

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.24.037

基于三维有限元分析的下颌第二前磨牙残根修复应力研究

何奇¹, 赵剑¹, 光倩颖²(杭州市余杭区第三人民医院口腔科¹, 门诊办公室², 浙江 杭州 311113)

[摘要]目的 评估不同修复方法及桩核材料对下颌第二前磨牙残根力学性能的影响。方法 应用三维有限元法建立4种修复模型(NPR、CLP、OEP、ISRF), 分别结合玻璃纤维桩、钛合金桩、镍铬合金桩3种桩核材料, 沿牙体长轴30°斜向施加400 N的静力载荷, 分析不同修复方式应力与位移情况、不同桩核材料的生物力学表现, 并采用双因素方差分析评估修复方式与桩核材料对各应力指标和位移指标的主效应及交互作用。结果 ISRF组基牙等效应力、粘接剂界面最大主应力、冠内粘接剂等效应力、最大位移低于NPR组、CLP组及OEP组($P<0.05$); 桩身内部最大主应力值随桩核材料弹性模量的增加而升高, 其中, 玻璃纤维桩在所有观测模型中应力水平最低, 其桩身内部最大主应力值为 (25.36 ± 1.42) MPa, 低于钛合金桩的 (38.74 ± 2.15) MPa和镍铬合金桩的 (45.83 ± 2.54) MPa($P<0.05$); 修复方式与桩核材料对各生物力学参数均存在显著的主效应及交互作用($P<0.01$)。结论 下颌第二前磨牙残根修复中应用ISRF联合玻璃纤维桩可有效降低基牙和粘接剂界面的应力峰值, 改善整体应力分布; ISRF结构在材料敏感性方面也起到了一定的缓冲作用, 在力学稳定性和临床应用方面表现出较好的弹性和适应性。

[关键词] 三维有限元分析; 下颌第二前磨牙; 残根修复; 桩核材料

[中图分类号] R783.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949(2025)24-0146-04

Stress Analysis of Mandibular Second Premolar Residual Root Restoration Based on Three-dimensional Finite Element Analysis

HE Qi¹, ZHAO Jian¹, GUANG Qianying²(Department of Stomatology¹, Outpatient Office², Yuhang District Third People's Hospital, Hangzhou 311113, Zhejiang, China)

[Abstract] **Objective** To evaluate the effects of different restoration methods and post-core materials on the mechanical properties of residual roots of mandibular second premolars. **Methods** Four restoration models (NPR, CLP, OEP, ISRF) were established by three-dimensional finite element method, combined with three types of post-core materials including glass fiber post, titanium alloy post and nickel-chromium alloy post, respectively. A static load of 400 N was applied obliquely at 30° along the long axis of the tooth. The stress and displacement of different restoration methods, as well as the biomechanical behaviors of different post-core materials were analyzed. Two-way analysis of variance was used to evaluate the main effects and interaction effects of restoration methods and post-core materials on various stress and displacement indexes. **Results** The equivalent stress of abutment teeth, maximum principal stress of adhesive interface, equivalent stress of intracoronary adhesive and maximum displacement in the ISRF group were lower than those in the NPR, CLP and OEP groups ($P<0.05$). The maximum principal stress inside the post increased with the increase of elastic modulus of post-core materials. Among them, the glass fiber post showed the lowest stress level in all observation models, with the maximum principal stress inside the post being (25.36 ± 1.42) MPa, which was lower than that of titanium alloy post $[(38.74\pm2.15)$ MPa] and nickel-chromium alloy post $[(45.83\pm2.54)$ MPa] ($P<0.05$). Both restoration methods and post-core materials had significant main effects and interaction effects on various biomechanical parameters ($P<0.01$). **Conclusion** The application of ISRF combined with glass fiber post in the restoration of mandibular second premolar residual root can effectively reduce the peak stress of abutment teeth and adhesive interface, and improve the overall stress

基金项目: 杭州市医药卫生科技项目(编号: B20230004)

第一作者: 何奇(1989.12-), 男, 浙江杭州人, 本科, 主治医师, 主要从事口腔科方面工作

distribution. In addition, the ISRF structure also plays a certain buffering role in material sensitivity, showing good elasticity and adaptability in terms of mechanical stability and clinical application.

