·生物材料专栏·综述·

光固化3D打印全瓷修复体数字化设计研究进展

梁浩文[1] 郭嘉文[2] 古发辉[3] 王童通[4] 孙进兴[4]

[1]广东职业技术学院艺术设计学院,佛山 528041;[2]中山大学附属口腔医院,光华口腔医学院,广东省口腔医学重点实验室,广东省口腔疾病临床医学研究中心,广州 510055;[3]广东工贸职业技术学院计算机与信息工程学院,广州 510510;[4]中山大学先进制造学院,深圳 518107

通信作者:孙进兴,Email:sunjx37@mail.sysu.edu.cn

【摘要】 光固化三维(3D)打印技术凭借其高成型自由度与表面精度,已成为制备高适配度全瓷修复体的重要手段。然而,成型过程中的尺寸偏差与翘曲变形等现象严重制约了其临床适配性。本文旨在系统梳理光固化3D打印全瓷修复体在数字化形态设计与形变补偿领域的最新研究进展,为高精度义齿的设计与制造提供理论指导。在几何形态设计层面,本文分析了三维卷积神经网络、生成对抗网络及点云等人工智能(AI)算法的应用;在形变补偿方面,剖析了各向异性缩放因子与切片轮廓偏置等线性补偿算法,并重点论述了有限元热力学物理仿真、智能非线性收缩预测模型以及保形支撑结构等非线性预变形补偿策略。研究表明,AI算法正推动数字化义齿设计由传统人工经验驱动向高保真、数据智能驱动转型。在成型补偿方面,线性补偿算法可有效修正宏观尺寸偏差,但难以解决非均匀畸变;而有限元仿真与AI非线性收缩预测模型能够从物理底层和数据驱动维度有效抑制复杂非线性形变,显著提升了全瓷修复体的最终临床适配精度。数字化形态设计与非线性形变补偿技术是提升光固化全瓷修复体成型精度的核心。未来研究有待对动态生物力学耦合下的义齿形态设计进行深入探索,并进一步推动AI预变形算法在复杂、个性化义齿制造中的临床普及。

【关键词】 光固化; 3D打印; 全瓷修复体; 数字化设计; 人工智能; 形变补偿

基金项目:国家自然科学基金(52405373);佛山市自筹经费类科技创新项目(2520001003142);广东职业技术学院高层次人才项目(XJGCC202519)

引用著录格式:梁浩文,郭嘉文,古发辉,等. 光固化3D打印全瓷修复体数字化设计研究进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2026,20(4):319-326.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.04.009

A review of digital design for ceramic dentures fabricated by vat photopolymerization 3D printing

Liang Haowen[1], Guo Jiawen[2], Gu Fahui[3], Wang Tongtong[4], Sun Jinxing[4]

[1]Guangdong Polytechnic, College of Art and Design, Foshan 528041, China; [2]Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangdong Provincial Clinical Research Center of Oral Diseases, Guangzhou 510055, China; [3]Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, School of Computer and Information Engineering, Guangzhou 510510, China; [4]School of Advanced Manufacturing, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

Corresponding author: Sun Jinxing, Email: sunjx37@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Vat photopolymerization (VPP) is a crucial 3D printing technology for fabricating ceramic dentures. However, nonlinear dimensional deviations and warpage distortion during the fabrication process severely restrict their clinical adaptability. This review aims to systematically summarize the latest research progress in digital morphological design and deformation compensation strategies for VPP 3D-printed ceramic dentures, providing theoretical guidance for high-precision manufacturing. In geometric morphology design, the applications of artificial intelligence (AI) algorithms, such as 3D convolutional neural networks, generative adversarial networks, and PointNet methods, were analyzed. Regarding deformation compensation, linear compensation algorithms like anisotropic scaling factors and slice contour offsets were examined. Crucially, nonlinear pre-deformation compensation strategies, including finite element thermodynamic simulations, AI-based nonlinear shrinkage prediction models, and conformal support structures, were discussed in detail. Results indicated that AI algorithms are driving the transition of denture design from experience-based paradigms to data-driven and high-fidelity intelligent models. While linear compensation algorithms effectively correct macroscopic dimensional deviations, they struggle with non-uniform distortions. Conversely, finite element simulations and AI nonlinear shrinkage prediction models can effectively suppress complex nonlinear deformations, significantly improving the final clinical adaptation accuracy of ceramic dentures. Ultimately,

digital morphological design and nonlinear deformation compensation technologies are fundamental to improving the accuracy of VPP ceramic dentures. Future research should further explore denture design under dynamic biomechanical coupling and promote the clinical application of AI pre-deformation algorithms for complex, personalized dentures.

【Key words】 Vat photopolymerization; 3D-printing; Ceramic dentures; Digital design; Artificial intelligence; Deformation compensation

Fund programs: National Natural Science Foundation of China(52405373); Foshan Self-funded Science and Technology Innovation (2520001003142); High-level Talent Research Start-up Fund of Guangdong Polytechnic (XJGCC202519)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.04.009

在修复体材料中,陶瓷材料凭借优异的生物相容性、力学强度,以及与天然牙釉质相近的色泽,已成为制造全瓷修复体的理想材料[1-3]。传统切削加工技术存在成型自由度低、易诱发微裂纹等局限,而光固化三维(three-dimensional,3D)打印技术展现出成型自由度高、表面光洁度优异及致密度高的优势[4-5]。该技术能够精准重建修复体复杂的微观解剖结构,从根本上解决因修复体不精准、边缘不密合所引发的咬合创伤、微渗漏及继发龋等临床并发症。

陶瓷光固化3D打印以数字化切片为基础,通过紫外光逐层固化陶瓷浆料构建高精度生坯[6]。其成型修复体的完整工艺流程包括修复体数字化模型设计、光固化陶瓷浆料制备、光交联固化成型,以及最终的脱脂烧结后处理(图1)。前期的数字化模型设计主导修复体的几何形貌与咬合精度,直接决定最终适配性[7-9]。目前,临床常见的设计方法有逆向复刻法、形库匹配法、镜像克隆法及蜡型扫描法等[10-12]。然而,这些方法普遍存在个性化不足、适用范围有限且高度依赖工人经验等局限。此外,光固化打印与脱脂烧结工艺中存在的线性与非线性尺寸偏差,会进一步加剧匹配误差,导致最终成型的全瓷修复体咬合错位与边缘不密合[13-14]。

