

基于柔性传感技术的压力监测运动裤设计

金佳勤, 于淼*, 王侠, 张春明, 孙亚宁

(青岛大学 纺织服装学院, 山东 青岛 266071)

摘要:为了满足人体运动需求,基于面料性能测试结果以及服装人体工效学分析,对运动裤款式结构进行优化设计;并于紧身运动裤中置入一款自行设计的柔性压力传感器,在提高穿着舒适度和缓解疲劳的同时,实现膝关节受力情况的实时监测,及时发现并调整不正确的运动姿势,更好地保护膝关节。该运动裤可结合步态分析系统,对运动姿势进行分析,从而降低运动损伤风险,提高运动成绩,实现人体生理健康参数的实时监测与传输。

关键词: 柔性传感器;膝关节;智能运动裤;设计优化;实时监测;服装压力

中图分类号: TS 941.734; TP 212 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2022)03-0202-07

Design of Pressure Monitoring Sports Pants Based on Flexible Sensing Technology

JIN Jiaqin, YU Miao*, WANG Xia, ZHANG Chunming, SUN Yaning

(College of Textiles and Clothing, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to meet the needs of human exercise, the style structure of sports pants was optimized based on the fabric performance test results and the ergonomic analysis of clothing, and a self-designed flexible pressure sensor was placed in the tights to improve wearing comfort and relieve fatigue. Meanwhile, real-time monitoring of the knee joint force was realized, and incorrect movement postures could be detected and adjusted in time to better protect the knee joint. The sports pants can be combined with a gait analysis system to analyze sports postures, thereby reducing the risk of sports injuries, improving sports performance, and realizing human physiological health parameters and real-time monitoring and transmission.

Key words: flexible sensors, knee joints, smart sweatpants, design optimization, real-time monitoring, clothing pressure

跑步是一项周期性有氧运动,由于跑步时长时间重复同一动作,极易造成膝关节的过度使用性损伤^[1-4]。为了减少运动损伤,科研人员潜心于各种紧身型运动裤的开发。随着人工智能技术的发展,以柔性压力传感器为代表的可穿戴设备已成为健康监测领域的研究热点。压阻式压力传感器具有种类丰富、器件单一、导出机制简单、能耗低等特点,是目前最受欢迎的压力传感器之一^[5]。现阶段针对紧身运动服的研究集中于人体压力舒适性、服

装压对人体生理机能的影响以及服装压的影响因子等方面^[6-7],将智能可穿戴技术与紧身运动服相结合,对服装压进行实时监测的研究较少^[8]。

文中结合现有技术和市场需求,将柔软性、延展性、轻便性、安全性、功能性和可拆卸性作为膝关节压力监测运动裤的设计目标,使运动裤在满足膝关节运动要求的同时,实现对膝关节立体受力情况的实时监测,以期在自身健康监测、远程医疗诊断及康复检测方面取得更好的效果^[9]。

收稿日期:2021-10-13; 修订日期:2021-11-27。

基金项目:国家自然科学基金项目(52073151);山东省自然科学基金项目(ZR2019PEE022);中国纺织工业联合会科技指导性项目(2018078)。

作者简介:金佳勤(1997—),女,硕士研究生。

*通信作者:于淼(1984—),女,讲师,硕士生导师。主要研究方向为服装舒适性及功能服装、智能纺织品与服装。

Email:yumiao_qd@126.com

1 实验部分

1.1 材料

1.1.1 原料 经编弹性针织面料(1[#],2[#]),广州偉卓布行有限公司提供;Coolmax® 纤维针织面料,美国杜邦公司生产。面料规格参数见表1。

表1 面料规格
Tab.1 Fabric specifications

面料	成分	厚度/mm	面密度/(g/m ²)	颜色
1 [#]	m(锦纶):m(氨纶)=86:14	0.487	218.76	浅灰
2 [#]	m(涤纶):m(氨纶)=88:12	0.297	165.34	黑
Coolmax	m(棉):m(涤纶):m(氨纶)=45:45:10	0.287	140.00	灰

