

文章编号: 1004-7220(2022)06-1064-06

个性化 3D 打印钛合金短柄股骨假体的生物力学评价

张润泽¹, 刘宏伟², 张 文³, 王佳峰¹, 邵龙辉¹, 王 庆¹, 蒋俊锋⁴, 王彩梅⁵

(1. 大连医科大学 研究生院, 辽宁 大连 116044; 2. 南京医科大学附属常州第二人民医院 骨科, 江苏 常州 213003; 3. 苏州大学 骨科研究所, 江苏 苏州 215006; 4. 河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 5. 北京爱康宜诚股份有限公司, 北京 102200)

摘要:目的 评估个性化 3D 钛合金打印短柄股骨假体的生物力学性能。方法 采用 4 种不同的短柄股骨假体: 3D 打印 1 组(假体 A)、3D 打印 2 组(假体 B)、BE 组(假体 C)、SMF 组(假体 D), 分别对 12 根成人尸体股骨标本实行人工股骨头置换。在万能材料力学试验机上通过初始稳定性测试和静力压缩测试, 对比分析 4 组假体模型变形量、最大压缩载荷、最大压缩位移和抗压压缩刚度。结果 初始稳定性测试结果显示, 3D 打印 2 组假体变形量略低于 3D 打印 1 组, 而明显低于 SMF 组和 BE 组, 但差异无统计学意义($P>0.05$)。3D 打印 2 组假体最大压缩载荷、抗压压缩刚度均大于其余 3 组, 最大压缩位移小于其余 3 组, 差异仍无统计学意义($P>0.05$)。结论 个性化 3D 打印钛合金短柄股骨假体力学性能与目前临床常用的股骨 SMF、BE 1 假体相当, 力学稳定性较好。

关键词: 人工髋关节置换术; 股骨假体; 3D 打印; 个性化; 力学测试

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.06.014

Biomechanical Evaluation of Individualized 3D Printed Titanium Alloy Short Femoral Stem Prosthesis

ZHANG Runze¹, LIU Hongwei², ZHANG Wen³, WANG Jiafeng¹, SHAO Longhui¹, WANG Qing¹, JIANG Junfeng⁴, WANG Caimei⁵

(1. Graduate School, Dalian Medical University, Dalian 116044, Liaoning, China; 2. Changzhou Second People's Hospital Affiliated to Nanjing Medical University Orthopaedics, Changzhou 213003, Jiangsu, China; 3. Institute of Orthopaedics, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China; 4. Institute of Internet of Things Engineering, Hehai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China; 5. Beijing AK Medical Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Objective To evaluate the biomechanical strength of individualized three-dimensional (3D) titanium alloy short femoral stem prosthesis. **Methods** A total of 12 adult cadaveric femur specimens were treated with artificial femoral head replacement with 4 kinds of short femoral stem prostheses: 3D printing group 1 (prosthesis A), 3D printing group 2 (prosthesis B), BE 1 (prosthesis C) and SMF (prosthesis D). The deformation, maximum compressive load, maximum compressive displacement and compressive stiffness of the four prosthesis models were compared and analyzed through initial stability test and static compression test on the universal material mechanics testing machine. **Results** The initial stability test results showed that the deformation of 3D printing group 1 was slightly lower than that of 3D printing group 2, and the deformation of 3D printing group 1 was significantly lower than that of SMF group and BE group, but the difference was not statistically significant ($P>0.05$). The maximum compressive load and compressive stiffness of 3D printing group 1 were higher than those of the other three groups, and the maximum compressive displacement was lower than that of the other three groups, but the difference was not statistically significant ($P>0.05$). **Conclusions** The mechanical properties of individualized 3D printing titanium alloy short femoral stem prosthesis are similar to

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61772172), 常州市卫健委重大项目 (ZD201617)

通信作者: 刘宏伟, 主任医师, E-mail: lhw27272022@163.com

those of SMF and BE 1 prosthesis that are used frequently in clinic, and its mechanical stability is good.

