0.0294
3	0.3	0.7	0.2917	0.7083	1.672	0.3072
4	0.4	0.6	0.4114	0.5886	2.273	0.2631
5	0.5	0.5	0.5064	0.4936	1.278	0.1260
6	0.6	0.4	0.6032	0.3968	0.638	0.0687
7	0.7	0.3	0.6933	0.3067	1.343	0.1188
8	0.8	0.2	0.7820	0.2180	3.599	0.3347
9	0.9	0.1	0.9127	0.0873	2.540	0.3060
均值					1.599	0.1935
标准差					0.988	0.1070

由表 3-4 可以看出蓝 T 与红 R 组合的预测比例与实际比例相差偏小，比例误差均值为 1.599%，标准差为 0.988，比例误差均值与其他组合相比处于中间，说明蓝 T 与红 R 组合的比例预测较次，离散程度较小；蓝 T 与红 R 组合的色差均值为 0.1935，标准差为 0.1070，结合表 2-6 可知，蓝 T 与红 R 组合的整体色差在视觉上和前两种组合相同也是处于几乎没有感觉，且离散程度较小。

3.5.6 双常数预测下偏差百分比探究

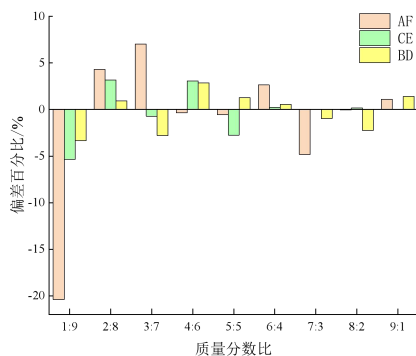


图 3-8 AF、CE、BD 在双常数预测下偏差百分比

Fig.3-8 Deviation percentage of AF, CE, BD under dual constant prediction

由图 3-8 可看出，在双常数预测下，AF 在 1:9 时，其误差最大，在其他比例时误差都较小；CE 在前半段时，误差偏大，而后半段则误差较小，有些几乎没有误差；BD 的总体误差都是偏小的。

3.5.7 预测样与实际样的色差比较

为了更直观的看出预测样与实际样的色差，通过实际测得的反射率 R 与预测的反射率 R 模拟作出预测颜色与实际颜色对比色卡，具体见图 3-9 所示。图 3-9 中左上有数字为 27 个样品的实际颜色，实际颜色下面为其对应的预测颜色。

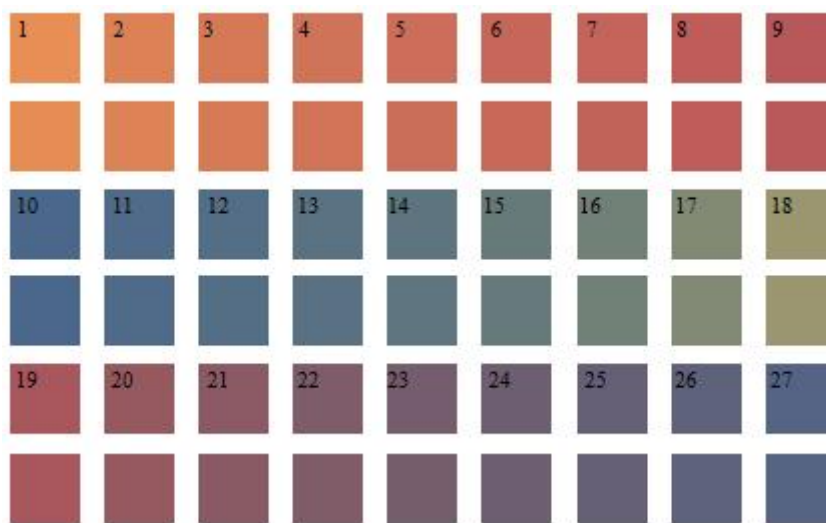


图 3-9 三种组合的预测颜色与实际颜色对比色卡

Fig.3-9 Comparison color chart between predicted colors and actual colors for three combinations

由图 3-9 可以看出，在 K-M 双常数模型的预测下，27 个样品的预测颜色与实际颜色在视觉上几乎没有差别，这与表 3-4 到表 3-6 中计算出的色差在表 2-6 色差与视觉对应关系相同，这说明 K-M 双常数模型在原液着色涤纶双组分双色预测比例中适用性强，且有很好的精确性。

3.6 K-M 单常数和双常数预测比较

在 3.5 小节分别使用 K-M 单常数理论和 K-M 双常数理论对原液着色涤纶双组分双色进行预测，为比较以上两种方法对原液着色涤纶双组分双色混纤预测的适用性和精准性，三种混纤组合分别用两种方法计算出的比例误差（单常数 $\Delta r/\%$ 、双常数 $\Delta r/\%$ ）和预测比例（单常数 C_1 、双常数 C_1 ）见表 3-5、表 3-6、表 3-7。单双常数比例误差比较见图 3-10、图 3-11、图 3-12 所示。

表 3-5 AF 在两种方法下的预测结果

Tab.3-5 The predicted results of AF under two methods

样品	单常数 C_1	双常数 C_1	单常数 $\Delta r / \%$	双常数 $\Delta r / \%$
AF1	0.0990	0.0796	0.201	4.070
AF2	0.1987	0.2086	0.250	1.728
AF3	0.2826	0.3211	3.480	4.227
AF4	0.3675	0.3986	6.508	0.279
AF5	0.3798	0.4971	24.043	0.568
AF6	0.5002	0.6158	19.966	3.161
AF7	0.5268	0.6663	34.646	6.736
AF8	0.6520	0.7996	29.602	0.076
AF9	0.8127	0.9099	17.465	1.984
均值			15.129	2.537
标准差			12.261	2.088

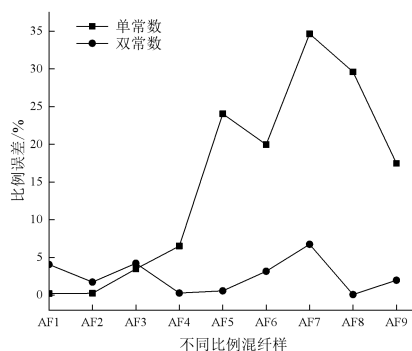


图 3-10 AF 单双常数比例误差比较

Fig3-10 Comparison of the constant ratio error between single and double AF constants

