

# 膝关节角度变化对压力梯度分布和皮肤形变的影响

方琦, 孙光武, 陈郁\*

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201600)

**摘要:**为研究膝关节在不同角度下对压力袜的压力梯度分布和皮肤形变产生的影响,实验采用FlexiForce 柔性薄膜传感器测量女性穿着长筒压力袜在站立和平躺姿势下4个膝关节角度的压力分布。同时,手工测量相应姿势下未穿和穿着压力袜的腿部6个围度尺寸,利用等效周长计算腿部皮肤的形变量。结果表明:站立或平躺姿势下,随膝关节角度变化压力梯度分布也随之改变;膝关节角度相同时,站立姿势的压力平均值大于平躺姿势的均值;腿部皮肤形变量由下而上呈增加趋势,平躺姿势的皮肤平均形变量大于站立姿势的均值。

**关键词:**压力袜;压力测量;膝关节角度变化;压力梯度分布;皮肤形变

**中图分类号:**TS 941.17 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2021)01-0023-06

## Effects of Knee Joint Angle Change on Pressure Gradient Distribution and Skin Deformation

FANG Qi, SUN Guangwu, CHEN Yu\*

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Sciences, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** In order to study the effect of knee joint on the pressure gradient distribution and skin deformation of pressure socks under different angles, the FlexiForce flexible film sensor was used to measure the pressure distribution of four knee joint angles of women wearing long tube pressure socks in standing and lying posture. Meanwhile, six circumference dimensions of the legs without and without pressure socks were measured manually, and the shape variables of leg skin were obtained by using the equivalent perimeter calculation formula. The results showed that: in standing or lying down posture, the pressure gradient distribution changed with the change of knee joint angle. When the knee joint angle was the same, the average pressure value of standing posture was greater than that of lying down posture. The skin shape variable of legs increased from bottom to top, and the average skin shape variable of lying posture was greater than that of standing posture.

**Key words:** pressure socks, pressure measurement, knee joint angle change, pressure gradient distribution, skin deformation

压力袜作为预防和治疗下肢静脉类疾病的主要医疗产品,越来越受到人们的重视,通过自下而上建立由大到小的轴向压力梯度分布能加快下肢静脉血液的回流速度,防止静脉血的淤滞和积聚,达到治疗静脉曲张、下肢血栓等疾病的目的<sup>[1-3]</sup>。显然,合理的压力梯度分布是影响压力袜治疗效果的关键因素。

压力袜在机械性能测试<sup>[4]</sup>、织造工艺<sup>[5]</sup>、主观

评价<sup>[6]</sup>、治疗效果<sup>[7]</sup>等方面的研究较多,其中压力梯度分布研究主要从工艺参数设计以及腿部运动姿势等方面展开。如孙玉钗等<sup>[8]</sup>在实验中发现不同的腿部运动姿势对压力梯度分布影响较大,通过对压力袜中衬垫纱送纱量的改进,使得压力袜更符合人体的需求。宫鲁蜀等<sup>[9]</sup>通过测量人体腿部静、动态条件下的压力梯度分布,得出两者分布存在相对误差,但没有对该误差进行具体的定量分析。

收稿日期:2020-10-26; 修订日期:2020-12-10。

基金项目:上海市教育委员会科研创新计划项目(TP2017074)。

作者简介:方琦(1994—),女,硕士研究生。

\*通信作者:陈郁(1977—),男,教授,硕士生导师。主要研究方向为人工智能在服装设计上的应用、三维人体测量等。

Email:09180001@sues.edu.cn

LIU R<sup>[10]</sup>通过实验证明压力袜产生的压力梯度分布会随着腿部姿势的改变而变化,膝关节角度的变化对腿部压力梯度分布有显著影响。

目前,关于膝关节角度变化对压力梯度分布影响的研究以单一角度为主,而人体在运动过程中膝关节会发生多角度的变化,同时会造成皮肤形变。因此,将站立、平躺姿势的抬腿动作进行分解,并测量站立和平躺姿势下不同膝关节角度的压力分布和皮肤形变量,分析穿着压力袜时膝关节角度变化对压力梯度分布及腿部皮肤形变的变化规律。

