

· 基础研究 ·

3D 打印多孔钛钢板一体化植入体修复髌臼后壁
粉碎性骨折合并骨缺损的初步研究张彦超¹, 李建军¹, 侯文韬², 张海峰³, 刘纪红³

(1. 中国医科大学附属盛京医院创伤骨科, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院金属研究所材料科学国家实验室, 辽宁 沈阳 110016; 3. 东北大学中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

【摘要】 目的: 探讨应用计算机辅助设计 (computer-aided design, CAD) 结合 3D 打印技术对髌臼后壁粉碎性骨折合并骨软骨缺损进行修复重建的可行性, 评估多孔钛合金支架钢板一体化植入体复合氮化钛生物陶瓷涂层的生物力学性能。**方法:** 基于连续断层 CT 图像, 利用 CAD 软件来构建具有特定三维内部结构的多孔钛钢板一体化植入体数字模型, 以 Ti6Al4V 粉末为原材料打印出实体并于其关节面复合氮化钛涂层, 观察植入体与髌臼匹配和贴附情况; 利用 Ansys 软件进行有限元建模, 分析正常组、传统组及植入体组髌臼在相同载荷状态下的应力分布、应力传导及形变位移等情况, 验证植入体的生物力学性能。**结果:** 植入体的多孔钛合金支架与髌臼匹配程度良好, 钢板形态基本与骨表面贴附, 根据 Matta 复位标准评定为优。有限元分析结果显示: 植入体重建后髌臼在 Von Mises 应力峰值 13.38 MPa 接近正常组 13.11 MPa, 小于传统组 15.66 MPa; 植入体重建后的髌臼在应力分布和传导与正常组基本一致, 稍优于传统组; 植入体的最大相对位移为 0.166 mm, 处于可以接受的范围。**结论:** 3D 技术制备的多孔钛合金支架钢板一体化植入体复合氮化钛涂层具备优良的匹配度和生物力学性能; 解剖重建使后壁头臼应力分布及传导恢复比较理想, 接近正常的髌关节, 其为临床治疗髌臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损的病例提供新选择。

【关键词】 打印, 三维; 有限元分析; 髌臼; 骨折, 粉碎性

中图分类号: R683.3

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.05.016

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



A preliminary study of three-dimensional printed porous titanium plate integrated implant for the repair of comminuted acetabular posterior wall fracture with bone defect ZHANG Yan-chao, LI Jian-jun*, HOU Wen-tao, ZHANG Hai-feng, and LIU Ji-hong. Department of Orthopaedics, Shengjing Hospital of China Medical University, Shenyang 110004, Liaoning, China

ABSTRACT Objective: To explore the feasibility of using computer-aided design (CAD) combined with 3D printing technology to repair and reconstruct the comminuted fracture of the posterior wall of acetabulum with osteochondral defect, to evaluate the biomechanical properties of composite titanium nitride bioceramic coatings with porous titanium alloy scaffolds and steel plate integrated implants. **Methods:** Based on CT images of continuous tomography, the computer-aided design software was used to construct a digital model of porous titanium alloy plate implant with a specially open cellular three-dimensional structure, and the three-dimensional implant was prepared with Ti6Al4V powder by using the 3D printing technology, following by titanium nitride coating on its articular surface. The degree of matching and attachment between the implant and acetabulum were observed; Ansys software was used for finite element modeling to analyze the stress distribution, stress conduction and deformation displacement of the acetabulum of the normal group, the traditional group and the implant group under the same load state, and to verify the biomechanical properties of the implant. **Results:** The porous titanium alloy implant fit well with the acetabular bone defects, the shape of the plate was well attached to the bone surface, and it was rated as excellent according to the Matta criteria. The Von Mises stress peak of the implant group 13.38 MPa was close to the normal group 13.11 MPa and smaller than that in the traditional group 15.66 MPa. The Von Mises stress distribution and conduction of implant group were basically consistent with the normal group, slightly better than the traditional group; the maximum relative displacement of the implant was 0.166 mm, according to the finite element analysis. **Conclusion:** The porous titanium alloy stent plate implant with titanium nitride coating prepared by 3D technology has excellent matching degree and biomechanical properties; the anatomi-

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (编号: 201602836)

Fund program: Natural Science Foundation of the Department of Science and Technology of Liaoning Province (NO. 201602836)

通讯作者: 李建军 E-mail: lij2046@126.com

Corresponding author: LI Jian-jun E-mail: lij2046@126.com

cal reconstruction makes the stress distribution and conduction recovery well, close to normal hip joints, which provides a new option for the clinical treatment of comminuted posterior acetabular wall fractures with severe bone defects.

