

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.002

## 以抗坏血酸为还原剂的靛蓝染色工艺研究

汪媛<sup>1</sup>, 陆涛<sup>1</sup>, 张聪<sup>2</sup>, 纪俊玲<sup>1,2</sup>, 陈群<sup>1</sup>

(1.常州大学 石油化工学院,江苏 常州 213164;2.常州美胜生物材料有限公司,江苏 常州 213164)

**摘要:**以抗坏血酸作为还原剂探讨靛蓝对棉织物的染色工艺。通过测定其还原溶液还原电位,优化抗坏血酸对靛蓝的还原染色工艺。优化的还原及染色工艺条件为:采用干缸法,靛蓝染料10%(omf),抗坏血酸40 g/L,NaOH 40 g/L,90℃下还原60 min;25℃织物浸染15 min,空气氧化30 min,再放入隐色体溶液中续染3次(每次续染时间为15 min,氧化30 min,清洗),皂洗,水洗,烘干。染后织物各项牢度指标与传统保险粉及葡萄糖还原工艺相当。

**关键词:**靛蓝;抗坏血酸;还原剂;棉织物

中图分类号:TS 193.6

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)06-0009-08

## Study on the Dyeing Process of Indigo with Ascorbic Acid as Reductant

WANG Yuan<sup>1</sup>, LU Tao<sup>1</sup>, ZHANG Cong<sup>2</sup>, JI Junling<sup>1,2</sup>, CHEN Qun<sup>1</sup>

(1. School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou Meisheng Biomaterials Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Dyeing of indigo on cotton fabric with ascorbic acid as a reducing agent was carried out. The reduction and dyeing processes were optimized via single factor tests, and the reduction potential of dye solution and dyeing behaviors on cotton fabric were studied. The optimal reduction process was stock vatting with indigo 10% (omf), ascorbic acid 40 g/L, NaOH 40 g/L, reducing at 90℃ for 60 min. The optimal dyeing process is dip-dyeing at 25℃ for 15 min, oxidation in air for 30 min, and then continuous dyeing in leuco solution for 15 min, oxidation for 30 min. Compared with conventional dyeing process with sodium hydrosulfite and with glucose, the process with ascorbic acid featured similar color fastness.

**Key words:** indigo dyeing; ascorbic acid; reductant; cotton fabric

靛蓝是人类使用的第一支还原染料<sup>[1]</sup>,不溶于水,对纤维没有亲和力。为了使靛蓝能够吸附上染纤

收稿日期:2018-09-24。

作者简介:汪媛(1981—),女,江苏淮安人,硕士,讲师。通信联系人:陈群(1963—),E-mail:13906123032@cczu.edu.cn

引用本文:汪媛,陆涛,张聪,等.以抗坏血酸为还原剂的靛蓝染色工艺研究[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(6):9-17.

维,需要将其还原成隐色酸,再反应生成能够溶于水、亲和纤维的隐色体钠盐<sup>[2-3]</sup>。最早的还原方法是发酵法,如今仍然在传统手工靛泥染色中使用,该法需要人手工完成,耗时较长(通常超过一周时间),生产效率低下,无法实现连续生产<sup>[4-5]</sup>。而现代合成靛蓝染色时使用的还原剂保险粉,还原速度快、染色效率高,染料损失量少。但是保险粉易吸湿结块分解,产生刺激性气味而且遇明火或高温易产生爆炸,使用时也不符合绿色清洁生产<sup>[6-9]</sup>。

人们采用二氧化硫脲<sup>[10-11]</sup>、二价铁盐络合物<sup>[12]</sup>、葡萄糖<sup>[13]</sup>等多种还原剂代替保险粉,将靛蓝还原成隐色体进行染色。抗坏血酸分子结构中的二烯醇基易被氧化为二酮基,具有一定的还原性,可以将染料 2,6-二氯靛酚还原(滴定法测定维生素 C)<sup>[14]</sup>。因此本试验采用抗坏血酸为还原剂,测定还原溶液的还原电位,还原靛蓝从而对棉织物进行染色,并通过测定染色织物的  $K/S$ (表观色深)来优化参数,最终确定以抗坏血酸为还原剂的靛蓝最佳染色条件。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与仪器

