DOI:10. 3969/j. issn. 1000-9760. 2026. 05. 013

数字化 3D 打印技术在乳磨牙早失间隙管理中的应用进展

王辉　韦薇
(济宁口腔医院儿童口腔科,济宁 272000)

摘　要　乳磨牙的过早丧失是儿童口腔临床中常见问题,极易引发牙弓长度缩短、继承恒牙阻生及牙列拥挤等错颌畸形。科学有效的间隙管理是预防性正畸的核心内容。传统间隙保持器存在制作繁琐、精度不足及易引发牙周病变等局限性。近年来,以计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)及 3D 打印为核心的数字化技术为间隙管理带来了革新。本文立足于乳磨牙早失的临床需求,系统阐述了数字化 3D 打印技术在间隙管理中的应用基础与核心工作流程。文章探讨了三维数字模型的获取、个性化拓扑优化设计、选择性激光熔化(SLM)等关键打印技术及材料学特征,总结了该技术在实现精准适配、提升生物力学性能与改善患者舒适度等方面的临床优势。针对当前存在的成本、技术门槛等问题进行剖析,展望人工智能辅助设计、新型生物材料及多功能整合的未来发展趋势,以期为临床医生制定精准化、个性化的儿童间隙管理方案提供理论依据。

关键词　乳磨牙早失;间隙管理;数字化 3D 打印
中图分类号:R788　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-9760(2026)10-464-05

Application progress of digital 3D-printing technology in space management for premature loss of primary molars

WANG Hui, WEI Wei
(*Department of Pediatric Dentistry, Jining Stomatological Hospital, Jining* 272000, *China*)

Abstract: Objective　The premature loss of primary molars frequently leads to shortened dental arch length, impaction of succedaneous permanent teeth, and dental crowding. Effective space management constitutes a core component of preventive orthodontics. Traditional space maintainers have limitations such as cumbersome fabrication, insufficient precision, and susceptibility to periodontal issues. Recently, digital technologies centering on CAD/CAM and 3D printing have revolutionized this field. Based on clinical demands, this article systematically reviews the application of digital 3D printing in space management. It discusses in detail the acquisition of digital models, personalized topology optimization, selective laser melting (SLM) techniques, and material properties. The clinical advantages of 3D-printed maintainers, including precise adaptation, enhanced biomechanical performance, and improved patient comfort, are comprehensively summarized. Finally, the article analyzes current challenges such as cost and technical barriers, and outlines future trends involving AI-assisted design, novel bioactive materials, and multifunctional integration, to provide a theoretical basis for precise and personalized space management.

Keywords: Premature loss of primary molars; Space management; Digital 3D-printing

乳磨牙不仅承担咀嚼功能,更是维持牙弓长度、引导恒牙正常萌出的关键。临床上,常因严重龋坏等原因导致乳磨牙早失。若不及时干预,邻牙易在咬合力下发生倾斜移位,致使牙弓周长缩短,进而引发继承恒牙萌出空间不足、异位甚至阻生[1-2]。这种继发性错颌畸形不仅破坏颜面美观,更影响儿童身心健康,因此早期进行间隙管理至关重要[3]。然而,传统的间隙保持器(如手工弯制的带环丝圈)高度依赖技师经验,存在临床应用短板:其制作流程繁琐、周期长、贴合精度有限,且易导致菌斑聚集引发牙周或牙体病变,生物力学性能亦不够理想[4]。近年来,计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)等数字化技术的引入,为间隙管理带来了深刻革新[5]。通过口内扫描与 3D 打印,实现了保持器的个性化精准定制,不仅大幅提升了装置的密合度与力

[基金项目]济宁市重点研发计划项目(2024YXNS219)

学性能,改善了患者的佩戴舒适度与口腔卫生维护,更减少了患者的就诊次数和等待周期。基于此背景,本文旨在立足乳磨牙早失的临床管理需求,对比传统装置的局限性,重点探讨数字化 3D 打印技术在间隙管理领域的应用现状、关键技术与发展前景,以期为儿童口腔预防性矫治的精准化提供理论参考。

