

·综述·

计算机辅助设计与制作一体化纤维桩核的研究进展

阿依宝塔·沙那别克 赵煜

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

通信作者: 赵煜, Email: zhaoyu5@mail.sysu.edu.cn

【摘要】 桩核冠修复是根管治疗后大面积牙体缺损常用的一种修复方式。目前临床常用的桩核修复体为预成纤维桩与树脂核、金属铸造桩核, 它们在修复过程中既有优势也有一定的局限性。随着口腔数字化技术的迅速发展, 计算机辅助设计与制作(CAD/CAM)一体化纤维桩核逐渐成为一种新的修复选择。为此本文对CAD/CAM一体化纤维桩核的材料、相关性能、临床应用等方面进行综述, 旨在为临床规范应用提供参考。

【关键词】 一体化纤维桩核; 计算机辅助设计与制作; 纤维增强树脂; 桩核修复体; 根管治疗后牙齿

基金项目: 广东省卫生健康适宜技术推广项目(202303201139365394、202405261722413402、202507130030435429)

引用著录格式: 阿依宝塔·沙那别克, 赵煜. 计算机辅助设计与制作一体化纤维桩核的研究进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2026, 20(2): 149-156.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.02.010

Research progress of CAD/CAM integrated fiber post-and-core

Ayibaota Shanabieke, Zhao Yu

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

Corresponding author: Zhao Yu, Email: zhaoyu5@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 The post-and-core crown is a widely accepted method to restore endodontically treated teeth with compromised tooth structure. Currently, cast metal post-and-core systems and prefabricated fiber posts are the most frequently options in dental clinical practice, but both also come with advantages and limitations. The development of computer aided design and computer aided manufacturing (CAD/CAM) custom fiber post-and-core represents one of the significant choices in the advancement of post-core restoration material. Therefore, this review evaluates the progress of post-and-core restoration using CAD/CAM integrated fiber post-and-core from the aspects of material, properties and clinical application, so as to provide reference for its extensive application in the future.

【Key words】 One-piece fiber-post-and-core; Computer aided design and computer aided manufacturing (CAD/CAM); Fiber-reinforced composite; Post-and-core; Endodontically treated teeth

Fund programs: Health Appropriate Technology Promotion Project of Guangdong Province (202303201139365394, 202405261722413402, 202507130030435429)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.02.010

根管治疗后患牙因牙体组织大面积缺损, 脆性明显高于活髓牙, 且更容易发生折裂^[1], 恢复其形态和功能是目前口腔修复的主要任务。由于剩余牙体组织过少, 通常会选择桩核修复体来提高其固位力和支持力^[1-2]。目前, 临床上常用于修复牙体缺损的桩核是铸造金属桩核和预成纤维桩加树脂核。传统的铸造金属桩核是临床上经典的桩核修复体, 具有密合性好, 强度较高等优点^[3-4]。但是, 其弹性模量显著高于牙本质, 且存在美观性差、干扰核磁共振成像、生物相容性不佳(金属离子析出)和再治疗困难等缺点^[5-6], 故临床应用逐渐减少。与铸造金属桩相比, 纤维桩克服了上述缺点, 不仅弹性模量与牙本质接近, 而且美观性能好, 无腐蚀性, 也不影响影像学检查, 具有良好生物相容性和可再修复的优点。但是, 由于商品化的预成纤维桩规格统一^[7], 与根管形态适配性差, 增加了脱落的可能性。同时, 难以通过其改变牙冠的长轴方向而纠正倾斜的牙齿^[8], 影响修复效果。另外, 预成纤维桩与树脂核之间存在结合力低的粘接界面, 树脂核受到较大力时可能碎裂导致全冠脱落^[9]。近年来, 随着数字化技术和材料学的快速发展, 计算机辅助设计及制作(computer aided design/computer aided manufacturing, CAD/CAM)一体化纤维桩核逐渐成为一种新的修复选择, 它综合了铸造金属桩核个性化的优点和纤维桩良好的生物学和美学特性。本文就CAD/CAM一体化纤维桩核的材料特点、相关性能和临床应用等研究进展作一综述, 旨在为临床规范应用提供参考。

一、计算机辅助设计及制作一体化纤维桩核概述

1. CAD/CAM一体化纤维桩核定义: CAD/CAM一体化纤维桩核定义是指通过CAD/CAM技术, 利用纤维增强树脂材料数字化切削一体化成形的桩核修复体^[3]。它结合了传统铸造金属桩核与根管适合性高及预成纤维桩核弹性模量接近天然牙本质的优势, 还有效弥补了两者的不足。

2. CAD/CAM一体化纤维桩核材料:用于CAD/CAM一体化纤维桩核的材料,需要同时满足与牙本质相近的弹性模量、高强度、优良的粘接性能,以及出色的可切削性和精度等要求。目前,主流的桩核材料可以分为以下几大类:纤维增强树脂基复合材料、聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)及其复合材料、氧化锆陶瓷、金属等。氧化锆陶瓷、金属的弹性模量远大于牙本质,易造成根折,进而导致修复失败,故临床应用相对较少^[10-11]。在临床应用中开始崭露头角的新型材料PEEK及其复合材料,凭借优良的力学性能、生物相容性、可塑性等诸多优点逐渐引起更多学者的关注与研究^[5,12]。虽然其实验数据和临床应用显示其具备理想桩核材料的要求,但目前还有很多尚待解决的问题,加工工艺也正处于发展中,3D打印设备及打印过程对PEEK及复合材料性能是否存在影响尚缺乏报道,因此还需要进一步体内体外实验来研究其桩核修复功效^[5,13]。纤维增强树脂基复合材料是目前最主流、应用最广泛的一类材料^[4],接下来将主要讨论纤维增强树脂基复合材料的组成、结构及其性能。

纤维增强树脂基复合材料是一种由树脂基体与增强纤维共混而成的新型牙科材料^[6],逐渐取代了传统的修复材料。

(1)组成:多向纤维增强树脂基复合材料是制备CAD/CAM一体化纤维桩核常用的材料。其主要成分包括纤维和树脂基体^[14-16]。其中,纤维为碳纤维、玻璃纤维、石英纤维、芳纶纤维和陶瓷纤维中的一种或者两种以上的混杂纤维。树脂基体为环氧树脂(拉挤成型)或双酚A双甲基丙烯酸缩水甘油酯(光固化预浸料)^[17]。纤维的体积分数为45%~65%^[18]。纤维增强复合树脂的横切面纤维排列分布均匀,与树脂基体展现出良好的浸渍^[19]。