织物:纱卡(纯棉,工业级)。

试剂:靛蓝染料(工业品),抗坏血酸(化学纯,上海润捷化学试剂有限公司),保险粉(化学纯,国药集团化学试剂有限公司),氢氧化钠(化学纯,国药集团化学试剂有限公司),无水碳酸钠(化学纯,国药集团化学试剂有限公司),氯化钾(化学纯,国药集团化学试剂有限公司),标准皂片(工业级,上海市纺织工业技术监督所)。

仪器:PHS-3C 型精密 pH 计(ORP 电极,上海精密科学仪器有限公司),SF600X 型测色配色系统(美国 Datacolor),DF-101S 型集热式搅拌器(巩义市英峪仪器厂),WT5002K 型电子天平(常州万泰天平仪器有限公司),Y-571 型摩擦色牢度仪(常州市双固纺织仪器有限公司),SW-24A 型耐洗牢度仪(常州市华纺纺织仪器有限公司),HH-S 型数显恒温水浴锅(常州翔天实验仪器厂)。

### 1.2 抗坏血酸还原靛蓝工艺

采用干缸法进行靛蓝的还原工艺<sup>[15]</sup>:取 0.20 g 靛蓝 10%(omf)分散在 10 mL 水中,加入 0.50 g NaOH,0.30 g 抗坏血酸,水浴升温至 75 ℃ 还原 60 min。加入水使溶液稀释至 100 mL,得靛蓝隐色体溶液。

### 1.3 靛蓝隐色体染色工艺

取 2 g 纯棉纱卡放进隐色体溶液,浴比 1:50,25 ℃ 浸染 30 min,取出后空气氧化 10 min(可多次氧化),皂洗、水洗、烘干,其工艺见图 1。

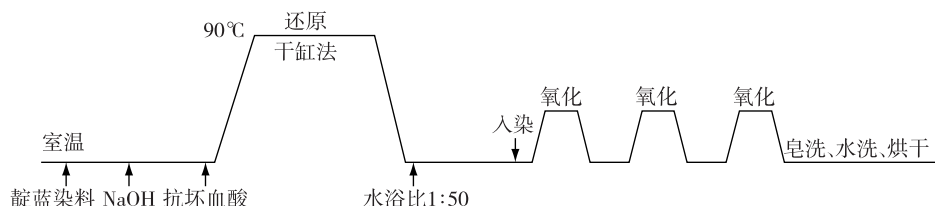


图 1 抗坏血酸还原靛蓝染色工艺流程图

## 1.4 测试方法

### 1.4.1 还原溶液还原电位的测定

以 1.2 工艺中还原液环境配置抗坏血酸溶液,为待测溶液。将 pH 计接上 ORP 电极(蒸馏水冲洗后),调制 mV 挡位,校准后插入所测溶液中,待仪表读数稳定后,读出所测溶液的氧化还原电位<sup>[16-17]</sup>。

### 1.4.2 织物颜色特征值测定

采用 Datacolor SF600X 型电脑测色仪在 D<sub>65</sub> 光源,10°视角下测色,测定染色纯棉纱卡的  $K/S$ ,  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$ , 每个试样测试后旋转 90°, 测量 4 次, 取平均值。

### 1.4.3 织物耐摩擦色牢度的测定

参照 GB/T 29865—2013《纺织品 色牢度试验 耐摩擦色牢度 小面积法》标准,参照 GB/T 251—2008《纺织品 色牢度试验 评定沾色用灰色样卡》,在 D<sub>65</sub> 标准光源下评定试样的干、湿摩擦色牢度级别。

