

3D 打印多孔钽金属治疗发育性髋关节发育不良：现状及应用前景

贺垠皓, 李晓声, 陈宏文, 陈铁柱

<https://doi.org/10.12307/2023.240>

投稿日期: 2022-01-29

采用日期: 2022-04-18

修回日期: 2022-04-26

在线日期: 2022-05-25

中图分类号:

R459.9; R394.2; R542.2

文章编号:

2095-4344(2023)09-01455-07

文献标识码: A

文章快速阅读: 3D 打印多孔钽金属治疗髋关节发育不良

文章特点—

△ 治疗发育性髋关节发育不良的效果及预后较好, 短期疗效在动物模型及部分文献中得到验证, 但缺乏中长期随访与记录。

发育性髋臼发育不良、髋关节骨缺损的分型

CROWE 分型

PAPROSKY 分型

评估发育性髋臼发育不良生物力学的生理条件

髋臼指数

中心边缘角

弹性模量

多孔钽金属的生物学特性

生物相容性

骨整合性

骨诱导性

文题释义:

多孔钽金属: 钽是一种金属元素, 原子序数为73, 化学符号Ta, 其具有极高的抗腐蚀性。多孔钽因高孔隙率提升了其生物相容性、机械性、黏附性及弹性模量等生物力学特性, 在医学骨科领域有着良好的发展潜力。

3D打印成型技术: 又称增材制造技术, 它是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可粘合材料, 通过DICOM转至计算机后, 逐层打印构建出所需物品的三维技术, 该技术常有熔融沉积成型、选择性激光熔融、引发化学气相沉积法等方式, 因其具有个性化精准制造等优势, 在骨科领域广泛应用。

摘要

背景: 发育性髋关节发育不良患者常有一个浅髋臼、笔直狭窄的股骨管等解剖结构的广泛扭曲, 尤其是面对高度脱位的发育性髋关节发育不良患者, 实施手术治疗时具有很大的挑战性。近年来, 3D打印多孔钽金属个性化治疗发育性髋关节发育不良的效果及预后较好, 可用于术前诊断、术前手术规划、术中建立3D导航模板、明确术前髋臼严重程度及术后髋臼重建矫正评估, 具有良好的发展前景。

目的: 探讨3D打印多孔钽金属治疗髋关节发育不良的最新研究进展。

方法: 采用计算机检索中国知网、PubMed、MDPI、BMC Biotechnology、Web of Science和Springer link数据库中有3D打印多孔钽金属个性化治疗发育性髋关节发育不良的研究资料, 检索时限为1970-2022年。根据纳入和排除标准, 最终共选取58篇文献进行综述。

结果与结论: ①多孔钽金属主要有生物相容性、骨整合性和骨诱导性等生物学特性及生物力学特性, 有效地促进了新骨、新的血管及神经的良好生长。②3D打印多孔钽金属是由3D打印成型技术、天然金属材料-多孔钽金属联合运用方案, 目前主要在发育性髋关节发育不良及髋关节骨缺损患者中评价这一方案的有效性。③3D打印多孔钽金属良好的术前计划能有效改善发育性髋关节发育不良、髋关节骨缺损的术后效果, 并为假体植入物做好术前个性化规划的准备, 能有效避免术中障碍和充分解决患者特异性畸形, 直接影响手术结果, 应用前景较好。④目前, 应用3D打印多孔钽金属个性化治疗发育性髋关节发育不良的短期疗效在动物模型及部分文献中得到验证, 但缺乏中长期随访结果。

关键词: 发育性髋关节发育不良; 3D打印; 3D打印术前计划; 3D打印术中导航模板; 3D打印多孔钽金属; 多孔钽金属; 生物力学性能; 生物学特性; 关节置换

3D printed porous tantalum metal in the treatment of developmental dysplasia of the hip: current status and application prospect

He Yin hao, Li Xiaosheng, Chen Hongwen, Chen Tiezhu

Department of Bone, Joint and Sports Medicine, Hunan Provincial People's Hospital (First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Changsha 410005, Hunan Province, China

He Yin hao, Master candidate, Department of Bone, Joint and Sports Medicine, Hunan Provincial People's Hospital (First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Changsha 410005, Hunan Province, China

Corresponding author: Chen Tiezhu, Master's supervisor, Associate chief physician, Department of Bone, Joint and Sports Medicine, Hunan Provincial People's Hospital (First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Changsha 410005, Hunan Province, China

湖南省人民医院(湖南师范大学附属第一医院)骨关节与运动医学科, 湖南省长沙市 410005

第一作者: 贺垠皓, 男, 1995年生, 汉族, 湖南省怀化市人, 湖南师范大学附属第一医院在读硕士。

通讯作者: 陈铁柱, 硕士生导师, 副主任医师, 湖南省人民医院(湖南师范大学附属第一医院)骨关节与运动医学科, 湖南省长沙市 410005

<https://orcid.org/0000-0003-2008-1234> (贺垠皓); <https://orcid.org/0000-0002-5814-7676> (陈铁柱)

基金资助: 湖南省卫生健康委员会项目(202204072627), 项目负责人: 陈铁柱; 湖南省教育厅项目(20C1162), 项目负责人: 陈铁柱

引用本文: 贺垠皓, 李晓声, 陈宏文, 陈铁柱. 3D打印多孔钽金属治疗发育性髋关节发育不良: 现状及应用前景[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(9):1455-1461.



Abstract

BACKGROUND: Patients with developmental dysplasia of the hip often have extensive distortion of anatomical structures such as shallow acetabulum and straight and narrow femoral canal. Especially in the face of developmental dysplasia of the hip patients with high dislocation, the implementation of surgical treatment is very challenging. In recent years, the effect and prognosis of individualized treatment of developmental dysplasia of the hip with 3D printed porous tantalum metal are good. It can be used for preoperative diagnosis, preoperative surgical planning, intraoperative establishment of 3D navigation template, determination of preoperative acetabular severity and postoperative acetabular reconstruction and correction evaluation. It has a good development prospect.

OBJECTIVE: To investigate the latest research progress of 3D printed porous tantalum metal in the treatment of developmental dysplasia of the hip.

METHODS: The research data on individualized treatment of developmental dysplasia of the hip by 3D printed porous tantalum metal were searched on the databases of CNKI, PubMed, MDPI, BMC Biotechnology, Web of Science, and Springer link by computer. Retrieval time was from 1970 to 2022. According to the inclusion and exclusion criteria, 58 articles were selected for review.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Porous tantalum metal has biological and biomechanical properties such as biocompatibility, bone integration and bone inductance, which can effectively promote the growth of new bone, new blood vessels and nerves. (2) 3D printed porous tantalum is a combined application of 3D printing molding technology and natural metal materials and porous tantalum. Currently, the effectiveness of this program is mainly evaluated in patients with developmental dysplasia of the hip and hip bone defects. (3) Good preoperative planning of 3D printed porous tantalum metal can effectively improve the postoperative outcomes of developmental dysplasia of the hip and hip bone defects, and prepare for the preoperative individualized planning of prosthetic implants, effectively avoid intraoperative obstacles and fully solve patient-specific malformations, and directly affect the surgical results. The application prospect is good. (4) Currently, animal models and some articles have verified the short-term efficacy of 3D-printed porous tantalum metal in the individualized treatment of developmental dysplasia of the hip, but medium and long-term follow-up results are lacking.

