

文章编号:1004-7220(2016)06-0483-07

# 踝关节内翻防护型半刚性踝护具的力学特征

孟强<sup>1</sup>, 关国平<sup>1</sup>, 牛文鑫<sup>2</sup>, 王璐<sup>1</sup>

(1. 东华大学 纺织学院, 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620;

2. 同济大学附属上海市养志康复医院(上海市阳光康复中心), 上海 201619)

**摘要:**目的 为探究踝关节易内翻扭伤的机制,设计一款适用于人体踝关节非对称生理结构、可有效防护内翻的踝护具。方法 分析导致踝关节内翻的解剖学因素,基于踝关节解剖的非对称结构,构思一种非对称结构踝护具。运用 Kinect 系统及 Geomagic Studio 软件,对成年男子踝关节进行三维扫描并数字建模,通过 3D 打印技术建立踝关节模型。以 EVA 膜、硅胶膜和裹边紫铜网为原材料,采用立体裁剪及复合材料加工技术,制备两种非对称结构的踝护具。对踝护具的塑形性能、拉伸性能、疲劳性能、外衬面料透气性和摩擦性等进行表征。结果 非对称结构踝护具的外侧具有良好的塑形性能,拉伸弹性回复率低。在小应力长时间作用下,EVA 复合材料和硅胶膜复合材料均能保持较好的弹性回复,可有效承受内翻外力。外衬面料的透气性和摩擦性试验结果表明,针织涤纶面料较适合作为外衬材料。结论 所设计制备的非对称结构踝护具的力学性能可满足踝关节内翻防护要求。外覆面料可提高踝护具的吸湿透气性能,摩擦性能较好。

**关键词:** 踝关节扭伤; 踝关节内翻; 踝护具; 非对称结构; 防护

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.06.483

## Mechanical characteristics of a semi-rigid ankle brace for protecting ankle varus

MENG Qiang<sup>1</sup>, GUAN Guo-ping<sup>1</sup>, NIU Wen-xin<sup>2</sup>, WANG Lu<sup>1</sup> (1. Key Laboratory of Textile Science and Technology of Ministry of Education, College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Yangzhi Rehabilitation Hospital (Shanghai Sunshine Rehabilitation Center), Tongji University School of Medicine, Shanghai 201619, China)

**Abstract: Objective** To explore the mechanism of ankle sprain varus, a kind of human ankle brace with asymmetric physiological structure which can protect the ankle effectively is designed. **Methods** The anatomic factors of ankle varus were analyzed firstly, and a kind of ankle brace with asymmetric structure was designed based on asymmetric structure of ankle joint by anatomy. Using Kinect system and Geomagic Studio software, 3D scanning and digital modeling on ankle joint of a male adult were performed, and the ankle model was established by 3D printing technology. With EVA film, silica gel film and wrapped edge copper network as raw materials, two kinds of ankle brace with asymmetric structure were prepared by 3D draping and composite materials processing technology. The shaping properties, tensile properties, fatigue performance, outer fabric breathability and friction of the designed brace were tested. **Results** The outside of ankle brace with asymmetric structure had good shaping property, low tensile elastic recovery rate. Under the effect of repeated small load, EVA composite materials and silicone composite materials could keep good elastic recovery and effectively bear external varus forces. The results from air permeability and grinding test showed that polyester material was a kind of suitable fabrics for the outer lining material. **Conclusions** The mechanical properties of ankle brace with asymmetric structure can meet

收稿日期:2016-09-20; 修回日期:2016-10-12

基金项目:2016年纺织面料技术教育部重点实验室开放课题项目(KLTST201611)。

通信作者:关国平,副教授,E-mail:ggp@dhu.edu.cn。

the requirement of ankle varus protection. The fabric of ankle brace can improve moisture permeability and frictional properties.

