

3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用研究

晋茹

(安徽中医药高等专科学校口腔医学系,安徽 芜湖 241000)

摘要 本研究旨在探讨3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用及其推广价值。口腔修复领域面临着多种挑战,包括颌骨缺损、牙齿缺失等问题,而3D打印生物陶瓷材料凭借其独特的特性,为这些问题提供了创新的解决途径。因此,本研究探讨了3D打印生物陶瓷材料的特性与优势、3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用,在未来发展中可能遇到的瓶颈及解决方案。随着技术的进一步发展和临床经验的积累,该材料有望在口腔修复领域发挥更大的作用,为广大患者提供更安全、有效且经济的治疗方案。

关键词 3D打印;生物陶瓷材料;口腔修复

中图分类号:R783.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-9664(2024)04-0072-05

Application and popularization of 3D printed bioceramics in prosthodontics

JIN Ru

(Department of Stomatology, Anhui College of Traditional Chinese Medicine, Wuhu 241000, Anhui, China)

Corresponding author: JIN Ru, Email: 644915179@qq.com

3D打印生物陶瓷材料是一种结合了增材制造技术与生物医用材料科学的新兴技术。该技术以数字模型文件为基础,通过软件分层离散和数控成型系统,利用激光束、电子束、加热头、光固化等方法,将粉末状金属、塑料或细胞、组织等特殊材料,尤其是生物陶瓷材料,通过逐层打印的方式构造出复杂结构的物体^[1]。目前,可打印的生物陶瓷材料包括磷酸三钙(tricalcium phosphate, TCP)、羟基磷灰石(hydroxyapatite, HAC)、双相磷酸钙(biphase calcium phosphate, BCP)以及生物活性玻璃^[2]。TCP具有良好的生物相容性、骨诱导性以及可降解性,是生物陶瓷材料中的重要组成部分。特别是 β -TCP,因其更好的骨诱导性和可降解性,常用于骨植入物和口腔修复中。HAC的化学成分与人体骨骼无机部分高度相似,能够与生物体的骨骼和软组织形成直接化学键,具有良好的生物相容性和骨传导性。因此,HAC在口腔修复领域,如人工牙齿、口腔修复体等方面有广泛应用。BCP结合了HAC和TCP的特性,具有更均衡的骨诱导性和可降解性,常

用于复杂的骨修复场景,能够同时促进新骨形成和维持材料的稳定性。生物活性玻璃则能够与生物体组织形成良好的结合,促进软组织的再生,是优秀的骨、齿类修复材料。通过3D打印技术制备的介孔生物活性玻璃,形态灵活,尺寸精准,能够进一步提高其应用效果^[3]。常见的加工方式有以下几种,一是数字光处理技术(digital light processing, DLP),其成型速度快、打印精度高,特别适用于氧化锆、氧化铝、羟基磷灰石等陶瓷材料的快速打印。该技术通过紫外线激光照射光固化树脂材料,逐层固化,构建出高精度的三维实体。二是选择性激光烧结技术(selective laser sintering, SLS),通过激光照射粉末材料,使其局部熔化并烧结成型。该技术主要用于氧化锆、氧化铝、碳化硅等陶瓷粉的加工,能够制造出复杂形状的零件,尤其适用于需要高强度的应用场景^[4]。三是直接喷墨打印技术(direct inkjet printing, DIP),通过喷嘴将陶瓷浆料直接喷射到建模台上,通过层层堆叠形成三维结构。该技术主要用于加工氧化锆基陶瓷浆料,是制造氧化锆全瓷修复体的主要技术之一。四是三维打印成型技术(3D printing, 3DP),利用喷嘴将粘结剂喷洒在粉末材料上,通过层层粘结形成三维结构。该技术以氧化锆、氧化铝、氧化硅等陶瓷粉为原料,已成功应用于