### 1.4.4 织物耐皂洗色牢度的测定

参照 GB/T 12490—2014《纺织品 色牢度试验 耐家庭和商业洗涤色牢度》标准,参照 GB/T 250—2008《纺织品 色牢度试验 评定变色用灰色样卡》和 GB/T 251—2008《纺织品 色牢度试验 评定沾色用灰色样卡》,在 D<sub>65</sub> 标准光源下评定试样的变色和贴衬的沾色牢度级别。

## 2 结果与讨论

### 2.1 抗坏血酸质量浓度对还原效果的影响

采用不同质量浓度的抗坏血酸与 50 g/L 氢氧化钠配成溶液,75 °C 保温 60 min,测定溶液的氧化还原电位。按照 1.2 干缸还原工艺,改变抗坏血酸用量,对靛蓝 10% (omf) 进行还原,采用 1.3 的工艺对纱卡进行染色,测试织物的  $K/S$  及其他颜色特征值,结果如图 2 及表 1 所示。

从图 2 中可以看出,当抗坏血酸质量浓度从 10 g/L 提高到 40 g/L 时,溶液的还原电位绝对值随着抗坏血酸质量浓度提高而增大,表明溶液还原能力逐渐增加,形成稳定的黄绿色隐色体溶液,染后织物  $K/S$  也随着抗坏血酸质量浓度的提高而增加,并在抗坏血酸质量浓度为 40 g/L 时达到峰值。继续将抗坏血酸质量浓度增加到 80 g/L 时,溶液的还原电位绝对值发生下降,染后织物  $K/S$  也随之降低。这说明抗坏血酸的质量浓度继续提高,并不能提高溶液的还原能力。与此同时,过多的抗坏血酸也阻碍了隐色体在棉织物上的吸附,使染后织物的表观色深  $K/S$  也发生下降。

从表 1 可以看出,染后织物颜色亮度  $L^*$  随着抗坏血酸质量浓度的提高先下降又提升,但变化幅度较缓,这可能是由于靛蓝上染越多导致织物颜色亮度下降。而染色样品饱和度  $C^*$  变化不大,说明抗坏血酸的质量浓度对色彩的影响比较小。 $h$  值较为稳定,则说明布样的色相区基本一致。

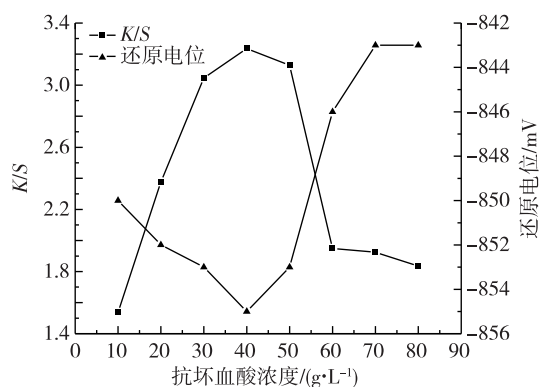


图 2 抗坏血酸质量浓度与溶液氧化还原电位及染后织物  $K/S$  的关系

表 1 抗坏血酸浓度对染后织物  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  的影响

抗坏血酸质量浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )	$L^*$	$C^*$	$h$
10	61.52	15.44	255.32
20	56.00	17.79	257.62
30	51.83	18.02	259.59
40	51.10	18.92	259.41
50	52.40	19.25	257.93
60	59.14	17.68	254.15
70	58.55	18.98	254.07
80	59.54	16.56	254.13

综上所述,选择抗坏血酸质量浓度为 40 g/L。

2.2 氢氧化钠用量对还原效果的影响

采用 40 g/L 抗坏血酸溶液,不同质量浓度的氢氧化钠,75 ℃ 还原 60 min,测定溶液的氧化还原电位。以此还原溶液按照 1.2 干缸还原工艺,改变氢氧化钠用量,对靛蓝 10%(omf)进行还原,采用 1.3 的染色工艺对纱卡进行染色,测试织物的  $K/S$  及其他颜色特征值。结果如图 1 所示,染色织物  $L^*, C^*, h$  值的影响如表 2 所示。