# 1 实验部分

## 1.1 实验材料和仪器

1.1.1 材料 3 种不同压力级别(Ⅰ级:15~21 mmHg;Ⅱ级:23~32 mmHg;Ⅲ级:34~46 mmHg)的长筒压力袜,材质为氨纶、锦纶混纺,其中Ⅰ级、Ⅱ级压力袜中氨纶、锦纶质量分数分别为 28%、72%,Ⅲ级压力袜中氨纶、锦纶质量分数分别为 36%、64%,均购自浙江义乌“中三院”。

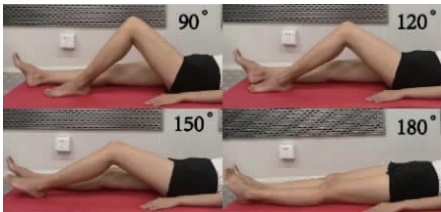
1.1.2 仪器 Novel Pliance-X-32 服装压力测量系统,德国 Novel 公司制造;FlexiForce 柔性薄膜传感器<sup>[11]</sup>,中国台湾麦思科技有限公司制造;YG(B)141D 数字化织物厚度仪,浙江温州际高检测仪器有限公司制造。

## 1.2 测量点选取

根据 FZ/T 73031—2009 测量腿部 6 个截面围度,分别为脚踝最小周长处 B、跟腱与小腿肌转变处 C、小腿最大周长处 D、胫骨节下端 E、大腿中部 F 及大腿根部 G。随后,参考王永荣等<sup>[4]</sup>压力测量方法,分别选取各截面的外侧( $\overline{g_1g_6}$ )、内侧( $\overline{f_1f_6}$ )、前侧( $\overline{h_1h_6}$ )、后侧( $\overline{e_1e_6}$ )4 条纵向测量线,与 6 个测量截面共形成 24 个测量点,腿部横向测量围度及测量点示意如图 1 所示。



(a)站立



(b)平躺

图 2 站立、平躺姿势下的膝关节角度示意

Fig. 2 Knee joint angle in standing and lying flat position

## 1.5 数据采集

1.5.1 压力的数据采集 压力测量前需通过角度计测量并调整好膝关节角度,并让受试者保持相应

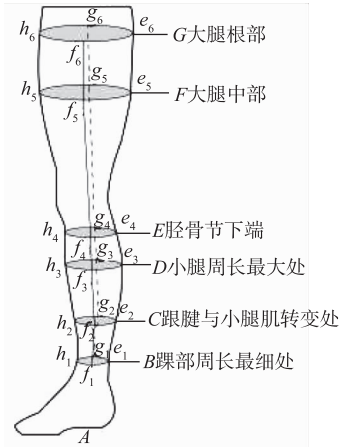


图 1 腿部横向测量围度及测量点示意

Fig. 1 Transverse measurement girth and measuring points of legs flexible sensor

## 1.3 实验对象

以健康的青年女性作为实验对象,选择 1 名体型均匀且腿型正常的 25 周岁女性(身高 164.6 cm,体质量 48.4 kg)作为实验对象,其体型特征见表 1。

表 1 实验对象的腿部原有尺寸数据

Tab. 1 Original leg size data of experimental subject

部 位	站立围度/	平躺姿势围度
	cm	/cm
脚踝最小周长处(B)	19.2	19.1
跟腱与小腿肌转变处(C)	24.8	25.0
小腿最大周长处(D)	32.7	32.7
胫骨节下端(E)	29.6	29.6
大腿中部(F)	42.0	42.9
大腿根部(G)	47.7	49.3

## 1.4 实验动作

根据调查结果显示,人体长期处于站立或平躺状态,容易引发下肢静脉疾病<sup>[12]</sup>。因此,实验在测量腿部压力和皮肤形变量时,分别选取站立和平躺姿势下的 4 个膝关节角度(90°,120°,150°,180°)进行测量,具体如图 2 所示。