陶瓷模具的制造,并实现了市场化。五是熔融沉积成型技术(fused deposition modeling, FDM),采用热塑性树脂结合剂作为原料,通过加热熔融后挤压成型。该技术不仅可用于加工普通陶瓷材料,还适用于锆钛酸铅压电陶瓷、磷酸三钙等特殊材料的加工。六是浆料直写成型技术(direct ink writing, DIW),利用高精度喷嘴将陶瓷浆料直接挤出,通过精确控制喷嘴的运动轨迹,构建出三维结构。该技术的原材料包括氧化锆、氧化铝、TCP、HAC等,能够制造出高精度、复杂形状的陶瓷部件。基于此,本研究旨在深入探讨3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用及其推广价值,概述相关的研究进展,分析其在临床实践中的优势和局限性,并展望未来的发展方向。

1 3D打印生物陶瓷材料的特性与优势

传统的口腔修复方法常常因为材料的限制而无法达到理想的修复效果,而生物陶瓷材料的应用为口腔修复带来了新的突破。一方面,这些材料具有出色的生物相容性。口腔环境复杂,因此,用于口腔修复的材料需要能够与人体组织和谐共处,不引起排异反应或感染^[5]。3D打印生物陶瓷材料能够满足这一要求,为患者提供安全、有效的修复方案。另一方面,3D打印生物陶瓷材料具有出色的机械性能。它们能够抵抗口腔中的咀嚼压力和磨损,保持修复体的稳定性和持久性^[6]。这种材料的硬度和耐磨性使其成为制造牙齿、牙冠、牙桥等口腔修复体的理想选择。

3D打印技术还为口腔修复带来了更高的精确度和灵活性。传统的口腔修复方法往往需要复杂的模具制作和加工过程,而3D打印技术能直接从数字模型制造出精确的修复体,减少了制作过程中的误差和不确定性。3D打印还能根据患者的个体差异进行定制,为每个患者提供个性化的修复方案。最后,3D打印生物陶瓷材料的成本相对较低,使得更多的患者能够享受到这种先进的口腔修复技术。与传统的加工方法相比,3D打印技术可以大幅度降低制造成本,提高治疗效率,减轻患者的经济负担。

2 3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用

2.1 牙体缺损的修复

在现代医学领域,牙体缺损修复已经成为一种常见的治疗方式。无论是由于外部创伤、龋齿侵蚀

还是髓炎等原因,牙体组织的大面积缺损都可能对口腔健康造成严重影响,不仅影响牙齿的正常功能,还会降低牙齿的抗力,增加牙体劈裂等风险^[7]。因此,寻找一种高效、精确的修复方法对于恢复牙齿功能和保护口腔健康至关重要。传统的牙体缺损修复方法包括使用嵌体、高嵌体、全冠、桩核冠等修复体,这些修复体通常由数控切削技术制作,具有较高的精度和稳定性,能够有效延长患牙的使用寿命^[8]。然而,随着科技的进步,3D打印技术作为一种新兴制造技术,逐渐在牙体缺损修复领域展现出其独特的优势。

近年来,国内外学者纷纷关注利用3D打印技术制作全瓷修复体的研究。研究人员通过3D打印技术成功制备了固体含量分别为22%和27%的氧化锆陶瓷浆料,以及相对密度为97%的氧化锆单冠^[9]。尽管该研究未评价全瓷冠的边缘适合性和力学性能,但这一研究为3D打印技术在牙体缺损修复领域的应用提供了有力支持。为进一步验证3D打印制作的氧化锆全瓷冠的精度和性能,有研究者利用3D检测软件对切削和DLP(数字光处理)制造的氧化锆全瓷冠进行比较,研究^[10]显示,通过3D打印制作的氧化锆全瓷冠的边缘及各轴面的密合度均符合临床医学要求。这一发现为3D打印技术在牙体缺损修复领域的应用提供了更为可靠的依据。在牙体缺损修复中,修复材料的选择至关重要。氧化锆陶瓷作为一种高强度、半透性差的材料,特别适用于后牙的修复,而对于口腔前牙区的美学修复,二硅酸锂玻璃陶瓷则成为首选。有研究者利用DLP技术成功制备了二硅酸锂玻璃陶瓷,并发现所得到的牙冠修复体密度高、抗折强度可达400 MPa,完全能够满足口腔修复学的临床需求^[11]。3D打印技术为牙体缺损修复提供了一种全新的解决方案,通过精确的3D打印技术,可以制作出符合临床医学要求的氧化锆全瓷冠和二硅酸锂玻璃陶瓷牙冠修复体,它们不仅具有高精度和良好的密合度,还具备优异的力学性能和美学效果。