从图 3 可以看出,当氢氧化钠质量浓度为 20 g/L 时,溶液的还原电位为-753 mV,其绝对值低于靛蓝隐色体电位 760 mV,干缸还原液仍为深蓝色,没有发生还原反应,不能形成隐色体溶液。随后当氢氧化钠质量浓度从 30 g/L 升高到 60 g/L 时,溶液还原电位绝对值增加,其还原能力也相应的提高,还原溶液呈黄绿色。此时染后织物  $K/S$  在氢氧化钠质量浓度为 40 g/L 时,达到峰值。继续提高氢氧化钠质量浓度,染色织物  $K/S$  反而下降。当氢氧化钠质量浓度达到 80 g/L 时,还原溶液呈橙色,靛蓝被过度还原。这是由于氢氧化钠的加入有助于靛蓝的还原,溶液还原程度的提高使更多的靛蓝被还原成隐色体并对棉织物上染。但是当氢氧化钠达到一定质量浓度,虽然溶液还原程度继续提高,靛蓝染料却发生了过度还原,  $K/S$  反而有所下降。

从表 2 可以看出,染后织物颜色亮度  $L^*$  随着氢氧化钠质量浓度的变化幅度不大。而染色样品饱和度  $C^*$ 、色相  $h$  也较为稳定,说明色泽受氢氧化钠质量浓度的影响不大,较为稳定。

综上所述,选择氢氧化钠质量浓度为 40 g/L。

2.3 还原温度对还原效果的影响

采用抗坏血酸 40 g/L,氢氧化钠 40 g/L 配置溶液,改变还原温度,保温 60 min,测定溶液的氧化还原电位。以此还原溶液,改变还原温度,对靛蓝 10%(omf)进行还原后,采用 1.3 的染色工艺对纱卡进行染色,测试织物的  $K/S$  及其他颜色特征值。结果如图 4 及表 3 所示。

靛蓝的还原反应是吸热反应,还原溶液的温

表 2 氢氧化钠浓度对染后织物  $L^*, C^*, h$  的影响

氢氧化钠质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	$L^*$	$C^*$	$h$
10	—	—	—
20	—	—	—
30	56.95	16.88	255.76
40	55.88	17.51	256.95
50	57.51	16.53	256.19
60	57.00	15.62	256.71
70	60.11	15.97	255.34
80	59.33	15.57	255.28

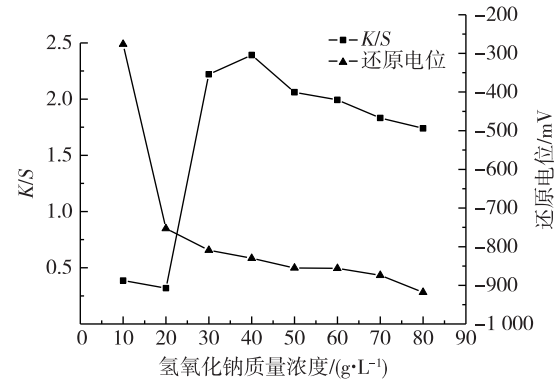


图 3 氢氧化钠质量浓度与溶液氧化还原电位及染后织物  $K/S$  的关系

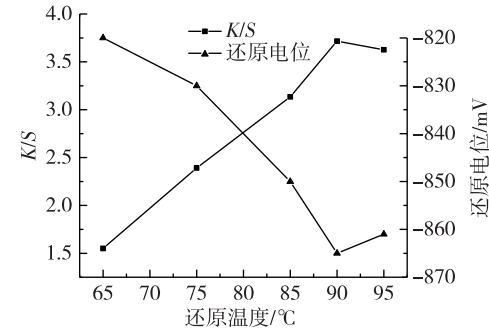


图 4 还原温度与溶液氧化还原电位及染后织物  $K/S$  的关系

表 3 还原温度对染后织物  $L^*, C^*, h$  值的影响

还原温度/℃	$L^*$	$C^*$	$h$
65	62.79	16.14	253.21
75	55.51	17.85	256.89
85	51.65	17.96	258.37
90	49.14	18.52	259.93
95	50.39	19.29	258.41

