

# 基于三维动态捕捉技术的无缝护膝防护性能研究

谢亮玉<sup>1a</sup>, 阎玉秀<sup>1a,b</sup>, 陶建伟<sup>2</sup>, 金子敏<sup>1c</sup>

(1. 浙江理工大学, a. 服装学院; b. 浙江省服装工程技术研究中心; c. 材料与纺织学院, 杭州 310018;

2. 浙江棒杰数码针织品股份有限公司, 浙江 义乌 322000)

**摘 要:** 无缝针织物是依据人体曲线设计的一次性成型的织物,其贴体舒适特别适合于护膝的制作。为设计制作抗冲击防护性能较好的护膝,采用正交试验方法,设计纱线原料、组织结构和织物密度为三因素,每个因素下设计三水平,采用无缝针织圆机织造9组试样,通过三维动态捕捉系统和生物力学原理对试样的防护性能进行测试与分析,同时测试织物的弹性。分析纱线原料、组织结构、织物密度对于试样防护性能以及弹性的影响,选取性能防护性能、弹性较优的材料用于无缝护膝的开发。结果表明:纱线原料为8tex/100f涤纶+20D氨纶/50D锦纶包覆纱时,交错组织、密度紧密的织物抗冲击性能最好,可作为护膝缓冲功能区设计;纱线原料为8tex/100f涤纶+20D氨纶/50D锦纶包覆纱时,罗纹组织、密度紧密的织物制动性能最好,可作为护膝制动功能区设计;7tex/144f涤纶+20D氨纶/30D锦纶包覆纱弹性较好,适用于护膝边缘设计。该成果可为无缝企业护膝产品的优化设计和开发提供参考。

**关键词:** 无缝护膝;正交设计;三维动态捕捉;生物力学;防护性

**中图分类号:** TS184.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2018)07-0396-07

## 0 引 言

跌倒是指身体失去原有的平衡而摔倒地面上,轻则擦伤、骨折,重则引起瘫痪甚至死亡<sup>[1]</sup>。跌倒过程中除了髋部和腕关节易受损外,膝关节也是极易受伤的。膝关节是上下腿骨交汇的地方,中间有半月板,前面有髌骨。在日常生活中,没有外力作用,髌骨在膝盖部位小范围移动,而在剧烈运动以及不当姿势下,髌骨会错位。另外,跌倒后来自地面的外力直接冲击也会对髌骨产生伤害<sup>[2]</sup>。护膝作为一种保护膝部的产品,一个作用就是通过包覆膝部减少跌倒过程中关节扭转、过伸和弯曲造成的伤害,即制动性能;另一个作用就是通过缓冲垫,减少膝部受到的外部冲击,即抗冲击性能。护膝的抗冲击性能是通过面料的弹性收缩来体现,首先弹性收缩中护膝吸收一部分外力,然后恢复形变的过程中将外力消散,进而减少传递给膝关节的冲击力,达到保护骨

骼关节的作用<sup>[3]</sup>。

现阶段市场的护膝普遍采用弹性材料,海绵和聚氨酯作为填充物,有一定的抗冲击和制动性能,但是吸湿排汗性、透气性能不好,舒适性能差<sup>[4]</sup>。无缝针织物是指采用无缝织机生产的一次成型的织物,没有接缝,与传统针织产品相比具有更好的合体性<sup>[5]</sup>。在原料选择上,一般需要选用弹性纱线作为地纱,其中锦/氨包覆纱和涤纶粘胶混纺纱容易编织,延展性、回复性、弹性和染色性能比单独的涤纶、氨纶和黏胶更好,适合做地纱<sup>[6]</sup>。关于组织的选用方面,无缝针织是纬编针织,常见的组织有纬平针、平针添纱、浮线添纱、假罗纹、网眼以及挑孔等。粗罗纹和细罗纹组织都属于假罗纹,粗罗纹条子较宽,凸起明显。细罗纹条形宽度较细,凸起较细罗纹小。交错组织属于平针添纱的一种,表面有假网眼,即细密的如蜂巢似的孔状结构。这三种组织是三维组织,立体感较强,具有代表性,因此选其制作护膝,研