2.2 牙列缺损的修复

随着生物陶瓷材料和3D打印技术的不断发展,牙列缺损的修复也取得了显著的进展。传统的牙列缺损修复方法,如可摘局部义齿和固定义齿,虽然在一定程度上能够恢复患者的咀嚼功能和美观,但仍然存在一些不足,如舒适度差、易脱落、影响发音等^[12]。3D打印技术的应用,使得牙列缺损的修复

更加精确、舒适和持久。

在牙列缺损的修复中,3D打印技术可以制作出个性化的支架和基托,使得义齿更加贴合患者的口腔结构,提高舒适度和稳定性;可以制作出高度仿真的牙齿,使得义齿在外观和功能上更加接近自然牙齿,提高患者的自信心和生活质量;还可以应用于种植义齿的修复中,通过3D打印技术,制作出精确的种植导板和手术模板,帮助医生在手术中准确定位和植入种植体,提高手术的成功率和患者的满意度^[13]。3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用,为口腔医学领域带来了新的突破和发展,提高了口腔修复的精度和效果,还使得修复过程更加便捷、高效和个性化。

2.3 颌骨缺损的修复

颌骨缺损的修复一直是口腔医学领域的一大挑战。传统的修复方法,如自体骨移植、异体骨移植等,虽然能在一定程度上修复缺损,但存在供体不足、免疫排斥反应等诸多问题^[14]。随着3D打印技术的引入,颌骨缺损的修复方法得到了创新。目前,有学者将3D打印技术应用于颌骨缺损修复研究,取得了令人瞩目的成果。他们利用3D打印技术制备了BG陶瓷支架,并在动物实验研究中进行了应用,根据术后4周的组织学检查结果显示,该支架的相容性及生物安全性均表现良好,为颌骨缺损的修复提供了新的可能性^[15]。HAC和 β -TCP作为磷酸钙类陶瓷材料,是骨组织支架常用的陶瓷材料。有学者将HAC和聚己内酯按照一定比例混合后,制备出了一种超塑性生物材料,通过3D打印技术,成功制备出了超塑性生物材料支架,并植入到大鼠下颌升支中,经CT扫描和组织学评估发现,3D打印的超塑性生物材料支架不仅具有良好的尺寸稳定性,还展现出优异的骨再生能力^[16]。

国外研究者也对3D打印 β -TCP支架治疗骨缺损的临床效果进行了评估。他们将3D打印的 β -TCP支架应用于实验兔的下颌骨缺损修复中。根据下颌骨切片的量化分析结果,新形成的支架骨的体积占比差异无统计学意义,表明3D打印 β -TCP可成功应用于兔下颌骨的关键节段性骨缺损修复^[17]。这一研究为临床医学应用该种材料提供了有力的科学依据。这些研究结果充分揭示了三维打印技术在颌骨缺损修复领域的巨大潜力。借助精确的三维打印技术,可以制备出具有高度相容性、生物安全性和骨再生能力的生物陶瓷材料支架。这些