度也影响着溶液的还原性,可通过还原电位来确定。当还原温度低于 50 ℃时,还原溶液呈深蓝色,不能形成隐色体溶液,无法上染到棉织物上。由图 4 可知,当溶液温度由 65 ℃提高到 90 ℃时,还原电位绝对值随之增加,溶液的还原程度随之增加,还原得到隐色体的量也进一步增加,因此染后织物的  $K/S$  也随还原温度的提高而提高。而当温度高于 90 ℃时,溶液的还原电位绝对值发生下降,对应的染后织物的  $K/S$  也发生下降。

由表 3 可知,染后织物颜色亮度  $L^*$  随着还原温度的提高而降低,布样颜色变暗变深。而染色样品  $C^*$  逐渐升高,说明色彩受还原温度的影响比较大。 $h$  值逐渐升高,则说明布样的色相区有所提高,蓝色更深。

综上所述,抗坏血酸还原靛蓝温度选择 90 ℃。

2.4 还原时间对还原效果的影响

采用抗坏血酸 40 g/L,氢氧化钠 40 g/L,在 90 ℃下,改变还原时间,测定溶液的氧化还原电位。以此还原溶液,改变还原时间,对靛蓝 10%(omf)进行还原;再采用 1.3 的工艺对纱卡进行染色,测试织物的  $K/S$  及颜色特征,结果如图 5 及表 4 所示。

由图 5 可知,还原时间从 30 min 增加到 60 min 时,还原溶液的还原电位绝对值、织物  $K/S$  随着还原时间的增加而增加,而当还原时间继续增加至 90 min 时,还原溶液的还原电位绝对值、织物  $K/S$  呈现稍有下降后保持平稳。这是由于,当还原时间达到 60 min 时,隐色体量达到最大值,使织物  $K/S$  达到最大值,之后当还原时间再增加,空气中氧气会将溶液中隐色体氧化,随后在还原液表面形成一层氧化膜,隔离了空气与溶液中隐色体,因此织物  $K/S$  发生下降后能保持稳定。

由表 4 可知,颜色亮度  $L^*$  随着还原时间的提高而略下降,布样颜色变暗。饱和度  $C^*$  变化不大,说明色彩基本不受还原时间的影响。 $h$  值变化很小,说明布样的色相区基本一致。因此,抗坏血酸还原靛蓝时间选择 60 min。

2.5 染色时间对染色效果的影响

选抗坏血酸质量浓度 40 g/L,氢氧化钠质量浓度 40 g/L,对 10%(omf)靛蓝,90 ℃还原 60 min,采用 1.3 染色工艺,改变浸染时间,对纱卡进行染色,测试织物的颜色特征值。结果如图 6 及表 5 所示。

由图 6 可知,当染色时间从 5 min 增加到 15 min 时,织物  $K/S$  随着染色时间的增长而增加,这由于随着染色时间增加,隐色体在织物上的吸附逐渐增加。当染色时间为 15 min 增加到 40

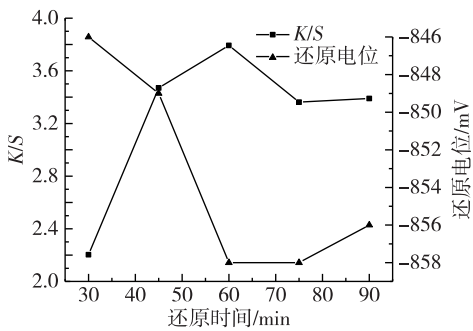


图 5 还原时间与溶液氧化还原电位及染后织物  $K/S$  的关系

表 4 还原时间对染后织物  $L^*, C^*, h$  值的影响

还原时间/min	$L^*$	$C^*$	$h$
30	57.26	17.13	255.98
45	50.27	18.12	258.18
60	49.16	18.85	259.43
75	49.92	17.33	258.97
90	50.38	18.06	258.40