1　乳磨牙早失间隙管理的临床需求与生物力学基础

1.1　乳磨牙早失的主要病因与间隙丧失风险因素

乳磨牙早失的病因复杂多样,其中龋病及其并发症占据首位(约占 70%~80%)。当乳磨牙破坏严重且无法保留时,拔除成为必然选择。此外,遗传性疾病(如低磷酸酯酶症)也是重要因素[6]。间隙丧失的风险及严重程度受多种因素调控:患儿年龄越小,牙槽骨改建越活跃,间隙丧失风险越高;牙弓原本存在拥挤趋势者,间隙闭合速度更快[7]。

1.2　间隙丧失的生物力学机制

乳牙早失后,牙列内原有的动力平衡系统被打破。间隙丧失主要通过两个维度发生[5,8-9]:1)近远中向移动(水平向)。后方恒牙在萌出力及近中向力分量的作用下,迅速向缺隙侧倾斜或整体移动;缺隙前方的牙齿亦可能向远中漂移。拔牙后前 3 个月是间隙丧失高峰期;2)垂直向移动。对颌牙齿因失去咬合接触而发生伸长,导致咬合曲线紊乱,增加未来咬合重建难度。

2　传统间隙保持技术的应用局限

2.1　主流传统装置的临床应用现状

目前临床应用的主流传统装置包括[10]:1)带环丝圈式保持器(BLSM),是处理单侧单个乳磨牙早失的经典固定装置;2)可摘式保持器,含树脂基托和卡环,具有恢复咀嚼功能和一定美观性的特点;3)舌弓与 Nance 弓,常用于双侧多数后牙缺失的间隙维持。

2.2　传统技术的共性局限

上述传统装置在长期临床应用中暴露出明显的共性缺陷:首先是制作误差大。传统“印模-石膏模型-技工弯制”模式,带环部分的设计必然要填倒凹,导致口内黏结时带环龈方边缘必然不能与牙面完全贴合,其间隙需要由黏结剂充填。其次是牙周健康威胁。带环悬突、粗糙的焊接点及大面积的树脂基托极易导致菌斑堆积,引发牙龈红肿和继发龋[11]。再次是机械故障率高。在咀嚼下易发生弹性形变,焊点断裂及脱粘失效率高达 40%以上。最后是就诊次数多,制作周期长。此外,可摘装置的丢失率和破损率高,严重依赖患儿依从性。

2.3　传统技术的临床痛点对数字化革新的迫切需求

传统技术在精度控制、生物力学适配性及舒适化体验上的先天不足,已成为制约儿童口腔预防性正畸疗效的瓶颈[12]。临床亟须一种能够摒弃繁琐手工操作、实现解剖级精准适配且力学性能优异的新型制备方式,这为数字化 3D 打印技术在间隙管理中的应用提供了强大的内在驱动力。

传统装置制作成本低是其优势,受技术和条件限制,短期内无法被完全淘汰。临床面临一个现实抉择:是继续投入精力改良传统焊接工艺,还是全面拥抱数字化进行替代?传统焊接技术的提升空间已十分有限,数字化 3D 打印技术可以弥补传统技术的缺点,进而解决传统装置长期存在的机械断裂与牙周致病问题;数字化技术可以缩短制作时间,使患者就诊一次完成治疗;但制作成本也随之增加[13]。

3　数字化 3D 打印技术在间隙管理中的应用基础

3.1　核心技术体系

数字化 3D 打印技术的应用基础是 CAD/CAM 与增材制造(additive manufacturing, AM)的深度融合。其摒弃了物理印模,形成了一条全数字化的闭环工作流程:即“口内扫描获取三维数据——软件中进行虚拟辅助设计—— 3D 打印设备直接加工成型”[14]。

3.2　关键打印技术

在间隙保持器的加工中,目前主流采用选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)技术[15]。该技术利用高能激光束,在惰性气体保护下,根据 CAD 切片数据将微细的金属粉末逐层熔化、堆积,能够直接一体成型出传统铸造无法实现的复杂空间网状结构或微型解剖形态。

