

文章编号: 1004-7220(2022)06-1107-07

远中邻骀腭面缺损的上颌第 1 磨牙 纤维桩-树脂核修复的有限元分析

仲 麒, 黄雨捷, 张轶凡, 宋迎爽, 吴雅琴, 瞿 方, 翁维民*, 胥 春*

(上海交通大学医学院附属第九人民医院 口腔修复科; 上海交通大学 口腔医学院; 国家口腔医学中心;
国家口腔疾病临床医学研究中心; 上海市口腔医学重点实验室, 上海 200011)

摘要:目的 探究根管治疗后远中邻骀腭面(disto-occluso-palatal, DOP)缺损的上颌第 1 磨牙纤维桩-树脂核修复策略。**方法** 建立 8 种不同的纤维桩-树脂核修复策略修复后的上颌第 1 磨牙有限元模型。若多根桩在髓腔内存在干扰,则将较细的桩在重叠部分下方 1 mm 处水平截断作为辅桩,较粗的桩保留原长作为主桩。分别加载与牙体长轴平行的 800 N 垂直力和与牙体长轴呈 45° 的 225 N 侧向力。通过有限元分析计算牙体组织和纤维桩内的等效应力及桩-树脂水门汀/树脂水门汀-根管壁界面上的切应力。**结果** 在相同载荷下,不同组间在牙体组织外表面的应力分布形式相似。垂直加载时,应力集中于根干的腭侧面;侧向加载时,应力集中于根干的近中颊侧面。置入纤维桩的根管中 1/3 处内表面最大等儿应力上升,而根管颈 1/3 处内表面最大等效应力下降。垂直、侧向载荷下所受应力最大的桩分别是腭桩和近颊桩。垂直载荷下,在同一根管内置桩较辅桩在桩-树脂水门汀界面上的切应力大;侧向载荷下,近中颊桩的桩-树脂水门汀界面切应力最大。垂直载荷下,树脂水门汀-根管壁界面上最大切应力在腭根内放置纤维桩时最大;侧向载荷下,界面上的最大切应力在近颊根放置纤维桩时最大。**结论** 对于 DOP 缺损的上颌第 1 磨牙,纤维桩修复能有效地将骀力向根方传导,改善剩余牙体组织中的应力分布。在腭根内置入单根纤维桩进行纤维桩-树脂核-全瓷冠修复可能是其最佳修复策略。

关键词: 有限元分析; 纤维桩; 磨牙; 桩核技术; 应力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.06.021

Finite Element Analysis on FRC Post-and-Resin Core Restored Maxillary First Molar with Disto-Occluso-Palatal Defect

ZHONG Qi, HUANG Yujie, ZHANG Yifan, SONG Yingshuang, WU Yaqin, QU Fang, WENG Weimin*, XU Chun*

(Department of Prosthodontics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine; College of Stomatology, Shanghai Jiao Tong University; National Center for Stomatology; National Clinical Research Center for Oral Diseases; Shanghai Key Laboratory of Stomatology, Shanghai 200011, China)

Abstract: Objective To explore the optimal strategy for fiber-reinforced composite (FRC) post-and-resin core restoration on an endodontically-treated maxillary first molar with a disto-occluso-palatal (DOP) defect. **Methods** Eight different finite element models of FRC post-resin core restored maxillary first molar were established. In the multi-post groups, the thinner post was horizontally trimmed 1 mm below the intersection point as the adjunct post, and the thicker one was resiguated as the main post. The 800 N vertical force parallel to the long axis of the tooth and 225 N lateral force directed at 45° to the long axis of the tooth were applied. The

收稿日期:2021-11-23; 修回日期:2021-12-24

通信作者:胥春,主任医师,E-mail:imxuchun@163.com;翁维民,副主任医师,E-mail:wengweimin31@126.com

* 为共同通信作者

equivalent stresses on external surfaces of tooth tissues, internal surfaces of root canals and in the posts, as well as the maximum shear stresses on post-cement interfaces and cement-dentin interfaces were calculated with finite element analysis. **Results** All the models showed similar distribution patterns of equivalent stress on external surfaces of tooth tissues under the same loading. The maximum equivalent stress was found on palatal (P) side of the root trunk under vertical loading, and on mesiobuccal (MB) side of root trunk under lateral loading. On internal surfaces of root canals, the maximum equivalent stress increased at the middle third of post-placed canal, and decreased at the cervical third of the canal. Under vertical loading, P posts showed the highest equivalent stress, while MB posts showed the highest equivalent stress under lateral loading. Under vertical loading, the main post encountered larger shear stress than the assistant one on post-cement interface in the same canal. Under lateral loading, post-cement interface in MB canal showed the highest shear stress. The highest shear stress appeared on cement-canal interface with a P post under vertical loading, and with an MB post under lateral loading. **Conclusions** The FRC post restoration can transmit occlusal force towards apical area, so as to improve stress distributions in residual tooth tissues for a maxillary first molar with DOP defect. One post in the P canal may be the best strategy of FRC post and resin core restoration for an endodontically-treated maxillary first molar with a DOP defect.