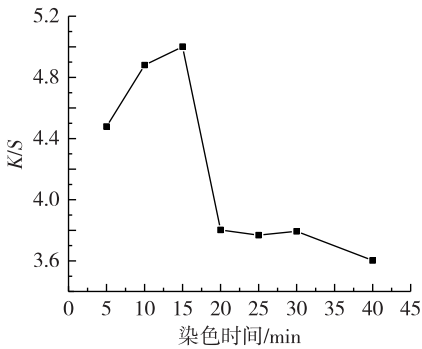


图 6 染色时间与织物  $K/S$  的关系



min 时,  $K/S$  随染色时间的增加而减小, 这是由于染色时间继续增加, 空气中的氧气使溶液中隐色体浓度降低, 进一步使原本已吸附在织物表面的隐色体发生了解附, 造成了织物  $K/S$  的下降。

由表 5 可知, 染色时间对亮度  $L^*$ , 饱和度  $C^*$ ,  $h$  值影响不大, 色彩基本不受染色时间的影响, 布样的色相区基本一致。因此选取 15 min 为最佳染色时间。

## 2.6 染色温度对染色效果的影响

选抗坏血酸质量浓度 40 g/L, 氢氧化钠质量浓度 40 g/L, 对 10% (omf) 靛蓝, 90 °C 还原 60 min, 采用 1.3 染色工艺, 改变浸染温度, 对纱卡进行染色, 测试织物的颜色特征值。其结果如图 7 及表 6 所示。

由图 7 可知, 当染色温度从 15 °C 上升到 25 °C 时, 织物  $K/S$  逐渐变大, 当染色温度为 25 °C 时, 织物  $K/S$  达到峰值, 这是由于温度提高有利于隐色体的吸附。继续升高染色温度, 织物  $K/S$  下降。这是由于温度的提高, 也加快了空气中氧气对溶液隐色体的氧化。

由表 6 可知, 织物颜色亮度  $L^*$  随染色温度提高先下降后上升, 整体幅度不大, 染色温度对饱和度  $C^*$ ,  $h$  值影响不大, 色彩基本不受染色时间的影响, 布样的色相区基本一致。所以选择染色温度为 25 °C。

## 2.7 氧化时间对染色效果的影响

选抗坏血酸质量浓度 40 g/L, 氢氧化钠质量浓度 40 g/L, 90 °C 还原 60 min, 按照 1.2 干缸还原工艺对靛蓝进行还原, 采用 1.3 染色工艺, 25 °C 下染色 15 min, 改变氧化时间, 对纱卡进行染色, 测试织物的颜色特征值。结果如图 8 及表 7 所示。

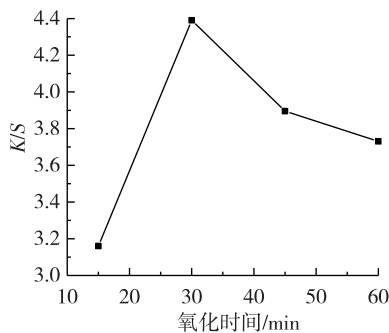


图 8 氧化时间与织物  $K/S$  的关系

表 5 染色时间对染后织物  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  值的影响

染色时间/min	$L^*$	$C^*$	$h$
5	46.95	19.75	261.02
10	45.74	20.09	261.00
15	45.03	19.64	261.15
20	46.57	19.87	260.79
25	46.04	19.39	260.94
30	49.16	18.85	259.43
40	45.49	18.85	261.55

