

# 从个性化假体到动态适配：3D打印技术在骨肉瘤治疗中的临床转化与创新

钱福生, 覃佳强\*

重庆医科大学附属儿童医院骨科, 重庆

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月26日; 发布日期: 2026年4月8日

## 摘要

骨肉瘤保肢治疗一直面临切除边界难控、重建匹配不足及并发症较多等问题。3D打印技术凭借患者特异性的数字化设计与增材制造能力,正在重塑骨肉瘤的精准切除与功能重建路径。本文系统梳理了该技术在骨肉瘤治疗中的完整技术链条及临床转化进展:从CT/MRI多模态融合、三维重建与个性化手术导板,到个体化假体的材料选择、结构优化与制造一体化,为肿瘤精准切除和生物力学匹配重建奠定基础。临床证据显示,3D打印技术不仅提高了标准部位及复杂节段缺损重建的成功率,而且可通过MSTS等客观指标在疼痛缓解、功能恢复和情感接受度提升等维度体现优势;不同解剖部位在支具依赖、行走能力、步态或上肢精细功能恢复上的获益仍存在差异。与此同时,3D打印正与生物活性材料、人工智能及传感监测技术加速融合:前者推动“结构支撑-骨整合-局部抗肿瘤/抗感染”一体化支架发展,后者则为结合动态运动学数据的个性化设计和术后闭环管理提供可能。当前,动态适配智能假体仍面临长期安全性、可靠性、供能与成本等挑战。未来,多学科深度协同有望推动骨肿瘤重建由静态替代迈向“感知-预测-响应”的智能化阶段。

## 关键词

3D打印技术, 骨肉瘤, 个性化假体, 动态适配, 肢体保留手术

# From Personalized Prostheses to Dynamic Adaptation: Clinical Translation and Innovation of 3D Printing Technology in Osteosarcoma Treatment

Fusheng Qian, Jiaqiang Qin\*

Department of Orthopedics, Children's Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

\*通讯作者。

文章引用: 钱福生, 覃佳强. 从个性化假体到动态适配: 3D 打印技术在骨肉瘤治疗中的临床转化与创新[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 1677-1686. DOI: 10.12677/acm.2026.1641406

## Abstract

Limb-salvage surgery for osteosarcoma remains a major clinical challenge, primarily due to difficulties in achieving precise tumor resection, reconstructing complex defects, and minimizing post-operative complications. Three-dimensional (3D) printing, as a paradigm-shifting technology enabling patient-specific digital design and additive manufacturing, has emerged as a key solution to address these limitations. This review provides a comprehensive and structured overview of the full workflow of 3D printing in osteosarcoma management, spanning multimodal imaging fusion (CT/MRI), three-dimensional surgical planning, patient-specific instrumentation, and personalized prosthesis fabrication with optimized materials and architectures. We further synthesize current clinical evidence and emphasize functional outcomes assessed by the Musculoskeletal Tumor Society (MSTS) score. Beyond overall score improvement, 3D printing-assisted reconstruction demonstrates domain-specific benefits, particularly in pain relief, baseline function, and emotional acceptance, while recovery of weight-bearing capacity, gait, and upper-limb dexterity remains site-dependent and variable. Importantly, emerging trends indicate a shift from isolated technological applications toward multidisciplinary integration. Bioactive interfaces combining porous structures with region-specific coatings and localized drug delivery are enhancing osseointegration and infection control. Concurrently, artificial intelligence (AI) is advancing from static topology optimization to dynamic, data-driven design paradigms that integrate anatomical, kinematic, and biomechanical loading information for truly personalized reconstruction. Despite these advances, intelligent, dynamically adaptive prostheses remain in early-stage development, constrained by challenges related to long-term safety, mechanical reliability, energy supply, and cost-effectiveness. Looking forward, the convergence of 3D printing, AI, biofunctional materials, and sensing technologies is expected to drive a transition from static structural replacement toward intelligent, responsive reconstruction systems characterized by a “sensing-prediction-response” framework.

## Keywords

3D Printing, Osteosarcoma, Patient-Specific Prosthesis, Adaptive Design, Limb Salvage Surgery

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 骨肉瘤治疗的困境与 3D 打印技术的破局之道

骨肉瘤是青少年最常见的恶性骨肿瘤类型，其在治疗方面遭遇着不少难题，特别像高肢体切除率以及术后功能恢复状况欠佳这类问题更是突出。传统的治疗方法涵盖了手术、化疗还有放疗等手段，然而患者对应的五年生存率在过去的数十年里几乎未曾变化[1]。这些传统治疗方法存在一定的局限性，具体表现为术后往往会引发较为严重的骨缺损，而且化疗药物所具有的耐药性以及副作用还将会进一步降低治疗效果，也预示着患者的预后是比较差的。所以，当下急需去探寻新的技术，以此来改进骨肉瘤的治疗成效，降低肢体切除率，进而提升患者的生活品质。

近年来，3D 打印技术发展迅速，给骨肉瘤的治疗开拓出了全新的可能性。有了这项技术，设计出个性化的假体不再是难题，能更精准的重建患者骨缺损。3D 打印技术有着这样的优势，那就是可以依据患者实际的解剖结构以及病理特征，去定制跟患者生理特征相吻合的假体。这样个性化的处理方案，一方

