

文章编号:1004-7220(2018)05-0429-06

锁骨骨折单肩气囊外固定器的力学分析

赵永信¹, 李鼎斌², 毛汉领³, 李欣欣³, 覃小倩³

(1. 广西工业职业技术学院 机械工程系, 南宁 530001; 2. 广西骨伤医院 骨伤科, 南宁 530012;
3. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

摘要:目的 针对传统外固定器存在的问题,发明一种新型的单肩气囊外固定器,分析评价该新型单肩气囊外固定器所产生的复位拉伸力。**方法** 建立人体锁骨的三维有限元模型,对单肩气囊外固定器的加载状况及所产生的复位拉伸力进行全面系统分析,并与传统“8”字绷带外固定器的情况进行对比分析。同时,通过观察实验,对比分析单肩气囊外固定器和传统“8”字绷带外固定器的实际加载情况。**结果** 单肩气囊外固定器所产生的复位拉伸力比传统外固定器更均匀而且较大,并可由患者自己调节。**结论** 单肩气囊外固定器对人体肩部的作用力及加载方式更加利于锁骨骨折的拉伸复位和维持锁骨骨折复位位置,而且使得锁骨骨折患者更加舒适。

关键词:锁骨骨折; 外固定器; 力学分析; 实验分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.05.008

Mechanical Analysis of Single Shoulder Airbag External Fixator for Clavicle Fractures

ZHAO Yongxin¹, LI Dingbin², MAO Hanling³, LI Xinxin³, QING Xiaoqian³

(1. Department of Mechanical Engineering, Guangxi Vocational and Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China; 2. Department of Orthopaedics and Traumatology, Guangxi Orthopedic and Traumatology Hospital, Nanning 530012, China; 3. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Objective In view of the problems existing in traditional external fixator, to invent a novel single shoulder airbag external fixator, and evaluate the reductional stretch force produced by it. **Methods** The three-dimensional finite element model of human clavicle was established. The loading conditions of the single shoulder airbag external fixator and the reductional stretch force produced by the external fixator were analyzed comprehensively and systematically. The actual loading conditions of the single shoulder airbag external fixator and the traditional eight-figure bandage external fixator were compared and analyzed by experiment. **Results** Reductional stretch force produced by the single shoulder airbag external fixator was more uniform and larger than that produced by traditional external fixator, and could be adjusted by the patient himself. **Conclusions** The force and the loading method of the single shoulder airbag external fixator on the shoulder were more favorable for the stretched reduction of clavicle fractures and maintaining the position of clavicle fractures, and it could make the patients with clavicle fractures more comfortable.

Key words: clavicle fractures; external fixator; mechanical analysis; experimental analysis

收稿日期:2017-10-25; 修回日期:2017-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51365006), 广西科学研究与技术开发技术项目课题(桂科攻0632007-2E)

通信作者:李鼎斌,教授,硕士研究生导师,E-mail:1454125558@qq.com

研究表明,手术和保守治疗对锁骨骨折的复位各有优缺点^[1-4],保守治疗相对来说副作用较少^[5],而手术治疗则在复位方面表现良好。对于非开放性、非粉碎性锁骨骨折,临床多采用拉伸复位外固定器处理这种保守治疗的方式。有研究者观察了几种“8”字绷带治疗锁骨骨折效果,结果表明,“8”字绷带基本能使骨折端逐渐复位,但也会出现弹力绷带的松紧度难以掌握、早期固定过紧和患者佩戴后活动不便等缺点^[6-7]。针对传统“8”字绷带的这些不足,本课题组李鼎斌主任医生发明了一种新型单肩气囊外固定器,佩戴者可自行调节固定器的松紧度,使骨折达到更好的复位效果,有助于锁骨骨折的愈合康复,且不影响健肢活动。

目前,多数研究利用 CT 扫描数据、Mimics 和 ANSYS 软件建立肩关节有限元模型,通过设置不同的边界条件,分析锁骨的生物力学特性^[8-10]。但是有关外固定器对锁骨施加载荷的力学分析以及外固定器作用于锁骨后产生复位拉伸的研究,却鲜有报道。本文在之前对锁骨骨折复位拉伸力优化加载方案模拟分析研究的基础上^[11],通过建立锁骨的三维有限元模型,对新发明的单肩气囊外固定器的加载状况及所产生的复位拉伸力进行全