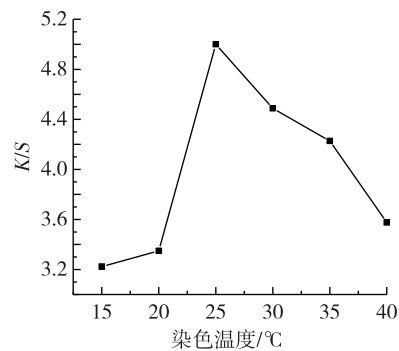


图 7 染色温度与织物  $K/S$  的关系

表 6 染色温度对染后织物  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  值的影响

染色温度/°C	$L^*$	$C^*$	$h$
15	51.34	18.53	258.84
20	50.56	18.26	258.81
25	45.03	19.64	261.15
30	47.07	20.02	259.58
35	47.86	19.64	259.65
40	49.95	19.12	259.60

表 7 氧化时间对染后织物  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  值的影响

氧化时间/min	$L^*$	$C^*$	$h$
15	49.89	19.34	258.08
30	48.70	20.33	261.49
45	48.97	18.95	259.87
60	49.71	18.90	259.54

由图 8 可知,当氧化时间从 15 min 增加到 30 min 时,织物  $K/S$  随着氧化时间的增长而增大,这是由于氧化时间的增加可能会造成靛蓝氧化析出。而当氧化时间大于 30 min,  $K/S$  有所下降。由表 7 可知,氧化时间对亮度  $L^*$ ,饱和度  $C^*$ ,  $h$  值影响不大,色彩基本不受染色时间的影响,布样的色相区基本一致。因此选择氧化时间为 30 min。

2.8 续染次数

选抗坏血酸质量浓度 40 g/L,氢氧化钠质量浓度 40 g/L,90 ℃ 还原 60 min,按照 1.2 干缸还原工艺对靛蓝进行还原,采用 1.3 染色工艺,25 ℃ 下染色 15 min,氧化 30 min,再放入隐色体溶液中续染(每次续染时间为 15 min,氧化 30 min),改变续染次数,对纱卡进行染色,测试织物的颜色特征值,其结果如图 9 所示。

由图 9 可知,当续染次数从 0 变到 3 时,  $K/S$  迅速增大,次数为 3 时达到最大值,可以看出染色效果明显提升。而当续染次数大于 3 时,  $K/S$  变化趋缓。此时溶液中隐色体与纤维上隐色体达到吸附平衡,增加续染次数也不会增加吸附量。由表 8 可知,颜色亮度  $L^*$  随续染次数增加而下降,织物颜色变暗,而续染次数对颜色饱和度  $C^*$ ,  $h$  值影响不大,色彩基本不受染色时间的影响,布样的色相区基本一致。因此合适的续染次数为 3 次。

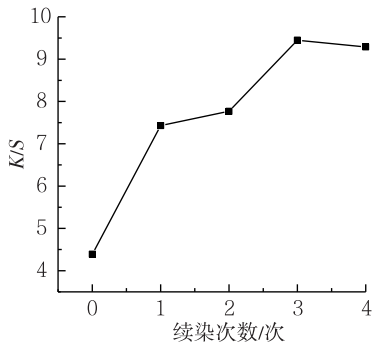


图 9 续染次数与  $K/S$  的关系

表 8 续染次数对染后织物  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  值的影响

续染次数/次	$L^*$	$C^*$	$h$
0	47.7	20.33	258.08
1	38.05	19.87	265.56
2	38.15	20.54	265.30
3	32.85	19.56	267.77
4	33.68	19.91	266.87

表 9 染后织物的耐皂洗色牢度与耐摩擦色牢度等级

还原剂	耐摩擦色牢度/级		耐皂洗色牢度/级	
	干摩	湿摩	沾色(棉)	变色
抗坏血酸	4	2~3	4~5	3~4
葡萄糖	4	2~3	4~5	3~4
保险粉	4	2~3	4~5	3~4

