

[文章编号] 1671-587X(2024)05-1259-07

DOI:10.13481/j.1671-587X.20240509

基于下颌第一前磨牙根管预备前后牙本质应力分布差异的 CBCT和三维有限元分析

姜鑫淼, 徐智博, 甄雨琦, 白玛曲珍, 孟秀萍
(吉林大学口腔医院牙体牙髓科, 吉林 长春 130021)

[摘要] **目的:** 分析下颌第一前磨牙根管直径并利用有限元分析法模拟3种不同预备方式下牙本质的应力分布, 为临床下颌第一前磨牙根管预备策略提供依据。**方法:** 选择21例锥形束计算机断层扫描(CBCT)图像资料完整的患者, 将CBCT原始数据DICOM格式文件导入Mimics 21.0软件, 测量距下颌第一磨牙根尖孔3、6、9和12 mm处根管直径并分段计算根管锥度, 在此基础上构建牙体组织和牙周组织三维有限元模型, 分为对照组、最大直径预备组、均匀预备组和0.06锥度器械预备组。在ANSYS Workbench 17.0有限元分析软件中, 对各组颊尖舌斜面分别施加200 N载荷, 分析各组下颌第一前磨牙牙本质所受应力。**结果:** 距离下颌第一前磨牙根尖孔3~6 mm段、6~9 mm段和9~12 mm段的根管锥度分析, 近远中向距根尖孔3~6 mm根管锥度基本相同; 颊舌向距根尖孔6~9 mm段根管锥度平均为0.29, 大于根尖1/3和根上1/3。在相同的载荷下, 各组下颌第一前磨牙牙本质的应力峰值依次增大, 分别为4.693 6、16.304 0、14.278 0和18.682 0 MPa。最大直径预备组受力集中于根管壁且应力最大, 均匀预备组受力集中于牙根表面且各截面应力均小于最大直径预备组, 0.06锥度器械预备组应力集中于根尖1/3牙根表面。**结论:** 下颌第一前磨牙根管具有椭圆形变锥度的特殊形态, 近远中向和颊舌向根管直径与锥度相差较大, 不同预备方式对根管壁的应力不同, 均匀预备扩大根管的预备方式最佳。

[关键词] 牙根纵裂; 根管直径; 根管预备; 有限元分析; 应力分析

[中图分类号] R78 **[文献标志码]** A

CBCT and three-dimensional finite element analysis based on differences in dentin stress distribution before and after root canal preparation of mandibular first premolar teeth

JIANG Xinmiao, XU Zhibo, ZHEN Yuqi, BAIMA Quzhen, MENG Xiuping

(Department of Endodontics, Stomatology Hospital, Jilin University, Changchun 130021, China)

ABSTRACT Objective: To analyze the root canal diameter of the mandibular first premolar by using finite element analysis to simulate the stress distribution of dentin under three different preparation methods, and to provide the basis for clinical root canal preparation strategies of the mandibular first premolars. **Methods:** Twenty-one patients with complete cone beam computed tomography (CBCT) images were selected. The original DICOM format data from CBCT were imported into Mimics 21.0 software to measure the root canal diameter at 3, 6, 9, and 12 mm from the apex and the root canal taper was

[收稿日期] 2023-09-25

[基金项目] 吉林省财政厅科技项目(JCSZ2021893-23)

[作者简介] 姜鑫淼(1998-), 女, 吉林省长春市人, 在读硕士研究生, 主要从事牙体牙髓病学方面的研究。

[通信作者] 孟秀萍, 副教授, 硕士研究生导师(E-mail: mengxp@jlu.edu.cn)

segmentally calculated. Based on this, three-dimensional finite element models of the dental and periodontal tissues were constructed. Control group, maximum diameter preparation group, uniform preparation group, and 0.06 taper instrument preparation group were designed. In ANSYS Workbench 17.0 finite element analysis software, a 200 N load was applied to the buccal, lingual, and occlusal surfaces in various groups, and the stresses on dentin in various groups were analyzed. **Results:** The analysis of root canal taper at 3–6 mm, 6–9 mm, and 9–12 mm from the apex of mandibular first premolar teeth showed that the taper was similar in the mesial-distal direction at 3–6 mm from the apex. The average taper in the buccal-lingual direction at 6–9 mm from the apex was 0.29, which was greater than the taper in the apical 1/3 and coronal 1/3. Under the same load, the peak stress values in dentin of mandibular first premolar teeth in various groups were increased sequentially: 4.693 6, 16.304 0, 14.278 0, and 18.682 0 MPa. The stress in maximum diameter preparation group concentrated on the canal wall with the highest stress value. The stress in uniform preparation group concentrated on the root surface, and the stress values on each section were lower than those in maximum diameter preparation group. The stress in 0.06 taper instrument preparation group concentrated on the apical 1/3 of the root surface. **Conclusion:** The root canal of the mandibular first premolar has a unique elliptical taper shape, and there are significant differences in diameter and taper between the mesial-distal and buccal-lingual directions. Different preparation methods result in different stress distributions on the canal wall, and the uniform preparation is the best method for enlarging the canal.