Key words: finite element analysis; fiber-reinforced composite (FRC) post; molar; post and core technique; stress

第 1 磨牙是口腔内存留时间最长、承受合力最大的牙,易因龋坏或折裂造成牙体缺损^[1-2]。当牙体缺损累及髓腔时,会导致牙髓暴露、感染,最终丧失活力,需行完善的根管治疗(root canal therapy, RCT)。研究表明,RCT 后牙齿冠部有 1 个及以上牙本质壁缺失时,应进行根管桩修复以降低治疗失败率^[3]。

上颌第 1 磨牙至少有 3 个根管^[4]。因此,根管桩修复时,其根管桩放置数量和位置存在多种组合,目前对何种组合为最佳组合尚无定论。较多接受的观点是在腭根内放置 1 根桩^[5-6],但近年来也有学者提出不同见解。付刚等^[7]对铸造金合金桩核修复上颌第 1 磨牙进行有限元分析(finite element analysis, FEA),发现放置 2 根桩时牙体组织内的应力较放置 1 根时低。赵莉等^[8]对纤维桩修复上颌第 1 磨牙进行 FEA 研究,也得到相似结果,并建议置入 2 根桩以降低牙体组织内的应力。

远中邻殆腭面(disto-occluso-palatal, DOP)缺损是上颌第 1 磨牙常见的牙体缺损类型。由于缺失 2 个牙本质壁,患牙发生折裂的风险较大,需要进行桩核冠修复。纤维桩因弹性模量与牙本质接近、美学性能出色以及根折发生率低而得到广泛应用,但其也存在对牙颈部牙体组织存留量要求高、脱粘接发生率较高等问题^[5,9-14]。正确的纤维桩-树脂核修复策略对于治疗预后至关重要。但目前有关系统探讨纤维桩-树脂核-全瓷冠修复后上颌第 1 磨牙剩

余牙体组织、纤维桩和各粘接界面上应力分布的研究,还鲜有报道。本文运用 FEA 方法探究不同修复策略下,纤维桩-树脂核-全瓷冠修复 DOP 缺损上颌第 1 磨牙后牙体组织和纤维桩以及桩-水门汀界面和水门汀-根管壁界面上的应力分布。研究结果有助于大面积牙体缺损多根牙纤维桩-树脂核修复策略的探索,为纤维桩的临床应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 上颌第 1 磨牙模型建立

将 1 颗因牙周病拔除的完整上颌第 1 磨牙进行 micro-CT(eXplore Locus SP, GE 公司,美国)扫描,并在 RCT 及全瓷冠牙体预备后再次扫描,分别得到 810、750 幅以医学数字影像和通讯格式存储的二维断层图像。将其导入 Mimics 21.0 (Materialise 公司,比利时)中,对牙备前后的牙体、充填树脂、牙胶尖等进行三维重建^[15-16],并以立体光刻格式导入 Geomagic Wrap 2015(3D Systems 公司,美国)中,建立全瓷冠、树脂核、DOP 缺损牙体组织(牙本质肩领高度 1.5 mm)、冠粘接树脂水门汀、牙胶尖、牙周膜、皮质骨和松质骨的模型^[14]。纤维桩(Matchpost[®], Recherches Techniques Dentaires 公司,法国)模型则通过 SolidWorks 2016 (Dassault Systemes 公司,法国)根据外形尺寸数据建立,并以 IGES 格式保存。