由表 3-5 可以看出, 当 A (红 T) 占比小时, 单常数的预测效果要优于双常数, 而当 A 占比越来越大时, 双常数的预测效果要比单常数的精准, 单常数的比例误差均值为 15.129%, 双常数的比例误差标准差为 2.537%, 要远小于单常数的比例误差均值, 说明双常数的整体预测效果比单常数精确; 单常数的比例误差标准差为 12.261, 双常数的比例误差标准差为 2.088, 由图 3-10 可以看出, 双常数的预测稳定性要优于单常数。

表 3-6 CE 在两种方法下的预测结果

Tab.3-6 The predicted results of CE under two methods

样品	单常数 C_1	双常数 C_1	单常数 $\Delta r / \%$	双常数 $\Delta r / \%$
CE1	0.1004	0.0946	0.088	1.071
CE2	0.1760	0.2063	4.799	1.265
CE3	0.2455	0.2978	10.893	0.434
CE4	0.3378	0.4122	12.434	2.451
CE5	0.3985	0.4863	20.296	2.741
CE6	0.5115	0.6012	17.690	0.297
CE7	0.6113	0.7000	17.746	0.005
CE8	0.7147	0.8014	17.069	0.283
CE9	0.8241	0.9000	15.175	0.002
均值			12.911	0.950
标准差			6.305	0.972

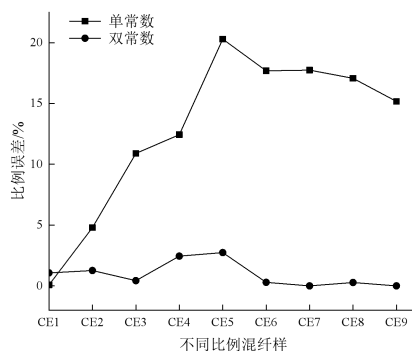


图 3-11 CE 单双常数比例误差比较

Fig3-11 Comparison of the constant ratio error between single and double CE constants

由表 3-6 可以看出，只有当 C（黄 T）占比为 0.1 时，单常数的预测效果要优于双常数，当 C 为其他占比时，双常数的预测效果都要优于单常数，单常数的比例误差均值为 12.911%，双常数的比例误差标准差为 0.950%，说明双常数的整体预测效果比单常数精确；单常数的比例误差标准差为 6.305，双常数的比例误差标准差为 0.972，从图 3-11 可以看出，双常数的预测稳定性要优于单常数。

表 3-7 BD 在两种方法下的预测结果

Tab.3-7 The predicted results of BD under two methods

样品	单常数 C_1	双常数 C_1	单常数 $\Delta r / \%$	双常数 $\Delta r / \%$
BD1	0.1332	0.0966	6.648	0.672
BD2	0.2264	0.2019	5.280	0.379
BD3	0.3034	0.2916	0.688	1.672
BD4	0.4199	0.4114	3.979	2.273
BD5	0.5080	0.5064	1.609	1.278
BD6	0.6011	0.6032	0.229	0.638
BD7	0.6863	0.6933	2.736	1.343
BD8	0.7808	0.7820	3.831	3.599
BD9	0.9059	0.9127	1.172	2.540
均值			2.908	1.599
标准差			2.067	0.988

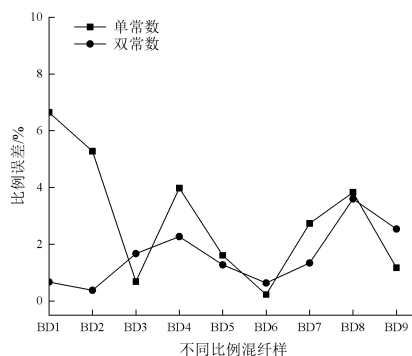


图 3-12 BD 单双常数比例误差比较

Fig3-12 Comparison of the constant ratio error between single and double BD constants

由表 3-7 可以看出，当 B（蓝 T）占比不同时，单双常数的预测效果优劣也在变化，但是相差不多；单常数的比例误差标准差为 2.067，双常数的比例误差标准差为 0.988，从图 3-12 可以看出，双常数在预测稳定性方面还是要优于单常数。

由表 3-5 到表 3-7 可以看出，双常数理论预测比单常数理论预测，AF 的比例误差减少了 83.2%，CE 的比例误差减少了 92.6%，BD 的比例误差减少了 45%，AF 的比例误差标准差减少了 83.0%，CE 的比例误差标准差减少了 84.6%，BD 的比例误差标准差减少了 52.2%，说明双常数的整体预测效果要优于单常数，且双常数理论下的预测稳定性要优于单常数。

3.7 本章小结

本章主要以原液着色涤/粘双组分双色纤维混配色实验为基础，基于 K-M 单常数理论探究原液着色涤/粘双组分双色纤维混配色的加和性，基于 K-M 单双常数理论对实验数据进行分析，对比分析以两种理论的配色结果。结果显示：在 400~700 nm 波长内，某个波长下，涤/粘双组分不同比例混合的 K/S 值，总是介于该波长下的 2 个不同组分单色纤维的 K/S 值之间，且当混色样中单色样的比例越大时，其整体的 K/S 值会逐渐向比例大的单色样的 K/S 值靠近，说明基于单色纤维与混配色纤维的 K/S 值的加和性进行混配色纤维比例的估算具有可行性。

在 K-M 单常数理论下，已知一定条件，对于蓝 T/红 R 混配时，除个别预测偏差较大外，总体效果好；黄 T/蓝 R 以及红 T/黄 R，均呈现预测偏差两头小中间大的特征。在 K-M 双常数理论下，27 种混纤样的平均色差为 0.1865，整体色差都处于 0.5 以下，根据视觉与色差之间的关系可知，视觉处于几乎没有感觉；红 T/黄 R 组合的比例误差为 2.537%，是三种组合中最大的，蓝 T/红 R 次之，黄 T/蓝 R 最小，说明黄 T/蓝 R 的预测效果最好，蓝 T/红 R 次之，红 T/黄 R 较差。

对实验结果进行综合分析发现，无论是比例预测结果还是偏差百分比结果，K-M 双常数理论的预测结果都要优于 K-M 单常数理论的预测结果，双常数模型不仅在预测比例上更为接近实际值，而且双常数理论的稳定性方面更加可靠。