KEYWORDS Printing, three-dimensional; Finite element analysis; Acetabulum; Fractures, comminuted

髋臼后壁粉碎性骨折多由高能量创伤间接传导所致, 往往因为不能使用原本粉碎的游离骨块进行解剖性重建后壁骨性结构或者关节面软骨下骨被压缩, 进而造成后壁骨缺损。目前文献主要使用骨移植联合不同的内固定方式治疗髋臼后壁粉碎性骨折合并骨缺损, 但术后创伤性关节炎、骨坏死溶解及股骨头再脱位等的发病率在不断上升, 仍有较高的危险性^[1-2]。因此, 寻求新技术方法进行重建头臼对应的解剖形态和稳定有效固定具有重要的临床意义。近年来, 3D 打印技术可以制备兼有结构和功能双重作用的多孔金属假体, 不仅能实现其与局部解剖精确匹配, 而且还能通过多孔化设计诱导早期骨长入实现假体稳定而有效的远期固定^[3]。此外, 大量基础实验研究表明, 骨组织工程支架具备优良的修复重建骨缺损的潜能, 为临床治疗骨缺损提供了新思路^[4]。

本研究的前期实验已对电子束熔融 (electron beam melting, EBM) 技术制备的多孔钛合金在生物力学性能及骨长入方面做了充分的论证^[5-7], 但目前国内外尚无其在髋臼后壁粉碎性骨折合并骨缺损领域应用的病例报道。因此, 自 2016 年 8 月起, 本研究考虑尝试以多孔钛合金支架复合氮化钛涂层为骨/软骨缺损修复元件, 联合钢板一期修复重建髋臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损病例, 旨在探讨利用 EBM 技术制备多孔钛合金支架/钢板一体化植入体的可行性, 通过有限元建模分析论证一体化植入体的有效性, 为其将来临床应用于治疗髋臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 实验材料

本实验采用 Ti6Al4V-ELI 医疗 (由上海施乐辉医疗器械股份有限公司制作) 用合金粉末材料, Ti6Al4V 粉末的元素成分为: 6.04% Al, 4.05% V, 0.013% C, 0.07% Fe, 0.13% O, 低于 0.005% 的 N 和 H, 余量为 Ti (质量百分比)^[5]。样品由中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家实验室利用 EBM 技术打印制备。

1.2 临床资料

选择我院髋臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损患者 1 例, 男, 28 岁, 身高 172 cm, 体重 65 kg。骨折按 Letournel-Judent 分型, 属于后壁骨折 (I 型), 骨折块粉碎化, CT 显示后壁骨缺损 >40% (图 1a)。经患者知情同意后, 通过术前影像检查 CT 平扫获得患者 3 个解剖层面的连续断层数据, 并以 DICOM 格式保

存文件。

1.3 仪器设备

Brilliance 256 层螺旋 CT (PHILIPS, 扫描电压 120 kV, 层距 1 mm)、Surface pro4 计算机 (Window10 操作系统, Intel i5 处理器, 256 G 内存, HD520 显卡, 8G 显存)、Mimics 17.0 (比利时, Materialize NV)、Magics 19.0 (比利时, Materialize NV)、EBM 电子束熔融快速成型系统 (瑞典, Arcam 公司, 型号 A1)、Ansys 16.0 (美国 ANSYS 公司)

1.4 制作方法

通过螺旋 CT 扫描获得层厚为 1 mm 的连续断层图像 (共 294 层), 以 DICOM 格式保存并导入 Mimics 17.0 软件, 通过阈值分割及区域增长建立骨盆蒙板, 然后编辑蒙板分离左、右髋骨及骶骨图层, 对各图层分别进行三维实体建模, 以 STL 格式保存; 在 Mimics 17.0 软件中, 利用健侧镜像作差法及布尔作差法即可得出缺损区域模型; 将所得骨缺损模型与钢板模型导入 Magics 19.0 软件中进行装配和多孔化设计, 设计出多孔钛合金支架/钢板一体化植入体的数字模型; 把一体化植入体数字模型转化为分层扫描程序, 转化为片层信息, 采用电子束熔融技术层层堆积从而得到一体化植入体的三维实体, 其后在化学反应辅助的磁控溅射工艺下获得厚度为 2 mm 的氮化钛涂层于植入体关节面。