1.2 不同桩核修复方式模型建立

在 Geomagic Wrap 2015 中以桩直径不超过根径 1/3 为限, 选择尽可能粗的纤维桩进行修复, 即腭根放置# 1.6 纤维桩, 远颊根放置# 1.4 纤维桩, 近颊根放置# 1.2 纤维桩, 在保留根尖段 5 mm 牙胶尖的原则下使用布尔工具预备桩道^[8,14]。按照不同修复方式, 建立 8 组模型: 无桩组 (no post, NP)、腭桩组 (palatal post, PP)、远颊桩组 (distobuccal post, DP)、近颊桩组 (mesiobuccal post, MP)、腭远颊桩组 (palatal and distobuccal posts, PDP)、腭近颊桩组 (palatal and mesiobuccal posts, PMP)、双颊桩组 (distobuccal and mesiobuccal posts, DMP) 和三桩组 (palatal, distobuccal, and mesiobuccal posts, PDMP)。若纤维桩在髓腔内存在重叠部分, 则将较细的桩在重叠部分下方 1 mm 处水平截断作为辅桩, 较粗的桩保留全长作为主桩。将以上所有部件曲面化后, 以 IGES 格式导入 ANSYS 19.0 (ANSYS 公司, 美国) 中的 Design Modeler 模块, 组合为有限元模型 (见图 1)。

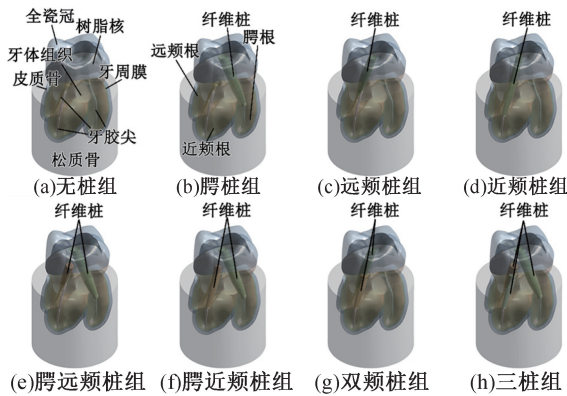


图 1 不同修复方式模型

Fig. 1 Models restored by different methods (a) NP group, (b) PP group, (c) DP group, (d) MP group, (e) PDP group, (f) PMP group, (g) DMP group, (h) PDMP group

1.3 有限元分析

在 ANSYS 中为每组模型建立 1 个结构静力分析系统, 并为每个部件赋予材料属性: 冠由氧化锆陶瓷制成, 桩则为石英纤维增强复合树脂桩, 冠和牙体组织及核之间由树脂水门汀粘接, 核为复合树脂核, 桩则以与复合树脂核相同材质的树脂水门汀与牙本质粘接。除纤维桩为正交各向异性的线弹

性材料外, 其余材料均视为各向同性的线弹性材料。具体的材料及组织力学性能参数见表 1。

表 1 材料及组织力学性能参数

Tab. 1 Mechanical properties of materials and tooth tissue

材料	弹性模量/MPa	泊松比
松质骨 ^[13,19]	1 370	0.30
皮质骨 ^[13,19]	13 700	0.30
牙本质 ^[13,19]	18 600	0.31
牙胶尖 ^[20]	141.9	0.45
牙周膜 ^[19]	68.9	0.45
冠粘接树脂水门汀 ^[21]	18 300	0.30
直接修复用复合树脂 ^[21-22]	12 000	0.33
复合树脂核、桩粘接树脂水门汀 ^[20]	16 440	0.26
氧化锆全瓷冠 ^[13,22]	200 000	0.33
	$E_x = 50\ 000$	
石英纤维增强复合树脂桩 ^[14]	$E_x = E_z = 15\ 000$	0.30

每个模型都被划分成包含约 40 000 个 10 节点四面体单元的网格。分别施加两种载荷: ① 工况 1, 在殆面的中央窝、近中及远中边缘嵴、近腭尖顶和远腭尖顶平行牙体长轴施加 800 N 力, 以模拟垂直殆力 [见图 2(a)]; ② 工况 2, 在殆面近颊尖和远颊尖三角嵴上与牙体长轴呈 45° 角施加 225 N 力, 以模拟侧向殆力 [见图 2(b)]^[23]。牙槽骨的底面和侧面固定约束, 受力时各界面间不发生相对滑动。测定牙体组织和纤维桩内的等效应力分布及桩-水门汀界面和水门汀-根管壁界面上的切应力分布^[6,24]。

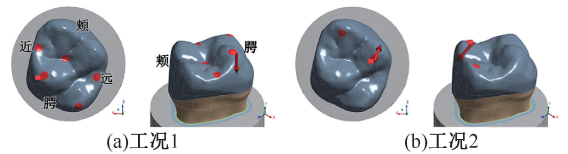


图 2 载荷示意图

Fig. 2 Schematics of force loading (a) Working condition 1, (b) Working condition 2