[Key words] Three-dimensional finite element analysis; Mandibular second premolar; Residual root restoration; Post-core material

下颌前磨牙因为咬合关系复杂,且冠根比例不佳,易导致残根修复失败,成功率普遍偏低^[1]。传统治疗方案如冠延长(CLP)、正畸牵引(OEP)、无肩领(NPR)修复等,虽能在一定程度上提升固位力,但易引发牙槽骨吸收、应力集中等并发症,影响修复效果与长期预后^[2]。近年来,肩台式根内固位形(ISRF)通过根管内预备肩台,可增强机械固位,优化应力分布,具有一定的应用潜力,但其与不同桩核材料联合的生物力学效应尚需系统评价^[3]。此外,桩核材料的弹性模量是影响修复体-牙体界面应力传递的关键。高模量金属桩(如钛合金、镍铬合金)易致应力屏蔽与集中。研究认为^[4],与牙本质弹性模量更匹配的玻璃纤维桩,可提供更合理的应力分布。故系统比较不同修复方式(NPR、CLP、OEP、ISRF)联合不同弹性模量桩核材料(玻璃纤维、钛合金、镍铬合金)的生物力学性能,对于优化修复方案、提高成功率具有重要意义。基于此,本研究拟构建下颌第二前磨牙三维有限元模型,通过仿真计算,对不同修复模式和材料的受力性能进行量化对比,评价其与牙体组织的相互作用,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 模型构建与处理 以形态正常、结构完整的下颌第二前磨牙(牙体全长21 mm,牙冠长7 mm,牙根长14 mm)作为建模对象。通过高精度micro-CT对离体牙进行扫描,获得层厚为0.025 mm的DICOM格式图像数据^[5]。将图像数据导入医学影像控制软件Mimics Research 21.0(Materialise公司,比利时),通过阈值分割和区域生长技术,初步提取牙体硬组织的三维几何模型。随后,将模型导入逆向工程软件Geomagic Wrap 2021(3D Systems公司,美国),进行去除噪声、修补网格缺陷、优化及简化三角面片等处理,最终生成精确的NURBS曲面模型,以准确表征牙齿复杂的解剖结构^[6]。

1.2 分组设计与处理方式

1.2.1 修复方式分组设计 在统一标准下颌第二前磨牙模型基础上,通过调整牙体与修复体形态构建

4种修复模型,所有模型均包含树脂核、全瓷冠及树脂粘接剂层,并通过桩核与剩余牙体组织连接。NPR模型:模拟釉牙骨质界水平缺损,修复体边缘止于该平面;CLP模型:模拟牙槽嵴顶降低1.5 mm并延伸牙体形成新肩领^[7];OEP模型模拟牙根牵引出龈缘2.0 mm以形成肩领;ISRF模型:模拟根管内预备1.0 mm宽水平肩台以增强固位。所有模型均基于同一标准牙齿模型建立,仅在修复体与牙体组织的界面形态和空间关系上存在差异,以确保生物力学性能对比的可比性^[8]。

1.2.2 桩核材料分组设计 以“修复方式”为因子一,“桩核材料”为因子二。对上述4种修复模型中的桩核结构,分别赋予3种桩核材料的力学属性:玻璃纤维桩(弹性模量18 GPa)、钛合金桩(弹性模量110 GPa)与镍铬合金桩(弹性模量193 GPa)^[9],共形成12个独立的有限元分析模型。

1.3 有限元分析参数设置

1.3.1 材料属性与网格划分 将所有模型导入ANSYS Workbench 2022 R1中进行材料属性定义与网格划分。各材料均设置为均质、连续、各向同性的线弹性材料,其弹性模量与泊松比等力学参数见表1。模型采用10节点四面体单元进行网格划分。在桩-牙本质界面及粘接剂层等应力集中区域进行局部网格加密,最小单元尺寸小于0.1 mm;在应力梯度较低的区域采用相对稀疏的网格^[10]。

表1 有限元模型材料力学参数

材料	弹性模量 (MPa)	泊松比
牙本质	1.86×10^4	0.31
牙周膜	69	0.45
皮质骨	1.37×10^4	0.30
松质骨	1.37×10^3	0.30
玻璃纤维桩	1.80×10^4	0.27
钛合金桩	1.10×10^5	0.35
镍铬合金桩	1.93×10^5	0.33
树脂核	1.87×10^4	0.24
全瓷冠	7.00×10^4	0.19
树脂粘接剂	8.30×10^3	0.35

1.3.2 载荷与边界条件及评估指标 为模拟侧方咀嚼,在牙冠颊尖斜面施加400 N静态载荷,方向与牙体长轴呈30°角。模型边界条件设定为固定牙槽骨外壳。评估指标包括:基牙等效应力、各粘接剂界面应力(等效应力与最大主应力)、修复体整体位移及桩身内部最大主应力^[1]。同时采用双因素方差分析评估修复方式与桩核材料对各应力指标和位移指标的主效应及交互作用。