收稿日期: 2017-11-19 网络出版日期: 2018-04-08

基金项目: 浙江省高校重中之重学科开放基金项目(2016KF08);国家科技部重点新产品计划项目(2014GR08001)

作者简介: 谢亮玉(1987-),江苏南通人,硕士研究生,主要从事服装技术与理论方面的研究。

通信作者: 阎玉秀, E-mail: yanyuxiu777@163.com

究无缝织物中的三维组织对于护膝防护性能的影响。相比较而言,无缝针织产品贴体舒适性较好。国内外研究表明,间隔织物—三维织物的一种,具有良好的抗冲击性<sup>[7]</sup>。无缝技术中的三维组织是否具有抗冲击性的论证研究,对将无缝针织技术在护膝开发和制作中的应用具有重要意义。

本文采用无缝针织技术,使用服用性能优良的纱线原料和三维立体组织,通过正交试验设计织造护膝试样<sup>[8]</sup>。通过三维动态捕捉系统,准确捕捉佩戴不同护膝时人体膝盖的轨迹,通过逆动力学的原理来将三维坐标数据转化为运动力学参数,以此来分析人体不同部位的受力情况,研究不

同护膝的防护性能优劣,选择防护性能好的织物用于无缝护膝产品的开发。

1 实验部分

1.1 原料和设备

试样以纱线原料、组织结构、织物密度为三因素,密度依靠上机程序进行控制,上机密度值设定为以下三种密度,即紧密、居中、一般。设计纱线原料、织物组织、织物密度为三个因素,每个因素设计三水平,采用标准正交表  $L_9(3^3)$ ,设计试样方案<sup>[9]</sup>,用无缝针织圆机织造 9 块大小一致的护膝,如表 1 所示。用密度镜测量的织物的密度,如表 2 所示。

表 1 实验试样表

织物编号	纱线原料 A	织物组织 B	密度 C	平方米克重/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	厚度/mm
#1	7tex/144f 涤纶+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱	细罗纹	紧密	328	1.45
#2	7tex/144f 涤纶+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱	平针添纱	居中	434	2.03
#3	7tex/144f 涤纶+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱	粗罗纹	一般	549	2.06
#4	8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱	细罗纹	居中	368	1.60
#5	8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱	平针添纱	一般	560	2.45
#6	8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱	粗罗纹	紧密	576	2.34
#7	14tex 涤粘纱+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱	细罗纹	一般	588	1.94
#8	14tex 涤粘纱+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱	平针添纱	紧密	798	2.45
#9	14tex 涤粘纱+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱	粗罗纹	居中	904	2.48

表 2 织物密度表

织物编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
纵密/个	108	89	66	95	74	115	60	102	82
横密/个	98	75	48	80	58	100	45	85	65

注:织物纵密代表沿线圈,按照纵行方向,50 mm 内的横列线圈数量;织物横密是按照横列方向,50 mm 内的纵行线圈数量。

1.2 试验准备

织物防护性能是织物保护人体的能力,本文主要研究织物的制动性能和抗冲击性能。本研究采用的仪器是瑞典三维运动采集和分析系统(Qualisys Oqus 500<sup>+</sup>)。三维动态捕捉系统可以通多个摄像头全面覆盖整个空间,捕捉人体运动轨迹,并通过贴在人体上的主动或者被动发光的 Marker 点来测得人体部位在运动过程中的轨迹。实验数据以三维坐标变化数据( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ )形式输出<sup>[10]</sup>。实验地点是浙江理工大学人体动态测量实验室。通过文献研究,人体的身高、体重与人体跌倒时受到地面的冲击能量大小成正比,膝围大小会影响护膝包覆膝盖的紧密程度,也会影响护膝的防护性能<sup>[11]</sup>。本实验不考虑人体身高、体重和膝围大小的影响,因此选择同样体型年轻女性 20 名,年龄 20~25 岁,身高为(160

