

· 综述 ·

DOI: 10.12464/j.issn.0253-9802.2024-0244

3D 打印技术在口腔修复与口腔种植中的应用现状

姚杰^{1, 2}, 廖健^{1, 2}✉

(1. 贵州医科大学口腔医学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州医科大学附属口腔医院修复种植科, 贵州 贵阳 550001)

【摘要】 随着科技的不断发展, 3D 打印技术在医疗领域得到了广泛应用。尤其在口腔修复与口腔种植领域, 3D 打印技术为患者提供了更准确、微创、快捷和个性化的解决方案。本综述探讨 3D 打印技术在口腔修复与种植学中的应用, 包括其原理、优势、应用范围以及未来的发展趋势, 旨在为 3D 打印技术的临床应用提供参考。

【关键词】 3D 打印技术; 可摘局部义齿; 种植义齿; 导板

Application status of 3D printing technology in dental prosthetics and dental implantology

YAO Jie^{1, 2}, LIAO Jian^{1, 2}✉

(1. School of Stomatology, Guizhou Medical University, Guiyang 550001, China; 2. Department of Oral Prosthodontics and Implants, Affiliated Stomatological Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang 550001, China)

Corresponding author: LIAO Jian, E-mail: 7860552@qq.com

【Abstract】 With the continuous development of science and technology, 3D printing technology has been widely used in the medical field. Especially in the field of dental prosthetics and implants, 3D printing technology provides patients with more accurate, minimally invasive, fast and personalized solutions. This review discussed the application of 3D printing technology in oral prosthesis implantation, including its principle, advantages, application scope and future development trend, aiming to provide a reference for the clinical use of 3D printing technology.

【Key words】 3D printing technology; Removable partial denture; Implant denture; Guide plate

3 维 (three-dimensional, 3D) 打印技术又称增材制造技术, 近年来以其数字化、个性化和精准化的特点在口腔医学研究领域逐渐成为一项核心技术, 为口腔数字化发展提供了强大动力, 并且随着计算机辅助设计 / 制造技术的普及, 在口腔医学中的应用日趋成熟。目前 3D 打印技术主要包括熔融沉积成型技术、立体光固化成型技术、粉末床熔融技术、定向能量沉积技术、黏结剂喷射打印 3D 技术、喷墨打印技术和分层实体制造技术^[1]。本综述探讨 3D 打印技术在口腔修复与种植中的应用, 包括其原理、优势、应用范围、最新研究进展以及存在的不足及展望, 旨在为 3D 打印技术的临床应用提供参考。

1 3D 打印技术的原理

3D 打印技术的核心理念是“离散堆积”, 其原理是先利用计算机辅助设计建立数字化模型, 得到数字化 3D 图像的数据, 再将复杂的 3D 立体数据优化处理后, 对其进行分割, 将 3D 图层逐层分割成无数个二维图层, 再将离散出来的二维图层进行堆积叠加, 以此复刻出一个与 3D 实体一致的模型, 最后将得到的 3D 模型数据转化成能被 3D 打印设备识别的立体光刻技术 (stereo lithography, STL) 文件格式, STL 是一种描述 3D 物体表面几何形状的计算机文件。3D 打印技术的过程与减材制造相反, 是从零开始, 将材料逐点进行沉积,

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合基础 -ZK [2023] 重点 037)

作者简介: 姚杰, 住院医师, 研究方向: 口腔修复与口腔种植学方向, E-mail: 2173455240@qq.com; 廖健, 主任医师, 通信作者, 研究方向: 咬合重建、各种复杂骨增量及腭修复修复, E-mail: 7860552@qq.com

最终叠加成 3D 实体,极大地减少了材料的浪费,缩短了制造时间。目前 3D 打印技术最常用的是固体打印材料,主要包括生物不可降解材料与生物可降解材料^[2],如光固化树脂、金属材料、陶瓷材料、聚醚醚酮 (polyether ether ketone, PEEK) 材料及其他聚合物材料等^[3-4]。

2 3D 打印技术在口腔修复中的基础应用

2.1 3D 打印技术应用于制作可摘局部义齿支架

可摘局部义齿适应症广泛、经济实惠,目前仍是牙缺失的重要修复方式。方便、快捷、高效的义齿支架制作方法对口腔修复学意义重大,特别是对于多颗牙缺失伴有牙槽嵴严重吸收的患者,支架制作是其进行可摘局部义齿修复的难点和重点,而 3D 打印技术的应用使义齿支架的制作变得更加便捷快速。3D 打印支架首先通过扫描传统印模技术灌注得到的石膏模型获得口内数据,再将数据应用于计算机设计软件进行支架设计,设计完成之后进行支架的 3D 打印。通过各类检验技术及临床试验发现,利用 3D 打印技术制作的义齿支架在许多方面均表现优越。曾河清等^[5]应用选择性激光熔融技术 (selective laser melting, SLM) 制作可摘局部义齿支架,患者的主观感受、满意度以及支架的固位性、适合性和稳定性均优于应用传统石蜡铸造技术。传统义齿支架制作全程手工操作,工序较为复杂,各步骤之间的操作人员不同导致临床误差也相应增加,成品支架的临床匹配性有所欠缺, Ye 等^[6]采用 3D 拟合法测量了 SLM 制作的义齿支架与传统铸造支架就位后殆支托与牙体组织的间隙,发现铸造支架的间隙为 $(108 \pm 84) \mu\text{m}$,稍小于 SLM 义齿支架 $(174 \pm 117) \mu\text{m}$ 。一项对义齿支架的机械强度检测报告显示 3D 打印钴铬合金抗拉强度为 $(997 \pm 14) \text{MPa}$,屈服强度为 $(996.7 \pm 16.8) \text{MPa}$,延伸率为 $(20.86\% \pm 1.5\%)$,维氏硬度为 $(345 \pm 3.9) \text{HV}$,其机械性能满足口腔可摘局部义齿支架制作的要求^[7]。

