

文章编号: 1004-7220(2024)04-0724-06

# 预制裂纹的预备后椭圆形根管牙根有限元模型构建及分析

陈词<sup>1a,2</sup>, 王通<sup>1b</sup>, 李慧影<sup>1a,2</sup>, 付静<sup>1c,2</sup>, 郭婧涵<sup>1a,2</sup>, 许海平<sup>1a,2</sup>

(1. 青岛大学附属医院 a. 口腔内科, b. 信息管理部, c. 口腔修复科, 山东 青岛 266003;

2. 青岛大学 口腔医学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:**目的 分析椭圆形根管牙根两种预备形态下, 根管壁微裂纹对牙根受力的影响。方法 选择椭圆形根管的前磨牙 20 颗, 器械扩大预备根管、制造微裂纹并染色, 切片后显微镜下观察牙本质微裂纹的产生及分布。据此构建两种预备形态下预制裂纹的牙根模型, 评估受力时微裂纹处及牙根的应力分布。结果 椭圆形根管牙根的微裂纹总是出现在颊舌侧, 由根管壁向牙根表面扩展, 与有限元分析所展示的应力集中在根管壁颊舌侧的规律一致。微裂纹使根管壁的应力集中点向裂纹尖端处转移, 且在尖端极小区域内出现近 5 倍的应力剧增, 使微裂纹极易沿尖端方向扩展, 尤其在牙体长轴方向。结论 微裂纹的存在不改变椭圆形根管牙根颊舌侧应力集中的特点, 但微裂纹的产生使其尖端极小区域内出现剧增的应力集中, 这可能是微裂纹迅速扩展为牙根纵裂的机制, 临床操作需提高警惕。

**关键词:** 椭圆形根管; 根管预备; 微裂纹; 应力分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.023

## Construction and Analysis of Finite Element Models for Oval Root Canals after Preparation with Micro-Crack

CHEN Ci<sup>1a,2</sup>, WANG Tong<sup>1b</sup>, LI Huiying<sup>1a,2</sup>, FU Jing<sup>1c,2</sup>, GUO Jinghan<sup>1a,2</sup>, XU Haiping<sup>1a,2</sup>

(1a. Department of Stomatology, 1b. Information Management Department, 1c. Department of Prosthodontics, the Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266003, Shandong, China; 2. School of Stomatology, Qingdao University, Qingdao 266003, Shandong, China)

**Abstract: Objective** To analyze the stress distributions of two root canal preparation shapes of oval root canals with micro-crack. **Methods** Twenty single-canal mandibular premolars with oval canals were expanded to create micro-cracks. Roots were sectioned after staining. The generation and distribution of dentin micro-cracks were observed under microscope. Then a finite element (FE) model of sectioned enlarged oval canal roots with micro-cracks was established. The stress distribution of micro-crack and root were analyzed under lateral loading. **Results** Cracks always appeared in the buccolingual sides of oval canal roots and extended from the intracanal wall to the root surface. This was consistent with the stress concentration on the buccolingual side of the root canal wall shown by FE analysis. When micro-cracks occurred, stresses were transferred to the crack tip and the peak values increased sharply nearly 5 times. This made the cracks propagate easily along this direction,

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(81600903)

通信作者: 许海平, 副教授, 硕士生导师, E-mail: xuhaiping16@163.com

especially in the long axis direction of the tooth. **Conclusions** The presence of micro-cracks does not change the general stress concentration on root with two preparation morphologies of oval canals. However, the micro-crack causes an extreme stress concentration in the crack tip. This may be the mechanism of rapid propagation of microcracks into vertical root fracture, and dentists need to pay high attention.

**Key words:** oval canals; root canal preparation; micro-cracks; stress distribution

牙根纵裂(vertical root fracture, VRF)是指局限于牙根部的纵向折裂,往往导致拔牙<sup>[1]</sup>。根管治疗(root canal treatment, RCT)后牙齿发病率明显增加<sup>[2]</sup>,因此,研究 RCT 对牙根力学行为的影响,避免医源性可控因素对牙根造成的损伤,成为预防 VRF 的重要工作。首先,RCT 过程中对根管内壁施加的各种力可能是根部牙本质折裂的直接原因<sup>[3-4]</sup>。其次,根管预备在清除感染、成形根管的同时,对牙根的抗折性有复杂的影响。根管预备一方面使牙本质厚度减少,降低了牙根的抗折能力<sup>[5]</sup>;另一方面却使根管形成圆缓流畅的内壁,避免了天然根管不规则造成的应力集中<sup>[6]</sup>。