$\pm 2$ ) cm,体重在( $51.5 \pm 1.0$ ) kg,膝围尺寸相近。另外实验协调人员 1 名、仪器操作员 1 名。实验对象着装要求是上身穿紧身短上衣,下身穿紧身长裤,运动鞋。实验对象身上不佩戴任何饰品。为防止试验者受伤,在地面上铺 10 cm 的海绵缓冲垫。

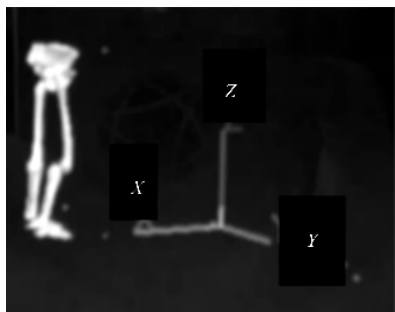
1.3 实验过程

1.3.1 关节部位标记点确立

本实验选择 4 个刚体,每个刚体由 4 个 Marker 点组成。刚体分布在大腿下部,大腿上部,另外在两侧髋关节、股骨关节、踝关节等部位贴 22 个独立的 Marker 点,总共 38 个 Mark 点。设置膝盖点为虚拟点,因为在摔倒过程中,膝盖部位附着的 Marker 点易脱落。(刚体是一种固定结构,有四个 Marker 点组成;虚拟点是因为不容易固定或者容易滑落的点,一般通过测量出实际的标识点的坐标就可以得出与其相对的虚拟点的坐标。)通过软件构建下肢骨骼模型,最终得到膝盖部位(虚拟点)的三维空间运动轨迹。三维动态捕捉系统原点设定为空间某一点,规定人体站立前后为 X 轴方向,左右为 Y 轴方向,上下为 Z 轴方向,如图 1 和图 2 所示。



图1 人体标记点



(a) 人体站立时三维图像



(b) 人体跪倒时三维图像

图2 三维坐标系

膝盖部位(虚拟点)数据通过瞬时时间点,以三维坐标变化数据( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ )的形式完成输出,再通过 Excel 表进行分析,如表 3 所示。

表3 位置变化表(部分)

时间点	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$	$\Delta Z/\text{mm}$
14	-0.1432	0.0117	-0.0089
15	-0.1423	0.0114	-0.0068
16	-0.1510	0.0074	-0.0222
17	-0.1358	0.0074	-0.0065
18	-0.1555	0.0085	-0.0091

### 1.3.2 试验动作设计和逆动力学分析

#### (1) 试验动作设计

试验者左膝佩戴护膝,右膝不佩戴护膝,静止站立后双膝同时跪地,缓冲一段时间后双膝达到稳定状态。实验只截取膝盖触地瞬间,腕关节没有触地

的过程,这时膝盖触地受到较大的冲击能量。有效动作是整个跌倒过程期间 Marker 点没有脱落,也没有 Marker 点被遮挡。通过观察视频,设定整个动作时间 2 s(设置 1 s 为 100 帧),每次试验重复 10 次,记录有效数据 5 次的平均值进行分析,

#### (2) 逆动力学原理分析

逆向动力学原理是已知某一时刻物体的运动参数,通过一定的公式换算得到此时施加在物体上的驱动力<sup>[12]</sup>。逆动力学原理主要包括牛顿第二定律,冲量定理,动量定理等。具体分为以下几步:

##### a) 求膝盖点移动的距离

在运动捕捉系统采样频率  $f$  较高时,每帧时间间隔极短,只有 0.01 s,将人体膝盖点在相邻两帧的运动轨迹近似为直线,其距离  $S_t$  可以用空间距离公式求得,如式(1)所示。

$$\Delta x = x_2 - x_1, \Delta y = y_2 - y_1, \Delta z = z_2 - z_1$$

$$S_t = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1)$$

其中: $x_1, y_1, z_1$  是 A 点空间坐标;A 点经过一段时间,移动到 B 点, $x_2, y_2, z_2$  是 B 点空间坐标。

##### b) 求各个时间点瞬时速度和加速度

由于相邻两帧时间间隔极短,即 0.01 s,膝盖点速度变化忽略不计,膝盖点瞬时速度  $v_t$  近似等于两帧时间间隔内膝盖点的平均速度,相邻两个瞬时速度点之间的变化看成是匀变速的,如式(2)和式(3)所示。

$$v_t = \frac{S_t}{\Delta t} \quad (2)$$

$$a_t = \frac{v_{t+1} - v_t}{\Delta t} \quad (3)$$

其中:两帧之间的时间  $\Delta t = 0.01$  s; $S_t$  是两帧之间的位移; $v_t$  是  $t$  时刻的速度; $v_{t+1}$  是下一帧的速度; $a_t$  是  $t$  时刻的加速度。

c) 分析比较各个时间点瞬时速度,得出膝盖触地最大速度值和护膝的护膝制动力系数。

根据人体跌倒力学分析,结合视频分析和瞬时速度数据分析,人体跪倒过程中,膝盖点速度逐步增加,膝盖触地的瞬间速度最大。因为护膝的作用之一就是制动作用,所以通过比较佩戴护膝和不佩戴护膝时的膝盖的最大速度值的差值,可以评价不同护膝制动性能优劣。如式(4)所示。

$$K_{\text{制动}} = v_{\text{无护膝}} - v_{\text{有护膝}} \quad (4)$$

其中: $K_{\text{制动}}$  为护膝的制动系数,反映护膝限制膝关节活动的的能力; $v_{\text{无护膝}}$  是不佩戴护膝时膝盖触地速度值; $v_{\text{有护膝}}$  是佩戴护膝膝盖触地速度值。

c) 分析膝盖触地后(缓冲时间段)速度变化,分析各款护膝缓冲能力强弱(护膝抗冲击系数)。

结合动量定理,分析膝盖受力情况。膝盖在摔倒触地之前,由于自身重力影响,速度是增加的,接触地面以后,受到来自地面的冲击力,力的方向与膝盖速度方向相反,在冲击力和重力的合外力的作用下,合外力与原来膝盖速度相反,膝盖速度逐步减小直至稳定接近于 0,如式(5)一(8)所示。

$$Ft=m\Delta v \tag{5}$$

$$F=F_{\text{外力}}=F_{\text{缓冲}} \tag{6}$$

$$\frac{Ft}{m}=\frac{F_{\text{外力}}t}{m}-\frac{F_{\text{缓冲}}t}{m} \tag{7}$$

$$\Delta v_{\text{有护膝}}=\Delta v_{\text{无护膝}}-K_{\text{抗冲击}} \tag{8}$$

其中:式(5)是动量定理,膝盖动量的变化等于它所受外力的冲量; $t$ 为膝盖触地后缓冲时间; $\Delta v$ 是膝盖触地后的速度变化; $m$ 为膝盖质量;式(6)中, $F_{\text{外力}}$ 为

未佩戴护膝后膝盖受到的合外力; $F_{\text{缓冲}}$ 为护膝缓冲消散的外力; $F$ 为佩戴护膝后膝盖受到的合外力,力的单位均为牛顿  $N$ 。式(7)中  $m$  为人体质量, $t$  为缓冲时间。式(8)中, $\Delta v_{\text{有护膝}}$ 等于佩戴护膝后的膝盖触地后速度减小值; $\Delta v_{\text{无护膝}}$ 等于没有佩戴护膝的膝盖触地后速度减小值; $\Delta v_{\text{无护膝}}$ 与  $\Delta v_{\text{有护膝}}$ 的差值  $K_{\text{抗冲击}}$  可以作为评价护膝抗冲击性能优劣的指标。