针对上述问题,目前已有不少研究者从人工智能(artificial intelligence,AI)方法、线性与非线性形变补偿等角度出发对全瓷修复体进行优化设计[15-17]。然而,目前学术界尚缺乏针对全瓷修复体数字化形态设计与形变补偿策略这一维度的系统性综述分析,导致难以形成修复体设计算法与补偿策略的完整理论闭环,加剧了该领域的信息壁垒,限制了高精度全瓷修复体的应用转化进程。为此,本文系统梳理了近年来光固化3D打印全瓷修复体在AI几何形态生成、收缩形变机理及线性/非线性形变补偿算法等方面的前沿研究进展,为开发出更高精度、智能个性化的光固化全瓷修复体提供理论指导和技术突破方向。

一、光固化全瓷修复体的几何形态设计

数字化模型设计是主导光固化3D打印全瓷修复体精准成型的关键前置环节[18-19]。准确的几何形态轮廓不仅是保障修复体精准咬合的基础,更能有效均衡局部咬合载荷,避免因应力集中而诱发全瓷材料的早期脆性断裂[20-21]。当前数字化设计方法大多基于人工几何匹配,在临床应用中面临着个性化适配度低、复杂非对称缺损重构能力有限及高度依赖医师临床经验等局限性。相比之下,引入AI算法驱动的几何形态生成模型,能够深度整合患者的多维口腔解剖特征,推动数字化设计从人工经验驱动向数据智能驱动转型,这已成为实现复杂修复体高配准度成型的必然趋势[22-23]。

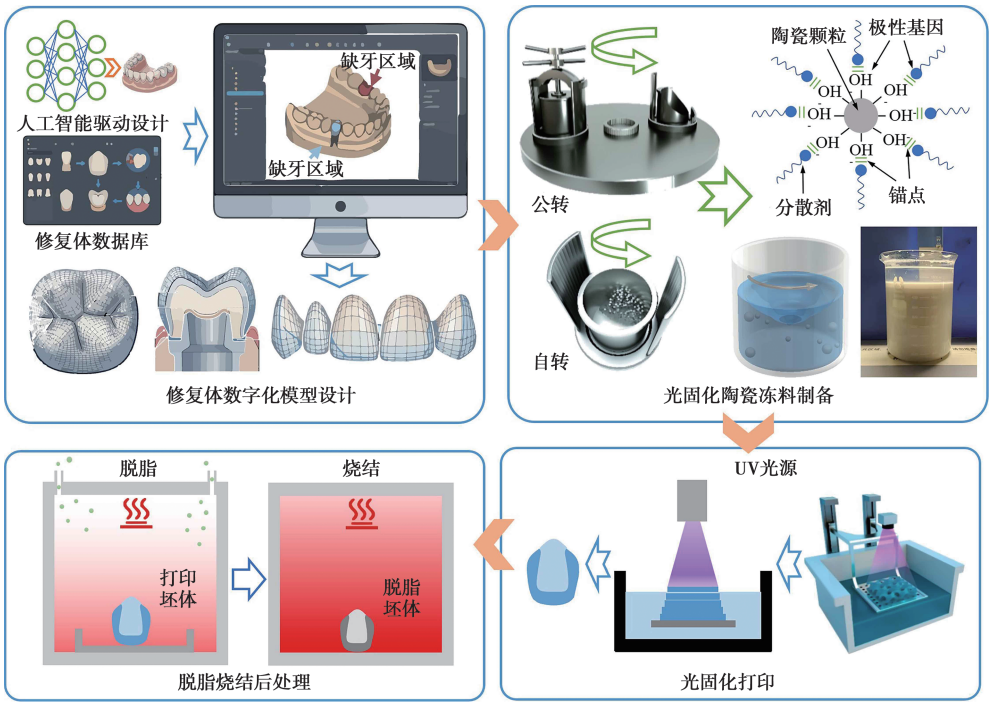

图1 光固化三维(3D)打印全瓷修复体的数字化设计与成型全流程

三维卷积神经网络(3D convolutional neural networks,3D-CNN)具备优异的三维空间特征提取与非线性映射能力,可有效解析口腔几何边界,实现修复体形态的预测与内部结构优化[24]。近年来,该方法被陆续引入全瓷修复体的设计生成中,Farook等[25]构建了包含17个隐藏层的3D-CNN架构模型,利用120份牙齿的三维特征数据进行深度学习。该模型成功实现了牙冠的自动化生成,其预测灵敏度高达1.00。在内部力学结构优化方面,Chen等[26]提出了一种基于Inception V3架构的双向进化结构优化网络模型。该模型不仅将生成修复体的形状误差控制在12.36%,并将迭代计算时间由6.5 h缩减至45 s。3D-CNN在形态预测与计算效率方面具有优势,但在处理过程中容易产生特征平均化,导致生成的修复体表面过度平滑、细节丢失,难以精确还原复杂的牙尖与窝沟等解剖形态。

三维生成对抗网络(3D generative adversarial network,3D-GAN)通过生成与对抗的动态博弈架构,能深度学习并还原天然牙的概率分布与微观解剖规律[27]。Chau等[28]利用该架构重建单颗磨牙,生成的修复体与天然牙的平均Hausdorff距离仅为0.441 ~ 0.752 mm,且重建成功率达到60%,证实了该方法在单冠仿生设计中的高形态保真度。Ding等[29]则基于深度卷积3D-GAN设计前磨牙牙冠,研究结果表明该方法将修复体的均方根误差降至0.361 1,有限元分析进一步证实该模型具备与天然牙高度一致的应力分布与疲劳寿命,实现了几何形态与生物仿生的双重适配。然而,3D-CNN和3D-GAN本质上均受限于体素化设计方法,存在$O(N^3)$的维数灾难和表面阶梯效应,难以在有限算力条件下精确刻画复杂的几何边缘与精细特征。