1.4 统计学方法 将有限元仿真计算得到的所有应力与位移峰值数据统一导出,利用SPSS 23.0统计学软件进行系统分析。符合正态分布的计量资料

采用($\bar{x} \pm s$)表示,多组数据比较使用单因素方差分析,满足方差齐性组间两两比较采用LSD-*t*检验,如不满足方差齐性则改用Tamhane's *T*₂检验;*P*<0.05表示差异有统计学意义,*P*<0.01为统计学意义显著。

2 结果

2.1 不同修复方式应力与位移比较 ISRF组基牙等效应力、粘接剂界面最大主应力、冠内粘接剂等效应力、最大位移低于NPR组、CLP组及OEP组(*P*<0.05),见表2。

表2 不同修复方式应力与位移比较($\bar{x} \pm s$)

组别	<i>n</i>	基牙等效应力(MPa)	粘接剂界面最大主应力(MPa)	冠内粘接剂等效应力(MPa)	最大位移(μm)
NPR组	3	152.63 ± 8.71	35.21 ± 2.08	68.92 ± 3.51	32.75 ± 1.62
CLP组	3	125.38 ± 6.32	28.87 ± 1.79	55.13 ± 2.83	24.12 ± 1.21
OEP组	3	118.69 ± 5.88	26.43 ± 1.52	52.27 ± 2.64	22.53 ± 1.13
ISRF组	3	78.52 ± 4.23	21.32 ± 1.23	45.58 ± 2.31	18.32 ± 0.92

2.2 不同桩核材料的生物力学表现 桩身内部最大主应力值随桩核材料弹性模量的增加而升高,见图1。其中,玻璃纤维桩在所有观测模型中均表现出最低的应力水平,其桩身内部最大主应力值为(25.36 ± 1.42)MPa,低于钛合金桩的(38.74 ± 2.15)MPa和镍铬合金桩的(45.83 ± 2.54)MPa(*P*<0.05)。

2.3 修复方式与桩核材料对各项指标的双因素方差分析 双因素方差分析显示,修复方式与桩核材料对各生物力学参数均存在显著的主效应及交互

作用(*P*<0.01),修复方式与桩核材料对各项指标的方差分析结果见表3。

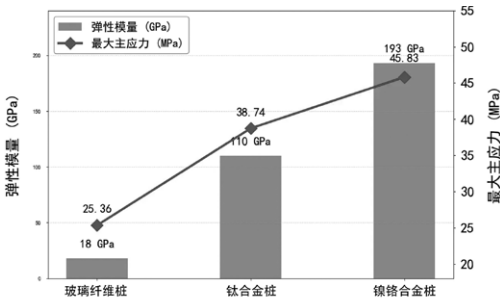


图1 不同桩核材料弹性模量与桩身内部最大主应力的关系

表3 修复方式与桩核材料对各项指标的双因素方差分析

评估指标	修复方式(df=3)		桩核材料(df=2)		交互作用(df=6)	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
基牙等效应力	45.320	0.000	38.760	0.000	4.230	0.001
粘接剂界面最大主应力	52.180	0.000	41.550	0.000	5.120	0.000
冠内粘接剂等效应力	48.910	0.000	36.840	0.000	3.890	0.002
最大位移	50.670	0.000	25.330	0.000	3.450	0.005

3 讨论

下颌第二前磨牙冠根比例不佳、咬合负荷集中,其残根修复长期存在稳定性欠佳的问题。不同修复设计对修复体周围生物力学环境的影响

尚未明确。本研究通过建立三维有限元模型,旨在系统评估4种修复设计(NPR、CLP、OEP、ISRF)与3种桩核材料在斜向载荷下的应力分布规律与结构变形特征,以期揭示各修复方案的生物