**Key words:** Ankle sprain; Ankle varus; Ankle brace; Asymmetric structure; Protection

对于伞兵、跳伞爱好者、滑翔机教练、杂技演员等群体而言,高空着陆是运动中的常见动作。在着陆瞬间,巨大的着陆冲击力极易导致踝关节内翻。根据统计,在跳伞损伤的所有形式中,踝关节损伤占最大比例(约为36%),而损伤形式以踝关节内翻为主<sup>[1]</sup>。踝关节内翻可导致外侧韧带损伤甚至断裂,继而引发一系列严重后果。研究表明,在高空着陆过程中,佩戴踝护具能有效保护踝关节<sup>[2]</sup>。相较于柔性踝护具,半刚性踝护具的防护效果更佳<sup>[3-5]</sup>。踝关节韧带分为外侧韧带和内侧韧带,内侧韧带主要为三角韧带,外侧韧带包括距腓前韧带、跟腓韧带和距腓后韧带。由此可见,踝关节韧带在分布上内外侧是非对称的,外侧韧带较内侧韧带薄弱。因此,踝关节更易于发生内翻,踝护具应从材料及结构等方面着重加强对外侧韧带的保护,减少内翻的发生<sup>[6-11]</sup>。基于牛文鑫<sup>[12]</sup>等人对高空着陆踝关节损伤机制及其防护的研究结果,本文设计并制备一种半刚性、非对称结构的踝护具,主要用于防护高空着陆瞬间的踝关节内翻,并对该踝护具进行了较全面的力学性能表征。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及仪器设备

EVA膜,厚度0.5 mm,深圳兴辉泰塑胶有限公司;硅胶膜,厚度0.5 mm,上海道冠橡塑五金有限公司;PDMS,美国道康宁DC184;裹边紫铜网,密度为14目,丝径0.35 mm,安平县赛航丝网制造有限公司;无水乙醇,常熟市鸿盛精细化工有限公司;全棉面料、针织涤纶面料、涤棉混纺面料,市售。

XLB平板硫化机,上海齐才液压机械有限公司;DHG-9055A电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;TP-114精密电子天平,丹佛仪器(北京)有限公司;YG026MB-250多功能电子织物强力机,温州方圆仪器有限公司;YG541E全自动激光织物折皱弹性测试仪,宁波纺织仪器厂;YG461E全自动透气性测定仪,温州方圆仪器有限公司;医用纺织品多功能强力仪,温州市大荣纺织有限公司。

### 1.2 踝护具设计

**1.2.1 踝关节数字建模及3D打印足模** 采用Kinect系统采集成年健康男性志愿者双足踝关节解剖数据,并通过Geomagic Studio将其转化为三维点云数据<sup>[13]</sup>,再使其可视化成像。为减轻混杂噪声对图像品质的影响,采用平滑滤波对扫描的踝关节图像进行除噪处理。除噪后封装得到完整的踝关节数据,获得重建的踝关节模型<sup>[14]</sup>。利用得到的踝关节模型,通过3D打印技术制备与志愿者踝关节比例为1:1的踝关节模型。该模型用于踝护具的设计及立体裁剪。基于此,可获取诸如足底宽度、小腿围、踝骨高度及宽度等踝关节的精确特征信息。

**1.2.2 踝护具结构设计** 人体踝关节内外两侧为非对称结构,且踝关节内侧韧带远强于外侧韧带,故防护踝关节内翻的踝护具在结构上应当与踝关节的非对称解剖结构形成互补,以弥补外侧韧带的不足。因此,非对称踝护具的底部与外侧设计为可塑性的镜像“L”型。足底踩压于踝护具的底部形成第1受力固定点,踝护具外侧可塑性的半刚性材料在外踝部吻合贴附固定,形成第2受力固定点。当踝关节发生内翻时,非对称结构的踝护具就对踝关节内翻形成了有力保护。踝护具内侧部分为柔性材料,保证踝关节活动的灵活性。为了提高踝护具的吸汗性能、透气性和舒适性,在踝护具最外面包覆轻薄透气面料。

