

3D打印钛基复合材料在康复辅具领域的应用研究

张佳仪¹, 李 梦^{1,2*}, 白孟灿¹, 安春旭¹, 张 彦¹, 尹嫣然¹, 王先锦¹

¹济宁医学院康复医学院康复治疗系, 山东 济宁

²医工融合智能康复医疗设备关键技术山东省工程研究中心, 山东 济宁

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

摘 要

随着人口老龄化进程的加快与慢性病群体康复需求的持续增长, 康复辅具向个性化、高性能、轻量化方向升级成为必然趋势, 而传统制造技术与材料体系难以适配这一发展需求, 钛基复合材料凭借优异的生物相容性、力学性能与耐蚀性, 成为康复辅具制造的理想材料选择, 3D打印技术的发展也为该材料的个性化成型提供了相应技术支撑。研究表明, 3D打印钛基复合材料的融合应用有望缓解康复辅具个性化定制与高性能要求之间的矛盾, 为精准医疗背景下康复辅具的创新发展提供了新路径, 具有重要的理论研究与工程应用价值。

关键词

康复辅具, 钛基复合材料, 3D打印, 个性化制造

Research on the Application of 3D Printed Titanium Matrix Composites in the Field of Rehabilitation Assistive Devices

Jiayi Zhang¹, Meng Li^{1,2*}, Mengcan Bai¹, Chunxu An¹, Yan Zhang¹, Yanran Yin¹, Xianjin Wang¹

¹Department of Rehabilitation Therapy, School of Rehabilitation, Jining Medical University, Jining Shandong

²Shandong Provincial Engineering Research Center for Key Technologies of Medical-Engineering Integrated Intelligent Rehabilitation Medical Equipment, Jining Shandong

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张佳仪, 李梦, 白孟灿, 安春旭, 张彦, 尹嫣然, 王先锦. 3D打印钛基复合材料在康复辅具领域的应用研究[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 212-222. DOI: 10.12677/ms.2026.165115

Abstract

With the accelerating population aging and the ever-increasing rehabilitation demands of patients with chronic diseases, the development of rehabilitation assistive devices toward personalization, high performance and lightweight design has become an inevitable trend. Nevertheless, conventional manufacturing techniques and material systems are inadequate to satisfy such evolving requirements. Owing to their outstanding biocompatibility, mechanical properties and corrosion resistance, titanium matrix composites have emerged as an ideal candidate for the fabrication of rehabilitation assistive devices. In addition, advances in 3D printing (additive manufacturing) have provided robust technical support for the personalized shaping of such materials. Research has demonstrated that the integrated application of 3D-printed titanium matrix composites effectively reconciles the conflict between personalized customization and high-performance demands of rehabilitation assistive devices, opening up a new avenue for the innovative development of rehabilitation assistive devices under the framework of precision medicine. This approach thus exhibits significant theoretical significance and engineering application value.

Keywords

Rehabilitation Assistive Devices, Titanium Matrix Composites (TMCs), 3D Printing, Personalized Manufacturing

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. 引言

近年来我国人口老龄化趋势日益显著,据相关统计数据显示,60岁及以上人口占比持续攀升,老龄化社会的到来使得老年群体的肢体功能障碍、慢性病术后康复等需求急剧增加[1] [2]。同时,交通事故、运动损伤等导致的肢体损伤群体也对康复辅助器具(以下简称康复辅具)存在大量刚性需求,康复辅具作为康复医学的重要载体,在提升患者生活质量、促进功能恢复等方面发挥着越来越重要的作用,其性能直接影响康复效果与患者生活质量。在此背景下,社会对康复辅具的要求已从单纯的“功能替代”向“个性化适配、高性能耐用、舒适化体验”转变,传统康复辅具的制造模式与材料体系逐渐显现出诸多弊端。

传统康复辅具制造多采用石膏取型、机械减材加工等工艺,制作过程受限于制作材料以及使用条件等,具有制作周期长、成本高等缺点。相较于传统工艺,3D打印技术突破了传统制造技术在复杂结构成型上的限制,能够实现康复辅具的个性化、精准化成型,且材料利用率高、生产周期短,成为康复辅具制造的重要发展方向[3]。同时,通过在钛合金基体基础上引入陶瓷增强相形成的复合材料兼具钛合金的生物相容性、耐蚀性与增强相的高硬度、高耐磨性,可较好地满足康复辅具对材料的综合性能要求。二者的融合应用为解决康复辅具行业的痛点问题提供了全新思路。

基于此,本文将系统梳理康复辅具材料的演变历程与性能需求,对比主流金属3D打印技术的适配性,深入分析3D打印钛基复合材料的成型工艺、质量控制要点,详细阐述其在假肢、矫形器等康复辅具中的具体应用场景,剖析当前该领域在材料、工艺、临床转化方面面临的核心挑战,并对未来发展趋势进行探讨,以期对康复辅具的研发与生产提供有益参考,进一步推动康复辅具的高质量发展,为人类健康事业做出积极贡献。