1.2 方法

1.2.1 热湿舒适性测试 根据 GB/T 11048—2018《纺织品生理舒适性稳态条件下热阻和湿阻的测定(蒸发热板法)》^[10],采用织物保温仪测试面料(1[#],2[#])的传导系数。每组实验测3次,取平均值(下同)。实验环境:温度(25±5)℃,相对湿度(65±5)%,静置24 h。

参照 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》^[11],采用透气量仪对面料(1[#],2[#])的透气性进行测试;依据 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第1部分:吸湿法》^[12],采用织物透湿量仪对面料(1[#],2[#])的透湿率进行测试。实验环境:温度(25±5)℃,相对湿度(65±5)%。

1.2.2 接触舒适性能测试 运用织物风格仪测试面料(1[#],2[#])的弯曲刚度、弯曲滞后矩、动摩擦平均系数、摩擦系数平均偏差、表面粗糙度。实验环境:温度(25±5)℃,相对湿度(65±5)%。

1.2.3 拉伸弹性性能测试 参照 ASTM D3107—2007《弹力纱机织物拉伸性能的标准试验方法》^[13],

表3 面料接触舒适性测试结果

Tab.3 Test results of fabric contact comfort

面料	弯曲刚度/(cN·cm ²)		弯曲滞后矩/(cN·cm)		平均动摩擦系数		平均摩擦系数偏差		表面粗糙度/μm	
	经	纬	经	纬	经	纬	经	纬	经	纬
1 [#]	0.019	0.011	0.026	0.075	0.149	0.236	0.004	0.072	2.060	8.950
2 [#]	0.012	0.010	0.047	0.078	0.134	0.170	0.008	0.007	1.885	2.620

由表3可以看出,两种面料的弯曲滞后矩均较低,产生弯曲变形后易恢复,而面料2[#]的抗弯刚度更低,手感更佳,适合作为样裤的主体面料。两种面料经向的摩擦系数和粗糙度比纬向的小,其中面料1[#]表面更为粗糙,适合局部配伍,以减少与下肢的接触面积。

1.3.3 拉伸弹性性能 面料的拉伸弹性性能测试结果见表4。

1.1.2 仪器 YG(B)606G型纺织品热阻和湿阻测试仪,温州大荣纺织仪器有限公司制造;YG461E-III型全自动透气量仪,宁波纺织仪器厂制造;YG(B)216-II型织物透湿量仪,温州际高检测仪器有限公司制造;KES-F织物风格仪,上海罗中科技发展有限公司制造;YG065H-250型电子织物强力仪,莱州电子仪器有限公司制造。

采用织物强力仪对面料(1[#],2[#])的伸长率和形变率进行测试。实验环境:温度(25±5)℃,相对湿度(65±5)%。

1.3 结果与讨论

1.3.1 热湿舒适性 面料的热湿舒适性测试结果见表2。

表2 面料热湿舒适性测试结果

Tab.2 Test results of fabric thermal wet comfort

面料	热阻/ [(m ² ·K)/W]	透气率/ (mm/s)	透湿率/ [g/(m ² ·d)]
1 [#]	0.026	871.99	3 945
2 [#]	0.019	1 283.07	4 656

由表2可以看出,面料2[#]热阻值比1[#]的小,说明面料2[#]热传递效率高,且其透气率、透湿率比1[#]大。因此,面料2[#]热湿舒适性更好,能够满足人体在正常运动强度下的透气、透湿及散热等需求,适合作为运动裤的主面料。

1.3.2 接触舒适性 面料的接触舒适性测试结果见表3。

表4 面料拉伸弹性性能测试结果

Tab.4 Test results of tensile and elastic properties of fabrics

面料	定负荷伸长率		定负荷急弹性变形率	
	经向	纬向	经向	纬向
1 [#]	106.2	104.8	12.4	8.6
2 [#]	163.5	125.7	8.2	7.0