1.5 有限元分析

一体化植入体数字模型设计完成后, 赋值、导入 Ansys 16.0 (美国 ANSYS 公司) 有限元分析软件, 设置螺钉与骨盆的接触为绑定, 设定约束条件给予 600 N 负荷轴向加载, 模拟单脚站立静息状态下髋臼分别在正常生理状态、植入体重建及传统方法重建时受力分布及受力传导情况, 同时分析植入体的剪切应力及相对位移, 以论证一体化植入体设计的安全性和可靠性。分析过程中假设使用的材料为同一的和各向同性的, 同时设定所用材料模型为均匀连续的线弹性材料模型^[8], 各材料的参数见表 1。

表 1 重建骨盆三维有限元分析模型各材料属性

Tab.1 Material properties of reconstructed pelvic three-dimensional finite element analysis model

材料	杨氏模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	17 000	0.30
松质骨	345	0.20
Ti6Al4V	120	0.33

1.6 观察项目及方法

观察植入体与髌臼匹配和贴附情况,采用 Matta 髌臼复位标准评价骨折复位质量;通过有限元分析结果对比分析植入体组与正常组、传统组在 Von Mises 应力峰值大小、应力分布、应力传导及形变位移程度等方面的差异。

2 结果

2.1 骨盆、一体化植入体的数字重建模型及三维实体模型(图 1)

计算机辅助设计(computer assisted design, CAD)设计出具有特定内部结构且高度匹配的三维一体化植入体(图 1b, 1c),EBM 技术 1:1 打印出以 Ti6Al4V 为原材料的三维支架实体模型及以聚乙烯材质的骨盆模型(图 1d, 1e)。重建出的三维一体化植入体,其多孔钛合金支架与髌臼匹配程度良好,钢板形态与骨表面贴附良好,螺钉未进入关节面,固定位置符合手术置入的标准。根据 Matta 髌臼骨折复位标准,评价植入体组骨折复位质量为优。

2.2 重建固定髌臼后的受力分布及受力传导

应力分布云图显示(图 2a, 2b, 2c):同种加载符合压力下,植入体修复重建后的髌臼窝表面 Von

Mises 应力峰值主要集中于髌臼后壁,最大 Von Mises 应力为 13.38 MPa,与对侧正常髌臼应力峰值 13.11 MPa 接近,远小于钛合金的屈服强度(950±14) MPa^[9],且传统方法修复重建后的髌臼表现为 Von Mises 应力增大,峰值为 15.66 MPa;多孔钛合金支架/钢板一体化植入体复合氮化钛涂层重建后的髌臼与对侧正常髌臼受力分布基本一致,明显优于传统方法重建出的髌臼。

模型位移分布云图显示(图 2d, 2e):模拟单脚站立位静息状态下,随着加载负荷压力的增大,应力传导范围变广;多孔钛合金支架/钢板一体化植入体复合氮化钛涂层重建后的髌臼应力传导途径和健侧髌臼基本一致,符合生理应力传导特点。

植入体表面剪切应力云图显示(图 2f):随着加载负荷压力的增大,植入体剪切应力也增大,但是远小于螺钉金属材质屈服强度;表面剪切应力的峰值主要存在螺钉及植入体与髌臼接触边缘附近;在重建骨盆假体模型中,3D 打印一体化植入体位移分布如图 2e 所示:其位移主要集中在下缘钢板与髌臼连接面处,植入体的最大位移为 0.166 mm,处于可以接受的范围。