面让骨缺损的重建效果得以提升, 另一方面也使得患者术后功能恢复的情况有较为明显的改善[2]。除此之外, 随着动态适配技术渐渐兴起起来, 假体的设计以及功能也在不停地向前演进。动态适配技术能让假体随着患者的生理变化做出相应调整, 进而达成和生理功能同步的优化效果, 如此便提升了假体的使用成效, 同时也让患者的生活质量有所提高[3]。

3D 打印技术于骨肉瘤治疗方面的临床转化应用以及相关技术创新, 已然给传统治疗方法所遭遇的诸多挑战带来了全新的思路与有效的解决办法。不论是开展个性化的假体设计工作, 还是将动态适配技术加以运用, 均给患者术后的功能恢复情况以及生活质量的提升开拓出了不一样的路径。本文会全面且细致地对 3D 打印技术在骨肉瘤治疗当中的实际应用状况以及未来的走向趋势展开综述, 盼望着能够给该领域后续的研究活动以及临床实践操作给予一定的参考价值与借鉴。

## 2. 3D 打印实现个性化治疗的技术链条

### 2.1. 从影像到实物的精准手术规划

3D 打印技术已经彻底颠覆了骨肉瘤手术原有的规划模式。其借助创建与患者情况高度契合的物理模型以及专门的手术工具, 成功搭建起一条完整的技术路径, 从多模态影像分析到三维实体模拟, 最终实现术中精准切除。

外科医生把患者的计算机断层扫描(CT)以及磁共振成像(MRI)数据加以融合并进行三维重建, 进而生成一个包含肿瘤、骨骼、血管以及神经等重要结构的数字化模型。这项技术可清晰界定肿瘤侵袭范围, 为确定安全的手术边界提供依据, 还能实现手术方案的数字化预演[4]。比如借助三维模型, 医生能预先模拟肿瘤切除范围, 评估不同重建方案的可行性, 识别术中可能出现的风险, 进而制定出个体化的最优手术策略[5] [6]。

3D 打印所打造出来的个性化实体模型能够把数字规划转变成为可供触摸感知的术前模拟平台。借助于上文提及的三维数据, 是能够打印出和患者解剖结构极为相近的骨骼 - 肿瘤模型的。此模型所具有的核心价值体现在: 其一, 可用于复杂的术前模拟方面。外科团队能够在该模型之上开展诸如真实的截骨操作、假体试安装等一系列的操作, 从而提前对手术步骤以及解剖变异有所熟悉, 进而对手术流程加以优化, 切实有效地缩短实际手术所花费的时间, 并且减少术中的出血情况[7] [8]。其二, 能够增进医患之间的沟通以及多学科之间的协作。直观可视的模型对于医生向患者及其家属解释病情以及手术方案是有帮助的, 同时也有助于推动外科、影像科、肿瘤内科等多个学科团队展开更为深入细致的探讨, 进而达成治疗方面的共识[9] [10]。

最终而言, 3D 打印所打造的个性化手术导板切实保障了术前规划能够在手术进程中得以精确施行。依照最终敲定的手术方案, 能够着手设计并且打印出同患者骨骼表面能够完美贴合的个性化截骨导板。在手术操作期间, 该导板是能够直接被固定在预先设定的截骨部位的, 进而对锯片起到引导作用, 促使锯片可以精准地完成截骨操作, 其达成的精度甚至能够达到亚毫米这样的级别。相关研究清晰表明, 运用这类导板, 能够有效地确保肿瘤能够得到完整的切除, 从而达成理想的外科边界效果, 并且还能最大程度地将健康的骨组织以及关节功能予以保留, 这对于降低出现局部复发的风险、达成功能的最大化重建而言, 有着不容忽视的重要意义[3] [11] [12]。与传统的那种单纯依靠术者个人经验来开展自由手截骨的方式相比起来, 导板技术在很大程度上提升了手术的可重复性以及精确度, 特别适合应用于那些解剖结构相对复杂的骨盆、脊柱等部位所涉及的重建手术当中[13] [14]。

3D 打印技术把多模态影像融合起来, 还和三维重建、实体模型打印以及个性化导板制造相结合, 由此构建出一个精准手术的闭环。这个闭环是从“虚拟”走向“现实”, 从“规划”落实到“执行”。如此一来, 骨肉瘤切除的彻底性以及安全性都得到了提升, 同时也为后续开展个性化的骨缺损重建打下了

稳固的基础。

## 2.2. 个性化假体的材料、设计与制造一体化

个性化假体的达成并非靠某单一技术的突破,它实则是一个围绕着临床需求展开,并且把材料科学、生物力学设计以及先进制造工艺紧密结合起来的一体化系统工程。该流程所要做的就是为每一位骨肉瘤患者量身打造出这样一种重建方案:它不但在形态方面能够精准地与患者相匹配,而且在功能以及生物整合层面还能实现长期的稳定状态。