2. 康复辅具的材料演变与性能需求

2.1. 康复辅具常见材料及比较

目前用于制作辅具的材料种类繁多,各具特色,其中医用金属材料、医用塑料材料、医用复合材料、医用橡胶材料、医用纺织材料以及聚氨酯材料最为常见,具体优缺点比较见表1。

医用金属材料,如医用钛及钛合金、医用不锈钢,钴、镁合金,及记忆金属等。医用金属材料一般具有较高的强度、良好的韧性、较高的抗弯曲疲劳强度、优异的加工性能等优良性能[4]。金属材料具有较高的强度和硬度,能承受较大的压力和冲击力,在医学应用中主要作为承力材料,在临床多用于修复骨骼、关节、血管、牙齿等[5],在辅具中常用于制作轮椅的框架、助行器的支撑杆等,为辅具提供稳定的结构支撑。

医用塑料材料,包括聚乙烯、聚丙烯、ABS等,在辅具中可用于制作手柄、扶手、运动用护具等[6],使辅具更加轻便易用,方便使用者适应和操作。同时,金属材料和塑料材料在3D打印技术中也最为常见的材料,因其易获取性及优异的经济性,在大众医学中主要用于一次性医疗器械(点滴瓶、注射器等)、非一次性医疗设备(计量器、外科仪器等)[7]。

医用复合材料,如碳纤维复合材料、聚醚醚酮复合材料、石墨烯和石墨烯基纳米复合材料等,是由两种或两种以上不同性质的材料组合而成的新型材料,兼具各组成材料的优点,具有良好的生物相容性、机械性能和化学稳定性,可以耐受体内酸碱环境的变化[8][9],可用于制造高性能的康复辅具,植入性医疗器械等。同时,复合材料作为组织工程支架材料,可以提供良好的细胞生长环境,具有广阔的应用前景。

现有材料虽在不同程度满足了康复辅具的基本性能需求,但在强度、重量、舒适度等方面存在一定的平衡难题,难以适应当前个性化、高性能的行业需求。

Table 1. Comparison of common rehabilitation assistive device materials

表 1. 当前康复辅具常见材料比较

材料	优点	缺点
医用金属材料	强度高、耐用,使用寿命长,优异的力学性能,可降解性,良好的生物相容性[10],能够满足使用者对辅具稳定性和安全性的要求。	植入人体后会产生腐蚀和磨损,破坏材料性能,还有可能含有对人体有毒性的合金元素,且植入件在生物体内的降解速度与生物体需治疗部位自动愈合的速度能否相匹配也是非常关键的问题[4]。
医用塑料材料	具有质轻、高强度、耐高温、耐腐蚀和优异的化学稳定性[11][12],造价便宜,降低使用者体力消耗的同时降低了开发成本,同时塑料材质可以通过不同的加工工艺实现多样化的外观设计,提高辅具的美观性。	强度和硬度相对较低,在长期使用或受到较大外力时容易变形或损坏,耐用性较差。
医用复合材料	可同时拥有多种材料性能,如聚醚醚酮复合材料可同时拥有动态负载性能优异、耐腐蚀以及耐磨等特点[13]。同时能够提高辅具的性能和舒适度,有助于提升辅具的科技感和高端感。	成本较高,导致辅具价格昂贵,限制了其在普通消费群体中的普及程度。
医用橡胶材料	基于较好的耐高温、耐腐蚀、高绝缘和高强度等特性,硅橡胶被广泛应用于医疗领域[14],其良好弹性、优良的化学稳定性及生物相容性[15],在假肢应用中可改善残肢与接受腔的压力分布,减少剪切力与摩擦力[16],减轻使用者的疲劳感,延长使用寿命。	机械强度、耐酸碱性、亲水性较差,在介入时对组织摩擦较大,易损伤尿道、血管壁等上皮组织[16],并且价格较贵。

续表

医用纺织材料	以生物医用纺织纤维为原料, 具备抗菌、无毒、无致癌、不致敏等特点, 具有临床诊断、治疗修复、替代脏器以及保健与防护等功能[17]。	强度和支撑性相对较弱, 不适合用于承受较大压力或需要高强度支撑的部位, 且容易受到污染和损坏, 需要经常清洗或更换。
聚氨酯材料	含有氨基甲酸酯基团的聚合物, 通常由异氰酸酯与聚合物多元醇反应而成, 具有高强度、耐磨耗、抗撕裂、挠曲性能好、耐油和血液相容性好等优点[18]。	透气性差, 固化时间长, 具有潜在过敏反应等生物相容性问题以及非轴向力学性能差等机械性能的限制性, 长期使用有一定风险。

2.2. 钛基复合材料的性能优势

钛基复合材料是以钛及钛合金为基体, 通过引入陶瓷颗粒、纤维等增强相, 经复合制备而成的高性能复合材料, 将基体材料良好的韧性、延展性与增强体的高强度、高模量或特殊功能特性相结合[19], 从而实现性能的显著提升, 成为康复辅具制造的优选材料。

Table 2. Comparison of common reinforcement phases [27]-[29]

表 2. 常用增强相对比[27]-[29]