不同根管形态的牙根在根管预备前后抗折力改变不同<sup>[7]</sup>。目前,根管预备与牙根抗折力的研究多见于圆形根管,而对于 VRF 好发的椭圆形根管研究却非常有限。椭圆形根管是指在距离根尖 5 mm 处、长径超过短径 2 倍的根管,其发生率高达 25%<sup>[8]</sup>。由于目前根管预备器械基本为旋转切割的锉针,对椭圆形根管进行预备时,往往只扩大根管中央而颊舌端预备不全,有学者提倡往复手法拂刷椭圆形根管,以期形成光滑的内壁<sup>[9]</sup>,但根管近远中壁出现隆起的情况仍时有发生。明确预备后不同根管形态对根管壁及牙根应力分布的影响,对于优化椭圆形根管的根管预备,预防 VRF 具有重要意义<sup>[10]</sup>。

根部牙本质微裂纹在活髓牙和 RCT 牙中均可能发生<sup>[11]</sup>,这可能成为 VRF 的起始缺陷,严重影响患牙的预后。临床研究发现,微裂纹使根管手术后牙齿的 3 年成功率由 91.7% 下降到 31.8%<sup>[12]</sup>。在根管预备过程中,过度切割牙本质、局部预备力过大均可造成原有微裂纹的扩展或新微裂纹的萌生<sup>[13]</sup>。目前,随着镍钛器械柔韧性及操作方法的改良,根管预备造成的微裂纹可得到有效控制<sup>[14]</sup>。但是在 RCT 前、加压充填及桩道预备过程中,根管壁微裂纹的产生仍在所难免。微裂纹的存在可能使

牙根局部的应力重新分布,在后续受力过程中,极易进展为贯通牙本质的 VRF。

本文利用体外实验模拟评估根管壁微裂纹的产生情况,据此构建微裂纹牙根的有限元模型,分析两种根管预备形态下微裂纹对牙根应力分布的影响,预测裂纹扩展的机制,并明确椭圆形根管的根管预备形状目标,为预防医源性 VRF 的发生提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 椭圆形根管牙根微裂纹发生位置的模拟与评估

**1.1.1 样本筛选及制备** 选取青岛大学附属医院口腔颌面外科门诊因正畸拔除、完整无龋坏、无充填材料、活髓的单根下颌第二前磨牙,患者年龄 18~30 岁。牙齿的收集不改变任何治疗方案,均获得患者知情同意,并取得青岛大学附属医院医学伦理委员会批准。牙齿保存在 4 ℃ Hank's 溶液中直至使用。去除离体牙上的牙结石及软组织,牙科显微镜(3000E 口腔显微镜,博恩登特科技有限公司)下排除根面有裂纹、根面龋坏、根尖敞开的牙齿。CBCT(i-CAT FLX, KAVO 公司,美国)扫描,共筛选出椭圆形根管牙齿 25 颗,样本随机分为对照组( $n=5$ )和实验组( $n=20$ )。对照组不进行根管预备,实验组疏通根管并确定工作长度,排除无法疏通达到工作长度的样本,并补充新样本。实验组使用 WaveOne(Dentsply Sirona 公司,美国)镍钛锉切削根管壁至大号(40# 0.08 锥度)。

**1.1.2 裂纹观察** 1% 亚甲基蓝染料(福州飞净生物科技有限公司)根管内染色。每颗牙在距离根尖 5、7、9、11 mm 处切割,制备 4 个厚度 2 mm 牙根切片。牙科显微镜 20×放大倍数下观察切片的微裂纹,记录位置和方向。SPSS 软件统计分析牙根不同位置微裂纹的产生情况,Fisher 精确概率检验比较组间有无差异,采用双侧检验,显著性水平  $P=0.05$ 。