(2)结构:多向纤维增强树脂基复合材料为圆形或方形截面的坯体成型加工而成。坯体截面结构中心部分为沿坯体长度方向的单向纤维增强区域,截面外围环状部分为采用表面毡或者无纺布形成的多向纤维增强区域^[20],坯体截面中心部分的直径与外围部分的直径比为0.5~1.0^[18]。纤维增强方式由以前单一的单向纤维(沿长度方向排列)变为单向纤维与多向纤维(表面毡或无纺布)结合^[20]。在口腔环境中牙齿承受的咀嚼力是来自多方向的。虽然单向纤维在单一方向上可提供最大增强效果,但是难以满足多方向受力均匀的要求,且难以保证一体化桩核边缘薄弱部位的完整性。而单向纤维与多向纤维结合在受力方向不明确时更具优势,能更好地传递咀嚼应力^[6,20]。Liu等^[21]于2010年成功研发出一种适用CAD/CAM切削加工的多向纤维增强树脂基复合材料,为口腔修复体的精密、高效制造提供了创新的材料解决方案。图1为临床上常用的CAD/CAM切削加工纤维增强树脂材料。

(3)性能:多向玻璃纤维增强复合材料是集优越的机械性能、生物相容性与美观于一体的新型修复材料,满足临床使用时对一体化桩核多方受力的要求^[15]。多向玻璃纤维增强复合材料具有良好的机械性能,其强度、刚度和韧性优异^[6,22];弹性模量与牙本质接近,利于应力均匀分布^[6,15];玻璃纤维折射率与树脂相近,可实现高效光传导,可有效保证

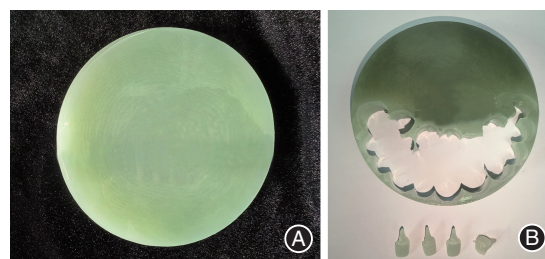


图1 用于计算机辅助设计与制作(CAD/CAM)切削加工的纤维增强树脂材料 A:圆盘型坯体,尺寸为98 mm×20 mm(直径×高度); B:由坯体切削制作而成的一体化纤维桩核。

根管内树脂粘接剂充分固化,形成良好的粘接界面^[23-24];与牙本质、釉质等天然牙体组织相比,纤维增强材料对变异链球菌的微生物黏附性更低,抗菌性更好,生物相容性强^[6]。通过杨艳阳等^[20]实验发现,多向玻璃纤维增强复合材料制备的一体化桩核整体受力更加均匀,且其切剖面相对整齐、光滑,桩体和核体部分结合情况明显优于单向纤维复合材料一体化桩核。由此可以认为,采用多向纤维增强复合材料制备的一体化纤维桩核不仅能显著改善桩、核和牙根的应力分布从而可以承受更多的咀嚼力,还可以保证薄弱环节的成型质量,降低牙根和牙冠折裂的风险,满足一体化桩核的精确化和个性化成型^[16,25]。

除了多向玻璃纤维增强复合材料,在口腔修复及其他高要求领域,主要的纤维增强复合材料还包括碳纤维增强复合材料、石英纤维增强复合材料、超高分子量聚乙烯纤维和蚕丝蛋白纤维。①碳纤维增强复合材料:具有出色的比强度、比模量(即单位重量下的强度和刚度)、耐疲劳和耐腐蚀等特性,被广泛用作工程结构材料^[26]。在口腔修复中,它常与高性能聚合物基体(如PEEK)结合,现出优异的生物力学性能^[27]。②石英纤维增强复合材料:其纤维核心成分为高纯度二氧化硅($\text{SiO}_2 > 99.9\%$)^[28],以环氧或甲基丙烯酸酯树脂为基体,通过硅烷偶联界面层形成的一种纤维增强树脂基复合材料。具有优异的光学性能、良好的力学性能^[28-29]及生物相容性稳定,适用于对美学要求极高的前牙修复^[30]。③超高分子量聚乙烯纤维:又被称为聚乙烯纤维,Ribbon带状纤维作为最常用的聚乙烯纤维,具有美观、生物相容性好、能够改善材料抗折强度和挠曲强度等特点^[31]。研究证实,使用聚乙烯纤维增强的复合树脂修复乳磨牙Ⅱ类洞,能显著提高修复体的抗折强度,并改善边缘封闭性,为乳牙的高质量修复提供了方案^[32]。④蚕丝蛋白纤维:凭借其优异的生物相容性、可控降解性和力学适应性,其在口腔医学中的运用主要集中于组织再生与修复领域,例如骨组织工程支架和牙周组织再生等^[33-35]。

二、计算机辅助设计及制作一体化纤维桩核数据获取方法

与传统铸造桩核一样,CAD/CAM桩核的设计流程包括间接技术及直接技术^[1]。

1. 间接技术:间接技术指的是在完善根管治疗后的牙齿行桩道预备,先制取硅橡胶印模、灌注石膏模型制作蜡型,再

通过光学扫描将桩道及牙体或桩核形态转化为三维数据,指导切削机加工纤维增强复合树脂块制作一体化纤维桩核^[36-37]。扫描方式具体包括印模扫描法、石膏模型扫描法和桩核蜡型扫描法等。印模扫描是直接扫描传统印模获取三维数据^[17];石膏模型扫描则是通过扫描石膏模型获取桩道及牙体形态数据;而桩核蜡型扫描是在石膏模型上制作桩核蜡型后扫描获取桩核形态数据^[3]。间接技术是在印模制取和翻制石膏模型的基础上进行,虽然获得的数字印模的精度与传统印模几乎没有差别,但印模或石膏模型本身带来的误差却无法忽略^[1,38]。

2. 直接技术:直接技术是指利用口内扫描仪等光学扫描设备,在根管治疗或桩道预备后,将患者的口腔内部结构以数字形式记录下来,生成三维(three-dimension, 3D)模型的过程^[37,39]。完成扫描之后,将获得的模型数据导入技工室CAD软件,设计形成一体化纤维桩核三维模型数据,再将桩核数据传输至同一高精度CAM数控加工中心^[40],通过切削玻璃纤维树脂块加工出个性化一体化玻璃纤维桩核。直接技术扫描桩道有效减少了使用传统印模材料、石膏模型以及蜡型所产生的误差^[1,37,41],提高临床诊疗的时效性和精度,还有效避免了取模时患者对印模材料产生的恶心不适、误食等现象,提升患者的诊疗体验^[38-39],对于临床操作来说是一个更好的替代方案。

3. 直接和间接技术相比较:Moustapha等^[42]评估直接和间接数字化技术制备的个性化桩核的适应性差异。结果表明,与模型或印模的间接数字化相比,使用口内扫描仪的直接数字化工作流程具有更好的适应性。Alhasher等^[43]研究表明,采用口腔内扫描直接获取数据制作修复体的方法为传统方法提供了可靠的替代方案。因此,在未来口腔临床修复操作中,临床医师可以优先考虑直接技术。此外,Vogler等^[44]认为,相比传统铸造和预成纤维桩,数字化流程(口内扫