Key words: developmental dysplasia of the hip; 3D printing; 3D printing preoperative plan; 3D printing intraoperative navigation template; 3D printing porous tantalum metal; porous tantalum metal; biomechanical property; biological characteristics; joint replacement

Funding: Project of Hunan Provincial Health Commission, No. 202204072627 (to CTZ); Project of Hunan Provincial Department of Education, No. 20C1162 (to CTZ)

How to cite this article: HE YH, LI XS, CHEN HW, CHEN TZ. 3D printed porous tantalum metal in the treatment of developmental dysplasia of the hip: current status and application prospect. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2023;27(9):1455-1461.

0 引言 Introduction

发育性髋臼发育不良是机体发育不良造成髋关节负重时应力集中或异常应力所致髋臼的畸形，继而加重髋关节不稳和退变，是导致髋关节炎的重要病因^[1]。全球有25%的患者有发育性髋臼发育不良家族史，因成人的发病率只占1%-10%，常容易被忽视；近年来，随着体检率的上升，统计发育性髋臼发育不良患者数已由98万例骤升至2450万例^[2]；而女性明显多于男性。目前，传统的全髋关节置换仍是治疗严重及晚期发育性髋关节发育不良的最佳选择，但大量的研究表明，全髋关节置换后易发生感染、假体松动、脱落、髋关节衰竭、坏死^[3-4]，而需进行二次翻修。

3D打印技术起源于20世纪80年代^[5]，随着技术的发展，为骨科髋臼不同程度的损伤，提供了术前视觉和触觉的评估，进行个体化假体制造，以最大限度减少术后并发症，并取得了良好的结果。近年来，为了进一步提高3D打印个体化的假体适应性，因金属材料-多孔钽金属(porous Tantalum, P-Ta)具有极高的抗腐蚀能力、富有延展性、生物兼容性、抗菌性和黏附性等特性，具有与人类骨松质相似的生物力学性能，而逐渐用于骨科领域。它能够充分发挥3D打印的优势，延长假体在体内的耐受时间，硬度适中，具备良好的力学性能，在体内能够很好地适应髋关节的活动，因此被认为是目前最理想的骨科假体材料^[6]。3D打印多孔钽金属(3D printing porous tantalum, 3DPPTa)较传统的全髋关节置换在发育性髋臼发育不良治疗上，具有精准的个体化方案，可用于术前诊断、术前手术规划、建立术中三维导航模板、明确术前髋臼严重程度及评估术后髋臼重建矫正^[4]，具有良好的疗效及预后。文章以此探讨3D打印多孔钽金属治疗发育性髋关节发育不良的最新研究进展。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 所有作者在2021年10月进行分工检索。

1.1.2 检索文献时限 检索文献时间起止为2021-10-05/2022-02-12。

1.1.3 检索数据库 中国知网、PubMed、MDPI、BMC Biotechnology、Web of Science 和 Springer link 数据库。

1.1.4 检索词 中文关键词：“发育性髋关节发育不良、3D打印、3D打印术前计划、3D打印术中导航模板、3D打印多孔钽金属、多孔钽金属、生物力学性能、生物学特性、关节置换”；英文关键词：“developmental dysplasia of the hip, 3D printing, 3D printing preoperative plan, 3D printing intraoperative navigation template, 3D printing porous tantalum metal, Porous tantalum metal, Biomechanical properties, Biological characteristics, Joint replacement”。

1.1.5 检索文献类型 包括动物实验、临床研究、研究原著、综述、述评、病例报告和荟萃分析。

1.1.6 手工检索情况 无。

1.1.7 检索策略 以PubMed和中国知网数据库为例，见图1。

PubMed 数据库检索策略	中国知网数据库检索策略
#1 developmental dysplasia of the hip [Title/Abstract]	#1 发育性髋关节发育不良 [主题/摘要]
#2 3D printing [Title/Abstract]	#2 3D 打印 [主题/摘要]
#3 preoperative planning [Title/Abstract]	#3 术前计划 [主题/摘要]
#4 navigation template [Title/Abstract]	#4 导航模板 [主题/摘要]
#5 3D printing porous tantalum metal [Title/Abstract]	#5 3D 打印多孔钽金属 [主题/摘要]
#6 Porous tantalum metal [Title/Abstract]	#6 多孔钽金属 [主题/摘要]
#7 Biological characteristics [Title/Abstract]	#7 生物力学性能 [主题/摘要]
#8 Biological characteristics [Title/Abstract]	#8 生物学特性 [主题/摘要]
#9 Joint replacement [Title/Abstract]	#9 关节置换 [主题/摘要]
#10 #1 AND #2	#10 #1 AND #2
#11 #1 AND #5	#11 #1 AND #5 [篇名]
#12 #1 AND #2 AND #6	#12 #1 AND #2 AND #6 [篇名]
#13 #3 AND #12	#13 #3 AND #12
#14 #4 AND #12	#14 #4 AND #12
#15 #7 AND #12	#15 #7 AND #12
#16 #8 AND #12	#16 #8 AND #12
#17 #9 AND #12	#17 #9 AND #12

图1 | 中英文数据库检索策略

1.1.8 检索文献量 通过上述计算机检索与手工检索，共检索到338篇参考文献，其中中文126篇，英文212篇，按入选标准进行人工筛选，排除与主题相关性差及重复、陈旧的文献，最终纳入58篇文章。

1.2 入组标准

1.2.1 纳入标准 ①与3D打印多孔钽金属治疗发育性髋关节发育不良相关的文献，包括病例报告、临床研究、动物实验及综

述等；②论述发育性髋臼发育不良分型、分级及影响发育性髋臼发育不良的文章；③论述多孔钽金属生物兼容、抗腐蚀性等生物特性的相关文章；④论述3D打印术前计划、术中导航模板及术后康复预后等相关文章。

1.2.2 排除标准 重复性研究及与文章内容无关的研究。

1.3 文献质量评估和数据提取 通过上述计算机检索与手工检索，共检索到338篇参考文献。研究文献由相互独立的3人搜索并通过小组多次讨论解决分歧，信息记录与3D打印多孔钽金属治疗发育性髋关节发育不良相关的文献。按入选标准进行人工筛选，排除与主题相关性差及重复、陈旧的文献，最终纳入58篇文献，见图2。