的实验动作;其次将 FlexiForce 柔性传感器固定在受试者腿部相应的测量部位;最后待传感器获取稳定的压力数据后,利用 Labview 处理数据软件获得

受试者各测量截面上的前、后、内、外 4 个测量点<sup>[3]</sup>的平均压力值。实验动作开始之前要确保受试者有 30 min 的恢复时间,避免前实验时身体过度紧绷对后实验造成影响。

**1.5.2 皮肤形变的数据采集** 压力袜厚度根据 GB/T 3820—1997 测量方法,采用 YG(B)141D 数字式织物厚度仪测量压力袜多部位厚度并取平均值。通过皮尺测量穿着压力袜的腿部围度  $L$ ,根据等效周长计算公式获得腿部等效周长  $L_1$ ,计算腿部原有周长与  $L_1$  的差即为皮肤形变量  $L_D$ 。在测量  $L$

前,受试者通过角度计调整膝关节角度并保持调整后的动作 2 min,确保皮肤形变趋于稳定状态。

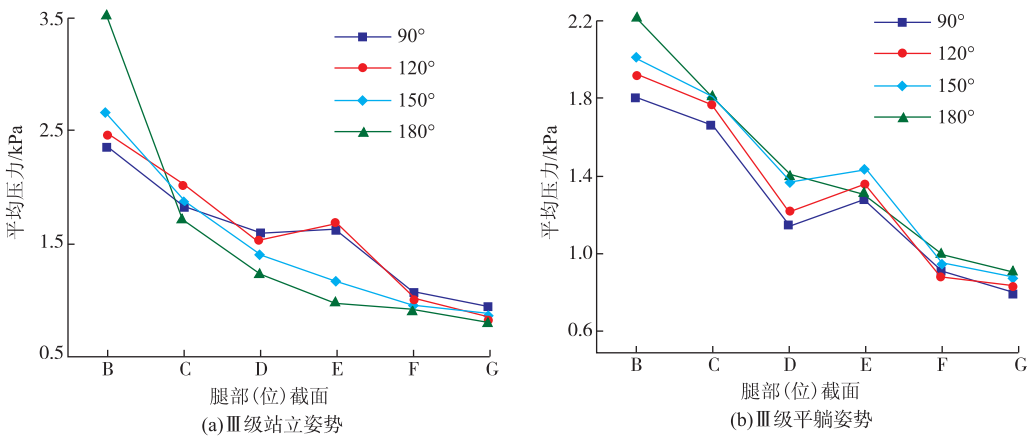
## 2 结果与分析

**2.1 膝关节角度变化对压力梯度分布的影响**  
利用 SPSS 软件中的单因素方差分析(ANOVA)对压力数据进行统计分析,得出站立、平躺姿势下膝关节角度变化对压力梯度分布影响显著( $P < 0.01$ ),具体见表 2。

表 2 膝关节角度变化对平均压力分布的影响						
Tab.2 Effect of knee joint angle change on mean pressure distribution						
身体姿势	类 别	平方和	自由度	均 方	$F$	显著性
站立	组间	195.618	3	65.206	2 533.402	0.000
	组内	22.032	856	0.026		
	总计	217.651	859			
平躺	组间	213.192	3	71.064	2 502.776	0.000
	组内	24.305	856	0.028		
	总计	237.497	859			

Ⅲ级压力袜在不同姿势下的压力分布数据<sup>[5]</sup>如图 3 所示,分析穿着Ⅲ级压力袜站立、平躺姿势下的膝关节角度变化对截面  $B$  产生的压力数据,发现站立时截面  $B$  的平均压力值为 2.74 kPa、极差为 1.16 kPa,而平躺时的平均压力值为 2.01 kPa、极差为 0.42 kPa,可以看出膝关节角度变化对站立姿势

的压力分布影响更为显著。根据拉普拉斯方程( $P = T/r$ ,式中  $P$  是压强, $r$  是表面的半径, $T$  是张力)可知,截面  $E$  压力随着膝关节角度的减小而增大,造成截面  $E$  的压力大于截面  $D$ 。平躺时截面  $G$  除压力袜的外加压力,还受到自身重力的作用,约为 0.11 ~ 0.14 kPa,但对平均压力值的影响较小。