增强相	力学性能	生物相容性	耐磨性	耐腐蚀性	密度	加工难度	成本
二氧化硅(SiO ₂)	强度、硬度显著提高, 韧性稍微下降, 抗疲劳性能提高	良好(惰性陶瓷, 无毒性)	显著提升	优异	低(约 2.6 g/cm ³)	中等	低
氧化铝(Al ₂ O ₃)	强度、硬度提高(高于 SiO ₂), 韧性下降	良好	优异	良好	中(约 3.9 g/cm ³)	高, 烧结难度大	中
羟基磷灰石(HA)	强度、硬度轻微提高, 韧性基本不变	优异(生物活性高)	中等	表面易腐蚀	低(约 3.1 g/cm ³)	中等	高
石墨烯(GO/rGO)	强度、硬度、韧性均提高, 抗疲劳性能显著提升	良好	优异	优异	低(约 2.2 g/cm ³)	高, 分散困难	极高
碳化钛(TiC)	强度、硬度提高, 抗磨损能力突出	中等(惰性, 需表面生物涂层)	优异	中等	中(约 4.9 g/cm ³)	高, 需烧结温度高	中
金属/合金(Ta、TiB ₂ 等)	强度提高, 韧性保持不变, 抗疲劳性能提高	良好	中等	优异	高(约 16.6 g/cm ³)	高, 冶金结合困难	极高
碳纤维(CF)	强度、韧性提高, 抗疲劳性能优异	中等	中等	良好	低(约 1.8 g/cm ³)	高, 界面结合难	高

康复辅具所用钛基复合材料的基体主要为 Ti₆Al₄V 钛合金, 该合金是生物医用领域应用最成熟的钛合金之一。物理特性上, 钛合金的抗拉强度范围在 686~1176 MPa, 极端情况下可攀升至 1764 MPa, 超过一些高强钢, 且密度约 4.54 g/cm³, 仅为钢的 60%左右, 较钢轻盈很多, 密度在铝的 2 倍与镁的 5 倍之间, 兼具轻量化与较高的力学性能, 能够在降低辅具重量的同时, 满足其承载、抗冲击等力学要求, 有效减轻患者的佩戴负担。此外, 钛合金的熔点高达 1942 K, 远超黄金近 1000 K, 较铁亦高出近 500 K, 展现出卓越的高温耐受力。化学特性上, 钛合金表现活跃, 尤其在常温条件下与氧气反应会快速形成一层致密、结合力强且高度稳定的氧化膜, 能够有效防护本体免受腐蚀侵害[20]。另一方面, 通过引入增强相形成钛基复合材料, 能够有效提高材料的强度与硬度, 提升复合材料的整体力学性能。根据增强体的

不同, 钛基复合材料可分为以各种长短纤维为增强相的连续纤维增强钛基复合材料(CRTMCs)和以陶瓷颗粒、金属氧化物以及稀土氧化物等作为增强体的非连续颗粒增强钛基复合材料(DRTMCs), 连续纤维增强钛基复合材料虽然具有高强度、耐高温和抗蠕变等优良性能, 但存在常规技术加工困难及力学性能各向异性等缺点, 且增强体与基体界面结合差, 在材料受力过程中易产生裂纹等问题[21][22]。非连续颗粒增强钛基复合材料在保持连续纤维增强钛基复合材料特性的基础上, 具有各向同性、可变形加工、生产成本低等优点, 被认为是最具发展潜力的高性能金属基复合材料[23]。目前常用的增强体主要包括 TiC、TiB、TiB₂、SiC、B₄C、Ti₅Si₃ 和 Si₃N₄ 等陶瓷颗粒。其中 TiB 与 TiC 具有高硬度与高模量, 与基体相容性好, 密度、泊松比与热膨胀系数与纯钛或钛合金基体相近, 且化学稳定性好, 能够有效提高钛基复合材料的室温和高温力学强度、耐磨性等, 是理想的增强体材料, 但存在强度-塑性平衡问题[24]; Si 元素可以与 Ti 基体形成 Ti₅Si₃ 等稳定硅化物相, Ti₅Si₃ 具有高熔点和良好的热稳定性, 可以提高复合材料的热稳定性和抗蠕变作用, 从而提高复合材料的高温性能[25]; 石墨烯的自润滑效应可以使复合材料的摩擦系数随着时间的增加逐渐趋于稳定, 并减少了复合材料的体积磨损量, 有效提高复合材料的耐磨性, 但其存在界面反应严重、界面结合机制不明确等问题[26]。

经复合强化后的钛基复合材料, 其硬度、耐磨性较纯 Ti₆Al₄V 钛合金显著提升的同时, 保持了基体良好的生物相容性、耐蚀性与轻量化特性, 部分钛基复合材料的高温性能也得到改善, 能够适应不同使用环境的要求。此外, 钛基复合材料的性能可通过调控增强相的种类、含量、粒径与分布进行定制化设计, 制备出具有针对性的复合材料, 可较好适配康复辅具的个性化、高性能要求。