描+CAD/CAM设计制作)制备的桩核印模精度更高、操作更简便。可以认为,直接数字化技术在CAD/CAM一体化纤维桩核数据获取方面更具有优势,获取的数据更加精确,且有效减少误差和缩短操作时间。有学者通过选择直接扫描桩道、扫描聚醚印模以及扫描石膏模型3种方式获取数据来制备桩核,然后分别评估3种方式制备的CAD/CAM桩核的桩保留度、粘接层厚度和微渗漏情况,结果发现采用直接扫描技术制备的桩核的保存率最高,而粘接剂厚度和微渗漏量则基本相似^[45]。结果证明,直接技术相对于间接技术来说,有效提高了数据的精度和适合度,减少脱粘接率,降低修复失败的风险,这在口腔临床修复中意义重大。

值得注意的是,虽然直接数字化技术比间接技术有优势,但在桩核扫描过程中,剩余牙冠组织对光线的阻挡,以及细长桩道对光线直射及返回接收的影响,是光学印模采集的一个难点。有学者通过体外实验,采用数字方法评估了直接口内扫描仪在不同桩道长度(6、8和10 mm)下的准确性,评估在根颈、根中和根尖部1/3区域扫描的准确性;结果表明,在根颈和根中1/3区域,各组间精度无显著差异;然而在根尖1/3区域,10 mm组的精度($163\text{ }\mu\text{m}$)显著低于6 mm($96\text{ }\mu\text{m}$)和8 mm($131\text{ }\mu\text{m}$)组;这表明根颈和根中区域的扫描精度在不同桩道长度下保持一致,而根尖区域的精度随桩道长度增加明显下降^[46]。因此,建议当制备的桩深 $\leq 8\text{ mm}$ 时,可使用口内扫描仪进行椅旁数字化取模;若需更深桩道,仍建议传统印模或结合实验室扫描。图2为一体化纤维桩核及修复流程。

三、计算机辅助设计及制作一体化纤维桩核性能

1. 弹性模量:弹性模量是评价桩核材料力学性能的关键指标之一,直接影响桩核修复体和根管在功能负载下的应力分布。理想的桩核材料弹性模量应该接近天然牙本质,以促进桩-核-粘接剂-牙本质复合体间应力均匀分布,避免应力集中于剩余牙体组织,从而减少根折的风险^[4,7,11]。

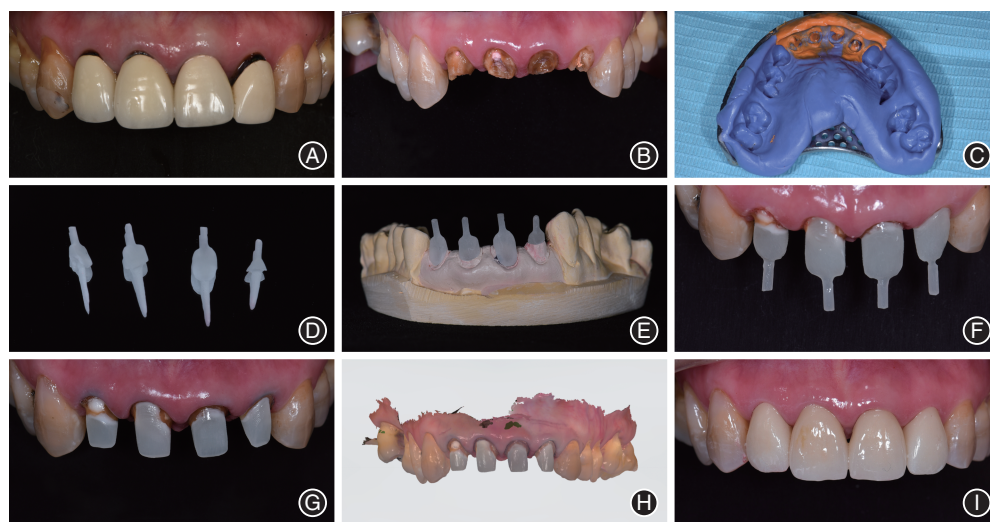


图2 一体化纤维桩核及修复流程 A:修复前口内情况;B:牙体和根管预备后;C:制取硅橡胶印模;D:一体化纤维桩核切削完成;E:在石膏模型上检查桩核密合度;F:临床试戴,确认就位情况;G:使用双固化树脂水门汀粘接固位,并按全瓷冠预备标准完成牙体预备;H:牙体预备口扫;I:全瓷冠试戴,完成修复。

天然牙本质弹性模量为 18.6 GPa, 钴铬合金、金合金、氧化锆和纯钛等材料的弹性模量显著高于牙本质^[5,11-12]。这种力学性能的较大差异, 易造成桩核及根管的应力集中, 造成患牙根折等问题。相对于金属桩和氧化锆瓷桩, 纤维增强树脂的弹性模量约为 25 ~ 40 GPa^[4-5,47-48], 与牙本质弹性模量相近^[7], 有利于应力在牙根的均匀分布, 提高整体的抗力性能, 降低根折的风险, 达到理想的修复效果。不同材料的弹性模量如表 1 所示^[4-5,12,49]。

表 1 不同材料的弹性模量和泊松比

材料	弹性模量(GPa)	泊松比	文献
天然牙本质	18.6	0.31	白云洋等 ^[4]
玻璃纤维增强树脂	25 ~ 40	0.28 ~ 0.3	白云洋等 ^[4]
钴铬合金	218	0.33	谭颖等 ^[12]
金合金	95	0.33	谭颖等 ^[12]
氧化锆	100 ~ 250	0.22 ~ 0.32	徐良伟等 ^[49]
纯钛	100 ~ 120	0.30	白云洋等 ^[4]
纯聚醚醚酮	3 ~ 4	0.36	白云洋等 ^[4]
30%碳纤维增强型聚醚醚酮	18	0.39	刘杨等 ^[5]

此外, 在临床应用中处于初步阶段的 PEEK 及其复合材料具有良好的力学性能。纯 PEEK 的弹性模量为 3.0 ~ 4.0 GPa, 经过碳纤维加强的 PEEK 弹性模量为 18.0 GPa, 更接近牙本质的弹性模量^[5,50]。研究发现, 碳纤维增强型 PEEK 桩在牙本质中产生的应力更小, 可以提高桩核修复的成功率^[51]。碳纤维增强型复合材料桩虽然因其优异的力学性能展现出广阔的临床应用前景, 值得深入研究^[52], 但材料本身的高熔点、半结晶性等特性也带来了诸多亟待解决的关键问题^[13]。

