

棉纤维复杂外观形貌对花生油油渍分布与洗净效果的影响

杨朴¹, 傅佳丽¹, 刘玉祥^{2,3}, 耿可煜^{2,3}, 田野^{2,3}, 方亮晶^{2,3}, 徐壁⁴, 吴雄英¹, 丁雪梅^{1,3*}

(1. 东华大学服装与艺术设计学院, 上海, 200051;

2. 北京宝洁技术有限公司, 北京, 101312;

3. 宝洁全球织物护理研究院, 北京, 101312;

4. 东华大学化学与化工学院, 上海, 201620)

DOI:10.61369/CDCST.2025040011

摘 要: 棉纤维因其独特且复杂的微观形貌特征, 如不规则边缘、表面凹槽及中腔结构, 使其在洗涤过程中表现出独特的油渍滞留行为。本文使用花生油与尼罗红油性染料共混, 在纯棉织物上制备花生油油渍布和油渍纱线, 采用激光共聚焦等观察方法, 系统研究了棉纤维外观形貌特征及其对花生油油渍分布与洗净效果的影响。研究表明, 棉纤维纵向天然转曲形成的不规则边缘与表面凹槽、腰圆形截面中的中腔结构, 共同构成了复杂的三维形貌, 多次洗烘后的棉纤维中腔可能会出现裂隙缺陷; 花生油油渍在棉纤维上沿纵向凹槽铺展, 会优先选择性地润湿和填充于凹槽、中腔裂隙等部位, 且不同形貌区域油渍吸附量的显著波动, 凹槽、中腔裂隙区域的油渍吸附量普遍远高于纤维表面; BJT 洗涤剂在去除棉纤维油渍方面表现优于 NSL。本研究为理解棉织物去污难点及开发高效洗涤方案提供了理论指导。



丁雪梅

关键词: 棉纤维; 外观形貌; 花生油; 油渍分布; 洗净效果

作者简介: 丁雪梅, 东华大学服装与艺术设计学院教授、博士生导师, 主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金等开展纺织行业可持续发展研究, 同时与宝洁、博西华等国内外知名大公司长期合作开展服装洗护理论研究与实践。已发表文章、主编教材等400多篇, 获省部级科技进步二等奖3项、中纺联优秀教师奖1项、东华大学育人奖1项、宝洁全球织物护理研究院“卓越贡献奖”及宝洁中国“合作共创之星”。E-mail: fddingxm@dhu.edu.cn。

棉纤维因其优异的舒适性而被广泛应用于日常穿着, 但棉型衣物的油渍清洗始终是洗护领域的难点之一。棉纤维在自然生长中形成的独特微观结构, 如纵向的天然转曲与表面凹槽, 以及横截面上的中空腔室, 共同构成了一个非均匀、多尺度的界面体系。棉纤维自身复杂多变的物理形貌结构会显著影响油渍在棉纤维上的分布, 这被认为是油渍清洗关键的制约因素之一。

已有研究表明, 花生油油渍像涂层一样分布在纤维表面和纱线内部^[1], 可能分布在织物结构中的四个主要区域: 纱线之间相对较大的空间, 纱线中纤维之间较小的孔隙, 单个纤维形成的微小角度(如棉纤维的天然转曲形成的角度等), 以及纤维表面本身^[2], 而纱线和织物结构决定了前两个区域的几何形状, 而纤维形态决定了后两个区域。

已有研究对棉纤维的形貌特征及其对油渍分布和洗净效果的影响已有初步认识。任江(2012)通过激光共聚焦显微镜在单纤维水平上揭示了油渍在棉纤维表面的微观分布规律, 发现不同油渍在棉纤维表面会形成不同的分

布模式^[3]; 胡倩(2017)发展了单纤维去污测定方法, 建立了棉纤维表面特性与去污效果之间的定量关系, 并发现棉纤维的表面特性变化会显著影响去污指数^[4]; 唐慧文(2019)则系统研究了织物组织参数、纤维成分、表面性质等多个维度的纺织品特性对家用洗涤过程中去污性能的影响, 并证明了宏观的织物结构形貌通过影响污渍的分布和可及性, 决定了洗涤难度^[5]。

然而, 现有研究多关注污渍在纤维之间的宏观分布, 而油渍在单根棉纤维自身不同形貌单元(如凹槽、中腔、裂隙)上的精细分布、滞留量及对洗净效果的影响等领域存在研究空白。因此, 本文将使用花生油与油性染料共混, 在未使用过和多次洗涤干燥两种新旧程度的纯棉织物上制备花生油油渍布和油渍纱线, 采用激光共聚焦等观察方法, 深入探讨棉纤维的复杂形貌如何影响油渍分布, 并分析该分布特性对洗涤效果的影响, 同时对比不同洗涤剂的洗净效果。研究发现可为开发针对性的棉织物高效洗涤方案提供理论指导。

