

· 研究论文 ·

原液着色生物基尼龙56纤维的制备及其可见光-近红外光谱性能

罗巧玲¹ 邵力文¹ 林琴² 王冬^{1*} 付少海^{1*}

(¹江南大学 纺织科学与工程学院 江苏省纺织品数字喷墨印花工程技术研究中心 无锡 214122)

(²延京纺织科技(江苏)有限公司 苏州 215200)

摘要 为了模拟绿色植被的光谱特征,以亚甲基双萘磺酸钠(NNO)为分散剂,采用喷雾干燥技术制备了自分散纳米颜料绿,通过熔融共混法制备了生物基尼龙56(PA56)原液着色纤维,探究纤维的微观结构、以及热、力学、可见光-近红外光谱性能.结果表明当颜料蓝-6124和颜料黄-1103复配质量比为2:1时,研制的自分散颜料绿能够较好地模拟绿色植被在可见光-近红外(400~1200 nm)的光谱特性;自分散颜料绿在PA56纤维内分散均匀,相容性好,且纤维的热性能基本保持不变,力学性能稳定;原液着色PA56纤维的光谱距离小于0.65、光谱角度小于0.13 rad,光谱相关系数高于0.98,达到了GJB 1411-2015二级光学伪装和二级光谱伪装的要求;颜色可以很好地模拟GBJ 1082A-2021中伪装网颜色MG1151与DG0730(色差<3);耐晒牢度>6级,耐水洗牢度和耐汗渍牢度均为4~5级.

关键词 可见光-近红外光谱,生物基尼龙56,原液着色,光谱反射率,颜色相似度

引用: 罗巧玲,邵力文,林琴,王冬,付少海.原液着色生物基尼龙56纤维的制备及其可见光-近红外光谱性能.高分子学报, 2025, 56(2), 322-330

Citation: Luo, Q. L.; Shao, L. W.; Ling, Q.; Wang, D.; Fu, S. H. Study on preparation and visible near infrared spectral performance of dope dyeing biobased polyamide 56 fiber. *Acta Polymerica Sinica*, 2025, 56(2), 322-330

森林和草原是我国主要的地貌特征,开发可见光-近红外(400~1200 nm)光谱范围内能精准模拟绿色植被光谱的新材料,对实现军事目标的隐身具有重要意义^[1,2].

当前,模拟400~1200 nm光谱范围内的绿色植被常见方法主要有涂层法和直接染色法^[3,4],前者是将伪装涂料^[5]、变色胶囊等材料通过涂覆方式施加到织物上^[6,7],其制备产品存在单位克重数大、摩擦牢度不佳等问题;叶绿素类^[8]或分散染料^[9,10]具有对人体无刺激、对织物服用性能影响小等优势,也是模拟绿色植被光谱特性常用的着色材料,但存在耐日晒性能和耐候性能不能满足要求等问题.颜料的色牢度和耐候性较好^[11],利用原液着色法制备原液着色纤维,具有着色工

序简单,色牢度优异,且耐久性能好等优点,是当前纤维着色发展的主要方向之一.

生物基尼龙56(PA56)是一种新型的生物基材料^[12],具有良好的力学性能、热稳定性、耐化学性能、耐磨性能和更好的吸湿性能^[13~15],在军事领域应用潜力巨大.资料检索发现,前人在尼龙6或尼龙66上采用染色和涂层法开发模拟在400~1200 nm光谱范围内的绿色植被^[16],但鲜有人采用原液着色法开发模拟绿色植被的生物基PA56.

基于此,本研究采用喷雾干燥技术开发了自分散颜料绿,然后将自分散颜料绿和PA56通过熔融共混制备了生物基PA56原液着色纤维,测试分析了纤维的结构、表面形貌、结晶性能、热性能和力学性能;探究了纤维的光谱反射率和颜

2024-08-26 收稿, 2024-12-06 录用, 2025-01-07 网络出版; 江苏省基础研究计划自然科学基金-青年基金(基金号BK20221093)和山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(项目号 2023TSGC0001)资助.

* 通信联系人, E-mail: winter36@jiangnan.edu.cn; shaohaifu@jiangnan.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2024.24222; CSTR: 32057.14.GFZXB.2024.7327

色 $L^*a^*b^*$ 值、光谱距离、光谱角度、光谱相关系数等,考察了原液着色纤维模拟绿色植被光谱特性的效果;探究了原液着色纤维的耐日晒牢度、耐水洗牢度和耐汗渍牢度。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

材料:颜料蓝-6124、颜料黄-1103,江阴艾帝达化工有限公司;亚甲基双萘磺酸钠(NNO,分析纯),上海麦克林生化科技股份有限公司;生物基PA56切片,华纺股份有限公司。

仪器:UV-2600型紫外-可见光-近红外分光光度计(美国珀金埃尔默仪器公司);DC850型测配色仪(Datacolor公司);ZMD-400型立式研磨分散机(众时(上海)机械有限公司);Zetasizer Nano-ZS90型电位及粒径分析仪(英国马尔文仪器有限公司);SP-1500-H型喷雾干燥机(上海顺仪实验设备有限公司);DHG-9053A型真空干燥箱(上海风棱实验设备有限公司);WLG10AG微型双锥螺杆挤出机(上海新硕精密机械有限公司);Nicolet is50型傅里叶变换红外光谱仪(美国Thermo Scientific有限公司);D2 PHASER型X射线衍射(德国布鲁克AXS有限公司);SU8100型场发射扫描电子显微镜(日本日立株式会社);梅特勒DSC3+型示差扫描量热仪、梅特勒TGA2型全自动热重分析仪(瑞士梅特勒-托利多公司);XL-2纱线强伸度仪(上海新纤仪器有限公司);YG(B)611-III型日晒气候试验机、SW-24G耐洗色牢度试验机(温州大荣纺织仪器有限公司);YG-631型汗渍色牢度仪(无锡纺织仪器厂)。