文中根据膝关节损伤情况及疼痛发生区域分布进行膝关节柔性压力监测传感器设计,具体如图 3 所示。膝关节柔性压力监测传感器及其内部的压力监测元件设计和制作均自行完成。

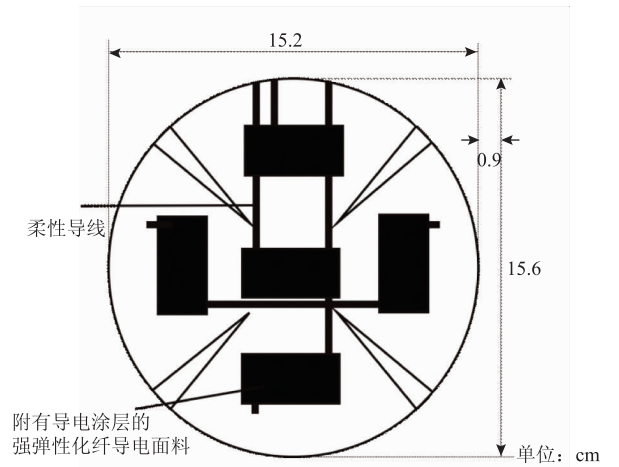


图 3 膝关节柔性压力监测传感器示意
Fig. 3 Schematic diagram of flexible pressure monitoring sensor for knee joint

压力监测元件以强弹性化纤面料为基底,保证监测元件的延展性,表面涂覆纳米级的导电涂层(导电涂层厚度由电脑根据膝关节压力值范围模拟计算所得)。

柔性导体置于化纤面料和压力监测元件之间,以“+”字设计将柔性导体的所有监测元件连接起来,每一块压力监测元件下方有两根柔性导线,一根连接外部线路,一根连接其他压力监测元件。压力监测元件下柔性导体排列如图 4 所示。图 4 中置于压力监测元件下的柔性导体以两个交叉的“F”形排列,监测元件与柔性导体充分接触以确保所测压力数据准确。

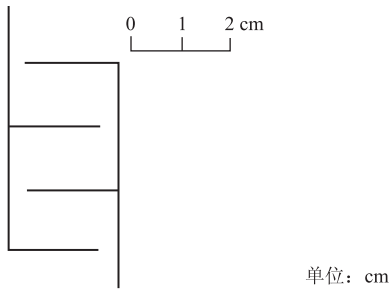


图 4 压力监测元件下柔性导体排列示意
Fig. 4 Schematic diagram of flexible conductor arrangement under pressure monitoring element

柔性导体和压力监测元件均固定于长直径为 15.6 cm、短直径为 15.2 cm 的椭圆形化纤面料之上,化纤面料、压力监测元件和柔性导体共同构成膝关节柔性压力监测传感器。椭圆形化纤面料上

均匀设有 4 个长 5 cm、宽 0.9 cm 的省道,以提升膝关节柔性压力监测传感器的贴体度,减小测量误差。

2.2.2 微控制元件 微控制元件包含具有 16 KB ~ 1 MB Flash、多种控制外设、USB 全速接口和 CAN 的微控制器 STM32F103 以及 4 cm × 6 cm 的 22402A-18 电路板,通过上下焊接方式组合在一起。微型控制元件利用柔性导线与传感元件相连接,为传感器提供驱动电阻的同时,接收、放大传感器所感知的外界压力,并将传感器内部产生的电阻信号转换成可被电脑识别的数字信号,传输到电脑终端,最后完成压力数值的实时记录与导出。

自行设计运动裤两条,一条运动裤内贴袋中放置膝关节柔性压力监测传感器,另一条作为参照组。

3 样裤性能测试和评价

3.1 实验对象

选取 6 名年龄为(24 ± 2)岁、身体健康、有跑步运动经历且无膝关节损伤的女大学生作为实验对象,其腿型相似,平时均穿 M 码裤子。受试者具体信息见表 5。

表 5 受试者基本信息
Tab. 5 Basic information of the subjects

编号	身高/cm	体质量/kg	年龄/岁
1	165	55	25
2	168	50	26
3	163	54	25
4	161	48	25
5	170	53	24
6	160	45	25