### 1.3 非对称踝护具的制备

踝护具的结构设计具有非对称性,外踝侧半刚性部分采用EVA膜或硅胶膜夹心裹边紫铜网的方式来实现半刚性和可塑性,内侧侧柔性材料选用EVA膜或硅胶膜。EVA膜复合材料通过热压法制备,硅胶膜复合材料采用胶粘法制备。外层包覆材料选取全棉面料、针织涤纶面料、涤棉混纺面料进行比较研究。

**1.3.1 热压法** 采用热压法制备EVA膜复合材料,裁剪两片规格为20 cm×50 cm的EVA膜,以无水乙醇擦拭膜表面,裁剪一片规格为4 cm×20 cm裹边紫铜网,以无水乙醇擦拭。如图1所示,A是规

格为 20 cm × 50 cm 的 EVA 膜, B 为紫铜网放置位置, C 为最终所需裁剪形状。擦拭后的两片 EVA 膜上下对齐, 将紫铜网置于两片 EVA 膜之间, 放在 B 处。置于平板硫化机中热压成形, 上下平台热压温度均设置为 105 ℃, 压强为 3 MPa, 热压时间为 10 s。

**1.3.2 胶粘法** 采用胶粘法制备硅胶膜复合材料, 裁剪两片规格为 20 cm × 50 cm 的硅胶膜, 以无水乙醇擦拭膜表面, 裁剪一片规格为 4 cm × 20 cm 紫铜网, 同样以无水乙醇擦拭。将 PDMS 的基本组分与固化剂以 10 : 1 的质量比混合配制成胶水待用。将其中一块硅胶膜平铺于洁净玻璃板上, 取胶水均匀涂覆于硅胶膜表面, 把裹边紫铜网置于图 1 中 B 处位置, 在紫铜网表面继续涂覆适量胶水, 将另一层硅胶膜对齐放置于第一块膜之上, 排除气泡。最后, 将载有复合材料的玻璃板放入烘箱中, 调节烘箱温度为 60 ℃, 烘干 12 h 后取出。最后, 两种踝护具外表面均以缝制的方式包覆一层面料。

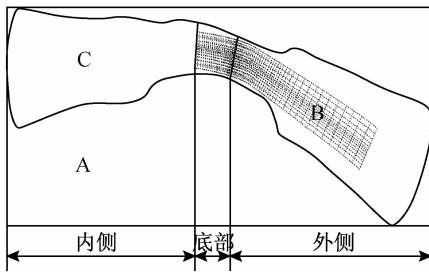


图 1 非对称踝护具结构设计及材料制备裁剪图

Fig.1 Drawing of structure design and material preparation of ankle brace with asymmetric structure

## 1.4 踝护具性能测试

通过以上制备方法获得了 4 种踝护具测试样本。E1: 未加可塑层紫铜网的 EVA 膜双层材料; E2: 有可塑层紫铜网的 EVA 膜双层材料; G1: 未加可塑层紫铜网的硅胶双层材料; G2: 有可塑层紫铜网的硅胶双层材料。其中, E1、G1 用于测试踝护具内侧柔性部分的力学性能, E2、G2 用于测试踝护具外侧半刚性部分的力学性能。

**1.4.1 塑形保持性能** 紫铜网的塑形性能在于可保持弯折形态, 保持与踝关节外部的形态吻合。此处利用纺织材料的织物折皱弹性测试原理进行评价, 所用仪器为 YG541E 全自动激光织物折皱弹性测试仪, 参照标准: GB/T 3819-1997《纺织品织物折