有学者对传统玻璃纤维桩、预成玻璃纤维桩加树脂核、CAD/CAM 一体化纤维桩核在弯曲强度和根内应力分布方面的性能进行研究。传统玻璃纤维桩的处理为: 在纤维桩表面进行处理后, 于根管及桩体涂布粘接剂, 随后将树脂水门汀注入根管, 插入玻璃纤维桩并光固化; 预制玻璃纤维桩加树脂核处理为: 对纤维桩硅烷化处理后, 用复合树脂包绕, 置入根管; 取出确保完全固化后, 在根管内涂布粘接剂, 并使用双固化树脂水门汀完成最终粘接; CAD/CAM 一体化纤维桩核: 用 CAD/CAM 系统生成一体化纤维桩核后使用双固化树脂水门汀完成粘接。结果发现, CAD/CAM 一体化纤维桩核的弹性模量最低, 应力分布更均匀^[14]。CAD/CAM 一体化纤维桩核是采用弹性模量接近牙本质的纤维增强复合树脂材料制备而成(31.7 ~ 32.7 GPa), 应力分布均匀; 一体化的制备使得桩核弹性模量一致, 减少粘接界面, 不存在桩与核之间弹性模量的差异, 是均质低弹性模量的材料, 有效避免在口内咀嚼过程中产生应力集中从而导致根折的发生; 个性化的设计可以获得理想的根管匹配性, 提高根管和桩核的密合性, 提高桩的固位力, 延长修复体的使用寿命, 具有独特的优势^[7,15]。

在过度负荷下, 桩核系统修复的根管治疗牙可能发生牙折。根据折裂发生的位置, 其失效模式可分为两类: 当折裂

发生在核与桩或釉牙骨质界冠方牙体组织时, 认为是可修复失效; 当牙折发生在釉牙骨质界根方牙体组织时, 包括垂直、水平或斜向根折, 则认为是不可修复失效^[2,12]。

Seckler 等^[53]分别用预成玻璃纤维桩加复合树脂核、铸造金属桩核、CAD/CAM 一体化纤维桩核修复根管治疗后的下颌前磨牙, 为研究在机械负载下的 3 种桩核的抗折性能与失效模式差异。所有样本经热机械循环(模拟 1 年咀嚼)及 45°角压缩测试至断裂, 接着在牙科手术显微镜下对失效模式进行分类, 结果发现: 铸造金属桩核 80% 为牙体折裂(不可修复失效); CAD/CAM 一体化纤维桩核 50% 为粘接失效, 50% 为核断裂(均为可修复失效), 无牙根折裂; 预成玻璃纤维桩加复合树脂核为 100% 核断裂(可修复失效)。弹性模量低的桩材料能将咬合力更均匀地分布在牙根, 并将最大应力传递至牙颈部骨水平以上^[12]。这一力学特征有助于减少根部牙本质的应力集中, 减少根折的风险。并在过大力量作用下以可修复失效为主, 为修复体后期再治疗提供了可能性^[12]。

有学者认为纤维桩较低的弹性模量并不完全是优点^[54]。弹性模量与刚度是成正比^[11]。如果桩的刚度较低, 那么当桩在反复加载后容易发生变形, 在根颈处就会容易形成高应力断裂带^[55]。同时, 桩会在侧向力作用时出现轻微动度, 而使牙冠边缘的粘接层应力集中, 从而导致牙冠的边缘封闭出现破坏, 最后导致继发龋或脱粘接^[56-57]。

2. 抗折强度(弯曲强度): 抗折强度会直接影响到修复体的耐用性和临床效果, 而静态的断裂负荷试验和疲劳试验是目前评价桩核修复体抗折强度的常用方法^[12]。Pang 等^[57]分别对根管治疗牙进行 CAD/CAM 一体化纤维桩核、预成纤维桩加树脂核及铸造合金桩核的修复, 观察他们的抗折强度。结果发现, CAD/CAM 一体化纤维桩核的抗折力值显著高于预成玻璃纤维桩, 而与铸造合金桩核组之间差异无统计学意义, 这与刘鹏等^[9]的研究结果一致。有研究表明, 材料的弹性模量会影响修复体的抗折强度^[58-59]。CAD/CAM 一体化纤维桩核弹性模量与牙本质相近, 因此其根管内应力分布更均匀, 有效避免应力集中。不仅提高抗折强度, 而且规避了金属材料的不足, 是一种具有良好前景的修复材料。

李智等^[56]的研究证实 CAD/CAM 一体化玻璃纤维桩核修复漏斗状根管时, 其抗折表现与铸造合金桩核一致。提示其在复杂根管形态中具有较好的应用潜力。CAD/CAM 一体化玻璃纤维桩核通过个性化设计, 使其能精确适配漏斗状根管的特殊形态。其与牙本质相近的弹性模量及与根管壁的高度贴合, 不仅提高了桩核的自身强度还可以减少粘接界面, 使应力分布更均匀从而进一步改善抗疲劳性能和整体抗折强度^[56], 尤其适用于喇叭形根管或牙本质肩领缺失的牙体缺损情况及对美观要求较高的患者。Suzaki 等^[60]使用玻璃纤维增强树脂盘切削制作的 CAD/CAM 一体化桩核和预成纤维桩加复合树脂核修复无髓牙。实验表明, CAD/CAM 一体化纤维桩核组抗折性能显著优于预成纤维桩加树脂核组: CAD/CAM 一体化纤维桩核平均断裂载荷比预成组提升

43.8%[CAD/CAM一体化纤维桩核组:($1\,555.9 \pm 231.8$) N, 预成组:($1\,082.1 \pm 226.7$) N];CAD/CAM一体化纤维桩核组断裂全部发生在可修复的颈中部,预成组断裂半数发生在不可修复的根尖部。该结果提示,CAD/CAM一体化纤维桩核在提升抗折强度同时,更有利于临床修复的再处理,为薄弱无髓牙提供了一种合适的修复方式。

此外,Fathey等^[55]研究发现,相比于PEEK和聚合物渗透陶瓷网络(polymer-infiltrated ceramic network, PICN),由玻璃纤维增强复合材料FRC通过CAD/CAM制备的桩核平均抗折强度最高。这表明,由玻璃纤维增强复合材料制备而成的CAD/CAM一体化纤维桩核修复体比其他较常见的非金属材料制备而成的桩核修复体具有更好的抗折强度,在临床修复更具有优势。

然而,目前试验中的抗折强度是通过施加较大的静态负荷来测定的,并未模拟真实的长期咀嚼疲劳过程及复杂的口腔动态环境(如唾液、咬合复杂性、温度、湿度变化)。此外实验样本较少,未设计牙本质肩领等,可能影响结果普适性。因此,未来还需要进一步的研究来模拟真实的口腔环境,通过结合动态疲劳测试验证其长期可靠性,以及扩大研究规模验证结果普适性。