3.2 实验仪器

膝关节柔性压力监测传感器,自制;气囊式接触压力测试仪,北京力泰友联科技有限公司制造;Moxy 近红外光实时无线无创肌氧监测仪,世纪天鸿国际集团股份有限公司制造;MSR145W 温湿度传感器,广州虹科电子科技有限公司制造。

3.3 实验方法

3.3.1 压力测试 采用气囊式接触压力测试仪和膝关节柔性压力监测传感器对穿着样裤受试者的膝关节压力进行测试。实验环境:温度(25 ± 5)℃,相对湿度(65 ± 5)%。

3.3.2 肌氧测试 采用近红外光实时无线无创肌氧监测仪对受试者穿着样衣运动过程中腓肠肌、股内侧肌、股外侧肌的肌氧饱和度和总血红蛋白变化情况进行监测。实验环境:温度(25 ± 5)℃,相对湿度(65 ± 5)%。

3.3.3 热湿度测试 采用温湿度传感器对受试者

穿着样裤运动过程中腓肠肌、股内侧肌、股外侧肌的温度变化情况进行监测。实验环境:温度(25 ± 5) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度(65 ± 5)%。

3.4 效果评估

3.4.1 压力评估 为了检验膝关节柔性压力监测传感器测试数据的准确性,在受试者穿着样裤静止站立状态下^[9],分别采用气囊式接触压力测试仪和膝关节柔性压力监测传感器对膝关节 5 个监测点进行压力测试,记为方法 1 和方法 2,具体结果见表 6。

表 6 静止站立时膝关节压力测试结果比较
Tab. 6 Comparison of knee joint pressure test results when standing still

测试点	方法 1		方法 2	
	右膝	左膝	右膝	左膝
A	0.83	0.81	0.91	0.89
B	0.57	0.51	0.65	0.61
C	0.53	0.56	0.63	0.64
D	0.61	0.63	0.69	0.72
E	0.57	0.59	0.64	0.68

表 7 左右膝关节受压独立样本 *t* 检验输出结果
Tab. 7 Output results of *T*-test of independent samples of left and right knee joint compression

项目	假设方差	Levene 检验		<i>T</i> 检验					
		<i>F</i>	Sig.	<i>t</i>	<i>v</i>	Sig.	均值差	标准误差	95% 置信区间
右膝压力	相等	0.038	0.846	-0.067	48.000	0.947	-0.040 40	0.601 85	-1.250 49 ~ 1.169 69
	不等			-0.067	47.962	0.947	-0.040 40	0.601 85	-1.250 52 ~ 1.169 72
左膝压力	相等			-0.130	48.000	0.897	-0.084 40	0.647 25	-1.385 79 ~ 1.216 99
	不等	0.013	0.993	-0.130	48.000	0.897	-0.084 40	0.647 25	-1.385 79 ~ 1.216 99