点云方法(PointNet)通过直接处理原始的无序三维点云,有效规避了传统体素化带来的精度损失与算力冗余,可以高效重构牙齿表面几何特征[27]。Hosseinimanesh等[30]提出了一种点云到网格(Point-to-mesh)的牙冠补全网络架构,该架构通过深度提取缺损区以及邻牙的三维特征,直接预测并生成高质量的连续牙冠网格。量化结果表明相较于传统的3D-GAN与3D-CNN,该模型不仅将单颗牙的设计时间压缩至5 s,其倒角距离与均方根误差分别降低了12.32%和46.43%。实现了高效且精准的个性化设计。尽管点云方法计算效率较高,但由于其独立处理各数据点,难以准确反映全局修复体之间的拓扑连接关系与局部几何关联,容易导致生成修复体在窝沟形态等精细特征上出现局部失真与缺失。

图卷积网络(graph convolutional network,GCN)依靠图结构天然的拓扑表达优势,能够高效解析数据点间的空间关联与局部细节[31]。针对牙齿三维重建易受噪声干扰且表面特征复杂的问题,Hu等[32]提出了一种基于GCN的修复体网格去噪设计框架。该研究利用动态注意力GCN优化网格法向量,并结合顶点变形网格来细化顶点位置。在无需依赖大量标注数据的前提下,实现牙齿网格锐利边缘、轮廓和纹理等精细几何特征的保留,显著提升了模型真实感和几何精度。Liu等[33]构建了融合GCN和Transformer的TUCNet(teeth point cloud completion method)架构。该网格解析并重构了点云的空间拓扑关系,不仅实现了缺损牙冠的高精度补全,更有效抑制了三维重建过程中常见的形态粘连现象。总体而言,不断演化的深度学习AI算法正推动修复体数字化设计向高保真、高匹配度与智能化的方向迈进。高阶的AI算法能生成在理论上完美适配的修复体数字模型,但是在随后的实体制造环境中,材料的光交联与高温相变不可避免地使模型产生复杂的物理形变。因此,深入揭示全瓷修复体成型过程中的物理形变产生原因及作用机理是实现高精度全瓷修复体制造的必经之路。

二、光固化全瓷修复体制造过程的尺寸偏差与形变机理

全瓷修复体成型过程中的形变主要来源于光固化与热处理阶段引发的尺寸偏差和体积收缩。

全瓷修复体光固化成型依赖于光敏树脂的交联反应,而树脂基体聚合引起的体积收缩、层层堆叠累积的内部残余应力,以及陶瓷颗粒光散射导致的几何边缘失真会引起修复体发生尺寸偏差与形变[34-36]。在光聚合反应中,陶瓷浆料的树脂单体碳碳双键断裂,交联形成致密的三维网状结构。微观上,分子间原本较长的范德华作用距离被较短的共价键取代。这种微观尺度的键长缩短,在宏观上直接表现为修复体生坯的体积收缩,进而影响修复体的几何精度(图2A)。在打印过程中,由于已固化层的活性位点减少,进一步导致坯体修复体的层间结合强度低于层内强度[37-38]。在已固化层的物理约束下,树脂的交联收缩会在界面处诱发残余内应力。随着内应力的逐层积累,全瓷修复体生坯会出现边缘上翘、薄壁内收等复杂的非线性变形(图2B)[39-40]。此外,陶瓷粉体与光敏树脂基体之间会存在较大的折射率差异。当紫外光穿透浆料时,光子会在高折射率的陶瓷颗粒表面发生多重散射与反射[41]。在x、y轴水平方向上,这种侧向散射使实际固化区域超出了数字掩膜的理论边界,造成修复体外轮廓偏大与边缘不密合;而在z轴垂直方向上,光束的过度穿透固化则会填平咬合面的细微特征,使窝沟与牙尖等精细解剖形貌丧失锐度(图2C)。

在热处理阶段,引发全瓷修复体发生体积收缩与尺寸偏差的核心原因在于高温下的陶瓷晶粒生长与致密化效应,以及成型方向上的各向异性收缩[42-43]。脱脂后的陶瓷生坯由松散的粉体颗粒构成,内部存在大量孔隙。在高温下,为降低系统表面能,颗粒间发生传质运动与晶粒生长,促使材料致密化融合收缩(图3A)。然而,由于临床修复体复杂的不规则解剖形态,如较厚的牙尖、较薄的冠边缘,不同厚度部位在高温下的致密化速率存在差异,造成厚、薄区域的收缩不一致,最终引发修复体整体的非均匀收缩与几何失真(图3B)[44]。光固化3D打印层层堆叠的成型方式,使得生坯在z轴与x、y轴方向上的陶瓷颗粒排列密度与树脂分布存有差异。同时,由于层间结合强度低于层内强度的特点,进一步加剧了材料微观结构的各向异性,进而引发全瓷修复体的各向异性收缩与非对称变形(图3C)[45-46]。

