

# 基于生物力学的运动防护服装研究进展

周楠, 蒋晓文\*, 王雪婷

(西安工程大学服装与艺术设计学院, 陕西西安 710048)

**摘要:**依据生物力学原理研发的运动防护服装符合人体运动规律,可以有效预防受伤,降低肌肉受损的程度,满足运动舒适性要求。分别从防护结构设计、缓冲材料应用和减震技术研发3个方面综述运动防护服的研究现状,总结出未来运动防护服装的发展方向为服装的舒适性、功能化和智能化。

**关键词:**生物力学;运动防护服;舒适性;功能化;智能化

**中图分类号:**TS 941.731.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2020)03-0210-06

## Research Progress of Sports Protective Clothing Based on Biomechanics

ZHOU Nan, JIANG Xiaowen\*, WANG Xueting

(Apparel and Art Design College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Sports protective clothing developed based on the principles of biomechanics can effectively prevent injuries and reduce the degree of muscle damage, which is accordance with the laws of human body movement and meet the requirements of sports comfort. This paper summarized the research status of sports protective clothing from three aspects: protective structure design, cushioning material application and shock-absorption technology research and development, and concluded that the future development direction of sports protective clothing was comfort, function and intelligence.

**Key words:** biomechanics, sports protective clothing, comfort, function, intelligence

随着人们生活品质的提升和体育运动的发展,运动健康、运动防护等相关问题受到广泛关注<sup>[1]</sup>。越来越多的人有意识地在运动过程中佩戴防护护具以避免或减轻损伤<sup>[2]</sup>。运动防护装备需求的增加,推动着服装防护性能研究的进一步发展。

运动过程中,业余及职业运动员的关节、肌肉及韧带都有可能因慢性过度使用或急性暴力作用受到损伤<sup>[3]</sup>。意外损伤(如摔伤、扭伤等)占到2%;运动性损伤(如准备活动不充分、技巧动作不准确等)造成的人体损害占比98%<sup>[4]</sup>。因此,依据运动生物力学原理研制减震缓震、舒缓拉伸服装,是运动防护服的未来发展方向。文中从运动服装的舒适性及防护功能等角度对其研究现状进行梳理,以为运动防护服装研究设计提供思路。

## 1 防护结构设计

运动过程中,人体关节、肌肉、皮肤等发生形变,服装应变为褶皱、滑移、延展等束缚人体活动。运动防护服装在运动人员训练、比赛中起着至关重要的作用<sup>[5]</sup>,防护服装产生限制运动自由及不舒适的接触压力都是影响有效运动的重要因素。因此,结合运动特点和人体各部位压力分布,设计出合理的服装结构,可提高人体运动的舒适性。

运动防护服结构设计需要考虑服装合体性的要求,使服装款式和结构符合人体运动规律<sup>[6]</sup>。服装合体性强调服装贴合人体体型,服装结构、尺寸规格与人体一致<sup>[7]</sup>。添加省道、结构分割线及褶裥等是使服装产生合体效果的常用手段<sup>[8-9]</sup>,如在滑

收稿日期:2020-03-01; 修订日期:2020-03-31。

作者简介:周楠(1995—),女,硕士研究生。

\*通信作者:蒋晓文(1968—),女,教授,硕士生导师。主要研究方向为服装舒适性与功能性。Email:xwenj20134@163.com

雪服的肘部和膝部设计分割线<sup>[10]</sup>,提高活动功能性,具体如图1所示。设计骑行服时,因人体活动时前屈幅度较大,一般在后片变化结构:通过分析骑行自行车时人体的运动特征,采用袖肘部前弯的造型及上衣前短后长的设计<sup>[11]</sup>,具体如图2所示;摩托车骑行姿势中屈体动作较多,前倾时前片腰部堆积、后片显得稍短,采取前片适当减短、后片加长的处理<sup>[12]</sup>。