Key words: total hip arthroplasty; femoral prosthesis; three-dimensional (3D) printing; individualization; mechanical test

全髋置换手术已成为治疗终末期髋关节疾病最成功的一种骨外科手术。在全髋置换手术中,股骨假体起到非常重要的作用。传统股骨假体的固定主要分为骨水泥型和非骨水泥型两种方式。骨水泥型主要是利用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥、磷酸钙骨水泥和硫酸钙骨水泥等生物材料用来填充股骨柄和股骨之间的缝隙,从而达到固定的作用。但是骨水泥存在骨水泥综合征,诸如血压下降、心率减慢、肺栓塞、心跳呼吸骤停、疲劳折断、聚合热以及机械性松动引起的术后高松动率等问题,使得骨水泥柄的使用受到限制^[1]。传统非骨水泥股骨假体的长期疗效已被大部分学者肯定,但仍存在无菌性松动、应力遮挡和假体周围骨折等共性问题,需要更好的解决方案^[2]。

一些新型的股骨假体应运而生,其优势包括:通过增加股骨近端的生理负荷,来减少应力遮挡的发生,降低长柄造成的髓腔内骨量丢失,防止股骨皮质撞击和大腿疼痛的发生。这些新型假体较传统假体具有更小的生理破坏性,它们较传统假体更短,通常被称为“短柄”^[3]。

但随着临床观察和随访研究的不断深入,短柄也暴露出一些设计问题。例如,由于个体差异所导致的股骨柄与股骨髓腔不吻合;压配过度或反复扩髓出现的股骨假体周围骨折;压配不紧出现的假体微动移位,使得该处骨组织容易发生骨吸收,从而增加骨-假体界面间隙,导致假体松动;有些短柄假体表面无多孔涂层,可能导致假体-骨界面的结合强度低,或非一体化制造的表面微孔涂层长期在体内存在脱落风险^[4]。

针对传统减材制造的标准化短柄股骨假体的缺点,本文提出两种采用 3D 打印制备的新型个性化短柄股骨假体设计方法。先前研究已证明,3D 打印个性化短柄股骨假体的力学性能和稳定性能值得肯定^[5-6]。本文继续在尸体标本上完成生物力学性能测试、金属疲劳检验,从而进一步验证研究结果。通过在尸体股骨标本建立股骨头置换模型并进行力学测试,对比两种 3D 打印的短柄假体与目前主流的两款

非 3D 打印传统短柄假体的力学性能差异。

1 材料和方法

1.1 随机对照设计

本实验中所有分组均采用随机分组,对各组标本随机采用本组的假体进行股骨头置换,以比较各组的力学性能。

1.2 材料

1.2.1 尸体股骨标本 12 个经固定后的成人尸体股骨标本,由苏州大学医学部人体解剖学教研室提供,剔除周围软组织,切除股骨髁,X 线摄片排除骨损伤、骨密度异常及骨组织疾病。并将股骨标本随机分为 4 组,每组 3 根:① 3D 打印 1 组(假体 A);② 3D 打印 2 组(假体 B);③ BE 组(假体 C);④ SMF 组(假体 D)。

1.2.2 4 种股骨短柄假体 两种个性化股骨假体均是与北京爱康宜诚医疗器材有限公司合作,通过高能电子束熔融(electron beam melting,EBM)金属 3D 打印方法所制备,SMF 假体由美国 Smith & Nephew 公司提供,BE 假体由北京市春力正达医疗器械股份有限公司提供(见图 1)。



图 1 尸体股骨标本和 4 个钛合金假体

Fig. 1 Cadaveric femur specimens and four titanium alloy prostheses

注:从左至右依次为 3D 打印 1 组(假体 A)、3D 打印 2 组(假体 B)、SMF 组(假体 C)、BE 组(假体 D)。

1.2.3 主要的设备及测试软件 力学测试在 Instron E10000 拉扭双轴万能材料力学试验机上实行,静态测试软件为 Bluehill 2.0,动态测试软件为 WaveMatrix。

1.3 方法

1.3.1 个性化股骨假体制备 实验前采用 64 层螺旋 CT(GE 公司,美国)对尸体股骨全长沿股骨长轴方向以加密薄层 CT 横断面方式扫描,球管电流 200 mA,电压 120 kV,将 CT 图像数据传送到 CT 三维重建工作平台,数据处理后,完成尸体股骨 CT 三维重建。将三维 CT 数据传入 EBM 金属 3D 打印机(北京爱康宜诚医疗器材有限公司),分别根据股骨的形态参数设计和打印出两种个性化短柄假体。