KEYWORDS Vertical root fracture; Root canal diameter; Root canal preparation; Finite element analysis; Stress analysis

目前,根管治疗术是治疗牙髓病和根尖周病的最常用和最有效的方法,具体步骤包括根管预备、根管消毒和根管充填^[1-3]。然而接受根管治疗后牙齿牙根纵裂发生率明显升高^[2],可达3.69%~25.00%^[4-5],主要原因与根管治疗过程中对根管壁的切削导致剩余管壁不足以承受咬合力有关。研究^[6-9]显示:近远中径较小的椭圆形根管更易发生牙根纵裂,尤其是根管治疗后前磨牙牙根纵裂的发生率是未经根管治疗前磨牙的2倍。为了降低前磨牙根管治疗后牙根纵裂的发生率,应充分认识根管解剖形态和锥度,在最大程度去除感染牙本质的情况下,尽量减少牙本质的切削量尤为重要。迄今为止,尚无研究基于牙齿形态特征和应力分布提出一种能够同时控制根管感染及减少牙根纵裂发生率的根管预备策略,本研究收集临床锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)成像数据,采用Mimics 21.0软件辅助测量,分析下颌第一前磨牙根管直径和锥度,采用有限元分析法模拟3种不同根管预备模式下牙本质的应力分布,为下颌第一前磨牙根管预备策略及预备器械的选择提供依据。

1 资料与方法

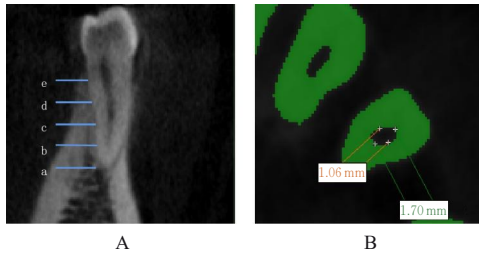
1.1 一般资料 and 主要设备

收集在吉林大学口腔

医院牙体牙髓病科就诊并拍摄CBCT的患者21例,随机选择其下颌左侧或右侧第一前磨牙。纳入标准:CBCT影像可清晰分辨下颌第一前磨牙牙本质和髓腔;被选择牙齿根管系统为单根管;牙根和根管无明显弯曲;未行根管治疗或修复;牙齿周围骨质未见明显异常。CBCT仪(芬兰ProMax 3D公司),Mimics 21.0软件(比利时Materialise公司),Geomagic Wrap 2021软件(美国Raindrop公司),Solidworks 2021软件(法国Dassault Systemes公司),ANSYS Workbench 17.0软件(美国ANSYS公司)。

1.2 患者下颌第一前磨牙根管直径测量 将21例患者CBCT原始数据的DICOM格式文件导入Mimics 21.0软件,采用灰度阈值调整显示牙本质范围(图1A)。分别选取解剖性根尖孔和距根尖孔3、6、9及12 mm的轴位图像,将其CBCT原始数据的DICOM格式文件导入Mimics 21.0软件,测量近远中向直径和颊舌向直径(图1B)。

1.3 牙体组织三维有限元模型建立 从21例患者的CBCT图像中选择1例清晰度较高的DICOM格式原始数据,采用Mimics 21.0软件进行三维重建,调整阈值后提取牙釉质和牙本质的三维模型,保存为STL格式文件,导入Geomagic Wrap 2021软件,进行去除钉状物、减少噪音、快速光滑处理及打磨



A: a—e presented 0, 3, 6, 9, and 12 mm from apical foramen, respectively; B: Root canal diameters measured by Mimics 21.0.

