

doi: 10.16118/j.1008-0392.2018.06.015

· 临床研究 ·

## 3D 打印减压鞋垫在糖尿病足防治中的临床应用

陈薇薇<sup>1,2</sup>, 张国锋<sup>2</sup>, 陈育宏<sup>2</sup>, 谭 军<sup>1</sup>

(1. 同济大学附属东方医院骨科, 上海 200120; 2. 宁波大学医学院附属医院手足外科, 浙江 宁波 315000)

**【摘要】目的** 探讨 3D 打印减压鞋垫在糖尿病足防治中的临床效果。**方法** 选取 2016 年 1 月至 2017 年 3 月收治的高危糖尿病足患者 62 例, 所有患者 Wagner 分级均 0 级。利用随机数字表法将患者进行左右足自身对照研究, 治疗组穿着 3D 打印糖尿病足减压鞋垫, 对照组穿着普通鞋垫。采用比利时 Footscan 足底压力步态分析仪对两组患者进行穿鞋垫前后动态足底压力的监测, 以及 B 超检测足底血流变化。对两组患者进行 1 年的随访, 观察治疗前后两组患者足底峰值压强、动脉收缩期峰值血流速度 (peak arterial systolic flow velocity, PASV)、足溃疡发生率等。**结果** 治疗前患者双足足底各区域峰值压强比较, 差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ ); 治疗 1 年后, 治疗组患者第 2、5 跖骨底部、足跟区域及第 1 趾底主要负重区域峰值压强均低于本组治疗前, 治疗前后差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。治疗后对照组、治疗组足溃疡发生率分别为 16.1% 和 5.0%, 两组间差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。治疗后治疗组第 1、5 跖骨底、足跟内侧 PASV 均高于本组治疗前, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。**结论** 3D 打印减压鞋垫可均匀分布足底压力, 纠正糖尿病高足压患者异常受力情况, 降低足溃疡发生率, 减少截肢率, 保障糖尿病患者的生活质量, 为预防糖尿病患者糖尿病足病的发生提供经济有效的方式。

**【关键词】** 糖尿病足; 3D 打印; 减压鞋垫; 峰值压强; 动脉收缩期峰值血流速度

**【中图分类号】** R68 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1008-0392(2018)06-0076-06

## Application of 3D-printed decompression insole for the prevention of diabetic foot

CHEN Wei-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-feng<sup>2</sup>, CHEN Yu-hong<sup>2</sup>, TAN Jun<sup>1</sup>

(1. Dept. of Orthopedics, East Hospital, Tongji University, Shanghai 200120, China; 2. Dept. of Hand and Foot Surgery, Affiliated Hospital of Medical School of Ningbo University, Ningbo 315000, Zhejiang Province, China)

**【Abstract】Objective** To evaluate the application of decompression shoe pad for diabetic foot by 3D-printing. **Methods** Sixty-two patients with high risk of diabetic foot were recruited in our hospital from January 2016 to March 2017. All patients were classified as grade 0 according to Wagner classification. The patients were randomly assigned in two groups: 31 patients with the left feet and another 31 patients with the right feet wearing 3D-printed decompression insole (study group), and the other feet of 62 patients were cushioned with common insole (control group). The dynamic foot pressure before and after cushioning the insole was monitored by Belgian Footscan foot pressure gait analyzer, and the changes in the blood flow of the foot were detected by ultrasonography. The patients were followed up for 1 years, and the peak pressure of the foot, the peak arterial systolic flow velocity (PASV) and the incidence of foot ulcer were observed before and after the treatment in two groups. **Results** There was no significant

收稿日期: 2018-07-23

基金项目: 上海市浦东新区领先人才计划 (PWRd-2011-02, PWR12012-03)