**图 3 Ⅲ级压力袜在不同姿势下的压力分布数据**  
**Fig.3 Pressure distribution data of grade III pressure socks under different postures**  
将站立、平躺姿势下测量压力的分布结果与 YY/T 0853—2011 比较,如图 4 所示,发现膝关节呈 180°时两者的压力梯度分布均符合标准,膝关节呈 150°时只有站立姿势的压力梯度分布符合标准,其余角度均不符合标准。  
将Ⅰ级、Ⅱ级压力袜的压力分布与Ⅲ级压力袜比较,发现 3 组形变量变化趋势相似。比较截面  $B$  处的 3 组平均压力值发现,站立和平躺姿势下Ⅱ级与Ⅰ级的平均压力差分别为 0.28,0.19 kPa,Ⅲ级与Ⅱ级的平均压力差分别为 1.39,0.92 kPa。结果表明:膝关节角度变化对压力梯度分布影响随着压力袜压力级别的增加而增大;膝关节角度变化对站立姿势的压力梯度分布影响大于平躺姿势的压力梯度分布。

2.2 膝关节角度变化对皮肤形变的影响

同样通过 SPSS 软件中的单因素方差分析 (ANOVA) 对皮肤形变量进行统计分析,结果表明膝关节角度变化对皮肤形变影响显著 ( $P < 0.01$ ),具体结果见表 3。

Ⅲ级压力袜在不同姿势下的皮肤形变量如图 5 所示。分析穿着Ⅲ级压力袜在站立、平躺姿势下膝关节角度变化对皮肤形变量的影响发现,皮肤形变量由下至上总体呈递增趋势。由于截面 E 的骨骼结构较多,导致平躺和站立时的平均皮肤形变量较小,分别为 0.5,0.7 cm。小腿和大腿区域含有更多的肌肉和皮下脂肪组织,截面 D,G 分别是小腿和大

腿部分的形变最大区域,平躺时截面 D 的平均形变量比站立时大 0.1 cm,平躺时截面 G 的平均形变量比站立时大 1.4 cm。

穿着Ⅰ级、Ⅱ级压力袜时不同姿势下的皮肤形变量<sup>[11]</sup>如图 6 所示。将Ⅰ级、Ⅱ级压力袜条件下的皮肤形变量与Ⅲ级压力袜进行比较发现,3 组压力袜形变量的变化规律相似。截面 G 在Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级压力袜条件下,站立时的平均皮肤形变量分别为 1.4,1.7,2 cm,平躺时的平均形变量分别为 2.9,3.1,3.4 cm。结果表明:膝关节角度变化对平躺姿势的皮肤形变影响大于站立姿势,并且对皮肤形变的影响随着压力袜压力级别的增加而增大。

