

DOI: 10.13475/j.fzxb.20171203806

互穿聚合物网络温敏凝胶对棉织物 液态水分传递的影响

王勃翔^{1,2}, 刘丽¹, 路艳华², 李金华³, 张松¹,
汪刘才¹, 韩思杰¹, 刘禹辰¹

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 辽东学院辽宁省功能纺织材料重点实验室, 辽宁 丹东 118003; 3. 丹东优耐特纺织品有限公司, 辽宁 丹东 118303)

摘要 为使高分子凝胶在纺织品改性中得到更好的应用, 采用互穿聚合物网络(IPN)方法, 制备了一种IPN壳聚糖/聚N-异丙基丙烯酰胺温敏凝胶; 并以戊二醛为交联剂, IPN凝胶为改性剂, 采用二浸二轧法获得改性棉织物, 以提高棉织物的液态水分传递能力。研究了不同质量增加率对改性棉织物的透湿性以及液态水分传递能力的影响。结果表明: IPN凝胶牢固附着在棉纤维表面, 且改性棉织物的低临界溶解温度为34.45℃; 温度高于低临界溶解温度时, 高质量增加率的改性棉织物透湿性显著提高; 改性棉织物对液态水分具有较强的单向传递能力, 高质量增加率的改性棉织物液态水分传递能力较好; IPN凝胶可显著改善棉织物的透湿和液态水分传递能力。

关键词 温敏凝胶; 液态水分传递能力; 互穿聚合物网络; N-异丙基丙烯酰胺; 壳聚糖; 智能纺织品
中图分类号: TS 111.8; TQ 317.9 文献标志码: A

Influence of interpenetrating polymer networks thermosensitive gel on liquid moisture transfer of cotton fabric

WANG Boxiang^{1,2}, LIU Li¹, LU Yanhua², LI Jinhua³, ZHANG Song¹,
WANG Liucan¹, HAN Sijie¹, LIU Yuchen¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Functional Textile Materials, Eastern Liaoning University, Dandong, Liaoning 118003, China; 3. Dandong Unik-Tex Co., Ltd., Dandong, Liaoning 118303, China)

Abstract In order to better apply macromolecule gel in textile modification field, a series of chitosan/poly(N-isopropylacrylamide) gels were synthesized by interpenetrating polymer network (IPN) technology. The cotton fabric was modified with the prepared gels using glutaraldehyde as crosslinking agent by two-dipping-two-padding process to improve the liquid moisture transfer property of cotton fabric. The influence of weight gain ratio on moisture penetrability and liquid moisture transfer capacity of modified cotton fabric was researched in detail. The results indicate that the modified cotton fabric has the low critical solution temperature at 34.45℃ and the IPN gel shows well combination with cotton fiber. The moisture penetrability of modified cotton fabrics with high weight gain ratio are significantly improved when the temperature is higher than low critical solution temperature. Furthermore, the modified cotton fabrics have excellent one-way liquid moisture transfer capacity. The modified cotton fabrics are better in liquid moisture transfer capacity at high weight gain ratio. The moisture penetrability and liquid moisture transfer capacity of cotton fabric are significantly improved by IPN gel modification.

Keywords thermosensitive gel; liquid moisture transfer capacity; interpenetrating polymer network; N-isopropylacrylamide; chitosan; smart fabric

收稿日期: 2017-12-19 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2015AA033905); 辽宁省自然科学基金项目(2016341); 辽东学院青年项目(2017QN010)

第一作者简介: 王勃翔(1989—), 男, 博士生。主要研究方向为智能纺织纤维材料。

通信作者: 刘丽, E-mail: liuli@staff.shu.edu.cn。

棉纤维是一种产量高且应用广泛的天然纤维之一,其织物具有穿着舒适、手感柔软、透气、透湿性优异等特点;与大多数合成纤维相比,棉纤维具有大量的活性基团,可进行改性修饰,使其在服装、纺织、家居领域应用极其广泛^[1-2]。湿热舒适性是服装面料影响人体感觉最重要的因素之一,对纺织品湿热舒适性的研究可有效地了解水气在人体与外界之间的传递情况,尤其是在炎热的夏季,当外界温度较高,人体又大量出汗的情况下,汗液如何能够快速通过服装面料传递到外部显得极为重要,因此纺织品的透湿性能、液态水分传递性能和通透性能是现代服装面料研究中至关重要的部分^[3-4]。