图1 下颌第一前磨牙根管直径测量方法示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of measuring methods of root canal diameter of mandibular first premolar tooth

等处理, 最后重划网格、构造格栅并得到牙釉质及牙本质的实体模型。取21例患者CBCT图像测量所得的根管直径平均值, 采用Solidworks 2021软件构建根管模型, 见图2。与牙釉质和牙本质的实体模型结合, 模拟深达牙本质深层的树脂充填作为对照组(图3A)。

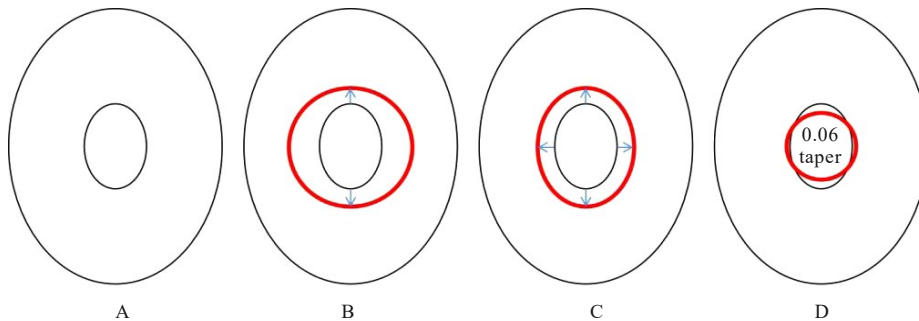
PETERS等^[10]利用光学显微镜和电子显微镜



图2 对照组根管模型的建立

Fig. 2 Establishment of root canal model in control group

发现细菌在牙本质小管内的最大穿透深度能达到 $375\ \mu\text{m}$ 。最大直径组在对照组的基础上, 颊舌向分别切割 $375\ \mu\text{m}$ 牙本质, 以此为直径模拟将进行圆形切割, 其余与对照组相同(图3B)。均匀预备组在对照组的基础上, 颊向、舌向、近中向和远中向均切割 $375\ \mu\text{m}$ 牙本质, 其余与对照组相同(图3C)。0.06锥度器械预备组模拟临床使用0.06锥度根管锉进行预备, 建立不规则髓腔模型, 其余与对照组相同(图3D)。



A: Control group; B: Maximum diameter preparation group; C: Uniform preparation group; D: 0.06 taper instrument preparation group.

图3 各组根管预备方式示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of preparation methods of root in various groups

1.4 牙周组织三维有限元模型建立 将牙本质与牙槽骨重叠部分整体偏移 $0.2\ \text{mm}$ 得到牙周膜(图4)。在牙周膜外侧模拟建立牙槽骨模型(图5)。



图4 牙周膜模型

Fig. 4 Model of periodontal ligament

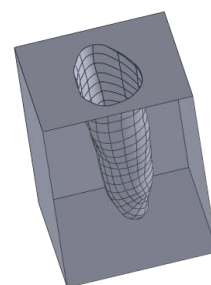


图5 牙槽骨模型

Fig. 5 Model of alveolar bone

1.5 对照组和3种不同预备方式的三维有限元分析 将牙体组织与牙周组织组合, 得到对照组和三种不同预备方式的下颌第一前磨牙三维有限元模

型。将4个模型导入 ANSYS Workbench 17.0 软件进行有限元分析。采用 ANSYS Workbench 17.0 软件对模型进行网格划分, 节点数和单元数分别为 37 759~140 694 及 19 265~85 155, 见图 6。

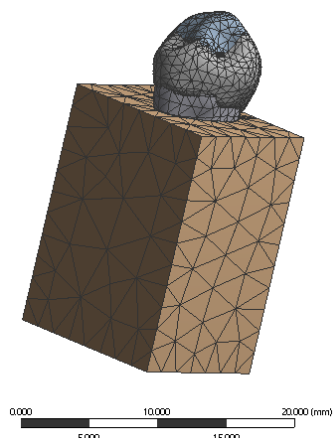


图 6 下颌第一前磨牙有限元模型网格划分示意图

Fig. 6 Schematic diagram of mesh division of finite element model of mandibular first premolar

1.6 牙体、牙周组织和充填修复材料的力学参数

牙体、牙周组织和充填修复材料的力学参数^[11-15]见表 1。

表 1 牙体、牙周组织和充填修复材料的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of dental tissue, periodontal tissue, and filling restorative material