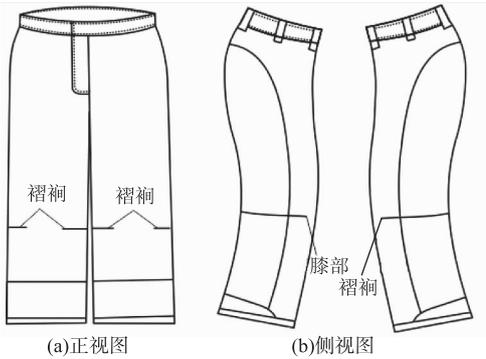


图1 滑雪服膝部设计

Fig.1 Knee design of the ski suit



图2 迪卡侬自行车骑行服

Fig.2 Decathlon cycling clothes

基于生物力学研发的运动防护服装对相应部位韧带、肌肉加压,有助于肌肉运动,支撑关节,舒缓过度拉伸,提高竞技水平。文献[13-15]通过肌电测试、压力测试实验研究服装紧身程度、压力分布规律与运动表现、人体舒适性指标之间的关系,旨在提高防护服在运动过程中的舒适性与防护性。陈金鳌<sup>[16]</sup>发现在高强度跑步运动中,高度紧身负荷加快肌肉力竭,中度紧身负荷一定程度上有利于维持运动人员的有氧运动。张同会等<sup>[17]</sup>依据不同骑行状态下人体14个部位服装压力值,设计骑行裤的款式、结构,有效舒缓运动过程中的肌肉损伤。

## 2 缓冲材料应用

在运动防护服装的设计中,材料的性能尤为重

要。运动过程中的冲击会使关节、肌腱和肌肉受到较大的机械力,产生生理应激,损害人体。缓冲材料能够减少碰撞所产生的冲击力和振动,达到保护人体的目的。

### 2.1 气囊应用

防护服装设计中应用缓冲气囊目的是在机车骑行或极限运动中提供一种能迅速打开的安全气囊,通过其缓冲或吸收冲击负荷,降低意外损伤几率或减轻骨骼、肌肉受伤程度。目前,气囊触发系统核心以传感器感知角速度、加速度信号变化判断是否启动气囊<sup>[18]</sup>。摩托车装备品牌Dainese推出D-air Misano1000防护夹克,服装背部配备多个传感器,以800次/s频率监测骑手状态,同时内置GPS等电子设备,当监控到骑手情况异常时,充气系统即刻启动,气囊可为骑手的背部、锁骨和胸部提供保护,具体如图3所示。In & Motion品牌推出的Spine VPD 2.0气囊背心如图4所示。图4中的气囊背心采用集成式传感器监测冲击负荷,以1000次/s的频率监测滑雪运动员的运动状态,判断运动员即将遭受意外时,立刻释放气囊,为其脊椎、脖颈、胸口、下腹及臀部提供减震保护<sup>[19]</sup>。



图3 D-air Misano 1000 夹克

Fig.3 D-air Misano 1000 jacket



图4 Spine VPD 2.0 空气气囊背心

Fig.4 Spine VPD 2.0 air bag vest

### 2.2 新型材料应用

2.2.1 STF-纺织材料 正常状态下剪切增稠液体(shear thickening fluid, STF)是一种分散胶体,其中自由悬浮着许多特殊的粒子,这种球形硅微粒是自

自然界中最坚硬的非金属材料之一。当受到外力高速冲击时,STF 黏性迅速增加,变为坚硬的固体,外力消失后又恢复为原来的柔韧状态。

STF 与纺织纤维的结合应用广泛。如采用 STF 浸渍 Nylon, Kevlar 等纤维制备防护性能优良的 STF-纺织材料<sup>[20-22]</sup>,在改善材料防刺、防弹性能的同时,减轻织物质量提高其舒适性<sup>[23-25]</sup>。目前,STF 在防刺穿材料、液体装甲和防弹装甲方面应用最为广泛<sup>[26]</sup>。由剪切增稠液体体系与高性能纤维混合制成的剪切增稠防刺布,具有面料薄、柔软舒适、防刺性能优的特点<sup>[27]</sup>;液体装甲是指利用 STF 处理过的高性能纤维织物,质轻、体积小,防护性及柔韧性优越;防弹装甲进行防弹保护时,STF 与织物共同发挥作用,剪切增稠体系黏度增大可阻止织物中纤维与纱线之间相对滑移,织物通过变形吸收能量。运动服装制作中应用 STF-纺织材料,不仅可以满足人体相应部位的防护需求,而且防护性能不会因动作幅度过大而降低。