支架能够满足引导骨再生的基本需求,为颌骨缺损患者带来更为有效的治疗方案。因此,利用3D打印技术,能依据患者的计算机断层扫描(computed tomography, CT)或磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等影像数据,精确地重塑患者的颌骨结构,制造出与患者颌骨完全吻合的骨替代品。这类骨替代品不仅具备与真实颌骨相近的生物力学性能,还能根据患者需求进行个性化定制,从而实现更优质的修复效果。3D打印技术同样适用于颌骨缺损的再生修复。通过打印具有生物活性的材料,如生物陶瓷、生物活性玻璃等,可促进骨组织的再生与修复,进一步提升修复成效。在颌骨缺损修复中应用此技术,能减轻患者痛苦、缩短康复周期。3D打印技术可与其他先进技术相结合,如数字化导航技术、机器人技术等,以提升颌骨缺损修复的精确度和安全性。

2.4 口腔种植修复

口腔种植修复是一项高度复杂且巧妙的医学技术,其目的在于通过在下颌骨组织中植入支撑结构,以固定上部修复体,从而实现缺失牙齿的修复。这一过程对精确性和稳定性要求极高,因为种植体的成败将直接影响到患者的生活品质 and 口腔健康。为实现此目标,口腔种植修复采用人工材料制作种植体,这些材料多为金属或陶瓷等硬质物质,经过严谨的手术流程后,将这些种植体植入患者的牙槽骨内。手术过程中,医生会确保种植体的位置和稳定性,使其得以牢固地附着于下部结构,为进一步增强种植体的稳定性,需通过特定装置和方式将上部牙齿修复体与种植体连接。

在众多种植体中,个性化根形种植体因其独特的优势而在口腔种植领域具有重要的发展前景。这种前沿设计的核心理念在于其能够精准地贴合患者的牙槽骨形态,从而最大限度地保存了宝贵的牙槽骨量^[18]。这一特性不仅对于维护口腔的长期健康与稳定至关重要,还显著提升了种植体的稳固性和使用寿命。具体而言,个性化根形种植体通过精确的术前规划与定制生产,确保了种植体与患者口腔环境的完美融合,这一过程中,影像学技术和三维重建软件发挥了关键作用,它们为医生提供了详尽的口腔结构信息,使得种植体的设计更加科学、合理。在手术实施阶段,这种高度个性化的种植体能极大地简化手术操作流程,降低手术风险,并有效减轻患者的痛苦与不适感。氧化锆材料在

口腔种植领域的广泛应用也为这一领域注入新的活力,与传统的金属钛材料相比,氧化锆具有更优异的生物相容性和更光滑的表面特性。这一特点使得氧化锆种植体在植入后能够显著降低组织的炎症反应,促进组织的快速再生与愈合。对于患者而言,这意味着更短的恢复期和更佳的种植效果。

国外有学者利用数字光处理3D打印技术制作出个性化氧化锆口腔种植体,并对其精度、表面形貌、晶相结构、表面粗糙度以及力学性能进行了全面的检测。结果显示,这些打印的种植体的尺寸精度非常高,其精度均方根为0.1 mm,其表面粗糙度算术平均值为 $(1.59\pm 0.41)\mu\text{m}$,粗糙度均方根值为 $(1.94\pm 0.47)\mu\text{m}$,这些数值表明种植体的表面非常光滑,有助于减少炎症反应和促进组织的再生^[19]。在晶相结构方面,该种植体的晶相为典型的钇稳定四方氧化锆,这种晶相结构具有良好的机械性能和稳定性。在力学性能测试中,该种植体的抗弯强度接近传统方式制作的陶瓷种植体,这表明其具有足够的强度来承受口腔内的各种咬合力和咀嚼力的作用。