作者简介: 陈薇薇 (1981—), 女, 副主任医师, 硕士. E-mail: 1935855381@qq.com

通信作者: 谭 军. E-mail: 13601859998@139.com

differences in the peak pressure between the two feet of all the patients before treatment ( $P > 0.05$ ). After 1 years of treatment, the peak pressure of the mainly weighed region including the second, fifth metatarsal, the heel area and the first toe in the study group was lower than that before the treatment. The differences between study and control groups were statistically significant ( $P < 0.05$ ). After treatment, the incidence of foot ulcers in the control group and the treatment group were 16.1% and 5%, respectively ( $P < 0.05$ ). The PASV of the first, the fifth metatarsal and the medial heel after treatment in study group were all higher than those before the treatment ( $P < 0.05$ ). **Conclusion** The 3D-printed decompression insole can evenly distribute sole pressure, correct abnormal stress and reduce the incidence of foot ulcers in patients with high risk of diabetic foot, which provides an economic and effective way to prevent the occurrence of diabetic foot.

**【Key words】** diabetic foot; 3D-printing; decompression insole; peak pressure; peak arterial systolic flow velocity

随着社会生产力的发展和人民生活水平的逐步提高,糖尿病患病率逐年上升,目前中国糖尿病的发病率已高居全球第2位<sup>[1]</sup>。研究<sup>[2]</sup>表明,超过15%的糖尿病患者在其发病过程中发生足溃疡或坏疽,14%~24%的足溃疡患者需要截肢治疗,2/3的糖尿病足是由压力性溃疡造成的。而且糖尿病足溃疡的治疗时间长,花费巨大,给患者和社会带来了严重的经济负担。因此,预防糖尿病足溃疡的发生具有重大的实际意义。

研究表明,足底压力的异常增高是预测足部溃疡发生的独立危险因素,其相关性高达70%~90%;足底压力的异常增高对足溃疡预测的敏感性最高(特异性高达69%)<sup>[3]</sup>。国外研究发现,糖尿病患者足底压强以87.5 Pa为阈值,超过此压强值的患者足溃疡的风险要增加2倍<sup>[4]</sup>。目前为止我国大部分医院以及糖尿病患者往往只注重对已发生的溃疡和坏疽的治疗,而不重视对其危险因素进行预防性干预,往往错失了最佳的预防治疗时机,甚至许多都面临截肢。因此,纠正糖尿病患者异常高足压,均匀分布足底压力,对于预防糖尿病足溃疡的发生至关重要。

3D打印技术诞生于20世纪80年代<sup>[5]</sup>,是材料堆砌法应用的一种新型制造技术;被誉为“第3次工业革命”的核心技术。目前,3D打印技术在矫形鞋垫制作中也逐渐得到应用。2014年5月,比利时3D打印Materialise公司与足底压力测量Rsscan International公司联合成立RSPrint公司。该公司使用动态压力测量系统,对患者足部进行扫描,获取足

的外形数据,收集行走和跑步时足底压力分布数据,通过3D打印生成3D打印鞋垫<sup>[6]</sup>。该公司于2014年在德国莱比锡国际假肢矫形器及康复技术展览会上展示了这项技术。目前,国内为糖尿病患者定制减压鞋垫厂家数量不多,更很少有条件为糖尿病患者量身定做3D打印减压鞋垫。3D打印减压鞋垫以患者足部CT扫描数据及足底压力数据为导向,量身定制,足弓支撑及矫形效果确切,且减压效果确切可控。因此本研究拟应用3D打印技术,选择合适材料,量身定做糖尿病减压鞋垫,均匀分布足底压力,旨在探讨应用3D打印减压鞋垫平衡足底压力在糖尿病足溃疡早期防治中的意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

选取2016年1月—2017年3月宁波大学医学院附属医院、同济大学附属东方医院收治的62例有高危因素的糖尿病足患者,所有患者糖尿病足Wagner分级均为0级(即有发生足溃疡危险因素但尚无溃疡存在)。其中男33例,女29例;年龄41~69岁。根据《糖尿病足国际临床指南》中提出的高危糖尿病足人群的高危因素及Gavin足危险因素加权值积分法来评估高危糖尿病足<sup>[7-9]</sup>。但上述两种方法过于抽象,本研究简化了入选标准:(1)合并下肢血管病变:踝肱指数(ABI) $< 0.9$ 或下肢血管B超检查动脉或静脉中重度狭窄;(2)Semmes-Weinstein 10 g单丝检测法检测有保护性感觉缺失<sup>[10-11]</sup>;(3)病史 $> 10$ 年。除满足以上三项外,合并有心脏、肾脏或眼