**2.2.2 D3O 凝胶材料** 正常情况下,D3O 凝胶材料呈柔性、可弯曲状态,一旦受到外力撞击,常态下可自由运动的分子在 0.001 s 内会迅速停止运动并交错在一起,使材料呈现坚硬状态,减缓外部撞击力,当外力消逝后凝胶又回复至柔软状态<sup>[28]</sup>。D3O 凝胶材料的防护性能较其他防护类材料(如氯丁橡胶和聚乙烯)更为坚固,且因常态下柔软不束缚人体活动而多被应用于运动防护领域<sup>[29]</sup>。目前,D3O 在摩托车骑行服、滑雪服上应用广泛,加拿大和美国的运动员已开始使用 D3O 材料制作的竞技装备。

**2.2.3 三维空间的复合材料** Dow Corning 积极防护系统及其横截面如图 5 所示。

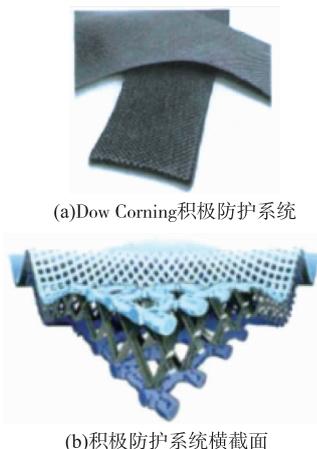


图 5 Dow Corning 积极防护系统及其横截面  
Fig. 5 Dow Corning active protection system and its cross section

积极防护系统是由间隔织物和硅树脂复合而成的三维空间结构复合材料<sup>[30]</sup>,具有良好的舒适性和缓冲性。该材料在外力作用下,其受力区域的硅树脂遭受冲击变成坚硬固体,并将冲击力逐步分散至相邻间隔纱,减缓冲击负荷;外力消失后,硅树脂快速转化为柔性状态。此外,该材料易裁剪、可缝纫、可水洗,且具有良好的稳定性,在高温或潮湿条件下,防护效果也不会受到影响。目前,这种材料在曲棍球、足球等接触式运动防护领域应用广泛。

### 3 减震技术研发

运动过程中,肌肉通过形变吸收外力、分散冲击负荷,达到防护目的。运动防护服装中应用减震技术,可以辅助肌肉发力或衰减冲击力,从而维持关节稳定、节省人体能耗。目前,Hex Pad 技术、RPT 技术和 Warrior Tech 技术在运动防护领域开始应用。

#### 3.1 Hex Pad 技术

Hex Pad 技术产品如图 6 所示<sup>[31]</sup>。迈克达威品牌的护具设计中采用 Hex Pad 技术,旨在舒缓运动过程中外力冲击,满足运动防护性需求。肘部、膝部等关键部位的独立六边形聚乙烯衬垫搭建成蜂窝状,质轻贴身。该衬垫在均匀分散外力冲击的同时,还能起到支持体力、配合人体发力的作用。目前,该技术常用于跑步、篮球等剧烈运动的防护装备中。



图 6 Hex Pad 技术产品  
Fig. 6 Hex Pad technical products

#### 3.2 RPT 技术

G-FORM 品牌的运动防护产品应用其独有的 RPT 技术,在发生碰撞时可吸收 90% 以上的冲击力<sup>[32]</sup>,有效预防损伤及降低受伤程度。防护产品采用压纹设计和减震衬垫,具有良好的防护性、耐压性、耐磨性;其外观沟壑依据人体骨骼结构设计,贴