1.2 自分散纳米颜料的制备

取颜料蓝-6124与颜料黄-1103质量比2:1,分散剂NNO对颜料的质量分数分别为5%、10%、20%,制备颜料含量为10%的分散体200 g,将其在搅拌机作用下分散30 min后,再使用立式研磨分散机研磨,研磨转速为2000 r/min,时间6 h,最后利用喷雾干燥机对颜料分散液进行喷雾干燥处理,制备自分散纳米颜料绿(SDN-PG),进风温度为180 °C,进料速率为600 mL/h,空气流量为2.95 m³/min^[17]。

1.3 生物基PA56原液着色纤维的制备

将SDN-PG和PA56切片按质量比2:8混合,再转移至微型双锥螺杆挤出机,纺丝温度为

265~270 °C,自循环10 min后将熔体挤出,冷却、切片、干燥后得到PA56色母粒。将PA56色母粒和PA56切片按一定质量比进行混合,其中色母粒对整体质量分数分别为5%、10%和15%,在265~270 °C的温度范围内熔融纺丝,得到颜料含量分别为1% (PA56-P 1%)、2% (PA56-P 2%)、3% (PA56-P 3%)的原液着色纤维(UDY)。

1.4 测试与表征

1.4.1 自分散纳米颜料的分散性能测试

将样品稀释至2000倍,用纳米粒度分析仪测试样品的粒径、粒径分布指数(PDI)和Zeta电位。

1.4.2 结构表征

使用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察样品的表面形貌,设置加速电压为20 kV,电流为10 mA,测试前对样品进行喷金处理。使用傅里叶变换红外光谱仪测试样品的红外吸收光谱(FTIR),扫描的波长范围为500~4000 cm⁻¹。使用X射线衍射(XRD)方法测量样品的结晶行为,激发源采用铜靶,电压为40 kV,电流为300 mA,衍射角扫描范围从5°~60°。

1.4.3 热性能测试

使用全自动热重分析仪测试样品的热失重曲线,温度范围为30~600 °C,升温速率为10 °C/min,气体氛围为N₂,气体速率为50 mL/min,样品质量为5~10 mg。使用示差扫描量热仪分析样品的热性能,先由室温升至300 °C,升温速度为20 °C/min,再将温度降至30 °C,然后再将温度升至300 °C,升温速度为20 °C/min,最后再降至室温。

1.4.4 单纤维强力测试

使用纱线强伸度仪对样品进行力学强度测试,夹持距离为50 cm,拉伸速度为1000 mm/min,强力数据取3次测试的平均值。

1.4.5 光谱特性测试

使用紫外-可见光-近红外分光光度计测试样品的反射光谱曲线,扫描的波长范围为400~1200 nm,扫描间隔5 nm,扫描模式为R%。参照标准GJB 1411A-2015,计算标准植被与PA56原液着色纤维的光谱距离(式(1))、光谱角度(式(2)),再用Pearson相关系数计算光谱相关系数(式(3))。

光谱距离:利用欧式距离(d)作为样品光谱与参考标准光谱之间的距离描述,表示光谱间两点的距离的远近,来表征光谱的相似度。

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (1)$$

式中 p_i ($i = 1 \sim n$) 是样品的光谱向量; q_i ($i = 1 \sim n$) 是参考标准光谱向量.

光谱角度: 利用光谱角度(θ)来描述样品与参考标准光谱之间局部几何的相似度. 向量夹角越小, 几何相似度越高.

$$\theta_{p,q} = \cos^{-1} \frac{p^T q}{\|p\| \|q\|} \quad (2)$$

式中 p 为样品光谱向量; q 为参考标准光谱向量.

光谱相关系数: 利用 Pearson 相关系数(r)来描述样品光谱与参考标准光谱之间的整体相关性, 数值越接近 1, 说明相关度越大.

$$r = \frac{\alpha_{pq}^2}{\alpha_p \alpha_q} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}} \quad (3)$$

式中 p_i ($i = 1 \sim n$) 为样品光谱向量; q_i ($i = 1 \sim n$) 为参考标准光谱向量; $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ 分别为样品的平均光谱向量和平均参数标准光谱向量.

1.4.6 颜色性能测试

使用电脑测配色仪测试样品的颜色, 在 D65 光源和 2° 视角下, 测量样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 按式(4)计算色差 ΔE .

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

式中 ΔL^* 为样品明度变化; Δa^* 为样品红绿度变化; Δb^* 为样品黄蓝度变化.

1.4.7 色牢度性能测试

参照 GB/T 8427-2019, 测试样品的耐日晒牢度, 光源辐照度为 $(1.10 \pm 0.02) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$, 光源波长为 420 nm. 使用蓝色羊毛标准进行对比评价日晒变色牢度.

参照 GB/T 3921-2008 测试样品的耐皂洗牢度, 皂洗水温 50°C , 洗涤时长 45 min, 使用浓度为 5 g/L 的标准皂片去离子水溶液进行皂洗.

参照 GB/T 3922-2013 测试样品的耐汗渍牢度, 浸液温度 $(37 \pm 5)^\circ\text{C}$, 时间 4 h, 经 NaOH 调节后 pH 值为 (8.0 ± 0.2) .