综上所述,光固化全瓷修复体制造过程中的尺寸偏差与形变,主要源于层层堆叠成型引起的各向异性收缩、光散射

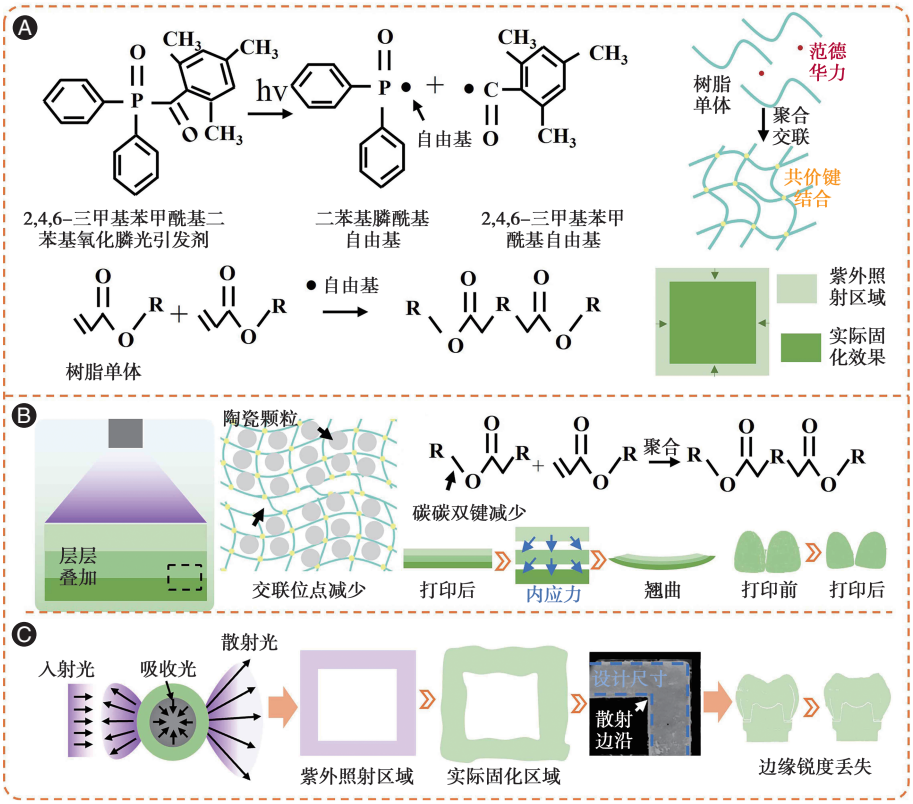

图2 光固化全瓷修复体的尺寸偏差与形变机理 A:树脂单体的光引发聚合反应;B:层间残余应力引起的非线性翘曲;C:光散射导致的过度固化和边缘特征畸变。

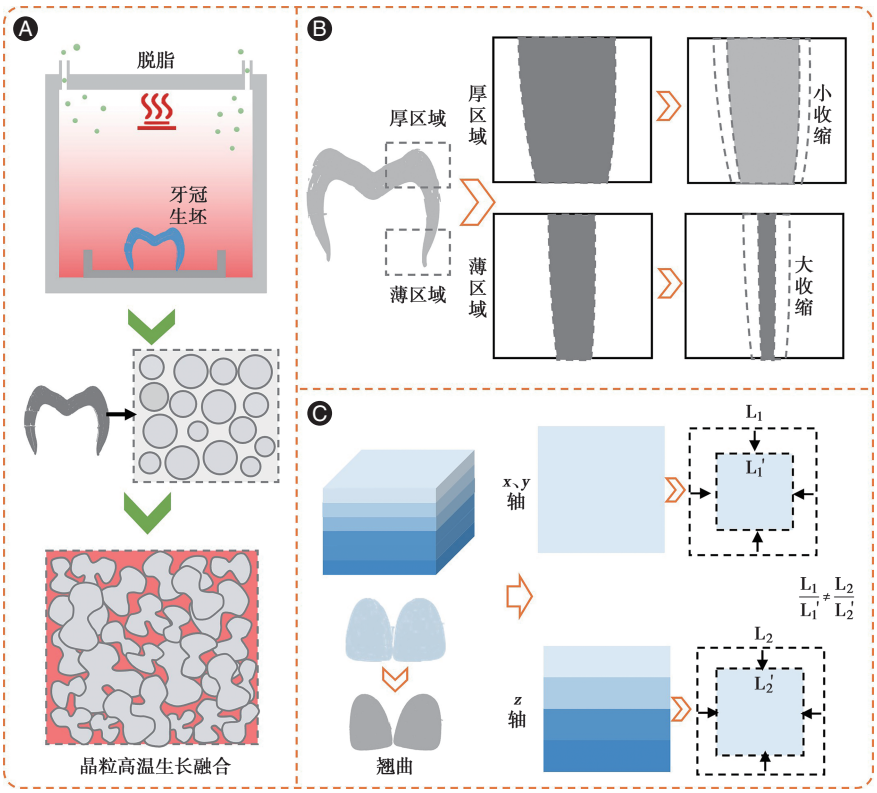

图3 高温热处理阶段全瓷修复体的非均匀形变机理 A:高温下陶瓷晶粒长大和致密化收缩;B:厚度变化引起的不均匀收缩;C:各向异性引起的不对称收缩。

带来的过固化尺寸偏差、结构厚薄不一引起的非均匀收缩，以及残余内应力导致的翘曲变形。

三、光固化全瓷修复体的线性形变补偿设计

1. 各向异性缩放因子算法设计：针对层层叠加引起全瓷修复体在x、y轴与z轴之间的各向异性收缩问题，传统的等比例放大算法仅设置单一的膨胀系数，无法补偿不同成型方向上的收缩差异。各向异性收缩因子算法通过解耦光固化全瓷修复体在不同坐标轴上的线性收缩率，在数字模型上分别为x、y、z轴引入3个独立的放大系数，实现非均匀预放大处理，以抵消各维度的收缩量。

近年来，相关研究通过量化陶瓷标准件烧结前后的尺寸演变规律，推导出各维度的独立缩放因子，有效提升了全瓷修复体的成型精度。Mohammed等[47]分析了固含量为85wt%的光固化氧化锆生坯的烧结收缩特性。研究结果表明生坯在x、y、z轴的平均收缩率分别为22.11%、22.51%和25.31%，其中z轴的收缩放大因子高达1.339。通过引入上述各向异性补偿因子，全瓷修复体的成型几何精度获得了显著提升。随着对成型精度要求的不断提升，各向异性收缩的复杂性也被进一步揭示。Zhao等[48]对光固化0.1 mm超薄氧化锆贴面进行了多因素精度分析。该研究不仅证实z轴因层间孔隙在烧结阶段存在最大的收缩比例(1.339～1.351)，更发现x、y平面内修复体内外表面的收缩率同样存在不对称性，其内表面的x、y收缩因子要高于外表面。这一现象主要归因于边界光散射效应，导致过固化区域不充分交联而降低了致密度，最终在烧结时引发更剧烈的体积收缩。

各向异性收缩因子算法虽能有效修正由结构各向异性引发的宏观尺寸偏差，却难以消除复杂内腔因内外表面收缩差异造成的边缘误差。此外，作为一种线性方法，该算法也无法应对模型厚薄不均引发的畸变，以及残余应力释放诱发的翘曲现象。因此，为实现全瓷修复体的高精度精准成型，亟需引入更高阶的非线性预变形补偿策略。