## 2 数据分析

### 2.1 护膝防护性能结果和分析

为确保实验准确,用摄像机记录 100 次实验对象进行摔倒动作,通过视屏分析和数据分析确定摔倒瞬间的具体时刻为 0.3 s,膝盖触地后的缓冲时间段 0.3~0.5 s。膝盖保持稳定时间段 0.5~2.0 s。护膝防护性能相关数据如表 3 所示。

表 3 膝关节触地速度和缓冲时间段速度变化

织物编号	触地瞬时速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$			触地后缓冲段速度减小值 $\Delta v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		
	有护膝	无护膝	制动系数	有护膝	无护膝	抗冲击系数
#1	20.46	38.20	17.74	10.00	13.63	3.63
#2	41.15	46.51	5.36	27.42	34.62	7.20
#3	30.17	38.05	7.88	21.17	21.19	0.02
#4	31.50	51.60	20.10	18.17	23.69	5.69
#5	38.03	43.66	5.63	15.30	17.09	1.80
#6	31.50	51.60	20.10	18.17	29.17	11.00
#7	37.78	52.27	14.49	18.33	18.52	0.19
#8	53.03	70.91	17.88	38.23	49.74	11.51
#9	30.72	41.85	11.13	23.90	29.40	5.50

由表 3 可见,佩戴护膝能明显减小膝盖触地速度,表明护膝能限制膝盖活动,减少跌倒过程中关节扭转、过伸和弯曲造成的伤害,即产生制动作用。由制动系数大小比较可知,各款护膝制动能力由大到小是#4=#6>#8>#1>#7>#9>#3>#5>#2。同时,左膝触地后缓冲段速度减小值显示触地后膝盖的受力情况,佩戴护膝后膝盖触地受力比不佩戴护膝时受力小,表示护膝能够缓冲地面冲击力,即具有抗冲击性能。由抗冲击性能系数大小比较可知,各款护膝抗冲击能力由大到小是#8>#6>#2>#4>#9>#1>#5>#7>#3。

### 2.2 护膝防护性能方差分析

表 4 对护膝的制动性能进行了方差分析,从显著性可以看出,A(纱线原料)、B(组织结构)、C(密度)三个因素的  $p$  值均大于 0.05<sup>[13]</sup>,故 A、B、C 三个因素对于制动性能均无显著影响。从第Ⅲ类平方和

比较可以看出对护膝制动性能的影响  $C>B>A$ ,即三因素的影响从大到小依次为密度、组织结构、纱线原料。

表 4 护膝制动性能方差分析表

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	$F$	显著性 $p$ 值
校正的模型	268.983 <sup>a</sup>	6.00	44.830	4.166	0.206
截距	1608.277	1.00	1608.277	149.468	0.007
A	42.522	2.00	21.261	1.976	0.336
B	92.222	2.00	46.111	4.285	0.189
C	134.238	2.00	67.119	6.238	0.138
错误	21.520	2.00	10.760		
总计	1898.780	9.00			
校正后的总变异	290.503	8.00			

注: $R$ 平方=0.926(调整后的  $R$ 平方=0.704),因变量即制动系数。



同理,对护膝的抗冲击性能也进行方差分析,见表5。从方差分析结果中显著性可以看出,A(纱线原料)、C(密度)的 $p$ 值大于0.05,B(组织结构)的 $p$ 值小于0.05,故A、C两个因素对于抗冲击性能无显著影响,B组织结构对于抗冲击性能有显著影响。从第Ⅲ类平方和比较可以看出三因素对护膝抗冲击性能的影响从大到小依次为密度、组织结构、纱线原料。

表5 护膝抗冲击性能方差分析表

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性 $p$ 值
校正的模型	11.747 <sup>a</sup>	6.00	1.958	13.248	0.072
截距	239.218	1.00	239.218	1618.767	0.001
A	0.349	2.00	0.174	1.180	0.459
B	11.129	2.00	5.564	37.654	0.026
C	0.269	2.00	0.134	0.910	0.524
错误	0.296	2.00	0.148		
总计	251.260	9.00			
校正后的总变异	12.042	8.00			