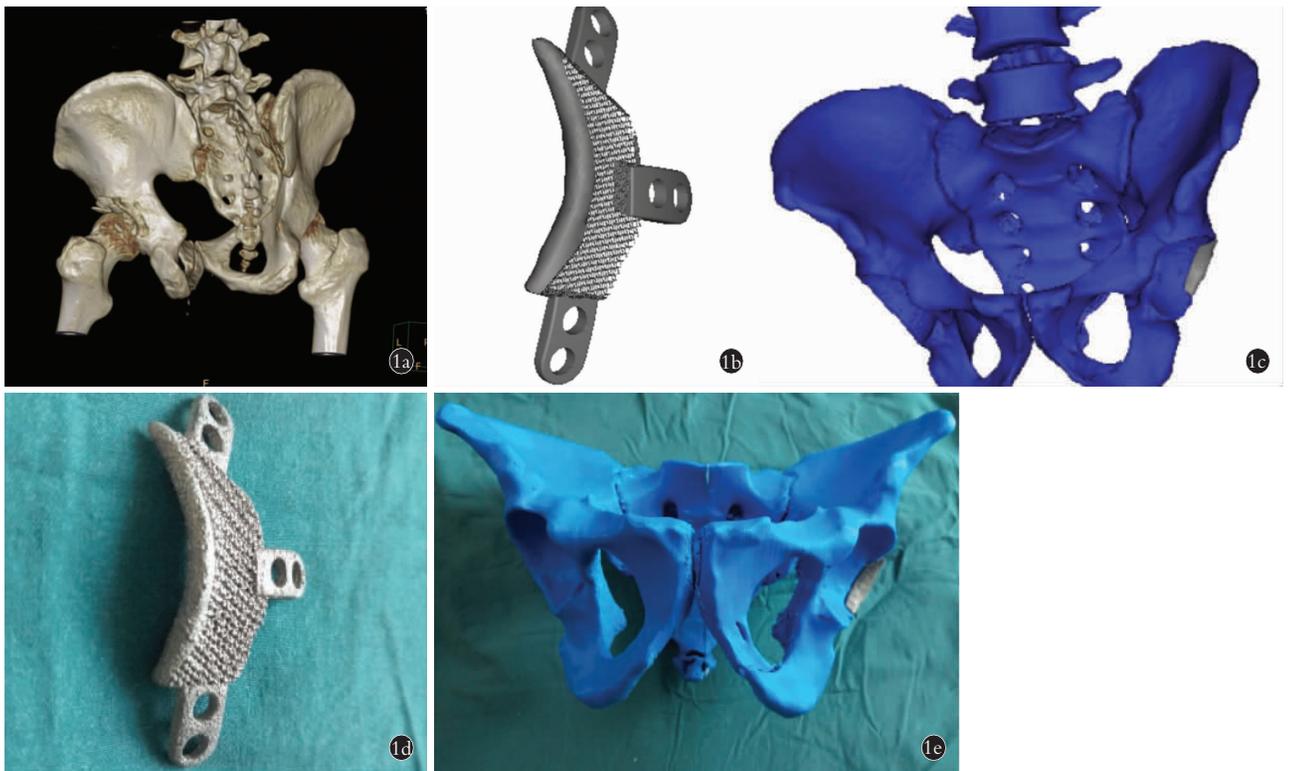


图 1 骨盆、一体化植入体的数字重建模型及三维实体模型 1a. 术前骨盆三维 CT 显示左髌臼后壁粉碎性骨折合并骨缺损 1b. 一体化植入体数字模型 1c. 植入体修复重建骨盆数字模型 1d. 一体化植入体实体 1e. 植入体修复重建骨盆实体

Fig.1 Digital reconstruction model and three-dimensional solid model of pelvis and integrated implant 1a. Preoperative pelvic three-dimensional CT showed comminuted fracture of posterior wall of left acetabulum with bone defect 1b. Digital mode of the integrated implant 1c. Digital reconstruction model of left acetabulum 1d. Solid model of the integrated implant 1e. Solid reconstruction model left acetabulum