面系统的分析^[12],以期更好地揭示该单肩气囊外固定器对人体肩部的施力加载及产生复位拉伸力的优点,并与传统“8”字绷带外固定器的实际加载情况进行对比分析。结果表明,单肩气囊外固定器的加载状况及所产生的复位拉伸力更加利于锁骨骨折的拉伸复位,而且使得锁骨骨折患者更加舒适。

1 分析模型

在前期研究中,在 1 名锁骨完整的男性志愿者(年龄:32 岁,身高:170 cm)CT 扫描数据基础上,通过 Mimics 软件建立了人体左侧肩部的三维模型^[11],该模型包括 16 985 个单元、31 801 个节点,其中锁骨有限元模型包括 3 662 个单元,6 498 个节点,模拟实际的人体肩部模型[见图 1(a)]。设定约束条件为:锁骨的胸锁关节面、肩锁关节、盂肱关节所有节点的自由度为 0;肩胛骨往前的线位移为 0。肩胛骨达到平衡后会受到一个冠状轴(X 轴)方向上的位移约束。设 θ 为 F_1 在 XOY 平面(水平面)上与 Y 轴(矢状轴)正方向的夹角(取逆时针方向为正), η 为 F_1 在 YOZ 平面(矢状面)上与 Y 轴正方向的夹角(取逆时针方向为正)[见图 1(b)]。

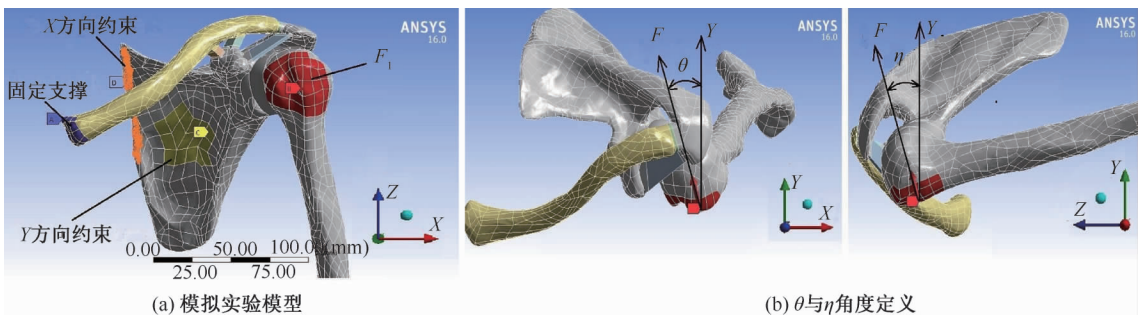


图1 模拟实验模型及角度定义

Fig. 1 Experimental model for simulation and angles definition

(a) Experimental model for simulation, (b) Angle definition

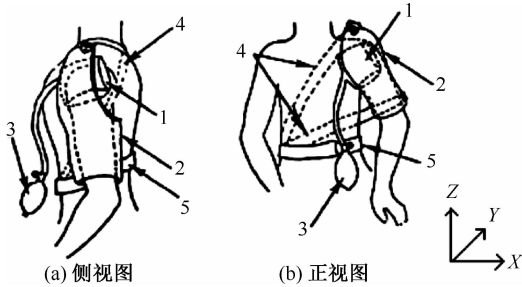
2 外固定器加载方式分析

2.1 单肩气囊外固定器加载方式分析

单肩气囊外固定器的作用载荷是面载荷,而传统“8”字外固定器的作用载荷相当于穿过人体腋下的线载荷。单肩气囊外固定器主要由上臂袖套、海绵垫、黏胶带、扎带、可充放气气囊等组成(见图2)。从袖套顶端引出的后置扎带(扎带1)为患者伤肩提

供向后和向上的合力。从袖套底端引出的后置扎带(扎带2)将伤者的上肢固定于外展后伸位,用以提供向外和向后的合力。为保持外固定器平衡,添加1条从上臂袖套顶端引出的前置扎带(扎带3)。3条扎带的另一端均连接到腰部的黏胶带上。