2 结果

2.1 牙体组织内等效应力分布

在牙体组织外表面, 在相同载荷下, 不同组间的应力分布形式相似。垂直加载时, 应力集中于根干腭侧; 侧向加载时, 应力集中于根干近颊侧。垂直、侧向载荷下最大等效应力分别出现在 MP、PP 组, 最小等效应力分别出现在 PP、PDP 组 (见图 3)。

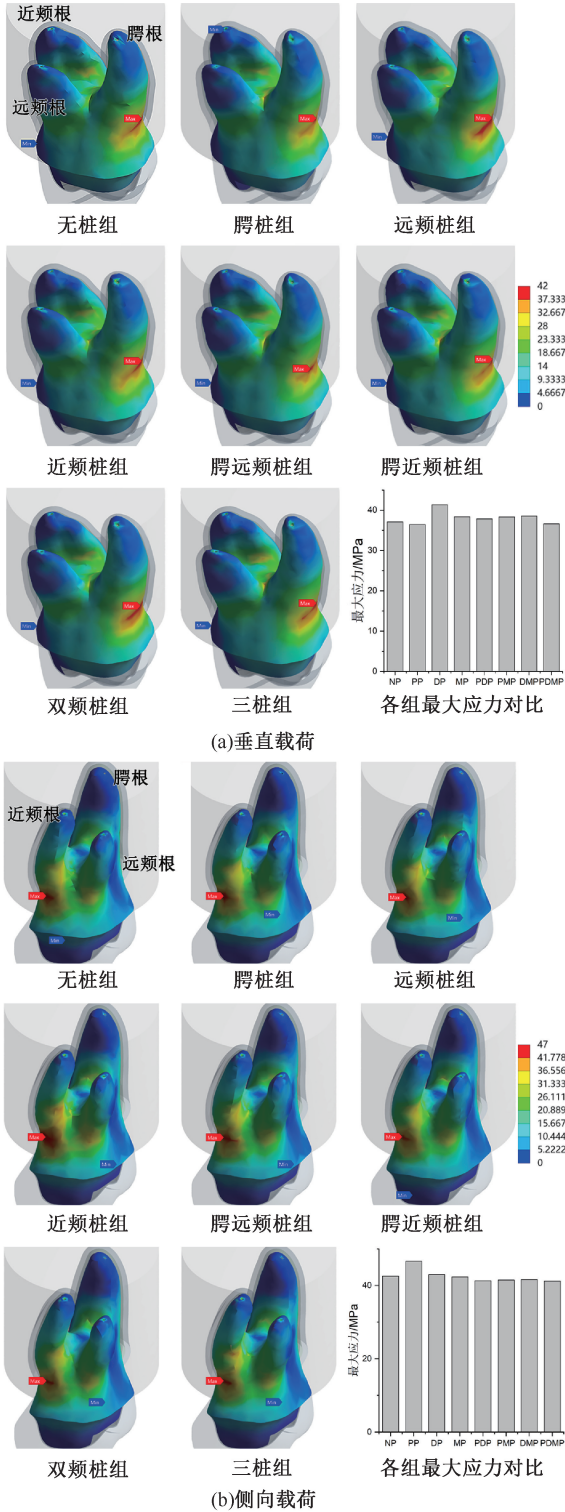


图 3 不同载荷下牙体组织外表面等效应力分布
Fig. 3 Equivalent stress distributions on external surfaces of tooth tissues under different loading (a) Under vertical loading, (b) Under Lateral loading

最大应力普遍出现在根管中 1/3 及尖 1/3 处。在置入纤维桩后,相应根管中 1/3 处内表面的最大应力上升,而根管颈 1/3 处内表面的最大应力下降,应力集中于桩道与下方未预备根管壁所形成的外线角处(见表 2)。