近十年以来,智能聚合物材料受到越来越多的关注和研究。在这些聚合物中,温敏聚合物常被广泛地应用在药物传递、基因传递、组织工程和智能纺织品制造等领域^[5-7]。聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm)是一种研究较为广泛和集中的温敏聚合物;PNIPAAm 相变灵敏,其体积会随着微小的温度变化发生改变,通常这种变化在 32 °C 附近,而此温度称为低临界溶解温度(LCST),因此其在人体生理温度附近具有良好温度响应性^[8-9]。PNIPAAm 对温度具有较高敏感性,故 PNIPAAm 凝胶通常被用来研究智能纺织品^[10-11]。用 PNIPAAm 凝胶对纤维进行改性,可使普通的纤维材料获得特殊的温敏特性和良好的液态水分传递能力。

本文在前期研究^[12]的基础上,首先合成了一种互穿聚合物网络壳聚糖/聚 N-异丙基丙烯酰胺(IPN CS/PNIPAAm)凝胶,然后以 IPN 凝胶作为棉织物的改性整理剂,采用“二浸二轧”工艺对棉织物进行修饰;对改性前后棉织物温敏特性及表面形貌进行表征,并重点研究了 IPN 凝胶对改性棉织物水蒸气透过性和液态水分传递能力的影响,以期为智能纺织品开发开辟新的途径。

1 实验部分

1.1 实验材料

经退浆、煮练和氧漂处理的棉平纹织物(经纬纱线密度均为 18 tex),广东溢达纺织品有限公司;N-异丙基丙烯酰胺(NIPAAm),分析纯(98%,在正己烷中重结晶纯化处理),上海阿拉丁试剂有限公司;N,N-亚甲基双丙烯酰胺(Bis),分析纯,重均相对分子质量为 154.17,上海源叶生物科技有限公司;戊二醛(GA),分析纯(25%),冰醋酸,分析纯,上海国药化学试剂有限公司;壳聚糖(CS),生物纯,脱乙酰度 $\geq 90\%$;过硫酸铵(APS),分析纯,上海国

药化学试剂有限公司;N,N,N,N-四甲基乙二胺(TEMEDA),分析纯,上海国药化学试剂有限公司。

1.2 试样制备

1.2.1 IPN CS/PNIPAAm 凝胶的制备

首先配制质量分数为 2.5% 的 CS 醋酸溶液和 6.5% 的 NIPAAm 水溶液,将 2 种溶液在室温下按一定的质量比在 250 mL 三口瓶中充分混合;通入氮气 30 min 除去氧气;将一定量的 Bis 和 APS 加入到混合液中,待 Bis 和 APS 全部溶解稳定 10 min 后再加入一定量质量分数为 5% 的 TEMEDA 助引发剂溶液;磁力搅拌升温至 40 °C,氮气环境下反应 2~4 h,得到透明凝胶;采用透析膜(截留相对分子质量为 12 000)对凝胶进行提纯;最后将纯净的凝胶配制成 5%~10% 的凝胶液备用。

1.2.2 IPN 凝胶对棉织物的改性方法

实验前先用丙酮、乙醇和去离子水分别洗涤棉织物 3 次,除去生产运输途中附着的杂质;然后在 1% NaOH 溶液中煮沸 2 h,用去离子水洗涤至中性,干燥至恒态质量后在质量分数为 5% 的 GA 溶液中充分浸泡,再分别浸于一定质量分数(5%~10%)的 IPN 凝胶液中;采用二浸二轧(轧余率为 70%~90%)的方法对棉织物进行改性,质量增加率在 5.4%~10.6% 范围内,最后将改性棉织物在干燥箱中 60 °C 下预烘 5 min,于 150 °C 焙烘 3 min。

1.3 测试与表征

1.3.1 形貌观察

采用 Zeiss SIGMA 多功能扫描电子显微镜,观察经 IPN 凝胶改性后棉织物的表面形貌及 IPN 凝胶分布情况。

1.3.2 热性能测试

采用 Mettler-Toledo DSC-822/400 型差示扫描量热仪测试样品的低临界溶解温度。称取约 10 mg 样品置于坩埚中,然后放入差式扫描量热仪中进行测试。测试条件: N₂ 吹扫速率为 20 mL/min,测试样品在 -20 °C 冷冻 5 min,然后以 10 °C/min 升温速率升温至 100 °C。