简化的上臂袖套受力如图3(a)所示,图3(b)~(d)分别为人体左肩佩戴袖套的右视、主视和俯视图。其中, R_i 为扎带*i*给上臂袖带的矢量



1-气囊, 2-上臂袖套, 3-气压泵, 4-海绵垫扎带, 5-黏胶带
图2 锁骨骨折单肩气囊外固定器

Fig.2 Single shoulder airbag external fixator for clavicle fractures
(a) Lateral views, (b) Front view

力(i 为扎带编号, $i=1,2,3$); F_1 、 F_2 分别为肩部、上

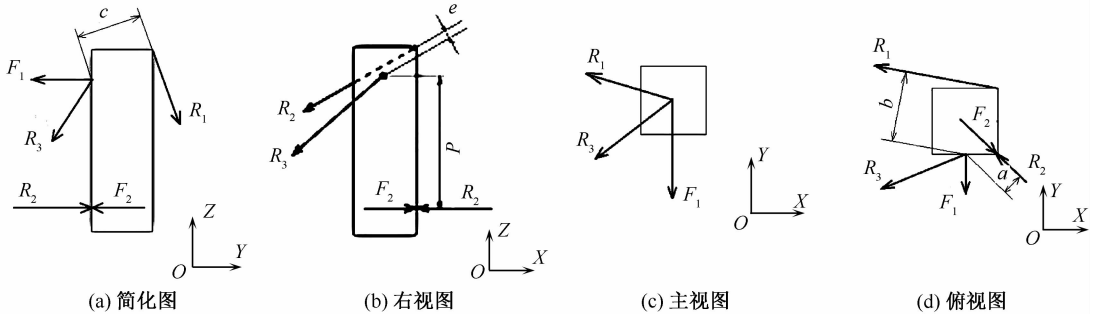


图3 锁骨骨折单肩气囊外固定器受力分析图

Fig.3 Stress analysis diagram for single shoulder airbag external fixator (a) Simplified diagram, (b) Right view, (c) Main view, (d) Vertical view

2.2 传统“8”字外固定器加载方式分析

使用“8”字型绷带外固定器治疗锁骨骨折是最常见的一种传统固定方法。主要使用两个布质的圆环套住人体双侧肩部,在背部用绷带将两环连接束缚住,并以此为错位的锁骨提供复位拉伸力(见图4)。

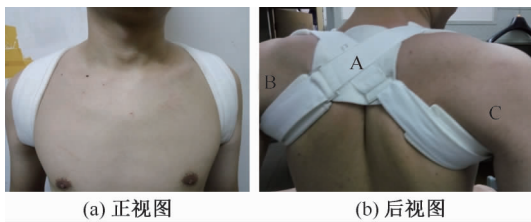


图4 “8”字锁骨带

Fig.4 Eight-figure bandage external fixator (a) Front view, (b) Back view

针对左肩一侧,忽略次要方向上的压应力影响,可将该部分视为1个受拉二力杆,则通过分析等效二力杆两 endpoints 的位置,即可确定左侧肩部对“8”字绷带,等效集中力的作用方位。根据牛顿第

二定律,可反求8字绷带对左肩等效集中载荷的作用方位。取该外固定器两环连接处中点为A点,外固定器与肩部接触处距A点最远端位置按左右分别定为B、C点,则A、B点分别为等效二力杆的两端点。通过测量A、B点位置,可确定“8”字绷带对人体肩部作用载荷方向的 θ 值范围为 $50^\circ \sim 70^\circ$,其 η 值范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$,具体数值因人而异。通过上述两种外固定器对肩部作用载荷的力学分析结果见表1。

肢给上臂袖带的矢量力; X 、 Y 、 Z 分别为在 X 、 Y 、 Z 轴方向投影分量; $a \sim e$ 分别表示某特定距离。
直接根据受力平衡求解会得到超静定方程,故需要按照实际情况对其进行减少变量或添加协调方程的方法来求解。综合力的方向可知,单肩气囊外固定器在肩部作用力在人体水平面的投影与矢状轴的夹角 θ 趋向于 90° 。在实际安装中,扎带1、3的方向会根据身高、体型等原因而不同,但可以确定其方向在人体矢状面(YOZ 面)与垂直轴(Z 轴)的夹角, $\eta < 45^\circ$ 。通过其作用位置离锁骨水平位置的距离,可以直观地看出在肩部远离锁骨一侧的边缘。