第 4 章 基于 Kubelka-Munk 理论模型双组分三色比例预测

4.1 引言

为进一步探讨 Kubelka-Munk 理论在原液着色涤/粘双组分三色混配色中的比例预测效果, 本章实验以第 3 章中预测效果较好的 K-M 双常数模型为基础, 选定三种单色的涤纶短纤维与三种单色的粘胶短纤维作为研究对象, 设计并制备了 54 种双组分三色混纤测试样品, 采用最小二乘法结合全光谱算法, 探究 K-M 双常数模型在原液着色涤/粘双组分三色混配色中的比例预测效果和适用性, 为原液着色涤/粘双组分混色纤维的颜色预测提供更为精确稳定的理论模型, 提高打样效率。

4.2 实验结果

4.2.1 预测反射率与实际反射率比较

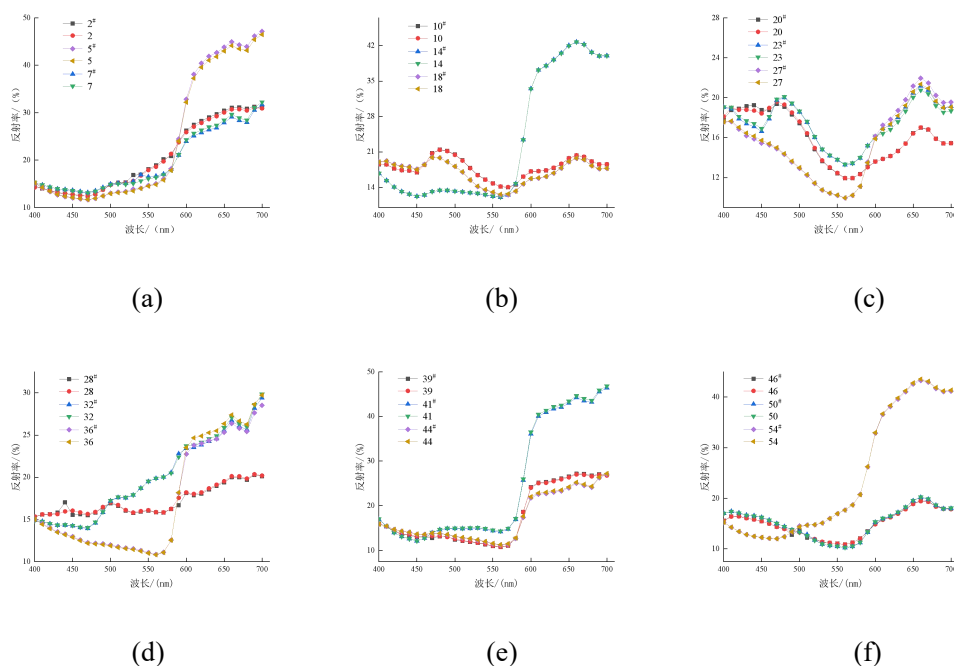


图 4-1 六种混色纤维组合随机样的预测 R 与实际 R

Fig. 4-1 Prediction R and actual R of six mixed fibers combined random samples

图 4-1 (a) - (f) 为六种混色纤维组合随机取样的预测反射率与其实际反射率对比图, 其中图 4-1 (a) 中 2、5、7 和 2[#]、5[#]、7[#] 分别表示为 2、5、7 号样品的实际和预测反射率 R, 图 4-1 (a) - (f) 中其余编号与图 4-1 (a) 意义相同。

由图 4-1 (a) 可以看出 2、5、7 号样品的预测反射率与实际反射率在波长 400 nm~700 nm 范围内基本重合, 图 4-1 (a) - (f) 中除个别样本在某些波长下有一定的偏差外, 其他均表现出类似的特征, 这说明从光谱反射率的角度来看, 各样品的预测颜色与实际颜色非常接近。

4.2.2 比例误差与色差探究

已知最小二乘法中式 (3-7) 结果为混色样中单色样的 K 值、S 值, 结合 K-M 双常数理论的全光谱配色算法, 编写 MATLAB 程序算法 (见附录 3、附录 4), 可求出预测比例。六种组合混色样的预测比例、配方比例误差及色差结果见表 4-1 到表 4-6 所示。

由表 4-1 可知, 9 种配比情况下的黄色粘胶 (黄 R) 与蓝色涤纶 (蓝 T)、红色涤纶 (红 T) 混色的配方比例误差均值为 1.733%, 标准差为 0.669, 说明该组样品预测比例与实际比例差异较小, 且离散程度较小; 色差均值为 0.4852, 标准差为 0.2152, 与其他组相比色差及离散程度略大。

表 4-1 黄色粘胶与蓝色、红色涤纶混色样预测结果

Tab.4-1 Prediction results of yellow viscose mixed with blue and red polyester

编号	实际比例			预测比例			$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	黄 R	蓝 T	红 T	黄 R	蓝 T	红 T		
1	0.5	0.1	0.4	0.5042	0.0974	0.3985	0.836	0.4096
2	0.5	0.2	0.3	0.4955	0.2064	0.2981	1.279	0.2144
3	0.5	0.3	0.2	0.4948	0.3114	0.1937	2.288	0.8355
4	0.5	0.4	0.1	0.4974	0.3934	0.1092	1.844	0.7289
5	0.4	0.1	0.5	0.3983	0.1048	0.4970	0.958	0.3166
6	0.4	0.2	0.4	0.4129	0.1904	0.3967	2.588	0.6424
7	0.4	0.3	0.3	0.4016	0.2874	0.3111	2.529	0.5821
8	0.4	0.4	0.2	0.4062	0.4050	0.1888	2.237	0.4554
9	0.4	0.5	0.1	0.4052	0.4967	0.0981	1.039	0.1818
均值							1.733	0.4852
标准差							0.669	0.2152

由表 4-2 可知, 黄色涤纶 (黄 T) 与蓝色粘胶 (蓝 R)、红色粘胶 (红 R) 混色样的比例误差均值为 1.696%, 标准差为 1.202, 说明该组样品预测比例与实际比例差异较小, 且离散程度略小; 色差均值为 0.1721, 标准差为 0.1145, 与其他组相比色差及离散程度较小。

表 4-2 黄色涤纶与蓝色、红色粘胶混色样预测结果

Tab.4-2 Prediction results of mixed samples of yellow polyester and blue and red viscose