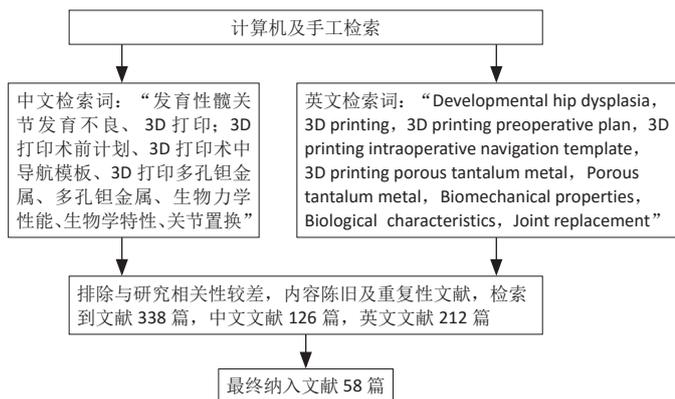


图2 | 文献检索流程图

2 结果 Results

2.1 发育性髋臼发育不良、髋关节骨缺损的分型 髋关节骨缺损通常是由创伤、运动损伤、术后感染和肿瘤等因素引起的硬组织缺陷，会导致髋关节疼痛及行走不稳等^[7]。发育性髋臼发育不良及髋关节骨缺损的分型具体信息见表1。

表1 | 发育性髋臼发育不良及髋关节骨缺损的分型

分型标准	指标	I型	II型	III型	IV型
CROWE分型	垂直高度之比	<0.10	0.10-0.15	0.16-0.20	>0.20
	半脱位的百分比	<50% 半脱位	50%-74% 半脱位	75%-99% 半脱位	100% 完全脱位
PAPROSKY分型	髋臼缺损的程度	仅有极少的骨丢失、无假体移位和完整的髋臼壁	有中度骨丢失、髋臼上缘及内侧壁骨量丢失，但髋臼的前、后柱完整保留	III A型 内壁和后柱中度破坏	III B型 内壁和后柱严重破坏

2.1.1 CROWE 按股骨头上移程度分级 CROWE描述了股骨头和髋臼之间半脱位的百分比，按股骨头上移程度将发育性髋臼发育不良分为4级：I级为股骨头直径<50%半脱位，II级为50%-74%半脱位，III级为75%-99%半脱位，IV级为100%完全脱位^[8]。

2.1.2 CROWE分型 CROWE等^[8]按照股骨头下缘与真臼下缘的垂直距离与骨盆的垂直高度之比将发育性髋臼发育不良分III型：CROWE I型：比值<0.10，CROWE II型：0.10-0.15，CROWE III型：0.16-0.20，CROWE IV型：>0.20。大量文献报道，成人发育性髋臼发育不良常以CROWE分型为主^[3-4, 9-10]。

2.1.3 PAPROSKY分型 PAPROSKY等^[11]按髋臼缺损的程度分型：I型：仅有极少的骨丢失、无假体移位和完整的髋臼壁；II型：有中度骨丢失，髋臼上缘及内侧壁骨量丢失，但髋臼的前、后柱完整保留。按位置将II型区分为II A(上侧)、II B(外上侧)

和II C(内侧)；III型：髋臼边缘和支撑结构的严重破坏导致严重的骨质流失；III A型：内壁和后柱的中度破坏；III B型：内壁完全破坏和后柱严重破坏。

PAPROSKY分型虽通过X射线片直观的将髋臼缺损进行分型，经济便利，但随着3DPPTa精细个体化，为将全髋关节置换后并发症假体不稳定、脱落的风险降至最低，常常借助CT三维成像，最为全面地观测评估发育性髋臼发育不良及髋臼缺损的程度，定制出个体化的3DPPTa。

2.2 评估发育性髋臼发育不良生物力学的参数指标 正常髋臼关节面的曲率半径与股骨头表面相适应，几乎可以完全包盖股骨头，进而维持关节的稳定。而发育性髋臼发育不良由于髋臼覆盖股骨头面积减少，导致股骨头不稳定及向前外侧移位，使关节负重状态发生改变，引发髋关节疼痛、步态异常、力量下降等，从而继发髋关节炎^[1]。目前，髋臼指数与中心边缘角是评价发育性髋臼发育不良最常用的参数指标^[1, 12]。

2.2.1 髋臼指数 又称Tönnis角，反映髋臼对于股骨头覆盖情况及测量承重区的重要参数，对于发育性髋臼发育不良的分析较为直接，也是术后评估手术预后的重要指标^[13]。髋臼指数>13°与发育性髋臼发育不良密切相关，其同时与患者年龄、股骨头大小、损伤程度等因素有关，髋臼指数常可区分不同髋臼的形态、覆盖率和方向^[14]，有助于评估前后髋臼覆盖，提升对无症状发育性髋臼发育不良人群的确诊率。也有报道指出，患有发育性髋臼发育不良的父母具有一定的遗传性^[15]，髋臼指数的测量可为发育性髋关节发育不良患者进行风险评估及为发育性髋关节发育不良患者后代提供临床预防诊疗措施，且可进行术前个体化3D打印建模与P-Ta形态大小的制定^[16]。

2.2.2 中心边缘角 目前，大多数学者仍以中心边缘角作为评估发育性髋臼发育不良覆盖面积严重程度的测量标准，通过股骨头中心作身体纵轴的平行线，与股骨头中心和髋臼外缘连线的夹角来测量髋臼覆盖股骨头侧方面积，进而评估发育性髋臼发育不良的严重程度^[17-18]。其侧方中心边缘角在20°-38°且无髋臼后倾现象，可视为正常；侧方中心边缘角<20°为髋臼覆盖不足，被归类为发育性髋臼发育不良；侧方中心边缘角>38°为过度覆盖^[14]。石永言等^[12]对1494例4岁以后的健康人群骨盆正位片的中心边缘角进行系统对比分析：中心边缘角：4岁21.62°；9岁25.07°，成年时32.14°；>18岁后维持在30°-34°；具体因种族、性别等因素而有所不同；目前，在评估发育性髋臼发育不良的严重程度仅仅只依靠中心边缘角测量股骨头外侧覆盖率存在一定争议。

2.2.3 弹性模量 传统的髋关节置换假体，因其高致密性，其弹性模量明显高于人体骨组织，易造成应力屏蔽和应力集中，导致假体不稳定，甚至脱落^[19]，严重时需进行二次翻修手术。由于3D打印个体化假体结构的高孔隙率及良好的生物兼容性，降低了弹性模量，增加了初始的稳定性，使骨长入固定^[20]；表明了多孔钽的弹性模量更接近人的骨性组织，骨结合性能更有优势，生物力学较多孔钛更为稳定^[21]。

2.3 多孔钽金属的生物学特性

2.3.1 生物兼容性 发育性髋臼发育不良是先天性髋臼骨缺损而导致覆盖不足，将3DPPTa个体化假体锚定在髋臼发育不良处，因其具有高密度孔隙率及良好的机械强度，建立了良好的生物兼容性，促进骨再生及血管形成，与新生骨充分兼容，增加髋臼覆盖面积，在种植假体与骨骼之间保持较高的湿润性，从而为成骨细胞的黏附、生长和分化提供良好的生物环境^[22]；BALLA等^[23]通过体外细胞培养实验证明了此观点，同时其也观察到在多孔钽表层的细胞密度是钛表面的6倍，促进了多孔钽金属的