1. 实验方案

1.1 纯棉基布选择

选择新、旧两种使用程度的纯棉织物为基布，具体参数如表1。

表1 纯棉基布参数表

名称	织物组织及成分	纱线支数 /tex	经密 (根 /10cm)	纬密 (根 /10cm)	平方米重 (g/m ²)	新旧程度
新棉 A	100%棉	17.4	336	288	242	未使用过
旧棉 B	100%棉	33	240	240	185	多次洗涤干燥

参考 GB/T 13174-2021 标准，对纯棉基布进行预处理，即先放入滚筒洗衣机用自来水按标准洗涤模式洗涤，后经烘干机烘干展平，密封在塑料袋内置于阴凉干燥处保存，使用时按要求裁剪。

1.2 油渍的筛选及油渍纤维、油渍布的制作

选择鲁花5S压榨花生油（食用级，山东鲁花集团有限公司）加热至120℃，持续时长3~5min，取出后自然冷却，分别将花生油与尼罗红染料按照质量比1000:0.4配成油污液。从棉织物上拆取棉纱线，浸没于油渍中5min，纸巾吸掉多余油渍，在(35±2)℃热板仪上静置2h后制成花生油油渍纤维，用于后续实验。使用微量移液器取50μL，采用点染方式（符合食用油油渍的沾污场景），将混合花生油油渍滴加在新棉A和旧棉B上，在室温下静置10min，使油渍在基布上扩散均匀，再平放在(35±2)℃热板仪上静置2h后制成花生油油渍布，用于后续实验。

1.3 油渍布清洗

实验选用NSL与BJT两款洗涤剂。其中，NSL为国家标准配方洗衣液，BJT为宝洁公司最新的汰渍洗衣原液。分别采用水浴搅拌洗涤方法洗涤新棉A和旧棉B的油渍布。具体清洗过程如下：设置洗涤水温10℃、洗涤剂浓度2g/L、洗涤时长30min、搅拌转速500r/min、水量1600mL。

1.4 棉纤维油渍分布的观察方法

使用激光共聚焦显微镜（ZEISS LSM 900）拍摄织物、纱线、纤维束、纤维的不同尺度照片，观察油渍的分布规律。

1.5 洗净率测试方法

使用测试孔径为25mm的可见分光光度计（X-rite Ci7800），将洗涤前后污染布上的污斑置于分光光度计测试孔，两者中心点对齐，并应使用至少4块相同批次的基布做衬底，在400~780nm的可见光区测定污染布的CIE三

刺激Y值。

洗净率计算方法如公式（1）：

$$D = \frac{Y_w - Y_s}{Y_o - Y_s} \quad (1)$$

式中：Y_w为污染布洗涤后CIE三刺激Y值，以百分数（%）表示；

Y_s为污染布洗涤前CIE三刺激Y值，以百分数（%）表示；

Y_o为污染布原布CIE三刺激Y值，以百分数（%）表示。

2. 棉纤维外观形貌特征对花生油油渍分布的影响

图1是用激光共聚焦显微镜拍摄新棉A点染花生油污渍后在织物尺度上的油渍分布规律，可以看出，观察区域内，液态花生油渗透在针织棉织物中，较多分布在纱线表面，但分布并不均匀，而纱线间的空隙处分布较少。

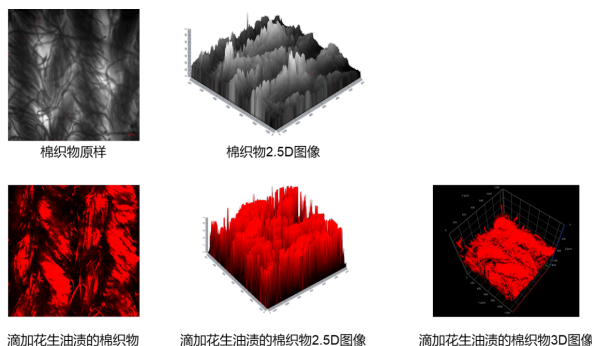


图1 花生油在棉织物上的分布

图2是用激光共聚焦显微镜拍摄旧棉B在单根纤维层面上花生油油渍分布规律，可以看出，观察区域内，花生油不均匀地分布在纤维的外表面，而纤维内分布较少。

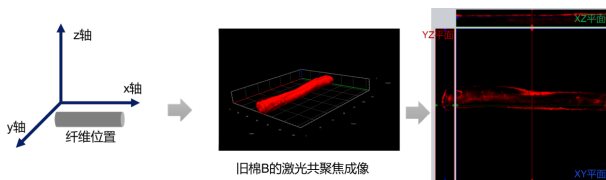


图2 激光共聚焦测试样品放置示意

图3是用激光共聚焦显微镜拍摄新棉A在单根纤维横截面上花生油油渍分布规律，可以看出，观察区域内，花生油分布在纤维表面以及棉纤维的凹槽，未进入棉纤维的中腔，且从荧光强度来看油渍最大程度地分布在凹槽内。