1.3.2 股骨假体造模 将股骨头在股骨距上 12 mm 处切除,扩大髓腔,然后安装各组假体,尽可能使假体与骨髓腔紧密贴合。参考文献[7],本课题组设计一套新的股骨测试固定夹具(见图 2)。股骨远端放置于 BE 的夹具中,下端用牙托粉承托,股骨与力线倾斜 11°。股骨近端直接与力学试验机接触,加载过程中,股骨不会出现各个方向上的滑动。



图 2 生物力学试验固定夹具

Fig. 2 Fixation fixture for biomechanical test

1.3.3 生物力学测试 在苏州大学骨科研究所对 4 种股骨标本进行生物力学测试。① 初始稳定性测试:将标本置于 Instron 万能材料力学试验机,调整上下压头距离,使股骨正好处于竖直位置,股骨干与力线夹角 11°,做循环测试:80~800 N,频率 2 Hz,3 000 次循环,该步骤主要是消除股骨与夹具的间隙,以及股骨颈骨折滑移的位移。② 静力压缩测试:循环结束后,以 3 mm/min 速度做垂直压缩,直至模型破坏、压缩载荷至 6 kN 或者压缩变形超过 5 mm^[8]。

1.4 生物力学分析

1.4.1 初始稳定性测试 待 3 000 次循环结束后,统计测试循环测试前后,股骨发生的位移变化。

1.4.2 静力压缩测试 记录载荷-位移曲线,根据载荷-位移曲线的线性部分计算 4 种短柄假体的抗

压缩刚度,抗压刚度=压缩载荷/压缩位移,通过计算刚度,比较各组模型之间的固定效果。

1.5 统计学分析

应用 GraphPad Prism 8 统计学软件进行单因素方差分析和 Tukey 的多重比较检验, $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 个性化股骨假体制备

通过 EBM 金属 3D 打印技术成功制备出两种个性化股骨假体,均为 Ti6Al4V 钛合金材质的实体结构。柄体近端 2/3 表层为一体化金属打印的 3D 四面体微单元晶格微结构,四面体晶格结构的深度为 2 mm,孔径为 0.2~0.6 mm 混合孔径,孔隙率为 68%~72%。柄体远端 1/3 无微孔结构,逐渐狭窄,并且表面抛光处理。两种个性化短柄的长度根据股骨髓腔个性化差异长度,为 6~8 cm。

2.2 初始稳定性测试

3D 打印 2 组假体变形略低于 3D 打印 1 组,而明显低于 SMF、BE 组,但差异无统计学意义($P > 0.05$) [见表 1、图 3(a)]。

表 1 4 种短柄股骨假体初始稳定性测试结果

Tab. 1 Initial stability test results of four short shank femur prosthesis

组别	位移/mm
3D 打印 1 组	0.38±0.08
3D 打印 2 组	0.27±0.05
SMF 组	0.52±0.30
BE 组	0.50±0.27

2.3 静力压缩测试

3D 打印 2 组假体最大压缩载荷、抗压刚度均大于其余 3 组,最大压缩位移小于其余 3 组,差异仍无统计学意义($P > 0.05$) [见表 2、图 3(b)、图 4]。

表 2 4 种短柄股骨假体静力压缩试验结果

Tab. 2 Static compression test results of four short stem femoral prostheses

组别	最大压缩载荷/N	最大压缩位移/mm	抗压刚度/(N·mm ⁻¹)
3D 打印 1 组	3 563.38±1754.76	4.35±0.76	784.92±296.38
3D 打印 2 组	4 458.56±1244.21	4.76±0.42	957.65±362.18
SMF 组	2 387.07±349.56	3.70±0.96	694.50±288.66
BE 组	3 261.12±1177.54	4.74±0.46	687.05±221.65