生物相容性。目前,多孔钛金属被认为是医学界生物相容性最好的硬组织植入材料^[7, 24]。

2.3.2 骨整合性 骨整合是指植入的假体直接与患者自体活骨相结合,牢固地将假体固定在植入部位。21世纪初, FERNANDEZ-FAIREN 等^[25]通过动物实验证实了多孔钛金属骨整合的功效,其团队表示多孔钛金属表面形成的氧化层静电是失活的,不会使蛋白质变性,它可以在没有纤维界面的情况下进行骨整合,随访一年显示骨整合发展完整;且骨整合的建立最早可在术后2周出现^[22]。近年来,有学者认为:3DPPTa 钛涂层减少了糖尿病患者成骨性能的障碍,改善了骨长入,促进了骨整合^[22];但也有部分学者表明糖尿病仍是导致骨整合失败的危险因素之一。目前仍缺乏足够的临床试验及长期随访数据来证实。

2.3.3 骨诱导性 单独使用多孔钛作用于骨骼上时,为了使金属与骨骼相结合,必须在其表面形成一层磷灰石^[25];而3D打印联合多孔钛金属使用水凝胶形式进行表面涂层修饰,很好地调控了高密度的孔隙率,提升了骨的诱导性,提高了渗透性,促进了营养物质互相交换,也加速了各种药物系统的速率, HUA 等^[7]表示良好的骨传导性为未来抗肿瘤进行靶向药物治疗时会起到重要作用。3DPPTa 有良好的骨传导性,很好地避免应力屏蔽效应的发生,对维持生物学性能和力学性能有着很大的影响;进而能提高植入材料寿命^[26]。

2.4 3DPPTa 治疗方案治疗发育性髋臼发育不良的研究进展 3DPPTa 方案是将3D打印技术、天然金属材料-多孔钛金属联合运用方案,目前主要在发育性髋臼发育不良及髋关节骨缺损患者中评价这一方案的实效性。文章汇总了全球近3年高质量的5项试验研究^[3-4, 10, 27-28],主要评估指标为生物学特性、生物力学特性、术前计划、术中导航模板、细胞生存率、Harris 评分改善情况及假体不稳、脱落等风险减少率,见表2。

表2 | 3D打印多孔钛金属主要结果结论和临床应用意义

第一作者	发表年份	患者年龄	诊断	结局指标	随访时间	主要结论
程光亮 ^[27]	2018	33-58岁	发育性髋臼发育不良	目测类比分及Harris评分	6-12个月	患髋的内外翻转与内外旋转稳定性、髋臼对股骨头覆盖程度明显改善
伍旭林 ^[10]	2019	平均63岁	髋臼骨缺损	Harris评分, 目测类比分, 两组外展角和髋臼假体覆盖率对比	6个月	3D打印多孔钛金属显著降低患者的疼痛指数, 提升髋关节活动度及髋臼假体覆盖率, 效果显著
YAN ^[3]	2020	平均61.7岁	发育性髋臼发育不良	手术时间、术中术后出血量、术后6个月Harris髋关节评分, 外展角和旋转中心距坐骨结节线的距离	1.6年	3D打印多孔钛金属的术前计划及术中导航模板有效地减少了术中的操作时间、失血量及不必要的软组织挫伤, 改善了髋关节功能
LOGANATHA ^[4]	2020	32岁	发育性髋臼发育不良	Harris髋关节评分	1年	最大程度矫正髋臼畸形, 提供最佳功能, 改善患者的预后并最大限度地减少术前并发症
LI ^[28]	2020	30岁	髋关节骨缺损	Harris评分	1年	患者的局部疼痛情况、僵硬情况及关节功能明显改善

2.4.1 3D打印成型技术 目前国内外常用的3D打印成型技术:

①选择性激光熔融^[9, 24, 29]; ②熔融沉积成型技术^[3, 27]; ③化学气相沉积法^[30-31]。

2.4.2 3D打印术前计划 由于骨盆复杂的解剖形状及操作空间有限,对髋关节置入假体手术具有很大的挑战性。为了减少术后并发症,3D打印通过术前的影像数据进行重建,采用计算机辅助虚拟手术,建立与实际覆盖不足或缺损尺寸相同的3D模型,更为直观地进行术前手术计划,能够在术中精准定位其相互空间距离、成角关系、方向及深度^[32]。CHENG等^[33]采用回顾性研究分析了60例发育性髋关节发育不良患者和55名健康人口通过3D打印进行建模模拟手术来制定术前计划,发育性髋臼发育不良组股骨头中心位置明显更靠外上侧,进一步改善了3D术前计划,促进髋关节功能的恢复。ZENG等^[34]通过前瞻性研究发现3D打印技术结合虚拟手术治疗10例髋臼骨折患者,有7例解剖复位至小于1.0mm,其他3例复位1.0-2.0mm,解剖复位令人满意,术后随访1周末发生感染、固定失败、形成深静脉血栓等严重并发症,为发育性髋关节发育不良患者提供更少侵入性、更精确、更可靠的个体化术前计划,从而减少手术时间,显著改善了髋臼骨折的预后。出色的术前计划会直接影响手术结果,而对于儿童发育性髋关节发育不良患者尤为重要^[35]。

术前计划基于3D模型进行精确的解剖评估和术前训练,提高了术前诊断的准确性,对于避免术中障碍和充分解决患者特异性畸形至关重要^[36]。有学者研究显示,3DPPTa的术前计划需要满足“四性原则”,即假体解剖匹配性原则、假体安全性原则、骨组织受力有效性原则及骨组织安全性原则^[37];3D模拟结合CT扫描计算机辅助虚拟手术有助于更好的术前计划,对发育性髋臼发育不良、髋关节骨缺损是可行、准确、有效的改善方法,并为术前假体植入物的准备做好术前个体化规划。

2.4.3 术中3D打印导航模板 在传统全髋关节置换治疗发育性髋臼发育不良及骨缺损手术过程中常因解剖结构的广泛扭曲在识别和定位人体髋臼中而延长手术中时间,增加感染率^[2]。而3D打印技术是在X射线、CT、MRI等影像学技术下进行光学扫描,快速创建出计算机设计的术中导航模板,通过个体化的导板在手术中引导钻头通过术前预先计划的轨迹钻孔,来确定病变部位及假体放置位置,准确的术中定位可以减少手术时间、组织损伤和手术方案的不确定性^[38-39]。髋关节旋转中心主要评估置入传统假体的稳定性,其定位法常位于髋臼前后切迹线垂直线上方大约28mm处,髋臼窝的扩孔的前倾角以(15±10)°和(40±10)°为标准进行研磨,而研磨尺寸根据髋臼大小及前后壁的骨量而定^[40-41];然而,定位真髋臼及放置髋臼假体是术中最困难部分。TU等^[42]通过12例患者随访平均72.42个月(38-135个月),从平均手术时间、平均失血量及平均住院时间等多个方面进行评估手术结果,表示良好的3D打印指导模板能快速定位真髋臼,根据术前计划对髋臼大小及植入假体进行理想匹配,避免了CT及X射线片所带来准确率的误差。