痕回复性的测定回复角法》, 依次测试 E1、E2、G1、G2 的急弹性变形褶皱角和缓弹性变形褶皱角。

**1.4.2 拉伸性能** 采用 YG026MB-250 多功能电子织物强力机, 参照标准 GB/T 3923. 1-1997《织物断裂强力和断裂伸长率的测定》, 依次测试 E1、E2、G1、G2 的拉伸断裂性能, 每种试样测试 5 次。

**1.4.3 疲劳性能** 定负荷测试时的反复拉伸复荷选为 10 N, 根据外翻位移的研究<sup>[15]</sup>, 将定伸长率测试时反复拉伸的伸长率选为 10%。采用 YG026MB-250 多功能电子织物强力机, 参照标准 FZ/T70006-2004《针织物拉伸弹性回复率试验方法》, 夹头隔距设置为 100 mm, 拉伸速度为 100 mm/min, 反复拉伸 5 次。试验中, 试样施加 1 N 预加张力, 达到预定力值或伸长率时, 停顿 60 s。回到起点后停顿 90 s, 施加预加张力, 记录此时试样长度。进行 3 次测试, 分别测试试样在定伸长率和定负荷下的塑性变形率和弹性回复率。塑性变形率和弹性回复率的计算公式为:

$$\text{弹性回复率} = \frac{L_{01} - L'_0}{L_{01} - L_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{塑性变形率} = \frac{L'_0 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $L_0$  为试样加预加张力后的长度(原始长度), 单位为 mm;  $L'_0$  为经拉伸试验后再加上预加张力时试样长度(塑性变形量在内), 单位为 mm;  $L_{01}$  为拉伸状态下(定伸长率或定负荷)的试样总长度, 单位为 mm。

**1.4.4 面料透气性** 为表征在实际使用中人体出汗后对面料透气性的影响, 进行透气性测试。透气性测试参照标准 GB/T5453-1997《纺织品织物透气性的测定》进行, 采用 YG461E 全自动透气性测定仪分别测试织物在干态时以及模拟汗液浸湿时的透气量。

**1.4.5 面料与皮肤间摩擦性** 踝护具与皮肤之间的摩擦力对踝护具发挥防护作用有重要影响, 摩擦力大时, 防护效果较好。故对面料干态及湿态下的摩擦性能进行评价, 优选合适的面料。利用医用纺织品多功能强力仪搭建测试台(见图 2), 在仿真皮肤上放置质量为 110 g 的小滑块 A, 在 A 下表面包覆待测试干态面料 B, 由牵引线经导辊 C 与强力仪传感器 D 连接。启动强力仪后, 传感器 D 上移带动

滑块水平右移,待拉伸曲线水平稳定后,记录拉力  $F$ 。由公式  $F = \mu N$  ( $N$  为小滑块 A 的重力) 求出摩擦系数  $\mu$ 。将同样面料在蒸馏水中完全浸泡 10 min 后,替代干态面料进行测试。试验均重复 3 次。

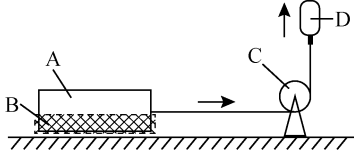


图2 摩擦测试平台示意图  
Fig.2 Schematic of friction test platform

### 1.5 数据表达及统计分析

所有测试数据均采用平均数 ± 标准差表示。采用  $t$  检验比较两组数据之间的显著性差异,  $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 3D 足模的建立

通过 Kinect 系统采集数据并经过数据处理后,得到用于 3D 打印的踝关节数字模型[见图 3(a)]。经 3D 打印之后得到如图 3(b) 所示的踝关节模型,该模型与真实成年健康男子踝关节尺寸相等,完整地保留了踝关节精确的特征信息,生动地体现了踝关节的非对称结构,利用此模型及立体裁剪技术可得到踝护具的设计参数。

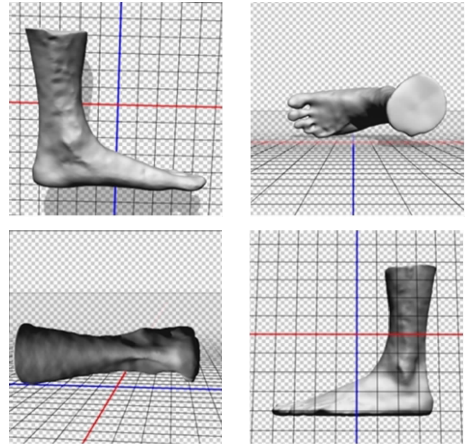
### 2.2 踝护具制备

通过立体裁剪、热压法和胶粘法分别制备非对称结构的复合材料,最后以面料包覆并辅以绑带(见图 4)。踝护具试佩戴结果表明,本研究所制备的非对称结构踝护具与踝关节贴合良好,受力稳固,对高空着陆时的踝关节内翻具有积极的防护作用。