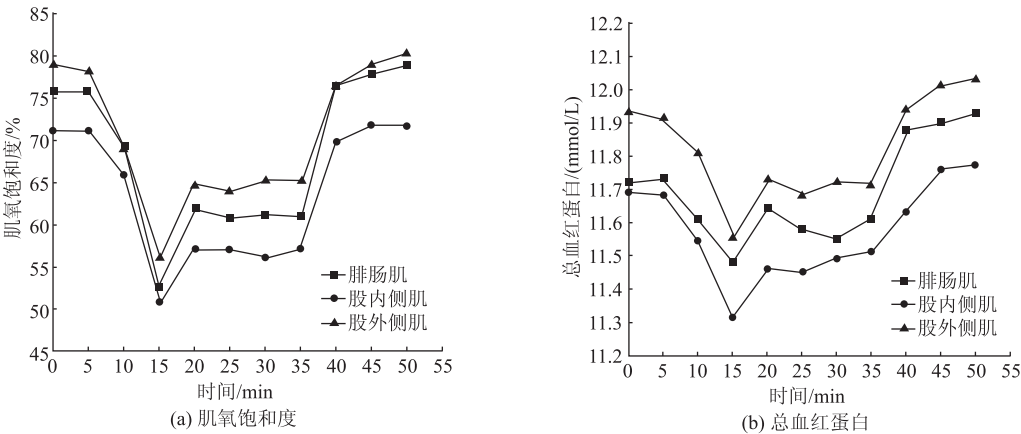


图 5 肌氧测试结果
Fig. 5 Muscle oxygen test results

由图 5 可以看出,肌氧饱和度和总血红蛋白的曲线变化趋势相似,监测的 3 个部位的曲线变化趋势也相似。前 15 min,血氧饱和度和总血红蛋白随着跑步速度的增加而减少;15 min 时,其值下降到

最低;15 ~ 40 min,随着时间的推移,又逐渐回升至相对稳定状态;后 10 min,逐步恢复到稳定水平。这是由于前期加速,肌肉突然收缩,血管受到压迫,肌肉血流量减少,肌氧饱和度和总血红蛋白降低;随着运动状态的稳定,人体逐渐适应,各器官重新分配血流量,肌氧饱和度和总血红蛋白恢复至稳定水平;恢复期其含量均高于初始水平,说明运动裤具有一定的缓解肌肉疲劳的作用^[14]。

3.4.3 温湿度评估 受试者穿着样裤运动过程中热湿测试结果如图 6 所示。

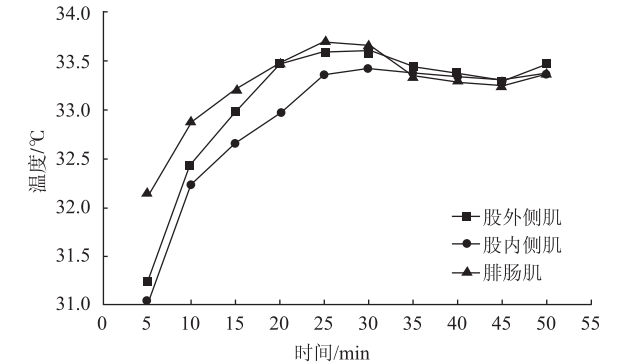


图 6 平均体表温度变化

Fig. 6 Average body surface temperature variation graph

由图 6 可以看出,在跑步过程中,3 个区域的肌肉温度变化较平稳,维持在 31 ~ 34 ℃ 之间,人体的热感觉舒适性较好,没有出现突然升温或降温的现象。前 25 min,随着运动负荷和人体代谢活动的增强,人体心率逐渐加快,产热增加,毛细血管扩张^[17],体温有所增加;25 min 后,人体适应运动强度,其内循环稳定,人体产热和出汗率保持相对稳定,体温也应保持相对稳定,但此处数据显示体温有所下降,说明运动裤透湿排湿性能良好,吸收体表部分热量,达到降温作用。

3.4.4 主观评估 文中运用 5 等分量表对样裤进行主观评价。-2 代表差,-1 代表较差,0 代表一般,1 代表较好,2 代表好^[9]。

在跑步测试方案结束后,对受试者穿着样裤的自身真实舒适感受进行问卷调查,具体包括束缚感、闷热感、黏体感、潮湿感、柔软感、压迫感、运动便利性以及综合穿着舒适感等指标,评价并打出相应分值,取平均值。样裤的主观舒适性评估分析结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,样裤满足人体基本穿着舒适性要求。静止站立时的穿着舒适性最好(跑步前大于跑步后),其次是开始跑步的第 2 阶段,再次是递减负荷的第 4 阶段,最后才是递增负荷的第 3 阶段。第 2 阶段,运动裤产生形变使服装压增大,束缚感、

