

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170704806

糖类添加剂在1,2,3,4-丁烷四羧酸棉织物 防皱整理中的应用

肖慧芳¹, 阎克路^{1,2}, 纪柏林^{1,2}

(1. 东华大学 化学化工与生物工程学院, 上海 201620;
2. 东华大学 国家染整工程技术研究中心, 上海 201620)

摘要 针对1,2,3,4-丁烷四羧酸(BTCA)防皱整理棉织物强力损失的问题,采用在整理液中加入糖类添加剂的方法,对棉织物的防皱性能进行改善;通过分子尺寸计算和傅里叶转换红外光谱测试,分析其作用机制。结果表明:葡萄糖、蔗糖和麦芽糖均可进一步提高BTCA整理织物的折皱回复角,同时降低织物的强力损失;葡萄糖对折皱回复角的提高作用最大,其质量浓度为10.0 g/L时,折皱回复角达到最大值260°,比不加葡萄糖的增加了22°;但将白度考虑在内,选择麦芽糖为最佳糖类添加剂,添加剂分子半径越小,越易扩散进入纤维内部,对折皱回复角提高作用越大;折皱回复角提高的原因是在不同BTCA分子之间建立了共价桥接。

关键词 防皱整理; 糖类添加剂; 棉织物; 1,2,3,4-丁烷四羧酸; 共价桥接

中图分类号: TS 195.2 文献标志码: A

Application of carbohydrate additives in 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid anti-wrinkle finishing of cotton fabrics

XIAO Huifang¹, YAN Kelu^{1,2}, JI Bolin^{1,2}

(1. College of Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. National Engineering Research Center for Dyeing and Finishing of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract Due to the strength loss of cotton fabrics treated with 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid (BTCA), different carbohydrate additives were added into the finishing bath to improve the anti-wrinkle properties of treated fabrics. The action mechanism was analyzed by molecular size calculation and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The results show that glucose, sucrose and maltose can further increase the wrinkle recovery angle (WRA) of the treated fabric and reduce the fabric strength loss. Glucose shows the greatest effect on WRA increasing, and WRA of the treated fabrics reaches the maximum value of 260° when the dosage is 10.0 g/L, increasing by 22° compared with those without glucose. However, taking the whiteness index into consideration, maltose was selected as the most appropriate carbohydrate additive here. According to the calculation of Connolly solvent excluded volume and radius of carbohydrate additives and based on the diffusion equation, it can be concluded that the molecule with smaller molecular radius can spread into the deeper section of the fiber and the effect on WRA improvement is more significant. FT-IR test shows that the mechanism of WRA enhancement is because of the covalent bridging through glucose between different BTCA molecules just grafted onto the fibers.

Keywords anti-wrinkle finishing; carbohydrate additive; cotton fabric; 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid; covalent bridging

收稿日期: 2017-07-11 修回日期: 2017-12-12

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAE11G00)

第一作者简介: 肖慧芳(1991—),女,硕士生。主要研究方向为纺织品后整理。

通信作者: 纪柏林 E-mail: jibolin19881015@163.com。

1,2,3,4-丁烷四羧酸(BTCA)是多元羧酸中整理效果较好的无甲醛防皱整理剂^[1-3],但其整理织物存在强力下降严重,织物表面pH值过低等缺点^[4-5]。研究表明,棉织物的弹性和断裂强力是一对矛盾体^[6-7],提高织物的折皱回复角(WRA)是以牺牲部分强力为代价的。强力损失主要由2个原因^[8]造成:BTCA与纤维素交联引起织物强力损失;酸降解引起织物强力损失。而BTCA与纤维素的酯化交联与BTCA对纤维素的酸降解是竞争反应^[9],如果提高交联反应,增加参与酯化反应的羧基数量以降低酸降解反应,那么就可以提高织物的弹性而不造成强力进一步降低。