3.3　主流打印材料

目前临床应用最广泛的打印材料是医用钛合金(Ti-6Al-4V)[16]。其具有卓越的生物相容性、无致敏性,且具备高强度、低模量的优异机械性能,耐腐蚀性强。此外,聚醚醚酮(PEEK)作为一种高性能聚合物,因其颜色接近牙色、具备减震缓冲作用,也开始作为新型非金属材料应用于 3D 打印保持器领域。

在 3D 打印材料的选择上,需平衡机械强度与美学要求。钛合金虽是现阶段首选材料,但其非牙色属性限制了对美学要求高的临床应用;而以 PEEK 为代表的聚合材料虽具有美学与缓冲优势,其长期抗疲劳与抗磨耗性能尚缺乏大样本验证[17-18]。探寻兼具金属强度与树脂美学的新型复合打印材料,是未来材料学亟待突破的瓶颈。

4　数字化 3D 打印间隙保持器的设计与制作关键技术

4.1　三维数字模型的获取与优化

高精度的数字模型是设计的基石。利用口内扫描仪获取患儿牙列及软组织的三维数字模型,消除了传统印模材料形变和石膏膨胀带来的系统误差。在获取数据后,需通过软件对软组织形态进行适度重构与优化(如虚拟消除少许干扰黏膜),以确保后续设计的保持器既不压迫牙龈,又

能获得良好的就位道。

4.2　个性化虚拟设计要点

在 CAD 软件中,技师可实现真正的“解剖式设计”。借助有限元分析(FEA)和拓扑优化(Topology Optimization)原理,可对保持器进行力学优化:在非受力区进行镂空减薄以实现轻量化;在受力集中区(如连接体根部)进行加固增强。同时,固位体边缘可设计为羽状(Knife-edge),实现与牙体的零间隙贴合[19]。

4.3　3D 打印的工艺参数与成型质量控制

3D 打印的质量受层厚、激光功率及扫描速度等参数影响。为了确保成品的致密度及力学强度,打印参数需严格匹配粉末粒径。此外,成型后的后处理工艺(如热处理去应力、喷砂及表面高抛光)对防止菌斑滞留、降低装置对牙周刺激具有决定性作用。

现阶段的数字化设计对设计者依然有较高要求,即 CAD 设计参数多凭个人经验设定。行业内尚未形成针对间隙保持器的统一设计规范(如理想的网状结构孔径、最佳连接体厚度临界值等)。未来急需通过大规模生物力学实验,建立针对不同缺牙位点和咬合模式的标准化“参数数据库”,以规范设计流程。

5　数字化 3D 打印间隙保持器的临床应用优势与效果

5.1　结构性能优势

最显著的结构特征是“一体化成型”。它彻底取消了带环与丝圈之间的焊接点,消除了结构中的薄弱环节,从根本上解决了传统装置焊点断裂的机械顽疾。同时,拓扑优化赋予了装置更强的抗疲劳性能与轻量化特性。

5.2　临床应用优势

通过一次就诊即可完成扫描、设计、打印和佩戴全流程,显著减少就诊次数,极大降低医生和患者的时间成本。精准适配与被动就位,基于微米级精度制作,使得保持器就位时的被动适合性极佳,几乎无需椅旁调改,大幅缩短了操作时间。采用个性化的龈下边缘设计,便于牙线清洁。舒适无印模,口扫替代传统取模,消除了患儿的恶心反射,极大提升了依从性。

5.3　临床应用效果

综合临床研究显示,3D 打印钛合金保持器表面光滑,显著降低了患儿的牙龈指数(GI)和菌斑指数(PI)[20]。其一体化结构带来了较高的存留率,临床失败率显著低于传统装置。其轻薄、美观的特性,使得患儿及家长对治疗的满意度大幅提升。虽然短期临床效果显著,但学术界对此仍持谨慎态度。3D 打印金属保持器由于具有极高的结构刚度,在长期佩戴过程中,是否会对发育期儿童颌骨的自然生长(尤其是牙槽弓宽度的横向发育)产生限制性束缚?目前仍属未知。开展涵盖颌骨发育全周期的长期纵向研究,是确证其远期生物安全性的挑战。