Material/structure	Elastic modulus(E /MPa)	Poisson's ratio
Enamel	80 000.00	0.30
Dentin	18 600.00	0.27
Endodontium	2.07	0.45
Gutta-percha point	0.69	0.45
Alveolarbone	13 700.00	0.30
Parodontium	68.90	0.45
Compound resin	12 000.00	0.30

1.7 边界条件加载方式 实验中各部件均假设为连续、均质且各向同性线性弹性材料。牙槽骨底部固定, 在下颌第一前磨牙颊尖的舌斜面平行于牙体长轴施加 200 N 的载荷, 观察 Von Mises 应力大小和应力集中位置。

1.8 统计学分析 采用 GraphPad Prism 9.0 统计软件进行统计学分析。距根尖孔 3、6、9 和 12 mm 处近远中向和颊舌向根管直径均符合正态分布, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示。各截面近远中向与颊舌向根管直径和根

管锥度差异比较采用配对 t 检验。距根尖孔不同区段的根管锥度差异比较采用单因素方差分析, 组间两两比较采用 LSD- t 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 下颌第一前磨牙根管直径和锥度 距离解剖性根尖孔 3 mm 截面处近远中根管直径和颊舌向根管直径 [(0.56±0.22) mm vs (0.35±0.08) mm] 比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。距根尖孔 6 mm 处近远中向根管直径与颊舌向根管直径 [(0.52±0.10) mm vs (0.97±0.40) mm]、距根尖孔 9 mm 处近远中向与颊舌向根管直径 [(0.70±0.13) mm vs (1.84±0.68) mm] 和距根尖孔 12 mm 处近远中向与颊舌向根管直径 [(0.89±0.19) mm vs (2.32±0.60) mm] 比较差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。

除距根尖孔 3 mm 处以外的每一截面近远中与颊舌向根管直径差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 可以认为下颌第一前磨牙在距根尖孔 3 mm 处的根管形态为类圆形。从距根尖孔 3 mm 处到冠方, 近远中向与颊舌向根管直径差异显著, 根管形态从类圆形变为椭圆形。

根据近远中向和颊舌向根管直径测量结果, 分别计算距根尖孔 3~6 mm 段、6~9 mm 段及 9~12 mm 段的根管锥度, 锥度 = $(D-d)/l$, D 为冠方根管直径, d 为根方根管直径, l 为 D 和 d 之间的距离。见表 2。单因素方差分析结果显示: 近远中向 3 段锥度比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 颊舌向距根尖孔 6~9 mm 段根管锥度与其余 2 段根管锥度比较差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 距根尖孔 3~6 mm 段与 9~12 mm 段根管锥度比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

表 2 下颌第一前磨牙的根管锥度

Tab. 2 Root canal tapers of mandibular first premolar teeth

($\bar{x} \pm s$)