注:R平方=0.925(调整后的R平方=0.701),因变量即抗冲击性系数。

### 2.3 护膝防护性能正交分析

对9款护膝的制动性能和抗冲击性能与试样因素(纱线原料、组织结构、密度)进行正交分析,见表6。

表6 护膝制动性能和抗冲击性能正交分析表

织物编号	因素			$K_{\text{制动}}$	因素			$K_{\text{抗冲击}}$
	A	B	C		A	B	C	
#1	1.00	1.00	1.00	17.74	1.00	1.00	1.00	3.63
#2	1.00	2.00	2.00	5.36	1.00	2.00	2.00	7.20
#3	1.00	3.00	3.00	7.88	1.00	3.00	3.00	0.02
#4	2.00	1.00	2.00	20.10	2.00	1.00	2.00	5.69
#5	2.00	2.00	3.00	5.63	2.00	2.00	3.00	1.80
#6	2.00	3.00	1.00	20.10	2.00	3.00	1.00	11.00
#7	3.00	1.00	3.00	14.49	3.00	1.00	3.00	0.19
#8	3.00	2.00	1.00	17.88	3.00	2.00	1.00	11.51
#9	3.00	3.00	2.00	11.13	3.00	3.00	2.00	5.50
均值 $K_1$	10.33	17.44	18.57		3.62	3.17	8.71	
均值 $K_2$	15.28	9.62	12.20		6.16	6.84	6.13	
均值 $K_3$	14.5	13.03	9.33		5.73	5.51	0.67	
极差 $R$	4.95	7.82	9.24		2.55	3.67	8.04	
最优	A2	B1	C1		A2	B2	C1	

由极差 $R$ 可以看出各因素对护膝制动性能的影响由大到小依次为密度、组织结构、纱线原料。每个因素的最佳水平为:纱线原料(8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱)、织物组织(细罗纹组织)、密度(紧密)。得出最优水平是A2,B1,C1。

根据因素A的 $K$ 值所得,纱线原料对护膝制动性能有一定影响, $K_2 > K_3 > K_1$ ,说明8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱的制动性能优于14tex 涤粘混纺纱+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱和7tex/144f 涤纶+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱。

根据因素B的 $K$ 值所得,织物组织对护膝制动性能有较大影响, $K_1 > K_3 > K_2$ ,各组织制动性能由大到小是:细罗纹组织、粗罗纹组织、平针添纱组织。

根据因素C的 $K$ 值所得, $K_1 > K_2 > K_3$ ,织物密度对于护膝制动性能影响最大,制动性能由大到小是:紧密、居中、一般。说明织物越紧密,制动性能越好。

由极差 $R$ 可得,影响织物抗冲击性能的因素由大到小依次是密度、组织结构、纱线原料,得出最优水平是A2,B2,C1。即材料是8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱,组织结构是平针添纱组织,密度是紧密的织物抗冲击性能最好。

根据因素A的 $K$ 值,纱线原料对织物抗冲击性能有一定影响,发现 $K_2 > K_3 > K_1$ ,说明8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱的抗冲击性好于14tex 涤粘混纺纱+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱和7tex/144f 涤纶+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱。

根据因素B的 $K$ 值,织物组织对织物抗冲击性能有较大影响,发现 $K_2 > K_3 > K_1$ ,各组织抗冲击性能由大到小是:平针添纱组织、粗罗纹组织、细罗纹组织。护膝中常用细罗纹组织,实验结果表明平针添纱组织和粗罗纹组织比细罗纹组织抗冲击性能更优,可用于护膝开发。

根据因素C的 $K$ 值,织物密度对于抗冲击性能影响最大,发现 $K_1 > K_2 > K_3$ ,各织物密度抗冲击性能由大到小是:紧密、居中、一般。说明织物越紧密,抗冲击性能越好。