### 2.3 塑形保持性能

踝护具足底部分与外踝侧部分的镜像“L”形弯折有足够的塑形保持性,对防护踝关节内翻具有重要作用。对 4 种试样测试后发现,4 种试样在塑形性能方面均有显著差异。

如图 5(a) 所示, E1 的急弹性回复角为  $(127.6 \pm 8.4)^\circ$ , 缓弹性回复角为  $(138.8 \pm 5.85)^\circ$ , 缓弹性回复角比急弹性回复角增加约 8.8%。E2 的急弹性回复角为  $(21.1 \pm 2.5)^\circ$ , 缓弹性回复角为  $(28.6 \pm 2.9)^\circ$ , 缓弹性回复角比急弹性回复角有较



(a) 踝关节数字模型



(b) 3D 打印足模照片

图3 3D 足模建立示意图

Fig.3 Schematic for of 3D foot model

(a) Digital model of ankle, (b) Photos of 3D printed model



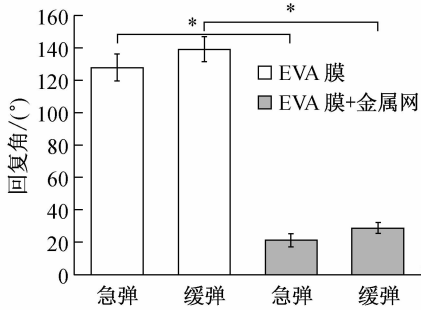
图4 非对称踝护具模拟使用照片

Fig.4 Photos of foot model wearing ankle brace with asymmetric structure

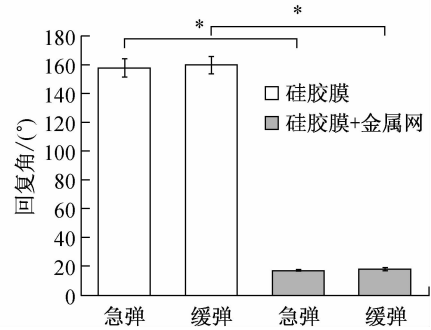
大增加,约为 35.5%。而 E2 的缓弹性回复角仅为 E1 的 20.6%,说明添加紫铜网显著提高了踝护具的塑形保持性能。

如图 5(b) 所示, G1 的急弹性回复角为  $(158.0 \pm 6.4)^\circ$ ,缓弹性回复角为  $(160.3 \pm 5.9)^\circ$ ,缓弹性回复角较急弹性回复角仅增加 1.5%。G2

的急弹性回复角为  $(17.4 \pm 0.6)^\circ$ ,缓弹性回复角为  $(18.6 \pm 1.2)^\circ$ ,缓弹性回复角较急弹性回复角仅增加 6.9%,而 G2 的缓弹性褶皱角比 G1 小,约为 G1 的 11.6%,说明添加紫铜网显著提高了踝护具的塑形保持性能。



(a) EVA 膜及其与紫铜网复合材料



(b) 硅胶膜及其与紫铜网复合材料

图 5 不同材料踝护具塑形性能比较 (\*  $P < 0.05$ )

Fig. 5 Comparison of shaping performance of ankle braces with different materials (a) EVA film and its composite material with copper net, (b) Silicone membrane and its composite material with copper net