表 2 根管内表面最大等效应力

Tab. 2 Maximum equivalent stress on internal surfaces of root canals 单位:MPa

分组	部位	垂直载荷			侧向载荷		
		腭根	远颊根	近颊根	腭根	远颊根	近颊根
NP	颈 1/3	25.553	16.769	14.807	13.405	13.351	23.422
	中 1/3	23.907	16.769	13.785	16.633	19.090	25.578
	尖 1/3	18.674	19.438	19.132	11.701	19.311	25.404
PP	颈 1/3	18.424	17.325	14.489	11.095	13.954	23.220
	中 1/3	35.120	16.639	13.132	19.876	19.251	25.975
	尖 1/3	24.020	19.645	35.018	11.711	20.020	37.918
DP	颈 1/3	25.126	15.462	14.726	13.520	13.636	23.518
	中 1/3	24.094	31.050	13.682	16.600	22.059	26.693
	尖 1/3	24.871	20.706	18.681	11.923	20.809	24.826
MP	颈 1/3	25.024	16.290	13.626	13.569	13.730	22.168
	中 1/3	24.197	16.033	21.430	16.306	19.400	33.540
	尖 1/3	24.336	19.309	20.303	11.855	19.100	26.804
PDP	颈 1/3	18.377	14.702	14.629	11.300	13.487	23.110
	中 1/3	36.572	30.533	14.504	19.384	21.373	25.405
	尖 1/3	25.232	20.691	20.828	11.767	20.719	23.201
PMP	颈 1/3	18.384	16.282	14.771	11.345	12.908	21.262
	中 1/3	42.767	16.282	25.773	22.579	19.153	41.837
	尖 1/3	24.801	19.930	21.610	11.053	19.304	28.567
DMP	颈 1/3	24.970	15.029	14.680	13.175	13.211	20.481
	中 1/3	23.796	30.573	25.054	16.340	20.994	41.623
	尖 1/3	24.294	18.926	19.778	11.544	18.369	26.488
PDMP	颈 1/3	18.276	16.105	13.900	11.194	13.186	22.187
	中 1/3	34.583	28.178	20.499	18.003	19.830	32.905
	尖 1/3	23.102	18.890	25.706	11.140	19.334	33.885

注:每个根管内的最大应力及其所在部位粗体标注。

2.2 纤维桩内等效应力分布

纤维桩内最大等效应力对比如表 3 所示。垂直载荷下,在同一根管中,主桩(如 DP、MP 组中的颊桩)产生的应力较辅桩(如 PDP、PMP 组中的颊桩)大;在不同根管中,腭桩产生的应力最大。侧向载荷下,近颊桩产生的应力最大。

此外,在垂直载荷下,当主桩位于颊根内(即 DP、MP、DMP 组)时,最大等效应力出现在纤维桩的骀面;而在其他组中,最大等效应力出现在桩尖处(见图 4)。

对比根管内表面上的应力可知,根管内表面的

表 3 纤维桩内最大等效应力

Tab. 3 Maximum equivalent stresses in the posts 单位: MPa

分组	垂直载荷	侧向载荷	
腭桩	PP	64.151	25.715
	PDP	67.035	25.503
	PMP	66.612	25.304
	PDMP	74.892	25.340
远颊桩	DP	56.083	26.133
	PDP	41.942	28.462
	DMP	47.339	25.692
	PDMP	41.229	27.264
近颊桩	MP	47.621	50.799
	PMP	42.285	54.779
	DMP	36.482	48.774
	PDMP	38.268	47.790

表 4 桩-水门汀界面上最大切应力

Tab. 4 Maximum shear stress on post-cement interface 单位: MPa

分组	垂直载荷	侧向载荷	
腭桩	PP	12.138	7.188
	PDP	15.672	7.516
	PMP	13.580	7.295
	PDMP	11.603	7.294
远颊桩	DP	11.754	7.090
	PDP	8.154	6.758
	DMP	14.960	6.726
	PDMP	7.828	6.743
近颊桩	MP	18.567	12.351
	PMP	7.138	12.461
	DMP	8.155	13.134
	PDMP	7.384	12.796

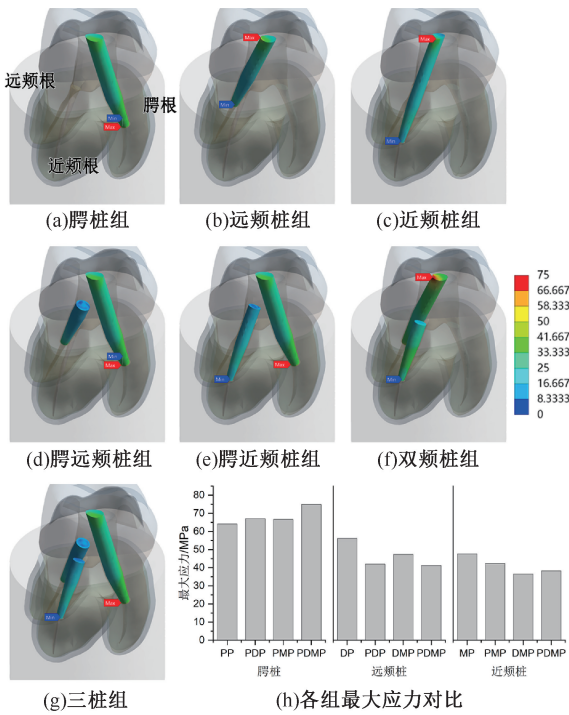


图 4 垂直载荷下纤维桩内等效应力分布

Fig. 4 Equivalent stress distributions in the posts under vertical loading (a) PP group, (b) DP group, (c) MP group, (d) PDP group, (e) PMP group, (f) DMP group, (g) PDMP group, (h) Comparison of maximum stress in each group