2. 基于光散射抑制的切片轮廓偏置算法设计：陶瓷颗粒引起的光散射现象会使实际固化区域超出数字掩膜的理论边界，直接影响成型修复体的边缘锐度，最终影响密合度与就位精度。针对此问题，基于光散射抑制的切片轮廓偏置算法提出了一种数字化预处理阶段的几何纠偏策略。该方法通过对各层二维切片外轮廓预先缩小特定的物理距离或像素数量，从而有效提升修复体在x、y平面的成型尺寸精度。

Yun等[49]深入剖析了光散射效应影响复杂轮廓精度的物理机制。研究结果表明，当曝光能量为60 mJ/cm^{2}时，陶瓷浆料在x、y平面的过固化尺寸高达530 μm；而当能量升至100 mJ/cm^{2}时，该尺寸误差更是突破了1 000 μm。针对这一显著的过固化现象，研究团队建立了基于等效曲率的逆向补偿公式($w_{ex}=\zeta^k\cdot w'_{ex}$)。该算法通过在切片投影面上对复杂轮廓实施反向偏置处理，有效消除了微孔与方孔结构的交联堵塞，实现了精细复杂特征的高保真成型。针对氧化锆牙冠的成型精度，Son等[50]量化分析了切片轮廓偏置算法的实际补偿效果。对比数据显示，经过该算法处理后，牙冠的边缘间隙较未偏置组缩减了约10 μm，咬合面间隙则由(141.9±20.2) μm降低至(80.3±28.4) μm。最终成型的牙冠综合适配间隙被精准控制在(86.5±17.4) μm，远低于临床公认的120 μm安全阈值。

尽管上述切片轮廓偏置算法能将x、y平面的全局误差控制在微米级别，但受限于修复体尖角、窝沟及平缓曲面等复杂解剖结构，其实际的光散射效应存在显著的不均匀性。因此，这种全局统一的偏置方法极易导致尖锐边缘的过度补偿，以及平缓区域的补偿不足。为克服这一局限，亟需在修复体数字模型中引入非线性预变形策略，以精准应对复杂形态下的非均匀畸变。

四、光固化全瓷修复体的非线性形变补偿设计

临床修复体的解剖形态具有高度的不规则性，如牙尖与窝沟区域较厚，冠边缘与颈缘区较薄。这种不规则会导致陶瓷生坯在高温烧结时产生局部致密化速率不匹配，进而引发非线性、非均匀的体积畸变。针对这一挑战，近年来研究人员尝试引入有限元分析与AI工具，探索修复体数字模型的非线性预变形补偿策略，进一步突破光固化全瓷修复体的成型精度瓶颈。

1. 基于有限元分析的反向预变形设计：基于有限元分析的逆向预变形设计，通过构建光固化3D打印全瓷修复体的烧结热力学模型，动态仿真其高温致密化过程中的体积收缩与残余应力释放行为。通过提取局部变形矢量，对修复体数字模型实施反向几何补偿，从而抵消热处理中发生的物理形变，实现复杂修复体的精准成型。

近些年，有研究学者详细量化并验证了有限元分析在复杂非线性形变预测与精度补偿中的表现。在微观烧结本构模型与体积预测方面，Puchakayla等[51]针对光固化3D打印氧化锆工艺建立了一套热弹-黏塑性的本构模型。复杂悬垂结构的烧结仿真结果表明预测的三维形变与实际结果保持高度一致，误差控制在1%左右，为光固化全瓷修复体反向预变形补偿设计提供重要参考。沿着这一思路，Hsu等[52]将有限元热力学模型直接应用在光固化全瓷修复体的精准成型上。其研究结果表明，仿真预测的修复体体积收缩率为53.74%，与实际烧结结果的偏差控制在5%以内。更关键的是，经过反向预变形补偿后，修复体的内部密合间隙成功控制在120 μm的标准以内，局部最小间隙低至50 μm。基于有限元分析的逆向预变形设计能从物理底层抑制非线性形变，实现修复体的高精度适配，但是该方法在光固化全瓷修复体的规模化应用中存在明显局限。有限元仿真面临着模型迭代成本高与求解周期漫长的困境。此外，物理仿真模型的预测精度高度依赖于稳定的浆料性能与烧结环境，难以应对实际生产中的变化。

2. 基于AI的非线性收缩模型补偿设计：与物理模型驱动的有限元分析不同，基于AI的非线性收缩补偿提供了一种数据驱动的智能化方案。该方法基于深度神经网络与卷积神经网络强大的多维非线性映射能力，通过对工艺数据的挖掘学习，提取光固化全瓷成型中复杂结构的局部非均匀收缩规律，进而实现高效的非线性形变预测与逆向几何预变形补偿。

现阶段,将AI非线性预测模型直接应用于光固化全瓷修复体尺寸补偿的研究尚处于起步阶段。在光固化全瓷修复体原型制造领域,Sharma等[53]引入人工神经网络(artificial neural network,ANN)、支持向量回归及随机森林等算法进行工艺优化,但其重点仍聚焦于通过调整层厚与打印角度来改善表面粗糙度,全瓷修复体烧结非线性形变补偿仍有待进一步探索。在光固化陶瓷增材制造体系中,基于AI的非线性收缩与尺寸偏差预测已取得实质性进展。Wang等[54]通过CNN方法,深入剖析了光固化氧化铝陶瓷在高温烧结下的各向异性尺寸形变。该研究团队基于半径为10 mm的实心圆柱体,通过CNN模型将预测泛化至带有复杂内外轮廓的环状组件。测试结果表明,CNN收缩预测模型与实际模型的均方根误差为0.009 848,均方误差为0.000 097,远低于传统的收缩预测方法。进一步地,Tarak等[55]综合运用ANN、决策树及Bagging/Stacking集成学习算法,对光固化氧化锆陶瓷的烧结收缩行为进行了量化分析。该研究选取内部填充拓扑结构(如蜂窝、方形和Gyroid等)、填充密度、层厚及打印角度等54组工艺特征作为输入变量,构建预测模型。结果表明由4节点神经网络与M5模型树构成的Stacking集成模型表现最优,其预测决定系数R^2高达0.9,平均绝对误差仅为0.339%。