假体能够取得长期成功的首要前提在于其材料方面所具备的基础条件。当下,钽合金以及钛合金由于拥有极为出色的生物相容性、良好的耐腐蚀性,并且它们与骨组织的弹性模量较为相近,所以已然成为了骨缺损重建领域里的主流选用对象。在这当中,多孔钽因为有着独特的呈骨小梁状的结构特点,可以十分有效地促使骨细胞充分长入其中,进而达成快速的生物固定效果,这就给早期负重以及功能锻炼带来了可能性[4][8][15][16]。对于材料的选择而言,不能仅仅着眼于其静态方面的性能状况,而是应当将目光聚焦到它在人体内部那种动态环境之下的实际表现情况上。比如说,借助 3D 打印技术是能够精准地去制造出带有特定孔隙率以及贯通孔道的多孔结构的,而这样的结构一方面为骨整合给予了三维层面的空间保障,另一方面还对营养物质的传输与代谢起到了优化作用,这无疑也是假体能够获取长期生物活性的重要关键所在[17][18]。

在确定了材料体系之后,假体设计便成了将患者个体解剖情况和预期功能关联起来的纽带。依据患者术前所拍摄的高精度 CT 影像,凭借三维重建技术,能够精准地获取到肿瘤切除以后骨缺损的具体形态。个性化设计并不是单纯地进行“形态复制”,而是要全方位地去考量生物力学方面的诸多因素。

**解剖匹配:** 确保假体与残余骨端的连接界面最大化且贴合,以提供初始稳定性。

**功能适配**主要涉及依据缺损的具体部位,比如关节或者骨干,同时结合患者的年龄以及活动水平等因素,去针对假体的关节面曲率还有内部支撑结构,像晶格设计这类方面展开优化操作,从而实现力学强度和弹性加以平衡的目的,进而降低应力遮挡的情况出现,以此来对剩余的骨骼起到保护作用[8]。

**固定一体化:** 把螺钉孔道、锚定结构这类固定方式同假体主体做成一体化设计,防止由于附加组件而出现的微动以及磨损情况。从临床案例能够看出,这样量身定制的设计能够在很大程度上改善术后肢体的功能状况,并且还能减少因机械不匹配而引发的并发症风险[4]。

3D 打印,尤其是选择性激光熔化(SLM)、电子束熔化(EBM)等金属增材制造技术,可将复杂个性化的数字模型转化为实体植入物。更重要的是,它使“分区设计-分层制造-二次功能化”成为可能:首先在数字模型阶段将假体划分为致密承重区、梯度过渡区和多孔骨整合区,分别确定晶格拓扑、孔径、孔隙率与螺钉轨迹;随后通过 SLM/EBM 等工艺一次成形主体结构;最后再针对特定区域实施表面功能化,如微弧氧化、等离子喷涂、溶胶-凝胶沉积、电泳沉积或药物浸润/负载,使羟基磷灰石、抗菌成分、镁离子或化疗药物优先分布于孔壁或骨-假体界面[17]-[19]。这意味着生物活性材料涂层并非简单地“附着”在成品表面,而是应与多孔结构的空间布局、孔道连通性和局部力学需求协同设计,最终实现“承重支撑-骨长入-局部抗感染/抗肿瘤”一体化。

因此,材料、设计和制造的一体化不应仅理解为把不同环节串联起来,而应理解为一个可迭代的闭环:临床解剖与切除边界决定假体几何形态,生物力学目标决定晶格和固定方式,局部生物学需求决定界面涂层和载药策略,而制造工艺反过来又限定可实现的孔隙精度、表面粗糙度和疲劳性能[19]。这一闭环协同,才是 3D 打印个性化假体能够从“形态匹配”进一步迈向“功能匹配”和“生物匹配”的关键。

### 3. 临床应用成效：从复杂重建到功能康复

#### 3.1. 个性化重建的临床案例与效果

3D 打印个性化假体，它的核心价值就在于可应对骨肉瘤切除术后从标准到极为复杂的各类骨缺损情况。临床实践显示，该技术凭借精准的解剖匹配以及功能化设计，在不同难度的重建场景里都能获得不错的中短期疗效。

对于肢体远端骨骼部位像桡骨远端、股骨远端这类区域出现的肿瘤，在将其切除之后开展的重建工作，所面临的主要难题就在于如何让假体和剩余的骨骼能够牢固地结合起来，以及怎样在早期阶段促使功能得以恢复。有一个颇具代表性的案例可说明，有一位桡骨远端骨肉瘤患者，在接受了 3D 打印多孔钽假体的植入操作以后，该假体和骨界面在后续的随访期间达成了不错的骨长入效果，这位患者不仅完全消除了疼痛，而且腕关节功能也颇为满意，最终成功保住了手部功能[2]。这类案例已经证明，借助假体采用多孔结构的设计方案，是能够推动骨细胞内生进程的，进而达成生物性固定的效果，其在稳定性方面以及愈合速度上往往比传统的机械固定方式更为出色。

在累及关节面的骨肉瘤(比如膝关节周边)治疗方面，怎样在彻底将肿瘤切除掉的时候最大限度地把自己的关节功能保留下来，这无疑是一个十分棘手的难题。而 3D 打印技术凭借其“边界定制”特性，在此情况之下凸显出了独特的长处。比如说，在针对膝关节周边肿瘤开展的保肢手术当中，依靠 3D 打印所制作出的个性化截骨导板，可以达成毫米级别的精度来完成肿瘤切除工作，并且与之完美契合的个性化假体，还能够精准地对关节面的解剖形态予以重建。从临床相关报告能够看到，这类患者在接受手术之后，其膝关节的活动度有了颇为明显的提升，疼痛评分(VAS)也大幅度地下降了，而且按照国际上通用的肌肉骨骼肿瘤协会(MSTS)功能评分标准来看，该评分达到了良好的程度乃至优秀的水平，进而成功达成了肿瘤学治疗以及关节功能保存这两方面的双重目标[8] [20]。