编号	实际比例			预测比例			$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	黄 T	红 R	蓝 R	黄 T	红 R	蓝 R		
10	0.5	0.1	0.4	0.5000	0.1009	0.3991	0.175	0.0460
11	0.5	0.2	0.3	0.5048	0.1885	0.3067	2.301	0.1229
12	0.5	0.3	0.2	0.4922	0.2992	0.2086	1.711	0.3948
13	0.5	0.4	0.1	0.5045	0.4103	0.0852	2.957	0.2468
14	0.4	0.1	0.5	0.3966	0.0903	0.5131	2.621	0.0252
15	0.4	0.2	0.4	0.4004	0.1986	0.4011	0.289	0.1629
16	0.4	0.3	0.3	0.4050	0.2968	0.2982	1.001	0.0970
17	0.4	0.4	0.2	0.4025	0.3976	0.1999	0.509	0.1521
18	0.4	0.5	0.1	0.3951	0.5185	0.0865	3.696	0.3016
均值							1.696	0.1721
标准差							1.202	0.1145

由表 4-3 可知，蓝色粘胶（蓝 R）与红色涤纶（红 T）、黄色涤纶（黄 T）混色样的比例误差均值为 1.666%，标准差为 1.025，说明该组样品预测比例与实际比例差异较小，且离散程度略小；色差均值为 0.2546，标准差为 0.0902，与其他组相比色差略大，离散程度略小。

表 4-3 蓝色粘胶与红色、黄色涤纶混色样预测结果

Tab.4-3 Prediction results of blue viscose mixed with red and yellow polyester

编号	实际比例			预测比例			$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	蓝 R	红 T	黄 T	蓝 R	红 T	黄 T		
19	0.5	0.1	0.4	0.4965	0.1054	0.3981	1.085	0.2992
20	0.5	0.2	0.3	0.5030	0.1944	0.3026	1.120	0.3366
21	0.5	0.3	0.2	0.5022	0.3009	0.1968	0.635	0.3912
22	0.5	0.4	0.1	0.4970	0.3998	0.1032	0.643	0.2506
23	0.4	0.1	0.5	0.3983	0.0951	0.5066	1.325	0.3004
24	0.4	0.2	0.4	0.4009	0.2078	0.3913	1.736	0.2003
25	0.4	0.3	0.3	0.4016	0.2856	0.3128	2.876	0.2202
26	0.4	0.4	0.2	0.4018	0.4179	0.1804	3.929	0.2367
27	0.4	0.5	0.1	0.3978	0.4940	0.1082	1.645	0.0563
均值							1.666	0.2546
标准差							1.025	0.0902

由表 4-4 可知，蓝色涤纶（蓝 T）与红色粘胶（红 R）、黄色粘胶（黄 R）混色样的比例误差均值为 1.650%，标准差为 0.703，说明该组样品预测比例与实际比例差异较小，且离散程度较小；色差均值为 0.3868，标准差为 0.3377，与其他组相比色差及离散程度略大。

表 4-4 蓝色涤纶与红色、黄色粘胶混色样预测结果

Tab.4-4 Prediction results of blue polyester mixed with red and yellow viscose

编号	实际比例			预测比例			$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	蓝 T	红 R	黄 R	蓝 T	红 R	黄 R		
28	0.5	0.1	0.4	0.5023	0.0950	0.4028	1.003	0.3160
29	0.5	0.2	0.3	0.4989	0.2087	0.2924	1.741	0.9934
30	0.5	0.3	0.2	0.4934	0.3027	0.2039	1.321	0.1866
31	0.5	0.4	0.1	0.5067	0.3934	0.0999	1.343	0.1010
32	0.4	0.1	0.5	0.4046	0.0940	0.5015	1.206	0.0672
33	0.4	0.2	0.4	0.4021	0.1948	0.4031	1.042	0.1809
34	0.4	0.3	0.3	0.3909	0.3167	0.2924	3.335	0.0968
35	0.4	0.4	0.2	0.3948	0.3937	0.2115	2.290	0.8399
36	0.4	0.5	0.1	0.4076	0.5003	0.0921	1.571	0.6993
均值							1.650	0.3868
标准差							0.703	0.3377

由表 4-5 可知，红色粘胶（红 R）与黄色涤纶（黄 T）、蓝色涤纶（蓝 T）混色样的比例误差均值为 2.461%，标准差为 1.024，说明该组样品预测比例与实际比例与其他组相比差异略小，且离散程度略小；色差均值为 0.1894，标准差为 0.0673，与其他组相比色差及离散程度略小。

表 4-5 红色粘胶与黄色、蓝色涤纶混色样预测结果

Tab.4-5 Prediction results of red viscose mixed with yellow and blue polyester

编号	实际比例			预测比例			$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	红 R	黄 T	蓝 T	红 R	黄 T	蓝 T		
37	0.5	0.1	0.4	0.5037	0.0960	0.4003	0.808	0.2545
38	0.5	0.2	0.3	0.5100	0.2048	0.2852	2.965	0.1400
39	0.5	0.3	0.2	0.4910	0.3067	0.2023	1.795	0.1746
40	0.5	0.4	0.1	0.4951	0.3960	0.1090	1.795	0.0762
41	0.4	0.1	0.5	0.3956	0.0967	0.5077	1.541	0.1721
42	0.4	0.2	0.4	0.4093	0.2095	0.3811	3.770	0.2859
43	0.4	0.3	0.3	0.3855	0.2944	0.3201	4.015	0.1709
44	0.4	0.4	0.2	0.3953	0.3934	0.2113	2.262	0.1451
45	0.4	0.5	0.1	0.4144	0.5016	0.0840	3.199	0.2849
均值							2.461	0.1894
标准差							1.024	0.0673

由表 4-6 可知，红色涤纶（红 T）与黄色粘胶（黄 R）、蓝色粘胶（蓝 R）混色样的比例误差均值为 1.109%，标准差为 0.673，说明该组样品预测比例与实际比例差异较小，且离散程度较小；色差均值为 0.1772，标准差为 0.1171，与其他组相比色差及离散程度略小。