参照 GB/T 250-2008 和 GB/T 251-2008, 评价样品的变色和沾色牢度等级.

2 结果与讨论

2.1 自分散纳米颜料的制备

如表 1 所示, 分散剂用量从 5% 增加到 20%,

粒径从 322 nm 下降到 285 nm, PDI 也随之下降到 0.2 以下, 从分散液的 Zeta 电位来看, Zeta 电位的绝对值增大 10 左右, 明显提高了分散性和均匀性. 这是由于在溶液中 NNO 可与颜料表面的基团相互作用, 形成吸附层, 吸附层带负电, 由于静电斥力作用使颜料粒子分散均匀. 由此得出, 分散剂 NNO 含量为 20% 时, 研磨 6 h 的分散效果好.

Table 1 Dispersion performance of SDN-PG.

The dosage of NNO (%)	Particle size (nm)	PDI	Zeta potentials (mV)
5	322.5	0.322	-47.7
10	298.5	0.221	-53.3
20	285.8	0.167	-57.7

图 1 是颜料粒子复配分散前后的微观形貌. 与颜料黄 1103 (图 1(a)) 和颜料蓝 6124 (图 1(b)) 不同, 经喷雾干燥后的颜料 SDN-PG (图 1(c)) 呈现出粒径较均一的球状结构, 表明 2 种颜料研磨分散处理之后很好地融合在一起.

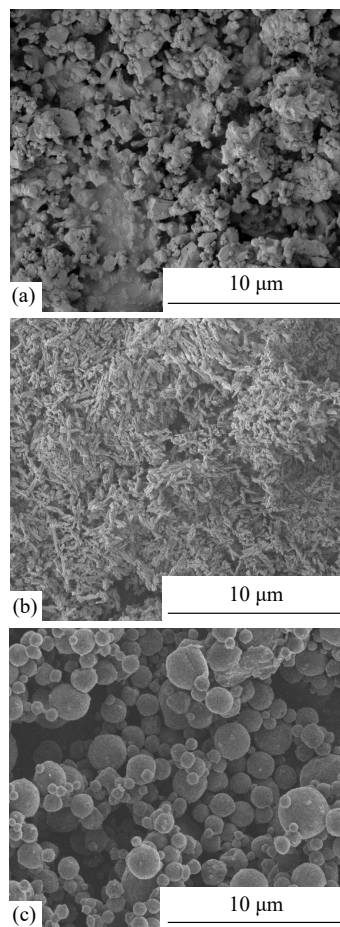


Fig. 1 SEM images of (a) pigment yellow 1103 powder; (b) pigment blue-6124 powder; (c) SDN-PG powder.

分散剂NNO能够提高颜料的分散性能, 从而提升颜料的颜色稳定性, 且不改变颜料的吸收波长^[18], 因此选择NNO作为分散剂. 如图2所示, SDN-PG在540~550 nm出现“绿峰”, 在660 nm出现“红边”起始位置, 在780~1100 nm有较为平缓的“近红外高原”, 说明SDN-PG可以模拟绿色植被的光谱特征.

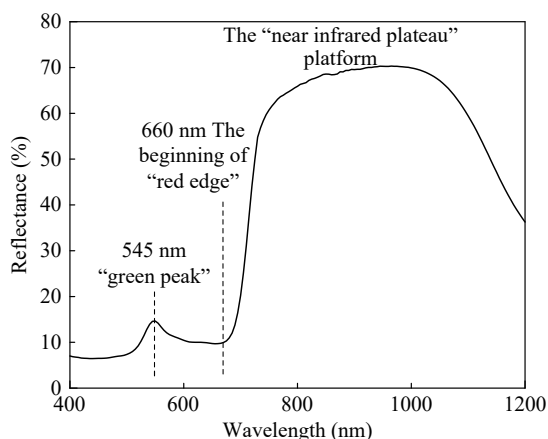


Fig. 2 Spectral reflectance curve of SDN-PG.

2.2 PA56原液着色纤维的结构表征

2.2.1 傅里叶红外光谱(FTIR)

如图3所示, PA56和原液着色纤维在 1632 cm^{-1} 处均出现酰胺I的伸缩振动, 在 1540 cm^{-1} 处均出现酰胺II的伸缩振动, 吸收峰位置没有明显位移, 表明在原液着色加工过程中SDN-PG对PA56主体结构没有影响. PA56和原液着色纤维在 3289 cm^{-1} 附近都存在氨基特征峰, 原液着色纤维相较于PA56氨基特征峰向短波数方向移动(蓝移), 吸收频率略微下降, 且谱带变宽, 这可能是由于分散剂NNO对PA56有亲和力, 与氨基之间形成了氢键, 说明经熔融挤出后, SDN-PG与PA56

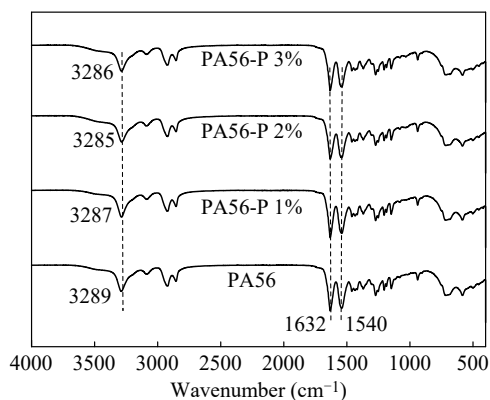


Fig. 3 FTIR spectra of the PA56 dope dyeing fibers.