2.3 桩-水门汀界面上的切应力分布

桩-水门汀界面上的最大切应力对比如表 4 所示。垂直载荷下,在同一根管,主桩(如 DP、MP 组中的颊桩)在桩-水门汀界面上产生的切应力较辅桩(如 PDP、PMP 组中的颊桩)大。侧向载荷下,近颊桩的桩-水门汀界面上切应力最大。

此外,在垂直载荷下,PP 组的切应力集中于近桩尖处,其余组的切应力则集中于主桩-水门汀界面的殆方边界(见图 5)。

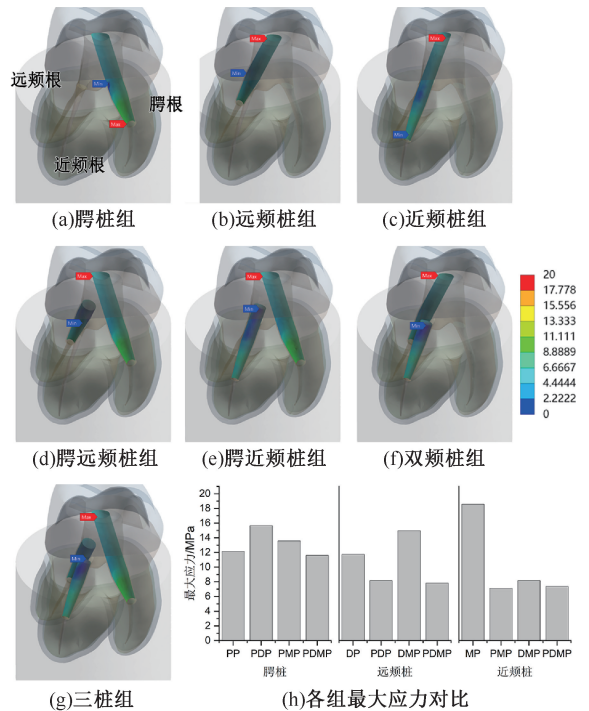


图 5 垂直载荷下纤维桩-水门汀界面上切应力分布

Fig. 5 Shear stress distributions on post-cement interface under vertical loading (a) PP group, (b) DP group, (c) MP group, (d) PDP group, (e) PMP group, (f) DMP group, (g) PDMP group, (h) Comparison of maximum stress in each group

2.4 水门汀-根管壁界面上的切应力分布

水门汀-根管壁界面上的最大切应力对比如

表 5 所示。垂直载荷下,腭根内放置纤维桩时(PP、PDP、PMP、PDMP 组)水门汀-根管壁界面上的最大切应力大于只在颊根内放置纤维桩时(DP、MP、DMP 组);侧向载荷下,近颊根放置纤维桩时(MP、PMP、DMP、PDMP 组)水门汀-根管壁界面上的最大切应力明显高于其他组。

表 5 水门汀-根管壁界面上最大切应力

Tab. 5 Maximum shear stresses on cement-dentin interface

分组	单位:MPa	
	垂直载荷	侧向载荷
PP	10.140	7.075
DP	7.879	7.216
MP	7.560	11.535
PDP	10.304	7.076
PMP	10.166	11.604
DMP	8.060	11.738
PDMP	10.384	11.566

3 讨论

本文结果显示,上颌第 1 磨牙进行纤维桩-树脂核-全瓷冠修复后,同一载荷下牙体组织外表面上的应力分布形式基本相同,最大应力差距也不大,与赵莉等^[9]的研究结果相似。本文认为,牙体外表面上的应力分布形式可能与牙本身的形态和受力方式有关,而与桩的数目及所在根管的关系不大。此外,各组模型在牙根颈 1/3 及根分叉处牙体外表面上都检测到较大的应力,提示保留这些部位牙体组织对纤维桩修复的重要性。