底病变者或吸烟、足部畸形者、高龄(年龄 $\geq 75$ 岁)者,均可入选。排除标准:(1)足部有活动性溃疡;(2)有下肢截肢手术史;(3)踝、膝或髋关节及脊柱严重畸形或有活动障碍者;(4)步态异常、行走不稳或障碍者。(5)其他原因引起的神经病变。

利用随机数字表法分组,患者左右足分别穿不同鞋垫,将患者左右足随机分为对照组和治疗组,对照组 31 例左足、31 例右足穿普通鞋垫,治疗组 31 例右足、31 例左足穿自主研究设计 3D 打印减压鞋垫。两组患者的年龄、性别、BMI、糖尿病病程、空腹血糖、餐后 2 h 血糖、ABI、Semmes-Weinstein 单丝(SWM)检测、痛温觉间均具有可比性( $P>0.05$ )。两组患者均无明显下肢畸形及步态异常,故忽略下肢力线及步态异常等因素的影响。

### 1.2 设备与软件

采用比利时 Footscan 足底压力步态分析仪以及法国声科高频超声。

### 1.3 研究方法

1.3.1 试验前准备 由于每个人行走姿势不同,对测试出的足底压力及步态稳定曲线有一定影响。因此,在测试前对患者进行步态训练,以保证试验数据客观有效。且患者每日穿宽松软鞋,计步器计算每天活动量,每天保持 3 000~5 000 步活动量。

1.3.2 足底压力动态分析过程 要求患者脱鞋、穿袜,经规范行走训练后以正常步态在测试平板上行走 3 m,由测量仪测量患者左、右脚的足底压力,数据采集与分析采用配套软件 Footscan Software 7.0,并反复测试 3 次,选取最为稳定的一次行走步态分析足底压力分布。本研究中将足部分为 10 个基于解剖学的分区,即第 1 足趾(T1)、2~5 趾(T2-T5),第 1、2、3、4、5 跖骨分别为 M1、M2、M3、M4 和 M5,足底中部(MF),足跟内侧(HL)和外侧(HM)。压力仪图像显示的红色区域表示足底压力异常,蓝色区域表示压力正常。

本研究前期研究发现糖尿病患者足底峰值压强最高的 5 个区域依次为 M2、T1、HM、HL 和 M5。故为这些患者制作减压鞋或鞋垫时,应以以上 5 个区域为重点,以达到直接减轻局部压力的目的。故本研究主要分析上述 5 个区域的峰值压强总和。

1.3.3 足部动脉收缩期峰值血流速度(PASV)变化 取 3 cm 厚木板,在足部主要负重且有主要血管流经区域:M1、M5、HL 区各开一洞,可放入高频探头即可,足部半负重状态踩木板上,高频探头探测以上区域 PASV(图 1~2),了解局部皮肤软组织血流灌注情况。