相互融合了. 另一方面氨基特征峰蓝移, 可能是纤维的结晶部分向非结晶部分转化^[19], 结晶度下降引起的.

2.2.2 X射线衍射(XRD)

图4表明, PA56和原液着色纤维的XRD在 $2\theta_1$ 和 $2\theta_3$ 值为 12.89° 和 38.27° 的衍射峰没有偏移, 表明颜料对 $2\theta_1$ 和 $2\theta_3$ 处的结晶峰的晶型没有影响; PA56和颜料含量为1%、2%以及3%的原液着色纤维 $2\theta_2$ 值分别为 20.79° 、 20.87° 、 21.04° 、 21.40° , 随着颜料添加量的增加, 峰的位置向右偏移, 晶面间距从0.427变小到0.415, 这是由于PA56中加入颜料, 晶胞参数变小改变导致的^[20].

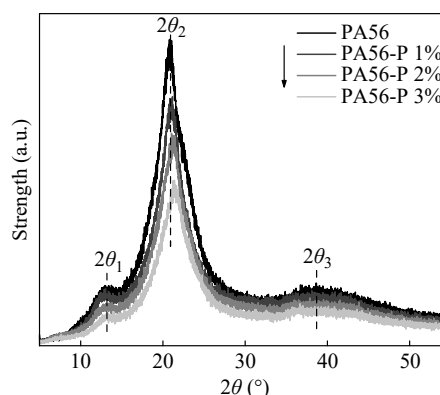


Fig. 4 XRD patterns of the PA56 dope dyeing fibers.

PA56原液着色纤维随着颜料添加量的增大, 结晶峰形态的影响表现为峰宽变窄, 峰强度变小, 结晶度从32.68%下降到26.82%, 说明加入SDN-PG对PA56的结晶度有影响, 这是由于加入颜料会影响分子链的有序性, 使结晶度降低^[21,22]. 颜料添加量增多, 结晶度下降, 这与FTIR的测试结果分析一致.

2.2.3 扫描电子显微镜(SEM)

如图5所示, 当SDN-PG用量低于2%时(图5(a1)和(a2)所示), 原液着色纤维表面光滑, 没有裂纹或孔洞出现, 截面也没有发现颜料团聚现象, 表明SDN-PG与PA56相容性较好, 纺丝过程中颜料没有迁移团聚. 当SDN-PG用量为3%时(图5(c1)和5(c2)), 虽然没有观察到颜料聚集团聚, 但纤维表面粗糙度明显增加, 说明当颜料用量增大到一定程度后, 会影响纤维的表面形态, 造成纤维不均匀率增加. 此外, 值得注意的是SDN-PG用量增大, 也会使颜料和切片混合分散难度增加, 可见, 通过色母粒来控制颜料添加量

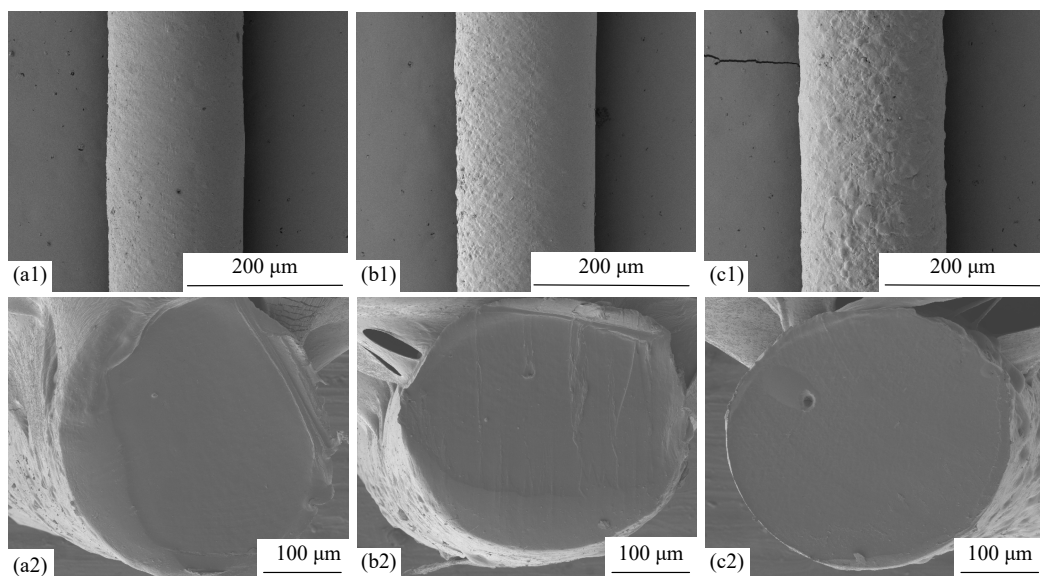


Fig. 5 SEM images of (a1, a2) PA56-P 1% fiber; (b1, b2) PA56-P 2% fibre; (c1, c2) PA56-P 3% fibre.