在置入纤维桩的根管内表面中 1/3 处,应力较未置入桩时均显著升高;而在这些根管的颈 1/3 处,应力除了在侧向载荷下的远颊根管中出现上升以外,其他根管内均出现了下降,与 Yoon 等^[6]的结果相似,提示纤维桩具有将骀力向根方传导、从而保护牙颈部牙体组织的作用。观察置入纤维桩根管内表面中 1/3 处应力集中的位置,可见所有应力集中点均位于桩道与下方未预备根管壁所形成的外线角处,这可能与桩道末端形成的较为锐利的线角有关,提示纤维桩生产厂家在设计纤维桩及配套的根管预备钻形态时,不应使纤维桩尖端及预备后桩道末端形成锐利的线角。鉴于置入纤维桩后根管内表面的最大应力(42.767 MPa)也未超过牙体组织的抗弯强度(100~200 MPa)^[25-27],本文认为,进行纤维桩-树

脂核修复并不会导致牙根受力过大而发生根折。而与腭根中置入单根纤维桩(PP 组)相比,增加纤维桩数目并未明显减小牙根内表面应力,提示使用多根纤维桩并不能提高牙体组织的抗折能力。

垂直、侧向载荷下所受应力最大的纤维桩分别是腭桩和近颊桩,提示两者分别是将垂直和侧向骀力向根方传导、降低牙颈部牙体组织应力的主要部件。此时,纤维桩所受最大应力(74.892 MPa)远小于其抗弯强度(741 MPa)^[28]。因此,腭桩和近颊桩可以有效地保护牙颈部剩余牙体组织,而又不至于发生纤维桩的断裂。

垂直载荷下,当颊桩作主桩(DP、MP 和 DMP 组)时,桩-水门汀界面上所受的切应力较作为辅桩(PDP、PMP、DMP 和 PDMP 组)时更大,且应力集中于骀面边界,结合 DP、MP 和 DMP 组在垂直载荷下主桩内的等效应力也集中于纤维桩骀面的现象,提示在上颌第 1 磨牙颊根内放置主桩并不能有效地将垂直骀力向根方分散,在对上颌第 1 磨牙进行纤维桩核修复时,应将主桩放置于腭根内。而且,在腭根放主桩的多桩组(PDP、PMP 和 PDMP 组)中,桩-水门汀界面的切应力仍集中于骀面边界,提示在颊根内放置辅桩影响了腭桩在桩-水门汀界面上的应力分散,不应在颊根内放置纤维桩。但即便在仅腭根中放置主桩的 PP 组中,垂直载荷下的桩-水门汀界面的最大切应力(12.138 MPa)也已超过了未经表面处理的纤维桩与树脂水门汀(Multilink Speed, Ivoclar Vivadent 公司,列支敦士登)的粘接强度(10.49 MPa)^[29],提示临床上应降低患牙所受骀力。并且今后应该进一步改进纤维桩的表面处理及树脂粘接剂的性能,以提高纤维桩与树脂水门汀的粘接强度,避免纤维桩脱粘接的发生。

在水门汀-根管壁界面上,垂直载荷下腭根内放置纤维桩时界面上的最大切应力高于其他组,侧向载荷下近颊根放置纤维桩时界面上的最大切应力高于其他组。这可能与腭桩和近颊桩分别传导了较多的垂直向骀力和侧向骀力,从而对水门汀-根管壁界面产生较大的切应力有关。但二者的最大切应力(10.384、11.738 MPa)均未超过树脂水门汀与牙本质之间的粘接强度(老化前 21.8~40.2 MPa,老化 6 个月后 11.8~32.3 MPa)^[30],故不会导致树脂水门汀与根管壁间产生脱粘接。

综上所述,对于 DOP 缺损的上颌第 1 磨牙,纤维桩能有效地将殆力向根方传导,改善剩余牙体组织中的应力分布。综合牙体组织与桩内的应力分布以及桩-树脂水门汀、树脂水门汀-根管壁界面上的切应力分布,本文认为,在腭根内置入 1 根纤维桩进行纤维桩-树脂核-全瓷冠修复是该类患牙的最佳治疗策略。

本研究中,所有的模型均来自同一颗离体牙,鉴于个体差异的存在,以及 FEA 中的近似化处理,得到的结论并不能完全反映所有临床情况。此外,本文只研究了 DOP 这 1 种缺损类型,后续还需进一步开展关于上颌第 1 磨牙其他缺损类型的 FEA 研究。

参考文献:

[1] YAMUNADEVI A, PRATIBHA R, RAJMOHAN M, *et al.* First molars in permanent dentition and their malformations in various pathologies: A review [J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2021, 13(Suppl 1): S23-S30.

[2] 王美青, 何三纲. 口腔解剖生理学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2014: 321.