1.3.3 温敏性测试

根据 FZ/T 01071—2008《纺织品 毛细效应试验方法》在不同温度下,分别测定 5 min 内水在改性棉织物上的毛细上升高度,用来表征改性棉织物的温度敏感性。

1.3.4 透湿性测试

根据 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 1 部分:吸湿法》对普通棉织物与 IPN 凝胶改性棉织物进行透湿性测试。将盛有吸湿

剂的透湿杯用织物试样封口,并放置于 HT001L 型恒温恒湿试验箱(北京环创科学仪器有限公司)中,在一定时间内根据透湿杯质量的变化,计算试样的透湿率和透湿度。

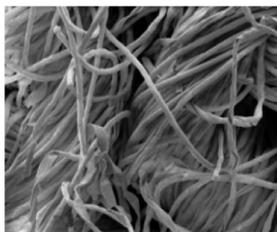
1.3.5 液态水分管理能(MMT)测试

采用 SDL ATLAS 公司(美国) MMT 型液态水分管理仪对棉织物液态水分管理能进行测试。将试样固定于仪器传感器之间,仪器内部将模拟人体汗液的标准溶液输送到试样表面,计算机根据上下传感器的电阻变化得到测试数据。通过该仪器全面、客观地评估织物的三维湿度扩散及液态水转移特征^[14]。

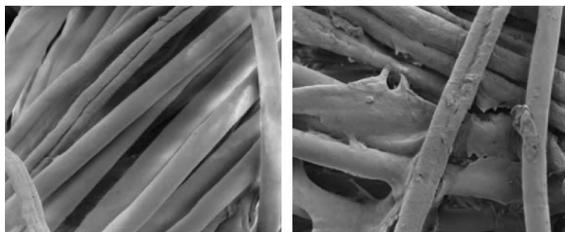
2 结果与讨论

2.1 棉纤维形貌分析

图 1 示出普通棉纤维及 IPN 凝胶改性棉纤维的 SEM 照片。可看到:普通棉纤维表面干净且光滑;改性棉纤维表面变得粗糙,有明显的聚合物,并且聚合物均匀地附着在棉纤维表面,无明显破损,表明 IPN 凝胶与棉纤维结合良好。



(a) 未改性棉纤维(×500)



(b) 未改性棉纤维(×2 000)

(c) 改性棉纤维(×2 000)

图 1 未改性棉纤维与改性棉纤维的 SEM 照片

Fig. 1 SEM images of original cotton fiber and modified cotton fiber. (a) Original cotton fiber(× 500);

(b) Original cotton fiber(× 2 000);

(c) Modified cotton fiber(× 2 000)

IPN 凝胶与棉纤维结合的机制主要是壳聚糖上的氨基(—NH₂)与戊二醛的一个醛基(—CHO)发生缩合反应生成席夫碱,棉纤维上的羟基(—OH)与另一个醛基发生羟醛缩合反应生成不饱和 C=C^[12]。戊二醛的双醛基分别与棉纤维和 IPN 凝胶中的壳聚糖反应,因此,在戊二醛的交联下 IPN 凝胶可均匀并且牢固附着于棉纤维表面。

2.2 棉纤维热力学分析

图 2 示出 IPN 凝胶、IPN 凝胶改性棉纤维和普通棉纤维的热流量与温度关系曲线。DSC 曲线的起始温度和峰值温度两侧切线的交叉点分别为样品的低临界溶解温度。可以看出,IPN 凝胶的低临界溶解温度为 34.08 °C,改性棉纤维的低临界溶解温度为 34.45 °C,普通棉纤维未出现此相变峰。由此可知,改性棉织物的低临界溶解温度在 32 ~ 35 °C 之间,与纯 PNIPAAm 凝胶^[12]和 IPN 凝胶非常接近,并且接近人体体温。由于 IPN 凝胶改性棉织物过程中控制织物的质量增加率在 8.5% 左右,即棉织物上的 IPN 凝胶较少,其溶胀程度比 IPN 凝胶低,脱水吸热量也较少,所以 DSC 吸热峰面积较小,DSC 曲线中改性棉织物的可逆焓变值低于 IPN 水凝胶的可逆焓变值。