是制备原液着色的关键点之一。

2.3 PA56原液着色纤维的热性能

如图6所示, PA56和原液着色纤维的热分解温度均在350 °C以上, SDN-PG的加入将PA56的初始分解温度提高至383 °C(质量损失为5 wt%处的温度), 说明SDN-PG提高了PA56的耐热性. 但随着SDN-PG从1%增加到3%, 初始分解温度反而稍稍下降, 这是由于颜料添加量大在其PA56中更加难以均匀分散, 影响相容性, 同时在熔融纺丝的高温下, PA56可能发生氧化降解反应, 而颜料的加入可能会加速这一过程, 特别是当颜料与PA56的相容性不佳或颜料本身耐热性较差时, 这种加速作用会更加明显。

如图7所示, PA56熔融存在熔融峰较宽且不对称^[23,24], 颜料的加入并没有改变这一现象. 随着SDN-PG含量增加到3%, 原液着色纤维的熔点和结晶温度分别降低至249和231 °C, 这是由于颜料阻碍分子链链段的规整排列, 原液着色纤维的结晶度随着颜料含量增加而降低^[24] (PA56的理论熔融焓取188.7 J/g^[25], 结晶度从32.23%下降到25.92%, 虽然DSC计算得到的结果比XRD计算得到的结果小, 但是颜料添加量增加, 结晶度下降的趋势是一样的). 熔点和结晶温度降幅并不大, 表明SDN-PG的加入对PA56热性能影响不大, 仍然保持着良好的热稳定性, 可以使用与原切片相同的纺丝工艺, 有利于加工和纤维性能稳定。

2.4 PA56原液着色纤维的力学性能

由图8知, 原液着色纤维强力较低, 伸长

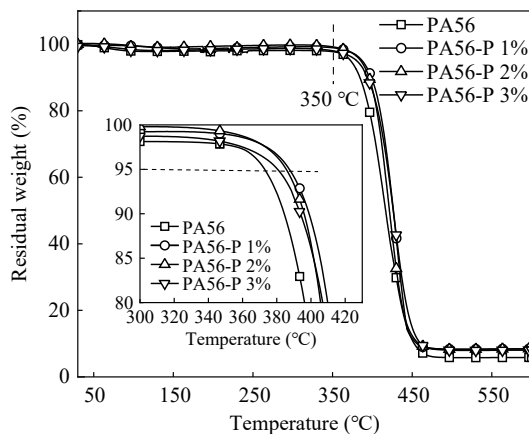


Fig. 6 TG curves of the PA56 dope dyeing fibers.

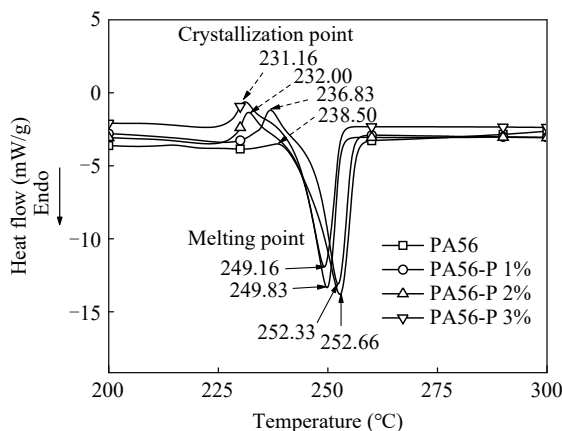


Fig. 7 DSC curves of the PA56 dope dyeing fibers.

大, 这是因为PA56原液着色纤维为未拉伸丝(UDY), 强力和韧性受拉伸状态和热处理加工温度的影响^[26,27].

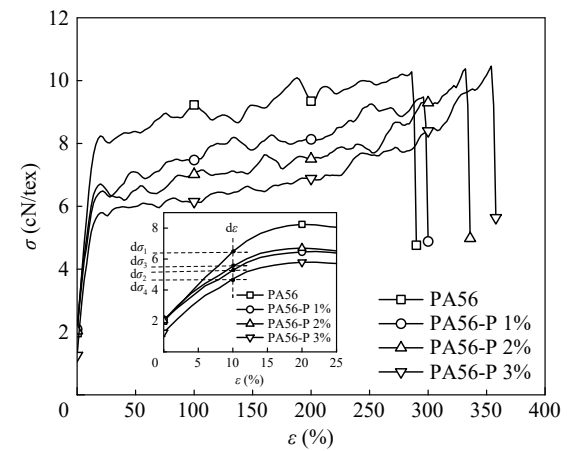


Fig. 8 Stress-strain curves of the PA56 dope dyeing fibers σ is stress; $d\sigma$ is the differential of stress; ε is elongation; $d\varepsilon$ is the differential of elongation.

如图8所示，随着SDN-PG添加量的增加至3%，原液着色纤维的断裂强度逐渐升高至10.5 cN/tex，断裂伸长率显著提高到358%，但是强度均值降低了(如表2所示)，这可能是加入颜料熔融共混挤出后，纤维大分子链的规整性下降，结晶度下降导致的^[28]。同时，随着颜料的增多，PA56原液着色纤维的模量($d\sigma/d\varepsilon$)下降，这是由于模量也与PA56分子链段的规整排列、结晶度等相关^[29]，颜料影响了PA56分子之间的作用力，在结晶区形成缺陷，结晶度下降，在受力后产生滑脱或断裂，导致PA56的模量降低。

Table 2 Mean and standard deviation of fiber strength.		
Fiber	Mean value (cN/tex)	Standard deviation
PA56 0%	8.96	1.26
PA56-P 1%	7.76	1.20
PA56-P 2%	7.45	1.23
PA56-P 3%	6.99	1.39

2.5 PA56原液着色纤维可见光-近红外光谱性能

2.5.1 光谱拟合

将颜料含量分别为1%、2%、3%的原液着色纤维光谱反射率曲线与标准植被光谱通道对比，结果如图9所示。从图上可以看出原液着色纤维光谱反射率曲线80%以上在标准植被光谱通道以内，在545 nm处出现了“绿峰”，660 nm处出现了“红边”起始位置，“红边”斜率与标准植被基本一致，在780~1200 nm出现了“近红外高原”，说明原液着色纤维的光谱反射率曲线特征与绿色植被一致，能够较好地模拟绿色植被的光谱反射率。