为提高BTCA对棉织物的防皱性能,同时不降低织物强力,可加入适量的添加剂。虽然小分子扩链剂多元醇如二甘醇^[10]有利于促进BTCA与棉织物的交联效果,但会降低织物强力。棉纤维的基本组成物质是纤维素,其完全水解后的最终产物是葡萄糖^[11]。葡萄糖作为纤维素基本结构单元,也可作为扩链剂与BTCA发生酯化反应,从而消耗部分羧基减少对纤维素的酸降解;作为扩链剂其刚性比二甘醇小,对织物的强力损失影响小。

本文采用BTCA作为整理剂,次亚磷酸钠作为催化剂,与纤维素结构单元相似的单糖、二糖和多糖等糖类化合物作为添加剂,对棉织物进行整理。通过测试整理织物的折皱回复角、撕破强力和白度,从中筛选出防皱整理效果最好的糖类添加剂,并通过红外测试进一步分析了添加剂的作用机制。

1 实验部分

1.1 实验材料

织物:经过退浆、煮练、漂白和丝光处理的纯棉平纹府绸布,经纬纱线密度均为14.6 tex,经纬密度分别为524、284根/(10 cm),面密度为117 g/m²(上海华纶印染有限公司)

化学试剂:1,2,3,4-丁烷四羧酸(BTCA)、一水合次亚磷酸钠(SHP)、一水合葡萄糖、蔗糖(均为分析纯AR,国药集团化学试剂有限公司)、一水合麦芽糖、壳聚糖(均为生物试剂BR,国药集团化学试剂有限公司)、β-环糊精(分析纯AR,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)

1.2 仪器和设备

TE412-L型电子天平(赛多利斯科学仪器北京有限公司),P-A1型立式均匀轧车(瑞比公司),DHE 65002型焙烘机(Mathis公司),MOO3A型折皱回复角测试仪(锡莱-亚太拉斯有限公司),

YG(B)033D型撕破强力仪(温州大荣纺织仪器有限公司),Varian 640-IR型傅里叶红外光谱仪(Varian公司),SF600 PSUS型电脑测色配色仪(美国Datacolor公司)

1.3 整理工艺

二浸二轧整理液(轧液率为90%左右)→预烘(90℃,2.0 min)→焙烘(160℃,3.0 min)→常温水洗(5.0 min)→烘干(90℃,5.0 min)。

1.4 测试方法

1.4.1 整理织物的防皱性能测试

织物的折皱回复角按照AATCC 66—2008《织物折皱回复性:回复角法》测定。

织物的撕破强力按照ASTM D 1424—1996《冲击摆锤法测定织物的撕破强力》进行评定。

织物的白度采用Datacolor电脑测色配色系统,参照AATCC 110—2005《纺织品的白度测定》进行测定。

1.4.2 红外光谱分析

整理后织物在常温条件下用水冲洗5.0 min,再用0.1 mol/L的NaOH溶液洗涤4.0 min,于85℃烘干5.0 min,将布样剪成粉末,称取2.0 mg样品,与已烘干的200 mg溴化钾混合,研磨均匀,然后压片,在傅里叶红外光谱仪上测定样品的红外吸收光谱。扫描波数范围为4 000~400 cm⁻¹,扫描次数为100,分辨率为4 cm⁻¹,基线校准,背景峰采用空气。

1.4.3 糖类添加剂分子尺寸计算

糖类添加剂体积由软件ChemBio3D Ultra进行计算^[12-13]。康利溶剂排出体积(CSEV)为溶剂与分子表面接触面所包含的体积^[13]。由计算得到的分子康利溶剂排出体积可进一步按球形模型计算出分子半径:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (1)$$

式中: V 为旧软件计算出的化合物分子康利溶剂排出体积, nm³; r 为球形分子半径, nm。

不同化合物在相同聚合物纤维素中的扩散系数 D 与其半径大小 r 的关系可通过下式^[12]表示:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