图 1 高频探头探测足底 PASV  
Fig.1 Detection of plantar PASV with high frequency probe

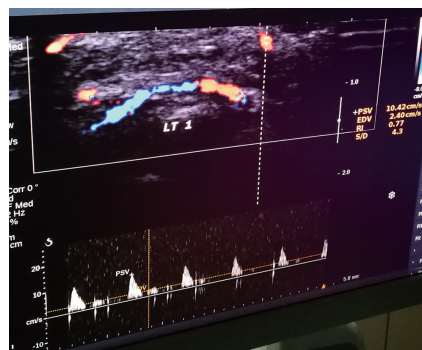


图 2 足底血流检测成像及数值  
Fig.2 Imaging and value of plantar blood flow

1.3.4 Semmes-Weinstein 10 g 单丝检测法检测感觉变化 我们选取足底十个部位感觉测定,包括第 1~5 趾,第 1、2、3、5 跖骨头及足跟部位,如果有 2 个点及以上感觉异常则视为保护性感觉缺失。

1.3.5 治疗方法 两组患者首诊予以步态分析仪检测其足底压力分布情况,同时根据治疗组患者足底压力变化情况制定 3D 打印减压鞋垫治疗方案,而对照组给予普通鞋垫。此外,两组患者均给予糖尿病综合治疗方案,控糖目标:参照美国内分泌学会(ENDO)非急诊住院的绝大多数患者血糖控制目标,即空腹血糖 7.8 mmol/L 以下,餐后 2 h 血糖 10 mmol/L 以下<sup>[12]</sup>。两组患者均治疗 1 年。1 年后,随访记录患者双足底峰值压强及足底压力分布情况、PASV 变化、足部溃疡情况等。

1.3.6 3D 打印减压鞋垫治疗方案 (1) 先采集足部模型,结合足部 3D 重建扫描数据得出足部模型,经 Footscan 步态分析仪检测足底压力及步态平衡曲线,结合鞋垫材料弹性模量数据,根据综合测试数据分析结果,由于多喷头打印材料质地及衔接工艺仍需进一步研究,目前 3D 打印鞋垫仍在试行阶段,目前阶段采用双层打印,分别两层柔性材质:第一层为柔性减震材质 poron 泡棉材料鞋垫,第二层为放置于足跟部、足底中部至第 1~5 跖骨近端基底水平的支撑材质的足弓垫用以支撑足弓以及矫正足部畸形(图 3~4),再把两层打印材料粘合,给予治疗组定制 3D 个性化鞋垫,均匀分布足底压力、适度支撑足弓矫正足部畸形、同时适当缓冲防止局部皮肤受压,对照足则给予同厚度普通鞋垫。

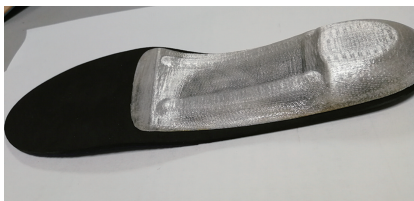


图 3 3D 打印鞋垫  
Fig.3 3D-printed insole

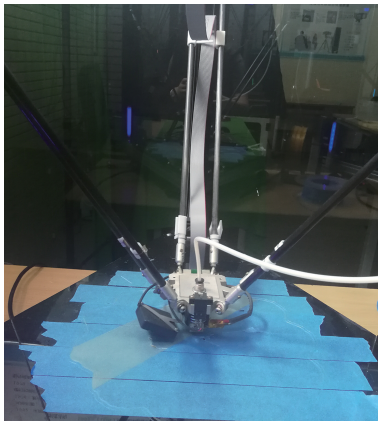


图 4 3D 打印设备  
Fig.4 3D printing equipment

#### 1.4 统计学处理

采用 SPSS 19.0 软件进行统计学检验。先对数据进行正态分布检测,符合正态分布的计量资料(如足底压力)以  $\bar{x} \pm s$  表示,同组治疗前后比较采取配对  $t$  检验,组间比较采取独立样本  $t$  检验;计数资料采取  $\chi^2$  检验;等级资料采取 Wilcoxon 秩和检验。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 治疗前后足底压力变化

治疗前,两组患者双足足底主要负重区域峰值压强差异无统计学意义( $P < 0.05$ );对照组治疗后即刻,治疗半年、1 年后,足底各区域峰值压强与治疗前比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ),见表 1;而治疗组治疗后即刻,治疗半年、1 年后,主要负重区域峰值压强均低于治疗前,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。

表 1 两组不同时间点主要负重区域峰值压强比较

Tab.1 Peak pressure of two groups at different time points (kPa)

时间	对照组	治疗组	$t$	$P$
穿鞋垫前	280±48	284±45	0.76	>0.05
穿鞋垫即刻	279±46	221±26	2.32	<0.05
穿鞋垫半年后	289±47	259±31	2.14	<0.05
穿鞋垫 1 年后	290±50	213±21	2.51	<0.05
$F$	9.25	4.23		
$P$	>0.05	<0.05		