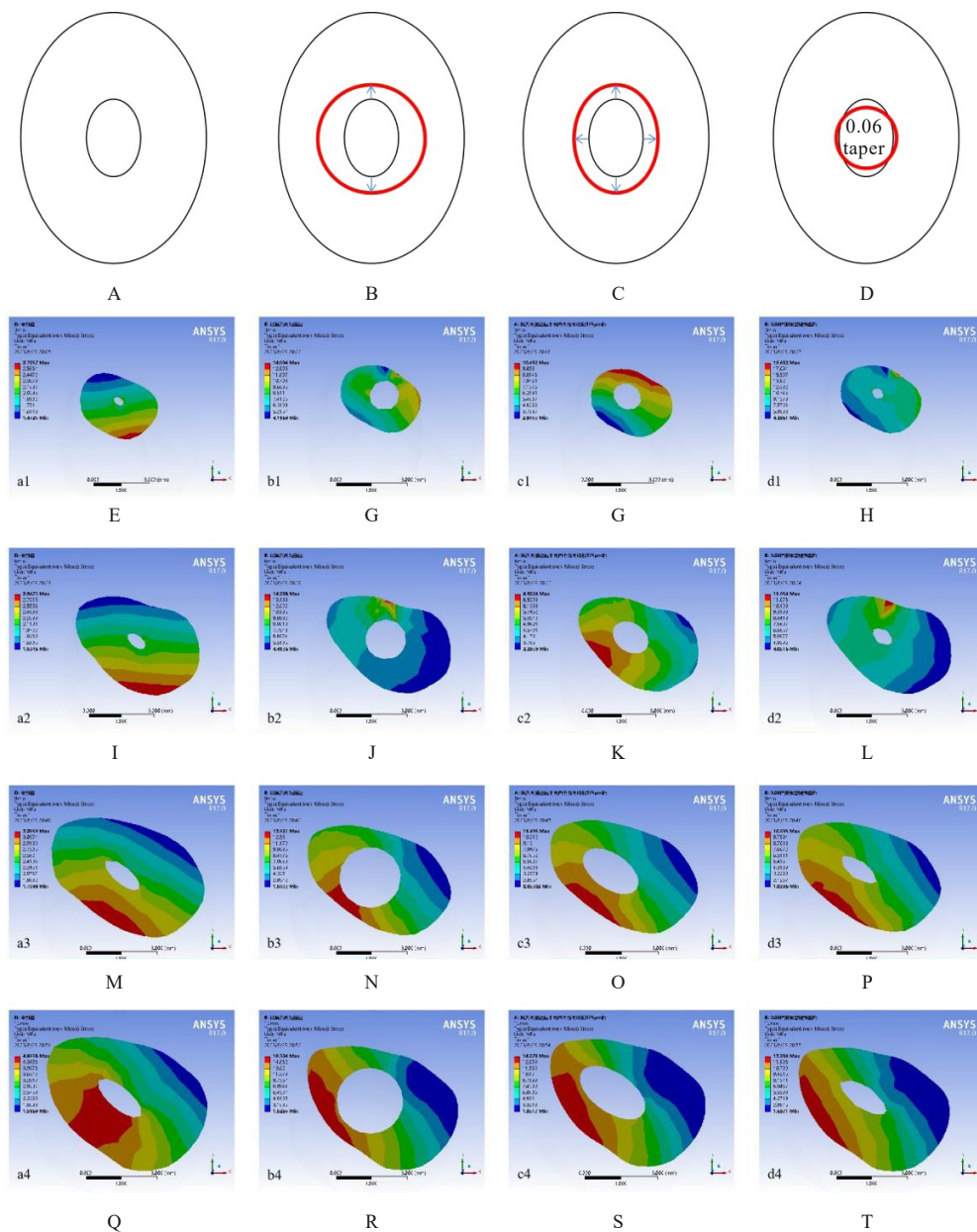
Group	Root canal taper	
	Mesiodistal	Buccolingual
Distance from anatomical apical foramen(mm)		
3-6	0.06±0.04	0.13±0.09 ^{*△}
6-9	0.06±0.04	0.29±0.19 [*]
9-12	0.06±0.04	0.16±0.22 [△]

^{*} $P < 0.05$ vs mesiodistal root canal taper; [△] $P < 0.05$ vs root canal taper of 6-9 mm from anatomical apical foramen.

提示颊舌向根管根中1/3段锥度较大, 根上1/3与根尖1/3锥度较小, 平均锥度为0.13~0.16。
2.2 下颌第一前磨牙3种根管预备方式的有限元分析 施加相同载荷, 在距离根尖孔3、6、9和12 mm处牙本质所受应力最大值, 对照组分别为2.725 2、2.847 3、3.255 9、和4.693 6 MPa, 最大直径组分别为14.004、14.286、13.921和16.304 MPa, 均匀预备组分别为10.492 0、6.922 4、

11.495 0和14.278 0 MPa, 0.06锥度器械预备组分别为18.682 0、11.954 0、10.895 0和13.284 0 MPa。见图7。

最大直径组在距离根尖孔9和12 mm处应力集中区均位于近中根管壁, 且除距离根尖孔3 mm处以外, 其余处的牙本质受力均为4组中最高, 距离根尖孔12 mm处达到应力最大值(16.304 0 MPa)。见图8。均匀预备组所有截面应力集中区均位于近



A: Control group; B: Maximum diameter preparation group; C: Uniform preparation group; D: 0.06 taper instrument preparation; E-H: Stress maps in control group; I-L: Stress maps in diameter preparation group; M-P: Stress maps in uniform preparation group; Q-T: Stress maps in 0.06 taper instrument preparation group; E, I, M, Q: 3 mm from apical foramen; F, J, N, R: 6 mm from apical foramen; G, K, N, R: 9 mm from apical foramen; H, L, P, T: 12 mm from apical foramen.