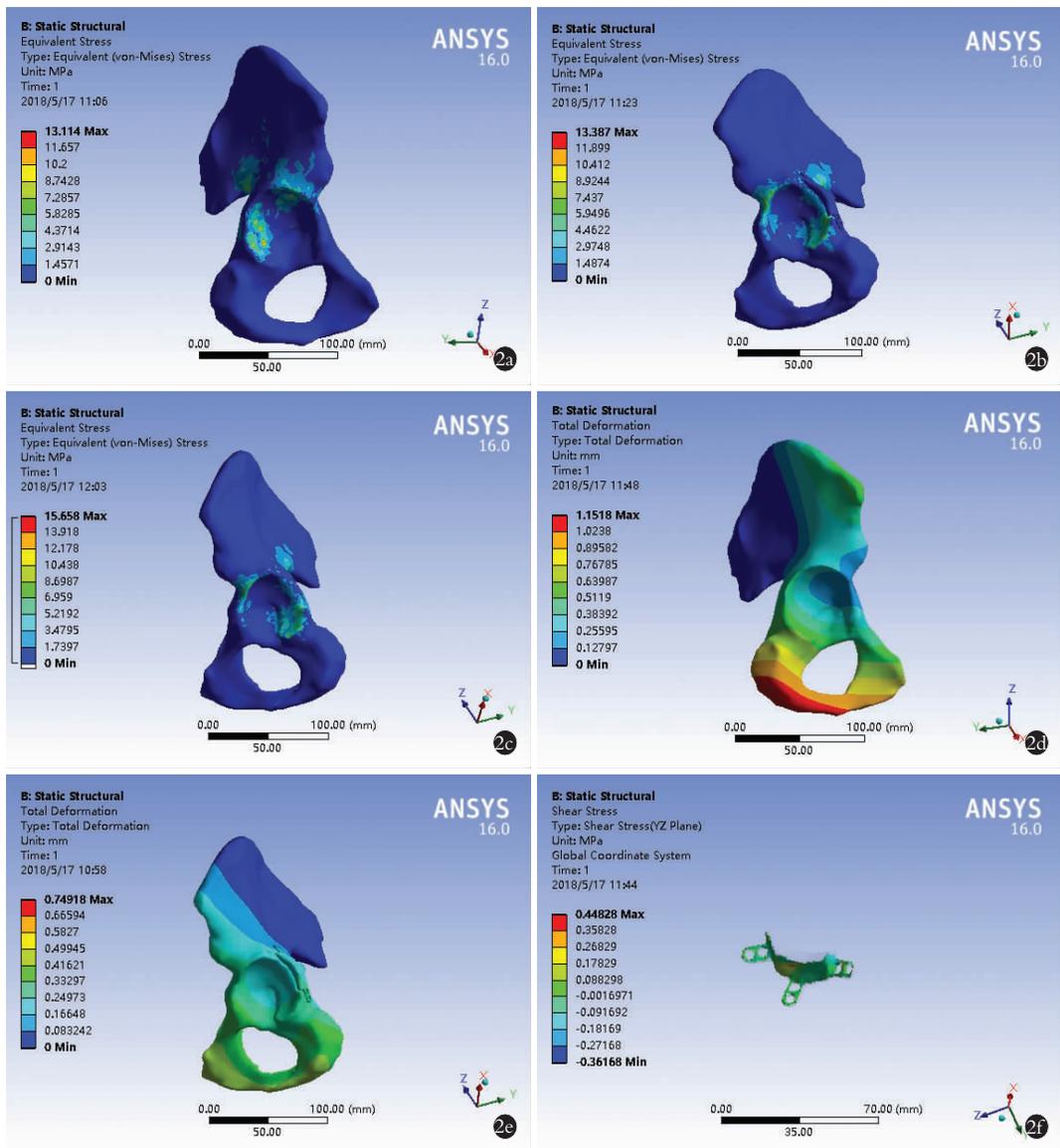


图 2 多孔钛钢板一体化植入体复合氮化钛涂层的有限元分析结果 2a. 对侧正常髋臼 Von Mises 应力的分布图(正常组) 2b. 植入体修复髋臼 Von Mises 应力的分布图(植入体组) 2c. 传统法修复髋臼 Von Mises 应力的分布图(传统组) 2d. 对侧正常髋臼的位移分布图(正常组) 2e. 植入体修复髋臼的位移分布图(植入体组) 2f. 一体化植入体表面剪切力分布图

Fig.2 Finite element analysis of porous titanium alloy plate implant with titanium nitride coating 2a. Distribution of Von Mises stress in the contralateral normal acetabulum (Normal group) 2b. Distribution of Von Mises stress in the acetabulum repaired by implant (Implant group) 2c. Distribution of Von Mises stress in the acetabulum repaired by traditional procedure (Traditional group) 2d. Distribution of deformation in the contralateral normal acetabulum (Normal group) 2e. Distribution of deformation in the acetabulum repaired by implant (Implant group) 2f. Distribution of shear stress in implant