综上所述,基于AI的非线性收缩预测模型在光固化陶瓷的形变预测与尺寸补偿中表现出优异的精度与计算效率,为未来光固化修复体的智能化预测变形设计奠定了技术基础。然而,如何将该非线性补偿算法向齿科临床制造领域转化,仍是未来该领域亟待突破的核心研究方向。

3. 抑制烧结形变的支撑结构设计:针对烧结形变的支撑结构设计,其核心策略在于为光固化成型的个性化修复体设计全包裹或多段式的保形支撑。该支撑结构不仅能在光交联阶段有效抵抗层间剥离力,更能在高温热处理过程中,为解剖形态不规则的陶瓷生坯提供稳固的物理约束,抑制修复体翘曲与非线性畸变。

近年的研究通过创新支撑结构构型,验证了其在抑制复杂形态翘曲、畸变的关键作用。针对易发生悬垂塌陷的复杂氧化锆固定桥,Lian等[56]设计了一种由顶部网格、中部圆锥与底部圆柱构成的三段式复合支撑。研究结果表明,在面临x、y平面25.2%、z轴28.6%的各向异性收缩下,该支撑结构能有效抑制冠桥的翘曲与扭曲,最终烧结样品的平均尺寸偏差被控制在150 μm以内,实现了复杂固定桥的高精度成型。此外,Li等[57]提出了一种咬合面全覆盖支撑策略,以优化光固化氧化锆单冠的烧结形貌。对比测试显示,相较于传统柱状支撑,咬合面支撑在高温阶段为薄壁颈缘提供了更为均匀的力学约束。最终成型修复体的边缘间隙为(66 ± 12) μm,轴向间隙为(90 ± 14) μm,三维均方根误差降低至(17.8 ± 3.3) μm,反映出优化的支撑结构可使其各项精度指标达到与传统切削相当的水平。

引入支撑结构能有效抑制全瓷修复体在烧结阶段的形变,但是这种依赖物理约束的支撑设计面临着过密的支撑阵列在烧结后难以去除干净,去除过程易引发修复体表面机械损伤或微裂纹,制造成本有所提高等问题。

五、挑战与展望

光固化3D打印技术在全瓷修复体的成型精度与复杂结构制造中表现出广阔的前景,且各类数字化预处理与形变补偿算法也取得显著进展。然而,这要从实验室走向规模化临床应用,仍存在着有待突破的关键技术瓶颈。

目前,基于3D-CNN、GAN等深度学习算法的修复体生成模型,多局限于缺损牙齿的静态三维形貌重构与几何特征匹配。然而,真实的口腔环境是一个复杂的动态力学系统。现有的AI设计策略并未考虑患者个性化咀嚼运动特征,以及修复体在长期咬合服役下的应力分布规律。因此,如何实现静态解剖数据与动态咀嚼行为的耦合,构建出动态生物力学驱动的智能化修复体设计模型,是未来亟需探索、突破的重要方向。在非线性形变补偿领域,有限元仿真虽然具有物理可解释性,但存在计算耗时长、成本高且对材料本构参数敏感等局限。与此同时,基于AI的收缩预测目前仅应用在简单规则的几何体,对于个性化、厚度非均匀全瓷修复体的AI预测模型仍属空白。未来有待深化产学研融合,构建涵盖单冠、多单位固定桥等各类修复体形态烧结数据集,推动AI预变形算法的落地应用。在支撑结构设计上,目前修复体的保形支撑结构高度依赖工程师的主观经验,面临着高材料冗余、后处理去除过程繁琐,且易诱发表面裂纹。因此,如何开发能够提供均匀力学约束,有效抑制高温翘曲,且易去除的智能化支撑自适应生成算法,是未来亟待探究的重要方向之一。

展望未来,随着AI驱动的修复体形态设计与非线性预变形补偿技术日益成熟,光固化3D打印技术必将加速个性化全瓷修复体的临床普及。这不仅全面赋能口腔数字化制造,而且为中国乃至全球的牙列缺损患者提供高效的诊疗方案。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 梁浩文:酝酿和设计实验、实施研究、起草文章;郭嘉文:分析解释数据、对文章的知识性内容作批评性审阅;古发辉:思路规划、研究指导;王童通:起草文章;孙进兴:研究指导、论文审阅

参 考 文 献

[1] 李婉昕,张照欣,李强. 牙齿缺失对吞咽功能影响的研究进展[J]. 国际口腔医学杂志, 2026,53(4):601-606. DOI:10.7518/gjkq.2026622.

[2] Atanda A J, Livinski A A, London S D, et al. Tooth retention, health, and quality of life in older adults: A scoping review [J]. BMC Oral Health, 2022,22(1):185. DOI:10.1186/s12903-022-02210-5.

[3] Sulaiman T A, Suliman A A, Abdulmajeed A A, et al. Zirconia restoration types, properties, tooth preparation design, and bonding. A narrative review [J]. J Esthet Restor Dent, 2024,36(1):78-84. DOI:10.1111/jerd.13151.

[4] 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. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230419.001.

[5] 施英统,郑雯雯,谢呵瀚,等. 光固化3D打印制备氧化锆陶瓷的工艺优化[J]. 耐火材料, 2026,60(1):25-30. DOI:10.3969/

j.issn.1001-1935.2026.01.005.

[6] 牛书鑫,丁宁,陈燕飞,等. 光固化3D打印陶瓷型芯的烧结工艺及结构性能调控[J]. 中国陶瓷, 2026,62(6):48-56. DOI:10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.2026.06.006.

[7] 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.

[8] 魏菱,邹东,陈虎,等. 一种数字化全口义齿的临床疗效评价[J]. 北京大学学报(医学版), 2020,52(4):762-770. DOI:10.19723/j.issn.1671-167X.2020.04.031.

[9] 周永胜,孙玉春,王勇. 数字化全口义齿的临床应用和研究进展[J]. 华西口腔医学杂志, 2021,39(1):1-8. DOI:10.7518/hxkq.2021.01.001.

[10] Vazzana A, Higgins O A, Oxilia G, et al. High-accuracy methodology for the integrative restoration of archaeological teeth by using reverse engineering techniques and rapid prototyping [J]. J Archaeol Sci Rep, 2022(44):103511. DOI:10.1016/j.jasrep.2022.103511.