表 4-6 红色涤纶与黄色、蓝色粘胶混色样预测结果

Tab.4-6 Prediction results of red polyester mixed with yellow and blue viscose

编号	实际比例			预测比例			$\Delta r / \%$	ΔE_{CMC}
	红 T	蓝 R	黄 R	红 T	蓝 R	黄 R		
46	0.5	0.1	0.4	0.5037	0.0984	0.3979	0.741	0.2537
47	0.5	0.2	0.3	0.4889	0.2080	0.3030	2.213	0.0991
48	0.5	0.3	0.2	0.4967	0.3002	0.2032	0.666	0.2572
49	0.5	0.4	0.1	0.5117	0.3896	0.0986	2.348	0.0258
50	0.4	0.1	0.5	0.4021	0.1017	0.4962	0.762	0.0816
51	0.4	0.2	0.4	0.4014	0.1940	0.4045	1.198	0.0745
52	0.4	0.3	0.3	0.4017	0.3022	0.2961	0.788	0.3940
53	0.4	0.4	0.2	0.3949	0.4038	0.2013	1.024	0.2877
54	0.4	0.5	0.1	0.3995	0.5012	0.0993	0.239	0.1212
均值							1.109	0.1772
标准差							0.673	0.1171

由表 4-1 到表 4-6 可以看出, 54 个混色样品的色差都在 1.0 以下, 色差最大为 29 号, 为 0.9934, 色差最小为 14 号, 为 0.0252, 按照纺织行业的色差标准, 色差在 1.1 以下属于可接受范围内。54 个混色样品的比例误差都在 5% 以下, 比例误差最大是 43 号, 为 4.015%, 比例误差最小是 10 号, 为 0.175%。六种组合混色样中平均比例误差最小的是红色涤纶与蓝色、黄色粘胶组合, 为 1.109%, 其离散程度相对最小; 六种组合混色样品中平均比例误差最大的是红色粘胶与蓝色、黄色涤纶组合, 为 2.461%, 其离散程度相对较大, 其他四组混色样品平均比例误差都在 1.6%~1.8% 之间, 差异较小。六种组合混色样中平均色差最小的是黄色涤纶与红色、蓝色粘胶组合, 为 0.1721, 平均色差最大的是黄色粘胶与红色蓝色、涤纶混色样, 为 0.4852; 而其离散程度相对较大的是蓝色涤纶与红色、黄色粘胶组合, 为 0.3377, 离散程度相对较小的是红色粘胶与黄色、蓝色涤纶组合, 为 0.0673。

通过计算, 上述样品整体的色差均值为 0.2775, 标准差为 0.2177, 比例误差与色差均较小, 说明 K-M 双常数模型适用于预测原液着色涤/粘双组分纤维混配色比例, 且精确度较高。

4.2.3 预测样与实际样的色差比较

为了更直观的看出预测样与实际样的色差, 通过实际测得的反射率 R 与预测的反射率 R 模拟作出预测颜色与实际颜色对比色卡, 见图 4-2 所示。图 4-2 中, 左上角为实际颜色, 右上角为预测颜色。

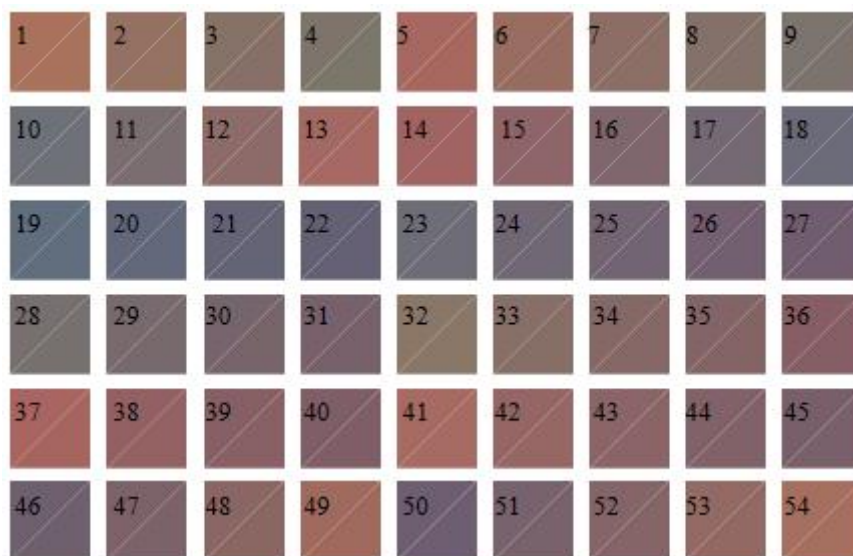


图 4-2 预测颜色与实际颜色对比色卡

Fig. 4-2 Predicted color compared to the actual color color card

由图 4-2 结合表 4-1 到表 4-6 可以看出，色差最大为 29 号，为 0.9934，人眼视觉难以察觉色差；色差最小为 14 号，为 0.0252，在人眼视觉上基本没有色差，其他样品右下角的预测颜色与左上角的实际颜色非常接近几乎没有差别，这与前面预测比例与实际比例相差较小以及色差较小的计算结果相一致。该结果进一步验证了 K-M 双常数模型对于原液着色涤/粘双组分纤维混配色比例预测的可行性。

4.3 本章小结

本章主要以原液着色涤/粘双组分三色纤维混配色实验为基础，基于 K-M 双常数模型对六种原液着色涤/粘双组分组合样品进行配色模型实验研究，利用最小二乘法原理对单色纤维的吸收系数 K 值和散射系数 S 值进行数据处理，结果表明：运用 K-M 双常数模型预测原液着色涤/粘双组分三色混色纤维比例具有可行性，且预测精度较好。原液着色涤/粘双组分 54 个混色纤维样品预测颜色与实际颜色的色差均在 1.0 以下，色差最大为蓝色涤纶与红色、黄色粘胶混色样且混色比例为 5:2:3，为 0.9934，色差最小为黄色涤纶与蓝色、红色粘胶混色样且混色比例为 4:1:5，为 0.0252，色差均值为 0.2775，标准差为 0.2177，说明预测比例与实际比例差距较小。原液着色涤/粘双组分 54 个混色纤维样品预测比例与实际比例误差均在 5% 以下，比例误差最大是红色粘胶与黄色、蓝色涤纶混色样且混色比例为 4:3:3，为 4.015%，比例误差最小是黄色涤纶与蓝色、红色粘胶混色样且混色比例为 5:1:4，为 0.175%，比例误差均值为 1.719%，标准差为 0.989。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