3 讨论

3.1 髋臼后壁粉碎性骨折合并骨缺损新型修复重建方式的必要性

后壁骨折是髋臼骨折最常见的类型，由于髋臼解剖结构复杂，后壁薄厚不一，骨折块相对小而薄，尤其伴有关节面软骨的边缘游离骨块，骨折系复杂的关节内骨折，手术难度较大且术后并发症多，故髋臼后壁严重粉碎性骨折合并骨缺损一直是创伤骨科的治疗难题。其中，骨缺损的解剖性修复重建和术中

有效而坚强的内固定被公认为手术成功的金标准^[3,10]。但是，临床上对于此类型病例的缺损修复重建和固定方式目前并没有统一的标准。弹性钢板联合骨盆重建钢板是国内文献^[1,10]报道最多的固定方式，但是弹性钢板可由多种钢板充当，究竟重建钢板与哪一种弹性钢板组合效果最好，尚不明确。随着内固定器械及技术的不断发展，国内外学者^[11-12]亦在此领域对骨盆重建钢板做出了大量的尝试，但一直未能获得实质性的突破。此外，目前文献关于重建

髌臼缺损的方法依然停滞在人造骨、异体冻干骨及自体髌骨等传统领域,骨移植技术很大程度上受限于高成本、易排斥、来源少等缺点^[13]。长期的术后随访资料显示,即使手术重建了髌臼的解剖形态并获得坚强的内固定,恢复了“头臼对应”关系,达成了髌臼与股骨头的生理性匹配,但是伴随着负重的不断增加及活动形式的复杂化,复位的骨折块存在松动、萎缩、坏死及溶解的可能性及内固定物失效的可能性,严重时再次出现塌陷导致髌臼“同心圆”结构的改变。术后疗效满意度调查显示,不满意度高达 32%^[14]。本研究利用一体化多孔 Ti6Al4V 支架复合氮化钛涂层解剖重建髌臼后壁骨/软骨缺损区域,最大程度地还原正常髌关节的解剖学特性及受力传导特征,从根本上避免了自体骨移植的“点面摩擦”、骨折块松动溶解及固定丢失的可能,有效降低了并发症的发生。

3.2 3D 打印多孔钛合金支架-钢板一体化植入体的可行性

近年来,3D 打印技术越来越多在临床修复重建领域得到应用,尤其是利用 EBM 快速成形技术制备多孔金属材料的工艺成熟,可在不牺牲生物力学性能和生物相容性的前提下制备出孔隙率和孔结构可调的多孔金属材料,以获得生物力学性能优异、可以与人体组织良好结合的骨组织替代植入体^[3,15]。随着 3D 打印技术及材料学的发展,我们的合作机构早已证实了由 EBM 技术制备的多孔 Ti6V14V 支架拥有接近人体骨骼的弹性模量和诱导骨组织长入两大优势^[5-7]。多孔钛合金具备比重小、比强度高、弹性模量低,生物力学性能优良,生物相容性好等特点:(1)弹性模量为 0.2~6.3 GPa,与人体骨组织基本匹配,适用于制备人体植入物。(2)压缩强度范围 4~113 MPa,接近于人体皮质骨的强度,且高于人体小梁骨的强度要求。(3)孔隙率 62%~86%,可为骨小梁长入提供类似松质骨的三维蜂窝结构^[6]。Yang 等^[16]通过实验研究证实多孔 Ti6Al4V 作为载体治疗兔股骨骨缺损,不仅能够增加支架周围的骨长入性能,而且能够诱导成骨细胞再生性能。Delanois 等^[17]在髌关节翻修手术中使用了多孔钛合金植入体,早期骨长入增强了远期假体的稳定性,有效的降低假体松动、内固定断裂等相关并发症的发生率。国内亦有西京医院学者付军等^[18]临床随访证实了钛合金 3D 打印假体治疗骨盆腔肿瘤获得良好的术后疗效。目前国内外尚无多孔钛联合钢板 I 期修复重建髌臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损病例的报道,文献更多的报道 3D 打印多孔金属假体在骨盆腔肿瘤和髌关节翻修术的应用。与其他重建固定方式相比,笔者认为本研究方案