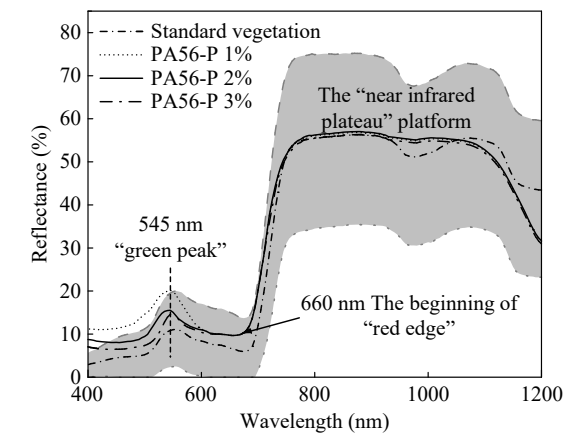


Fig. 9 Spectral reflectances of the PA56 dope dyeing fibers.

计算原液着色纤维与标准植被光谱曲线的光谱距离(d)、光谱角度(θ)及光谱相关系数(r)，结果见表3。通过对比发现原液着色纤维与标准绿叶光谱曲线的光谱距离均小于0.65，表明光谱反射率曲线两点的距离非常近；光谱角度小于0.13 rad，表明光谱反射率曲线的几何相似度高；光谱相关系数都高于0.98，表明光谱反射率曲线的整体相似度高。上述研究结果表明，当颜料含量在1%~3%之间制备的原液着色纤维在400~1200 nm可见光-近红外范围内可较好地模拟绿色植被的光谱特征，达到了GJB 1411-2015二级光学伪装和二级光谱伪装的要求。

Table 3 Spectral fit of the dope dyeing PA56.			
Fiber	d	r	θ
PA56-P 1%	0.648	0.986	0.122
PA56-P 2%	0.495	0.980	0.093
PA56-P 3%	0.448	0.990	0.085

2.5.2 颜色相似度

表4显示PA56-M对纤维质量分数为5%时制备原液着色纤维与GBJ 1082A-2021伪装网颜色MG1151色差仅为0.945，表明原液着色纤维可以很好模拟该标准提出的颜色特征。当PA56-M对纤维质量分数为10%时，制备原液着色纤维与DG0730色差1.103，色差值也小于3，表明该纤维对伪装色DG0730具有较好的模拟效果。

Table 4 Color similarity of the dope dyeing PA56.		
Fiber	Simulated color	ΔE
PA56-P 1%	MG1151	0.945
PA56-P 2%	DG0730	1.103
PA56-P 3%	DG0647	3.525

2.6 色牢度性能

原液着色纤维的色牢度结果表5所示,表明原液着色纤维的耐日晒变色牢度均在6级以上,耐皂洗的变色和沾色牢度为4~5级,耐汗渍色的变色和沾色牢度达到4~5级,能满足军事纺织品对牢度的要求.

Table 5 Color fastness of the dope dyeing PA56^a.

Test name	Test items	Fiber		
		PA56-P 1%	PA56-P 2%	PA56-P 3%
Sunlight fastness	Xenon arc	6-7	7	7
	CH	4-5	4-5	4-5
Soaping fastness	CO	4-5	4-5	4-5
	PA	4-5	4-5	4-5
	WO	4-5	4-5	4-5
Perspiration fastness	CH	4-5	4-5	4-5
	CO	4-5	4-5	4-5
	PA	4-5	4-5	4-5
	WO	4-5	4-5	4-5

^a CH is change in color fastness; CO is cotton stain fastness; PA is nylon stain fastness; WO is wool stain fastness.

3 结论

(1) 颜料蓝-6124与颜料黄-1103质量比为2:1时,制备的自分散纳米颜料绿能够模拟绿色植被在可见光-近红外(400~1200 nm)范围的“绿峰”、

“红边”和“近红外高原”等特征.

(2) FTIR结果表明纤维在原液着色加工后的分子结构没有变化,但氨基峰蓝移,颜料可能与氨基形成了氢键或者颜料使结晶区向非结晶区转移;XRD结果表明颜料影响了PA56的结晶性能,使结晶度下降;纤维的SEM图表明,颜料在PA56中分布均匀,相容性好,但颜料含量影响纤维的均匀性;TG结果表明一定程度的颜料添加量能够提高纤维的热降解性能;DSC结果表明颜料的加入使纤维的熔点和结晶温度略微降低;原液着色纤维与原PA56纤维的力学性能对比得出,原液着色加工后纤维的断裂伸长和断裂强力有所提高,但模量降低.

(3) PA56原液着色纤维的光谱曲线与绿色植被光谱的光谱距离小于0.65、光谱角度小于0.13 rad,光谱相关系数高于0.98,达到了GJB 1411-2015二级光学伪装和二级光谱伪装的要求.

(4) 当颜料用量为1%时,在颜色上可模拟GBJ 1082A-2021伪装网颜色MG1151;当颜料用量为2%时,可以很好地模拟DG0730颜色性能.且PA56原液着色纤维的耐日晒变色牢度大于6级,耐皂洗的变色和沾色牢度达到4~5级,耐汗渍色的变色和沾色牢度达到4~5级.

本工作制得的PA56原液着色纤维可以模拟绿色植被可见光-近红外光谱特性,各项性能优异,有望广泛地应用于军用伪装领域.