力学特性,为临床修复方案优化提供理论依据。

本研究中ISRF组基牙等效应力、粘接剂界面最大主应力、冠内粘接剂等效应力、最大位移低于NPR组、CLP组及OEP组($P<0.05$)。分析原因在于,ISRF模型根管内预备的肩台结构,可在不改变牙根长度和冠根比例的前提下,有效提高修复体与牙体组织间的粘接面积和机械嵌合作用^[12]。该结构改变了应力传导路径,使载荷能够更均匀地沿牙根长轴方向传递至根管壁,从而避免应力在脆弱的根管口和桩核界面过度集中。相比之下,CLP和OEP通过改变牙槽骨水平或牙根位置获取肩领,虽能提高固位,但可能伴随牙周组织改变或治疗复杂性增加^[13, 14];而NPR由于完全缺乏有效肩领或内部固位结构,应力集中现象最为显著,基牙等效应力达到 (152.60 ± 8.71) MPa。从生物力学角度分析,ISRF为实现高成功率残根修复提供了结构更优的设计方案。本研究结果还显示,桩身内部最大主应力值随桩核材料弹性模量的增加而升高,其中玻璃纤维桩桩身内部最大主应力值低于钛合金桩和镍铬合金桩($P<0.05$);修复方式与桩核材料对各生物力学参数均存在显著的主效应及交互作用($P<0.01$)。分析原因在于,玻璃纤维桩的弹性模量(18 GPa)与牙本质(18.6 GPa)最为接近,在力学上形成了良好的梯度过渡,因此在应力传递过程中表现出较好的相容性。相比之下,高弹性模量的金属桩由于与牙本质刚度差异较大,容易在界面处产生应力集中现象。本研究结果还提示,选择与牙本质力学性能相近的材料有助于实现更均匀的应力分布,减少因材料刚度差异过大而导致的应力屏蔽效应,从而提升修复体的长期成功率。然而,需要注意的是,本研究建立在材料线弹性假设和静态载荷条件之下,与实际口腔中复杂的动态力学环境仍存在差异,真实情况中牙齿会受到动态载荷和疲劳循环等长期作用,这些因素可能会影响修复效果,所以未来研究需要进一步考虑这些长期作用机制,并结合临床随访来验证有限元分析的可靠性,只有在更多临床证据支持的情况下,这种修复方案才能在推广应用时提供充分的依据。

综上所述,在下颌第二前磨牙牙冠缺损严重的情况下,采用ISRF联合玻璃纤维桩修复可有效降低基牙和粘接剂界面的应力峰值,改善整体应力分布;ISRF结构在材料敏感性方面也起到了一定的缓冲作用,在力学稳定性和临床应用方面表

现出较好的弹性和适应性。

[参考文献]

- [1]于丁一,司红羚,赵雯静,等.3种不同材料和嵌体洞型修复下颌第二磨牙应力分布的三维有限元分析[J].实用口腔医学杂志,2025,41(4):456-460.
- [2]于丁一,赵雯静,苏马靖,等.下颌第二前磨牙根尖屏障术后根管充填材料三维有限元分析[J].牙体牙髓牙周病学杂志,2025,30(5):262-266.
- [3]殷金萍,王静,孙亚丽,等.动态载荷下不同材料修复非龋性颈部缺损有限元分析[J].口腔医学研究,2021,37(9):820-824.
- [4]张宇璐,刘佳.乳牙不锈钢预成冠对儿童颞下颌关节应力分布及应力影响的三维有限元分析[J].上海口腔医学,2025,34(3):237-243.
- [5]王静,殷金萍,孙亚丽,等.静态载荷下不同材料修复下颌第二前磨牙非龋性颈部缺损的有限元分析[J].郑州大学学报(医学版),2022,57(1):68-72.
- [6]杜珊珊,童锦发,李超.不同复合树脂修复下颌第一前磨牙多类型楔状缺损的三维有限元分析[J].浙江临床医学,2020,22(4):538-540.
- [7]黄耀文,宋莉,戴芳,等.不同材料修复下颌第一前磨牙楔状缺损的三维有限元分析[J].南昌大学学报(医学版),2023,63(3):74-78.
- [8]康美嘉,孙芸芸,张晗,等.不同部位微种植体辅助隐形矫治器远移下颌磨牙的三维有限元分析[J].吉林大学学报(医学版),2023,49(4):1027-1033.
- [9]蔡长宇,冯娜,杨玉娥.垫底材料及厚度对下颌第二乳磨牙嵌体修复应力分布影响的三维有限元分析[J].口腔医学研究,2022,38(7):654-658.
- [10]高琳,韩祥永,徐晓明.不同材料及不同固位深度的髓腔固位冠修复下颌第二磨牙的三维有限元分析[J].上海口腔医学,2022,31(6):621-624.
- [11]向彪,王星星,杨颜菁,等.无托槽隐形矫治器联合附件扭转下颌左侧第二前磨牙的三维有限元分析[J].口腔医学研究,2022,38(12):1192-1198.
- [12]杨贝贝,安虹,张建国.固定桥不同桥体龈端形态修复下颌第一磨牙的三维有限元分析[J].口腔医学,2021,41(1):27-31.
- [13]张宇璐,刘佳.乳牙不锈钢预成冠对儿童牙体与颌骨应力分布及应力影响的研究:三维有限元模型的建立与分析[J].现代口腔医学杂志,2025,39(3):234-240.
- [14]赵田琦,谢冰清,沈洁,等.短种植体应用于垂直骨量不足下颌磨牙种植修复的三维有限元研究[J].安徽医科大学学报,2022,57(9):1508-1512.

收稿日期: 2025-11-10 编辑: 刘雯