具有以下优势:(1)EBM 技术的应用精准地重建了骨缺损区域支架^[3],有效的恢复了髌臼月状关节面与股骨头的生理性匹配,恢复了骨缺损处的解剖架构,为髌臼后壁提供了坚强的结构支持,保证了植入体的初始稳定性。(2)多孔钛合金支架凭借着均匀规律的孔径分布而拥有接近于松质骨的弹性模量、接近于皮质骨的强度和强于镁锆钽等金属的疲劳强度,不仅恢复髌臼的原始旋转中心和生物力学性能,而且早期骨长入还为一体化植入体提供了远期稳定性^[5-7]。(3)该一体化植入体中钢板的设计吸收了联合使用弹性钢板效果明显优于单独使用重建钢板的理念,上下钢板模拟骨盆重建钢板,中间钢板模拟弹性钢板,有效避免多孔金属假体在负重情况下的滑动和扭转。(4)与植骨联合钢板等传统固定相比,一体化植入体的设计允许患者早期下地进行康复功能锻炼有效缩短卧床时间,避免了因长期卧床而带来的褥疮、坠积性肺炎等并发症。(5)该一体化植入体在化学反应辅助的磁控溅射工艺下获得厚度为 2 mm 的氮化钛涂层,其作为一种新型的多功能陶瓷材料,硬度大、化学稳定性稳定、生物相容性高、摩擦系数较低、具耐磨性远超过镀金层和其他仿合金镀层,可有效的修复粉碎缺损的关节面,降低继发性创伤性关节炎的发病率^[19]。

3.3 3D 打印多孔钛合金支架-钢板一体化植入体的有效性

由于髌臼结构的特殊性与复杂性,几何形状不规则,基本无法通过实体测量髌臼应力分布及传导情况来获取髌臼内部力学特性。早期文献只能借助尸体标本模拟重建骨折类型,通过机械物理方法进行分析评价不同固定方式的有效性和机械性能^[10,20]。目前已有大量文献对髌臼后壁粉碎性骨折的不同内固定方式进行有限元模型建立,恢复骨盆真正的解剖结构,从生物力学性能的角度为临床决策提供可靠的理论支持^[8,21]。本研究利用有限元分析中化整为零的思想方法,对植入体进行划分单元,通过对单元进行力学计算与分析来等效得出整体的力学特性。有限元分析结果显示多孔钛合金支架/钢板一体化植入体复合氮化钛涂层重建后的髌臼与正常髌臼应力分布及传导基本一致,其 Von Mises 应力峰值远远小于 Ti6Al4V 材料的极限强度($1\ 005 \pm 26$) MPa^[9],植入体的最大形变位移和表面剪切应力均在可接受范围内,其有效性和稳定性能够满足人体生物力学要求,证实了其在髌臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损病例中的安全性和可靠性。但是,该研究采用 Ti6Al4V 支架修复缺损的髌臼后壁,舍弃了游离粉碎的骨块而导致骨量丢失,而且未能对一

体化植入体进行疲劳测试实验,可能会低估植入体松动、内固定断裂等风险;另外,3D 打印多孔钛支架/钢板一体化植入体复合氮化钛涂层修复髌臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损的远期疗效还需临床大样本的数据观察与随访。

综上所述,3D 打印多孔钛合金支架/钢板一体化植入体复合氮化钛生物陶瓷涂层具备优良的生物力学性能和良好的生物相容性,本初步研究证实了现阶段技术的可行性,并且通过有限元建模与分析进一步证实其在临床应用的安全性和可靠性,是临床治疗髌臼后壁粉碎性骨折合并严重骨缺损病例的新型选择,具有一定的临床应用价值。