REFERENCES

- 1 Zhao, J. L.; Zhou, B.; Wang, G. L.; Ying, J. J.; Liu, J.; Chen, Q. Spectral camouflage characteristics and recognition ability of targets based on visible/near-infrared hyperspectral images. *Photonics*, **2022**, 9(12), 957.
- 2 Su, Y.; Yu, B.; Zhao, X. M. Research status and development of infrared camouflage textile materials. *Text. Res. J.*, **2023**, 93(21-22), 5047-5082.
- 3 Hossain, M. A. UV-Visible-NIR camouflage textiles with natural plant based natural dyes on natural fibre against woodland combat background for defence protection. *Sci. Rep.*, **2023**, 13(1), 5021.
- 4 Lin, Y. P.; Ren, L. Q.; Yang, X. D.; Yuan, H. Y. Design and application of bionic camouflage materials simulating spectral reflection characteristics of plants: a review. *Appl. Sci.*, **2024**, 14(11), 4404.
- 5 Fu, S. Q.; Liang, Z. D.; Qian, X.; Zhang, W.; Qiu, Y. L.; Ling, X.; Liu, Q. L.; Zhang, D. Ultrawide spectra camouflage coatings from metallic flake powder. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(21), 27627-27639.
- 6 Zhou, S. H.; Dong, S. K.; Guo, Y. M.; Shuai, Y.; Xu, H. X.; Hu, G. W. Colored thermal camouflage and anti-counterfeiting with programmable In₃SbTe₂ platform. *Nanophotonics*, **2024**, 13(6), 945-954.
- 7 Li, N. Q.; Cui, Z. S.; Yue, X. L.; Zhang, Y. J.; Ren, Z. H.; Guan, Z. H. Molecular hard-segment engineered polyurethane with thermochromism, shape memory, humidity-driven, and self-healing capabilities. *Sens. Actuat. B Chem.*, **2024**, 404, 135266.
- 8 祖梅, 鄢峰, 甘沅丰, 刘雪梅, 刘东青, 李铭洋, 程海峰. 模拟绿色植被光谱特征的高光谱伪装材料与技术研究进展. *红外技术*, **2022**, 44(10), 1018-1026.

- 9 Lu, Q. X.; Li, M.; Tian, A. L.; Fu, S. H. Green plant leaf-inspired smart camouflage fabrics for visible light and near-infrared stealth. *J. Bionic Eng.*, **2022**, 19(3), 788–798.
- 10 张典典, 李敏, 关玉, 王思翔, 胡桓川, 付少海. 仿植被可见光-近红外反射光谱特征的分散染料印花织物制备及其性能. *纺织学报*, **2023**, 44(1), 142–148.
- 11 Hossain, M. A. Spectral simulation and materials design for camouflage textiles coloration against materials of multidimensional combat backgrounds in visible and near infrared spectrums. *MRS Commun.*, **2023**, 13(2), 306–319.
- 12 Yang, H. Y.; Liu, W. T. Bio-based polyamide 56: recent advances in basic and applied research. *Polym. Eng. Sci.*, **2023**, 63(8), 2484–2497.
- 13 Eltahir, Y. A.; Saeed, H. A. M.; Xia, Y. M.; Yong, H.; Wang, Y. M. Mechanical properties, moisture absorption, and dyeability of polyamide 5, 6 fibers. *J. Text. Inst.*, **2016**, 107(2), 208–214.
- 14 Zhang, S. Y. Characterization and compatibility of bio-based PA56/PET. *e-Polymers*, **2023**, 23(1), 20228082.
- 15 Gong, X. R.; Zhang, S. Y. Development and characterization of biobased polyamide 56/polyethylene terephthalate composite fibers. *J. Biobased Mater. Bioenergy*, **2021**, 15(4), 521–527.
- 16 Ghosh, S.; Hall, J.; Joshi, V. Study of chameleon nylon and polyester fabrics using photochromic ink. *J. Text. Inst.*, **2018**, 109(6), 723–729.
- 17 宋伟广, 王冬, 杜长森, 梁栋, 付少海. 自分散酞菁蓝 15:3 的制备及其在粘胶纤维原液着色中的应用. *纺织学报*, **2021**, 42(10), 8–14.
- 18 Hao, L. Y.; Cai, Y. Q.; Wang, R. Preparation of ultrafine pigment dispersion and investigation of its adsorption performance on cationized flax substrate. *Adsorpt. Sci. Technol.*, **2011**, 29(9), 875–885.
- 19 Yang, T. T.; Gao, Y. B.; Wang, X. L.; Ma, B. M.; He, Y. Hydrogen bonding and crystalline structure of bio-based PA56. *Polymer*, **2021**, 237, 124356.
- 20 Gan, D. S.; Liu, Y. J.; Hu, T. H.; Fan, S. H.; Cui, L. N.; Liao, G. K.; Xie, Z. Y.; Zhu, X. Y.; Yang, K. J. Pseudo-eutectic of isodimorphism to design biaxially-oriented bio-based PA56/512 with high strength, toughness and barrier performances. *Polymers*, **2024**, 16(8), 1176.
- 21 He, L. L.; An, T. F.; He, M.; Fan, Q.; Yang, J. F.; Liu, Y. F.; Qin, S. H.; Yu, J. Achieving anti-moisture absorption and high thermal properties in bio-based polyamide 56/F-based heat-resistant agent composites through crystal regulation. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2023**, 140(34), e54301.
- 22 Wang, Y.; Kang, H. L.; Wang, R.; Liu, R. G.; Hao, X. M. Crystallization of polyamide 56/polyamide 66 blends: Non-isothermal crystallization kinetics. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2018**, 135(26), 46409.
- 23 来悦, 王煜, 王莉莉, 李璇, 赵京波, 董侠, 王笃金. PA56 球晶生长的光学偏振反转现象. *高分子学报*, **2020**, 51(11): 1267–1274.
- 24 Morales-Gámez, L.; Ricart, A.; Franco, L.; Puiggali, J. Study on the brill transition and melt crystallization of nylon 65: a polymer able to adopt a structure with two hydrogen-bonding directions. *Eur. Polym. J.*, **2010**, 46(10), 2063–2077.
- 25 Xun, Z. J.; He, G. C.; Huang, Y.; Yu, R. B. Effect of SiO_2 particles on the crystallization and formation of hydrogen bonding in biobased polyamide 56. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2022**, 4949–4960.
- 26 Luo, K. M.; Liu, J. X.; Abbay, K.; Mei, Y. J.; Guo, X. W.; Song, Y. H.; Guan, Q. B.; You, Z. W. The relationships between the structure and properties of PA56 and PA66 and their fibers. *Polymers*, **2023**, 15(13), 2877.
- 27 Kang, H. L.; Wang, Z.; Lin, N.; Hao, X. M.; Liu, R. G. Influence of drawing and annealing on the structure and properties of bio-based polyamide 56 fibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2022**, 139(48), e53221.
- 28 Wang, Z.; Lin, N.; Kang, H. L.; Hao, X. M.; Liu, R. G. Isodimorphism in polyamide 56/polyamide 66 blends with controllable thermal and mechanical properties. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2022**, 4(12), 9407–9416.
- 29 Wang, Z.; Lin, N.; Kang, H. L.; Hao, X. M.; Liu, R. G. Miscibility, crystallization and properties of bio-based polyamide 56/polyamide 6 blends. *Polymer*, **2023**, 265, 125603.