3. 3D 打印技术在康复辅具制造中的应用

3.1. 主流金属 3D 打印技术对比

Table 3. Comparison of technical characteristics and adaptability of SLM and EBSM [34]

表 3. SLM 与 EBSM 技术特点及适配性对比[34]

技术指标	激光选区熔融(SLM)	电子束选区熔融(EBSM)
工作热源	激光(束斑直径~0.1 mm)	电子束(束斑直径 0.1~2 mm)
成型环境	惰性气体保护	真空环境(<10 ⁻² Pa)
加工余量	0.1~0.5 mm, 较小	0.5~2.0 mm, 较大
致密度	高, 成型件致密度可达 99.5% 以上	较高, 成型件致密度可达 99% 以上
热应力	较大, 局部快速熔化凝固易产生残余应力	较小, 高温成型降低温度梯度, 残余应力低
成型效率	中, 小光斑限制扫描速度	高, 大光斑与高扫描速度结合, 成型效率高
材料适配性	适配大部分金属粉末, 包括钛基复合材料粉末	主要适配钛合金粉末, 对复合材料粉末的适配性较差
康复辅具适配场景	高精度、复杂结构的辅具, 如颅颌面修复体、个性化接受腔	大尺寸、简单结构的辅具, 如假肢支架、轮椅承重组件

随着对康复辅具个性化、高性能、轻量化需求的日益增加, 传统制造技术难以满足这些要求。增材制造技术(AM), 也称之为 3D 打印, 是基于离散-堆积的基本原理, 通过建模软件对零部件形状进行设计, 再通过分层软件对模型进行切片, 然后利用计算机控制 3D 打印机打印出最终产品, 可制造复杂形状和结构的金属零件[30]-[32], 目前钛基复合材料 3D 打印技术主要有选择性激光熔化(SLM)、电子束熔融(EBSM)、定向能量沉积(DED)和粉床熔融(PBF), 其中 SLM 与 EBSM 是粉末床熔化的典型代表, 二者都

以高能束流为热源,根据 CAD 分层数据选择性的扫描熔化粉末床上的金属粉末,逐层累计叠加,实现复杂结构的直接制造[33],但二者在热源特性、成型环境、工艺特点等方面存在明显差异,其适配性也因康复辅具的成型要求不同而有所区别,具体技术特点对比见表 2。

EBSM 技术以电子束为热源,成型效率高、残余应力低,但其成型精度较低,且高真空高温环境易导致陶瓷增强相发生化学反应,影响复合材料的性能,因此在钛基复合材料高精度康复辅具制造中的应用受到限制,主要用于大尺寸、低精度要求的金属辅具成型。SLM 技术则以激光器为热源,光斑直径小,具有成形精度高、成形零件致密度高、良品率高、制造适应性强等特点[35],能够精准还原患者的肢体解剖结构,适配康复辅具个性化、高精度的成型需求,同时其对钛基复合材料粉末的适配性较好,能够实现增强相均匀分布的复合材料成型,成为钛基复合材料康复辅具制造的主导技术。

由于设备工作原理的不同,二者所制造出的零件特征也有明显差异,总体比较,SLM 制造的零件具有更好的表面质量和更准确的结构细微特征,对于颅颌面修复体、脊柱矫形器等高精度、复杂结构的钛基复合材料辅具,优先采用 SLM 技术;而对于假肢支架、轮椅承重组件等大尺寸、对精度要求相对较低的辅具,可采用 EBSM 技术以提高成型效率。

3.2. 关键成型工艺与质量控制

以 SLM 为核心的钛基复合材料 3D 打印成型过程可分为粉末铺展、激光扫描熔化和熔池凝固三个阶段。如图 1 所示,SLM 打印机有一个充满金属粉末的腔室,通过涂布刀片将该金属粉末以非常薄的层铺展在基材或构建板上;然后,高功率激光通过选择性地熔化粉末材料来熔化部件的 2D 切片;接着,构建板下降一层的高度,而涂布刀片在表面上精细地铺展上又一层新粉末;重复该过程,直到完成打印[36][37],极大改善了传统钛合金加工过程中能耗高、生产周期长、复杂零件成形难度大等问题[38],进一步提高生产效率,降低经济损失[39]。