合人体曲线,具有良好的穿着舒适性,可提升运动员竞技水平。目前,RPT技术已广泛应用于球类、竞速自行车、滑雪、登山等高强度、高危险性项目的竞技装备中,为肩部、脊柱、臀部、腿部、肘关节、膝盖、胫骨等部位提供防护。

### 3.3 Warrior Tech 技术

SPIDI 品牌的护具如图 7 所示<sup>[33]</sup>。SPIDI 品牌的护具设计中运用 Warrior Tech 技术,旨在骑行过程中意外发生时为骑手提供有效防护。该类护具的设计符合人体工学,其外观采用独特的 3D 方格设计,能够有效分散冲击负荷,3D 方格贴合人体关节,满足骑手对骑行姿势的需求。此外,方格间的气道设计可大幅减少与地面摩擦时的热能。因此,Warrior Tech 技术的应用,为骑手提供了具有优良防护性和舒适性的护具。



图7 Warrior Tech 技术产品

Fig.7 Warrior Tech technical product

## 4 发展趋势

现阶段,依据生物力学研发的运动防护服从结构设计、缓冲材料和减震技术应用着手,预防运动损伤和降低人体受到冲击后的损伤程度。随着高分子材料、智能化技术的快速发展以及运动过程中人们对竞技表现和安全防护需求的提高<sup>[34]</sup>,未来运动防护服装应向舒适性、功能化与智能化方向发展。

1) 协调舒适性与防护性的关系。目前,运动防护服的防护性能基本能够满足,但舒适性能还需要进一步改善,提高运动防护服的舒适性能是未来研究趋势之一。影响服装压力的因素主要是人体和服装<sup>[35]</sup>,因此基于运动姿势、人体关节活动及皮肤拉伸等因素建立不同运动状态下人体各部位舒适压力阈值,并进行服装结构调整,可有效提高服装压力舒适性<sup>[36]</sup>。此外,运动防护服的热湿舒适性与服装材料的透湿性、透气性等因素有关<sup>[37-38]</sup>。采用化学、物理方法改善纤维及纱线形态结构或利用复合方式(如涂层法、压层法等)改进面料,能够显著

提高服装的热湿舒适性<sup>[39]</sup>。

2) 改进纤维、织物加工技术。新材料、新织物的复合、加工、整理使运动服装呈现出高性能化发展趋势。高性能织物集高性能纤维与新技术工艺于一体<sup>[40]</sup>。高性能纤维应依据纤维特性,从工艺和设备出发,采取合理的染整加工方法。因此,为实现纤维、织物的高性能化、高效化生产,应对常规纺织工艺技术和加工装备进行创新<sup>[41]</sup>。

3) 提高运动防护服智能化水平。目前,智能服装的研究热点主要集中在微电子系统、智能纤维技术方面。运动防护服中应用微电子系统制备电子化智能防护服,使其不仅能够预警、定位、监控、感知周围环境并对其变化或刺激作出反应,还可兼顾保健和生命安全防护作用。运动防护服中合理运用智能纤维(如相变纤维能够感知环境温度变化并进行温度调节,具有较好的调温功能<sup>[42]</sup>),可制备舒适性能优异的运动防护服。智能化运动防护服更受运动爱好者及专业运动员的青睐,是未来运动防护服发展趋势<sup>[43]</sup>。

## 5 结语

目前,运动防护服装的研究重点是符合人体运动规律、协助肌肉运动、减震防护等。基于运动生物力学原理设计服装结构、研发材料与技术,不仅能够保证运动防护服装良好的防护性,还有利于实现更好的运动舒适性。当下,体育运动快速发展,针对不同运动类型建立起运动防护参数的数据库,指导设计各种运动防护服装也是运动防护服研究方向。未来依据运动生物力学等原理衍生出的运动防护产品兼具舒适性、功能化与智能化,可有效预防运动损伤和降低人体受到冲击后的损伤程度,提升运动员竞技水平。