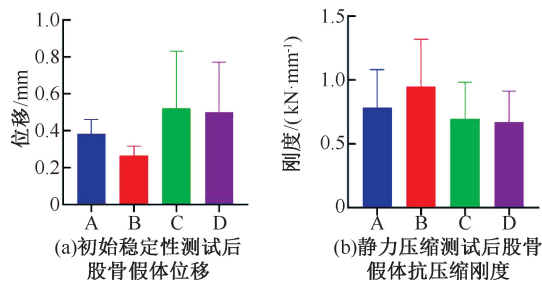


图3 4种短柄假体生物力学性能比较

Fig. 3 Comparison of biomechanical properties of four short stem prostheses (a) Displacement of femur prosthesis after initial stability test, (b) Compressive stiffness of femur prosthesis after static compression test

注: A、B、C、D 分别为 3D 打印 1 组、3D 打印 2 组、SMF 组、BE 组。

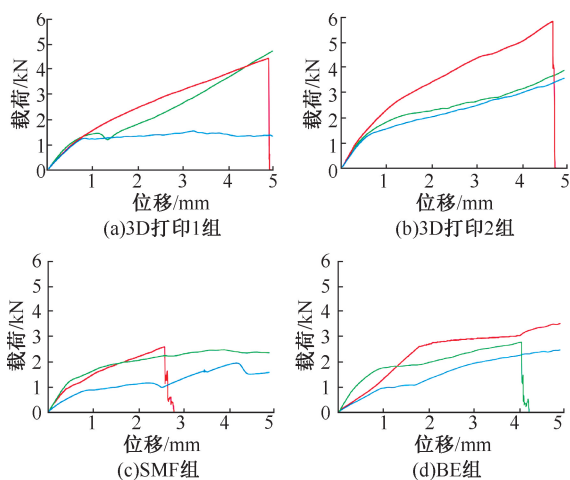


图4 4种短柄假体的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load displacement curves of four short stem prostheses

(a) 3D printing group 1, (b) 3D printing group 2, (c) SMF group, (d) BE group

注: 每组共检测 3 个标本, 每个标本由不同颜色的曲线表示。

3 讨论

3.1 个性化股骨假体设计

两种个性化短柄股骨假体的制备均采用整体EBM金属3D打印,为Ti6Al4V钛合金材质的实体结构,柄体近端2/3的表层为一体化金属打印的3D四面体微单元晶格微结构,四面体晶格结构的深度为2mm,立柱厚度大于0.2mm,从而达到假体的制造工艺及强度要求。其孔径为0.2~0.6mm的混合孔径,孔隙率68%~72%,该微孔结构已经被证实为适合骨科应力负荷传递以及骨长入^[9]。两种个性化假体的近端内侧和股骨近端髓腔内侧股骨矩区

域曲线吻合,外侧和大粗隆内侧骨接触。柄体远端1/3逐渐缩窄,与相应部位髓腔仅接触,无压配,无微孔结构,表面抛光处理,从而减少对髓腔皮质的应力刺激,减少大腿疼的发生率。3D打印个性化短柄假体A、B的区别在于:假体A为假体和股骨矩区域完全吻合及和股骨粗隆间髓腔匹配及压配的弧形流线型弯柄,流线型以期最大化减少假体柄的局部应力集中点,并且最大化增加股骨假体和髓腔的匹配度,并增加股骨髓腔对假体的箍应力和摩擦力[见图5(a)];假体B为在满足假体和股骨矩区域吻合及和股骨粗隆间髓腔匹配的基础上,适当减少对股骨近端外侧髓腔容积的占据,尽可能多地保存松质骨量。增加假体和冠状面上小粗隆水平及以下2cm髓腔之间的匹配,为楔形设计[见图5(b)]。

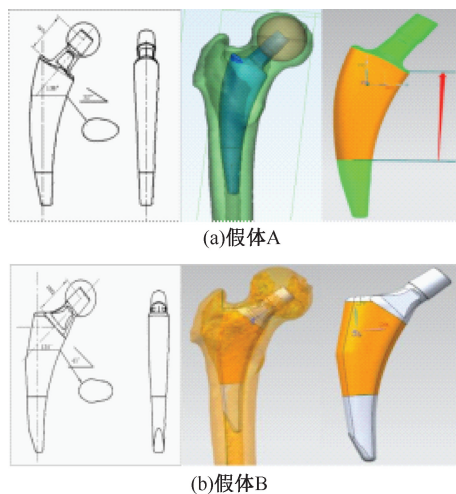


图5 3D打印组假体结构示意图及设计理念

Fig. 5 Structure diagram and design concept of 3D printing groups (a) Prosthesis A, (b) Prosthesis B