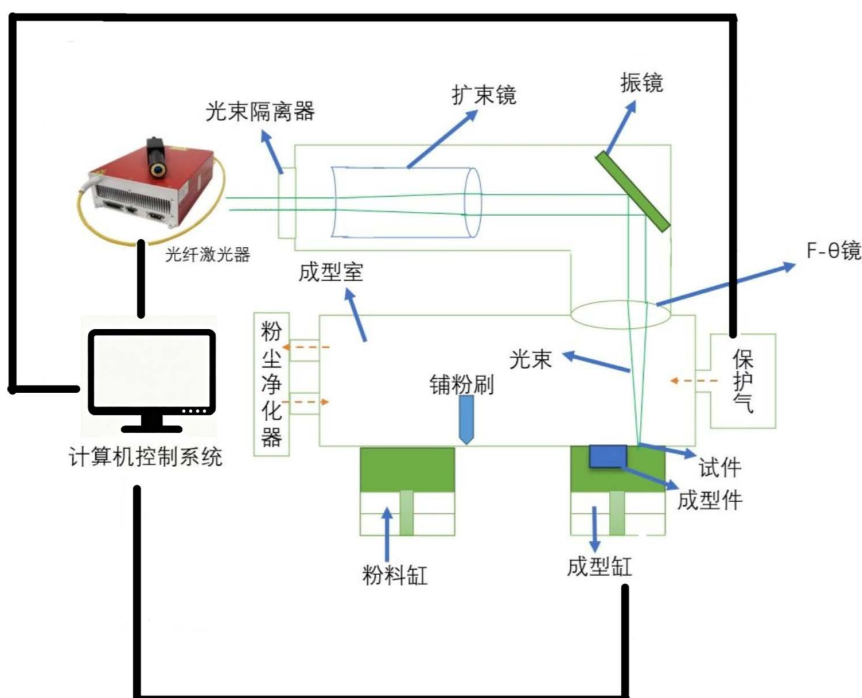


Figure 1. Schematic diagram of selective laser melting process
图 1. 选区激光熔化工艺流程示意图

在成型过程中，由于材料特性与工艺过程的复杂性，易产生气孔、残余应力、未熔合等缺陷，需要优化现有的技术方法或开发新的技术路线以提高零件的成型精度和表面质量[40]，具体补偿机制如下：

(1) 通过实时监测材料的性能变化，并调整工艺参数或使用添加剂等补偿性能偏差。例如，如果材料在打印过程中出现强度下降或韧性不足的情况，可通过调整打印温度、速度或添加增韧剂等方式来改善材料的性能；

(2) 通过优化结构设计来补偿材料性能的不足。例如，可以在关键受力部位增加加强筋或采用更复杂的结构设计来提高辅具的承载能力和稳定性。此外，还可以利用拓扑优化等方法对辅具结构进行优化，以实现轻量化和性能提升的双重目标；

(3) 通过调整打印参数、优化打印路径或使用支持结构等方式来进行补偿。例如，可以增加打印层之间的结合力、减少打印误差或提高打印精度等措施来确保打印出的辅具具有足够的精度和稳定性。

此外，SLM 成形钛合金悬垂件时温度梯度较大，引起熔池收缩不均，会形成较大的应力与变形，在马兰戈尼效应¹和蒸汽反冲压力作用下熔池形态受到扰动，出现对流飞溅及下沉现象，极易形成孔隙、球化和粘粉缺陷，如图 2 所示。可通过优化激光工艺参数，提高粉末铺展均匀性，保证增强相的均匀分布，提高熔池的流动性，防止增强相在熔池凝固过程中团聚。除此之外，在线监测与闭环控制也是质量控制的重要手段，通过引入高速摄像、红外测温、激光共聚焦等在线监测设备，实时监测熔池形态、温度场、成型过程的缺陷产生情况，并根据监测结果实时调整激光工艺参数，实现成型过程的闭环控制，有效提高成型件的质量稳定性。

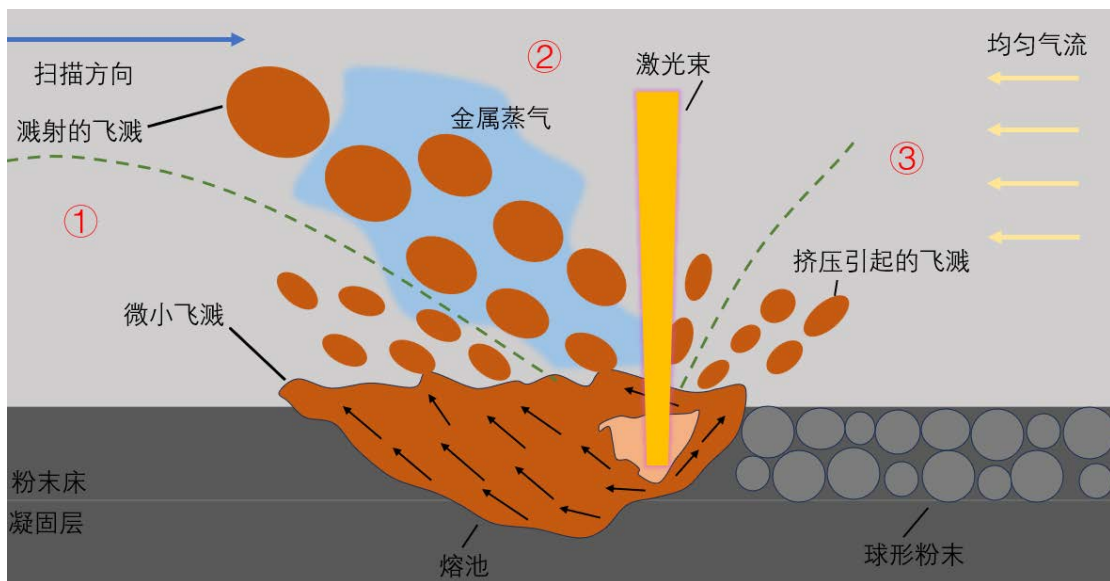


Figure 2. Molten pool morphology
图 2. 熔池图

4. 3D 打印钛基复合材料在康复辅具中的具体应用

康复辅具是为帮助身体机能受限或存在功能障碍的人士进行日常生活和康复而设计和制造的关键器械，最大限度地帮助使用者实现生活自理和参与社会活动，其材料性能和适配精度是决定康复效果和使用体验地重要因素。生物医用钛合金材料是专指用于生物医学工程的一类功能结构材料，主要用于外科