### 参考文献:

- [1] 李长安,鲁虹.腰部运动损伤防护智能服装的研发[J].纺织学报,2020,41(2):119-124.  
LI Cheng'an, LU Hong. Research and development of smart garments for waist muscle injury protection [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(2): 119-124. (in Chinese)
- [2] 李媛,谢红,邓红琼,等.运动护具对网球运动中上肢防护的影响[J].毛纺科技,2018,46(6):71-77.  
LI Yuan, XIE Hong, DENG Hongqiong, et al. Influence of sports gears on upper limb protection in tennis [J]. Wool Textile Journal, 2018, 46(6): 71-77. (in Chinese)

- [3] 李世伟, 谢红, 宋亚男, 等. 投掷运动肩部肌肉群防护装备效果[J]. 服装学报, 2016, 1(1): 35-38.  
LI Shiwei, XIE Hong, SONG Yanan, et al. Study on the effect of the protective equipment of the shoulder muscles of the throwing motion[J]. Journal of Clothing Research, 2016, 1(1): 35-38. (in Chinese)
- [4] 汪世奎, 谢红, 曹蕊超, 等. 基于运动生物力学防护服装的研究[J]. 纺织导报, 2014(1): 91-93.  
WANG Shikui, XIE Hong, CAO Ruichao, et al. A study on protective cloths based on sports biomechanics[J]. China Textile Leader, 2014(1): 91-93. (in Chinese)
- [5] 徐军, 张莉, 张峰. 基于运动生物力学的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, 28(1): 23-26.  
XU Jun, ZHANG Li, ZHANG Feng. Comfortableness research of female beach volleyball clothes based on movement biological mechanics[J]. Journal of Tiangong University, 2009, 28(1): 23-26. (in Chinese)
- [6] 牛宏颐, 李晓英. 运动服装设计要素及其应用分析[J]. 针织工业, 2013(8): 45-49.  
NIU Hongyi, LI Xiaoying. Design element of sportswear and its application[J]. Knitting Industries, 2013(8): 45-49. (in Chinese)
- [7] 张文斌. 服装工艺学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2001: 167-170.
- [8] 刘需, 赵欲晓. 基于工效性能的骑行服装研究进展[J]. 上海纺织科技, 2017, 45(1): 5-7.  
LIU Xu, ZHAO Yuxiao. Advances in jersey ergonomics based on performances[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2017, 45(1): 5-7. (in Chinese)
- [9] 徐青青, 孙鹏. SARS 医用防护服结构的功能性设计[J]. 西安工程大学学报, 2003, 17(3): 225-228.  
XU Qingqing, SUN Peng. Design of the structure and function of medical protective clothing for anti-SARS[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2003, 17(3): 225-228. (in Chinese)
- [10] 李亚男. 户外滑雪运动服装的研究及功能性设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- [11] 常丽霞. 自行车运动服装的舒适性与功能性研究[J]. 针织工业, 2014(6): 60-63.  
CHANG Lixia. A research on comfort and functionality of cycling wears[J]. Knitting Industries, 2014(6): 60-63. (in Chinese)
- [12] 张倩. 专业摩托车运动防护服装研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014.