6　数字化 3D 打印技术在间隙管理应用中的现存问题

数字化 3D 打印技术的初始投入成本是其推广普及面临的首要挑战。高精度的口内扫描仪、专业级 CAD 设计软件授权费用以及医用级金属 3D 打印机(如 SLM 设备)的采购和维护成本均十分昂贵,这使得大部分基层医疗机构难以承担。此外,用于 3D 打印的医用级钛合金粉末等耗材价格也远高于传统的材料。这些高昂的成本直接导致单个数字化 3D 打印间隙保持器的制作费用显著高于传统手工弯制装置,限制了该技术在经济欠发达地区和普通患者中的应用,使其难以大规模惠及儿童群体。

数字化 3D 打印技术的高度专业性和复杂性构成了另一道技术门槛。全数字化工作流程要求临床医生和技师不仅具备扎实的口腔医学基础,还需掌握跨学科的知识储备和操作技能。例如,医生需要熟悉口内扫描仪的操作技巧,确保数据采集的精度;技师则需要熟练运用复杂的 CAD 软件进行三维设计,理解力学原理,完成保持器的拓扑优化和个性化形态设计。同时,对 3D 打印设备的工艺参数(如激光功率、扫描速度、层厚)设置以及后处理流程(如热处理、抛光)的精准把控也至关重要。这些环节均需要长时间的学习、培训和实践积累,对专业人才的培养和数量提出了更高的要求,从而限制了该技术在临床实践中的快速推广。

尽管初步研究和病例报告展示了 3D 打印间隙保持器的显著优势,但其长期临床效果和安全性仍缺乏高级别的循证医学证据支持。目前关于该技术的文献多为体外研究、有限的病例报告或小样本短期观察性研究。缺乏大样本量、多中心、随机对照试验(RCT)等高质量的临床研究来充分验证其对继承恒牙萌出、颌骨正常发育的远期影响,以及对儿童口腔健康(如龋病风险、牙周健康)的长期维护效果。此外,关于其卫生经济学效益的评估也相对匮乏。这种证据等级的不足使得临床医生在推荐该技术时,难以提供充分的科学依据,也增加了患者和家长的顾虑。

7　数字化 3D 打印技术在乳磨牙早失间隙管理中的未来发展趋势

人工智能(AI)的集成将是数字化间隙管理领域的核心突破口。未来的 AI 辅助设计系统将利用深度学习算法,对海量的患者三维数据(包括牙列形态、颌骨结构、对颌咬合关系以及间隙丧失模式)进行分析和学习。通过这种智能化分析,AI 能够自动识别缺隙特征,预测邻牙移动趋势,并根据个性化需求和生物力学原理,自动生成符合最佳力学结构和临床效果的保持器设计方案,甚至可以实现“一键式”自动化设计。这将降低人工设计误差和时间成本,缩短设计周期,并确保设计的科学性和精准性[21]。

未来材料学的发展将聚焦于开发功能更强大的新型生物活性打印材料。这包括能够缓慢释放具有抗菌、抗龋功能的离子(如氟离子、钙离子、磷酸根离子)的材料,以在维持间隙的同时主动预防基牙的继发龋和牙周炎症。另一个

重要方向是研发高强度、高韧性的可生物降解材料。这类保持器在完成间隙维持任务后,可以随着恒牙的萌出和颌骨的生理性改建而逐渐降解吸收,无需二次临床拆除,从而减少患者的就诊次数和不适感,提升治疗的便捷性和舒适性。