¹马兰戈尼效应是指由于表面张力不同的二种液体的界面存在表面张力梯度而使质量传运的现象。

植入物和矫形器械等产品的生产制造[41]，其粉末材料具有良好的可塑性和流动性，适用于 SLM 成型加工[42]。3D 打印钛基复合材料的引入，正在推动康复辅具从传统的“笨重”向“轻量化定制”转变。

4.1. 假肢与接受腔

假肢是肢体缺损患者的重要康复辅具，主要由接受腔、关节连接件、假脚等部分组成，主要具备功能代偿、辅助运动、肢体保护等功能。传统假肢矫形器多以木头、皮革等作为原材料，易磨损变形，使用周期较短[43]，接受腔式假肢装配也存在残肢界面摩擦损伤甚至感染、力传导性能不佳等问题[44]。3D 打印钛基复合材料凭借高比强度与优异抗疲劳性能，可被用作制作关节、连接件及承重骨架，在满足日常行走、负重等力学需求的同时大幅减轻假肢自重，有效缓解患者残肢肌肉疲劳感，延长假肢单次佩戴时长与整体使用寿命，而且其耐腐蚀、无磁性的特点也适配长期使用与医学影像检查。

4.2. 矫形器与固定装置

矫形器与固定装置是装配于人体四肢、躯干等部位的体外医疗器械，主要用于预防或矫正肢体畸形，治疗骨关节以及神经肌肉疾病并补偿运动功能。作为矫形器的材料需要具备一定的要求，如防止跌倒、重量轻、不限制肌肉活动、辅助提高血液循环质量等[45]。传统矫形器多以石膏成型，以钢材、皮革等材料加工制成[46]，普遍存在制作效率低、整体重量大、与人体解剖结构匹配度低、佩戴舒适度不足等问题。3D 打印钛基复合材料依靠其轻量化与良好生物相容性可大大减轻佩戴负荷，降低皮肤刺激与应力遮挡效应，并且可以根据有限元分析对矫形效果进行预判和及时优化，增加矫形器的实用度和美观度，满足人体舒适性与美学的要求[47]，使矫形器产品不再局限于传统热塑夹板、石膏模具成型，为矫形器的个性化制作提供了广阔的平台和设计空间[48]。

4.3. 其他辅助设备

除假肢、矫形器外，钛由于其无毒、化学稳定性和生物相容性等良好性能在植入修复方面起到重要作用，是制作骨植入器件的较好选择，也可用于制备人造心脏瓣膜等[49]。3D 打印钛基复合材料还在高性能轮椅关键承重组件、个性化手术导板、康复训练器具等其他康复辅助设备中得到了重要应用，凭借其个性化成型能力与抗疲劳、耐磨损的优异性能，提高康复辅具的适配性与使用舒适度，保障使用者使用过程中的安全性，推动各类康复辅助设备向高性能、个性化方向发展。

5. 现存问题与发展趋势

5.1. 当前面临的挑战

目前，3D 打印钛基复合材料康复辅具的应用受到材料、技术、临床转化三重制约：材料方面，复合粉末制备工艺复杂，成本高昂，效率低损耗高，且由于基体与陶瓷增强相之间存在物理化学性质差异，材料之间结合度较差，易产生缺陷；技术方面，SLM 等 3D 打印设备的维护和运营成本较高，中小企业难以投入广泛使用，同时，3D 打印钛基复合材料成型件后仍需进一步人工处理，自动化水平低，且市场工艺参数缺乏统一标准，成型件质量稳定性差，难以满足康复辅具高精度、高质量的临床要求；临床转化方面，在医疗认证标准、医工结合、临床评价体系等方面仍存在诸多壁垒，缺乏专用医疗认证与质量检测体系，多学科协作不足、研发与临床脱节，加之患者对 3D 打印康复辅具的认知度较低，一定程度上影响了其临床推广。

5.2. 未来发展趋势

随着材料科学、3D 打印技术与康复医学的不断发展，3D 打印钛基复合材料在康复辅具领域的发展

将朝着材料创新、工艺改善、产业功能升级的方向迈进。聚焦功能增强与多功能复合方向，联用微弧氧化、等离子喷涂等技术，优化材料性能与生物相容性，改善界面湿润性；同时 3D 打印也将依托技术升级，合并多激光协同、AI 智能调控、后处理自动化等技术，逐步实现打印参数及时修正，开发拓扑优化接受腔、多孔轻量化矫形器等结构库，提高生产效率与产品质量，为大规模临床应用提供工艺保障。综上，3D 打印钛基复合材料康复辅具将实现从“功能替代”向“功能增强”、智能化辅具发展，同时向产业化、规模化应用的方向迈进，成为康复医疗的重要组成部分，推动康复辅具个性化定制的规模化、国际化发展。