本研究的3D打印个性化短柄股骨假体均为干骺端髓腔压配固定,柄体远端与相同水平髓腔仅接触无压配,该固定方式可将假体所承受的压应力及扭转应力主要通过股骨干骺端传递,柄体中、远端仅承担部分压应力及扭转应力,更接近人体自然状态下的应力传递方式。这种固定方式不同于传统股骨假体,它对股骨近端(干骺端)会施加足够的应力刺激^[10]。根据Wolff定律,它可以减少股骨近端的应力遮挡效应,从而降低该部位的应力遮挡性骨吸收及假体无菌性松动的概率^[11]。3D打印个性化短柄股骨假体相对传统短柄假体的设计优势在于,前者是根据患者的股骨髓腔形态、前倾角、外展角

设计的最符合个体的股骨假体,而且适用于股骨近端畸形、前倾角异常,以及需纠正异常偏心距、下肢长度等特殊情况,而这种情况是普通的短柄假体甚至标准长度假体都很难做到的^[12]。个性化短柄股骨假体的另一个设计优势在于其近端内侧设计完全和股骨矩曲线吻合,这很有临床意义。股骨矩为股骨最坚硬的皮质骨,由于股骨髓腔开口指数存在个体差异,故股骨矩曲线也存在个体差异。普通短柄股骨假体植入往往需去除较多髓腔内股骨矩处皮质骨量以获得良好匹配,在坚硬的股骨矩处扩髓易产生过高热量,形成光滑的骨表面,阻止骨生长。而 3D 打印的个性柄近端和干骺端髓腔、粗隆间髓腔压配,和股骨矩内侧曲线吻合。术中几乎无需扩髓和对股骨矩进行磨锉,节省了大量股骨髓腔的准备时间,可明显减少因扩髓而导致的假体周围骨折、术中出血、肌肉损伤等并发症发生率。

3.2 个性化股骨假体制备

本研究的个性化股骨柄采用的是最新的 EBM 金属 3D 打印技术制备。相比较于普通短柄股骨假体,3D 打印个性化股骨柄的制备过程具有步骤简单,耗时少、费用低等优点。该技术能简捷、快速、精准地制造复杂形态内植物。同时,在内植物表层可一体化打印具有三维连通的微孔晶格结构,为诱导骨长入奠定了结构基础,而这正是人工股骨假体植入术后远期疗效的关键^[13]。尤其在假体-骨界面需骨长入的内植物制备方面具有独特优势,在骨科、齿科、创伤修复领域均有重要应用^[14]。个性化短柄股骨假体表层微孔结构为一体金属 3D 打印,无远期脱落风险,而且表层微孔结构的深度、形状、孔径、孔隙率均可自由调节,降低了普通生物型股骨假体需额外进行假体表面喷涂处理的时间和经济成本。3D 打印的钛合金微孔结构具备诱导骨细胞长入的能力,已得到动物实验及临床应用验证,短期疗效令人鼓舞^[15]。尽管 3D 打印个性化股骨柄有如此多的优点,但它需要高能 EBM 或选区激光熔融(selective laser melting, SLE)来制备。EBM 金属 3D 打印技术是由高能电子束有选择地熔化金属粉末,通过层层熔融堆积,直接制造金属部件。3D 打印出的金属部件与传统的短柄假体等经过材料切割、锤炼、锻造方式制造出的金属部件相比,其生物力学性能仍被一些学者担忧^[13]。尽管目前的

主流金属 3D 打印技术(EBM、SLM)已有超过铸造、略次于锻造的钛合金力学强度,但随着日新月异的金属 3D 打印技术(LENS、LasformTM)和材料技术(复合材料、梯度材料、非晶合金)的发展,相信 3D 打印医用内植物金属力学强度不足的缺陷一定能被克服^[16]。