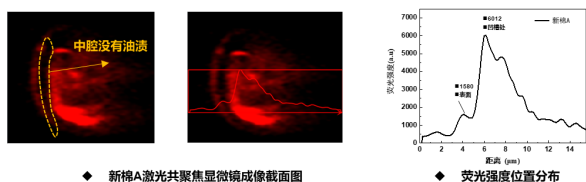


图3 花生油在新棉 A 纤维上的分布

图4是用激光共聚焦显微镜拍摄旧棉 B 在单根纤维横截面上花生油油渍分布规律,可以看出,观察区域内,花生油分布在纤维表面以及棉纤维的凹槽,且有的进入了棉纤维的中腔,且此根棉纤维中由中腔进入裂缝的油渍荧光强度最强。

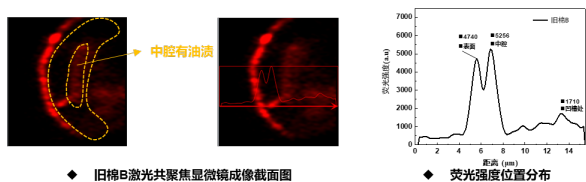


图4 花生油在旧棉 B 纤维上的分布

上述观察发现,棉纤维的独特形貌特征是其油渍滞留行为的结构基础。纵向的天然转曲形成不规则边缘与表面凹槽、腰圆形截面中的中空结构,共同构成了复杂的三维形貌,多次洗烘后的棉纤维中空可能会出现裂隙缺陷,这些特征显著影响油渍在纤维上的分布特征。花生油油渍在棉纤维上会优先选择性地润湿和填充于凹槽、中空裂隙等部位,液态油渍在毛细管效应的驱动下,可沿纵向凹槽铺展,同时也能径向渗透至纤维内部甚至中空。不同形貌区域的几何形状差异还造成局部油渍吸附量的显著波动,凹槽、中空裂隙区域的油渍吸附量普遍远高于纤维表面,纤维损伤造成的中空裂隙区域为油渍提供了更多的滞留位点,同时促进了油渍的快速扩散,加深了油渍的渗透和固着。因此,总体呈现分布边界模糊、不连续、渗透深度不一的高度不确定性特征。

3. 棉纤维外观形貌特征对花生油油渍洗净性能的影响

图5用分光光度计测试 NSL 和 BJT 两种洗涤剂清洗新棉 A 和旧棉 B 油渍布的洗净率结果。可以看出,旧棉 B 的花生油油渍洗净率远低于新棉 A, BJT 洗涤剂在新棉 A 和旧棉 B 的清洗效果均显著优于 NSL。

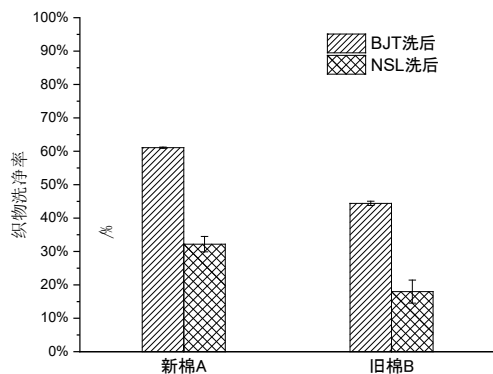


图5 NSL 与 BJT 清洗花生油油渍布的洗净率情况

上述结果表明,棉纤维多次洗烘后产生了纤维表面粗糙加剧、中空裂隙等外观形貌的损伤及亲水性的降低,使得棉纤维毛细管作用力增强、油渍润湿性增强、油渍滞留位点增多且结合力增强。因而,油渍自动、快速地大面积铺展与渗透,形成广泛而薄层的油膜覆盖。在洗涤过程中,由于污渍-纤维结合力的增强,再加上深嵌于微观缺陷内部的油渍受到物理屏蔽,使得洗涤剂的化学作用和流体的机械力难以有效触及,从而成为主要的顽固残留源,导致旧棉 B 的洗净率远低于新棉 A。