6. 结论

钛基复合材料在保留 Ti₆Al₄V 钛合金优异生物相容性、耐蚀性与轻量化特性的基础上，通过陶瓷增强相的细晶强化、载荷传递强化与弥散强化，实现了硬度、耐磨性、力学强度的显著提升，有效满足康复辅具对材料的综合性能要求；同时 3D 打印技术尤其是 SLM 技术，突破了传统制造技术在复杂结构成型上的限制，能够基于患者的医学影像数据实现康复辅具的个性化、精准化成型，二者的融合应用有效缓解了康复辅具“个性化定制”与“高性能要求”之间的核心矛盾，成为康复辅具领域的重要发展方向。但由于当前 3D 打印钛基复合材料在康复辅具领域的应用仍面临材料制备成本高、界面结合难，工艺设备投入大、后处理自动化程度低、工艺标准化缺失，医疗认证标准不统一、医工结合壁垒等挑战，制约了其大规模的产业化临床应用。未来，随着相关技术的不断突破与产业体系的不断完善，3D 打印钛基复合材料将在康复辅具领域得到更广泛的应用，促进精准医疗背景下康复工程的创新发展。

基金项目

2024 年济宁医学院大学生创新创业训练计划项目：3D 打印钛基复合材料康复辅具工艺调控研究(cx2024136z)；济宁医学院实验教学和教学实验室建设研究项目：基于创新思维导向的医工融合类专业实验教学体系建设(SY2024002)；教育部供需对接就业育人项目：校企联动·竞赛赋能：康复工程专业复合型创新人才实践培养范式(2025062743932)。

参考文献

- [1] Zhuang, W., Wang, J., Wu, X., Chen, C., Xiao, W., Jiang, C., *et al.* (2026) Parsing and Prioritizing Users' Evolving Requirements with Large Language Models: A Case Study in Personalized Rehabilitation Assistive Devices Design. *Computers & Industrial Engineering*, **214**, Article ID: 111878. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.111878>
- [2] 林家旋, 黄斌, 陈钊润, 等. 人工智能在骨科康复辅具领域的应用进展[J]. 信息与电脑, 2026, 38(4): 58-60.
- [3] 蒋力维. 3D 打印在智能辅具中的应用进展与发展概况[J]. 科技与创新, 2025(19): 50-52, 56.
- [4] 张永涛, 刘汉源, 王昌, 程军, 石瑾, 王岚, 于振涛. 生物医用金属材料的研究应用现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 21-26.
- [5] 宁聪琴, 周玉. 医用钛合金的发展及研究现状[J]. 材料科学与工艺, 2002(1): 100-106.
- [6] 齐佳. 塑料在体育护具领域的应用[J]. 塑料助剂, 2022(1): 81-82, 86.
- [7] 白木, 周洁. 医学塑料市场发展综述[J]. 医疗保健器具(医疗器械版), 2003(9): 44-49.
- [8] 蔡庭玮, 沈薇, 贾绍华. 复合材料碳纤维在化工与医药领域的应用[J]. 化学与粘合, 2025, 47(2): 198-202, 208.
- [9] 钟萍. 医用碳/碳复合材料的研究进展[J]. 医学综述, 2014, 20(5): 855-857.
- [10] 任伊宾, 杨村, 梁勇. 新型生物医用金属材料的研究和进展[J]. 材料导报, 2002, 16(2): 12-15.
- [11] 朱正利. 高分子材料在医用领域中的应用研究及展望[J]. 上海轻工业, 2023(1): 135-137.
- [12] 王兴华. 外科人体解剖学视角下塑料植入物的研究进展[J]. 塑料工业, 2024, 52(7): 204.
- [13] 朱池磊. 颗粒增强钛基复合材料车削加工材料去除过程研究[D]: [硕士学位论文]. 盐城: 盐城工学院, 2024.