髋关节旋转中心异常也会增加全髋关节置换后肢体长度差异、外展肌无力等风险。有研究纳入22例发育性髋关节发育不良患者,分别对11例患者进行传统全髋关节置换处理,另外11例行3D打印导航模板处理,通过术中导航,精准地确定髋关节旋转中心而展开手术,分别记录3D打印组和对照组的手术时间及手术失血量,同时计算植入髋臼杯的理想外展角与实际角度之间的偏差及杯前倾角的偏差,3D打印组明显优于传统全髋关节置换组,且3D打印术后并发症的风险明显下降^[38]。有研究通过17例(4男5髋,13女16髋)髋关节发育不良继发终末期骨关节炎患者在3D打印髋关节模型下进行术前模拟手术^[43],平均随访时间为(18.35±6.86)个月,通过Harris髋关节评分进行评估,平均垂直骨盆片上髋关节旋转中心的水平距离分别恢复为(15.12±1.25)mm和(32.49±2.83)mm;3D打印导

航模板对大龄发育性髋臼发育不良患儿在术中尤为重要,可以提高精度、减少手术时间、减少辐射暴露、减少骨骼损伤,简化手术^[44]。ZHENG等^[35]对25例发育性髋关节发育不良患者进行对照分析,12例患者使用3D打印导航模板,而另13例接受传统无导航手术,结果表明3D打印导航组手术时间平均21.08 min, X射线曝光次数3.92次,无骨骼损伤;传统组手术时间平均46.92 min, X射线曝光次数6.69,骨骼损伤0.92次,3D打印导航组指标明显优于传统组。目前,3D打印导航模板可以通过术前计划,术中精确识别定位,恢复髋关节旋转中心正常功能,有效减少在术中因经验不足和技术误差而导致的假体松动、脱落^[3];3D打印导航模板在发育性髋臼发育不良手术治疗中,将假体植入物精准地放置^[45],减少手术时间及术中失血量,促进了髋关节功能恢复及预后。

2.4.4 3DPPTa 方案治疗发育性髋臼发育不良的临床疗效 由于发育性髋关节发育不良患者常有一个浅髋臼、笔直狭窄的股骨管等解剖结构的广泛扭曲,尤其面对高度脱位的发育性髋关节发育不良患者,恢复其正常的髋关节旋转中心和维持良好的髋关节功能为术前计划的重要目标之一,目前尚存在一定的争议^[46]。3DPPTa是使用CT的3D打印技术联合P-Ta而创建的骨模型,对评估发育性髋臼发育不良覆盖不足的面积个体化,精确地将假体作用于髋臼覆盖不足或缺损处,从而减少因不同的骨骼结构大小而导致植入假体的不稳定、甚至脱落的风险,减少术后并发症^[47]。YAN等^[3]近4年对25例患者进行随机对照试验,12例患者接受了3D打印技术的全髋关节置换,13例患者接受了传统的全髋关节置换,平均随访时间为1.6年,3D打印组手术时间、术中术后出血量及术后6个月Harris髋关节评分均优于传统髋关节置换组,未见感染和假体松动,外展角和髋关节旋转中心距坐骨结节线的距离有显著差异。

3D打印的术前计划及术中导航模板有效地减少了术中的操作时间、失血量及不必要的软组织挫伤,改善了髋关节功能。有研究表明,1例CROWS IV型的发育性髋臼发育不良的32岁女性患者在传统的全髋关节置换后,再次出现患髋的疼痛、间接性跛行,LOGANATHAN等^[4]为患者施行了3DPPTa手术重建,通过术前建3D打印模型和植入物试验,准确评估髋臼缺陷情况,患者术后1周下床活动,术后14 d出院,随访1年,Harris髋关节评分为90分,最大程度矫正髋臼畸形,提供最佳功能,改善患者的预后并最大限度地减少术后并发症。程亮亮等^[27]对8例(12髋)年龄33-58岁的发育性髋关节发育不良患者进行3DPPTa手术,术后随访6-12个月,平均8.2个月,术前目测类比分(2.92±0.79)分,末次随访时目测类比分(0.83±0.72)分;术前Harris评分(69.67±4.6)分,末次随访升至(84.25±4.17)分,患髋的内外翻转与内外旋转稳定性、髋臼对股骨头覆盖程度得到明显改善。传统单一的多孔钽虽可有效修复骨缺损,但很难制定与缺损处完美匹配的假体去准确重建骨缺损^[46]。FAN等^[48]表示:3DPPTa的生物力学性能优于单一的多孔钽,在术后8周时,骨整合性更加明显,钽的抗压缩变形能力更接近猪骨支架,提高了细胞兼容性和骨整合。术后系统的康复训练有利于促进髋关节功能恢复,避免髋关节僵硬、压疮等术后并发症。GUO等^[49]通过3DPPTa对新西兰兔的骨缺损进行研究分析,实验表明增加了骨向内生长和骨整合,使假体更为牢固,降低了假体松动、脱落等风险。LI等^[28]描述了1例患有髋关节骨软骨瘤导致骨缺损的30岁女性,行3DPPTa术后24 h,使用被动装置增加活动范围,术后1个月开始拄拐行走,2个月开始佩戴支具行走,术后6个月,走路时无明显疼痛,术后1年可在没有外力帮助下正常行走,复查X射线片显示无假体松动和脱落现象。

软骨肉瘤所致的骨缺损常因缺损太大而给临床医师在治疗方案上带来了巨大挑战;因其较小时,患者自身常无明显症状及体征,而当患者出现疼痛等症状影响生活时,肿瘤已经相当大,且软骨肉瘤对化疗不敏感,手术才是最佳治疗方案,在软骨肉瘤切除后,临床医师所面对的骨盆的重建,是一项巨大挑战,而3D打印的个体化假体最大限度地恢复髋臼解剖结构,尤其是在没有模块化假体的特定区域,重建肿瘤切除术后导致的巨大骨缺损,最大限度地恢复髋臼结构及改善其功能等优势^[36]。伍旭林等^[10]研究表示:术后Harris评分由术前平均30分,术后改善最高可达98分,患者的局部疼痛情况、僵硬情况及关节功能明显改善。由于其高孔隙率促进细胞的营养物质交换与代谢,促进新骨的形成及血管、神经生成,有望提升患髋的生物力学性能,促进骨愈合。多孔钽金属良好的成骨特性,在联合3D打印后,能更好地对患者进行个体化使用,与患者自身骨组织进行很好地结合,更好地防止应力屏蔽及植入物假体的脱落。用3D打印导航模板进行处理,通过手术导航,精确定位髋关节旋转中心而开展的手术明显优于传统的全髋关节置换,3D打印组在术中时间、术中出血量、对骨骼的损伤及术后的随访满意度乃至患者术后的生活质量方面均有明显的优势,也进一步肯定了3D打印导航模板对于传统全髋关节置换的重要性及必需性。