## 1.2 预制裂纹的椭圆形根管有限元模型构建及分析

### 1.2.1 有限元模型建立、分组及网格划分

CBCT扫描形态标准、单个椭圆形根管的离体下颌第二前磨牙,数据导入 Mimics 21.0 (Materialise 公司,比利时)生成虚拟实体模型。本实验聚焦微裂纹局部的应力分布规律,因此简化实体模型,截取 3 mm 椭圆形根管牙根并引入微裂纹展开研究,据此评估局部微裂纹的产生对牙根受力的影响。模型导入 HyperWorks 2020 (Altair Engineering 公司,美国)切割根管壁,建立两种预备形状的椭圆形筒状结构的三维模型,分别记为模型 A1、B1。其中,模型 A1 近远中根管壁存在隆起,椭圆形根管中心处进行预备,颊舌侧根管壁只进行光滑处理;模型 B1 为扩大的椭圆形根管,沿椭圆形根管壁均匀去除 0.1 mm 牙本质。在 SolidWorks 2021 (Dassault Systems 公司,美国)中建立长 0.5 mm、深度 0.2 mm、最宽处 20  $\mu\text{m}$  微裂纹模型,裂纹设计及尺寸参考文献 [15-16]。根据体外实验微裂纹的产生位置及方向,将微裂纹模型与椭圆形根管牙根模型组合,使微裂纹位于根管颊侧,起始于根管壁及根方横断面,指向牙根表面及冠方,微裂纹长径对应牙体长轴,深度对应裂纹向根面进展的深度,建成根管壁预制微裂纹的模型,分别记为模型 A2、B2。其中,模型 A2 近远中根管壁存在隆起,颊侧根管壁预制微裂纹。模型 B2: 扩大的椭圆形根管,颊侧根管壁预制微裂纹(见图 1)。

将实体模型导入 ABAQUS 2021 (ABAQUS 公司,美国), Mesh 模块划分网格并检验网格质量,采用四面体 10 节点的网格划分模式,通过平衡计算精度和成本进行收敛测试<sup>[17]</sup>,确定合适的网格尺寸,牙本质网格种子尺寸为 0.15 mm,裂纹处网格进行局部细化。单元数及节点数详见表 1。

### 1.2.2 实验假设条件、材料力学参数及边界约束

假设模型中材料连续、均质和线性弹性,牙本质的弹性模量为 18.6 GPa,泊松比为 0.31<sup>[18]</sup>。在该模型中,约束施加在牙根表面。

### 1.2.3 载荷条件及应力结果分析

在根管壁上垂直于根管壁施加 1 N/mm<sup>2</sup> 侧向力, ABAQUS 软件测量模型内节点分析牙根内最大主应力的分布。

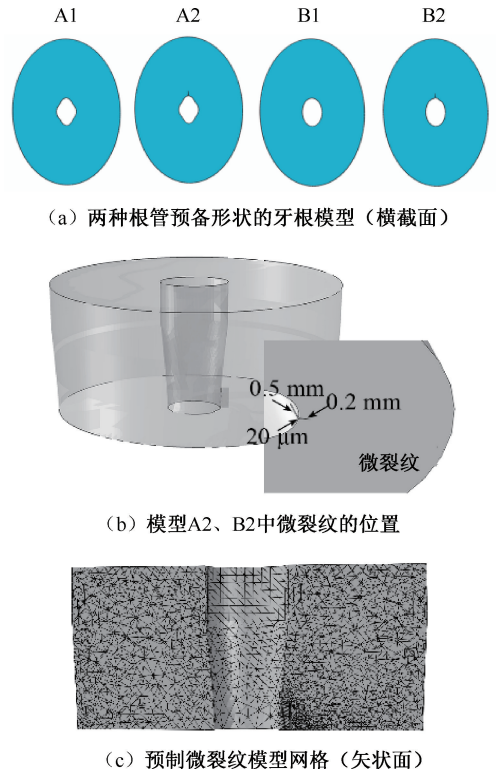


图 1 简化牙根有限元模型建立情况

Fig. 1 Simplified finite element modeling of the roots (a) Two root canal preparation models (cross sections), (b) Location of micro-crack in model A2, B2, (c) Mesh at the model with micro-crack (sagittal plane)

表 1 两种根管预备形状下预制微裂纹有限元模型的分组及单元数和节点数

Tab. 1 Description of different models, summarizing the number of mesh elements and nodes used in the models.

模型	描述	单元数	节点数
A1	近远中根管壁存在隆起	58 196	83 700
A2	近远中根管壁存在隆起,颊侧根管壁预制微裂纹	130 111	368 282
B1	扩大的椭圆形根管	35 955	52 053
B2	扩大的椭圆形根管,颊侧根管壁预制微裂纹	124 786	354 704

## 2 结果

体外实验中,对照组牙根切片未观察到微裂纹产生,而实验组 10% 的切片观察到牙本质微裂纹(见表 2)。微裂纹主要分布于牙根的下段,但不同位置的发生率没有统计学差异( $P=0.25$ )。微裂纹均位于在根管的颊舌端,自根管壁向牙根表面扩展(见图 2)。