骨盆、肩胛骨或者长骨出现“超临界”节段性缺损的情况时，传统用于重建的手段通常有着较高的失败率。而 3D 打印技术可以达成多节段一体化假体的设计以及制造工作，能很好地契合极为不规则的解剖缺损状况。就好比在完成涉及髌臼的骨盆肿瘤切除之后，一体化的 3D 打印骨盆假体不但可恢复骨骼的连续性，而且还能精准地重建髌关节旋转中心，以此为基础来为下肢功能的恢复打下良好的基础。相关研究指出，运用这类个性化的假体展开复杂的重建操作，患者在术后的功能恢复情况较为理想，并且假体出现松动、断裂等机械方面的并发症的发生率也明显有所降低[21][22]。甚至还有前瞻性的研究把治疗功能整合到假体当中，像是运用载药或者是具备光热效应的 3D 打印支架，在对骨缺损进行修复的过程中同时抑制肿瘤的复发，呈现出“治疗-修复”一体化在未来的发展方向[3]。

综上所述，从较为简单的标准骨干重建一直到复杂程度颇高的关节、多节段重建，3D 打印个性化假体凭借自身精准适配、可促进骨整合以及能够实现一体化成型等技术方面的特点，在充分保障肿瘤切除边界的情况之下，大幅度地提高了肢体保留手术的成功概率，并且让功能预后也有了明显提升，进而给骨肉瘤患者带来了从保肢开始直至功能康复的完整一套解决方案。

#### 3.2. 术后感染防控的协同策略

术后感染属于骨肉瘤保肢手术后所面临的一项极为严峻的挑战，甚至有可能引发灾难性的手术失败情况。3D 打印技术凭借自身所具备的定制化优势，针对这一难题给出了协同防控策略，该策略涉及从局部药物递送方面到分阶段手术规划等方面，由此使得复杂病例的管理水平得到了明显的提升。

##### 3.2.1. 局部载药与靶向清创：个性化抗感染间隔物

在感染或者存在高风险的病例当中，单纯依靠系统抗生素来治疗，通常很难在骨缺损的局部实现有

效的药物浓度, 而且其副作用还比较大。3D 打印技术能够制造出载有抗生素的个性化间隔物, 比如采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)这类材料, 借助 3D 打印模具将其成型为能与清创之后空腔形状完全匹配的间隔物, 并且预先让它负载上高浓度的抗生素, 像万古霉素这样的。这种间隔物在植入到体内之后, 可以在局部持续地释放药物, 直接对感染灶起到作用, 有效地清除病原体, 这里面就包含了耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA), 与此同时还能给软组织给予临时性的支撑[23]。和传统手工塑形的骨水泥间隔物相比, 3D 打印出来的个性化间隔物与骨腔的贴合程度要更好一些, 药物释放也更为均匀, 空腔死腔的大小也更小, 如此一来便优化了感染控制的效果, 还降低了复发的风险。

### 3.2.2. 优化两阶段翻修: 为永久重建搭建桥梁

对于已经确诊的假体周围感染情况而言, 标准的“两阶段翻修手术”可称得上是治疗的金标准。3D 打印技术在这一策略里起到了极为关键的作用: 在第一阶段当中, 完成彻底清创之后, 会植入之前所提及的个性化抗生素间隔物, 以此来控制感染状况, 并且维持肢体的长度以及关节间隙; 到了第二阶段, 等感染彻底消除以后, 再把间隔物取出来, 然后植入最终的个性化永久假体。因为两个阶段的手术都是依据同一套精准的解剖数据来进行的, 所以能够确保临时间隔物和最终假体在形态方面实现完美的衔接, 这不仅极大地便利了二次手术的操作流程, 而且减少了对组织的损伤, 还有助于术后功能的顺利过渡。从临床实践的情况来看, 这样的方案能够有效地降低感染复发的概率, 并且能够让患者最终获得较为良好的功能评分(比如 MSTs 评分) [23]。

3D 打印技术把抗感染治疗从“全身给药”这种较为被动的模式转变成了“局部定制、精准打击”的主动模式, 借助个性化载药间隔物和两阶段翻修手术进行精准配合, 其在控制骨感染这个棘手并发症方面展现出了明显优势, 同时也为最终成功实现骨骼功能重建打下了稳固基础, 属于骨肉瘤综合治疗体系里必不可少的协同策略。

### 3.3. 功能恢复与生活质量提升的客观评价: 从 MSTs 总分到子项

3D 打印个性化假体在骨肉瘤治疗中的真正价值, 不能仅用 MSTs 总分“升高”一语概括, 而应进一步拆解为不同维度的功能获益。MSTs 下肢评分包括疼痛、总体功能、情感接受度、支具使用、行走能力和步态; 上肢评分则关注疼痛、功能、情感接受度、手位、手部灵巧性和提举能力。因此, 同样的总分改善, 其背后的获益结构可能并不相同: 有的患者主要受益于疼痛缓解和情感接受度提升, 有的则体现在关节活动、独立行走或上肢精细操作能力的恢复。对这些子项进行拆解, 才能更准确地体现 3D 打印技术在不同解剖部位重建中的真实优势。