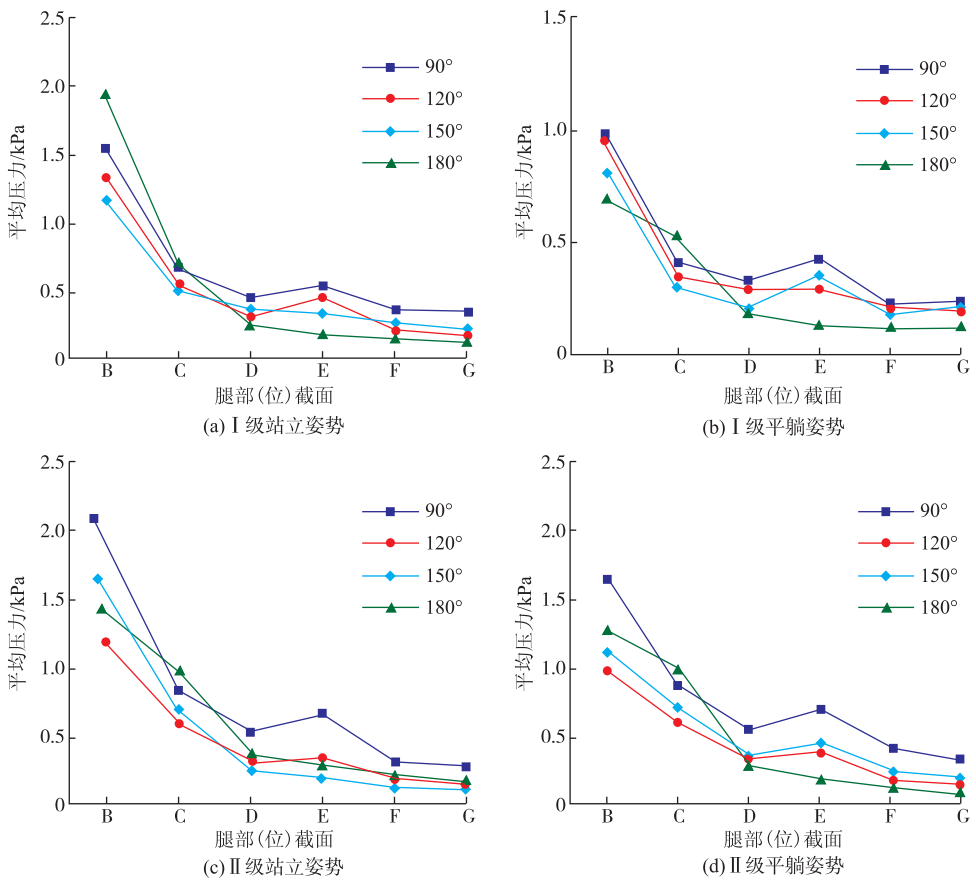


图 4 I 级、Ⅱ级压力袜在不同姿势下的压力数据

Fig. 4 Pressure data of grade I and II pressure socks under different postures

表 3 膝关节角度变化对皮肤形变的影响

Tab. 3 Effect of knee joint angle change on skin deformation

身体姿势	类 别	平方和	自由度	均 方	F	显著性
站立	组间	7.045	3	2.348	9.484	0.000
	组内	4.952	20	0.248		
	总计	11.996	23			
平躺	组间	4.185	3	1.395	57.520	0.000
	组内	0.485	20	0.024		
	总计	4.670	23			