2.2 3D 打印技术制作牙冠修复体

龋病和牙周炎等是造成牙体缺损、牙齿缺失的常见原因,临床上常采用冠、桥的修复治疗方法。传统修复中,医师通常需要根据预备后的剩余牙体组织形态,手工制取模型并记录咬殆关系,不仅

费时,且手工程序越多,其精准度也越难以保证。3D 打印技术可以根据患者的 CT 数据或口腔扫描数据,生成 3D 模型并对冠修复体做出精密调整。刘健等^[8]研究显示,接受 3D 打印技术联合口内扫描技术进行单颗牙冠修复的牙体缺损患者,对修复方法的满意度、修复后的焦虑评分和生活质量均优于接受传统固定修复的患者。冠修复体边缘与基牙的良好密合是修复成功的关键因素,王伟娜等^[9]通过“硅橡胶法”和 3D 偏差分析软件 Geomagic Qualify 对 10 例 3D 打印制作的氧化锆全瓷单冠的冠边缘及内部的密合性进行测量,结果显示全瓷冠的边缘及内部密合性分别为 $(89 \pm 19) \mu\text{m}$ 、 $(87 \pm 16) \mu\text{m}$,显著小于目前临床上可接受的 $120 \mu\text{m}$ 冠边缘合适性,完全能达到临床应用的标准。

3D 打印技术除用于终冠的制作外,在前牙美学修复中也应用广泛。美学蜡型是口腔美学修复的一项具有重要意义的诊疗手段,通过制作蜡型,在其基础上进行模拟设计,能很好地将最终修复效果呈现在患者眼前^[10]。运用 3D 打印技术将术前对患者的美学分析和设计的数字化结果转化为实体,减少了翻制模型及手工制作蜡型时造成的目标修复体空间的传递误差,有效提高诊疗效率和患者舒适度^[11]。

2.3 3D 打印技术制作全口义齿

全口义齿因其复杂的颌位关系、咬殆记录以及人工牙排列等导致其制作敏感性较高,使得需要反复地调改,甚至重新制作。获得具有良好的生物相容性和物理性能的基托是义齿制作成功的关键因素。目前制作义齿基托最常用的材料是聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA),但 PMMA 浸出的甲基丙烯酸甲酯 (methyl methacrylate, MMA) 单体会造成黏膜刺激或过敏,使其对人体组织具有细胞毒性^[12]。传统切削制造的基托很容易造成单体残留,而随着 3D 打印技术与其他数字化技术的结合,通过增材制造的方法制作出的基托很好地避免了单体残留的问题。Srinivasan 等^[13]采用高效液相色谱法检测不同冲洗周期下切削全口义齿和 3D 打印全口义齿单体的洗脱浓度,结果显示,3D 打印义齿的 MMA 单体浓度显著低于切削所得到的义齿,且还可以通过涂敷额外保护层进一步减少 3D 打印义齿中 MMA 的含量。

为保证无牙颌功能性印模的精准度,临床上

通常需要制作个别托盘,但传统个别托盘的制作需要取初印模、灌注石膏模型、修整模型和画线等复杂步骤,极大地增加了印模与患者口内无牙颌之间误差,并且延长了患者就诊时间间隔。而利用数字化技术仅需对印模进行3D扫描,通过计算机设计后再利用3D打印技术便可快速得到个性化托盘实体^[14],大大简化了制作流程,提高了修复效率。使用不同印模材料时,托盘与组织面之间预留的最佳空隙有所不同。一般情况下,2 mm的空间适合于藻酸盐,硅橡胶等流动性更好的材料所需空间应该更小^[15]。陈虎等^[16]对无牙颌初印模石膏模型进行扫描,运用计算机设计并利用3D打印技术打印出个别托盘,其打印的上颌个别托盘内表面与石膏模型表面平均间隙为 (1.98 ± 0.40) mm,明显小于传统方法制作的个别托盘。

此外,实现义齿良好的边缘封闭,保证全口义齿在无牙颌内稳定使用,是全口义齿修复成功的另一重要因素。Charoenphol等^[17]分析切削和3D打印义齿基托后发现,在主要应力承担区域切削得到的义齿基托拟合度要优于3D打印基托,然而在边缘封闭区,3D打印的基托更为准确。在色彩稳定性方面,3D打印义齿表现得较为优越。有研究者对同一组患者使用传统热聚合PMMA全口义齿和3D打印义齿各3个月进行了调查,结果显示,传统义齿的色彩变化要比3D打印义齿更为明显,患者满意度不如3D打印义齿^[18]。但在基托粗糙度方面,3D打印义齿尚有不足,将3种不同制作工艺(增材制造、减材制造和传统热聚合法)制作的义齿基托分别放置在两种常用义齿清洁剂中浸泡^[19],结果显示浸泡前后表面粗糙度变化量最大的为3D打印义齿基托。

3 3D打印技术在口腔种植中的应用

3.1 3D打印种植外科导板

随着我国种植牙集采政策的落地,种植修复目前已成为缺牙患者首要考虑的修复方式,而种植修复的效果与种植体的植入位置、角度、精准度及深度等密切相关。临床上牙列缺损患者大多缺牙时间长,缺牙部位解剖结构变化,患者口内临床表现可与实际不符,“自由手”术者难以精准把控种植体植入方向与深度,容易发生穿孔。有研究表明,种植体位置不准确是近半数种植体周围炎的风险因素^[20]。导板技术的出现和发展可