### 2.2 静态测试前后足溃疡发生情况

两组患者治疗前均无足溃疡发生。对照组治疗 1 年后,10 例(16.1%)发生足溃疡,其 Wagner 分级均为 2 级;治疗组 1 年后,3 例(5.0%)发生足溃疡,均发生在第二跖骨底,Wagner 分级均为 1 级且均有不同程度跗外翻畸形;两组足溃疡发生率差异有统计学意义( $\chi^2 = 4.21, P < 0.05$ )。治疗组 3 例患者足溃疡与其跗外翻畸形、对应第 2 跖骨底异常受力、第 2 跖骨底峰值压强异常增高有关,穿减压鞋垫 1 年后第 2 跖骨底峰值压强较穿鞋垫前均有所下降,但仍是足底峰值压强最大部位。对照组 10 例患者溃疡发生部位为第 2 跖骨底 7 例,第 5 跖骨底 3 例,10 名患者此两部位在穿普通鞋垫前足底峰值压强均异常偏高,且穿普通鞋垫后无明显变化。

### 2.3 治疗后足部 PASV 变化

治疗前,患者双足足底主要负重区域 PASV,差异无统计学意义( $P > 0.05$ );治疗 1 年后,治疗组第 1、5 跖骨底及足跟内侧 PASV 较治疗前及对照组治疗后均有升高,差异有统计学意义( $P < 0.05$ );对照组患者足底主要负重区域 PASV 与治疗前对比,差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),见表 2。治疗 1 年后,治

疗组 3 例足溃疡患者第 1 跖骨底区域 PASV 较治疗前无明显变化,而第 5 跖骨底及足跟内侧 PASV 均

较治疗前有所升高。对照组 9 例足溃疡患者 1 年后,足底主要负重区域 PASV 无明显变化。

表 2 两组治疗前后主要负重区域 PASV 比较  
Tab.2 Comparison of PASV before and after treatment

(cm/s)

部位	治疗组		t	P	对照组		t	P
	治疗前	治疗 1 年后			治疗前	治疗 1 年后		
跖骨底	9.1±2.9	11.9±3.2	2.21	<0.05	8.7±3.0	8.5±3.3	0.79	>0.05
第 5 跖骨底	3.5±1.7	5.1±2.1	2.04	<0.05	3.7±1.4	4.1±1.5	0.52	>0.05
足跟内侧	6.1±1.6	7.9±1.9	2.16	<0.05	5.9±1.5	6.2±1.6	1.10	>0.05

2.4 Semmes-Weinstein 10 g 单丝检测法检测感觉变化

治疗前,两组患者均有保护性感觉缺失。治疗组 2 个点感觉异常 13 例,3 个点感觉异常 12 例,4 个点感觉异常 5 例,5 个点及以上感觉异常 1 例。对照组 2 个点感觉异常 12 例,3 个点感觉异常 12 例,4 个点及以上感觉异常 6 例,5 个点及以上感觉异常 1 人,两组差异无统计学意义。治疗 1 年后,治疗组 2 个点感觉异常 12 例,3 个点感觉异常 11 例,4 个点感觉异常 5 例,5 个点及以上感觉异常 3 例。对照组 2 个点感觉异常 9 例,3 个点感觉异常 8 例,4 个点及以上感觉异常 8 例,5 个点及以上感觉异常 6 例。

3 讨 论

糖尿病足溃疡形成与很多因素有关:(1) 血管病变及缺血;(2) 周围神经病变;(3) 足底压力的改变。糖尿病患者足底压力异常增高和异常分布亦是足溃疡发生的重要且独立危险因素,相关性可高达 70%~90%。糖尿病患者足解剖结构和功能异常的共同作用,导致足底压力异常升高。尤其是糖尿病患者合并周围神经病变时,足的肌肉萎缩,趾骨的屈曲畸形和步态异常,关节畸形,胼胝体形成等,均可导致局部压力升高<sup>[13]</sup>。同时由于丧失保护性感觉,不能感知外伤疼痛以及足底压力升高,走路时足底受力不均匀,导致局部应力过大,反复摩擦而破损,最终导致足溃疡的产生。糖尿病足溃疡一旦发生治疗非常困难,费用大,住院时间长,而且治疗效果欠佳。因此,纠正糖尿病患者异常高足压,预防足溃疡的发生就成为了一个迫切的问题。