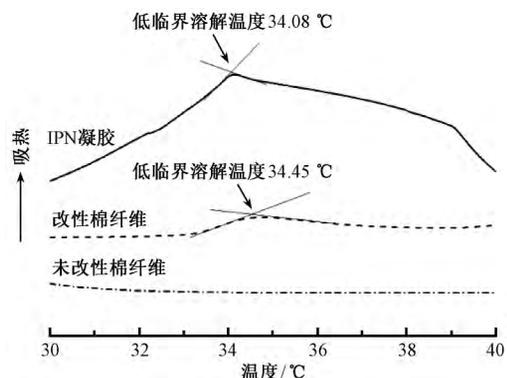


图 2 IPN 凝胶、改性棉纤维和未改性棉纤维的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC thermograms of IPN gel, modified cotton fiber and original cotton fiber

2.3 棉织物温敏性分析

图 3 示出在不同质量增加率情况下,IPN 凝胶改性棉织物在不同温度下的吸水数据。可以看出,未经改性的棉纤维吸水性能优异,随温度的升高,水分子的布朗运动加快,棉织物的芯吸高度逐渐上升。经 IPN 凝胶改性后棉织物的吸水性显然降低。

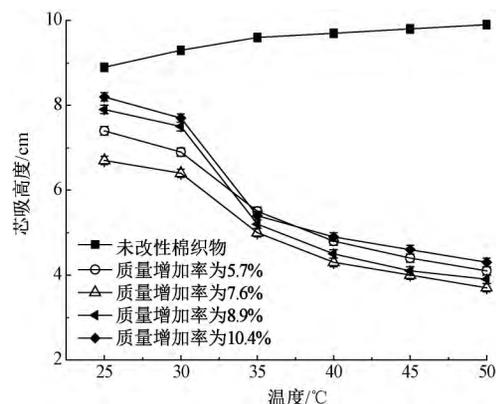


图 3 不同温度下棉织物的芯吸高度

Fig. 3 Wicking heights of cotton fabrics at different temperatures

改性后的棉织物表面一部分—OH 被 IPN 凝胶包裹住,虽 PNIPAAm 中的—CON—有一定的亲水性,但 PNIPAAm 本身的亲水性不及棉织物;当低于低临界溶解温度时,质量增加率高的棉织物具有较高的亲水性,因为大分子凝胶中亲水基团的比例较高,当温度 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,即高于低临界溶解温度,改性棉织物亲水性均大幅下降,高质量增加率的棉纤维下降幅度较大。形成的原因如图 4 所示,当温度低于低临界溶解温度时,水是高聚物的良溶剂,通过氢键作用水被结合在酰胺基上,因此改变了疏水基异丙基之间的相互作用,此时高聚物分子链呈伸展状态,织物具有较好的亲水性;反之,当温度高于低临界溶解温度时,水的热运动加剧,水与酰胺基之间的氢键被破坏,结合水开始游离,此时高聚物中疏水基团异丙基之间的相互作用增强,大分子链呈卷曲状态,此时织物疏水性增强。

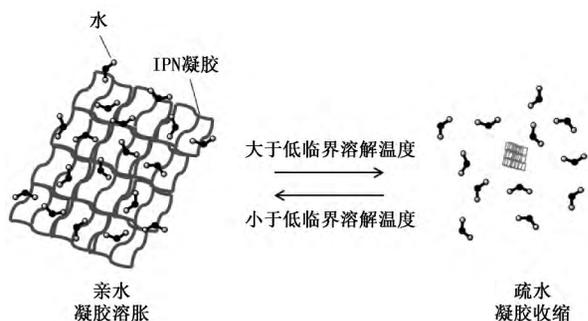


图 4 IPN 凝胶亲/疏水转变

Fig. 4 Transformation between hydrophilicity and hydrophobicity of IPN gel

2.4 凝胶对棉织物液态水分传递的影响

2.4.1 棉织物的透湿性

表 1 示出在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对湿度为 50% (模拟普通环境) 条件下 IPN 凝胶改性前后棉织物的透湿数据。可以看出,在常规环境下,改性棉织物的透湿率和透湿度均低于未改性棉织物,且随质量增加率的增加,改性棉织物的透湿性逐渐下降。