降低上述风险,使种植精准度及成功率大幅上升。导板技术最初多应用于外科手术当中,近年来逐渐运用于口腔种植手术中。传统种植导板的制作方法复杂、耗时^[21]:制取患者口腔印模,灌制硬石膏模型并修整模型,在石膏模型缺牙部位上排列人工牙,然后翻制出2个模型,充填倒凹后,将模型放置于抽真空压膜机内,利用透明树脂薄膜压制2个导板,其中一个导板用于确定种植体的植入位置和方向,另一个导板与前一个导板保持相同的方向、角度和位置钻孔,并在导板颊侧钻孔埋入牙胶,作为放射性导板;运用UX6.0软件分别绘制不同内外径、不同长度的导向管,以STL格式输入3D打印机,制作相同内径的导向管实体,将不同内径的导向管进行包埋、铸造成金属导向管,随后将导管插入传统导板上并用流动树脂固定,制作出传统种植导板。伴随着3D打印技术的成熟,运用其制作的口腔种植外科全程导板在种植手术中的使用率日益增高。对比之下,3D打印种植外科导板的制作显得更加简便、高效^[22]:术前对患者颌面部行CBCT数据采集,对上下颌牙列和颌骨进行3D重建,结合患者牙列缺损的实际情况,在计算机软件上进行虚拟种植体尺寸设计和放置,完成种植体植入路径、角度及深度的模拟,最终完成种植导板的设计。将设计完成的数字化导板数据以STL文件格式输入3D打印机,在生成支持文件后便可制作3D打印种植外科导板。

通过设计、制作种植导板,可提前对种植手术进行模拟和规划,在术中可很好地避免损伤神经、血管、上颌窦底。3D打印技术制作的导板为全程导板,包括运用导板进行定位先锋钻、种植窝全程预备(从先锋钻到扩孔钻,以及必要时的颈部成型钻及攻丝钻)和引导种植体植入,可使术者更加精准地实施手术,显著提高手术成功率与安全性。岳旭阳等^[23]分别使用常规导板与3D打印导板对两组患者进行种植修复术,结果显示运用3D打印导板手术的患者种植体植入精准度明显高于常规导板,后期修复后咬合力更高,龈沟液内炎性细胞因子也更少。3D打印导板的优势在于可以在术前于计算机上模拟种植体植入位点、角度和深度等,提供精确的手术规划和导航,马静^[24]研究发现,3D打印导板相较于常规种植能显著提高上前牙种植的位置精准度:顶端、根端垂直向误差和水平误差分别为 (0.62 ± 0.28) mm vs. (1.59 ± 0.67) mm, $(0.49 \pm$

0.23) mm vs. (1.65 ± 0.72) mm, (0.53 ± 0.27) mm vs. (1.84 ± 0.75) mm, (0.58 ± 0.31) mm vs. (1.82 ± 0.66) mm。李兵等^[25]采用传统种植导板制作方法和 3D 打印技术分别制作 2 种导板,在 2 组缺牙患者缺牙区引入种植体,结果显示,使用传统导板手术组的颈部偏离距离(颊舌向、近远中向、垂直向)以及根尖部偏离距离(颊舌向、近远中向、垂直向)均在 1 mm 以上,偏离角度(颊舌向、近远中向)在 4°以上,而运用 3D 打印个性化导板手术组的颈部偏离距离以及根尖部偏离距离均在 1 mm 以下,偏离角度低于 3°,3D 打印种植外科导板的应用实现了更高的种植精度和成功率。

3.2 3D 打印个性化钛网

牙周炎、外伤、囊肿、牙缺失等常导致牙槽骨的丧失,增加种植区的牙槽骨骨量是提高种植成功率的关键。口腔种植中的骨增量技术为骨条件不足的患者提供了种植可能,并且随着 3D 打印技术的应用,骨增量的成功率也日益上升。保证骨移植材料在术区稳定的关键在于生物屏障膜的应用。其中,钛网因其良好的机械性能、能保持新骨形成的空间、抗腐蚀能力强、良好的生物相容性等优点,已经成为引导性骨再生(guided bone regeneration, GBR)术中优选屏障膜。随着数字化 3D 技术在医学领域应用,3D 打印个性化钛网的使用使 GBR 成功率得到了进一步提升。有研究表明在骨移植时是多孔结构而非材料的种类赋予材料生物活性^[26]。一般钛网孔形态有圆形、三角形和六角形等孔隙结构,厚度在 0.1~0.6 mm 之间,但简单的孔隙结构容易造成应力集中,使钛网变形甚至断裂,影响植骨效果。3D 打印个性化钛网可塑性强,可以通过计算机辅助设计/制造技术预先设计预览,根据不同患者骨缺损状况对钛网的孔形态、厚度以及孔径等参数进行个性化调整^[27],更好地贴合患者颌骨解剖形态,避免了传统钛网术中弯制时导致孔隙结构改变的问题。通过对患者术后植骨区组织学分析发现,3D 打印个性化钛网下新形成的组织矿化程度高,组织结构良好,可以达到较为理想的成骨效果^[26]。

近年来,3D 打印技术结合仿生学设计成为各类产品设计最感兴趣的方向之一,其中,自然界中的蜘蛛网结构引起众多学者关注。通过 3D 打印技术联合数字化模拟蜘蛛网结构制作出的 3D 打印个性化钛网可以很好地避免因应力集中而引起的钛网局部断裂。张亮等^[28]通过有限元方法分析对