各种治疗鞋以及减压技术通过纠正足底压力来预防和治疗糖尿病足溃疡。目前用于预防或治疗糖尿病足,降低足底压力的干预措施包括 4 种:支具、

治疗鞋及鞋垫、外科手术及其他减压技术<sup>[14]</sup>。支具限制活动佩戴繁琐,广泛应用受到限制,外科手术创伤大,恢复慢,治疗鞋相对昂贵,根据季节需变换鞋款,而治疗鞋垫相对具有简单、方便和依从性较好的优点。但目前国内只有极少数医院可以为糖尿病患者量身定做治疗鞋及减压鞋垫。

随着个人健康意识的提升,个性化量身定制的产品比如矫形鞋垫需求大大增加。3D 打印技术是一种快速成型技术,是 20 世纪 80 年代后期开始逐渐兴起的一项新兴制造技术。它根据计算机辅助设计的三维模型数据,通过将数据转换后传递到 3D 打印机,通过叠加式制造工序,逐层自动打印与数学模型完全一致的三维实体模型,也称增材制造技术<sup>[15]</sup>。随着 3D 打印技术的发展中,它在矫形鞋垫制作中的应用也逐渐得到重视。与传统减压鞋垫相比,3D 打印减压鞋垫以患者足部 CT 扫描数据及足底压力数据为导向,分层设计,量身定制,足弓支撑及矫正足部畸形效果确切,且减压效果确切可控。

本研究与浙江省三维打印工艺与装备重点实验室合作,选用熔融沉积成型技术,应用实验室自主研发的 3D 打印机打印糖尿病足减压鞋垫,提供支撑和缓冲减震减压的作用。对患者足底压力步态进行分析检测,将 3D 打印鞋垫的过程分解,使用不同填充方式,通过调整填充率实现可变密度,应用高分子聚丙烯改良版材料通过生物力学原理设计,稳定支撑同时保证足弓弹性,应用 poron 泡棉材料减震,并通过可变密度对足底高足压部位重点减压,根据患者的需求进行产品的量身定制,增强鞋垫软硬度及舒适度。通过使用前后足底压力步态分析检测、高频彩超检测以及足底感觉检测,明确 3D 打印减压

鞋垫可以降低足底主要负重区域峰值压强,均匀分布足底压力,半年后鞋垫变薄,足底主要负重区域峰值压强有所回升但仍低于穿鞋前,更换鞋垫后峰值压强继续下降。鞋垫还可以防止局部皮肤血流灌注改变,改善足底皮肤软组织局部血液供应,矫正足部畸形,减少保护性感觉缺失程度,预防足部受伤,这些最终都可以降低糖尿病足溃疡发生率。争取把糖尿病足控制在0级,提高糖尿病足治疗成功率、减少截肢致残率,提高糖尿病患者的生活质量,治疗方法简便,患者依从性好,治疗效果可靠,为预防中国糖尿病患者糖尿病足病的发生提供经济有效的方式,易于向基层医院推广。

随着3D打印速度的提升,材料科技的发展,3D打印技术在矫形鞋垫制作中的应用将更加广泛,除糖尿病足鞋垫外,还可以向踇外翻、扁平足、高弓足、马蹄足畸形等足部畸形以及关节炎、肌腱炎、足底筋膜炎等足病方向进一步拓展应用。