## 2.4 拉伸性能

4 种试样 E1、E2、G1、G2 的拉伸断裂性能如图 6 和表 1 所示。E1 的断裂强力并不高,而断裂伸长率高达 789.43%,这与 EVA 出色的韧性相符。加入紫铜网的 E2 初始模量陡增,体现出金属的高模量特点。并且出现 2 个断裂峰值,第 1 个断裂峰值为紫铜网失效后导致曲线急速下降。随后,外层 EVA 膜承担负荷,曲线重新缓慢上升,到达第 2 个断裂峰值时,外层 EVA 膜材料也断裂失效。由 G1 的断裂曲线可知,硅胶膜的拉伸强力与伸长之间呈现出较好的线性关系,其断裂强度较 EVA 膜大,而断裂伸长率小于 EVA 膜。与 E2 类似,加入紫铜网的 G2 同样体现出较高的初始模量,并出现两个断裂峰值, E2 的断裂伸长率为 109.26%, G2 的断裂伸长率为 74.21%,均小于未加紫铜网的 E1 和 G1。

## 2.5 疲劳性能

由表 2 可知,定负荷反复拉伸后,4 种样本的塑性变形率较低,弹性回复率均在 83% 以上。4 种样本的形态保持较好,尺寸也没有发生明显变化,从而保证了良好的防护性能。然而,在定伸长率反复拉伸后,E2 和 G2 的塑性变形率明显高于定负荷测试后 E2 和 G2 的塑性变形率。这是因为定伸长率拉

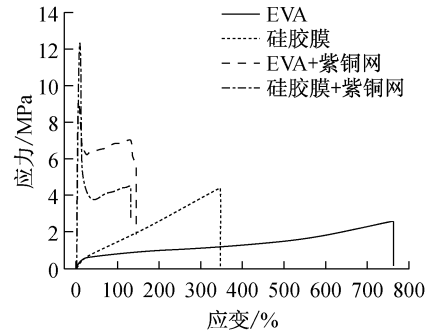


图 6 4 种样本的拉伸曲线

Fig. 6 Tensile curves of four samples

表 1 4 种样本的拉伸断裂强度及断裂伸长率

Tab. 1 Breaking strength and elongation of four samples

材料	断裂强度/( $N \cdot mm^{-1}$ )	断裂伸长率/%
E1	4.46 ± 0.05	789.43 ± 27.89
E2	11.06 ± 0.81	109.26 ± 31.73
G1	6.95 ± 2.69	338.07 ± 84.72
G2	15.75 ± 1.04	74.21 ± 19.21

伸时的拉伸力更大,造成了样本更大的形变。另一方面,由于可塑层为金属网而非黏弹性材料,故发生较大形变的时候,其塑性变形率较大,这与塑形保持

性能的测试结果相一致。同理, E2 和 G2 的弹性回复率均低于它们定负荷拉伸后的弹性回复率。定伸长率测试后, E1 的弹性回复率低于定负荷测试后的值, 是由于实验中所用 EVA 复合材料为塑性材料, 在较大拉伸力下, 发生了较大形变。然而, 由于硅胶膜复合材料良好的弹性, 在两种测试条件下, 其弹性回复率没有显著的差异。值得一提的是, 踝关节内翻时, 外踝最大应力平均值约为 77.28 kPa<sup>[16]</sup>, 而 E2 和 G2 在定伸长率测试时的应力值远大于 740 kPa。因此, 从实际应用角度来讲, E2 和 G2 几乎不会发生失效。

表2 定负荷和定伸长率反复拉伸结果

Tab. 2 Tensile results under repeated load and repeated elongation

样本	定负荷		定伸长率	
	塑性变形率/%	弹性回复率/%	塑性变形率/%	弹性回复率/%
E1	1.73 ± 0.50	91.03 ± 1.87	2.83 ± 0.34	77.73 ± 1.95
E2	0.37 ± 0.15	83.03 ± 3.89	33.03 ± 4.62	17.63 ± 3.62
G1	7.84 ± 0.75	84.73 ± 1.27	1.62 ± 0.11	86.33 ± 0.80
G2	0.33 ± 0.06	85.35 ± 3.82	21.73 ± 1.79	31.23 ± 3.35