现有临床报道提示, 3D 打印技术最稳定的获益首先出现在疼痛、情感接受度和基础功能三个维度。其原因在于个性化假体能够提高截骨后的解剖匹配度, 减少界面微动和软组织摩擦, 并通过多孔结构促进早期骨整合, 从而更早实现疼痛缓解和对重建肢体的“信任感”恢复[2] [20]-[22]。以胫骨“超临界”节段缺损重建为例, 患者在随访中普遍达到无痛、步行距离不受限, 平均 MSTs 为 26.8/30, 提示在以承重稳定为核心的骨干重建中, 疼痛、支具依赖和行走能力往往是最先改善的子项[22]。

不同重建部位的子项改善并不一致。膝周保关节重建通过精确导板和个性化假体保留了关节面与韧带附着的连续性, 故除疼痛下降外, 功能、步态和膝关节活动度改善更为突出; 相关系列中 10/12 例患者末次随访屈膝可达 95°~125°, 平均 MSTs 28 分, 且均可脱拐独立行走[20]。相较之下, 骨盆/髌臼周围重建虽然也可获得满意总体功能, 但因髌外展肌重建困难、骨盆环应力环境复杂以及旋转中心重建精度要求更高, “支具使用-行走能力-步态”这三个子项的恢复通常慢于“疼痛-情感接受度”的改善。已有骨盆系列研究提示, 3D 打印个性化重建后多数患者能够恢复独立行走并取得良好 MSTs 结果, 但仍可见髌关节脱位、翻修等与动态稳定相关的并发症[21][24]。这说明复杂负重关节的重建成败, 不仅取决于

假体是否“装得进去”，更取决于其是否能在动态活动中维持力线与软组织张力平衡。

上肢重建的获益结构又有所不同。以桡骨远端为代表的病例中，疼痛缓解和情感接受度改善往往最为直接，而手位、灵巧性和提举能力的恢复则更依赖腕关节稳定性、伸屈肌腱平衡以及后续康复训练的质量[2]。因此，临床研究在报告功能结果时，不宜仅给出平均 MSTs 总分，而应至少按解剖部位、重建类型和随访阶段分层报告各子项变化，并尽可能联动 ROM、VAS、步态分析或上肢操作能力等指标。只有把“哪一项改善、为何改善、在哪类患者改善更明显”阐述清楚，3D 打印技术才能真正为骨肉瘤保肢决策提供精细化证据。

## 4. 前沿趋势：动态适配假体的技术创新

### 4.1. 概念、设计与核心驱动力

动态适配假体处在骨缺损重建从“静态替代”朝着“智能交互”发展的前沿位置，它的关键点在于该假体可依据患者当下运动状况、生理负荷或者术后愈合情况，主动或者被动地改变自身力学特性，像是刚度、形状等，进而达成和生物组织的动态契合以及功能提升。

设计原则着重于生物力学方面的协调事宜。和传统的假体不一样，动态适配假体在设计之时，最先去考量的是要与周围的活体组织达成长期的协同状态。其中的关键原则有如下几点：其一，要着力减少应力屏蔽情况的发生。具体而言，可以通过采用仿生的力学设计方式，或者设置可变刚度的结构，以此让负荷能够在假体以及骨骼之间实现合理的分布，进而防止因为假体过度去承载负荷而致使邻近的骨头出现吸收的情况。其二，得对动态匹配予以优化处理。要保证假体在不同的活动状况下，像是行走、奔跑这类情形当中，都能够给予适宜的支撑作用以及缓冲效果，从而提升使用的舒适程度以及工作效率。其三，必须要确保具备长期的耐久性能。在那种处于动态变化当中的应力环境之下，所选用的材料以及构建的结构都得拥有极为出色的抗疲劳性能，这样才能切实保障假体能够保持长期的可靠性。

智能材料与传感技术构成核心驱动力这一理念的实现依赖于两大技术支柱：

智能材料，像形状记忆合金、压电材料以及水凝胶等等，这类材料在受到温度、应力、电场或者 pH 值等外界刺激的时候，会产生可以逆转的形变或者性能方面的改变。就好比形状记忆合金，在体温或者特定电信号的触发作用之下，是能够恢复到预先设定好的形态的，如此一来便赋予了假体主动调节自身形态的能力[4]。

集成传感和反馈系统：把微型传感器(比如应变传感器、压力传感器)嵌到假体里，能实时监测假体和骨头接触面的力学状况、微动情形以及局部生物环境指标(像 pH 值，或许跟早期感染有关)。这些数据经过嵌入式处理器或者无线传输给医生，供其了解术后的监测信息，以后还能形成闭环控制系统，推动执行器(如依靠智能材料制成的微动装置)达成自适应调节[8]。这两者的结合，让假体从单纯的“被动植入物”变成有“感知 - 响应”功能的智能生物医学设备。

### 4.2. 临床前研究与转化挑战

动态适配假体方面的研究，当下已经从单纯的概念设计阶段逐步迈向了临床前的验证以及初步的探索这一阶段，在此过程当中，已然展现出了其具备的潜力，并且也进一步明确了若要实现向广泛的临床转化转变时，必须要去克服的那些关键障碍所在。