式中: r_1 、 r_2 分别为化合物1和化合物2的分子半径, nm; D_1 、 D_2 分别为化合物1和化合物2的扩散系数, m²/s。

2 结果与讨论

2.1 糖类添加剂的筛选

为研究不同分子尺寸的糖类化合物对整理织物性能的影响,本文选取单糖、二糖、多糖等糖类化合

物作为添加剂,按照1.3节实验方法对棉织物进行防皱整理,基于课题组前期研究结果^[4],BTCA选取70.0 g/L,SHF选取16.0 g/L。

2.1.1 单糖(葡萄糖)的最佳用量

首先,采用不同质量浓度的葡萄糖加入整理液中对织物进行防皱整理,并对整理织物的性能进行测试,结果如表1所示。

表1 葡萄糖用量对棉织物整理效果的影响

Tab.1 Effect of glucose dosage on cotton fabric finishing

葡萄糖质量浓度/(g·L ⁻¹)	折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%		白度/%
		经向	纬向	
0.0	238	60.9	53.9	72.3
5.0	246	56.4	46.0	62.9
10.0	260	61.6	47.0	52.2
15.0	246	60.2	55.7	48.2
20.0	249	61.0	54.3	43.6
25.0	242	59.8	50.5	42.7

由表1可知,当葡萄糖的质量浓度为10.0 g/L时,整理织物的折皱回复角达到最大值260°,比不加葡萄糖的增加了22°,强力保留率基本不变,说明葡萄糖可增大织物的折皱回复角,同时不会降低织物的强力。由于整理织物存在泛黄现象,因此需要找到一种与葡萄糖作用相同,但不会导致织物泛黄的添加剂。

2.1.2 二糖(蔗糖、麦芽糖)的最佳用量

采用不同质量浓度的蔗糖对棉织物进行防皱整理,并对整理织物的性能进行测试,结果如表2所示。

表2 蔗糖用量对棉织物整理效果的影响

Tab.2 Effect of sucrose dosage on cotton fabric finishing

蔗糖质量浓度/(g·L ⁻¹)	折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%		白度/%
		经向	纬向	
0.0	238	59.4	44.1	75.8
5.0	246	53.7	45.5	62.0
10.0	253	55.4	49.6	49.3
15.0	248	56.2	46.3	40.1
20.0	247	58.4	46.0	35.8
25.0	236	60.0	53.0	36.2

由表2可知,当蔗糖质量浓度为10.0 g/L时,整理织物的折皱回复角达到最大值253°,比不加蔗糖的增加15°,同时纬向撕裂强力保留率增加5.5%,说明蔗糖不仅可提高织物的弹性,还可提高织物的撕破强力,但是整理的织物依然存在泛黄现象。

麦芽糖也是一种二糖化合物,同样将其作为添

加剂加到整理液中对织物进行防皱整理,整理织物的性能测试结果如表3所示。

表3 麦芽糖用量对棉织物整理效果的影响

Tab.3 Effect of maltose dosage on cotton fabric finishing

麦芽糖质量浓度/(g·L ⁻¹)	折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%		白度/%
		经向	纬向	
0.0	238	51.6	47.2	76.4
5.0	242	51.7	46.2	73.7
10.0	247	50.3	49.3	71.8
15.0	239	51.1	50.6	72.4
20.0	241	53.1	51.0	74.3
25.0	239	54.1	52.0	71.6

由表3可知,当麦芽糖的质量浓度为10.0 g/L时,整理织物的折皱回复角达到最大值247°,比不加麦芽糖的增加了9°,纬向撕破强力保留率保持不变趋势。说明麦芽糖可提高织物的弹性,但不影响织物的强力,同时对织物的白度影响小;因此,麦芽糖适合作为BTCA整理液的添加剂。

2.1.3 多糖(β-环糊精、壳聚糖)的最佳用量

采用不同质量浓度的β-环糊精加入整理液中对BTCA进行防皱整理,并对整理织物的性能进行测试,结果如表4所示。

表4 β-环糊精用量对棉织物整理效果的影响

Tab.4 Effect of β-cyclodextrin dosage on cotton fabric finishing

β-环糊精质量浓度/(g·L ⁻¹)	折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%		白度/%
		经向	纬向	
0.0	238	58.3	50.1	74.9
5.0	228	58.6	50.5	75.1
10.0	230	56.7	48.5	75.4
15.0	233	57.4	51.7	73.6
20.0	228	58.4	50.5	74.0
25.0	220	60.2	51.3	76.2