比仿生蛛网孔隙结构与常规孔隙结构的 3D 打印个性化钛网的应力值,发现仿生蛛网孔隙结构钛网受到的最大应力值低于常规孔隙结构钛网,可以很好地分散应力。

目前 Terheyden 分类 2/4-4/4 型骨缺损是 3D 打印个性化钛网的主要适应症^[29-30]。不同类型骨缺损对应用个性化钛网的反应略有不同,但最终成骨效果主要与其术后是否发生钛网暴露有关。钛网暴露是应用钛网屏障膜时出现的最常见并发症,相比传统钛网,3D 打印个性化钛网与患者颌骨解剖形态更加拟合,发生钛网暴露的概率更低。郭雪琪等^[31]对 15 例应用 3D 打印个性钛网用于修复严重牙槽骨缺损的患者进行观察研究,仅发现 1 例出现钛网暴露,术后感染率及钛网暴露率较低,患者主观满意度高,具有良好的短期临床效果。因此,在运用 3D 打印个性化钛网的情况下,术中再通过做好骨膜减张和无张力缝合创口,钛网暴露率会进一步降低,植骨效果将会更好。

3.3 3D 打印种植体

口腔种植术成功与否的关键在于种植体能否与周围骨组织发生骨结合。加强种植体表面的生物活性、抗感染能力和骨结合能力以及负荷能力,可以有效提高种植成功率。牙种植体材料一般有纯钛、钛合金和陶瓷类 3 种,目前应用于 3D 打印种植体材料最广泛的是 Ti6Al4V^[32]。3D 打印技术的成熟使种植材料各方面性能都得到空前提高,并且可以实现打印材料选择多样化。3D 打印可以改变种植体表面特性,构建微/纳米形貌,成骨过程中有更多的新骨沉积在其表面,实现快速骨整合^[33]。体内外实验表明,3D 打印的钛合金种植体表面的粗糙和良好亲水性有利于骨髓间充质干细胞的黏附和增殖,促进成骨作用,达到早期骨整合的效果^[34]。在种植体材料、性能得到提高后,越来越多的患者对种植治疗周期的缩短有了更高的期待。随着种植学的发展,即刻种植因其治疗周期短、能尽早恢复美观与功能而被广泛应用于临床,但即刻拔除天然牙所遗留的拔牙窝形态不规则,无与之匹配的常规成品种植体,强行置入常规种植体无法获得初期稳定性。因此,3D 打印个性化根形种植体逐渐被应用于即刻种植修复中。3D 打印个性化种植体因其外形与天然牙类似,植入时无需制备窝洞,3D 打印技术还为其增设多孔结构,使之成为许多即刻种植的良好种植体选择,郭芳等^[35]运用有限元分析方法对 3D 打印的多孔根

形种植体进行生物力学分析,结果表明应力分布主要在植体实体和多孔结构,力值均小于其屈服强度,理论上植体不会出现折裂。

4 3D 打印技术在口腔修复与口腔种植中的其他应用

3D 打印技术在生物活性材料的制作方面亦十分重要。对于骨量不足、骨缺损的患者进行骨增量时,除上述钛网的应用外,骨移植材料的生物活性是骨增量成功的另一大重要因素。传统骨修复材料如聚醚醚酮、钛金属、碳酸钙等常存在生物活性不足的缺点,最终导致口腔种植中骨增量效果不佳。近年来生物活性陶瓷因其良好生物活性和力学性能而被广泛应用于骨修复中,包括羟基磷灰石、 β -磷酸三钙和生物活性玻璃^[36]。天然骨主要由羟基磷灰石和 I 型胶原组成,有机成分与无机成分共同促进了骨组织的生物活性与机械性能^[37]。传统制作方法难以将有机物与无机物良好地结合,而 3D 打印技术可以在计算机辅助设计下,控制材料孔隙率与孔径结构,实现细胞的迁移,仿生制备出生物活性良好的骨修复材料^[38]。随着 3D 打印技术的迅速发展,未来将实现更多高生物活性有机物与无机物的聚合,制备出的骨修复材料将比传统制作工艺制作出的材料具有更高的生物相容性和骨传导能力,并更好地运用到口腔骨修复当中。

除在临床操作与实施方面,3D 打印技术已经被运用到手术模拟与教育当中。实验发现,在经过 3D 打印模型模拟训练后,学习者在理解手术程序和种植学知识、理解微创拔牙、确认手术模板的准确性、导板和手术盒的使用方面取得了较好的结果^[39]。同时,3D 打印的模型以及模拟手术效果还可用于患者的术前教育^[40],向患者展示手术方案,让患者更直观地了解手术过程和可能的结果,提高患者对手术的理解和信心,这对促进良好的医患沟通、建立新型医患关系十分有利。

5 3D 打印技术的最新研究进展

5.1 高速、高分辨率 3D 打印技术

虽然相比传统铸造等方式 3D 激光打印技术已经极大地提升了产品制作速度,但在现今飞速发展的科技环境下仍面临着打印速度和分辨率的挑

战。德国卡尔斯鲁厄理工学院 Kiefer 团队研发了一种新型高通量多焦点 3D 激光打印系统^[41],该系统通过衍射光学元件和多透镜阵列相结合的方式,利用飞秒脉冲激光同时激发光敏材料中的多个光子,引发局部光聚合反应,从而在树脂中形成超精细 3D 结构,实现了大视场、高速、高分辨率的打印。该系统的研发,为口腔修复体及种植体的快速、大规模生产提供了可能。