未来的数字化间隙保持器将不再局限于单一的“维持间隙”功能。通过精巧的虚拟设计和 3D 打印工艺,可以将其设计为具有多功能整合的智能装置。例如,在保持间隙的同时,增加轻微的推力装置以纠正邻牙的轻度倾斜;整合阻断性矫治功能,如引导对颌牙的正常萌出或破除不良口腔习惯(如舌习惯、吮指),甚至在保持器上嵌入微型传感器以监测牙齿移动情况或提醒患者依从性,从而实现“一器多能”,提高早期干预的综合效益。

随着核心专利的逐步到期、国产 3D 打印设备与材料技术的不断成熟,以及批量化生产带来的规模效应,数字化 3D 打印设备的初始采购和耗材成本将逐渐降低。同时,为了确保临床应用的规范性和安全性,学术界和行业组织将加快制定针对数字化 3D 打印间隙管理装置的详细适应证、设计标准、制作流程、材料质控及临床效果评价等一系列指南和规范。这些措施将共同推动该技术向基层医疗机构普及,使其更具可及性,惠及更广大的儿童患者群体。

数字化 3D 打印技术的未来极具吸引力,但从“概念论证”走向“临床常规”仍面临重重挑战。例如,AI 全自动设计面临的算法问题与医疗责任界定、新型生物降解材料的临床毒理学审批等,都是亟待跨越的现实门槛。未来,打破医工交叉壁垒,建立完善的行业准入与监管评价体系,将是推动这些前沿设想落地的根本保障。

利益冲突:所有作者均申明不存在利益冲突。

参考文献:

[1] Lata H. A randomized clinical trial comparing the acceptance of conventional and prefabricated band and loop space maintainers in children with premature loss of primary molar[J]. Indian J Dent Res, 2026, 37(Suppl 1): S59-S59. DOI: 10.4103/ijdr_202637S1_ABS_169.

[2] Alshamrani KK, Aldhelai TA, Ibrahim RMF, et al. Early primary molar loss and associated factors among institutionalized orphans in Yemen[J]. Open Dent J, 2025, 19: e18742106387163. DOI: 10.2174/0118742106387163250624051900.

[3] Casaña-Ruiz M, Aura-Tormos JI, Marques-Martinez L, et al. Effectiveness of Space maintainers in pediatric patients: a systematic review and meta-analysis[J]. Dent J (Basel), 2025, 13(1): 32. DOI: 10.3390/dj13010032.

[4] Khan MK, Peedikayil FC, Kumar A. Effectiveness of three-dimensional-printed space maintainers in pediatric dental patients: a scoping review[J]. J Indian Soc Pedod Prev Dent, 2025, 43(4): 468-480. DOI: 10.4103/jisppd.jisppd_254_25.

[5] Mladenovic R, Nedeljkovic A, Vujacic L, et al. A personalized 3D-printed CAD/CAM functional space maintainer following the premature loss of a primary first molar in a five-year-old child[J]. Reports (MDPI), 2025, 8(3): 125. DOI: 10.3390/reports8030125.

[6] Kramer K, Chavez MB, Tran AT, et al. Dental defects in the primary dentition associated with hypophosphatasia from biallelic ALPL mutations[J]. Bone, 2021, 143: 115732. DOI: 10.1016/j.bone.2020.115732.

[7] Joshi VJ, Patel C, Patel MC, et al. Evaluation of dental arch space changes and the need for a space maintainer after unilateral loss of maxillary first primary molar: a systematic review and meta-analysis[J]. Cureus, 2025, 17(3): e81073. DOI: 10.7759/cureus.81073.

[8] Splieth CH, Eissa M, Zeitoun N, et al. Distribution of space loss after premature extraction of primary molars[J]. Quintessence Int, 2025, 56(7): 548-554. DOI: 10.3290/j.qi.b6375062.

[9] de Souza BB, Evangelista ME, Andriani J, et al. Assessment of space changes in the lower dental arch after the premature unit loss of a primary molar: a randomized clinical trial[J]. Int J Paediatr Dent, 2025, 35(2): 369-379. DOI: 10.1111/ipd.13239.