表 1 普通环境下棉织物的透湿性

Tab. 1 Moisture permeability of cotton fabric in normal environment

织物编号	透湿率 / $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})^{-1})$	透湿度 / $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{h})^{-1})$
O ₁	2 372	398
G ₁	2 094	351
G ₂	1 989	314
G ₃	1 762	277
G ₄	1 739	264

注:温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对湿度为 50%。O₁ 为原始普通棉织物;G₁、G₂、G₃、G₄ 分别为质量增加率等于 5.7%、7.6%、8.9%、10.4% 的 IPN 凝胶改性棉织物(下同)。

棉织物改性后,IPN 水凝胶在织物表面形成连续的致密膜,因此棉织物的透湿性能由该凝胶膜决定。在常规环境下,改性后的棉织物表面存在较多的亲水基团(如 CS 的羟基、氨基和 PNIPAAm 中的酰胺基团),凝胶呈亲水状态,凝胶膜在潮湿环境中遇湿溶胀,孔道封闭,一部分水气分子被凝胶吸收(如图 5 所示),因此透湿性较未改性棉织物要低。随改性棉织物质量增加率的增加,棉织物表面凝胶膜厚度增加,棉织物孔道被凝胶堵塞,水气分子透过棉织物越来越困难,因此透湿性下降。

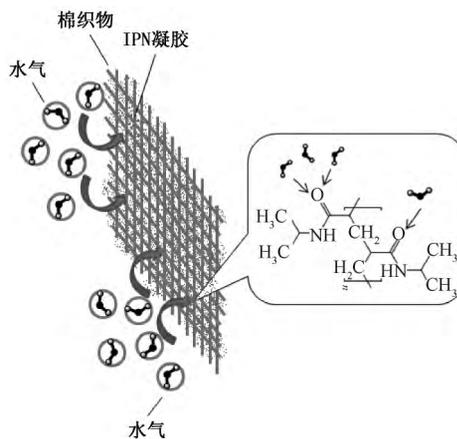


图 5 温度在低临界溶解温度以下时水蒸气在棉织物上的传递过程

Fig. 5 Transfer process between moisture and cotton fabric below LCST

表 2 示出在 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对湿度为 90% (模拟极端环境) 条件下改性前后棉织物的透湿数据。可以看出,在极端环境下,IPN 凝胶改性棉织物的透湿率和透湿度均高于普通棉织物,且随着质量增加率的增加,改性棉织物的透湿性能逐渐提高。

表 2 极端环境下棉织物的透湿性

Tab. 2 Moisture permeability of cotton fabric in extreme environment

织物编号	透湿率 / $(\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot 24\text{ h})^{-1})$	透湿度 / $(\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{h})^{-1})$
O ₁	11.440	2.086
G ₁	12.615	2.116
G ₂	12.793	2.121
G ₃	12.838	21.26
G ₄	13.042	21.44

注:温度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对湿度为 90%。

当环境温度高于低临界溶解温度,即超过人体体温($36.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,凝胶呈疏水状态,链段热运动加剧,此时凝胶体积的剧烈收缩产生暂时的缝隙,即膜的自由体积,而自由体积增加导致棉纤维间孔隙增大(如图 6 所示),因此透过的水气分子较多,透湿性提高。

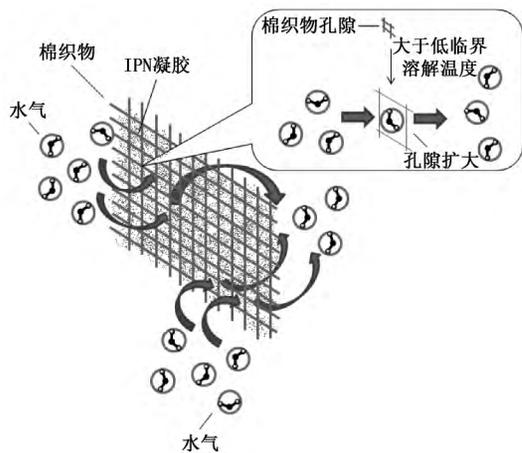


图 6 温度在低临界溶解温度以上时水蒸气在棉织物上的传递过程

Fig. 6 Transfer process between moisture and cotton fabric above LCST

棉织物经 IPN 凝胶改性整理后,可响应环境温度的变化来调节其水蒸气透过速率,因此,改性棉织物作为贴身面料制造成衣时,较高的环境温度有利于汗液蒸发排出,可改善服装的湿热舒适性。