本课题主要以三种单色涤纶短纤维和三种单色粘胶短纤维为研究对象, 基于 Kubelka-Munk 单常数/双常数理论, 通过测量的混色纤维 K/S 与单色纤维 K/S 数据, 利用最小二乘法 and 全光谱算法进行分析, 探究原液着色涤/粘双组分纤维混配色的比例预测情况, 通过实验数据分析, 本文章得出以下结果:

(1) 在 400~700 nm 范围内, 某一个波长下, 涤/粘双组分混色纤维样的 K/S 值, 总是介于该波长下的 2 个不同组分单色纤维的 K/S 值之间, 且当混色样中单色样的比例越大时, 其整体的 K/S 值会逐渐向比例大的单色样的 K/S 值靠近, 说明基于单色纤维与混配色纤维的 K/S 值的加和性进行混配色纤维比例的估算具有可行性。

(2) 在原液着色涤/粘双组分双色实验中, 用 K-M 单常数理论进行比例预测时, AF (红 T/黄 R) 的比例误差均值为 15.129%, CE (黄 T/蓝 R) 的比例误差均值为 12.911%, BD (蓝 T/红 R) 的比例误差均值为 2.908%, 说明 BD 比例预测差异最小, AF 最大, CE 介于两者之间; 而用 K-M 双常数理论进行比例预测时, AF 的比例误差均值为 2.537%, CE 的比例误差均值为 0.950%, BD 的比例误差均值为 1.599%, AF 的比例误差减少了 83.2%, CE 的比例误差减少了 92.6%, BD 的比例误差减少了 45%, 无论是比例预测结果还是偏差百分比结果, 都要优于 K-M 单常数理论的预测结果, 且 K-M 双常数理论的稳定性较好。用最小二乘法对六种单色纤维的反射率进行拟合时发现, 蓝色纤维的拟合效果最好, 蓝色涤纶和粘胶纤维的拟合决定系数 R^2 分别为 0.999 、 0.997, 其拟合值与实测值在全波段上基本呈现重合的趋势; 黄色涤纶和粘胶纤维的拟合决定系数 R^2 分别为 0.824 、 0.989 , 说明黄色涤纶纤维的拟合效果较差, 黄色粘胶纤维的拟合效果较好; 红色涤纶纤维和粘胶纤维的拟合决定系数 R^2 分别为 0.998 、 0.946, 说明红色涤纶纤维的拟合效果较好。因此, 在对混色纤维中单色纤维的反射率进行拟合时, 会因纤维的颜色及种类的不同, 其拟合效果也不同。

(3) 在原液着色涤/粘双组分三色实验中, 原液着色涤/粘双组分 54 个混色

纤维样品预测颜色与实际颜色的色差均在 1.0 以下，对应色差与视觉的关系处于稍有感觉，按照纺织行业的色差标准，均在可接受范围内。原液着色涤/粘双组分 54 个混色纤维样品预测比例与实际比例的误差均在 5% 以下，比例误差均值为 1.719%，标准差为 0.989，比例误差整体较小，说明运用 K-M 双常数模型预测原液着色涤/粘双组分三色混色纤维比例具有可行性，且预测精度较高，预测模型稳定性较好。

5.2 展望

（1）本课题由于研究时间和实验条件的限制，只做到双组分三色混色实验，在未来研究可以开展更复杂的多组分多色混色实验，进一步探索多组分多色的比例预测及色差表现。

（2）本课题由于材料的限制，只用了 K-M 模型进行预测，希望未来可以突破材料的限制，选用多种模型对多组分色纺纱进行全面高效的颜色预测。

（3）本课题目前仅考虑纤维混配色，希望未来能做到纱线以及织物形式的混配色。

参考文献

- [1] 张戈. 棉纤维色纺混色模型优化及配色方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [2] 刘惠林, 陈淑华, 余思慧. 锦纶原液着色纤维创新应用探究[J]. 纺织导报, 2022, (06):28-31.
- [3] 潘真祯. 产业链视角下我国色纺纱产业的创新发展研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [4] 毕大明, 章友鹤, 赵连英, 等. 色纺纱工艺技术的创新途径[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(02): 3-6.
- [5] 吕林军, 章友鹤, 赵树超, 等. 色纺纱关键技术及器材选用探析[J]. 纺织器材, 2018, 45(01): 32-37.
- [6] 王瑜贺. 全球生态文明建设的现实挑战与路径优化[J]. 北方工业大学学报, 2022, 34(06): 90-97.
- [7] 钟联. 生态文明建设昭示人类未来[J]. 当代世界, 2024, (02): 1.
- [8] 孟庆. 低碳经济下纺织印染行业现状及发展趋势[J]. 全国流通经济, 2021, (14): 62-64.
- [9] 邱志成, 李鑫, 金剑. 应用前景广阔的原液着色纤维[J]. 纺织科学研究, 2020, (01): 70-71.
- [10] 刘宇, 胡海蓉. 原液着色涤纶的发展与挑战[J]. 合成纤维, 2023, 52(10): 5-8.
- [11] 严旭新, 黄玉强, 于文菡, 等. 新型色纺精细混棉工艺流程研究[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(06): 49-52.
- [12] 朱建民, 程四新, 章友鹤, 等. 色纺纱生产前的调色、配色与对色相关技术探析[J]. 现代纺织技术, 2018, 26(04): 36-38.
- [13] 王玉娟. 基于 STEARNS-NOECHE 理论的色纺纱测配色研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [14] 房安宁. 散纤维测色与混色的光谱匹配模型研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [15] 金亚琪, 邹专勇, 许梦露, 等. 色纺纱产品开发现状及技术发展需求[J]. 棉纺织技术, 2012, 40(12): 65-68.
- [16] 李小东, 赵东柏, 冯利军. 计算机配色理论与实践[J]. 绿色包装, 2017, (02): 53-59.
- [17] 汪晏梅. 色纺纱快速配色系统开发[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [18] 张礼鹏. 品牌服装色彩供应链的成本与效率分析[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [19] Witt K. CIE color difference metrics[J]. Colorimetry: Understanding the CIE system, 2007: 79-100.
- [20] 李戎, 潘玮, 顾峰, 等. 计算机测配色的历史与现状[J]. 北京纺织, 1999,