5.2 拓扑优化算法在 3D 打印中的应用

拓扑优化算法是一种利用数学拓扑学理论和计算机科学中的算法及软件,寻找在特定边界条件和约束条件下,使得某些特定物理量的值最小或最大的最优几何形状(或分布)的方法。相比传统制造,3D 打印技术生产制造产品的成本仍然较高,如何在保证不损害打印产品表面质量与性能的前提下,降低生产成本,对今后的 3D 打印至关重要。将拓扑优化算法运用到 3D 打印当中,可以实现打印产品轻量化、打印出特定性能材料 and 多材料结构、多层级结构、多功能结构材料^[42]。拓扑优化算法还能减少打印过程中材料的使用量并提高结构的稳定性,为 3D 打印技术在口腔修复与口腔种植领域的应用提供了新的思路。

5.3 生物 3D 打印神经化构建体

组织再生是一个由神经、血管和免疫系统共同参与的复杂过程,但目前的组织修复工程尚仅限于恢复细胞功能,忽略了神经在组织修复中的重要作用。Zhang 等^[43]通过 3D 生物打印技术制备了锂钙硅酸盐/神经干细胞的神神经构建体,证实了这种基于无机生物材料/神经干细胞生物打印的神神经化构建体能够很好地促进神经干细胞的分化,从而引起组织的更佳修复。这为促进口腔组织的再生和功能恢复提供了潜在策略。

5.4 人工智能与 3D 打印的结合

随着 3D 打印技术的发展,人工智能与 3D 打印技术的结合势不可挡。人工智能处理复杂数据集,进行复杂计算,且可从以往的设计经验中学习,为 3D 打印流程设计出最优方案。在 3D 打印初对修复患者原始影像数据进行处理的过程中,传统医学图像的分割和处理方法往往耗时且出错概率较高^[44],人工智能引入了自动分割算法与增强工具,可显著减少手动处理数据的出错率,极大提高 3D 打印的速率与质量^[45]。通过人工智能模拟算法加强对神经网络的训练,以计算机视觉观察 3D 打印过程,可以实现实时调整 3D 打印过

程中处理材料的错误^[46]。孙玉春等^[47]设计并通过专利转化出了中国首套复杂义齿人工智能 3D 设计商用软件、义齿专用 3D 打印工艺及力学,初步实现了用人工智能替代专家经验、用精准 3D 打印替代专家手法操作技巧,修复过程快、简、准,同时实现了戴入修复体后的个性功能美学仿生匹配。在此类人工智能技术及软件的应用下,可快速提高基层和年轻医师的相关技术水平,提高患者满意度。因此,利用人工智能出色的优化设计能力,可探索利用人工智能和机器学习技术来优化 3D 打印过程,强化学习使流程细化,为口腔修复与口腔种植领域带来更高的精度和更短的治疗时间。

6 3D 打印技术在口腔修复与口腔种植应用中的不足

3D 打印技术在口腔修复与口腔种植领域中具有巨大的潜力和应用前景。通过实现个性化定制、提高治疗效果、缩短治疗周期和减少人为误差等优势。但 3D 打印技术尚存在不足,首先,3D 打印技术价格较为昂贵,目前并不适合大批量生产。其次,3D 打印可用的材料种类有限,主要局限于某些特定类型的塑料、金属和陶瓷,对于一些特殊需求或复杂材料的打印显得较为困难。针对上述问题,希望通过科技的不断发展,增加 3D 打印技术的普及率,研发出更多可打印的材料,从而降低 3D 打印成本。此外,目前数字化全口义齿口内扫描精度不够,尚不能直接准确扫描印模,无牙颌口腔前庭和口底黏膜转折位置、各功能区组织的可让性等无法通过扫描准确获知^[48],3D 打印技术在全口义齿修复方面的应用有待进一步探索。

7 结语与展望

3D 打印技术凭借其数字化、个性化和精准化的特点在口腔修复学与口腔种植学各领域发挥了重要作用,提供了许多治疗新思路。随着技术和材料的不断创新,3D 打印技术有望在口腔修复与口腔种植领域中发挥更大的作用:①出现更加适用于口腔修复与口腔种植的新型材料,使用的材料也将更加安全和舒适,这些材料将具有更好的生物相容性,能够减少患者的不适感,提高修复体的使用寿命;②将生物材料与 3D 打印技术相结合,实现功能性修复体的制作,如制作出可能具

有自愈合功能、释放药物的修复体等,为患者带来更好的口腔健康和生活质量。期望在未来的科学领域里实现 3D 打印技术与各学科的跨学科合作与技术研发,推动口腔医学领域的持续发展。