[11] Janda M, Mattheos N. Prosthetic design and choice of components for maintenance of optimal peri-implant health: A comprehensive review [J]. Br Dent J, 2024,236(10):765-771. DOI:10.1038/s41415-024-7357-0.

[12] 邓珂慧,李明星,毛英杰,等. 无牙颌软组织口内扫描的研究应用进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2024,59(10):1070-1074. DOI:10.3760/cma.j.cn112144-20240309-00105.

[13] Lin Y, Liu F, Zhang L, et al. Achieving high-strength, high-porosity and relatively low-shrinkage in extrusion-based 3D printed ZrO_2 ceramics by adjusting $CaCO_3$ addition and sintering temperature [J]. J Alloys Compd, 2024(1008):176809. DOI:10.1016/j.jallcom.2024.176809.

[14] Liu S, Li Q, Qu B, et al. Cooperative control of sintering shrinkage and strength of stereolithography 3D printed silica-based ceramic cores [J]. Ceramics International, 2025,51(14):19435-19448. DOI:10.1016/j.ceramint.2025.02.120.

[15] Ausiello P, Dal Piva A M D O, Borges A L S, et al. Effect of Shrinking and no shrinking dentine and enamel replacing materials in posterior restoration: A 3D-FEA study [J]. Appl Sci Switz, 2021,11(5):2215. DOI:10.3390/app11052215.

[16] 李骋,陈虎,王勇,等. 人工神经网络对口腔三维解剖特征分割与识别的研究进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2022,57(5):540-546. DOI:10.3760/cma.j.cn112144-20210703-00313.

[17] 孙玉春,李骋,陈虎. 人工智能翻开口腔医学新篇章[J]. 现代口腔医学杂志, 2022,36(6):361-364.

[18] Zhu H, Jiang J, Wang Y, et al. Additive manufacturing of dental ceramics in prosthodontics: The status quo and the future [J]. J Prosthodont Res, 2024,68(3):380-399. DOI:10.2186/JPR.JPR_D_23_00119.

[19] Sokolowski A, Huber S, Arefnia B, et al. The influence of prosthetic treatments and implant-supported prostheses on posterior mandibular ridge atrophy: A retrospective cohort study [J]. BMC Oral Health, 2025,25(1):100. DOI:10.1186/s12903-025-05467-8.

[20] Sengottaiyan A K, Bennani V, Veerasamy A. Influence of tooth preparation design on margin discrepancy and internal gap in digitally fabricated fixed complete coverage zirconia prostheses: A systematic review of *in vitro* studies [J]. J Prosthet Dent, 2025,134(3):616-627. DOI:10.1016/j.prosdent.2025.04.030.

[21] Zhao L, Jiang Z, Ma S, et al. Theoretical model based on stress waves and experimental verification of residual stress in stereolithography printed ZrO_2 porous ceramics [J]. Ceram Int, 2022,48(16):23983-23988. DOI:10.1016/j.ceramint.2022.05.073.

[22] Revilla-León M, Gómez-Polo M, Vyas S, et al. Artificial intelligence models for tooth-supported fixed and removable prosthodontics: A systematic review [J]. J Prosthet Dent, 2023,129(2):276-292. DOI:10.1016/j.prosdent.2021.06.001.

[23] Dawood E A, van Aelst S, Elgarba B M, et al. Mapping the artificial intelligence role in the design of digital prosthetics: A scoping review [J]. Digital Dent J, 2026,3(1):100069. DOI:10.1016/j.ddj.2026.100069.

[24] Li B, Yang Y T, Capra J A, et al. Predicting changes in protein thermodynamic stability upon point mutation with deep 3D convolutional neural networks [J]. PLoS Comput Biol, 2020,16(11):e1008291. DOI:10.1371/journal.pcbi.1008291.

[25] Farook T H, Ahmed S, Jamayet N B, et al. Computer-aided design and 3-dimensional artificial/convolutional neural network for digital partial dental crown synthesis and validation [J]. Sci Rep, 2023,13(1):1561. DOI:10.1038/s41598-023-28442-1.

[26] Chen Y C, Wang K H, Lin C L. Personalized prosthesis design in all-on-4® treatment through deep learning-accelerated structural optimization [J]. J Dent Sci, 2024,19(4):2140-2149. DOI:10.1016/j.jds.2024.03.017.

[27] Shu D, Cunningham J, Stump G, et al. 3D design using generative adversarial networks and physics-based validation [J]. J Mech Des, 2019,142(7):071701. DOI:10.1115/1.4045419.

[28] Chau R C W, Hsung R T C, Mcgrath C, et al. Accuracy of artificial intelligence-designed single-molar dental prostheses: A feasibility study [J]. J Prosthet Dent, 2024,131(6):1111-1117. DOI:10.1016/j.prosdent.2022.12.004.

[29] Ding H, Cui Z, Maghami E, et al. Morphology and mechanical performance of dental crown designed by 3D-DCGAN [J]. Dent Mater, 2023,39(3):320-332. DOI:10.1016/j.dental.2023.02.001.

[30] Hosseinimanesh G, Alsheghri A, Keren J, et al. Personalized dental crown design: A point-to-mesh completion network [J]. Med Image Anal, 2025(101):103439. DOI:10.1016/j.media.2024.103439.

[31] Zheng S, Qiu L, Lan F, TSO-GCN: A Graph Convolutional Network approach for real-time and generalizable truss structural optimization [J]. Appl Soft Comput, 2023(134):110015. DOI:10.1016/j.asoc.2023.110015.

[32] Hu Y, Shi Y, Li H, et al. A self-supervised framework for mesh denoising using graph neural networks in dental applications [J]. Appl Soft Comput, 2025(185):113989. DOI:10.1016/j.asoc.2025.113989.

[33] Liu M, Li X, Liu J, et al. TUCNet: A channel and spatial

attention-based graph convolutional network for teeth upsampling and completion [J]. Comput Biol Med, 2023(166): 107519. DOI:10.1016/j.compbiomed.2023.107519.