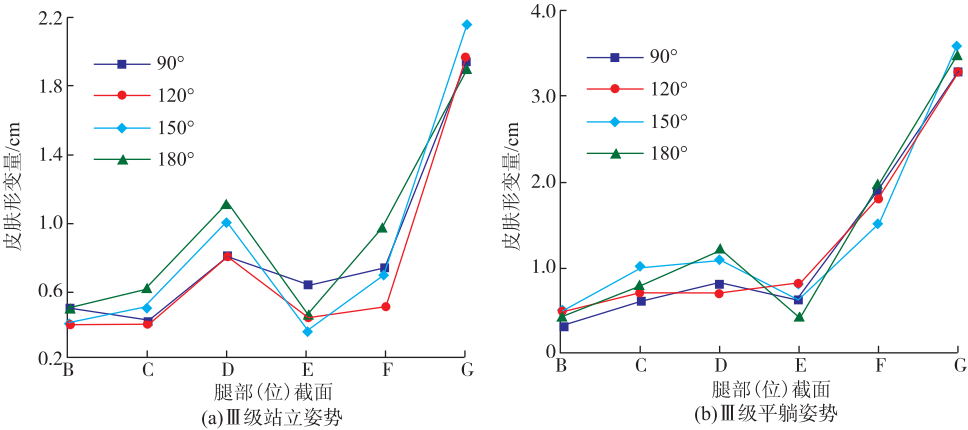


图 5 穿着Ⅲ级压力袜时不同姿势下的皮肤形变量

Fig. 5 Skin shape variation of grade III pressure socks in different postures

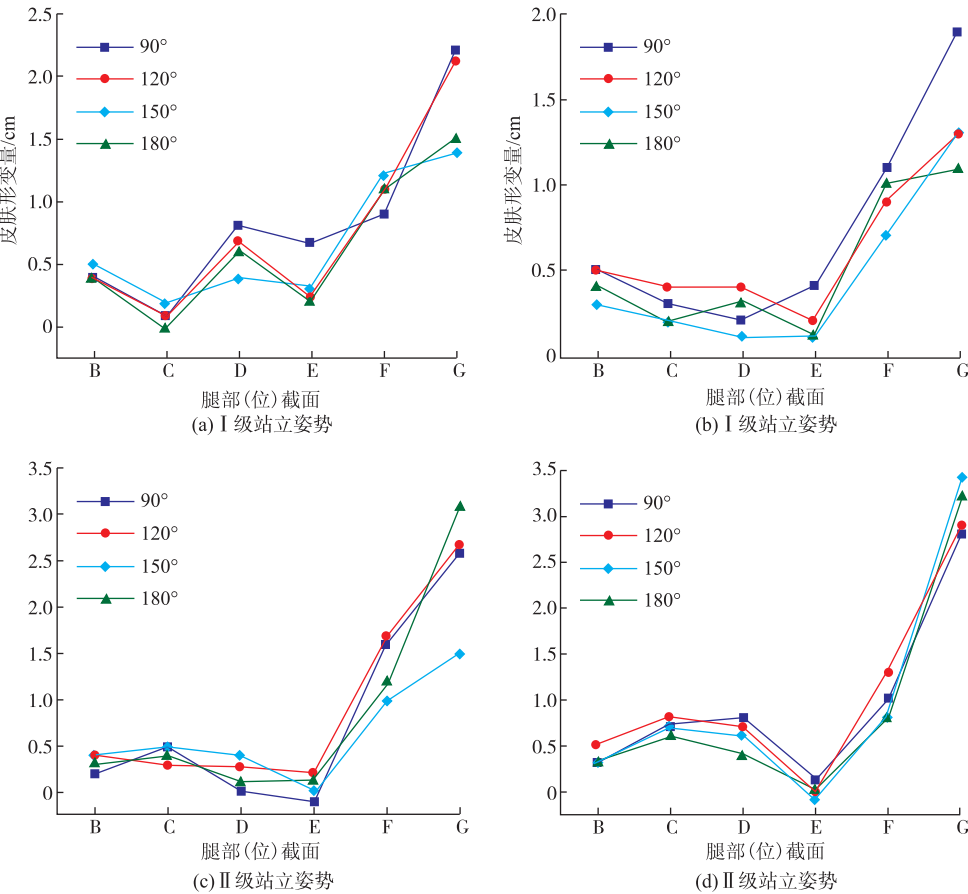


图 6 穿着 I 级、II 级压力袜时不同姿势下的皮肤形变量

Fig. 6 Skin shape variation of grade I and II pressure socks under different postures

2.3 压力分布对皮肤形变的影响

除了膝关节角度变化造成皮肤形变外,压力袜的外加压力也会造成皮肤形变。通过 SPSS 线性回归分析得出压力袜在某一截面处的平均压力值( $x$ )与平均形变量( $y$ )的函数关系,例如穿着Ⅲ级压力袜在截面 G 处站立、平躺姿势下两者的函数关系分别为

$$y_1 = 0.09x_1 + 2.12, R^2 = 0.01;$$
$$y_2 = 0.0x_2 + 2.72, R^2 = 0.75。$$

通过分析两组线性函数发现,不施加外加压力时站立、平躺姿势下的平均形变量分别为 2.12、2.72 cm,且平躺姿势下的函数斜率大于站立姿势,说明平均压力值对平躺姿势形变量的影响大于站立姿势的影响。

3 结 语

通过分析站立、平躺姿势下的膝关节各角度对压力梯度分布和皮肤形变规律的影响,得出以下

结论:

1) 穿着压力袜过程中应避免膝关节长时间处于弯曲状态,否则容易造成腿部远端静脉淤滞。

2) 膝关节角度变化对截面  $E$  前后侧的压力分布有显著影响,在膝盖弯曲时产生高压对压力梯度分布产生影响。站立姿势下膝关节呈  $150^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ , 均符合 YY/T 0853—2011 的压力梯度分布标准,而平躺姿势下只有膝关节呈  $180^{\circ}$  时符合此标准。

3) 腿部皮肤形变量与外加压力、不同姿势的膝关节角度变化都相关,膝关节角度变化引起的形变量大于压力造成的形变量。相同外加压力下,平躺姿势下膝关节各角度变化的皮肤形变量均大于站立姿势。

### 参考文献:

- [1] KUMAR B, HU J, PAN N. Smart medical stocking using memory polymer for chronic venous disorders[J]. Biomaterials, 2016, 75: 174-181.
- [2] VASUDEVAN T, VARCOE R L, ROBINSON D A, et al. Initial results of a clinical feasibility study for endovenous deep venous valve formation to treat chronic venous insufficiency[J]. Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders, 2019, 7(2): 294.
- [3] SUGAHARA I, DOI M, NAKAYAMA R, et al. Acute effect of wearing compression stockings on lower leg swelling and muscle stiffness in healthy young women[J]. Clinical Physiology and Functional Imaging, 2018, 38(6): 1046-1053.
- [4] 王永荣, 秦洁云, 王敏, 等. 压力医疗袜的压力性能测试与评价[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 48-52.
- WANG Yongrong, QIN Jieyun, WANG Min, et al. Evaluation and measurement of the pressure performance of medical stockings [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2015, 41(1): 48-52. (in Chinese)
- [5] 张斯雯, 王文祖. 抗压力袜的性能测试分析与试织[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2011, 37(1): 46-50, 60.
- ZHANG Siwen, WANG Wenzu. Performance testing and trial knitting of anti-embolism stockings [J]. Journal of

Donghua University (Natural Science Edition), 2011, 37(1): 46-50, 60. (in Chinese)

- [6] 倪海燕, 甘应进, 陈东生, 等. 女性弹力袜压力测试及其压感舒适性研究[J]. 西安工程大学学报, 2009, 23(1): 35-38.
- NI Haiyan, GAN Yingjin, CHEN Dongsheng, et al. Study on the pressure comfort of female elastic stockings [J]. Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology, 2009, 23(1): 35-38. (in Chinese)
- [7] HILL J A, HOWATSON G, VAN SOMEREN K A, et al. Influence of compression garments on recovery after marathon running [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2014, 28(8): 2228-2235.
- [8] 孙玉钗, 赵艳敏, 宫鲁蜀, 等. 基于人体需求的压力袜压力与压力分布及其产品开发[J]. 产业用纺织品, 2018, 36(6): 5-9, 31.
- SUN Yuchai, ZHAO Yanmin, GONG Lushu, et al. The pressure and pressure distribution of compression stockings and products development based on human needs [J]. Technical Textiles, 2018, 36(6): 5-9, 31. (in Chinese)
- [9] 宫鲁蜀, 孙玉钗. 压力袜穿着过程压力分布规律研究[J]. 针织工业, 2017(10): 15-18.
- GONG Lushu, SUN Yuchai. Study on pressure distribution law of compressive stockings during wearing [J]. Knitting Industries, 2017(10): 15-18. (in Chinese)
- [10] LIU R, KWOK Y L, LI Y, et al. Skin pressure profiles and variations with body postural changes beneath medical elastic compression stockings [J]. International Journal of Dermatology, 2007, 46(5): 514-523.
- [11] 庞欣, 方园, 李新阳. 基于柔性压力传感器的压力袜压力检测[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(6): 759-764.
- PANG Xin, FANG Yuan, LI Xinyang. Pressure testing of compression stockings based on flexible pressure sensor [J]. Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology, 2017, 37(6): 759-764. (in Chinese)
- [12] DAI X Q, LIU R, LI Y, et al. Numerical simulation of skin pressure distribution applied by graduated compression stockings [M]//ZENG X Y, LI Y, RUAN D, et al. Computational Textile. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

(责任编辑: 卢 杰)