- [13] 陈金鳌, 陆阿明, 徐勤儿. 紧身压迫对踏蹬至疲劳过程中股直肌表面肌电特征的影响[J]. 天津体育学院学报, 2012, 27(3): 264-269.  
CHEN Jin'ao, LU Aming, XU Qin'er. Effect of tight-fitting sportswear on characteristics of sEMG on rectus femoris during cycling motion to fatigue[J]. Journal of Tianjin University of Sport, 2012, 27(3): 264-269. (in Chinese)
- [14] 张同会, 冀艳波. 基于骑行动作分析的骑行裤压力舒适性研究[J]. 针织工业, 2019(1): 62-66.  
ZHANG Tonghui, JI Yanbo. Pressure comfort of cycling pants based on cycling motion analysis[J]. Knitting Industries, 2019(1): 62-66. (in Chinese)
- [15] 吴志明, 王美丽. 基于舒适性的运动胸衣分区设计[J]. 纺织学报, 2010, 31(4): 103-108.  
WU Zhiming, WANG Meili. Sectional design of sports bra based on comfortability[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(4): 103-108. (in Chinese)
- [16] 陈金鳌. 外加紧身压迫对下肢高强度跑至力竭运动特征的影响[J]. 河北体育学院学报, 2016, 30(3): 73-80.  
CHEN Jin'ao. Effect of outside imposed tight compression on characteristics of lower limbs' high-intensity exhaustive running exercise[J]. Journal of Hebei Sport University, 2016, 30(3): 73-80. (in Chinese)
- [17] 张同会, 冀艳波, 魏福红. 基于压力舒适性的骑行裤优化设计[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(3): 260-265.  
ZHANG Tonghui, JI Yanbo, WEI Fuhong. Optimized design of the cycling pants based on pressure comfort[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2018, 32(3): 260-265. (in Chinese)
- [18] TAMURA T, YOSHIMURA T, SEKIN M, et al. A wearable airbag to prevent fall injuries[J]. Information Technology in Biomedicine, 2009, 13(6): 910-914.
- [19] 李琴. 气囊式防摔功能服设计研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [20] HASSAN T A, RANGARI V K, JEELANI S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites[J]. Materials Science and Engineering, 2010(12): 2892-2899.
- [21] LEE Y, WETZEL E D, WAGNER N J. The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(13): 2825-2833.
- [22] 刘君, 熊党生, 熊华超. 剪切增稠流体浸渍 Kevlar 复合材料的防刺性能[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 271-274.  
LIU Jun, XIONG Dangsheng, XIONG Huachao. Stab resistance of Kevlar composites impregnated with shear thickening fluid[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 34(2): 271-274. (in Chinese)
- [23] SRIVASTAVA A, MAJUMDAR A, BUTOLA B. Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: a review[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2012, 37: 115-129.