Research Article

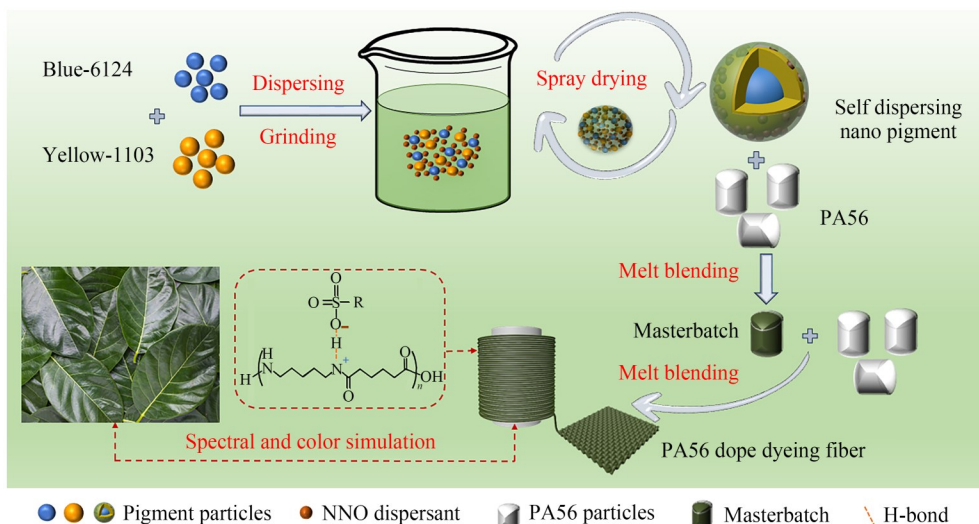
Study on Preparation and Visible Near Infrared Spectral Performance of Dope Dyeing Biobased Polyamide 56 Fiber

Qiao-ling Luo¹, Li-wen Shao¹, Qin Lin², Dong Wang^{1*}, Shao-hai Fu^{1*}

(¹Key Laboratory of Ecological Textile Education, School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122)

(²Yanjing Textile Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215200)

Abstract In order to simulate the spectral characteristics of green vegetations, self dispersed nano-sized pigment green was prepared by a spray drying with sodium salt of polynaphthalene sulphonic acid (NNO) as the dispersant, which was used to prepare PA56 dope dyeing fibers by the melt blending. Moreover, the microcosmic structure, thermal, mechanical, visible-near infrared spectral properties of the fibers were investigated. When the mass ratio of pigment blue-6124 to pigment yellow-1103 was 2:1, the self-dispersed nano-sized pigment green could well simulate the spectral characteristics of green vegetation in visible near infrared (400–1200 nm) region. The self-dispersed nano-sized pigment green is uniformly dispersed in PA56 fibers, with a good compatibility. In addition, the thermal properties of the fibers remain basically unchanged, and the mechanical properties are stable. The spectral distance of the PA56 dope dyeing fibers is less than 0.65, the spectral angle is less than 0.13 rad, and the spectral correlation coefficient is higher than 0.98, which meets the requirements of GJB 1411-2015 for secondary optical camouflage and secondary spectral camouflage. The color of PA56 dope dyeing fibers can simulate the camouflage net colors MG1151 and DG0730 in GJB 1082A-2021 very well (color difference <3). The sun fastness of PA56 dope dyeing fibers is greater than level 6, and the wash fastness and sweat fastness are both level 4–5.



Keywords Visible near infrared spectroscopy, Biobased polyamide 56, Dope dyeing, Spectral reflectance, Color similarity

* Corresponding authors: Dong Wang, E-mail: winter36@jiangnan.edu.cn

Shao-hai Fu, E-mail: shaohai fu@jiangnan.edu.cn