### 2.4 护膝弹性正交分析

护膝需要紧密包覆人体膝部和适当的压力保证舒适性,因此需要良好的弹性<sup>[14]</sup>,因此对上述试样的弹性进行分析,采用的仪器是YG026PC-250型电子强力机,采用定伸长法,研究弹性拉伸力如表7所示。

表 7 织物弹性拉伸力值

织物编号	因素			拉伸力值	因素			拉伸力值
	A	B	C	N1	A	B	C	N2
#1	1.00	1.00	1.00	3.80	1.00	1.00	1.00	4.00
#2	1.00	2.00	2.00	5.20	1.00	2.00	2.00	5.00
#3	1.00	3.00	3.00	6.00	1.00	3.00	3.00	3.60
#4	2.00	1.00	2.00	3.90	2.00	1.00	2.00	5.40
#5	2.00	2.00	3.00	6.00	2.00	2.00	3.00	4.60
#6	2.00	3.00	1.00	6.40	2.00	3.00	1.00	4.70
#7	3.00	1.00	3.00	3.10	3.00	1.00	3.00	6.30
#8	3.00	2.00	1.00	6.00	3.00	2.00	1.00	5.00
#9	3.00	3.00	2.00	6.00	3.00	3.00	2.00	4.80
均值 K1	5.00	3.60	5.40		4.20	5.23	4.57	
均值 K2	5.43	5.73	5.03		4.90	4.86	5.06	
均值 K3	5.03	6.13	5.03		5.36	4.36	4.83	
极差 R	0.43	2.53	0.37		1.16	0.87	0.49	
最优水平	A1	B1	C2/C3		A1	B3	C1	

注:N1 是横向拉伸力值,N2 是纵向拉伸力值。拉伸力值越小,弹性越好。

根据极差  $R$  可知,影响织物横向拉伸力值的因素主要包含:B 组织结构,A 面料成分和 C 密度。横向拉伸力值和织物弹性呈负相关,根据均值  $K$  可得较优水平组合:(A1,B1,C2/C3)。

由极差  $R$  可得影响纵向拉伸力值的主要因素依次为 A 面料成分,B 组织结构,C 密度。拉伸力值与织物弹性呈负相关,拉伸力值越大,弹性越差。根据均值  $K$  可得,较优水平组合为(A1,B3,C1)。

### 3 结 论

本文通过三维动态捕捉仪器对人体摔倒进行动作捕捉,通过运动数据结合生物力学原理进行膝盖部位的受力分析,分析不同款护膝抗冲击性能和制动性能的优劣,并分析织物原料、组织结构、密度对于护膝抗冲击性能和制动性能效果以及弹性的影响,得出以下结论:

a) 佩戴护膝对人体的膝盖确有一定的防护效果,通过包覆膝部减少跌倒过程中关节扭转、过伸和弯曲造成的伤害,抵抗跌倒时来自地面的冲击力。

b) 从护膝的基本参数方面考虑,各因素与护膝防护性能相关性由大到小是密度、组织结构、纱线原料,得出纱线原料是 8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱,细罗纹组织、密度紧密的护膝制动性能最好,纱线原料是 8tex/100f 涤纶+20D 氨纶/50D 锦纶包覆纱,平针添纱组织,密度是紧密的护膝抗冲击性能最好。由此可以进行护膝的优化设计,将护膝的膝盖部位用抗冲击性能较好的面料,膝盖上部和下部用制动性能较好的面料。

c) 面料成分、组织结构、密度影响织物弹性。织物横向弹性越好,护膝包覆力越强,穿着也更加舒适。横向弹性较优的织物是 7tex/144f 涤纶+20D 氨纶/30D 锦纶包覆纱,细罗纹,密度是居中或者一般,用于护膝上下开口位置。