[3] ELIYAS S, JALILI J, MARTIN N. Restoration of the root canal treated tooth [J]. *Br Dent J*, 2015, 218(2): 53-62.

[4] HARGREAVES KM, BERMAN LH. Cohen's pathways of the pulp expert consult [M]. Philadelphia: Elsevier Inc., 2015: 130-208.

[5] SCHWARTZ RS, ROBBINS JW. Post placement and restoration of endodontically treated teeth: A literature review [J]. *J Endod*, 2004, 30(5): 289-301.

[6] YOON HG, OH HK, LEE DY, *et al.* 3-D finite element analysis of the effects of post location and loading location on stress distribution in root canals of the mandibular 1st molar [J]. *J Appl Oral Sci*, 2018, 26: e20160406.

[7] 付钢, 杜莉, 任媛妹, 等. 不同设计桩核的后牙残根核桩冠修复体的三维有限元应力分析 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2009, 27(1): 24-28.

[8] 赵莉, 李丽君, 赵克, 等. 不同桩核系统修复上颌第 1 磨牙的有限元分析 [J]. *上海口腔医学*, 2013, 22(6): 607-612.

[9] MISHRA L, KHAN AS, VELO MMAC, *et al.* Effects of surface treatments of glass fiber-reinforced post on bond strength to root dentine: A systematic review [J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1967.

[10] MANNOCCI F, COWIE J. Restoration of endodontically treated teeth [J]. *Br Dent J*, 2014, 216(6): 341-346.

[11] VERÍSSIMO C, SIMAMOTO JÚNIOR PC, SOARES CJ, *et al.* Effect of the crown, post, and remaining coronal dentin on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary central incisors [J]. *J Prosthet Dent*.

2014, 111(3): 234-246.

[12] KAINOSE K, NAKAJIMA M, FOXTON R, *et al.* Stress distribution in root filled teeth restored with various post and core techniques: Effect of post length and crown height [J]. *Int Endod J*, 2015, 48(11): 1023-1032.

[13] LI X, KANG T, ZHAN D, *et al.* Biomechanical behavior of endocrowns vs fiber post-core-crown vs cast post-core-crown for the restoration of maxillary central incisors with 1 mm and 2 mm ferrule height: A 3D static linear finite element analysis [J]. *Medicine*, 2020, 99(43): e22648.

[14] AUSIELLO P, CIARAMELLA S, MARTORELLI M, *et al.* Mechanical behavior of endodontically restored canine teeth: Effects of ferrule, post material and shape [J]. *Dent Mater*, 2017, 33(12): 1466-1472.

[15] 王文亚, 傅波, 罗华, 等. 不同桩核冠修复上颌中切牙的三维有限元模型建立及应力分析 [J]. *医用生物力学*, 2014, 29(1): 25-30.

WANG WY, FU B, LU H, *et al.* Three-dimensional finite element modeling and stress analysis on different posts and cores for repairing the maxillary central incisors [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(1): 25-30.

[16] 羊茜, 冉淑君, 王冬梅, 等. 利用三维有限元分析根尖切除对上颌中切牙生物力学性能的影响 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(4): 337-342.

YANG Q, RAN SJ, WANG DM, *et al.* The effect of apical resection on biomechanical properties of maxillary central incisor by three-dimensional analysis [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(4): 337-342.

[17] ÖZTÜRK C, POLAT S, TUNÇDEMİR M, *et al.* Evaluation of the fracture resistance of root filled thin walled teeth restored with different post systems [J]. *Biomed J*, 2019, 42(1): 53-58.

[18] GLORIA A, MAIETTA S, MARTORELLI M, *et al.* FE analysis of conceptual hybrid composite endodontic post designs in anterior teeth [J]. *Dent Mater*, 2018, 34(7): 1063-1071.

[19] GONZÁLEZ-LLUCH C, PÉREZ-GONZÁLEZ A. Analysis of the effect of design parameters and their interactions on the strength of dental restorations with endodontic posts, using finite element models and statistical analysis [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2016, 19(4): 428-439.

[20] SAVYCHUK A, MANDA M, GALANIS C, *et al.* Stress generation in mandibular anterior teeth restored with different types of post-and-core at various levels of ferrule [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(6): 965-974.

[21] MAHMOUDI M, SAIDI AR, AMINI P, *et al.* Influence of inhomogeneous dental posts on stress distribution in tooth root and interfaces: Three-dimensional finite element analysis [J]. *J Prosthet Dent*, 2017, 118(6): 742-751.