随着3D打印电子计算机、分子生物学、材料学及组织工程学等技术的发展,3D打印能很好地和多孔钽进行结合,其在医学领域的应用也引起学者们的重视;3DPPTa通过联合三维CT创建的,精确地模拟患者髋部覆盖不足及缺损情况,可制定术前计划,模拟术中操作,将3DPPTa置入覆盖不足及缺损处,增加其覆盖面积,快速识别Harris窝及髋臼切迹的形态,确定真髋臼中心的具体位置,恢复髋关节旋转中心,从而减少传统置换术因术中暴露不充分、视野不足及不同的损伤情况及解剖变异而造成髋臼打磨不均匀、前倾角过大或过小等问题^[50];且减少了因骨骼结构大小各异而导致植入假体的不稳定、甚至脱落的风险,进而缩短了手术时间、术中的失血量及术中对正常血管、神经的损伤,同时也减少了术后假体感染的风险;置入多孔3DPPTa后,由于其对自身孔隙率的调控较传统假体而言^[26],其加速了细胞间的营养物质代谢及促进新骨、新血管及神经的生长,提高了假体与机体的生物兼容性,提升了骨整合的效率,促进了骨愈合进程^[51];多孔钽金属的高熔点、良好的机械强度及强大的抗腐蚀能力^[22],因其表面生成稳定的五氧化二钽(Ta_2O_5)保护膜^[52],腐蚀敏感性是决定植入物使用寿命的主要因素,与3D打印联合,可有效防止髋关节因活动所导致骨质溶解,因其强耐受力,有望突破传统全髋关节置换的假体使用年限^[53]。表面的生物光滑涂层可有效缓解多孔钽金属与骨组织黏膜的摩擦,提高预后,减少因假体松动而需再次翻修的概率^[54]。总之,3DPPTa从疗效上看与传统手术效果相仿,但简化手术过程、降低手术难度,从术前、术中及术后的不良反应来看,3DPPTa具有传统手术不可比拟的优势,其在髋关节的置换中将有逐步代替传统假体,延长传统假体使用年限,成为骨科相关领域的新型假体材料。

2.5 3DPPTa 方案的不足及改正措施

2.5.1 临床研究质量较低 相关文献多为单中心非盲性研究,存在偏倚现象,尚无大量临床证据支持长期预后效果。随着生物工程及3D打印技术的逐渐成熟,3D打印技术在临床上的应用越来越广泛,3DPPTa近年在治疗发育性髋臼发育不良中逐渐成为研究热点,但3DPPTa多为动物实验研究及单中心非盲性研究,存在偏倚现象,尚无大量临床数据证实发育性髋关节发育不良患者在术后10-20年以上中长期预后效果,是否有显著假体移位、

脱落等并发症，能否打破传统置换假体平均使用 15 年的限制，目前尚无定论。

2.5.2 钽熔点过高，导致表面存有少量未熔融的钽颗粒 由于钽金属熔点过高 (2 996 °C)，加工过程中存在未熔融的钽颗粒，导致多孔钽金属表面较为粗糙；术后曾导致 1 例股外侧皮神经损伤，表现为大腿外侧皮肤感觉减退，基于营养神经对症治疗，术后 6 个月随访症状消失，有 1 例导致切口内脂肪液化，基于清创后痊愈^[21]。

2.5.3 假体周围有感染风险^[55] 有学者表示在表层涂一定量的 Cu²⁺ 可增强其抗菌性，而在一定范围内，抗菌率随着 Cu 离子含量增加而不断增加^[52]，目前，还需更多的实验研究证实。

2.5.4 抗疲劳强度较低 3DPPTa 通过实验证明多孔结构材料虽有效降低种植体的弹性模量，但同时也降低了种植假体在体内抗疲劳强度，较传统的致密的假体更容易断裂^[21]；而且制备成型相对困难。

2.5.5 材料制备使用成本较高 多孔钽使用成本较其他植入物假体高^[4]，对生产设备要求较高，生产率低；媒体导入的相应格式有限，通过 DICOM 转载、计算机整合再通过 3D 打印的不同技术来进行个性化打印，生产周期长；难以应用于紧急治疗当中，限制了其广泛的发展及使用^[56]。若能降低 Ta 粉原材料价格及质量问题，减少 3DPPTa 的生产成本及生产周期，研制更专业化的装备和工艺并提高熔融技术或表面涂层技术使假体表面更加光滑^[56-57]；且在假体的高孔隙率与其稳定性中找到平衡，那么必将加速 3DPPTa 在临床上的应用，且有更多更大的临床样本数据及更长的随访时间来证实其实作为新型假体材料的优势。

3 总结与展望 Summary and prospects

3.1 既往他人在该领域研究的贡献和存在的问题 成人发育性髋关节发育不良是一种未经治疗的先天性髋关节发育不良，导致成人髋关节疼痛，常用的治疗方案是传统的全髋关节置换、髋臼周围截骨术和钛板植入等，传统的全髋关节置换治疗发育性髋臼发育不良有假体不稳定及滑脱等并发症，使用年限有限，换髋的年龄常需要达到 65 岁以上，而该年龄以下的发育性髋关节发育不良患者常因髋部疼痛而影响日常生活。与传统的全髋关节置换相比，髋臼周围截骨术中对周围血管神经的损伤及术后感染等并发症的发生率更高，所有对入路的选取常有热议，手术更容易损伤髋臼周围的神经和血管，导致异常运动和感觉功能障碍，严重时可能造成术中大出血^[58]。

3.2 作者综述区别于他人他篇的特点 文章对 3D 打印多孔钽金属治疗髋关节发育不良的最新研究进展进行综述；介绍了发育性髋臼发育不良的分型及其常用检测的生物力学指标，多孔钽的生物力学性能、生物学特性及其相互作用；叙述了 3D 打印的术前计划、术中导航模板及 3D 打印技术的重要性；总结了 3D 打印多孔钽金属在治疗发育性髋臼发育不良中的独特优缺点及改正措施；以期对发育性髋臼发育不良的骨科学、组织工程学等多学科领域联合治疗发育性髋臼发育不良提供参考依据。

3.3 综述的局限性 目前，3DPPTa 多为动物实验研究及单中心非盲性回顾性研究，存在偏倚现象，无对照试验，尚无大量临床数据证实该方案的生物相容性及临床术后的长期实用性，未来研究者们应对术后 5，10，20 年进一步随访进行验证。

3.4 综述的重要意义 随着人口老龄化的加剧，发育性髋臼发育不良患病率逐年上升，严重时晚期可致骨性关节炎。3DPPTa 在计算机辅助下进行建模并实施模拟手术，有助于更好地制定个体化术前计划，出色的术前计划能有效规避手术风险，直接影响手术结果；通过特定的 3D 打印个体化导航模板，对发育性髋

臼发育不良、髋关节骨缺损是可行、准确、有效的改善，对于避免术中障碍和充分解决患者特异性畸形至关重要。3DPPTa 重建修复发育性髋臼发育不良及骨缺损有降低假体松动、脱落等并发症的发生率、改善髋关节预后及延长假体移植物的使用年限的可能，希望 3DPPTa 能更广泛应用于临床为发育性髋关节发育不良患者带来福音。