### 参考文献:

- [1] 周国璋. 膝关节运动损伤原因分析[J]. 中国临床康复, 2004,8(9):1695-1701.
- [2] 李宁. 老年人膝部防护系统的研制[D]. 天津:天津工业大学,2015:23-96.
- [3] 孙清峰,殷玉鹏,牛富刚,等. 新型聚氨酯运动护膝组合料的开发[J]. 聚氨酯工业,2014,3(6):38-40.
- [4] 曹楠楠,陈韶娟. 运动护具的抗冲击性和透气性研究[J]. 非织造布,2011,19(4):19-20.
- [5] 龙海如. 无缝针织内衣的尺寸特性研究[D]. 上海:东华大学,2013:4-87.
- [6] 熊宪. 纬编无缝针织圆机机构与编织工艺分析[J]. 针织工业,2009,3(4):3-8.
- [7] 赵艳艳. 经编间隔织物防护面料的开发及相关防护性能的研究[D]. 上海:东华大学,2011:2-87.
- [8] 何玲. 抗冲击无缝针织物性能研究与防护运动服开发[D]. 杭州:浙江理工大学,2014:30-116.
- [9] 董能,赵志明. 运动捕捉技术在体育领域应用及其前景分析[J]. 山西体育科技,2006(1):91-92.
- [10] 姚瑞祥,王燕珍. 行走和慢跑状态下护膝的防护效果[J]. 纺织学报,2015,36(6):106-111.
- [11] 赵焕彬,李建设. 运动生物力学[M]. 北京:北京市高等教育出版社,2008:13-16.
- [12] 吴旭波. 基于生物力学的防护性网球运动服装的研究

- [D]. 上海:上海工程技术大学,2014:2-100.
- [13] 余建英,何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 人民邮电出版社,2003:80-100
- [14] 徐军,张莉,张峰. 基于运动生物力学的网球女子沙滩排球服装压力舒适性研究[J]. 天津工业大学学报,2009(2):23-26.
- [15] 许耀玲,肖秀兰,廖金凤. 老年人跌倒原因分析及安全防护[J]. 中国临床新医学,2010,3(3):285-286.

## Research on the protective performance of seamless knee pad based on 3D dynamic capture technology

XIE Liangyu<sup>1a</sup>, YAN Yuxiu<sup>1a,b</sup>, TAO Jianwei<sup>2</sup>, JIN Zimin<sup>1c</sup>

(1a. School of Fashion Technology; b. Zhejiang Provincial Research Center of Clothing Engineering Technology; c. College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. Zhejiang Bangjie Digital Knitting Share Co. Ltd., Yiwu 322000, China)

**Abstract:** Seamless knitted fabric is fully formed fabric designed according to the human shape. Because it's comfortable to wear, it is suitable to make knee protective pad. In order to design the knee pad with good anti-impact protective performance, orthogonal experimental design was used to design three factors including yarn material, fabric structure and fabric density. Three levels were set under each factor. 9 groups of samples were weaved with seamless knitting machine. The protective performance and the elasticity of the fabric samples were tested through 3D dynamic capture system and biomechanics principle. Besides, the effects of yarn material, fabric structure and fabric density on protective performance and elasticity of samples were analyzed. The materials with good protective performance and elasticity were chosen to develop seamless knee pad. The results show that when the material is 8tex/100f polyester +20D spandex/50D polyamide coated yarn, the fabric with interlaced tissue and tight density has the best anti-impact performance, so it can be used as buffer material of the knee pad. When the material is 8tex/100f polyester +20D spandex/50D polyamide coated yarn, the material with rib-knitted tissue and tight density has the best brake performance, so it can be used as the raw material of the knee brake function. The elasticity of 7tex/144f polyester +20D spandex/30D polyamide coated yarn is good, so it is suitable for knee pad edge design. The research results provide a reference for optimization design and the development of seamless knee protection products.

**Key words:** seamless knee pad; orthogonal design; three-dimensional dynamic capture; biomechanics principle; protective performance

(责任编辑: 刘国金)