- (02): 58-60+47.
- [21] HaLstead M B. Color Rendering Systems and their applications. Light and Lighting. Nov. Dec. 1976.
- [22] Kubelka P, Munk F. Ein Beitrag Zur Optik Der Farbanstr iche [J]. Zeitschrift fur Technische Physik, 1931, 12: 593-601.
- [23] 程璐. 色纺纱配色算法改进及计算机测配色系统开发[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [24] Davidson H R, Taylor M. Prediction of the Color of Fiber Blends[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(01): 96-98.
- [25] 江新卫. 色纺纱配色方法初探[J]. 棉纺织技术, 2000, (05): 298-299.
- [26] 任安民, 周立明. 色纺纱配色方法改进初探[J]. 上海纺织科技, 2007, (06): 14-16+37.
- [27] 徐亚亚. 数码转杯毛型混色纱成纱性能与混色效果研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- [28] Davidson H R, Hemmendinger H. A system of instrumental color control for the textile industry[J]. Journal of the Society of Dyes and Colourists, 1963, 79(12): 577-589.
- [29] 高新, 潘如如, 高卫东. 基于单常数 Kubelka-Munk 理论的棉纤维颜色预测 [J]. 丝绸, 2020, 57(09): 34-38.
- [30] 王卓, 杨瑞华, 潘博, 等. 基于 Kubelka-Munk 双常数理论的色纺纱配色模型 [J]. 棉纺织技术, 2021, 49(02): 24-30.
- [31] 张婷婷, 薛元, 贺玉东, 等. 环锭数码纱 Kubelka-Munk 双常数配色模型构建及其色彩预测[J]. 纺织学报, 2020, 41(01): 50-55.
- [32] 汪燕燕, 薛元, 陈宥融, 等. 面向全色域转杯纺纱的 Kubelka-Munk 双常数理论模型构建及颜色预测[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(03): 1-13.
- [33] Zhang G, Pan R, Zhou J, et al. Spectrophotometric color matching for pre-colored fiber blends based on a hybrid of least squares and grid search method[J]. Textile Research Journal, 2022, 92(15-16): 2569-2579.
- [34] Ma C, Wang Y, Li J, et al. Theoretical and Practical Analysis of Fiber Blend Model in Gray Spun Yarn[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2017, 12(02): 28-38.
- [35] Zhang G, Zhou J, Pan R, et al. Color prediction for pre-colored cotton fiber blends based on improved Kubelka-Munk double-constant theory[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22: 412-420.
- [36] Wei C, Wan X, Li J. A modified single-constant Kubelka–Munk model for color prediction of pre-colored fiber blends[J]. Cellulose, 2018, 25: 2091-2102.
- [37] Duntley S Q. The prediction and control of colored fiber blends by optical

- means[J]. *Am Dyest Rep*, 1941, 30: 698-700.
- [38] Mathur K, Seyam A F M, Hinks D, et al. Towards automation of colour/weave selection in Jacquard designs: model verification through visual assessment[J]. *Coloration Technology*, 2008, 124(01): 48-55.
- [39] Stearns E I, Noechel F. Spectrophotometric prediction of color of wool blends[J]. *American Dyestuff Reporter*, 1944, 33(09): 177-180.
- [40] 王泉, 姚佳, 李艳清, 等. Stearns-Noechel 模型在天然彩色棉混色中的应用[J]. *纺织学报*, 2016, 37(01): 93-97.
- [41] Asplod J R, Zhou M. Influence of blending on color appearance of black and white fiber blends[J]. *Textile Chemist & Colorist & American Dyestuff Reporter*, 2000, 32(10): 47-51.
- [42] Davidson H R, Hemmendinger H. Color prediction using the two-constant turbid-media theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(08): 1102-1109.
- [43] Friele L F C. The Application of Colour Measurement[J]. *Textile Institute*, 1952, 43: 604-611.
- [44] 马崇启, 朱宝基, 刘凤坤, 等. 基于 Stearns-Noechel 模型的色纺纱配色算法改进[J]. *天津工业大学学报*, 2019, 38(03): 41-46.
- [45] 沈加加, 陈维国, 刘伟. 基于约束最小二乘法的色纺纱配色方法[J]. *针织工业*, 2015(06): 31-33.
- [46] 王玉娟, 马崇启, 刘建勇, 等. 应用改进 Stearns-Noeche 模型的色纺纱配色技术[J]. *纺织学报*, 2017, 38(10): 25-31.
- [47] Wei C, Wan X, Li J. Color prediction model for pre-colored fiber blends based on modified Stearns-Noechel function[J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 147: 544-551.
- [48] Shen J, Zhou X, Ma H, et al. Spectrophotometric prediction of pre-colored fiber blends with a hybrid model based on artificial neural network and Stearns-Noechel model[J]. *Textile Research Journal*, 2017, 87(03): 296-304.
- [49] Sun X, Xue Y, Liu Y, et al. Research on full color gamut mixing model constructed by CNC spinning and Stearns-Noechel color prediction method[J]. *Textile Research Journal*, 2023, 93(5-6): 1358-1370.
- [50] Friele L F C. The application of colour measurement in relation to fiber-blending[J]. *Journal of The Textile Institute Proceedings*, 1952, 43(08): 604-611.
- [51] 沈加加, 胡英杰, 刘伟, 等. 基于 Friele 模型的色纺纱光谱配色研究[J]. *针织工业*, 2013(05): 32-36.
- [52] Philips-Invernizzi B, Dupont D, Caze C. Formulation of colored fiber blends from Friele's theoretical model[J]. *Color Research & Application: Endorsed by*

- Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur, 2002, 27(03): 191-198.
- [53] 马崇启, 程璐, 王玉娟, 等. 基于 Friele 模型的彩色纤维混色配方算法[J]. 纺织学报, 2017, 38(12): 33-37.
- [54] 杨瑞华, 王卓. 基于 Friele 模型的转杯纺黏胶混色针织物测配色系统[J]. 服装学报, 2023, 8(01): 31-36+49.
- [55] Yang L, Bai J, Zhang R, et al. The optimization of color-prediction models for colored cotton fiber yarns[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(19-20): 4007-4014.
- [56] Ruihua Y, Yaya X, Ruiye H. Friele Model of Rotor Spun Multi-Primary-Colour-Blended Yarn[J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2019, 5(137): 34-38.
- [57] Hemingray C, Westland S. A novel approach to using neural networks to predict the colour of fibre blends[J]. Coloration Technology, 2016, 132(04): 297-303.
- [58] 沈加加, 周翔, 屠天民. 基于 BP 神经网络的色纺纱配色[J]. 纺织学报, 2015, 36(11): 34-38.
- [59] 马崇启, 王玉娟, 刘建勇, 等. 基于 Ga-BP 神经网络的色纺纱配色[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(06): 27-31.
- [60] 程璐, 马崇启, 周惠敏, 等. 基于视觉特性的色纺纱全光谱配色算法优化[J]. 纺织学报, 2022, 43(10): 38-44.
- [61] Furferi R, Governi L, Volpe Y, et al. Carded Tow Real-Time Color Assessment: A Spectral Camera-Based System[J]. Sensors, 2016, 16(09): 1404.
- [62] 赵玉. 基于原色纤维混配色织物的呈色规律研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [63] 朱松. 彩色纤维配色方法研究初探[J]. 聚酯工业, 2010, 23(01): 29-32.
- [64] Durmus D. CIELAB color space boundaries under theoretical spectra and 99 test color samples[J]. Color Research & Application, 2020, 45(05): 796-802.
- [65] Chaouch S, Moussa A, Ladhari N. Color Formulation of Cotton Fabrics Using Multi-Objective Ant Colony Optimization[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(17): 15459-15474.
- [66] Lee C H, Wang Y, Tang Y L, et al. Dyeing wool knitted fabric in nano-scale reverse micelle with reactive dyes-a computer colour matching study[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22: 1320-1332.
- [67] Durand L B, Ruiz-López J, Perez B G, et al. Color, lightness, chroma, hue, and translucency adjustment potential of resin composites using CIEDE2000 color difference formula[J]. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 2021, 33(06):

836-843.

- [68] Ibrahim S. Discrete least square method for solving differential equations[J].
Advances and Applications in Discrete Mathematics, 2022, 30.

附录

附录 1：双色 MATLAB 计算 K、S 值代码

```
load test.mat
AB=ones(310,4);
for j=1 : 31
    for i=1 : 9
        AB(i+(j-1)*10,1)=(i*0.1)*aa(i,j);
        AB(i+(j-1)*10,2)=(1-i*0.1)*aa(i,j);
        AB(i+(j-1)*10,3)=(-i*0.1);
        AB(i+(j-1)*10,4)=(-(1-i*0.1));
    end
end
GG=zeros(4,31);
for n=1 : 31
    A=AB((1+10*(n-1)):10*n,:);
    B=A';
    C=B*A;
    det(C);
    D=inv(C);
    E=D*B;
    F=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;1];
    G=E*F
    GG(:,n)=G
end
```


附录 3：三色 MATLAB 计算 K、S 值代码

```

load test.mat

AB=ones(310,6);

for j=1 : 31
    for i=1 : 4
        for k=5 : 9

            AB(i+(j-1)*10,1)=0.5*ee(i,j);
            AB(i+(j-1)*10,2)=(i*0.1)*ee(i,j);
            AB(i+(j-1)*10,3)=(0.5-i*0.1)*ee(i,j);
            AB(i+(j-1)*10,4)=-0.5;
            AB(i+(j-1)*10,5)=(-i*0.1);
            AB(i+(j-1)*10,6)=-(0.5-i*0.1);

            AB(k+(j-1)*10,1)=0.4*ee(k,j);
            AB(k+(j-1)*10,2)=((k-4)*0.1)*ee(k,j);
            AB(k+(j-1)*10,3)=(0.6-(k-4)*0.1)*ee(k,j);
            AB(k+(j-1)*10,4)=-0.4;
            AB(k+(j-1)*10,5)=(-(k-4)*0.1);
            AB(k+(j-1)*10,6)=-(0.6-(k-4)*0.1);

        end
    end
end

GG=zeros(6,31);

for n=1 : 31

    A=AB((1+10*(n-1)):10*n,:);

    B=A';

    C=B*A;

    det(C);

    D=inv(C);

    E=D*B;

```

```
F=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;1];  
G=E*F  
GG(:,n)=G  
end
```


攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] **李少聪**,王旭,方寅春等.原液着色涤/粘双组分双色纤维混配色研究[J].武汉纺织大学学报,2023,36(05):17-24. (三类)
- [2] **李少聪**,项多闻,王旭等.基于 Kubelka-Munk 理论的涤/粘双组分三色混色纤维配方预测[J].工程塑料应用.已录用 2024 第 4 期 (CSCD-C, 二类)
- [3] 项多闻,**李少聪**,王旭等.原液着色涤纶短纤维、纱线及织物的颜色预测[J].丝绸.已录用. (二类)
- [4] 王旭,闵尔君,**李少聪**等.基于平织机的管状三维机织物设计及其矩阵模型[J].纺织学报,2023,44(08):103-109. (一类)

致谢

在本研究项目完成的过程中，我得到了许多宝贵的帮助和支持，对此我深感感激。首先，我要特别感谢我的导师王旭老师，其严谨的学术态度和深厚的专业知识为我的研究工作提供了坚实的理论基础。王旭老师对我的科研训练和思维方式的塑造，将是我职业生涯中一笔宝贵的财富。在此，我希望表达我最诚挚的敬意和感激之情。我还要向方寅春老师表达我的感激之情，在学术思维上给予了我巨大的帮助。

然后我还要感谢张文强先生在研究过程中提供的巨大帮助。张先生在技术上给予了我详尽的指导，对本研究的顺利开展起到了关键性的作用。我还要对彭旭光先生表示衷心的感谢。彭先生为本项目提供了必要的实验材料，这些高质量的材料是我们实验成功的基础。彭先生的慷慨支持极大地丰富了我们的实验条件，使我们能够在理想的条件下进行研究。此外，我亦要感谢实验室的全体人员。实验室团队为我提供了测色的帮助，他们的专业能力和无私分享，确保了数据采集的准确性和实验结果的可靠性，对本研究的成果有着不可估量的贡献。

不可忘记我的同学们，感谢他们在实验操作、数据分析及论文撰写等诸多环节的配合与帮助。我很荣幸能与一群志同道合的朋友一起学习、探讨和成长。同学们的互助合作精神和团队协作能力让我深受启发，也为我们共同的研究目标的实现提供了强有力的支撑。

最后，我要向所有直接或间接为本研究工作提供帮助的个人及团体表示最衷心的感谢。每一次帮助和每一份贡献都对本研究的成功产生了不可或缺的影响。再次感谢所有人的贡献和支持！