2.4.2 棉织物的液态水分传递性

表 3 示出棉织物的浸湿时间与吸水速度。可以看出:改性前后棉织物表层浸湿时间相近,但经 IPN 凝胶改性后的棉织物底层浸湿时间变快,由原来 7.769 s(5~19 s 为中速)加快到 3 s 以内(<3 s 为急速);改性后的棉织物表层吸水速度也高于未改性棉织物。可见,未改性的棉织物表层浸湿后,汗液不能很快地传递到底层,而经 IPN 凝胶改性后的棉织物汗液快速地从表层传递到底层,吸水速率较快,说明改性后棉织物的液态水分传递性得到明显提高。这主要是因为,在常温下 IPN 凝胶大分子链呈伸展状态,亲水性较强,附着在棉织物表面为水分传递提供很好的媒介,使棉织物与水分接触时表面可很快地浸湿。

表 3 棉织物的浸湿时间与吸水速度

Tab. 3 Wetting time and absorption rate of cotton fabric

织物编号	浸湿时间/s		吸水速度/(%·s ⁻¹)	
	表层	底层	表层	底层
O ₁	1.037	7.769	3.084	3.144
G ₁	1.965	2.527	15.582	6.388
G ₂	1.875	2.798	15.837	7.451
G ₃	1.597	2.336	15.643	7.239
G ₄	1.631	2.287	15.437	7.384

表 4 示出棉织物最大浸湿半径和液态水分扩散速度。可以看出:经 IPN 凝胶改性后的棉织物最大吸水半径由原来的 7 mm(0~7 mm 为非湿润)增大到 20 mm(18~22 mm 为大部分湿润);液态水分扩

散速度由慢速(1.0~1.9 mm/s)变为中速(2.0~2.9 mm/s);随棉织物质量增加率的增加,棉织物液态水分扩散速度加快(3.0~4.0 mm/s)。这主要是因为 IPN 凝胶的密度较小,改性后棉织物表面附着一层凝胶薄膜,使得液态水分在织物表面扩散的阻力变小,较易进行扩散,因此,当人体显著出汗时,改性棉织物可较快地将人体与织物接触表面的汗液吸收并传递到外侧。

表 4 棉织物最大浸湿半径和液态水分扩散速度

Tab. 4 Maximum wetted radius and diffusion speed of cotton fabric

织物编号	最大浸湿半径/mm		液态水分扩散速度/(mm·s ⁻¹)	
	表层	底层	表层	底层
O ₁	7	7	1.293	1.096
G ₁	20	20	2.885	2.474
G ₂	20	20	3.125	2.896
G ₃	20	20	3.174	2.887
G ₄	20	20	3.192	2.949

表 5 示出棉织物累积单向传递能力和液态水分管理管理能力。可以看出,改性棉织物液态水分单向传递能力(>400%为极好)优异。根据 AATCC 195—2012《纺织面料液体水分管理属性》,改性棉织物具有很好的液态水分管理管理能力(0.60%~0.80%为 4 级,非常好;>0.80%为 5 级,极好),因此,IPN 凝胶改性棉织物具有优异的液态水分传递能力,可改善人体与外界水分传递性能。

表 5 棉织物累积单向传递能力和液态水分管理管理能力

Tab. 5 Accumulative one-way liquid transport and moisture management capacity of cotton fabric

织物编号	累积单向传递能力/%	液态水分管理管理能力	AATCC 等级
O ₁	397.309	0.55	2(普通)
G ₁	577.288	0.74	4(非常好)
G ₂	581.637	0.74	4(非常好)
G ₃	588.848	0.76	4(非常好)
G ₄	592.731	0.79	4(非常好)