图7 对照组和3种不同根管预备模式的有限元分析图

Fig. 7 Finite element analysis diagrams of control group and three different root canal preparation models

中牙根表面,未集中于根管壁,牙本质在所有截面所受应力值均小于最大直径组,在距离根尖孔12 mm处应力达最大值(14.278 0 MPa)。0.06锥度器械预备组在距离根尖孔3 mm处牙根表面出现较大应力集中,应力达18.682 0 MPa,其他截面牙本质所受应力均小于最大直径组且应力集中区均位于牙根表面。

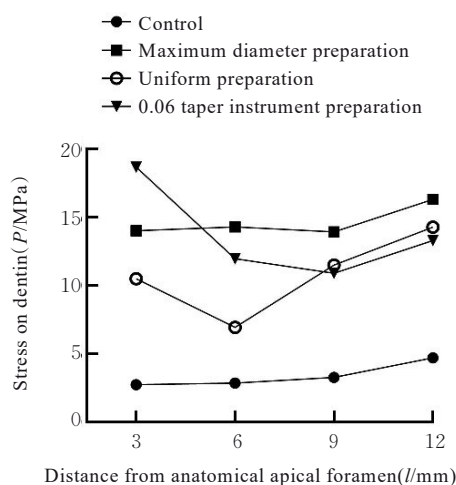


图8 牙本质所受应力曲线

Fig. 8 Curves of stress on dentin

3 讨论

在进行根管预备时,需要使用根管锉去除感染牙本质^[11-13]。研究^[14-16]显示:切削根管壁增加根管预备锥度和根管充填时的侧向力,导致牙体组织的抗力性能降低,增加牙根纵裂风险。机用镍钛锉因其切削力较大,会产生牙本质裂纹,超过某一定程度后可能还会导致根尖产生裂纹^[17-21]。采用小锥度器械预备可能会造成残余感染牙本质未完全去除,最终可能导致根管治疗失败。研究^[22]显示:在使用常规器械预备时,椭圆形根管普遍存在近远中向过度预备或颊舌侧未被彻底清洁的问题。本研究结果显示:下颌第一前磨牙的颊舌向根管直径远大于近远中向根管直径,颊舌向根管锥度与近远中向根管锥度相差较大,近远中向根管锥度为0.06,颊舌向根管锥度为0.13~0.29,根管中段锥度最大,整体根管形态呈椭圆形。

本实验中0.06锥度器械预备组模拟了临床上使用0.06锥度的器械进行根管终末预备的情形,结果显示:牙本质整体应力较小,其根尖处的牙根表面存在应力集中,且颊舌向根管壁去除牙本质质量较小,未能将大部分感染牙本质清除,增大了治疗

失败的可能性;最大直径预备组采用符合颊舌向根管锥度的大锥度器械预备,其根上1/3牙本质应力集中于根管壁,且所有截面应力最大值均大于均匀预备组。本文作者认为:为将感染牙本质全部清除而盲目使用大锥度器械不可取,该方式将增加牙根纵裂风险。均匀预备组模拟4个方向均切削375 μm牙本质,是在彻底清除感染牙本质的前提下尽可能保存了剩余牙本质。但有研究^[23-24]显示:椭圆形根管受力不如圆形根管更加均匀。本文作者认为:椭圆形根管的根管预备需要区别于圆形根管,建议在下颌第一前磨牙根管预备时,首先使用0.06锥度的器械预备近远中向根管壁,然后使用0.04锥度根管锉从近远中向颊舌向逐渐上下提拉,尽可能实现均匀预备模式。

综上所述,下颌第一前磨牙的根管形态较特殊,使用常规预备方法可能会导致预备过度或预备不足。临床医生需要了解每一颗牙的根管解剖形态,必要时也可通过有限元分析结果个性化地选择合适的器械进行预备,尽量减少因根管预备过度而导致的牙根纵裂和因预备不足导致感染的残留。

利益冲突声明:

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明:

姜鑫淼和徐智博参与文献检索、实验设计及论文撰写,姜鑫淼和甄雨琦参与数据收集及分析,徐智博和白玛曲珍参与论文结果分析及讨论,孟秀萍参与论文写作指导和审校。

[参考文献]