利益冲突声明: 本研究未受到企业、公司等第三方资助,不存在潜在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] 程玮璐,刘英慧. 增材制造技术的临床应用[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(17): 2782-2788. DOI: 10.12307/2024.447. CHENG W L, LIU Y H. Clinical application of additive manufacturing technology[J]. Chin J Tissue Eng Res, 2024, 28(17): 2782-2788. DOI: 10.12307/2024.447.
- [2] 张犇,郑天宜,史杰中,等. 3D 打印技术在组织修复中的应用进展[J]. 石油化工, 2023, 52(7): 1007-1012. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2023.07.017. ZHANG B, ZHENG T Y, SHI J Z, et al. Progress in application of 3D printing technology for tissue repair[J]. Petrochem Technol, 2023, 52(7): 1007-1012. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2023.07.017.
- [3] 白石柱,张生睿,龚旭,等. 3D 打印及其在口腔医学中的应用(三): 常用材料[J]. 实用口腔医学杂志, 2022, 38(4): 546-552. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2022.04.025. BAI S Z, ZHANG S R, GONG X, et al. 3D printing and its application in dental medicine (3) -commonly used materials[J]. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2022.04.025.
- [4] 米莲,柏娜. 3D 打印聚醚醚酮及复合材料在口腔医学领域的研究进展[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2022, 43(6): 616-622, 642. DOI: 10.11778/j.jdx.20220175. MI L, BAI N. Research progress of 3D printed PEEK and its composites in the field of stomatology (J Jinan Univ (Nat Sci & Med Ed)), 2022, 43(6): 616-622, 642. DOI: 10.11778/j.jdx.20220175.
- [5] 曾河清,牟荣,余跃. SLM 3D 打印技术与失蜡铸造技术在可摘局部义齿支架制作中的应用[J]. 海南医学, 2024, 35(8): 1120-1123. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6350.2024.08.012. ZENG H Q, MOU R, YU Y. Application effect of SLM 3D printing technology and lost wax casting technology in the production of removable partial denture brackets[J]. Hainan Med J, 2024, 35(8): 1120-1123. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6350.2024.08.012.
- [6] YE H, NING J, LI M, et al. Preliminary clinical application of removable partial denture frameworks fabricated using computer-aided design and rapid prototyping techniques[J]. Int J Prosthodont, 2017, 30(4): 348-353. DOI: 10.11607/ijp.5270.
- [7] 张倩,吴文孟,宁宝麟,等. 3D 打印钴铬合金应用于可摘局部义齿支架制作的机械性能评价[J/OL]. 全科口腔医学电子杂志, 2016, 3(1): 87-89. DOI: 10.16269/j.cnki.cn11-9337/r.2016.01.054.

- ZHANG Q, WU W M, NING B L, et al. Evaluation of 3D printing Co-Cr alloy's mechanical properties used in removable partial denture[J/OL]. Gen J Stomatol, 2016, 3(1): 87-89. DOI: 10.16269/j.cnki.cn11-9337/r.2016.01.054.
- [8] 刘健, 王琦, 袁磊, 等. 口内扫描仪结合 3D 打印技术单冠固定修复效果[J]. 中外医疗, 2021, 40(24): 65-67, 71. DOI: 10.16662/j.cnki.1674-0742.2021.24.065.
- LIU J, WANG Q, YUAN L, et al. Intraoral scanner combined with 3D printing technology single crown fixed repair effect[J]. China Foreign Med Treat, 2021, 40(24): 65-67, 71. DOI: 10.16662/j.cnki.1674-0742.2021.24.065.
- [9] 王伟娜, 于海, 刘一帆, 等. 3D 打印氧化锆全瓷冠的密合性研究[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2018, 28(4): 209-213. DOI: 10.15956/j.cnki.chin.j.conserv.dent.2018.04.0004.
- WANG W N, YU H, LIU Y F, et al. Evaluation of the fitness of zirconia crowns fabricated with 3D printing[J]. Chin J Conserv Dent, 2018, 28(4): 209-213. DOI: 10.15956/j.cnki.chin.j.conserv.dent.2018.04.004.
- [10] 王鹏, 李大军, 刘建彰. 上颌前牙宽度、前牙弓周长与前牙弓深度的相关性研究[J]. 北京大学学报(医学版), 2020, 52(1): 124-128. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167X.2020.01.020.
- WANG P, LI D J, LIU J Z. Analysis of the relationship among maxillary anterior teeth width, anterior arch perimeter and anterior segment depth[J]. J Peking Univ (Health Sci), 2020, 52(1): 124-128. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167X.2020.01.020.
- [11] 张倩倩, 陈昕, 赵雨薇, 等. 3D 打印在口腔美学修复中的应用[J]. 华西口腔医学杂志, 2018, 36(6): 656-661. DOI: 10.7518/hxkq.2018.06.014
- ZHANG Q Q, CHEN X, ZHAO Y W, et al. Application of 3D printing in aesthetic oral rehabilitation[J]. West China J Stomatol, 2018, 36(6): 656-661. DOI: 10.7518/hxkq.2018.06.014
- [12] GAUTAM R, SINGH R D, SHARMA V P, et al. Biocompatibility of polymethylmethacrylate resins used in dentistry[J]. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2012, 100(5): 1444-1450. DOI: 10.1002/jbm.b.32673.
- [13] SRINIVASAN M, CHIEN E C, KALBERER N, et al. Analysis of the residual monomer content in milled and 3D-printed removable CAD-CAM complete dentures: an in vitro study[J]. J Dent, 2022, 120: 104094. DOI: 10.1016/j.jdent.2022.104094.
- [14] 魏菱, 陈虎, 周永胜, 等. 数字化全口义齿个别托盘制作与临床应用时间评价[J]. 北京大学学报(医学版), 2017, 49(1): 86-91. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2017.01.015.
- WEI L, CHEN H, ZHOU Y S, et al. Evaluation of production and clinical working time of computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) custom trays for complete denture[J]. J Peking Univ (Health Sci), 2017, 49(1): 86-91. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2017.01.015.
- [15] BASKER R M, DAVENPORT J C, TOMLIN H R. Prosthetic treatment of the edentulous patient[M]. London: Palgrave Macmillan UK, 1992. DOI: 10.1007/978-1-349-21869-1.
- [16] 陈虎, 赵甜, 王勇, 等. 基于初印模三维扫描的无牙颌上颌个性化托盘计算机辅助设计及三维打印[J]. 北京大学学报(医学版), 2016, 48(5): 900-904. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2016.05.028.
- CHEN H, ZHAO T, WANG Y, et al. Computer aided design and 3-dimensional printing for the production of custom trays of maxillary edentulous jaws based on 3-dimensional scan of primary impression[J]. J Peking Univ (Health Sci), 2016, 48(5): 900-904. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2016.05.028.
- [17] CHAROENPHOL K, PEAMPRING C. Fit accuracy of complete denture base fabricated by CAD/CAM milling and 3D-printing methods[J]. Eur J Dent, 2023, 17(3): 889-894. DOI: 10.1055/s-0042-1757211.
- [18] EL NAGGAR S M, HELAL E, KHALIL M F, et al. Color stability of heat polymerized complete dentures and 3D printed CAD/CAM dentures[J]. J Arab Soc Med Res, 2022, 17(2): 139-144. DOI: 10.4103/jasmr.jasmr_20_22.
- [19] JAIN S, ADAWI H. Effect of effervescent denture cleansers on 3D surface roughness of conventional heat polymerized, subtractively, and additively manufactured denture base resins: an in vitro study[J]. J Prosthodont, 2023, 32(3): 244-252. DOI: 10.1111/jopr.13525.
- [20] CANULLO L, TALLARICO M, RADOVANOVIC S, et al. Distinguishing predictive profiles for patient-based risk assessment and diagnostics of plaque induced, surgically and prosthetically triggered peri-implantitis[J]. Clin Oral Implants Res, 2016, 27(10): 1243-1250. DOI: 10.1111/clr.12738.
- [21] American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology, TYNDALL D A, BROOKS S L. Selection criteria for dental implant site imaging: a position paper of the American academy of oral and maxillofacial radiology[J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology, 2000, 89(5): 630-637. DOI: 10.1067/moe.2000.106336.
- [22] GOSS A, BARTOLD M, SAMBROOK P, et al. The nature and frequency of bisphosphonate-associated osteonecrosis of the jaws in dental implant patients: a South Australian case series[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2010, 68(2): 337-343. DOI: 10.1016/j.joms.2009.09.037.
- [23] 岳旭阳, 许东亮, 郑翔. 3D 打印导板对牙列缺损种植修复患者植入效果观察[J]. 四川生理科学杂志, 2023, 45(4): 605-608.
- YUE X Y, XU D L, ZHENG X. Effect of 3D printing guide plate on implant repair of dentition defect[J]. Sichuan J Physiol Sci, 2023, 45(4): 605-608.
- [24] 马静. 3D 打印数字化外科导板在上前牙种植中的应用效果分析[J]. 中国现代药物应用, 2023, 17(17): 56-58. DOI: 10.14164/j.cnki.cn11-5581/r.2023.17.014.
- MA J. Application effect analysis of 3D printing of dental implant surgical guides in implantation of upper anterior teeth[J]. Chin J Mod Drug Appl, 2023, 17(17): 56-58. DOI: 10.14164/j.cnki.cn11-5581/r.2023.17.014.
- [25] 李兵, 李继东, 石若梅. 3D 打印技术对口腔种植牙精度、种植成功率及患者满意度的影响研究[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31(4): 31-33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3257.2024.4.014.
- LI B, LI J D, SHI R M. The effect of 3D printing technology