3.3 短柄假体初始稳定性能检验

疲劳性能是人工关节生物力学性能的一项重要参数指标,直接影响产品的可靠性与稳定性。可观的抗疲劳强度不仅可以提高假体的固定效果,还可以提高假体的使用寿命和降低假体的远期松动率^[17]。针对本实验中的 4 种短柄假体,McCalden 等^[18]通过临床在体实验和两年随访证明了 SMF 股骨短柄假体拥有良好的抗疲劳强度和初始稳定性;BE 型柄是由北京春力正达医疗器械股份有限公司推出在市场上被公认为较优秀的短柄股骨假体,而另外两种个性化短柄假体的初始稳定性未知。由于实验中的 4 种假体被施加频率 2 Hz、3 000 次、80~800 N 正弦负载循环,可以模拟股骨假体在人体中的初期负荷,故本实验通过对这 4 种假体施加相同的循环载荷,对比 4 种假体的初始稳定性。结果表明,测试中各组假体均未断裂或失效。通过计算模型的变形量可反映出模型的初始稳定性。模型的变形量越小,证明模型的初始稳定性越强。实验结果显示,4 种短柄股骨假体的模型变形量相近,差异无统计学意义,证明两种个性化短柄与 SMF 柄和 BE 1 柄的初始稳定性能相当。因此,两种个性化短柄拥有着可靠的力学强度和初始稳定性。

3.4 短柄假体抗压性能检验

假体的抗压性能可直接反映假体与股骨的结合强度,而失效载荷和抗压刚度是假体抗压性能最重要的指标^[19]。1 位体重 70 kg 成年人单腿站立负荷为 1.4 kN^[7]。本实验 4 种假体的失效载荷均大于 2.1 kN,比平均成年男性的单腿站立负荷高 50%。其中,3D 打印 2 组的失效载荷大于 4.2 kN,超过成年人的单腿站立负荷的 3 倍。该结果证明,两种个性化假体可以满足患者的日常活动需求,具有较为优秀的抗压性能。在载荷-位移曲线中,模型刚度通过 0.4~1.4 kN 范围的线性斜率计算。抗压刚度是指股骨在垂直向下载荷作用下抵抗变形的能力,它是人工股骨假体最重要的指

标^[20]。模型的抗压缩刚度越大,股骨假体植入后的力学稳定性越好。结果表明,4种短柄假体的抗压缩刚度类似。本文认为,即使两种个性柄均为3D打印技术制备,但其力学稳定性丝毫不弱于甚至超过其余两种传统减材方式制备的短柄假体。

4 结论

本文通过对尸体股骨标本CT扫描建模,成功采用EBM金属3D打印技术快速制造两种新型个性化短柄股骨假体。个性柄具有个性化、制造简单、一体化涂层等诸多优点,但其植入股骨后的力学性能仍受到质疑。本文在尸体股骨标本建立股骨假体置换模型,通过对模型进行初始稳定性测试和静力压缩测试,对比两种3D打印短柄假体与目前主流的两款非3D打印短柄假体的生物力学性能。结果发现,两种个性化3D打印钛合金股骨假体的初始稳定性和生物力学强度与目前临床常用的股骨SMF、BE 1假体相当,力学稳定性较好。

本研究也存在一定局限性:①只完成初始稳定性实验和静力压缩实验,未完成生物力学扭转实验,故仍需进一步探究抗扭转性能;②目前尚未完成临床IV期在体实验,即将3D打印个性化短柄假体植入患者股骨(个性化人工关节置换),并与传统短柄假体进行临床对照研究,评估个性化柄在体内的生物力学及临床表现。

参考文献:

[1] HINES CB, COLLINS-YODER A. Bone cement implantation syndrome; Key concepts for perioperative nurses [J]. *Aorn J*, 2019, 109(2): 202-216.

[2] BROWN TE, HARPER BL, BJORGUL K, et al. Comparison of cemented and uncemented fixation in total knee arthroplasty [J]. *Orthopedics*, 2013, 36(5): 380-387.