[10] Hemdan ME, El Kalla I, El Agamy RA. Clinical evaluation of different designs of fixed space maintainer: a randomized clinical trial[J]. Int J Clin Pediatr Dent, 2024, 17(4): 442-450. DOI: 10.5005/jp-journals-10005-2835.

[11] Zarean P, Zarean P, Sendi P, et al. Advances in the manufacturing process of space maintainers in pediatric dentistry: a systematic review from traditional methods to 3D-printing[J]. Appl Sci, 2023, 13(12): 6698. DOI: 10.3390/app13126998.

[12] Abdin M, Ahmed E, Hamad R, et al. Success rates and failures of fixed and removable space maintainers after the premature loss of primary molars[J]. Quintessence Int, 2024, 55(4): 304-312. DOI: 10.3290/j.qi.b4984249.

[13] Koaban A, Alotaibi SS, Abu Nakha KM, et al. Orthodontic space management in pediatric dentistry: a clinical review[J]. Cureus, 2024, 16(12): e76026. DOI: 10.7759/cureus.76026.

[14] Misbah S, Khatri A, Tyagi R, et al. Comparative evaluation of conventional, preformed, and three-dimensional printed band and loop space maintainers: a randomized clinical trial[J]. J Indian Soc Pedod Prev Dent, 2026, 44(2): 195-202. DOI: 10.4103/jisppd.jisppd_119_26.

[15] Porrua RA, González EJ, Castillo AR, et al. Design, fabrication, and characterization of novel dental implants with porosity gradient obtained by selective laser melting[J]. Mater Des, 2025, 25(1): 113660. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.113660.

[16] Pradeep PI, Akhilesh A, Kumar VA, et al. Characterization of titanium alloy Ti6Al4V-ELI components made by laser powder bed fusion route for space applications[J]. Trans Indian Natl Acad Eng, 2021, 6(4): 1071-1081. DOI: 10.1007/s41403-021-00254-7.

[17] 刘红梅,张新华. 聚醚醚酮及其复合材料在口腔医学的应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 235-242. DOI: 10.

3969/j. issn. 1001-3539. 2026. 03. 029.

[18] Gobena TS, Woldeyohannes DA. A comparative study of 3D printed PEEK and titanium (Ti-6Al-4V) on mechanical properties, and biocompatibility for dental application[J]. Discov Mater, 2026, 6(1): 207. DOI: 10. 1007/s43939-026-00659-7.

[19] Nedeljkovic A, Milosavljevic M, Mladenovic K, et al. Clinical outcomes of novel CAD/CAM-designed functional space maintainers produced via additive and subtractive methods: a randomized controlled trial[J]. J Dent, 2025, 155: 105608. DOI: 10. 1016/j. jdent. 2025. 105608.

[20] Al Akkad M, Yigit BS, Voborna I, et al. Adjustment of CAD-CAM crowns with and without a 3D-printed model: comparative study of marginal fit[J]. J Prosthodont, 2026, 10(1): 257-263. DOI: 10. 1111/jopr. 70190.

[21] Hung K, Yeung A, Tanaka R, et al. Current applications, opportunities, and limitations of AI for 3D imaging in dental research and practice[J]. Int J Environ Res Public Health, 2020, 17(12): 4424. DOI: 10. 3390/ijerph17124424.

(收稿日期　2026-02-28)

(本文编辑: 卢雪晴)

本刊对来稿中表、图的要求

来稿中的表、图均须置于正文中，切勿单独放于文后。每幅图、表应有言简意赅的题目。统计表格一律采用“三线表”格式，不用纵线、斜线。要合理安排纵表的横标目，并将数据的含义表达清楚；若有合计或统计学处理行(如 *F* 值、*P* 值等)，则在该行上面加一条分界横线；表内数据要求同一指标保留的小数位数相同。图片应清晰，不宜过大。图的宽×高为 7cm×5cm，最大宽度半栏图不超过 7. 5cm，通栏图不超过 17. 0cm，高与宽的比例应掌握在 5∶7 左右。

本刊编辑部