压迫感增加;第 3 阶段,随着运动强度的增加,运动裤产生的服装压增大,束缚感和压迫感增加更为明显;第 4 阶段,运动强度逐渐减弱,压迫感减弱明显,但运动时间长,闷热感增加明显。随着运动强度和时间的增加,人体新陈代谢加快,会有大量汗液排出,导致闷热感、潮湿感、黏体感等增加,尤其在第 3 阶段和第 4 阶段,随着运动强度和时间的增加,舒适性不断下降;在整个实验过程,样裤的运动便利性始终良好。运动过程中,样裤客观评价结果均保持在 1.5 评分以上,整体舒适性稳定,变化小,说明样裤的款式结构设计较合理。

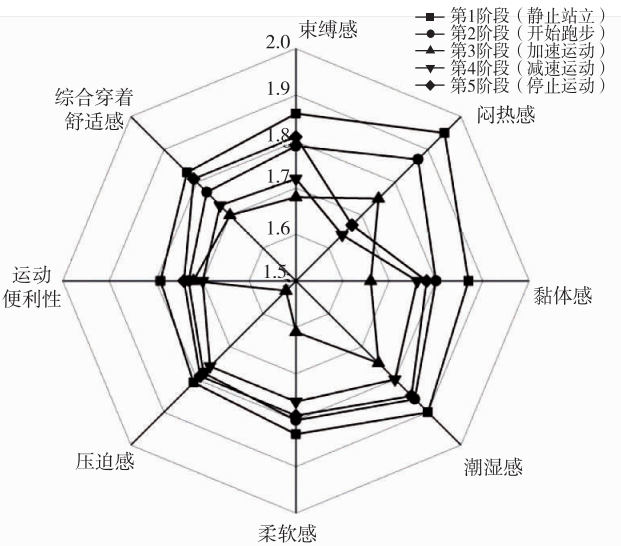


图 7 主观评估结果

Fig. 7 Subjective assessment result

4 结 语

随着跑步运动的兴起与流行,消费者对紧身运动服的需求逐渐提升,在满足基本穿着功能的同时期望获取更多的附加功能。文中设计的智能运动裤能够有效地获取膝关节压力值,结合步态分析系统,判断运动姿势的准确性,通过反馈的数据及时调整训练计划,改变运动方式,降低损伤风险;将监测元件微型化并与服装有效的结合,实现人体生理健康参数的实时监测与传输。

参考文献:

[1] VAN M W. Running injuries. a review of the epidemiological literature[J]. Sports Medicine, 1992, 14 (5) : 320-335.

[2] 阎玉秀,高智英,金子敏,等. 跑步运动中护膝压迫对女子膝关节角度影响[J]. 丝绸, 2018, 55(8) : 47-51.

YAN Yuxiu, GAO Zhiying, JIN Zimin, et al. Protection effect of kneepad compression on knee joint in running