BJT 洗涤剂采用了协同作用机理,即使在低温的洗涤条件下,新棉 A 和旧棉 B 的 BJT 清洗效果均显著优于 NSL: BJT 配方体系能快速润湿并渗透到棉纤维的微观缺陷中,通过强大的乳化与增溶作用将油渍从纤维上剥离,并借助聚合物和静电排斥作用防止其再次沉积。BJT 配方体系中有多种高分子,同时包含了污渍悬浮高分子以及清洗促进高分子,提高了清洁力,实现更深层次的清洁^[6]。而 NSL 洗涤剂可能在上述一个或多个环节中存在短板,导致其最终洗净率较低。

4. 结论

采用激光共聚焦、光学显微镜等观察方法,系统研究了棉纤维外观形貌特征及其对花生油油渍分布与洗净效果的影响。结果发现:

(1) 棉纤维纵向的天然转曲形成不规则边缘与表面凹槽、腰圆形截面中的中空结构,共同构成了复杂的三维形貌,多次洗烘后的棉纤维中空可能会出现裂隙缺陷。

(2) 花生油油渍在棉纤维上会优先选择性地润湿和填充于凹槽、中腔裂隙等部位, 液态油渍在毛细管效应的驱动下, 可沿纵向凹槽铺展, 同时也能径向渗透至纤维内部甚至中腔, 凹槽、中腔裂隙区域的油渍吸附量普遍远高于纤维表面。

(3) 在洗涤过程中, 由于污渍-纤维结合力的增强, 以及深嵌于微观缺陷内部的油渍受到物理屏蔽, 使得洗涤剂的化学作用和流体的机械力难以有效触及, 从而成为主要的顽固残留源, 最终导致旧棉的洗净率远低于新棉。

(4) BJT 洗涤剂采用了协同作用机理, 使得在新棉 A 和旧棉 B 的清洗效果均显著优于 NSL。

参考文献

- [1] Powe W C. The nature of tenaciously bound soil on cotton[J]. Textile Research Journal, 1959, 29(1 42 1): 879-884.
- [2] Getchell N F. Cotton Quality Study: III: Resistance To Soiling[J]. Textile Research Journal, 1955, 25 (2): 150-194
- [3] 任江. 棉纤维表面油渍洗涤机理的激光共聚焦显微分析 [D]. 浙江: 浙江理工大学, 2012.
- [4] 胡倩. 激光共聚焦显微镜单纤维去污测定法及其应用研究 [D]. 浙江: 浙江理工大学, 2017.
- [5] 唐慧文. 纺织品特性对家用洗涤去污性能影响的应用基础研究 [D]. 浙江: 浙江理工大学, 2019.
- [6] 张艳丽, 初晓斌, 丁雪梅, 等. 织物洗涤用高分技术的研究进展 [J]. 日用化学品科学, 2024, 47(10): 56-60.

The Influence of the Complex Appearance and Morphology of Cotton Fibers on the Distribution and Washing Effect of Peanut Oil Stains

Yang Pu¹, Fu Jia-li¹, Liu Yu-xiang^{2,3}, Geng Ke-yu^{2,3}, Tian ye^{2,3}, Fang Liang-jing^{2,3}, Xu Bi⁴, Wu Xiong-ying¹, Ding Xue-mei^{1,3*}

(1. School of Fashion and Art Design, Donghua University, Shanghai, 200051 ;

2. Beijing Procter & Gamble Technology Co., Ltd., Beijing, 101312 ;

3. Procter & Gamble Global Fabric Care Research Institute, Beijing, 101312 ;

4. College of Chemistry and Chemical Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620)

Abstract : Cotton fibers exhibit unique oil stain retention during washing owing to their complex microscopic morphology, including irregular edges, surface grooves, and lumen structures. In this study, peanut oil was blended with Nile red to prepare peanut oil-stained cotton fabrics and yarns. Confocal laser scanning microscopy and other observational methods were used to systematically investigate cotton fiber morphology and its effects on stain distribution and stain removal efficiency. The results indicated that the irregular edges and surface grooves formed by the natural longitudinal crimps of cotton fibers, together with the lumen structures, collectively form a complex three-dimensional morphology. Cracks may form in the lumen of cotton fibers after multiple wash-dry cycles. Peanut oil stains spread along fiber longitudinal grooves, preferentially wetting and filling sites like grooves and lumen cracks. There are significant variations in oil adsorption capacity across different morphological regions, with the oil adsorption in grooves and lumen cracks generally much higher than that on the fiber surface. Additionally, BJT detergent outperformed NSL in removing oil stains from cotton fibers. This study provides theoretical guidance for understanding the difficulties in cotton fabric stain removal and developing efficient washing solutions.

Keywords : cotton fiber; appearance morphology; peanut oil; oil stain distribution; cleaning effect