3. 粘接强度:大面积牙体缺损及根管治疗后,剩余健康牙体组织较少,且根管形态复杂多样,因此在临床上如何保存修复体并减少桩核的脱粘接率,依旧是一个值得关注的问题。一般来说,影响桩核粘接强度的因素有桩的材料、设计、桩的表面处理、与根管密合程度、根管形态、临床操作、粘接剂类型、光因素和老化等^[2,61]。有Meta分析研究比较CAD/CAM纤维桩与预成纤维桩和铸造金属桩的粘接强度,结果发现与其他两组相比较,CAD/CAM纤维桩组表现出更优的粘接性能^[2]。同时,Eid等^[62]研究发现,CAD/CAM个性化纤维桩核组的粘接强度显著高于预成桩组,且经热循环老化后仍保持稳定。这种优势主要源于CAD/CAM个性化一体化桩核制造技术,使根管与桩核获得较高的匹配度,使粘接剂较薄且分布更加均匀,减少气泡的形成,显著提高了粘接强度。此外,在所用材料中,纤维增强复合材料的抗粘接失效性能优于高密度聚合物,在模拟老化条件下也具有稳定的性能。因此,CAD/CAM一体化纤维桩被认为是预成纤维桩的可靠的替代方案,尤其适用于根管形态不规则的病例。

在桩核冠修复中,冠向微渗漏会影响患牙桩核修复后保存时间以及远期根尖周组织健康情况^[62],它是评价修复效果的一个重要指标。冯昌芬等^[17]对CAD/CAM一体化纤维桩核与传统修复方式在修复薄弱根管后的冠向微渗漏情况进行比较研究,结果发现:从微渗漏评分来看,CAD/CAM一体化纤维桩核组和铸造金钯金属桩核组冠方微渗漏无显著差异,且均明显小于预成纤维桩组;从微渗漏界面分布来看,CAD/CAM一体化纤维桩核组和铸造金钯金属桩核组多发生在桩核与树脂水门汀之间,而预成纤维桩组主要发生在树脂水门汀与根管壁界面。分析认为,CAD/CAM一体化纤维桩核因与根管密合度较好、粘接剂量少且分布均匀,从而降低固化

收缩,产生的冠方微渗漏就相对较少。这一特性有利于减少桩核冠修复后继发龋的发生率以及薄弱根管的长期保存,在未来是具有优势的修复材料。Ravanshad等^[63]的研究也支持桩核对于根管的适合性比粘接剂更能影响微渗漏。

此外,张媛等^[61]分别用CAD/CAM一体化玻璃纤维桩核、预成型玻璃纤维桩、光固化可塑性纤维桩修复漏斗状根管,来研究3组粘接强度差异及温度循环对粘接强度的影响。结果发现,与其他两组相比,CAD/CAM一体化玻璃纤维桩在根颈部、根中部、根尖部均具有最高的粘接强度,且经热循环老化后性能稳定。需特别指出的是,无论是否经历热循环老化,CAD/CAM一体化纤维桩在根颈部的粘接强度始终保持最高水平。这一性能差异主要是因为其设计不同。CAD/CAM一体化玻璃纤维桩在修复漏斗状根管时,与根管形态高度吻合,不仅减少粘接剂厚度,还促使应力均匀分布,进而在整体及局部(如根颈部)都实现了粘接与固位效果的显著提升。而预成型桩是预制形态,无法与根管达到很好的匹配,尤其在根颈部匹配性更差^[61],其间的间隙由较厚的粘接材料填充,这会引发聚合收缩、应力集中、界面产生气泡等问题。这些因素减少有效粘接面积并影响固位,从而增加了修复失败的风险^[64-65]。

当前研究主要局限于缺乏有关CAD/CAM一体化纤维桩核长期粘接性能的研究,及口腔动态环境与老化对粘接效果的影响。未来需结合更全面的测试与临床研究,探寻更优的粘接方式。

四、临床应用

目前,CAD/CAM制造技术在牙科领域应用越来越广泛,已被用于制作贴面、嵌体、高嵌体、单冠、固定局部义齿、种植基台及全口咬合重建^[1,4,14,66]。这项技术有几个优点:包括较高的精确性^[67]、标准化的制造程序、更快更便捷的制备速度进行量产及具备有效的质量控制手段^[68]。

临床上用CAD/CAM制备一体化桩核的适用范围为^[3,69]:当根管充填治疗完成至少7 d,且经检查无症状后,可对患牙行CAD/CAM一体化纤维桩核修复。一般用于牙冠部分缺损无法充填治疗或全冠修复固位不良者;牙冠缺损至龈下,牙周健康,牙根足够长,经过冠延长术或牵引术可暴露断面以下至少1.5 mm的根面高度,磨牙根分叉未暴露者;错位、扭转牙,非正畸适应证但要求美观者;畸形牙直接预备固位形不良者。而以下情况则不宜进行CAD/CAM一体化纤维桩核修复:未行完善根管治疗、根尖阴影过大或者瘘管未消者;缺损范围过大,3~4个轴壁缺损深达龈下,不能用正畸牵引或者牙冠冠延长获得足够的牙本质肩领者;解剖形态不良导致的牙根短小或者牙根吸收导致牙根过短、牙周萎缩导致冠根比异常者;牙根松动者;年轻恒牙应该尽量保存活髓,诱导根尖成形,促使牙根继续发育和根尖孔封闭^[3,69-70]。

CAD/CAM一体化纤维桩修复缺损患牙的临床病例比较有限,但都获得了较为满意的修复效果。陈雅云等^[71]报道了数字化辅助流程同步制作一体化玻璃纤维增强树脂桩核与树脂基陶瓷冠修复冠折年轻恒牙的临床病例1例,作者结合

数字化技术与生物相容性材料,设计制作了CAD/CAM一体化纤维桩核和树脂陶瓷冠,获得了良好的修复效果。相比传统方法,该病例修复过程简化了操作流程,减少患者就诊次数,且最终结果满足临床修复要求,修复效果满意度较高。Libonati等^[72]报道了用CAD/CAM一体化纤维桩核联合氧化锆单冠修复下颌前磨牙1例。在修复中,使用口内扫描仪对桩道和牙冠进行3D扫描,并在修复完成2年后对患者进行随访,未出现根折或脱粘接等情况。该病例中使用口内扫描仪进行扫描桩道,省去了传统印模的步骤,减少误差;数字化流程缩短制作时间,提高修复体精度。个性化桩核设计更加匹配复杂根管,还能保留更多牙体组织,增强生物力学性能。该技术为根管治疗后修复提供了一种高效、精准的数字化解决方案,尤其适用于复杂解剖形态的桩核修复,具有临床推广价值。