## 2.6 包覆面料的透气性

试验结果表明, 面料在浸湿之后, 透气性有所下降。由表 3 可知, 干态面料的透气性普遍优于湿态面料的透气性。其中, 干态和湿态下透气性最好的均为针织涤纶面料。针织涤纶面料湿态下透气量较干态降低 14.31%。全棉和涤棉混纺面料分别降低 11.78% 和 5.32%。虽然两者透气量降低较涤纶小, 但针织涤纶面料湿态下的透气性仍然优于全棉和涤棉混纺面料, 故此针织涤纶面料较适用于外层包覆材料。即使在湿态下, 上述 3 种面料的透气量依然远高于文献[17]中报道的贴身衣物的透气量 ( $463.33 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>。

表3 3种面料的透气性测试结果

Tab. 3 Air permeability test results of 3 kinds of fabrics

面料	干态透气量/ ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	湿态透气量/ ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
全棉面料	2 242 ± 21	1 978 ± 15
针织涤纶面料	2 453 ± 14	2 102 ± 14
涤棉混纺面料	1 956 ± 19	1 852 ± 16

## 2.7 面料的摩擦性能

由表 4 可知, 干态下, 全棉面料的摩擦系数最小, 针织涤纶面料摩擦系数最大, 达到  $0.35 \pm 0.01$ , 而涤棉混纺面料居中。湿态时, 三者的摩擦系数均有上升, 全棉、涤纶、混纺面料分别提升了 36.84%、11.43%、21.43%。摩擦太小, 易导致使用过程中踝护具与踝关节皮肤之间的滑移, 降低防护效果。因此, 较适合的面料, 其摩擦系数在干态的条件下要相对较大, 在使用过程中, 随着汗液的吸收, 其摩擦系数增大, 有利于踝关节内翻的防护。织物摩擦系数一般为 0.12 ~ 0.50, 3 种面料摩擦性中等偏上, 且有实验证明, 当摩擦系数接近 0.50 时, 会使皮肤产生灼热不适<sup>[18]</sup>。结合 3 种面料的透气性和摩擦性能来看, 针织涤纶面料比较适合于外层包覆材料。

表4 3种面料的摩擦性测试结果

Tab. 4 Friction test results of 3 kinds of fabrics

面料	干态摩擦系数	湿态摩擦系数
全棉	0.19 ± 0.01	0.26 ± 0.01
针织涤纶	0.35 ± 0.01	0.39 ± 0.02
涤棉混纺	0.28 ± 0.01	0.34 ± 0.01

## 3 讨论与结语

踝关节扭伤在日常生活中及极限运动中非常常见, 尤其是踝关节内翻。本研究基于对踝关节非对称解剖结构的分析, 探讨导致踝关节内翻的主要原因, 并构思了一种非对称结构的踝护具。期望该踝护具的非对称结构与踝关节的非对称结构形成互补, 为防护踝关节内翻起到积极作用。在踝护具的设计及制备过程中, 3D 打印的脚踝模型对脚踝结构参数的获取及立体裁剪起到了重要作用。踝关节的内外侧非对称结构应该在防护中得到重视, 给予力学性能薄弱的外侧以更加有力的防护。同时, 踝关节在运动中需要有充分的灵活性, 踝护具的防护应尽量减少对灵活性的影响。由于在实际使用中, 踝护具可能受到同方向外力的反复作用, 从而使材料持续受力产生疲劳, 尤其是外踝部位, 故对外侧踝护具材料的要求是能够经受小作用力反复作用, 具有足够的耐力学疲劳性。本研究中所选用的 EVA 膜及硅胶膜材料柔软适中, 在保证外侧韧带得到有力保护的同时, 给予了内侧脚踝较为充分的灵活性。

同时,从小作用力与小应变持续作用下的疲劳性能测试可以看出,选用的 EVA 膜与硅胶膜的复合材料均能满足防护要求。

研究表明,本研究所设计制备的非对称结构踝护具力学性能优良,能够满足踝关节内翻防护要求。外覆面料可提高踝护具的吸湿透气性能,摩擦性能较好。因此,该踝护具基本满足了踝护具使用的灵活性和舒适性要求。当然,本研究结果还很初步,还有诸多地方需要完善,例如通过实时步态分析及高台跳跃实验等深入研究其人体防护效果,进一步改善其结构与功能细节,期望早日促成产品问世。