- on dental implant accuracy, implant success rate and patient satisfaction[J]. J Rare Uncommon Dis, 2024, 31 (4): 31-33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3257.2024.4.014.
- [26] DELLAVIA C, CANCIANI E, PELLEGRINI G, et al. Histological assessment of mandibular bone tissue after guided bone regeneration with customized computer-aided design/computer-assisted manufacture titanium mesh in humans: a cohort study[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2021, 23 (4): 600-611. DOI: 10.1111/cid.13025.
- [27] XIE Y, LI S, ZHANG T, et al. Titanium mesh for bone augmentation in oral implantology: current application and progress[J]. Int J Oral Sci, 2020, 12 (1): 37. DOI: 10.1038/s41368-020-00107-z.
- [28] 张亮, 韩泽奎, 臧旖欣, 等. 仿生蛛网孔隙结构 3D 打印个性化钛网设计及三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27 (30): 4796-4801. DOI: 10.12307/2023.544. ZHANG L, HAN Z K, ZANG Y X, et al. Design and three-dimensional finite element analysis of 3D printed individualized titanium mesh with a bionic porous spider web-shaped structure[J]. Chin J Tissue Eng Res, 2023, 27 (30): 4796-4801. DOI: 10.12307/2023.544.
- [29] 卢卡·科达罗, 亨德里克·特海. 国际口腔种植学会 (ITI) 口腔种植临床指南第七卷, 口腔种植的牙槽嵴骨增量程序: 分阶段方案[M]. 宿玉成, 译. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2016. Cordaro L, Terheyden H. International Team for Implantology (ITI) Clinical Guidelines for Dental Implantation Volume 7: Ridge Augmentation Procedures: A Staged Approach[M]. Translated by SU Y C. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2016.
- [30] 妥文婷, 张健, 王艳颖. 3D 打印个性化钛网在口腔种植骨增量中的研究进展[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2023, 24 (6): 455-459. DOI: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2023.6.010. TUO W T, ZHANG J, WANG Y Y. Research progress in customized 3D-printed titanium mesh for bone augmentation in oral implantology[J]. Chin J Prosthodont, 2023, 24 (6): 455-459. DOI: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2023.6.010.
- [31] 郭雪琪, 陈韵欣, 杨岚, 等. 3D 打印个性化钛网修复严重牙槽骨缺损的短期效果观察[J]. 中国口腔种植学杂志, 2021, 26 (6): 368-375. DOI: 10.12337/zgkqzzxxz.2021.12.006. GUO X Q, CHEN Y X, YANG L, et al. Short-term observation of 3D-printing individualized titanium mesh in restoration of severe alveolar bone defects[J]. Chin J Oral Implantol, 2021, 26 (6): 368-375. DOI: 10.12337/zgkqzzxxz.2021.12.006.
- [32] 王骅, 王鹁, 张彪. 3D 打印钛合金牙种植体的细胞毒性的研究[J]. 中国口腔种植学杂志, 2019, 24 (1): 10-13. DOI: 10.12337/zgkqzzxxz.2019.03.003. WANG H, WANG Y, ZHANG B. Study of the cytotoxicity for 3D printed titanium alloy dental implants[J]. Chin J Oral Implantol, 2019, 24 (1): 10-13. DOI: 10.12337/zgkqzzxxz.2019.03.003.
- [33] WANG H, LIU J, WANG C, et al. The synergistic effect of 3D-printed microscale roughness surface and nanoscale feature on enhancing osteogenic differentiation and rapid osseointegration[J]. J Mater Sci Technol, 2021, 63: 18-26. DOI: 10.1016/j.jmst.2019.12.030.
- [34] ZHANG J, ZHOU W, WANG H, et al. 3D-printed surface promoting osteogenic differentiation and angiogenic factor expression of BMSCs on Ti6Al4V implants and early osseointegration *in vivo*[J]. J Mater Sci Technol, 2019, 35 (2): 336-343. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.063.
- [35] 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. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.014. 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. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.014.
- [36] 曾智谋, 朱策, 王林楠, 等. 3D 打印陶瓷聚合物复合材料用于骨修复的研究进展[J]. 华西医学, 2023, 38 (10): 1449-1455. DOI: 10.7507/1002-0179.202310133. ZENG Z M, ZHU C, WANG L N, et al. Research progress on 3D printing ceramic-polymer composite for bone repair[J]. West China Med J, 2023, 38 (10): 1449-1455. DOI: 10.7507/1002-0179.202310133.
- [37] PEI P, QI X, DU X, et al. Three-dimensional printing of tricalcium silicate/mesoporous bioactive glass cement scaffolds for bone regeneration[J]. J Mater Chem B, 2016, 4 (46): 7452-7463. DOI: 10.1039/c6tb02055k.
- [38] NEUFURTH M, WANG X, WANG S, et al. 3D printing of hybrid biomaterials for bone tissue engineering: calcium-polyphosphate microparticles encapsulated by polycaprolactone[J]. Acta Biomater, 2017, 64: 377-388. DOI: 10.1016/j.actbio.2017.09.031.
- [39] HU L, RONG R, SONG W, et al. Patient-specific 3D printed models for enhanced learning of immediate implant procedures and provisionalization[J]. Eur J Dent Educ, 2023, 27 (3): 765-772. DOI: 10.1111/eje.12928.
- [40] LIN H H, LONIC D, LO L J. 3D printing in orthognathic surgery-A literature review[J]. J Formos Med Assoc, 2018, 117 (7): 547-558. DOI: 10.1016/j.jfma.2018.01.008.
- [41] KIEFER P, HAHN V, KALT S, et al. A multi-photon (7 × 7) - focus 3D laser printer based on a 3D-printed diffractive optical element and a 3D-printed multi-lens array[J]. Gxjzz, 2024, 4 (1): 1. DOI: 10.37188/lam.2024.003.
- [42] 王晓璐. 拓扑优化设计及嵌入式技术在 3D 打印中的应用[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41 (3): 241-248. DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2022040004. WANG X L. Application of topology optimization design and embedded technology in 3D printing[J]. Powder Metall Technol, 2023, 41 (3): 241-248. DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2022040004.
- [43] ZHANG H, QIN C, SHI Z, et al. Bioprinting of inorganic-biomaterial/neural-stem-cell constructs for multiple tissue regeneration and functional recovery[J]. Natl Sci Rev, 2024, 11 (4): nwae035. DOI: 10.1093/nsr/nwae035.
- [44] MA L, YU S, XU X, et al. Application of artificial intelligence