参考文献

- [1] Lee C, Johnson EE. Use of spring plates in fixation of comminuted posterior wall acetabular fractures[J]. *J Orthop Trauma*, 2018, 32 (Suppl 1): S55-S59.
- [2] Veerappa LA, Tripathy SK, Sen RK. Management of neglected acetabular fractures[J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2015, 41 (4): 343-348.
- [3] Tan XP, Tan YJ, Chow CSL, et al. Metallic powder-bed based 3D printing of cellular scaffolds for orthopaedic implants: A state-of-the-art review on manufacturing, topological design, mechanical properties and biocompatibility[J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2017, 76: 1328-1343.
- [4] Kumar A, Mandal S, Barui S, et al. Low temperature additive manufacturing of three dimensional scaffolds for bone-tissue engineering applications: Processing related challenges and property assessment[J]. *Mater Sci Engineering R*, 2016, 103: 1-39.
- [5] Zhao S, Li SJ, Hou WT, et al. The influence of cell morphology on the compressive fatigue behavior of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2016, 59: 251-264.
- [6] 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.
- [7] Nune KC, Kumar A, Misra RD, et al. Osteoblast functions in functionally graded Ti-6Al-4 V mesh structures[J]. *J Biomater Appl*, 2016, 30(8): 1182-1204.
- [8] Liu XM, Pan CW, Wang GD, et al. Finite element analysis of the stability of combined plate internal fixation in posterior wall fractures of acetabulum[J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8(8): 13393-12297.
- [9] Yang D, Liu Z. Quantification of microstructural features and prediction of mechanical properties of a dual-phase Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Materials (Basel)*, 2016, 9(8): pii: E628.
- [10] 贾献荣. 髌臼后壁重建模型的建立及其生物力学分析[J]. *中国骨伤*, 2016, 29(4): 306-310.
- [11] JIA XR. Establishment and biomechanical analysis of reconstruction model of the posterior wall of acetabulum[J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2016, 29(4): 306-310. Chinese with abstract in English.
- [12] Zhang Y, Zhao X, Tang Y, et al. Comparative study of comminuted posterior acetabular wall fracture treated with the acetabular tridimensional memory fixation system[J]. *Injury*, 2014, 45(4): 725-731.
- [13] Lee AK, Wagner BR, McPhillips K, et al. Locking compression pylon plate for fixation of comminuted posterior wall acetabular fractures: a novel technique[J]. *J Orthop Trauma*, 2017, 31(1): e32.
- [14] Randelli F, Maglione D, Favilla S, et al. Total hip arthroplasty for post-traumatic arthritis after acetabular fractures[J]. *LO SCALP-ELLO-OTODI Educational*, 2015, 29(3): 204-210.
- [15] Krause PC, Braud JL, Whatley JM. Total hip arthroplasty after previous fracture surgery[J]. *Orthop Clin North Am*, 2015, 46(2): 193-213.
- [16] Gorsse S, Hutchinson C, Gouné M, et al. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys[J]. *Sci Technol Advanced Mater*, 2017, 18(1): 584.
- [17] Yang J, Chen HJ, Zhu XD, et al. Enhanced repair of a critical-sized segmental bone defect in rabbit femur by surface microstructured porous titanium[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2014, 25(7): 1747-1756.
- [18] Delanois RE, Gwam CU, Mohamed N, et al. Midterm outcomes of revision total hip arthroplasty with the use of a multihole highly-porous titanium shell[J]. *J Arthroplasty*, 2017, 32(9): 2806-2809.
- [19] 付军, 郭征, 范宏斌, 等. 应用 3D 打印假体重建下肢肿瘤性长节段骨缺损[J]. *中华骨科杂志*, 2017, 37(7): 433-440.
- [20] FU J, GUO Z, FAN HB, et al. Application of 3D-printed prosthesis on construction of long segmental bone defect after tumor resection [J]. *Zhonghua Gu Ke Za Zhi*, 2017, 37(7): 433-440. Chinese.
- [21] van Hove RP, Siersevelt IN, van Royen BJ, et al. Titanium-Nitride coating of orthopaedic implants: a review of the literature[J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015: 485975.
- [22] 董伊隆, 钱约男, 刘良乐, 等. 髌臼骨折不同内固定方式的生物力学稳定性研究[J]. *中国骨伤*, 2018, 31(5): 420-424.
- [23] DONG YL, QIAN YN, LIU LL, et al. Biomechanical stability study on different internal fixation for acetabular fracture [J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2018, 31(5): 420-424. Chinese with abstract in English.
- [24] Lei J, Liu H, Li Z, et al. Biomechanical comparison of fixation systems in posterior wall fracture of acetabulum by finite element analysis[J]. *Comput Assist Surg*, 2016, 21(1): 117-126.

(收稿日期: 2018-07-20 本文编辑: 王玉蔓)