3 结 论

1) 互穿聚合物网络壳聚糖/聚 N-异丙基丙烯酰胺(IPN CS/PNIPAAm)凝胶改性棉织物,在戊二醛交联下 IPN 凝胶均匀且牢固附着于棉纤维表面,改性棉织物具有和 IPN 凝胶相同的温敏特性,其低临界溶解温度为 34.45℃。

2) 当温度低于低临界溶解温度时,改性棉织物透湿性下降;当温度高于低临界溶解温度时,棉织物透湿性提高。这说明改性棉织物作为贴身面料时,在较高温度条件下,有利于人体汗液蒸发排出。

3) 改性棉织物的单向传递能力较强,具有优异的液态水分传递能力; IPN 凝胶可显著提高棉织物液态水分传递能力。 FZXB

参考文献:

- [1] 刘今强,张芳,邵建中,等. 棉纤维的 N-异丙基丙烯酸酰胺接枝共聚及产物的温敏性研究 [J]. 高分子学报, 2009(12): 1266 - 1273.
LIU Jinqiang, ZHANG Fang, SHAO Jianzhong, et al. Preparation of PNIPAAm grafted cotton and its thermal sensitivity [J]. Acta Polymerica Sinica, 2009(12): 1266 - 1273.
- [2] 张严,李永强,邵建中,等. 氦等离子体接枝聚合棉织物的疏水改性 [J]. 纺织学报, 2016, 37(7): 99 - 103.
ZHANG Yan, LI Yongqiang, SHAO Jianzhong, et al. Hydrophobic modification of cotton fabric by helium low temperature plasma induced graft polymerization [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(7): 99 - 103.
- [3] 胡淑芬,王越平,王永进,等. 麻针织物的湿舒适性分析 [J]. 上海纺织科技, 2014(9): 50 - 54
HU Shufen, WANG Yueping, WANG Yongjin, et al. Analysis of wet comfortability of ramie knitted fabric [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2014(9): 50 - 54.
- [4] 王干,张佩华. 凉感尼龙长丝针织物热湿舒适性能测试与分析 [J]. 国际纺织导报, 2015, 43(2): 38 - 40.
WANG Gan, ZHANG Peihua. Measurement and analysis of the heat-moisture comfort properties of cool polyamide filament knitted fabric [J]. Melland China, 2015, 43(2): 38 - 40.
- [5] CHEN T, FANG Q, ZHONG Q, et al. Synthesis and thermosensitive behavior of polyacrylamide copolymers and their applications in smart textiles [J]. Polymers, 2015(7): 909 - 920.
- [6] HYUN H, PARK S H, KWON D Y, et al. Thermo-responsive injectable mPEG-polyester diblock copolymers for sustained drug release [J]. Polymers, 2014(6): 2670 - 2683.
- [7] WARD M A, GEORGIU T K. Thermoresponsive polymers for biomedical applications [J]. Polymers, 2011(3): 1215 - 1242.
- [8] GALLAGHER S, FLOREA L, FRASER K J, et al. Swelling and shrinking properties of thermo-responsive polymeric ionic liquid hydrogels with embedded linear PNIPAAm [J]. International Journal of Molecular Science, 2014(15): 5337 - 5349.
- [9] HUANG J, HUANG Z M, BAO Y. Z, et al. Thermosensitive poly (N-isopropylacrylamide-co-acrylonitrile) hydrogels with rapid response [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2006, 14: 87 - 92.
- [10] AUDREY T, NATHALIE D G, DRAGAN J, et al. Incorporation of poly (N-isopropylacrylamide) /chitosan microgel onto plasma functionalized cotton fiber surface [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 352: 126 - 135.
- [11] LÜ J C, ZHOU Q Q, LIU G L, et al. Preparation and properties of polyester fabrics grafted with O-carboxymethyl chitosan [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 344 - 352.
- [12] WANG B X, WU X L, LI J, et al. Thermosensitive behavior and antibacterial activity of cotton fabric modified with a chitosan-poly (N-isopropylacrylamide) interpenetrating polymer network hydrogel [J]. Polymers, 2016, 8(4): 110 - 120.
- [13] 吴海燕,张云,谢红. 不同类型防水透湿织物的液态水分管理能能力 [J]. 纺织学报, 2011, 32(1): 34 - 40.
WU Haiyan, ZHANG Yun, XIE Hong. Moisture management ability of waterproof breathable fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(1): 34 - 40.