由表4可知,随着β-环糊精的加入,整理织物的折皱回复角呈下降的趋势,但是织物强力保留率基本不变。原因是β-环糊精与BTCA发生反应,从而与棉纤维羟基产生竞争反应,降低了BTCA与纤维的有效交联,造成折皱回复角降低。由表4还可知,整理织物的白度有所提高。

壳聚糖是一种可成膜物质,含有氨基和羟基等活泼基团,为研究壳聚糖在防皱整理中的作用,将壳聚糖以不同的浓度与BTCA一浴法整理织物,整理织物的性能测试结果如表5所示。

由表5可知,整理织物的折皱回复角随着壳聚糖的加入而下降。因为壳聚糖的用量过大,在纤维

表面形成的薄膜柔软性太差,造成整理织物的弹性下降,而壳聚糖分子量过大,整理过程中很难进入到纤维内部。

表 5 壳聚糖用量对棉织物整理效果的影响

Tab.5 Effect of chitosan dosage on cotton fabric finishing

壳聚糖质量浓度/ (g·L ⁻¹)	折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%		白度/%
		经向	纬向	
0.0	238	58.1	51.9	74.5
5.0	236	54.0	46.0	71.0
10.0	229	52.1	49.0	70.0
15.0	212	58.1	48.0	67.9
20.0	207	55.0	52.0	66.9
25.0	200	52.5	52.2	64.3

基于以上研究可知,葡萄糖作为添加剂对棉织物的弹性提高最大,但经其整理后织物存在泛黄现象。综合考虑整理织物的各项测试性能,选择麦芽糖作为最佳的糖类添加剂。但为了研究糖类添加剂的作用机制,暂时忽略整理织物的白度,以葡萄糖为对象研究其作用机制。

2.2 糖类添加剂分子结构分析

添加剂分子尺寸的大小决定其向棉纤维内部扩散的速率,因此有必要对糖类添加剂的分子尺寸进行探讨。按 1.4.3 节方法计算糖类添加剂康利溶剂排出体积,葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、β-环糊精和壳聚糖分子的康利溶剂排出体积值分别为 0.143 340、0.283 020、0.279 811、0.962 995、1.308 589 nm³。将分子看作球状模型,根据式(1)计算各糖类添加剂的分子半径,结果如图 1 所示。

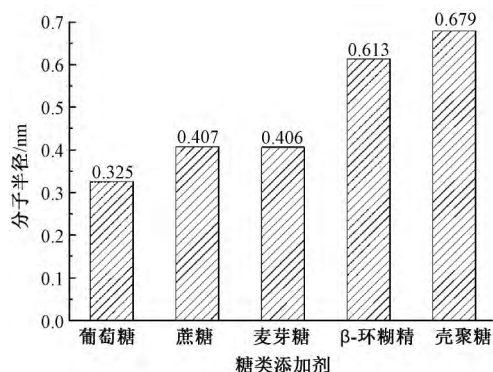


图 1 糖类添加剂分子尺寸的对比

Fig.1 Comparison of molecular sizes of carbohydrate additives

由图 1 可知,由葡萄糖分子计算得到的半径 r 为 0.325 nm,分子半径相对较小。由式(2)可知,葡萄糖分子进入纤维素内部的扩散系数大。麦芽糖和蔗糖分子半径相近,分别为 0.406、0.407 nm,二者

对织物的整理效果相近。结合 2.1 节部分结果可知,葡萄糖和蔗糖对整理织物的折皱回复角提高最多。β-环糊精和壳聚糖的分子尺寸偏大,整理效果较差,这是由于分子本身尺寸大,不易扩散进入纤维内部,无法在纤维分子链间起到桥接作用。