2.9 染色棉织物的色牢度

选择最优工艺条件对纱卡进行染色,测试织物的耐摩擦色牢度和耐皂洗色牢度,同时与传统保险粉工艺、葡萄糖工艺的染色织物做对比,其结果见表 9。

由表 9 可知,采用抗坏血酸为还原剂并在最优工艺条件下对棉织物进行靛蓝染色,染后织物的干摩擦色牢度以及耐皂洗沾色(棉)牢度较好,可以达到 4 级及以上,其湿摩色牢度和耐皂洗变色牢度较低。这结果与采用常规保险粉以及葡萄糖还原的染色织物的色牢度评级情况一致。

3 结 论

1)抗坏血酸还原靛蓝染色最优工艺条件:采用干缸法,靛蓝染料 10%(omf),用 40 g/L 葡萄糖,40 g/L NaOH,90 ℃ 下还原 60 min,浴比 1:50;25 ℃ 浸染 15 min,空气氧化 30 min,再放入隐色体溶液中续染 3 次(每次续染时间为 15 min,氧化 30 min,清洗),皂洗,水洗,烘干。

2)抗坏血酸还原靛蓝染色织物的各项色牢度与传统保险粉工艺、葡萄糖还原染色工艺的染色织物色牢度等级接近。

## 参考文献:

- [1]刘一萍,卢明,吴大洋.植物靛蓝染色历史及其发展[J].丝绸,2014,51(11):67-72.
- [2]沈志平.染整技术:第2册[M].北京:中国纺织出版社,2005.
- [3]姚继明,吴远明.靛蓝染料的生产及应用技术进展[J].精细与专用化学品,2013,21(4):13-18.
- [4]蔡成琴,张瑞萍,赵晴.纯棉织物的植物靛蓝生态染色[J].印染,2013,39(5):1-4.
- [5]ERKAN G, ŞENGÜL K, KAYA S. Dyeing of white and indigo dyed cotton fabrics with *Mimosa tenuiflora* extract[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2014, 18(2):139-148.
- [6]MEKSI N, TICHA M B, KECHIDA M, et al. Using of ecofriendly  $\alpha$ -hydroxycarbonyls as reducing agents to replace sodium dithionite in indigo dyeing processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24:149-158.
- [7]MEKSI N, KECHIDA M, MHENNI F. Cotton dyeing by indigo with the borohydride process: Effect of some experimental conditions on indigoreduction and dyeing quality[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 131:187-193.
- [8]AMAT A, ROSI F, MILIANI C, et al. Theoretical and experimental investigation on the spectroscopic properties of indigo dye [J]. Journal of Molecular Structure, 2011, 993:43-51.
- [9]MEKSI N, TICHA M B, KECHIDA M, et al. Using of ecofriendly  $\alpha$ -hydroxycarbonyls as reducing agents to replace sodium dithionite in indigo dyeing processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24:149-158.
- [10]甄超.二氧化硫脲还原靛蓝染料还原电位分析[J].轻纺工业与技术,2016,45(5):30-32.
- [11]甘厚磊,熊高,汪倩,等.保险粉和二氧化硫脲还原靛蓝的优化工艺[J].印染,2014(2):22-24.
- [12]伍建国,周向东,刘方,等.  $\text{Fe}^{2+}$  络合物在靛蓝染色过程中的作用[J].纺织学报,2004,25(3):96-98.
- [13]刘祥霞,卢嘉杰.棉织物的植物靛蓝染料-葡萄糖染色[J].印染,2011,37(5):1-5.
- [14]王丽霞.测定维生素 C 的两种方法[J].经济林研究,2001(2):39-40.
- [15]杨静新,王海峰,厉成宣,等.牛仔布靛蓝浸染工艺探讨[J].南通大学学报,2007,6(1):39-41.
- [16]罗小勤,樊增禄,陈庭春,等.靛蓝的电化学还原及其染色工艺的探讨[J].印染助剂,2008,25(3):21-23.
- [17]刘幸乐.影响靛蓝染色效果的因素分析及染色体系的优化设计[D].石家庄:河北科技大学,2012.

(责任编辑:殷丽莉)