二定律,可反求8字绷带对左肩等效集中载荷的作用方位。取该外固定器两环连接处中点为A点,外固定器与肩部接触处距A点最远端位置按左右分别定为B、C点,则A、B点分别为等效二力杆的两端点。通过测量A、B点位置,可确定“8”字绷带对人体肩部作用载荷方向的 θ 值范围为 $50^\circ \sim 70^\circ$,其 η 值范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$,具体数值因人而异。通过上述两种外固定器对肩部作用载荷的力学分析结果见表1。

表1 等效集中载荷分析结果

Tab.1 Analysis of equivalent concentrated loads

固定器	θ	η	作用位置
单肩气囊	远大于 45° ,趋向 90°	$< 45^\circ$	靠外
传统“8”字绷带	$0^\circ \sim 70^\circ$	$0^\circ \sim 30^\circ$	靠内

3 外固定器复位拉伸力对比分析

3.1 加载方位不同所产生的复位拉伸力对比分析

根据所建人体肩部有限元模型,分别选取网格1、2为单肩气囊外固定器和传统外固定器对肩部作

用的等效集中载荷的作用位置。设置两个幅值相等、大小为 10 N 的力,分别模拟单肩气囊外固定器和传统外固定器对肩部的作用,其中作用于单肩气囊外固定器的载荷的 θ 和 η 分别为 85° 和 -60° ;作用于传统外固定器的载荷的 θ 和 η 分别为 60° 和 15° 。

将设定的两种外固定器实际加载作用于锁骨模型,得到锁骨应力分布(见图 5)。图 5 中红色部分为拉应力,蓝色部分为压应力,颜色越密集则表示该区域应力越大。由复位拉伸应力集中区域可以看出,在 10 N 载荷下,单肩气囊外固定器在锁骨骨折部位上产生的应力面积相对较宽,使患者更舒适。单肩气囊外固定器加载后所产生的最大拉伸应力为 562.73 kPa,传统“8”字外固定器所产生的最大拉伸应力为 477.61 kPa,显然单肩气囊外固定器更利于锁骨骨折的复位。在模型自由度设定的情况下,载荷的作用会完全传递到锁骨上,出现较大应力是建立模型时简化边界条件后不可避免的结果。但是本文旨在比较两种固定器在同样加载力下所产生的拉伸复位力大小,故这种较大应力并没有影响。

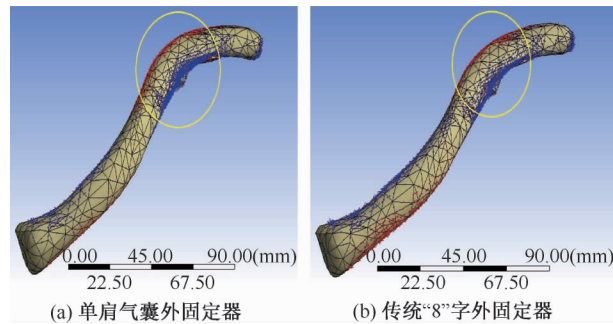


图 5 外固定器实际加载后的锁骨应力分布
Fig. 5 Stress distributions of clavicle under loading of external fixators (a) Single shoulder airbag external fixator, (b) Eight-figure bandage external fixator

3.2 可调性所产生的拉伸复位力对比分析

由于单肩气囊外固定器有 1 个气囊,可以调节固定器加载在人体肩部的载荷大小,而传统“8”字外固定器并没有调节装置,对单肩气囊外固定器设置依次增大的载荷大小,模拟分析气囊气压逐渐增大后对锁骨拉伸复位的影响。

保持单肩气囊外固定器加载方位(θ 、 η 、位置)不变,改变加载力大小,获得加载力(F)和复位拉伸应力(σ)的关系(见图 6)。在一定条件下,加载力和复

位拉伸力成正比例关系,随着所加囊压力的增大,对锁骨复位越好。由此可知,单肩气囊外固定器所设计的气囊既可以使患者方便地自我调节,也有利于锁骨骨折复位。而传统的“8”字外固定器则不能使得患者方便地自我调节,患者佩戴后会很不舒服。