- [24] GONG X, XU Y, ZHU W, et al. Study of the knife stab and puncture-resistant performance for shear thickening fluid enhanced fabric [J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(6): 641-657.
- [25] 熊芳,周大利,顾建文,等. Kevlar 纤维布/剪切增稠液复合材料制备及防刺性能[J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(4): 130-133.
- XIONG Fang, ZHOU Dali, GU Jianwen, et al. Preparation and stab-resistance study of Kevlar fabrics / shear thickening fluid composite [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2013, 34(4): 130-133. (in Chinese)
- [26] 白艳. 剪切增稠液体的性能及在纺织中的应用[J]. *上海纺织科技*, 2014, 42(8): 29-31.
- BAI Yan. Property of shear thickening fluid and its application in textiles [J]. *Shanghai Textile Science and Technology*, 2014, 42(8): 29-31. (in Chinese)
- [27] LI H. Synthesis and stab resistance of shear thickening fluid (STF) impregnated glass fabric composites [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2012, 20: 95.
- [28] 徐晓锋. 新材料 D30 造就的神奇滑雪服[J]. *中国纤维检验*, 2006(5): 48.
- XU Xiaofeng. New material D30 makes a magical ski suit [J]. *China Fiber Inspection*, 2006(5): 48. (in Chinese)
- [29] 王雅娴,李艳梅. 老年摔倒防护服装的开发现状及其发展趋势[J]. *毛纺科技*, 2019, 47(9): 84-88.
- WANG Yaxian, LI Yanmei. Development status and trend of fall-prevention garments for the elderly [J]. *Wool Textile Journal*, 2019, 47(9): 84-88. (in Chinese)
- [30] BUDDEN G. 防护与舒适并存的新型抗机械冲击防护服[J]. *纺织导报*, 2006(9): 62-63.
- BUDDEN G. New impact protection textile provides defense and comfort [J]. *China Textile Leader*, 2006(9): 62-63. (in Chinese)
- [31] 阮兰. 运动防护服装复合材料的碰撞防护性能研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2016.
- [32] PIERCE A. Reactive protection technology [J]. *Tech Directions*, 2012, 72(1): 10-11.
- [33] MOTO. 摩托护具 SPIDI 有哪些黑科技? [EB/OL]. (2018-04-20) [2020-03-26]. <http://www.newmotor.com.cn/html/cmhd/91828.html>.
- [34] 李晓慧. 功能性运动服装的前景研究[J]. *北京体育大学学报*, 2005(3): 426-427.
- LI Xiaohui. Perspective on functional sports suits [J]. *Journal of Beijing Sport University*, 2005(3): 426-427. (in Chinese)
- [35] 程宁波,吴志明. 服装压力舒适性的研究方法与发展趋势[J]. *丝绸*, 2019, 56(3): 38-44.
- CHENG Ningbo, WU Zhiming. Research method and development tendency of garment pressure comfort [J]. *Journal of Silk*, 2019, 56(3): 38-44. (in Chinese)
- [36] 高冉,石圆圆,张惠,等. 基于肩臂结构的高功能运动服装结构优化设计[J]. *北京服装学院学报(自然科学版)*, 2018, 38(4): 59-67.
- GAO Ran, SHI Yuanyuan, ZHANG Hui, et al. Structural optimization design of high-performance sportswear based on shoulder and arm structure [J]. *Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 38(4): 59-67. (in Chinese)
- [37] 刘瑜,刘咏梅. 大运动量条件下的运动服装舒适性研究[J]. *体育科学*, 2004(11): 71-73.
- LIU Yu, LIU Yongmei. Research on comfort of sportswear under condition of maximal training volume [J]. *China Sport Science*, 2004(11): 71-73. (in Chinese)
- [38] 阎迪,郝爱萍. 功能性防护服及新材料应用[J]. *棉纺织技术*, 2012, 40(2): 65-68.
- YAN Di, HAO Aiping. Functional protective clothing and new material application [J]. *Cotton Textile Technology*, 2012, 40(2): 65-68. (in Chinese)
- [39] 陆丽娅,张辉. 防护服舒适性的改进研究进展[J]. *北京服装学院学报(自然科学版)*, 2014, 34(3): 38-45.
- LU Liya, ZHANG Hui. Review of the advancement in protective clothing comfort [J]. *Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 34(3): 38-45. (in Chinese)
- [40] 李红燕,张谓源,李俊. 功能服装的研究综述[J]. *丝绸*, 2007(4): 45-47.
- LI Hongyan, ZHANG Weiyuan, LI Jun. Literature review of functional clothing [J]. *Journal of Silk*, 2007(4): 45-47. (in Chinese)
- [41] 罗益锋,罗晰旻. 世界高性能纤维及复合材料的最新发展与创新[J]. *纺织导报*, 2015(5): 22-24.
- LUO Yifeng, LUO Ximin. The latest development of high-performance fibers and composites in the world [J]. *China Textile Leader*, 2015(5): 22-24. (in Chinese)
- [42] 于佐君,张冰洁,孙健. 功能性材料创新在智能服装发展中的应用[J]. *西安工程大学学报*, 2019, 32(2): 129-135.
- YU Zuojun, ZHANG Bingjie, SUN Jian. Application of functional textile materials innovation on intelligent clothing development [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2019, 32(2): 129-135. (in Chinese)
- [43] 张鑫哲,陈丽华. 高性能运动服装发展现状与趋势[J]. *纺织导报*, 2010(5): 105-107.
- ZHANG Xinzhe, CHEN Lihua. Status quo and tendency of high performance sports wear [J]. *China Textile Leader*, 2010(5): 105-107. (in Chinese)