实验研究与初步转化已经表明，动态适配并不意味着单纯为假体增加传感器或执行器，而是要把“患者静态解剖”升级为“解剖 - 运动 - 载荷”协同驱动的设计框架。现有研究一方面已基于运动学几何和统计形态学实现个性化膝关节假体的自动建模，为关节线、旋转中心、接触曲率和截骨量的匹配提供算法基础[25]；另一方面，面向机器人膝假体的用户偏好学习与强化学习调参研究提示，步态周期内的屈伸

轨迹、地面反力、相位切换时机和个体主观舒适度, 均可被纳入控制参数优化过程[26]。对骨肉瘤重建而言, 这一思路的启示在于: 未来的 AI 设计不应止步于拓扑优化, 而应整合 CT/MRI 构建的骨缺损模型、步态分析或可穿戴惯导获得的动态运动学数据、足底压力和肌电信号, 以及有限元计算得到的应力分布, 形成患者特异性的“数字孪生”模型, 用于同步优化假体的关节面形态、旋转中心、柄部长度与方向、螺钉通道及区域性晶格刚度[25]-[27]。

动态适配假体虽然有着广阔的前景, 然而若想成为临床常规选择, 却面临着更为具体而严峻的挑战。首先, 动态数据如何进入制造流程仍缺乏标准化路径: 目前多数研究停留在术前一次性建模, 而尚未实现将康复期连续监测数据反向更新至假体设计与康复方案之中。其次, 多功能界面的制造整合仍存在工艺瓶颈。对于金属假体, 需要在保持深层孔道开放和疲劳强度的前提下, 实现孔壁内外均匀的生物活性涂层沉积或局部药物负载; 对于可降解或生物陶瓷支架, 则需进一步协调孔隙结构、降解速率和药物释放动力学之间的匹配[17]-[19]。其三, 数值模拟、AI 优化与增材制造之间虽然已开始形成闭环, 但相关验证多来自小样本、单中心或临床前研究, 距离形成可推广的设计规范仍有差距[27]。因此, 未来临床转化的关键, 不只是证明“可以做出更复杂的假体”, 而是建立一套从数据采集、模型训练、设计输出到制造质控和术后反馈的标准化流程。

## 5. 结论与展望

3D 打印技术已然从一种前沿的制造工艺逐步发展成了促使骨肉瘤治疗范式发生转变的关键核心驱动力。其凭借构建起一套完整的从多模态影像规划开始, 经由个性化假体的一体化设计与制造环节, 一直延伸至术后功能康复评估的技术链条, 借助给出高度个性化的解决办法, 正把骨肉瘤的治疗目标从单纯追求“肿瘤切除以及生存时间得以延长”这样的情况, 推升到了实现“功能最大限度地予以保留并且生活质量获得全面提升”的全新高度之上。

虽然取得了一定的成绩, 不过当下该领域所开展的研究依旧存在着一些限制。多数临床报告属于单中心且样本量较小的回顾性研究, 又或者是案例报告, 缺少那种能够给出最高等级循证医学证据的大规模、多中心以及具有前瞻性的随机对照试验。尤其是针对代表着未来发展趋势的动态适配智能假体而言, 其相关研究大都仅仅处于概念设计的阶段, 或者是在体外实验阶段, 再或者是初步进行临床探索的阶段。智能材料, 比如形状记忆合金, 其长期的生物安全性方面存在问题; 植入式的传感与供能系统在可靠性上也有待考量; 并且成本还十分高昂, 这些因素共同构成了阻碍其迈向广泛临床应用的重要挑战, 迫切需要借助严谨细致的临床前研究以及按部就班推进的临床试验来对其进行验证并予以克服。

展望未来, 骨肿瘤修复将进入由多技术深度协同驱动的“智能重建”阶段。下一步研究重点不应再把 3D 打印、AI、生物活性材料和传感监测视为并列技术模块, 而应构建贯穿“术前设计 - 术中实施 - 术后监测 - 再次优化”的连续技术链。

1) 和生物活性材料相融合: 其核心将从单纯表面改性转向界面工程。在同一假体内形成致密承重区、梯度多孔骨整合区和功能化表层区: 承重区保证初始稳定性, 多孔区促进骨长入, 功能层则承担抗菌、抗肿瘤或免疫调控作用。对于骨肉瘤患者而言, 这种设计最有价值之处在于它能把“切除后重建”与“局部复发防控”合并为同一器械平台[17][18]。

2) 与人工智能(AI)融合: AI 与 3D 打印的融合应从“静态几何定制”迈向“动态功能定制”。除利用算法自动生成更优晶格结构外, 更关键的是把患者的步态周期、关节活动轨迹、足底压力、肌肉募集模式和康复阶段负荷特征纳入设计输入, 在术前完成假体力线、旋转中心和区域刚度的个体化优化; 术后再利用可穿戴设备和影像随访持续更新模型, 有效提升了模型在个体化场景下的泛化能力, 实现康复方案和风险预警的同步调整[25]-[28]。