2.3 葡萄糖对整理织物耐洗性的影响

由 2.1 节可知,葡萄糖可最大程度提高整理织物的折皱回复角,故对 10.00 g/L 葡萄糖整理织物的耐洗性能进行研究,经不同水洗后,整理织物的性能测试结果如表 6 所示。

表 6 机洗次数对整理织物性能的影响

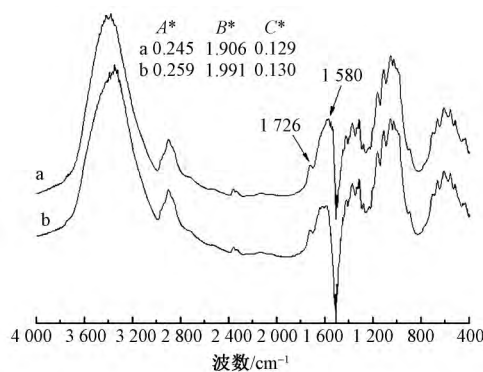
Tab.6 Effect of machine-washing times on fabric performance

机洗次数	不加葡萄糖				加葡萄糖	
	折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%		折皱回复角/(°)	撕破强力保留率/%	
		经向	纬向		经向	纬向
1	231	70.8	60.8	246	65.9	59.3
2	232	68.7	63.9	238	68.9	60.7
3	232	66.2	58.4	232	67.8	62.0

由表 6 可知:机洗 1 次后,加入葡萄糖整理织物的折皱回复角有所下降,但仍高于未加入葡萄糖的;当机洗 3 次时,加入葡萄糖整理织物的防皱性能与未加入葡萄糖整理的效果相当。原因是:在棉纤维无定形区尺寸较大的位置,发生交联的葡萄糖和 BTCA 经过多次洗涤后,酯键发生水解,从而造成弹性降低。从强力保留率来看,糖类添加剂的加入不会降低整理织物的强力。

2.4 化学结构分析

首先,按照 1.4.2 节对织物进行碱洗,以将未参与酯化反应的酸酐和羧基转化为羧酸盐,然后进行红外测试,测试结果如图 2 所示。



a—BTCA 和 SHP 整理织物;

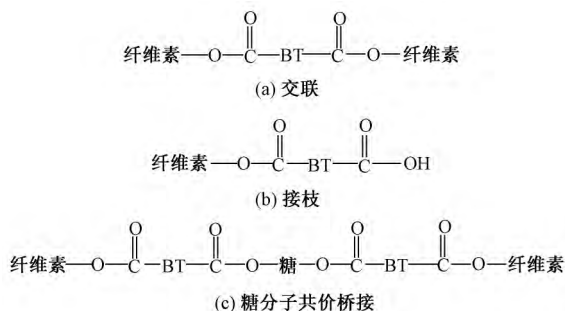
b—BTCA、SHP 和葡萄糖(10.0 g/L)整理织物。

图 2 整理棉织物的红外吸收谱图

Fig.2 Infrared absorption spectra of cotton fabric after finishing

整理织物经过碱洗后, $1\ 726\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰完全由 BTCA 参与酯化反应后形成的酯羰基所贡献, 以 $2\ 900\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰(纤维素 C—H 振动吸收峰)为基准峰, $1\ 726\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰强度与其吸收强度作比值(即 $1\ 726/2\ 900$), 可以衡量 BTCA 与纤维素的酯化交联程度^[14]。比值越大, 酯化共价交联程度越高。