- [J]. Journal of Silk, 2018, 55(8): 47-51. (in Chinese)
- [3] 谢彦彤, 赵一瑾, 黄国志, 等. 跑步运动中触地模式对跟腱生物力学影响的研究进展[J]. 医学综述, 2019, 25(17): 3442-3446.
- XIE Yantong, ZHAO Yijin, HUANG Guozhi, et al. Research advances in effects of foot touchdown patterns on biomechanics of Achilles tendon in running[J]. Medical Recapitulate, 2019, 25(17): 3442-3446. (in Chinese)
- [4] 王嘉瑛, 李令岭, 马梁, 等. 跑步爱好者运动损伤的调查与分析[J]. 昆明医科大学学报, 2020, 41(1): 151-157.
- WANG Jiaying, LI Lingling, MA Liang, et al. Investigation and analysis of sports injuries of runners[J]. Journal of Kunming Medical University, 2020, 41(1): 151-157. (in Chinese)
- [5] 韩志清, 杨晓红, 邱昀梵, 等. 柔性压力传感器在智能纺织品中的应用[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(4): 79-84.
- HAN Zhiqing, YANG Xiaohong, QIU Yunfan, et al. Application of flexible pressure sensor in intelligent textiles[J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(4): 79-84. (in Chinese)
- [6] 金子敏, 于施佳, 阎玉秀. 青年女性上体无缝内衣的压力舒适性[J]. 纺织学报, 2010, 31(2): 85-89.
- JIN Zimin, YU Shijia, YAN Yuxiu. Pressure comfort of seamless underwear for young women's upper body[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(2): 85-89. (in Chinese)
- [7] 陈晓娜, 吴昕穗, 朱琳玥. 裤装压力对跑步运动中女性大腿疲劳的影响[J]. 毛纺科技, 2019, 47(6): 75-81.
- CHEN Xiaona, WU Xinsui, ZHU Linyue. Influence of trousers pressure on female thigh fatigue during running [J]. Wool Textile Journal, 2019, 47(6): 75-81. (in Chinese)
- [8] AL MAHMUD A, WICKRAMARATHNE T I, KUYS B. Effects of smart garments on the well-being of athletes: a scoping review protocol[J]. BMJ Open, 2020, 10(11): 1-4.
- [9] 王侠. 基于柔性传感的膝关节受力监测运动裤设计与机理[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品生理舒适性稳态条件下热阻和湿阻的测定(蒸发热板法): GB/T 11048—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [11] 国家技术监督局. 纺织品织物透气性的测定: GB/T 5453—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品织物透湿性试验方法 第1部分吸湿法: GB/T 12704. 1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 美国材料与试验协会. 弹力纱机织物拉伸性能的标准试验方法: ASTM D3107—2007[S]. 美国: [s. n.], 2011.
- [14] LI M, ZHANG W Y. Hierarchical cluster analysis on coolmax/cotton double-faced effect knitted fabric's subjective sensations in different sports conditions[C]// 2008 International Symposium on Information Science and Engineering. Shanghai: IEEE, 2008: 622-625.
- [15] ZHANG Z H, TANG X N, LI J, et al. The effect of dynamic friction with wet fabrics on skin wetness perception[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2020, 26(2): 370-383.
- [16] 袁菁红. 基于裤装结构与人体下肢运动适应关系的研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2004.
- [17] 刘红, 陈东生, 魏取福. 服装压力对人体生理的影响及其客观测试[J]. 纺织学报, 2010, 31(3): 138-142.
- LIU Hong, CHEN Dongsheng, WEI Qufu. Effect of clothing pressure on human physiology and objective testing[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(3): 138-142. (in Chinese)

(责任编辑: 邢宝妹)

(上接第201页)

- [20] 隋倩. 导湿排汗针织面料的开发与性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [21] 王丽莎, 马晓红, 孟花, 等. 基于灰色关联模型的针织物热湿舒适性分析与预测[J]. 毛纺科技, 2020, 48(5): 82-86.
- WANG Lisha, MA Xiaohong, MENG Hua, et al. Analysis and prediction of thermal and moisture comfort of knitted fabrics based on grey correlation model[J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(5): 82-86. (in Chinese)
- [22] 吕聪. 织物热湿舒适性评价[D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- [23] 吴国辉. 针织T恤衫透湿性能影响因素的灰色关联分析[J]. 毛纺科技, 2018, 46(5): 15-19.
- WU Guohui. Grey correlation analysis of the factors influencing moisture permeability of T-shirt[J]. Wool Textile Journal, 2018, 46(5): 15-19. (in Chinese)
- [24] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.
- [25] 方方, 杨素云, 陈玉娥. 无缝针织运动面料服用性能评价[J]. 针织工业, 2015(8): 29-32.
- FANG Fang, YANG Suyun, CHEN Yú'e. An evaluation on the wearing properties of seamless knitted sportswear fabric[J]. Knitting Industries, 2015(8): 29-32. (in Chinese)

(责任编辑: 张雪)