- [14] 白玲, 汪海风, 汪翠, 等. 医用硅橡胶的表面亲水改性和细胞相容性[J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43(4): 531-541, 588.
- [15] 丁梦, 宋凌杰, 栾世方. 载药 ZIF-8 对医用高分子材料表面生物膜的清除性能分析[J]. 分析化学, 2023, 51(11): 1835-1843.
- [16] 王磊. 有机硅材料在康复辅具中的应用[J]. 有机硅材料, 2020, 34(5): 52-56, 67.
- [17] 马丕波, 梅德轩. 生物医用纺织材料研究应用与进展[J]. 服装学报, 2022, 7(3): 189-195.
- [18] 马丽芳. 聚氨酯材料在康复辅具中的应用[C]//中国电子学会生物医学电子学分会, 中国生物医学工程学会生物医学测量分会, 中国生物医学工程学会生物信息与控制分会, 中国生物医学工程学会生物医学传感器技术分会. 中国生物医学工程进展——2007 中国生物医学工程联合学术年会论文集(下册). 北京: 国家康复辅具研究中心, 2007: 2.
- [19] 高楚寒, 吴文恒, 张亮. 高温钛合金及钛基复合材料增材制造技术研究现状[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(1): 55-62.
- [20] 杨宝, 王春锋, 张泽宇, 等. 钛基复合材料的研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 117-130.
- [21] 石川, 雷剑波, 周圣丰, 等. 连续纤维增强金属基复合材料研究进展及其激光熔覆[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 30-40.
- [22] 杨宇承, 潘宇, 路新, 等. 粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2020, 38(2): 150-158.
- [23] 李树丰, 王少迪, 潘登, 等. 增材制造硼化钛增强钛基复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(4): 1113-1139.
- [24] 冯俊, 姜中涛, 韩骐璘, . 不连续增强钛基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2020, 38(5): 391-398.
- [25] 脱锦鹏, 陈安琦, 姚富升, 等. 颗粒增强耐热钛基复合材料设计制备研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(8): 199-208.
- [26] 刘海波, 王成辉, 周茜, 等. 石墨烯在金属基复合材料中的应用研究与进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(24): 8-14, 20.
- [27] 郭成波, 邢伟越, 郭艳玲, 等. 激光增材制造金属基复合材料工艺研究进展[J]. 热加工工艺, 2026, 55(5): 64-72.
- [28] 钦兰云, 门继华, 赵朔, 等. TiB₂ 含量对选区激光熔化 TiB/Ti-6Al-4V 复合材料组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 55-64.
- [29] 王玉敏, 张国兴, 张旭, 等. 连续 SiC 纤维增强钛基复合材料研究进展[J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1153-1170.
- [30] 姜永亮, 冻瑞岚, 宋祥, 等. 金属基复合材料增材制造工艺研究进展与趋势[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(11): 52-76.
- [31] 郑增, 王联凤, 严彪. 3D 打印金属材料研究进展[J]. 上海有色金属, 2016, 37(1): 57-60.
- [32] 殷杰, 耿佳毅, 王康龙, 等. SiC 陶瓷的 3D 打印成形与致密化新进展[J]. 无机材料学报, 2025, 40(3): 245-255.
- [33] 张云龙, 王兆彬, 张唯一, 等. 增材制造钛合金在骨科中的应用研究进展[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版): 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/44.1251.T.20260213.1333.002>, 2026-03-13.
- [34] 吴小平, 徐卫, 刘永胜. 钛 3D 打印及其在生物医学植入物中的应用[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(6): 106-116, 123.
- [35] 师维, 汪勇. 陶瓷颗粒增强金属基复合材料的制备及应用[J]. 热加工工艺, 2024, 53(24): 17-21.
- [36] 杨彦安, 李鹤, 穆保霞. 陶瓷 3D 打印技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1600-1614.
- [37] 王守兴, 李伶, 毕鲁南, 等. 大壁厚 3D 打印 SiO₂ 陶瓷快速制备技术研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1943-1949.
- [38] 王群, 屈蕴韬, 张嫫, 等. 激光选区熔化生物医用 Ti-6Al-4V 合金的弯曲疲劳行为[J]. 焊接学报, 2024, 45(4): 57-64, 132.
- [39] 蒋军杰. 选区激光熔化成型医用 Ti-6Al-4V 合金的组织 and 性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [40] 李桂伟, 曹祺原, 王嘉庆, 等. 先进材料增材制造研究与发展[J]. 机械工程学报, 2026, 62(3): 15-45. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20260310.1056.002>
- [41] 于振涛, 张明华, 余森, 等. 中国医疗器械用钛合金材料研发、生产与应用现状分析[J]. 中国医疗器械信息, 2012, 18(7): 1-8.
- [42] 孙祁, 张一弛. 3D 打印技术及材料在假肢矫形器领域的应用[J]. 技术与市场, 2020, 27(10): 38-39.
- [43] 张超峰, 王耀, 施虹求. 高分子材料在假肢矫形器制作中的运用[J]. 塑料工业, 2025, 53(5): 211.
- [44] 孔鹏润, 都承斐, 孙亚龙, 等. 植入式假肢假体周围骨组织生物力学特征分析[J]. 中国康复医学杂志, 2025, 40(4):

592-596, 610.

- [45] 辛玉甫, 荣姗姗, 尤爱民, 等. 脑卒中偏瘫临床应用的支具材料: 种类及其生物相容性[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(30): 4887-4891.
- [46] 林志伟, 王应球, 郑群香. 不同材料矫形器的生物学性能[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(21): 3965-3968.
- [47] 张爱平, 刘羲, 刘志峰, 等. 基于 3D 打印的定制脊柱侧弯矫形器设计制造与舒适度评价[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(4): 518-525.
- [48] 宁天亮, 王坤, 王领彪, 等. 基于逆向工程和 3D 打印的踝足矫形器产品设计[J]. 塑料科技, 2024, 52(2): 106-111.
- [49] 张文毓. 生物医用金属材料研究现状与应用进展[J]. 金属世界, 2020(1): 21-27.