### 参考文献:

- [1] EKELAND A. Injuries in military parachuting: A prospective study of 4499 jumps [J]. *Injury*, 1997, 28(3): 219-222.
- [2] NIU WX, WANG Y, YAO J, *et al.* Consideration of gender differences in ankle stabilizer selection for half-squat parachute landing [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2011, 82(12): 1118-1124.
- [3] NIU WX, CHU ZW, YAO J, *et al.* Effects of laterality, ankle inversion and stabilizers on the plantar pressure distribution during unipedal standing [J]. *J Mech Med Biol*, 2012, 12(3): 59-63.
- [4] FUMICH RM, ELLISON AE, GUERIN GJ, *et al.* The measured effect of taping on combined foot and ankle motion before and after exercise [J]. *Am J Sports Med*, 1981, 9(3): 165-170.
- [5] MICKEL TJ, BOTTONI CR, TSUJI G, *et al.* Prophylactic bracing versus taping for the prevention of ankle sprains in high school athletes: A prospective, randomized trial [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2006, 45(6): 360-365.
- [6] 美国平, 孟强, 牛文鑫, 等. 踝关节扭伤防护及其康复研究进展[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(1): 78-82.
- [7] GUAN GP, MENG Q, NIU WX, *et al.* Research progress of ankle sprains, protection and rehabilitation [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(1): 78-82.
- [8] TAYLOR DC, TENUTA JJ, UHORCHAK JM, *et al.* Aggressive surgical treatment and early return to sports in athletes with grade III syndesmosis sprains [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(11): 1833-1838.
- [9] DUBIN JC, COMEAU D, MCCLELLAND RI, *et al.* Lateral and syndesmotom ankle sprain injuries: A narrative literature review [J]. *J Chiropr Med*, 2011, 10(3): 204-219.
- [10] HOLLIS JM, BLASIER RD, FLAHIFF CM. Simulated lateral ankle ligamentous injury. Change in ankle stability [J]. *Am J Sports Med*, 1995, 23(6): 672-677.
- [11] 美国平, 关红涛, 王璐. 韧带损伤及人工韧带应用与研究[J]. *生物医学工程学进展*, 2013, 34(4): 234-238.
- [12] OLMSTED LC, VELA LI, DENEGAR CR, *et al.* Prophylactic ankle taping and bracing: A numbers-needed-to-treat and cost-benefit analysis [J]. *J Athl Train*, 2004, 39(1): 95-100.
- [13] 牛文鑫. 跳伞着陆踝关节损伤机制及其防护的生物力学研究[D]. 北京: 北京航空航天大学博士学位论文, 2012.
- [14] DARBY J, SÁNCHEZ MB, BUTLER PB, *et al.* An evaluation of 3D head pose estimation using the Microsoft Kinect v2 [J]. *Gait Posture*, 2016, 48: 83-88.
- [15] SNASEL V, ALANCAR M, JELONECK D, *et al.* International conference on communications, management, and information technology (ICCMIT 2015) Kinect 3D point cloud live video streaming [J]. *Procedia Comput Sci*, 2015, 65: 125-132.
- [16] 刘清华. 数字化人体足踝部三维有限元模型的建立及分析[D]. 广州: 南方医科大学博士学位论文, 2010.
- [17] 王鹏, 伍骥, 郑超, 等. 模拟空降兵半蹲式跳伞着陆踝关节侧方应力分析[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2014, 25(4): 270-274.
- [18] 贾娟. 连身文胸的湿舒适性研究[D]. 上海: 东华大学硕士学位论文, 2006.
- [19] 王旭. 织物和皮肤间的摩擦性能研究[D]. 上海: 东华大学博士学位论文, 2011.