- [1] 周学东.牙体牙髓病学[M].5版.北京:人民卫生出版社,2020.
- [2] YOSHINO K, ITO K, KURODA M, et al. Prevalence of vertical root fracture as the reason for tooth extraction in dental clinics[J]. Clin Oral Investig, 2015, 19(6): 1405-1409.
- [3] COHEN S, BERMAN L H, BLANCO L, et al. A demographic analysis of vertical root fractures[J]. J Endod, 2006, 32(12): 1160-1163.
- [4] PAN X, TANG R, GAO A T, et al. Cross-sectional study of posterior tooth root fractures in 2015 and 2019 in a Chinese population[J]. Clin Oral Investig, 2022, 26(10): 6151-6157.
- [5] LIAO W C, CHEN C H, PAN Y H, et al. Vertical root fracture in non-endodontically and endodontically treated teeth: current understanding and future

- challenge[J]. *J Pers Med*, 2021, 11(12): 1375.
- [6] MUNARI L S, BOWLES W R, FOK A S L. Relationship between canal enlargement and fracture load of root dentin sections[J]. *Dent Mater*, 2019, 35(5): 818-824.
- [7] INCEYUSUFOGLU S, SARICAM E, OZDOGAN M S. Finite element analysis of stress distribution in root canals when using a variety of post systems instrumented with different rotary systems [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023:1-13.
- [8] YUSUFOGLU S I, SARICAM E, OZDOGAN M S. Finite element analysis of stress distribution in root canals when using a variety of post systems instrumented with different rotary systems [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(7): 1436-1448.
- [9] CHAN C P, LIN C P, TSENG S C, et al. Vertical root fracture in endodontically versus nonendodontically treated teeth: a survey of 315 cases in Chinese patients[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 1999, 87(4): 504-507.
- [10] PETERS L B, WESSELINK P R, BUIJS J F, et al. Viable bacteria in root dentinal tubules of teeth with apical periodontitis[J]. *J Endod*, 2001, 27(2): 76-81.
- [11] 赵信义, 孙 皎, 包崇云, 等. 口腔材料学[M]. 5版. 北京: 人民卫生出版社, 2012.
- [12] HOLMES D C, DIAZ-ARNOLD A M, LEARY J M. Influence of post dimension on stress distribution in dentin[J]. *J Prosthet Dent*, 1996, 75(2): 140-147.
- [13] RUBIN C, KRISHNAMURTHY N, CAPILOUTO E, et al. Stress analysis of the human tooth using a three-dimensional finite element model[J]. *J Dent Res*, 1983, 62(2): 82-86.
- [14] 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.
- [15] 李 锐, 付昊杰, 孙晶晶, 等. 处理牙本质基质浸提液对牙髓干细胞成牙分化的影响[J]. *郑州大学学报(医学版)*, 2023, 58(3): 310-315.
- [16] RUNDQUIST B D, VERSLUIS A. How does canal taper affect root stresses?[J]. *Int Endod J*, 2006, 39(3): 226-237.
- [17] 袁建桥, 陈 斯, 牛龙龙, 等. 生理性支抗技术在牙性前突拔牙矫治中的磨牙支抗控制效果[J]. *郑州大学学报(医学版)*, 2023, 58(4): 516-520.
- [18] SABETI M, KAZEM M, DIANAT O, et al. Impact of access cavity design and root canal taper on fracture resistance of endodontically treated teeth: an *ex vivo* investigation[J]. *J Endod*, 2018, 44(9): 1402-1406.
- [19] 高小洁, 徐维宁. 2种不同根管预备技术与牙根纵折的原因分析[J]. *上海口腔医学*, 2012, 21(3): 321-324.
- [20] 王 梓, 许婉倩, 薛 明. 根管机械预备与牙本质微裂[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2021, 14(2): 138-142.
- [21] 王 雯, 王鹏来, 谢妮娜, 等. 不同器械预备根管对隐裂性牙髓炎临床治疗效果的影响[J]. *口腔医学*, 2019, 39(5): 427-431.
- [22] TAHA N A, OZAWA T, MESSER H H. Comparison of three techniques for preparing oval-shaped root canals [J]. *J Endod*, 2010, 36(3): 532-535.
- [23] VERSLUIS A, MESSER H H, PINTADO M R. Changes in compaction stress distributions in roots resulting from canal preparation [J]. *Int Endod J*, 2006, 39(12): 931-939.
- [24] KIM H C, LEE M H, YUM J, et al. Potential relationship between design of nickel-titanium rotary instruments and vertical root fracture [J]. *J Endod*, 2010, 36(7): 1195-1199.