由图 2 可看出, 加入葡萄糖整理织物的 $1\ 726\ \text{cm}^{-1}/2\ 900\ \text{cm}^{-1}$ (即酯键相对吸收强度 A^*) 和 $1\ 580\ \text{cm}^{-1}/2\ 900\ \text{cm}^{-1}$ (即羧酸盐中羧基的相对吸收强度 B^*) 数值均比未加入葡萄糖的高, 表明参与酯化反应的 BTCA 分子数量增多。根据 BTCA 与纤维素羟基分步成酐成酯的反应机制^[14], A^* 的增加速率应该小于 B^* , 但是图 2 表明 A^* 的实际增加速率(1.057 倍) 大于 B^* (1.045 倍), 且平均每个 BTCA 分子参与酯化反应的羧基数 C^* 基本不变, 表明平均每个 BTCA 分子中有更多羧基被消耗, 这是由 BTCA 与葡萄糖酯化反应造成的。图 3 示出 BTCA 与纤维素大分子可能发生的几种反应形式。据此可分析葡萄糖作添加剂对整理织物性能的影响机制。



注: BT 代表 BTCA 分子剩余部分的结构。

图 3 纤维素分子与 BTCA 的反应方式

Fig. 3 Reaction mode of cellulose molecules with BTCA.

(a) Crosslinking; (b) Grafting; (c) Carbohydrate molecule as bridge

棉纤维无定形区尺寸是一个较大的范围, 不同尺寸的化合物能够扩散到达的位置也不同。受 BTCA 分子尺寸的限制, 只有无定形区纤维素大分子链之间的距离合适时, 才会通过 BTCA 建立连接, 见图 3(a); 无定形区尺寸过大, 则 BTCA 分子中只有一端与纤维素发生反应, 见图 3(b)。而采用糖类化合物作添加剂, 当其分子中的羟基可能会与 BTCA 发生酯化反应, 从而进一步建立共价交联而提高织物弹性^[15-16], 见图 3(c)。这也解释了图 2 中 A^* 和 B^* 的测试结果; 此外, 葡萄糖分子中的羟基与 BTCA 发生酯化反应, 增加交联的平均长度与支化度, 提高交联网络的弹性, 使整理织物在受外力时能

够均匀地承担应力, 因此, 整理织物的强力也有所提高。

3 结 论

1) 通过对比 5 种糖类添加剂发现, 单糖、二糖化合物对 BTCA 整理织物折皱回复角的提高作用比多糖化合物大, 同时不会降低织物强力保留率, 解决了折皱回复角提高和强力保留率降低这一矛盾问题。综合考虑, 麦芽糖为最佳糖类添加剂, 其质量浓度为 $10.0\ \text{g/L}$ 时, 整理织物折皱回复角为 247° , 经、纬向强力保留率均在 50.0% 左右。

2) 葡萄糖作添加剂, 当其质量浓度为 $10.0\ \text{g/L}$ 时, BTCA 整理织物的折皱回复角为 260° , 且整理织物的耐洗性有一定提高。

3) 红外测试表明, 葡萄糖可与 BTCA 发生酯化反应, 提高酯键吸收强度。

4) 葡萄糖分子半径小, 易进入纤维内部, 与 BTCA 交联从而在纤维分子链之间起到桥接的作用, 形成网状结构, 提高了整理织物的弹性回复性能。

FZXB

参考文献:

- [1] 华文松, 顾松林, 顾艳霞, 等. 丁烷四羧酸在织物整理上的应用[J]. 印染助剂, 2008, 25(8): 5-8.
HUA Wensong, GU Songlin, GU Yanxia, et al. Application of butanetetracarboxylic acid on textile finishing[J]. Textile Auxiliaries, 2008, 25(8): 5-8.
- [2] 汪澜, 李卓. 多羧酸与纤维素纤维反应机理的分析研究[J]. 纺织学报, 2000, 21(1): 18-20.
WANG Lan, LI Zhuo. Analyses and studies on reaction mechanism of polycarboxylic acids with cellulosic fibers[J]. Journal of Textile Research, 2000, 21(1): 18-20.
- [3] 杨卓鸿, 王金秀, 方剑. 无甲醛防皱整理剂 BTCA 在棉织物整理中的应用研究[J]. 武汉科技学院学报, 2004, 17(3): 1-4.
YANG Zhuohong, WANG Jinxiu, FANG Jian. Application and study of non-formaldehyde wrinkle-resistant agent BTCA in the cotton fabric[J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2004, 17(3): 1-4.
- [4] 严玮琛, 刘建新, 胡婷莉, 等. 纯棉织物的无甲醛免烫整理[J]. 印染, 2014(8): 5-8.
YAN Weichen, LIU Jianxin, HU Tingli, et al. Formaldehyde-free durable press finish of cotton fabric[J]. China Dyeing & Finishing, 2014(8): 5-8.
- [5] 汪津, 纪柏林, 胡婷莉, 等. 棉织物多元羧酸抗皱整理免水洗工艺[J]. 纺织学报, 2015, 36(10): 92-96.