陈志宇等^[73]则采用CAD/CAM一体化纤维桩核与IPS e.max CAD全瓷冠的方式行即刻修复重度缺损的上颌前牙。该研究选择CAD/CAM技术制作个性化一体化纤维桩核,制作的桩核具有高精度和与根管的良好适合性,一体化制作消除了桩与核间薄弱的粘接界面,增强了桩核修复体系的整体性。而利用 CEREC MC XL椅旁CAM设备切削加工IPS e.max CAD瓷块,制作出二硅酸锂玻璃陶瓷冠。该过程高效精确,缩短制备时长,实现初诊就诊时即刻修复。在修复完成后的2年随访期内,所有修复体都维持稳定状态并功能良好,存留率为100%;81例患者的89颗牙中只有1例尖牙全瓷冠发生牙尖轻微折裂,4例全瓷冠边缘出现密合度欠佳,并有轻微着色,但无继发龋发生,成功率为94.4%。通过2年短期观察显示,CAD/CAM个性化一体化纤维桩核结合二硅酸锂基玻璃陶瓷冠即刻修复严重缺损的上颌前牙获得了良好的临床效果,满足临床修复要求。

目前已发表的关于CAD/CAM桩核的报道有限,在真实口腔环境中长期的冷热循环和咀嚼负荷会对其修复效果造成什么影响还待研究。因此,未来还需要更多病例和长期研究来进一步验证和优化这一技术。

五、结语

CAD/CAM一体化纤维桩核结合了口腔数字化技术的精准性和纤维材料的优异性能,被认为是未来桩核修复的重要发展方向,尤其适用于复杂病例和美学修复需求较高的患者。CAD/CAM一体化纤维桩核是根据根管形态定制设计制造的,与根管适合性强,密合度好,弹性模量与牙本质相近,抗折强度与铸造金属桩相似,同时具有良好的粘接强度,此外还有良好的美学效果,生物相容性好,不影响核磁共振成像,可以再治疗,减少就诊次数和时间等,已逐步成为口腔临床根管治疗后大面积缺损牙保存修复的理想选择。但是,目前CAD/CAM一体化纤维桩核研究主要集中在体外试验^[2,49],缺乏长期、多中心的临床研究,其远期修复效果、成功率及可能出现的并发症仍有待观察,而且在临床上实施这项技术的成本仍然较高,需要训练有素的医师操作^[14],因此其广泛应用还需更多在真实口腔环境中试验和临床评价的结论支持。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Al-Qarni FD. Customized post and cores fabricated with CAD/CAM technology: A literature review[J]. Int J Gen Med, 2022, 15:4771-4779. DOI: 10.2147/IJGM.S365296.
- [2] Ghanem MM, Leong XY, Veetil SK, et al. Do CAD-CAM fibre posts exhibit higher bond strength and fracture resistance than other types of posts? Systematic review with network Meta-analysis of *in-vitro* studies[J]. BDJ Open, 2025, 11(1):25. DOI: 10.1038/s41405-025-00315-x.
- [3] 全国卫生产业企业管理协会数字化口腔产业分会. 计算机辅助设计与辅助制作一体化纤维桩核技术临床操作规范[J]. 中华口腔医学杂志, 2025, 60(1):3-7. DOI: 10.3760/cma.j.cn.112144-20241016-00387.
- [4] 白云洋,李燕,邓旭亮. 数字化个性化桩核修复体的研究进展[J]. 中国实用口腔科杂志, 2024, 17(4):469-473. DOI: 10.19538/j.kq.2024.04.016.
- [5] 刘杨,曹友辉,包雪梅. 聚醚醚酮及其复合材料修复桩核冠:问题与临床应用价值[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(29):4691-4696. DOI: 10.12307/2024.582.
- [6] Alfaer AS, Aljabri YS, Alameer AS, et al. Applications, benefits, and limitations of fiber-reinforced composites in fixed prosthodontics[J]. Int J Community Med Public Health, 2023, 10(11):4462-4467. DOI: 10.18203/2394-6040.ijcmph20233495.
- [7] Gutiérrez MA, Guerrero CA, Baldion PA. Efficacy of CAD/CAM glass fiber posts for the restoration of endodontically treated teeth[J]. Int J Biomater, 2022;8621835. DOI: 10.1155/2022/8621835.
- [8] 王新知,杨茜. 不同类型桩核修复牙体重度缺损的回顾与进展[J]. 北京大学学报(医学版), 2011, 43(1):6-12. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2011.01.002.
- [9] 刘鹏,李亚南,姜慧,等. CAD/CAM一体化玻璃纤维桩核抗折力的体外实验研究[J]. 北京口腔医学, 2010, 18(2):90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1006-673X.2010.02.009.
- [10] Al-Qaysi SH, Saleh ARM, El-Damanhoury HM. Fracture resistance and failure mode of layered translucent zirconia with different crown designs[J]. Dent Mater J, 2022, 41(1):54-59. DOI: 10.4012/dmj.2021-051.
- [11] Badami V, Ketineni H, Pb S, et al. Comparative evaluation of different post materials on stress distribution in endodontically treated teeth using the finite element analysis method: A systematic review[J]. Cureus, 2022, 14(9):e279753. DOI: 10.7759/cureus.29753.
- [12] 谭颖,饶思哈,孙纪奎,等. 聚醚醚酮在桩核修复中的应用进展[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2022, 23(6):450-455+466. DOI: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2022.6.008.
- [13] 曲涵. 生物活性玻璃改性聚醚醚酮增材制造及其生物特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- [14] Dos Santos SER, Felizardo KR, Guirardo RD, et al. Flexural strength and stress analysis of CAD-CAM milled glass fiber post and core[J]. Int J Dent, 2025: 6298753. DOI: 10.1155/ijod/6298753.