3.5 课题组专家意见 随着治疗手段不断更新、提高，发育性髋关节发育不良患者的中长期生活质量逐年提升。与此同时，3DPPTa 对发育性髋关节发育不良患者长期生存质量的影响逐渐开始引起广泛关注；作为临床骨科医师，充分学习、理解及掌握发育性髋臼发育不良的相关概念及治疗手段，开展与康复科、影像科、生物工程学等多学科讨论及合作，可使研究者们更充分地做好术前计划、术中操作及患者术后功能恢复等治疗方案，最终目的是提升发育性髋关节发育不良患者术后的生存质量及预后。研究者们需要意识到的是，虽现有的动物实验数据、临床案例等相关报道难以证实 3DPPTa 对发育性髋关节发育不良患者的长期预后及并发症的发生概率，但研究者们应该更加努力去深入探索 3DPPTa，寻求多中心、多领域的合作是阐明 3DPPTa 在个体化治疗发育性髋臼发育不良疗效的未来方向。

致谢： 特别感谢湖南师范大学提供的科研条件及无私帮助，感谢湖南省人民医院（湖南师范大学附属第一医院）骨关节与运动医学科给予的学习机会及帮助。

作者贡献： 文章设计者为陈铁柱。资料收集者和论文撰写者为贺垠皓。数据分析及审核：李晓声和陈宏文。

利益冲突： 文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明： 这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让： 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。
出版规范： 文章撰写遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 声明)；出版前经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次文字和图表查重；经小同行外审专家双盲审稿，同行评议认为符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- LI Y, GUO Y, LI M, et al. Acetabular index is the best predictor of late residual acetabular dysplasia after closed reduction in developmental dysplasia of the hip. *Int Orthop*. 2018;42(3):631-640.
- LUO R, LI G, LI B, et al. Comparison of the modified Smith-Petersen (S-P) and ilioinguinal (I-I) approaches for periacetabular osteotomy in adult developmental dysplasia of the hip: a retrospective study. *J Orthop Surg Res*. 2021;16(1):157.
- YAN L, WANG P, ZHOU H. 3D Printing navigation template used in total hip arthroplasty for developmental dysplasia of the hip. *Indian J Orthop*. 2020;54(6):856-862.
- LOGANATHAN B, SHARMA V, KUMAR MR, et al. Acetabulum reconstruction with tantalumcup and augments in dysplastic hip type 4 using 3D printing technology. *J Orthop Case Rep*. 2020;10(7):18-21.
- ERTVRK C, AYYILDIZ S, ERDOL C. Orthopedics and 3D technology in Turkey: a preliminary report. *Joint Dis Relat Surg*. 2021;32(2):279-289.
- QIAN H, LEI T, LEI P, et al. Additively manufactured tantalum implants for repairing bone defects: a systematic review. *Tissue Eng Part B Rev*. 2021;27(2):166-180.
- HUA L, LEI T, QIAN H, et al. 3D-printed porous tantalum: recent application in various drug delivery systems to repair hard tissue defects. *Expert Opin Drug Deliv*. 2021;18(5):625-634.
- CROWE JF, MANI VJ, RANAWAT CS. Total hip replacement in congenital dislocation and dysplasia of the hip. *J Bone Joint Surg Am*. 1979;61(1):15-23.
- WANG H, SU K, SU L, et al. Comparison of 3D-printed porous tantalum and titanium scaffolds on osteointegration and osteogenesis. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2019;104:109908.
- 伍旭林, 邱冰, 朱伟民, 等. 钽金属垫块翻修术联合 3D 打印技术在 Paprosky 3 型髋臼骨缺损中的疗效评价 [J]. *中国老年学杂志*, 2019, 39(20): 4992-4995.