国内学者李琳^[20]在种植手术前采用激光选区烧结联合冷等静压技术制备氧化锆个性化根形种植体。他们对该个性化种植体的制作精度进行了评价,并对植体表面形态进行了表征。测试结果显示,打印的种植体具有良好的精度和力学性能,并且能在动物拔牙窝内的种植体-骨界面形成良好的骨整合。这说明此类植入体的特殊特征使其拥有出色的生理兼容性,并且可以牢牢地粘附在外部的骨骼上,从而极大增强其稳固性及持久的成功率。上海口腔医院已经将这种打印种植体的方式加以应用,目前取得了较为满意的效果,不仅能够满足美观的要求,另外可以促进所种植牙齿旁边周围组织的健康生长。

这些结果均表明,利用3D打印技术制作氧化锆口腔种植体是可行的,并且具有较高的精度和良好的生物相容性。这种个性化制作的方法能够根据患者的牙槽骨结构和需求进行定制化制作,提高种植体的适应性和成功率^[21-22]。因此,3D打印氧化锆种植体可为口腔个性化种植的发展提供有力的技术支持,为未来种植体设计和制作提供新思路。

3 小结及展望

3D打印技术在口腔医学领域,尤其是在颌骨缺

损修复和口腔种植修复方面,展现了巨大的潜力和优势。通过精确的个性化定制,3D打印技术能够制造出与患者颌骨结构完全吻合的骨替代品和种植体,显著提高了修复效果和种植成功率,而且3D打印技术与数字化导航技术、机器人技术等其他先进技术的结合,进一步提升了手术的精确度和安全性,为患者带来了更好的治疗体验。尽管3D打印技术在某些方面展现出一定优势,但其在生物陶瓷加工中所遇问题亦不容忽视。

对于DLP技术,其陶瓷浆料配置难度大,工艺复杂且生产效率低,由于陶瓷光敏树脂浆料的高固相含量,使得在固化过程中易产生成型应力,从而导致器件的性能下降。对于选择性激光烧结技术(SLS),其激光功率难以使陶瓷粉体完全熔化,且烧结过程中易产生不良烧结和致密度低等问题。这些问题可能导致打印的陶瓷器件强度不足、精度差等。对于直接墨水书写技术(DIP),其陶瓷墨水配比无标准,稳定性差,且喷头易堵塞,使得在打印过程中易发生断墨、漏墨等现象,影响打印质量。对于三维打印技术(3DP),其成型的陶瓷坯体致密度低、精度差,需繁琐的热处理提高致密度,不仅增加了加工成本和时间,还可能引发器件变形等问题。对于熔融沉积成型技术(FDC),其需设置支撑结构,处理流程繁琐,且成型产品种类受限,熔融沉积过程中可能产生熔融不均、气泡等问题,影响器件的性能。针对上述问题,笔者提出一系列前沿性解决方案。一是提升陶瓷粉体/浆料的质量,通过优化原料配方、改进制备工艺等方法,可提高陶瓷粉体/浆料的性能,从而改善SLS、3DP、FDC等技术的应用效果。二是研发高精度打印设备,通过提高打印设备的精度和稳定性,可制备高精度异形三维陶瓷结构,满足复杂应用场景的需求。三是优化后续处理工艺,如采用氮气或氩气环境脱脂、新型烧结工艺等方法,可降低器件变形、提高致密度和性能。

总体而言,尽管3D打印技术在生物陶瓷材料领域面临诸多挑战,但凭借其独特优势,如能够制备复杂的三维结构、提高生产效率等,有望在解决现有问题后广泛应用于该领域。未来,随着技术的不断发展和创新,我们有理由相信3D打印技术将为生物陶瓷材料领域带来更多的机遇和突破。