- [15] Gama M, Balbinot GS, Ferreira GC, et al. CAD/CAM milled glass fiber posts: Adaptation and mechanical behavior in flared root canals[J]. *Oper Dent*, 2021, 46(4):438-447. DOI:10.2341/20-198-L.
- [16] Bechir F, Bataga SM, Tohati A, et al. Evaluation of the behavior of two CAD/CAM fiber-reinforced composite dental materials by immersion tests[J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(23):7185. DOI:10.3390/ma14237185.
- [17] 冯昌芬, 逢键梁. CAD/CAM 一体化纤维桩核的研究进展[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2015, 16(5):318-320.
- [18] 北京欧亚瑞康新材料科技有限公司, 北京化工大学. 齿科修复用一体化纤维桩及其制备方法:CN201010124736.1[P]. 2010-08-18.
- [19] Vallittu PK. Fibre - reinforced composites (FRCs) as dental materials[M]//*Non-Metallic Biomaterials for Tooth Repair and Replacement*. Elsevier, 2013:352-374. DOI:10.1533/9780857096432.3.352.
- [20] 杨艳阳, 蔡晴, 杨小平, 等. 残根残冠桩核一体化修复体切削成型用多向纤维增强复合材料的研制[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(1):10-13. DOI:10.3969/j.issn.1003-0999.2013.01.002.
- [21] Liu P, Deng XL, Wang XZ. Use of a CAD/CAM-fabricated glass fiber post and core to restore fractured anterior teeth: A clinical report[J]. *J Prosthet Dent*, 2010, 103(6):330-333. DOI:10.1016/S0022-3913(10)60071-6.
- [22] Safwat EM, Khater AG, Abd-Elsatar AG, et al. Glass fiber-reinforced composites in dentistry[J]. *Bull Natl Res Cent*, 2021, 45(1):190. DOI:10.1186/s42269-021-00650-7.
- [23] Khan AS, Azam MT, Khan M, et al. An update on glass fiber dental restorative composites: A systematic review[J]. *Mater Sci Eng: C Mater Biol Appl*, 2015, 47:26-39. DOI:10.1016/j.msec.2014.11.015.
- [24] Behl S, Raju, Rajan G, et al. Physical and mechanical characterisation of flowable dental composites reinforced with short aspect ratio micro-sized S-Glass fibres[J]. *Mater Sci Eng: C Mater Biol Appl*, 2020, 111:110771. DOI:10.1016/j.msec.2020.110771.
- [25] 欧阳远婷, 张泽宇, 仇笑莹, 等. CAD/CAM 个性化玻璃纤维桩核在前牙区修复的应用[C]//*中华口腔医学会口腔修复工艺专业委员会第十三次全国口腔修复工艺学术年会论文汇编*. 成都, 2023:1653-1665. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.128288.
- [26] 陈启晖, 武朝阳, 孙大伟, 等. 碳纤维增强聚合物复合材料层间增韧研究进展[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(10):5573-5587. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20250620.008.
- [27] Borges GA, Mesquita MF, Matias LFDS, et al. Carbon fiber-reinforced PEEK as a framework material for single implant-retained mandibular overdentures[J]. *Braz Oral Res*, 2025, 39:e18. DOI:10.1590/1807-3107bor-2025.vol39.018.
- [28] Haider I, Gul IH, Umer MA, et al. A low-cost silica fiber/epoxy composite with excellent dielectric properties, and good mechanical and thermal stability[J]. *Materials (Basel)*, 2023, 16(23):7410. DOI:10.3390/ma16237410.
- [29] 王仁林. Bis-GMA/MMA 基石英纤维增强复合材料及其在牙科根管桩的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [30] 孙欢, 吴杨, 郭倩, 等. 石英纤维桩与金属桩核修复前牙效果比较[J]. *临床军医杂志*, 2022, 50(1):67-69. DOI:10.16680/j.1671-3826.2022.01.20.
- [31] Cengiz S, Bagis B, Külünk Ş, et al. Comparison of fiber reinforcing methods of composite resin: A flexural strength and stereo microscopy study[J]. *Microsc Res Tech*, 2023, 86(2):252-257. DOI:10.1002/jemt.24266.
- [32] 董鑫荷, 吕晶, 刘宇昊, 等. 超高分子量聚乙烯纤维结合不同树脂修复缺损乳磨牙的断裂载荷及边缘密闭性研究[J]. *口腔疾病防治*, 2024, 32(8):589-597. DOI:10.12016/j.issn.2096-1456.2024.08.003.
- [33] Li M, You J, Qin Q, et al. A comprehensive review on silk fibroin as a persuasive biomaterial for bone tissue engineering[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(3):2660. DOI:10.3390/ijms24032660.
- [34] Zhu S, Zhang Q, Xu X, et al. Recent advances in silk fibroin-based composites for bone repair applications: A review[J]. *Polymers (Basel)*, 2025, 17(6):772. DOI:10.3390/polym17060772.
- [35] Qian XQ, Xu X, Zhang M, et al. Integrated Janus silk fibroin membranes for periodontal - guided tissue regeneration[J]. *J Biomater Appl*, 2025:8853282251405353. DOI:10.1177/08853282251405353.
- [36] 王美艳, 马晓平, 崔玉兰, 等. 冠折年轻恒牙根管治疗后不同修复方法的抗折强度研究[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2021, 22(1):38-42. DOI:10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2021.01.008.
- [37] 熊佳壁, 孙为, 施斌. 口腔种植治疗中的数字化数据采集技术[J]. *中国口腔种植学杂志*, 2021, 26(2):114-119. DOI:10.12337/zgkqzzzz.2021.04.007.
- [38] 游杰, 闫文娟, 林丽婷, 等. 数字化口内扫描技术专家共识[J]. *口腔疾病防治*, 2024, 32(8):569-577. DOI:10.12016/j.issn.2096-1456.2024.08.001.
- [39] 黄翠, 刘峰, 满毅, 等. 口内数字印模技术[J]. *实用口腔医学杂志*, 2023, 39(6):689-695. DOI:10.3969/j.issn.1001-3733.2023.06.001.
- [40] 陈沐, 章立群, 刘学, 等. 口腔修复个性化纤维桩的研究进展[J]. *医疗装备*, 2022, 35(23):190-192. DOI:10.3969/j.issn.1002-2376.2022.23.059.
- [41] 廖梦圆, 严斌, 吴大明, 等. 一种新型数字化桩核修复技术[J]. *口腔医学*, 2021, 41(9):825-829. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2021.09.011.
- [42] Moustapha G, AlShwaimi E, Silwadi M, et al. Marginal and internal fit of CAD/CAM fiber post and cores[J]. *Int J Comput Dent*, 2019, 22(1):45-53.
- [43] Alhasher HK, Alfarsi MA. A fully digital method to fabricate custom hybrid ceramic one-piece post-and-core: A proof of concept[J]. 2022. DOI:10.21203/rs.3.rs-2308075/v1. <https://www.researchsquare.com/article/rs-2308075/v1>.
- [44] Vogler JAH, Billen L, Walther KA, et al. Conventional cast vs. CAD/CAM post and core in a fully digital chairside workflow: An *in vivo* comparative study of accuracy of fit and feasibility of