- [11] PAPROSKY WG, PERONA PG, LAWRENCE JM. Acetabular defect classification and surgical reconstruction in revision arthroplasty. A 6-year follow-up evaluation. *J Arthroplasty*. 1994;9(1):33-44.
- [12] 石永言, 刘天婧, 赵群, 等. 中国人髋关节中心边缘角正常值的测量 [J]. *中华小儿外科杂志*, 2010,31(2):118-122.
- [13] ONAC O, ALPAY Y, YAPICI F, et al. Correlation of postoperative magnetic resonance image measurements with persisting acetabular dysplasia in open reduction of developmental hip dysplasia. *Jt Dis Relat Surg*. 2021; 32(2):461-467.
- [14] ANDERSON LA, ANDERSON MB, ERICKSON JA, et al. Acetabular wall indices help to distinguish acetabular coverage in asymptomatic adults with varying morphologies. *Clin Orthop Relat Res*. 2017;475(4):1027-1033.
- [15] AYANOGLU T, ATAOGU MB, TOKGOZ N, et al. Assessing the risk of asymptomatic dysplasia in parents of children with developmental hip dysplasia. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2019,53(5):346-350.
- [16] OKUZU Y, GOTO K, KAWATA T, et al. The relationship between subluxation percentage of the femoroacetabular joint and acetabular width in asian women with developmental dysplasia of the hip. *J Bone Joint Surg Am*. 2017;99(7):e31.
- [17] WIBERG G. Shelf operation in congenital dysplasia of the acetabulum and in subluxation and dislocation of the hip. *J Bone Joint Surg Am*. 1953;35-A(1): 65-80.
- [18] VAUDREUIL NJ, MCCLINCY MP. Evaluation and treatment of borderline dysplasia: moving beyond the lateral center edge angle. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2020;13(1):28-37.
- [19] MIETTINEN HJ, MIETTINEN SS, KETTUNEN JS, et al. Revision hip arthroplasty using a porous tantalum acetabular component. *Hip Int*. 2021;31(6):782-788.
- [20] WANG F, CHEN H, YANG P, et al. Three-dimensional printed porous tantalum prosthesis for treating inflammation after total knee arthroplasty in one-stage surgery—a case report. *J Int Med Res*. 2020;48(3):1219690832.
- [21] SU KX, JI P, WANG H, et al. In vivo study of 3D printed porous tantalum implant on osseointegration. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*. 2018;36(3): 291-295.
- [22] WANG L, HU X, MA X, et al. Promotion of osteointegration under diabetic conditions by tantalum coating-based surface modification on 3-dimensional printed porous titanium implants. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2016; 148(16):440-452.
- [23] BALLA VK, BANERJEE S, BOSE S, et al. Direct laser processing of a tantalum coating on titanium for bone replacement structures. *Acta Biomater*. 2010; 6(6):2329-2334.
- [24] 吴先哲. 骨科植入用多孔钽激光 3D 打印成形工艺及生物力学性能研究 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2021.
- [25] FERNANDEZ-FAIREN M, MURCIA A, IGLESIAS R, et al. Osteointegration of porous tantalum stems implanted in avascular necrosis of the hip. *Acta Ortop Mex*. 2008;22(4):215-221.
- [26] RAN Q, YANG W, HU Y, et al. Osteogenesis of 3D printed porous Ti6Al4V implants with different pore sizes. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018; 84(18):1-11.
- [27] 程亮亮, 赵德伟, 杨磊, 等. 3D 打印多孔钽金属髋臼加强块在成人 DDH 髋关节重建术中的应用 [J]. *中华骨科杂志*, 2018,38(11):650-657.
- [28] LI Z, CHEN G, XIANG Y, et al. Treatment of massive iliac chondrosarcoma with personalized three-dimensional printed tantalum implant: a case report and literature review. *J Int Med Res*. 2020;48(10):1220759060.
- [29] SING SL, WANG S, AGARWALA S, et al. Fabrication of titanium based biphasic scaffold using selective laser melting and collagen immersion. *Int J Bioprint*. 2017;3(1):7.
- [30] BEAUREGARD N, AL-FURAJI M, Dias G, et al. Enhancing iCVD modification of electrospun membranes for membrane distillation using a 3D printed scaffold. *Polymers (Basel)*. 2020;12(9):2074.
- [31] CHENG C, GUPTA M. Surface functionalization of 3D-printed plastics via initiated chemical vapor deposition. *Beilstein J Nanotechnol*. 2017;8: 1629-1636.
- [32] LU S, XIN X, HUANG W, et al. Progress in clinical application of 3D printed navigational template in orthopedic surgery. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao*. 2020;40(8):1220-1224.
- [33] CHENG R, ZHANG H, Kernkamp WA, et al. Relations between the Crowe classification and the 3D femoral head displacement in patients with developmental dysplasia of the hip. *BMC Musculoskelet Disord*. 2019; 20(1):530.
- [34] ZENG C, XING W, WU Z, et al. A combination of three-dimensional printing and computer-assisted virtual surgical procedure for preoperative planning of acetabular fracture reduction. *Injury*. 2016;47(10):2223-2227.
- [35] ZHENG P, XU P, YAO Q, et al. 3D-printed navigation template in proximal femoral osteotomy for older children with developmental dysplasia of the hip. *Sci Rep*. 2017;7(1):44993.
- [36] LIANG S, XIE J, WANG F, et al. Application of three-dimensional printing technology in peripheral hip diseases. *Bioengineered*. 2021;12(1):5883-5891.
- [37] 刘洋, 吴先哲, 马幸双, 等. 个性化 3D 打印多孔钽植入假体设计的基本原则 [J]. *重庆医学*, 2021,50(16):2822-2825.
- [38] ZHANG YZ, CHEN B, LU S, et al. Preliminary application of computer-assisted patient-specific acetabular navigational template for total hip arthroplasty in adult single development dysplasia of the hip. *Int J Med Robot*. 2011;7(4): 469-474.
- [39] FENG ZH, LI XB, PHAN K, et al. Design of a 3D navigation template to guide the screw trajectory in spine: a step-by-step approach using Mimics and 3-Matic software. *J Spine Surg*. 2018;4(3):645-653.
- [40] ZHANG H, ZHOU J, GUAN J, et al. How to restore rotation center in total hip arthroplasty for developmental dysplasia of the hip by recognizing the pathomorphology of acetabulum and Harris fossa? *J Orthop Surg Res*. 2019;14(1):339.
- [41] JOHNSTON RC, BRAND RA, CROWNINSHIELD RD. Reconstruction of the hip. A mathematical approach to determine optimum geometric relationships. *J Bone Joint Surg Am*. 1979;61(5):639-652.
- [42] TU Q, DING HW, CHEN H, et al. Preliminary application of 3D-printed individualised guiding templates for total hip arthroplasty in Crowe type IV developmental dysplasia of the hip. *Hip Int*. 2020. doi:10.1177/112070020948006.
- [43] ZHANG H, GUAN JZ, ZHANG Z, et al. Restoring rotation center in total hip arthroplasty for developmental dysplasia of the hip with the assistance of three dimensional printing technology: a pilot study. *J Orthop Surg*. 2022;14(1):119-128.
- [44] ZHENG P, YAO Q, XU P, et al. Application of computer-aided design and 3D-printed navigation template in Locking Compression Pediatric Hip Plate (TauMiu) placement for pediatric hip disease. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2017;12(5):865-871.
- [45] TOMAZEVIC M, KRISTAN A, KAMATH AF, et al. 3D printing of implants for patient-specific acetabular fracture fixation: an experimental study. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2021;47(5):1297-1305.
- [46] ZHANG H, LIU Y, DONG Q, et al. Novel 3D printed integral customized acetabular prosthesis for anatomical rotation center restoration in hip arthroplasty for developmental dysplasia of the hip crowe type III: a case report. *Medicine (Baltimore)*. 2020;99(40):e22578.
- [47] 黎庆钿, 林博夫, 陈学潘, 等. 3D 技术辅助钽金属块植入修复严重髋臼骨缺损的早期疗效 [J]. *中华骨科杂志*, 2020,40(3):129-137.
- [48] FAN H, DENG S, TANG W, et al. Highly porous 3D printed tantalum scaffolds have better biomechanical and microstructural properties than titanium scaffolds. *Biomed Res Int*. 2021;2021:2899043.
- [49] GUO Y, XIE K, JIANG W, et al. In Vitro and in Vivo Study of 3D-printed porous tantalum scaffolds for repairing bone defects. *ACS Biomater Sci Eng*. 2019;5(2):1123-1133.
- [50] 陈检文, 董立明, 蒋科, 等. 髋臼假体安装位置与无菌性松动的相关分析 [J] *中国矫形外科杂志*, 2022,30(1):1-5.
- [51] DOU X, WEI X, LIU G, et al. Effect of porous tantalum on promoting the osteogenic differentiation of bone marrow mesenchymal stem cells in vitro through the MAPK/ERK signal pathway. *J Orthop Translat*. 2019;19:81-93.
- [52] DING Z, WANG Y, ZHOU Q, et al. Microstructure, wettability, corrosion resistance and antibacterial property of Cu-MTA2O5 multilayer composite coatings with different cu incorporation contents. *Biomolecules*. 2019; 10(1):28.
- [53] SOWA M, SIMKA W. Electrochemical impedance and polarization corrosion studies of tantalum surface modified by DC plasma electrolytic oxidation. *Materials (Basel)*. 2018;11(4):545.
- [54] MA L, CHENG S, JI X, et al. Immobilizing magnesium ions on 3D printed porous tantalum scaffolds with polydopamine for improved vascularization and osteogenesis. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2020;117:111303.
- [55] 刘旭. 金属加强块在严重髋臼骨缺损重建中的临床应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [56] 杨柳, 王富友. 医学 3D 打印多孔钽在骨科的应用 [J]. *第三军医大学学报*, 2019,41(19):1859-1866.
- [57] 吴昊, 郭征. 3D 打印多孔钽与钛合金及多孔钽骨科植入物的性能比较及应用展望 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2020,22(10):916-920.
- [58] ZHOU Y, KANG X, LI C, et al. Application of a 3-dimensional printed navigation template in Bernese periacetabular osteotomies: a cadaveric study. *Medicine (Baltimore)*. 2016;95(50):e5557.

(责任编辑: WJ, ZN, ZH)