但本实验有一定局限性,治疗周期长,且未考虑糖尿病控制、治疗因素及吸烟等生活方式改变以及患者本身下肢力线、步态等机械因素对于糖尿病足的影响。且3D打印技术仍是一项新兴技术,打印材料需要进一步开发改进,设备成本需进一步降低。目前材料仍是制约3D打印技术推广应用的主要因素<sup>[16]</sup>,对比,制作材料价格与数控机械加工相比仍较昂贵,制作时间也不占优势。应深入研究挖掘新型材料,降低材料及设备价格,增加材料的种类,以便向基层单位进一步推广。由于多喷头打印材料质地及衔接工艺仍需进一步研究改进,尤其是不同材料连接处打印仍需要进一步研究,目前试验阶段使用的均为单喷头分层打印鞋垫,后续我们还将进一步研究及优化多喷头3D打印减压鞋垫。

#### 【参考文献】

- [ 1 ] YANG W, LU J, WENG J, et al. Prevalence of diabetes among men and women in China [ J ]. *N Engl J Med*, 2010,362(12): 1090 - 1101.
- [ 2 ] BOULTON A J, CAVANAGH P R, RAYMAN G. The foot in diabetes [ M ]. Chichester: John Wiley & Sons, 2000: 1 - 16.
- [ 3 ] PHAM H, ARMSTRONG D G, HARVEY C, et al. Screening techniques to identify people at high risk for diabetic foot ulceration: a prospective multicenter trial [ J ]. *Diabetes Care*, 2013,23(5): 606 - 611.
- [ 4 ] LAVERY L A, ARMSTRONG D G, WUNDERLICH R P, et al. Predictive value of foot pressure assessment as part of a population-based diabetes disease management program [ J ]. *Diabetes Care*, 2003,26(4): 1069 - 1073.
- [ 5 ] 吴平.3D打印技术及其未来发展趋势 [ J ]. *印刷质量与标准化*, 2014(1): 8 - 10.
- [ 6 ] 中国3D打印网. Materialise 成立合资企业从事3D打印鞋垫 [ EB/OL ]. (2014 - 05 - 15). <http://maker8.com/article-1131-1.html>.
- [ 7 ] 国际糖尿病足工作组.糖尿病足国际临床指南 [ M ]. 许樟荣,敬华,译.北京:人民军医出版社,2004: 7.
- [ 8 ] 刘瑾,路潜,袁戈恒,等.糖尿病患者高危足的筛查方法 [ J ]. *中国糖尿病杂志*, 2016,24(11): 1052 - 1056.
- [ 9 ] 王秀问.老年人糖尿病足 [ J ]. *国外医学老年医学分册*, 1995,16(2): 77 - 80.
- [ 10 ] LEVIN S, PEARSALL G, RUDERMAN R J. Von Frey's method of measuring pressure sensibility in the hand: an engineering analysis of the Weinstein Semmes pressure anesthesiometer [ J ]. *J Hand Surgery*, 1978,3(3): 211 - 216.
- [ 11 ] KUMAR S, FERNANDO D J S, VEVES A et al. Semmes Weinstein monofilaments: a simple effective and inexpensive screening device for identifying patients at risk of foot ulceration [ J ]. *Diabetes Res Clin Pract*, 1991,13(1/2): 63 - 67.
- [ 12 ] UMPIERREZ G E, HELLMAN R, KORYTKOWSKI M T, et al. Management of hyperglycemia in hospitalized patients in non-critical care setting: an endocrine society clinical practice guideline [ J ]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2012,97(1): 16 - 38.
- [ 13 ] 陈凯,于涛,李兵,等.2型糖尿病患者足底压力分布特点 [ J ]. *同济大学学报(医学版)*, 2017,38(5): 52 - 57.
- [ 14 ] BUS S A, VALK G D, VAN DEURSEN R W, et al. The effectiveness of footwear and offloading interventions to prevent and heal foot ulcers and reduce plantar pressure in diabetes: a systematic review [ J ]. *Diabetes Metab Res Rev*, 2008,24(Suppl 1): S 162 - 180.
- [ 15 ] 林杉,陈铁,李梅.3D打印技术介绍 [ J ]. *橡塑资源利用*, 2014,(5): 23 - 27.
- [ 16 ] 傅驰林,刘斌.3D打印模型节材优化 [ J ]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017,29(4): 742 - 750.