- impression taking[J]. J Dent, 2023, 136: 104638. DOI: 10.1016/j.jdent.2023.104638.
- [45] Tsintsadze N, Juloski J, Carrabba M, et al. Effects of scanning technique on *in vitro* performance of CAD/CAM-fabricated fiber posts [J]. J Oral Sci, 2018, 60 (2) : 262 - 268. DOI: 10.2334/josnusd.17-0254.
- [46] Almalki A, Conejo J, Kutkut N, et al. Evaluation of the accuracy of direct intraoral scanner impressions for digital post and core in various post lengths: An *in-vitro* study[J]. J Esthet Restor Dent, 2024, 36(4):673-679. DOI: 10.1111/jerd.13159.
- [47] 郭晓阳. 一体化玻璃纤维增强树脂桩核的应用研究[D]. 石家庄:河北医科大学, 2022.
- [48] Costa TS, Brandão RM, Vajgel BCF, et al. CAD - CAM glass fiber compared with conventional prefabricated glass fiber posts: A systematic review [J]. J Prosthet Dent, 2024, 132 (2) : 337 - 342. DOI: 10.1016/j.prosdent.2022.01.007.
- [49] 徐良伟,田锡天,陈林,等. 不同弹性模量计算机辅助设计和计算机辅助制造桩核材料的应力分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(10):2061-2066. DOI: 10.12307/2025.267.
- [50] 曾亚楠. 聚醚醚酮桩核修复后抗折性能及失效模式分析[D]. 南昌:南昌大学, 2022.
- [51] 刘国江,杨丽,冯剑桥. 聚醚醚酮桩核在上颌中切牙修复时的三维有限元分析[J]. 哈尔滨医科大学学报, 2022, 56(6):580-583. DOI: 10.20010/j.issn.1000-1905.2022.06.0580.
- [52] 许晓杰,赵媛. 聚醚醚酮在桩核冠修复中的应用前景[J]. 口腔疾病防治, 2022, 30(12):902-906. DOI: 10.12016/j.issn.2096-1456.2022.12.011.
- [53] Seckler IN, da Silveira Bueno CE, Kato AS, et al. Impact of mechanical load of three post and core systems: CAD/CAM - fabricated glassfiber, prefabricated glassfiber customized with composite resin, and cast metal posts and cores[J]. Conservative Dentistry and Endodontic Journal, 2021, 5 (2) : 36 - 41. DOI: 10.5005/jp-journals-10048-0064.
- [54] Ukon S, Moroi H, Okimoto K, et al. Influence of different elastic moduli of dowel and core on stress distribution in root [J]. Dent Mater J, 2000, 19(1):50-64. DOI: 10.4012/dmj.19.50.
- [55] Fathey IT, Azer AS, Abdelraheem IM. Fracture resistance and failure mode of three esthetic CAD - CAM post and core restorations [J]. BMC Oral Health, 2024, 24 (1) : 523. DOI: 10.1186/s12903-024-04273-y.
- [56] 李智,王新知,高承志,等. 计算机辅助设计与制作一体化玻璃纤维桩核修复漏斗状根管的抗疲劳和抗折性能[J]. 北京大学学报(医学版), 2013, 45(1):59-63. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2013.01.013.
- [57] Pang J, Feng C, Zhu X, et al. Fracture behaviors of maxillary central incisors with flared root canals restored with CAD/CAM integrated glass fiber post-and-core[J]. Dent Mater J, 2019, 38 (1):114-119. DOI: 10.4012/dmj.2017-394.
- [58] Dietschi D, Duc O, Krejci I, et al. Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: A systematic review of the literature — Part 1. Composition and micro - and macrostructure alterations [J]. Quintessence Int, 2007, 38 (9) : 733-743. DOI: 10.1016/j.tripleo.2007.05.014.
- [59] Lanza A, Aversa R, Rengo S, et al. 3D FEA of cemented steel, glass and carbon posts in a maxillary incisor [J]. Dent Mater, 2005, 21(8):709-715. DOI: 10.1016/j.dental.2004.09.010.
- [60] Suzuki N, Yamaguchi S, Nambu E, et al. Fabricated CAD/CAM post - core using glass fiber - reinforced resin shows innovative potential in restoring pulpless teeth[J]. Materials (Basel), 2021, 14(20):6199. DOI: 10.3390/ma14206199.
- [61] 张媛,韩建民,刘林,等. 一体化玻璃纤维桩修复漏斗状根管粘接强度的体外研究[J]. 北京大学学报(医学版), 2019, 51(2):327-334. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167X.2019.02.024.
- [62] Eid RY, Koken S, Baba NZ, et al. Effect of fabrication technique and thermal cycling on the bond strength of CAD/CAM milled custom fit anatomical post and cores: An *in vitro* study[J]. J Prosthodont, 2019, 28(8):898-905. DOI: 10.1111/jopr.13101.
- [63] Ravanshad S, Ghoreeshi N. An *in vitro* study of coronal microleakage in endodontically - treated teeth restored with posts [J]. Australian Endodontic Journal, 2003, 29(3):128-133.
- [64] da Silva NR, Aguiar GC, Rodrigues MP, et al. Effect of resin cement porosity on retention of glass-fiber posts to root dentin: An experimental and finite element analysis [J]. Braz Dent J, 2015, 26(6):630-636. DOI: 10.1590/0103-6440201300589.
- [65] Gomes GM, Rezende EC, Gomes OM, et al. Influence of the resin cement thickness on bond strength and gap formation of fiber posts bonded to root dentin [J]. J Adhes Dent, 2014, 16(1):71-78. DOI: 10.3290/j.jad.a30878.
- [66] Spitznagel FA, Boldt J, Gierthmuehlen PC. CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth [J]. J Dent Res, 2018, 97 (10):1082-1091. DOI: 10.1177/0022034518779759.
- [67] Yeslam HE. Flexural behavior of biocompatible high-performance polymer composites for CAD/CAM dentistry [J]. J Compos Sci, 2023, 7(7):270. DOI: 10.3390/jcs7070270.
- [68] Uzun G. An overview of dental CAD/CAM systems [J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2008, 22(1):530-535. DOI: 10.1080/13102818.2008.10817506.
- [69] 赵钦民. 口腔修复学[M]. 8版. 北京:人民卫生出版社, 2020.
- [70] Bonchev A, Radeva E, Tsvetanova N. Fiber reinforced composite posts-a review of literature[J]. Int J Sci Res, 2017, 6(10):1887-1893.
- [71] 陈雅云,程前煌,杨秀娟,等. 数字化辅助一体化纤维桩核及树脂基陶瓷冠修复冠折年轻恒牙1例[J]. 口腔医学研究, 2024, 40(3):269-271. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2024.03.015.
- [72] Libonati A, di Taranto V, Gallusi G, et al. CAD/CAM customized glass fiber post and core with digital intraoral impression: A case report[J]. Clin Cosmet Investig Dent, 2020, 12:17-24. DOI: 10.2147/CCIDE.S237442.
- [73] 陈志宇,李雅,董福生,等. CAD/CAM一体化纤维桩核与全瓷冠即刻修复重度缺损前牙的2年临床观察[J]. 现代口腔医学杂志, 2016, 30(3):142-146. DOI: CNKI:SUN:XDKY.0.2016-03-005.

(收稿日期:2025-06-30)

(本文编辑:王嫚)