- in 3D printing physical organ models[J]. Mater Today Bio, 2023, 23 : 100792. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100792.
- [45] CHEN H, ZHANG B, HUANG J. Recent advances and applications of artificial intelligence in 3D bioprinting[J]. Biophys Rev, 2024, 5 (3): 031301. DOI: 10.1063/5.0190208.
- [46] 宁希. 前沿技术: 使用人工智能实时调整 3D 打印[J]. 上海质量, 2022, (9): 46-47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7816.2022.09.018.
- NING X. Cutting-edge technology: using artificial intelligence to adjust 3D printing in real time[J]. Shanghai Qual, 2022, (9): 46-47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7816.2022.09.018.
- [47] 孙玉春, 郭雨晴, 陈虎, 等. 口腔精准仿生修复技术的自主创新研发与转化[J]. 北京大学学报(医学版), 2022, 54(1): 7-12. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167X.2022.01.002.
- SUN Y C, GUO Y Q, CHEN H, et al. Independent innovation research, development and transformation of precise bionic repair technology for oral prosthesis[J]. J Peking Univ (Health Sci), 2022, 54 (1): 7-12. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167X.2022.01.002.
- [48] 柳玉晓, 林斐斐, 于书娟, 等. 一种数字化全口义齿的临床应用初步探讨[J]. 口腔医学研究, 2022, 38 (3): 248-251. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2022.03.011.
- LIU Y X, LIN F F, YU S J, et al. Primary clinical application of 3D printing complete dentures[J]. J Oral Sci Res, 2022, 38 (3): 248-251. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2022.03.011.
- (责任编辑: 郑巧兰)