- WANG Jin, JI Bolin, HU Tingli, et al. Washing-free anti-wrinkle finishing of cotton fabric by polycarboxylic acid[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(10): 92-96.
- [6] 郑春玲, 赵建平, 王祥荣. 添加剂在竹纤维 BTCA 抗皱整理中的应用[J]. *丝绸*, 2004(5): 9-11.
ZHENG Chunling, ZHAO Jianping, WANG Xiangrong. Application of additives in bamboo fiber BTCA anti-wrinkle finishing[J]. *Journal of Silk*, 2004(5): 9-11.
- [7] 汪澜, 袁近. 三乙醇胺在 BTCA 抗皱整理中的应用[J]. *丝绸*, 2002(8): 20-21.
WANG Lan, YUAN Jin. Application of triethanolamine in BTCA anti-wrinkle finishing [J]. *Journal of Silk*, 2002(8): 20-21.
- [8] 张亚惠, 于永玲. 亚麻织物 BTCA 无甲醛免烫整理工艺探讨[J]. *印染*, 2004, 30(22): 8-10.
ZHANG Yahui, YU Yongling. DP finish of linen fabric with BTCA [J]. *China Dyeing & Finishing*, 2004, 30(22): 8-10.
- [9] JI B, YAN K, SUN G. Investigation on functional properties of 1, 2, 3, 4-butanetetracarboxylic acid cross-linked fabrics impacted by molecular structures and chemical affinity of catalysts [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(18): 5216-5222.
- [10] 徐小梅, 邹正冬, 王碧佳. 棉织物 BTCA 低温免烫整理中的多元醇扩链作用[J]. *印染*, 2016, 42(17): 10-14.
XU Xiaomei, ZOU Zhengdong, WANG Bijia. Low temperature durable press finish of cotton fabrics by BTCA assisted with a polyol extender [J]. *China Dyeing & Finishing*, 2016, 42(17): 10-14.
- [11] 蔡再生. 纤维化学与物理[M]. 北京: 中国纺织出版社 2004: 156-167.
CAI Zaisheng. *Chemistry and Physics of Fibers* [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2004: 156-167.
- [12] ALVAREZ V H, AZNAR M. Thermodynamic modeling of vapor-liquid equilibrium of binary systems ionic liquid⁺ supercritical {CO₂ or CHF₃} and ionic liquid⁺ hydrocarbons using Peng-Robinson equation of state [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 39(4): 353-360.
- [13] JI B, ZHAO C, YAN K, et al. Effects of acid diffusibility and affinity to cellulose on strength loss of polycarboxylic acid crosslinked fabrics [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 144(1): 282-288.
- [14] JI B, TANG P, YAN K, et al. Catalytic actions of alkaline salts in reactions between 1,2,3,4-butane-tetracarboxylic acid and cellulose: II. esterification [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 132(1): 228-236.
- [15] YAO W, WANG B, YE T, et al. Durable press finishing of cotton fabrics with citric acid: enhancement of whiteness and wrinkle recovery by polyol extenders [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(46): 16118-16127.
- [16] 黄益, 王权威, 孟一丁, 等. 苧麻织物的柠檬酸/多元醇抗皱整理[J]. *纺织学报*, 2017, 38(5): 104-109.
HUANG Yi, WANG Quanwei, MENG Yiding, et al. Anti-crease finishing of ramie fabrics with citric acid and polyol [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(5): 104-109.