3) 和实时监测技术相结合: 传感技术、物联网与增材制造的融合将推动重建系统由“植入物”演变为“平台型装置”。未来假体或外周穿戴设备可持续监测骨-假体界面微动、局部温度/pH变化、负荷分布和活动水平; 当系统识别出感染、松动或异常应力集中征象时, 可提前触发影像复查、康复干预甚至设计修正。届时, 骨肉瘤保肢治疗将不再以手术结束为终点, 而是形成贯穿全随访周期的闭环管理。

去推动 3D 打印技术同生物材料、人工智能和实时监测技术的交叉融合, 并不只是为了制造“更复杂”的假体, 而是为了建立一个可持续学习重建体系。未来研究除继续积累肿瘤学安全性与长期生存数据外, 还应建立统一的功能评价框架: 不仅报告总 MSTS, 还要分层记录各子项、不同解剖部位的恢复轨迹以及与步态、ROM、疼痛和生活质量量表之间的对应关系。只有当功能获益、制造工艺和智能监测三者被整合进同一评价体系, 3D 打印技术才有望真正推动骨肉瘤保肢治疗从“个性化重建”走向“精准、可持续、可学习的智能重建”。

## 参考文献

- [1] He, C., Dong, C., Yu, L., Chen, Y. and Hao, Y. (2021) Ultrathin 2D Inorganic Ancient Pigment Decorated 3D-Printing Scaffold Enables Photonic Hyperthermia of Osteosarcoma in NIR-II Biowindow and Concurrently Augments Bone Regeneration. *Advanced Science*, **8**, Article ID: 2101739. <https://doi.org/10.1002/advs.202101739>
- [2] Chen, G., Yin, Y. and Chen, C. (2021) Limb-Salvage Surgery Using Personalized 3D-Printed Porous Tantalum Prosthesis for Distal Radial Osteosarcoma: A Case Report. *Medicine*, **100**, e27899. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000027899>
- [3] Long, J., Zhang, W., Chen, Y., Teng, B., Liu, B., Li, H., et al. (2021) Multifunctional Magnesium Incorporated Scaffolds by 3D-Printing for Comprehensive Postsurgical Management of Osteosarcoma. *Biomaterials*, **275**, Article ID: 120950. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.120950>
- [4] Gharbi, M.A., Zendeoui, A., Tborbi, A., Bouzidi, R., Ezzaouia, K. and Nefiss, M. (2023) Conservative Surgical Management of Surface Osteosarcoma Using 3D Printing Technology: An Unusual Case Report and Literature Review. *International Journal of Surgery Case Reports*, **113**, Article ID: 109086. <https://doi.org/10.1016/j.ijscr.2023.109086>
- [5] Rocha, M.S., Marques, C.F., Pina, S., Oliveira, J.M., Reis, R.L. and Silva, T.H. (2025) 3d-Printed Cell-Instructive Scaffolds Based on *Chondrosia reniformis* Collagen and Sr-Doped Calcium Phosphates for Bone Tissue Engineering. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, **11**, 3547-3559. <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.4c01926>
- [6] Yang, H., Fang, X., Xiong, Y., Duan, H. and Zhang, W. (2022) 3D Customized Biological Tibial Intramedullary Nail Fixation for the Treatment of Fracture after Massive Allograft Bone Transplantation of Tibial Osteosarcoma: A Case Report. *Orthopaedic Surgery*, **14**, 1241-1250. <https://doi.org/10.1111/os.13294>
- [7] Shen, S., Wang, P., Li, X., Han, X. and Tan, H. (2020) Pre-Operative Simulation Using a Three-Dimensional Printing Model for Surgical Treatment of Old and Complex Tibial Plateau Fractures. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 6044. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63219-w>
- [8] Tran Trung, D., Quang, S.N.T., Trung, H.P., Tu, N.V., Sy Quyen, N.V., Duc, T.T., et al. (2021) Partial Replacement of Pelvis with the Hip Joint in Osteosarcoma Treatment: A Case Report. *Annals of Medicine and Surgery*, **70**, Article ID: 102812. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102812>
- [9] Mendonça, C.J.A., Guimarães, R.M.d.R., Pontim, C.E., Gasoto, S.C., Setti, J.A.P., Soni, J.F., et al. (2023) An Overview of 3D Anatomical Model Printing in Orthopedic Trauma Surgery. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, **16**, 875-887. <https://doi.org/10.2147/jmdh.s386406>
- [10] Shah, N.R., Weadock, W.J., Williams, K.M., Moreci, R., Stoll, T., Joshi, A., et al. (2024) Use of Modern Three-Dimensional Imaging Models to Guide Surgical Planning for Local Control of Pediatric Extracranial Solid Tumors. *Pediatric Blood & Cancer*, **71**, e30933. <https://doi.org/10.1002/pbc.30933>
- [11] Lin, Y., Yang, Y., Yuan, K., Yang, S., Zhang, S., Li, H., et al. (2022) Multi-Omics Analysis Based on 3D-Bioprinted Models Innovates Therapeutic Target Discovery of Osteosarcoma. *Bioactive Materials*, **18**, 459-470. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.03.029>
- [12] Mancino, A.V., Milano, F.E., Risk, M.R. and Ritacco, L.E. (2023) Open-Source Navigation System for Tracking Dissociated Parts with Multi-Registration. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **18**, 2167-2177. <https://doi.org/10.1007/s11548-023-02853-x>
- [13] De Paolis, M., Sambri, A., Zucchini, R., Frisoni, T., Spazzoli, B., Taddei, F., et al. (2022) Custom-Made 3D-Printed Prosthesis in Periacetabular Resections through a Novel Ileo-Adductor Approach. *Orthopedics*, **45**, e110-e114. <https://doi.org/10.3928/01477447-20211227-01>