[3] KUTZNER KP, DONNER S, LOWEG L, et al. Mid-term results of a new-generation calcar-guided short stem in THA; Clinical and radiological 5-year follow-up of 216 cases [J]. *J Orthop Traumatol*, 2019, 20(1): 1-8.

[4] MANTELLI P, FIORUZZI A, BISOGNO L, et al. Short femoral stem and porous titanium: Winning combination? [J]. *Acta Biomed*, 2014, 85(Suppl 2): 71-74.

[5] 刘宏伟, 蒋俊锋, 张云坤, 等. 金属3D打印个性化股骨假体和4种类型标准化假体的生物力学对比[J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(32): 5151-5157.

[6] 刘宏伟, 张文, 蒋俊锋, 等. 个性化钛合金短柄股骨假体的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(3): 359-364.

LIU HW, ZHANG W, JIANG JF, et al. Biomechanical study on personalized titanium alloy short femoral

prosthesis [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(3): 359-364.

[7] CRISTOFOLINI L, VICECONTI Y, CAPPELLO A, et al. Toni mechanical validation of whole bone composite femur model [J]. *J Biomech*, 1996, 29(4): 525-535.

[8] KEMKER B, MAGONE K, OWEN J, et al. A sliding hip screw augmented with 2 screws is biomechanically similar to an inverted triad of cannulated screws in repair of a Pauwels type-III fracture [J]. *Injury*, 2017, 48(8): 1743-1748.

[9] WANG C, LIU D, XIE Q, et al. A 3D printed porous titanium alloy rod with diamond crystal lattice for treatment of the early-stage femoral head osteonecrosis in sheep [J]. *Int J Med Sci*, 2019, 16(3): 486-493.

[10] PATEL RM, LO WM, CAYO MA, et al. Stable, dependable fixation of short-stem femoral implants at 5 years [J]. *Orthopedics*, 2013, 36(3): e301-e307.

[11] VAN RIETBERGEN B, HUISKES R, WEINANS H, et al. ESB Research Award 1992. The mechanism of bone remodeling and resorption around press-fitted THA stems [J]. *J Biomech*, 1993, 26(4-5): 369-382.

[12] ARABNEJAD S, JOHNSTON B, TANZER M, et al. Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty [J]. *J Orthop Res*, 2017, 35(8): 1774-1783.

[13] LI SJ, XU QS, WANG Z, et al. Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method [J]. *Acta Biomater*, 2014, 10(10): 4537-4547.

[14] 郭芳, 黄硕, 胡敏, 等. 3D打印表面多孔钛根形种植体的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(1): 85-91.

GUO F, HUANG S, HU M, et al. Biomechanical study of three-dimensional printed titanium root-analogue implant with porous surface [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(1): 85-91.

[15] ZHAO Q, YI L, HU A, et al. Antibacterial and osteogenic activity of a multifunctional microporous coating codoped with Mg, Cu and F on titanium [J]. *J Mater Chem B*, 2019, 7(14): 2284-2299.

[16] KHORSANDI D, FAHIMIPOUR A, ABASIAN P, et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications [J]. *Acta Biomater*, 2021, 122: 26-49.

[17] HE R, ZHAO LG, SILBERSCHMIDT VV, et al. A computational study of fatigue resistance of nitinol stents subjected to walk-induced femoropopliteal artery motion [J]. *J Biomech*, 2021, 118: 110295.

[18] MCCALDEN RW, KORCZAK A, SOMERVILLE L, et al. A randomised trial comparing a short and a standard-length metaphyseal engaging cementless femoral stem using radiostereometric analysis [J]. *Bone Joint J*, 2015, 97-B(5): 595-602.

[19] KARAARSLAN AA, KARAKA LI A, KARCI T, et al. A new compression design that increases proximal locking screw bending resistance in femur compression nails [J]. *Acta Orthop Belg*, 2015, 81(2): 245-250.

[20] KANCHANOMAI C, MUANJAN P, PHIPHOBMONGKOL V, et al. Stiffness and endurance of a locking compression plate fixed on fractured femur [J]. *J Appl Biomech*, 2010, 26(1): 10-16.