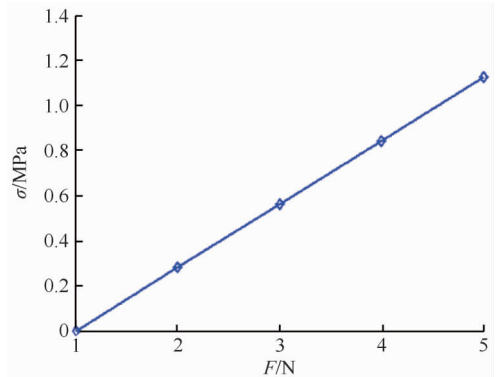


图 6 加载力和复位拉伸应力的关系
Fig. 6 Relationship between the loading force and reductional stretch force

4 观察实验

4.1 实验方案

4.1.1 实验目的 对比传统“8”字绷带外固定器和单肩气囊外固定器对肩关节部分加载后的作用力的分布情况。

4.1.2 实验原理 压力测试纸的显色和锡纸的变形情况可以直观反映出测试对象所受的压力分布^[13-14]。

4.1.3 实验器材 实验器材主要包括感压测试包(型号:4LW—HHW)、“8”字绷带、单肩气囊外固定器、医用胶布、锡纸。

4.1.4 实验步骤 (1) 将“8”字绷带和单肩气囊外固定器正确地安装在志愿者身上,在不给志愿者造成明显不适的前提下,调节绷带使得绷带对志愿者产生的向后的张力尽量大,用笔画出绷带在人体从肩缝到腋下所占的区域,然后卸下绷带。

(2) 从感压测试包中拿出 4LW 型测试纸,将 A、C 片的粗糙面相接,将相接好的胶片用胶布粘贴在志愿者身上,使得其尽量覆盖住第 1 步所画的区域,再将“8”字绷带、单肩气囊外固定器分别安装在志愿者身上,2 min 后,将外固定器卸下,并取下压力测试纸,观察显色情况^[15]。

(3) 按照以上步骤,把压力测试纸换成锡纸重复实验,并观察所得结果。

4.2 实验结果对比

传统“8”字绷带外固定器和单肩气囊外固定器所得显色结果如图7(a)所示。“8”字绷带给皮肤造成的压力要大于单肩气囊外固定器,而且“8”字绷带给皮肤的压在志愿者接近腋下附近较集中,而腋下区域又是人体神经较集中区域,故“8”字绷带可能对佩戴者的血液循环产生影响,且造成的压痛感也很大,这在实验中佩戴者也能明显感觉到,而单肩可调外固定器却无此问题。分别安装“8”字绷带与单肩气囊外固定器后锡纸的变形情况如图7(b)所示。从锡纸的压痕可以看出,“8”字绷带对身体的作用力较单肩气囊外固定器的作用力较大,而且集中在接近腋下部位。

要比传统固定器要大,同时单肩气囊外固定器所设计的气囊更加利于锁骨骨折的复位。

从实验角度出发,通过压力测试纸显色和锡纸压痕变形情况的对比分析可知,单肩可调式外固定器的作用力比较均匀(这是由于单肩可调外固定器中的气囊是面载荷),而且作用力靠外,即分布在肩峰处(而传统“8”字外固定器作用力集中在靠腋下的部位)。该位置可以使得锁骨更容易产生较大的拉伸复位力。结合实验结果可以看出,单肩式外固定器的加载方式更适合于锁骨骨折拉伸复位。

由于外固定器对人体肩部的作用力的方位非常复杂,本文进行了合理的一些简化处理,但是力学分析和实验结果均表明,单肩气囊外固定器对锁骨的加载方式比传统“8”字外固定器更适合人体锁骨骨折后的拉伸复位和维持骨折复位位置,且更能提高锁骨骨折患者佩戴外固定器后的舒适度。

本研究的对象单肩气囊外固定器已经应用于临床,并且取得了满意的效果,具有很好的实用性和安全性,对腋下神经、血管无压迫。本文旨在通过力学分析和简单受力实验,分析比较新发明的单肩气囊外固定器与传统“8”字外固定器的受力特点。结果表明,单肩气囊外固定器由原来的点线受力变为面受力,具有拉伸力更大、可自由调节等优点,更利于锁骨骨折治疗。单肩气囊外固定器的临床验证,可针对用更多的临床实验(包括性别、年龄分组、局部皮肤张力测试、锁骨骨折痊愈的情况等)来进行分析其对锁骨拉伸复位治疗的效果。

参考文献:

- [1] 陈阳, 马剑雄, 马信龙. 锁骨骨折的研究进展[J]. 中国骨与关节外科, 2011, 4(5): 411-416.
- [2] HOUWERT RM, SMEEING DP, AHMED AU, et al. Plate fixation or intramedullary fixation for midshaft clavicle fractures: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials and observational studies [J]. J Shoulder Elbow Surg, 2016, 25(7): 1195-1203.
- [3] RANALLETTA M, ROSSI LA, BONGIOVANNI SL, et al. Surgical treatment of displaced midshaft clavicular fractures with precontoured plates [J]. J Shoulder Elbow Surg, 2015, 24(7): 1036-1040.
- [4] 石小兵, 王也刘, 胡一新, 等. 锁骨骨折的治疗进展[J]. 中外医学研究, 2016, 14(13): 160-161.

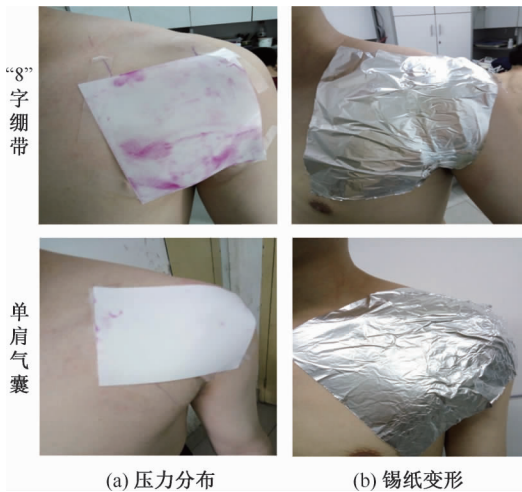


图7 实验结果对比

Fig. 7 Comparison of the experimental results (a) Distribution of pressure, (b) Tinfoil deformation

5 结论

本文从力学分析角度分析单肩气囊外固定器和传统“8”字外固定器施加于人体肩部的作用力特点。根据分析结果,在所建人体肩部有限元分析模型中分别加载,获得在外固定器作用下锁骨产生的拉伸复位力的应力分布图,并且分析了两种外固定器对人体肩部锁骨复位时的舒适性。结果表明,单肩气囊外固定器产生的锁骨拉伸复位力更加均匀(使患者更舒适),而且在同样加载情况下,复位力

- [5] 张振中. 锁骨骨折治疗方法分析[J]. 中国伤残医学, 2013, 21(3): 5-7.
- [6] 张彦龙, 姚啸生. 改良的“8”字绷带外固定治疗锁骨骨折的临床研究进展[J]. 沈阳医学院学报, 2017, 19(2): 175-177.
- [7] 李豫明, 龚辉松. 8字树脂绷带外固定治疗锁骨骨折[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2013, 28(5): 34-34.
- [8] 杨晓霞, 许金泉, 张二虎. 锁骨三维有限元应力分析[J]. 力学季刊, 2012, 33(4): 584-589.
- [9] 桂斌捷, 刘德宝. 锁骨三维模型构建和力学分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(30): 5827-5830.
- [10] METAN SS, KRISHNA P, MOHANKUMAR GC. FEM model an effective tool to evaluate Von Mises stresses in shoulder joint and muscles for adduction and abduction [J]. Proc Mater Sci, 2014, 5: 2090-2098.
- [11] 赵永信, 李欣欣, 李鼎斌, 等. 锁骨骨折复位拉伸力优化加载方案的模拟分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(3): 242-247.
- ZHAO YX, LI XX, LI DB, *et al.* Simulation analysis on optimal loading scheme of resetting tensile stress for clavicular fractures [J]. J Med Biomech, 2017, 32(3): 242-247.
- [12] 叶丹丹, 李升, 侯志勇, 等. 牵引复位器治疗四肢长骨骨折的生物力学特性分析[J]. 河北医科大学学报, 2017, 38(10): 1229-1231.
- [13] 徐杰, 钱晓明, 徐先林, 等. 服装压力测试方法的探讨[J]. 针织工业, 2008(9): 35-39.
- [14] 岳文侠, 王革辉. 服装压力对人体的影响及其测试方法[J]. 西安工程大学学报, 2012, 26(4): 452-456.
- [15] 王雪, 方方. 服装压力舒适性研究分析[J]. 纺织科技进展, 2015(1): 47-51.