- [14] Rapaport, S., Schmerler, J., Kreulen, R.T., Prasad, N., Pratilas, C.A. and Levin, A.S. (2025) Use of a Novel Technique for Iliac Wing Osteosarcoma Metastasis Resection and Reconstruction. *JBJS Case Connector*, **15**, e24. <https://doi.org/10.2106/jbjs.cc.24.00420>
- [15] Xu, C., Xia, Y., Zhuang, P., Liu, W., Mu, C., Liu, Z., *et al.* (2023) FePSe<sub>3</sub>-Nanosheets-Integrated Cryogenic-3D-Printed Multifunctional Calcium Phosphate Scaffolds for Synergistic Therapy of Osteosarcoma. *Small*, **19**, Article ID: 2303636. <https://doi.org/10.1002/sml.202303636>
- [16] Zhu, C., He, M., Sun, D., Huang, Y., Huang, L., Du, M., *et al.* (2021) 3D-Printed Multifunctional Polyetheretherketone Bone Scaffold for Multimodal Treatment of Osteosarcoma and Osteomyelitis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 47327-47340. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c10898>
- [17] Fan, D., Zhang, C., Wang, H., Wei, Q., Cai, H., Wei, F., *et al.* (2023) Fabrication of a Composite 3D-Printed Titanium Alloy Combined with Controlled in Situ Drug Release to Prevent Osteosarcoma Recurrence. *Materials Today Bio*, **20**, Article ID: 100683. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100683>
- [18] Liu, X., Liu, Y., Qiang, L., Ren, Y., Lin, Y., Li, H., *et al.* (2023) Multifunctional 3D-Printed Bioceramic Scaffolds: Recent Strategies for Osteosarcoma Treatment. *Journal of Tissue Engineering*, **14**. <https://doi.org/10.1177/20417314231170371>
- [19] Choo, Y.J., Kim, J.H. and Chang, M.C. (2024) Three-Dimensional Printing Technology Applied to the Production of Prosthesis: A Systemic Narrative Review. *Prosthetics & Orthotics International*, **49**, 344-352. <https://doi.org/10.1097/pxr.0000000000000366>
- [20] Liu, W., *et al.* (2022) Clinical Application of Three-Dimensional Printed Osteotomy Guide Plate and Personalized Prosthesis in Knee-Preserving Tumor Resection. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, **36**, 811-816.
- [21] Wu, J., Xie, K., Luo, D., Wang, L., Wu, W., Yan, M., *et al.* (2021) Three-Dimensional Printing-Based Personalized Limb Salvage and Reconstruction Treatment of Pelvic Tumors. *Journal of Surgical Oncology*, **124**, 420-430. <https://doi.org/10.1002/jso.26516>
- [22] Zhao, D., Tang, F., Min, L., Lu, M., Wang, J., Zhang, Y., *et al.* (2020) Intercalary Reconstruction of the “Ultra-Critical Sized Bone Defect” by 3D-Printed Porous Prosthesis after Resection of Tibial Malignant Tumor. *Cancer Management and Research*, **12**, 2503-2512. <https://doi.org/10.2147/cmar.s245949>
- [23] Qu, G.-X., Zhang, C.-L., Du, X.-H., *et al.* (2023) Application of Personalized Spacers Made with 3D-Printed Mold in the Two-Stage Procedure for Periarticular Infection. *European Review for Medical & Pharmacological Sciences*, **27**, 7507-7513.
- [24] Hu, X., Chen, Y., Cai, W., Cheng, M., Yan, W. and Huang, W. (2022) Computer-Aided Design and 3D Printing of Hemipelvic Endoprosthesis for Personalized Limb-Salvage Reconstruction after Periacetabular Tumor Resection. *Bioengineering*, **9**, Article No. 400. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080400>
- [25] Li, P., Liu, H., Zhang, B., Liu, D., Yang, L. and Liu, B. (2023) An Automatic Method Framework for Personalized Knee Prosthetic Modeling Based on Kinematic Geometry. *Current Medical Imaging Formerly Current Medical Imaging Reviews*, **20**, E110823219690. <https://doi.org/10.2174/1573405620666230815142639>
- [26] Alili, A., Nalam, V., Li, M., Liu, M., Feng, J., Si, J., *et al.* (2023) A Novel Framework to Facilitate User Preferred Tuning for a Robotic Knee Prosthesis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **31**, 895-903. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2023.3236217>
- [27] Namvar, A., Lozanovski, B., Downing, D., Williamson, T., Kastrati, E., Shidid, D., *et al.* (2024) Finite Element Analysis of Patient-Specific Additive-Manufactured Implants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **12**, Article ID: 1386816. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1386816>
- [28] Xie, N., Tian, J., Li, Z., Shi, N., Li, B., Cheng, B., *et al.* (2024) Invited Review for 20th Anniversary Special Issue of PLRev “AI for Mechanomedicine”. *Physics of Life Reviews*, **51**, 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.10.010>