参考文献

[1] 李晓雪,樊世锋,侯晓薇. 3D打印生物陶瓷材料在口腔

- 修复领域的研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2023, 33(4): 39-45.
- [2] 张俊, 李明利, 汤彬彩, 等. 生物陶瓷材料的3D打印技术现状[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(6): 651-658.
- [3] 王勇. 口腔材料与口腔数字化技术[J]. 口腔材料器械杂志, 2023, 32(3): 153-157.
- [4] 葛俊. 3D打印陶瓷技术在口腔医学领域的研究进展[J]. 陶瓷科学与艺术, 2023, 57(5): 96.
- [5] 周远恒, 陈才俊, 葛军显, 等. 氧化锆全瓷冠光固化3D打印研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(6): 2150-2160.
- [6] 单验博, 何鑫, 温宁. 3D打印技术在口腔临床中的应用[J]. 武警医学, 2022, 33(9): 817-820.
- [7] 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.
- [8] 梅子彧, 鲁雨晴, 楼雨欣, 等. 数字光处理打印牙科氧化锆的微观结构和机械性能研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2021, 39(5): 576-581.
- [9] 仇琪, 李耀华. 3D打印的口腔修复用医疗器械研发进程和注册要求概述[J]. 中国医疗器械信息, 2021, 27(17): 1-2+139.
- [10] 朱莹. 3D打印二氧化锆种植体的制备和力学性能研究及美学种植修复病例报告[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [11] 毕锦桐, 胡欣, 刘金纾. 口腔修复陶瓷材料的磨损性能[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(3): 406-412.
- [12] 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.
- [13] 高水超, 田皞, 喻建军, 等. CT血管造影血管定位联合精细化三维打印指导复杂口腔癌切除与修复的效果[J]. 中华肿瘤杂志, 2019, 41(7): 496-500.
- [14] 赵瑞霖, 付茜, 乔嘉, 等. 人工髁突-下颌骨延长器复合体治疗 Pruzansky II B型及III型半侧颜面短小症的模型试验[J]. 中国修复重建外科杂志, 2023, 37(10): 1270-1275.
- [15] 周立波, 初明慧, 刘惠萍. 3D打印技术结合案例教学法在口腔医学大学生教学中的应用[J]. 江苏科技信息, 2022, 39(5): 75-77.
- [16] Baumgartner S, Gmeiner R, Schoenherr JA, et al. Stereolithography-based additive manufacturing of lithium disilicate glass ceramic for dental applications [J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2020, 116: 111180.
- [17] 何时知, 张罗, 房居高, 等. 3D打印辅助设计个性化游离腭骨瓣成形修复上颌骨切除术后缺损[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2020, 55(3): 205-208.
- [18] Huang Z, Huang JY, Li CX, et al. The application of 3D printed self-glazed zirconia for full-mouth rehabilitation in a patient with severely worn dentition: a case report [J]. Advances in Applied Ceramics, 2020, 119 (5 - 6) : 305-311.
- [19] 曾娜, 包拿, 刘施腾, 等. 3D打印技术在口腔牙种植中的应用与发展[J]. 甘肃科技, 2018, 34(24): 42-44.
- [20] 李琳. 全面数字化趋势下联泰科技口腔3D打印技术的发展[J]. 现代制造, 2020, 25: 16-18.
- [21] 石菲菲, 葛文慧, 许来俊. 数字化3D打印技术在口腔医学中的临床应用进展[J]. 山东医药, 2023, 63(11): 104-108.
- [22] 许可, 陈定根, 李娜, 等. 3D打印技术在口腔正畸领域的应用进展[J]. 四川医学, 2024, 45(1): 68-72.
- (收稿日期: 2024-07-26)
(本文编辑: 欧阳菁)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

本刊对通讯作者有关事宜的通告

本刊自2007年第1期起,要求凡刊用文章须标注通讯作者及通讯作者的Email地址。特提醒作者注意:投稿时务必于文章首页作者单位下方标明通讯作者姓名及Email地址,凡新投文章内注明通讯作者的稿件,稿件相关的一切事宜(包括邮寄稿件收稿回执、退稿、稿件退修、校样、版面费、稿件处理费等)均与通讯作者联系。文内未注明通讯作者的文章,按国际惯例,本刊默认第1作者为通讯作者,并在刊登时将其姓名和Email地址脚注于文章首页左下角,且有关稿件的一切事宜与第1作者联系。