[34] Zhao D, Su H, Hu K, et al. Formation mechanism and controlling strategy of lamellar structure in 3D printed alumina ceramics by digital light processing [J]. Addit Manuf, 2022(52): 102650. DOI:10.1016/j.addma.2022.102650.

[35] Xu Y, Yang Z, Huang G, et al. Size shrinkage and compressive behaviour of Al_2O_3 honeycomb structures fabricated via Digital Light Processing technology [J]. Ceram Int, 2024, 50(22): 45713-45722. DOI:10.1016/j.ceramint.2024.08.412.

[36] Kim I, Yoon Y J. Digital light processing 3D printing of porous ceramics: A systematic analysis from a debinding perspective [J]. Addit Manuf, 2024(93): 104409. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104409.

[37] Zhang K, Meng Q, Qu Z, et al. A systematic insight into the DLP process of additive manufactured Al_2O_3 ceramic green body [J]. Ceram Int, 2026, 52(7): 8464-8470. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.01.043.

[38] Li X, Li J, Niu S, et al. Regulation of anisotropy in vat photopolymerization of silica-based ceramic cores based on particle grading [J]. Ceram Int, 2025, 51(27): 52768-52776. DOI:10.1016/j.ceramint.2025.09.036.

[39] Soon C W, Leong C K J, Ho T Y K, et al. Mitigation of warpage in stereolithography 3D printed ceramics via addition of sterically bulky acrylate monomer [J]. J Am Ceram Soc, 2026, 109(1): e70266. DOI:10.1111/jace.70266.

[40] Yu L, Ren Z, Qiao Z. Advanced ceramics via digital light processing: Performance enhancement and potential applications [J]. J Am Ceram Soc, 2025, 108(11): e70062. DOI: 10.1111/jace.70062.

[41] Dong Y, Dong T, Yang Z, et al. The influences of light scattering on digital light processing high-resolution ceramic additive manufacturing [J]. Ceram Int, 2024, 50(6): 9556-9562. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.12.274.

[42] Yu X, Wang Z, Wang Y, et al. Optimization, formation, and evolution of the photoinduced curing gradients and in-situ lamellar gaps in additive manufacturing of ZrO_2 ceramics: From curing to sintering behaviors [J]. J Eur Ceram Soc, 2023, 43(14): 6279-6295. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.055.

[43] Anil A, Nadimpalli R. Toward predictive dimensional accuracy in DLP-fabricated alumina lattices: Volumetric error and shrinkage control [J]. ACS Omega, 2026, 11(12): 18760-18777. DOI:10.1021/acsomega.5c09707.

[44] Liu Y, Yuan S, Niu P, et al. Multi-dimensional optimization of slurry and synergistic suppression of interlayer cracking by layer thickness in DLP 3D printing silica-based ceramic cores [J]. Ceram Int, 2025,51(26):48037-48051. DOI:10.1016/j.ceramint.2025.08.064.

[45] Santoliquido O, Camerota F, Ortona A. The influence of topology on DLP 3D printing, debinding and sintering of ceramic periodic architectures designed to replace bulky components [J]. Open Ceram, 2021(5): 100059. DOI:10.1016/j.oceram.2021.100059.

[46] Fan J, Xu X, Niu S, et al. Anisotropy management on microstructure and mechanical property in 3D printing of silica-based ceramic cores [J]. J Eur Ceram Soc, 2022,42(10):4388-4395. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2022.03.059.

[47] Mohammed M K, Alahmari A, Alkhalefah H, et al. Evaluation of zirconia ceramics fabricated through DLP 3D printing process for dental applications [J]. Heliyon, 2024, 10(17): e36725. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e36725.

[48] Zhao W, Singh P, Han J, et al. Precision-optimized process control in DLP printing of ultra-thin zirconia prostheses: A multi-factor accuracy analysis [J]. Dent Mater, 2025,41(12):1609-1619. DOI:10.1016/j.dental.2025.08.019.

[49] Yun Y, Deqiao X, Chen J, et al. Mechanism of ceramic slurry light scattering affecting contour accuracy and method of projection plane correction [J]. Ceram Int, 2023,49(10):15024-15033. DOI:10.1016/j.ceramint.2023.01.085.

[50] Son K, Lee J M, Jang K J, et al. Effect of pixel offset adjustments for XY Plane dimensional compensation in digital light processing 3D Printing on the surface trueness and fit of zirconia crowns [J]. J Funct Biomater, 2025,16(3):103. DOI: 10.3390/jfb16030103.

[51] Puchakayla P K R, Gandhi P, Singh G. Digital light processing based additive manufacturing of 3-YSZ: A constitutive modeling driven finite element analysis for sintering shrinkage and deformation [J]. J Manuf Process, 2025(156): 711-726. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.10.086.

[52] Hsu H J, Lee S Y, Chang S L, et al. Shrinkage prediction using finite element analysis and experimental validation using three-dimension slurry printing system [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2017,91(1):1289-1296. DOI:10.1007/s00170-016-9842-3.

[53] Sharma A, Saini R S, Kaushik A, et al. Machine learning based approach for surface roughness prediction in precision dental prototyping [J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 32239. DOI: 10.1038/s41598-025-17487-z.

[54] Wang Y, Wang Z, Yu X, et al. Predicting dimensional deviation for sintering-induced shrinkage of Al_2O_3 ceramics manufactured by vat photopolymerization: Using convolutional neural network [J]. Mater Today Commun, 2023(37): 107309. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107309.

[55] Tarak F. AI-Assisted AM for dimensionally accurate ceramic vat-photopolymerisation[D]. Loughborough: Loughborough University, 2026. DOI:10.26174/thesis.lboro.31347844.

[56] Lian Q, Wu X, Li D, et al. Accurate printing of a zirconia molar crown bridge using three-part auxiliary supports and ceramic mask projection stereolithography [J]. Ceram Int, 2019,45(15): 18814-18822. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.06.111.

[57] Li R, Xu T, Wang Y, et al. Accuracy of zirconia crowns manufactured by stereolithography with an occlusal full-supporting structure: An *in vitro* study [J]. J Prosthet Dent, 2023,130(6):902-907. DOI:10.1016/j.prosdent.2022.01.015.

(收稿日期:2026-06-27)

(本文编辑:王嫚)