表 2 牙根不同位置上牙本质缺陷产生情况

Tab. 2 Occurrence of dentinal micro-cracks in different sections of roots

距根尖距离/mm	有微裂纹	没有微裂纹	缺陷率/%
5	4	16	20 <sup>ns</sup>
7	2	18	10 <sup>ns</sup>
9	2	18	10 <sup>ns</sup>
11	0	20	0 <sup>ns</sup>
总数	8	72	10

注: <sup>ns</sup> 表示组间没有统计学差异。

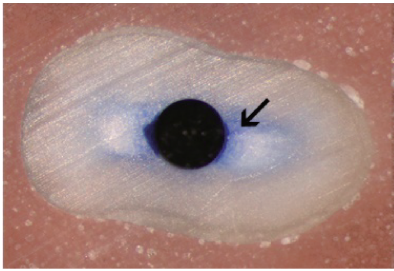


图 2 牙根切片所观察的微裂纹

Fig. 2 Dentinal micro-crack observed in root section

有限元分析表明,无论根管壁是否存在微裂纹,椭圆形根管牙根的应力峰值均出现在根管的颊舌侧壁,应力从根管壁向牙根表面递减传递。与模型 B 相比,模型 A 根管颊舌壁与近远中壁隆起的交界处呈现反方向较小的压应力,这一隆起结构改变了应力在根管壁和牙根表面的传递规律(见图 3)。模型 B 中根管壁的最大应力均稍小于模型 A,无裂纹组根管壁颊、舌侧最大应力减小了 15.3%~16.9%,有裂纹组减小了 19.4%~20.3%(见表 3)。

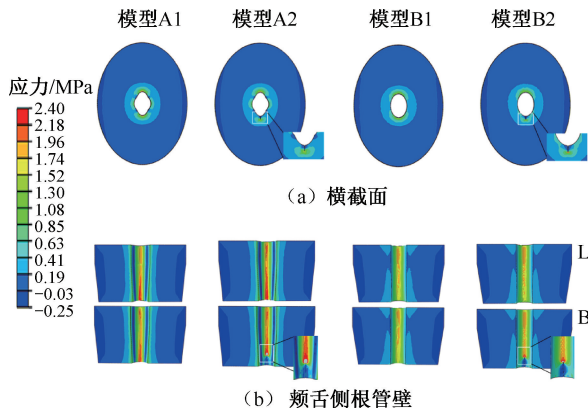


图 3 载荷下两种根管预备形态及预制微裂纹模型应力分布情况

Fig. 3 Stress distributions of two root canal preparation models with or without micro-crack under loading (a) Cross-sections, (b) Buccolingual plane of models

注: B 为颊侧, L 为舌侧。

表 3 载荷下各模型最大应力

Tab. 3 The maximum stress of different models under the load

模型	颊侧根管壁	舌侧根管壁	裂纹径向尖端	牙根表面
A1	2.264	2.334	—	-0.088
A2	13.294	2.410	1.759	-0.089
B1	1.917	1.940	—	-0.120
B2	10.596	1.942	6.264	-0.107

单位: MPa

注: - 代表力的方向。

比较微裂纹预制前后可见,微裂纹使根管壁的应力集中点向裂纹尖端处转移,且在微裂纹尖端极小区域内出现近 5 倍增高的应力集中(见图 4)。模型 A 根管壁最大应力由 2.264 MPa 增大至 13.294 MPa,模型 B 由 1.917 MPa 增大至 10.596 MPa。微裂纹在轴向和径向尖端均出现应力集中,且轴向尖端处应力峰值增大更明显。比较两个带微裂纹模型的应力峰值发现,在微裂纹轴向尖端处,模型 A2 较模型 B2 高约 25.5%,而在微裂纹径向尖端处,模型 A2 较模型 B2 低约 71.9%(见表 3)。

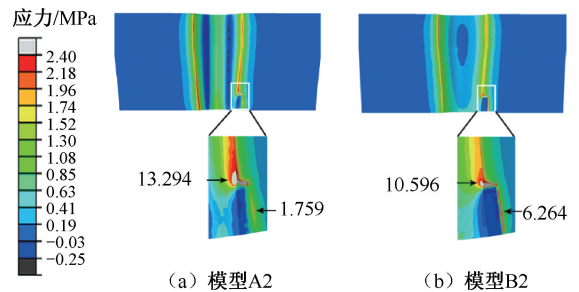


图 4 预制微裂纹模型应力分布状况矢状面观

Fig. 4 Stress concentration of oval root canal models with crack in sagittal plane (a) Model A2, (b) Model B2

### 3 讨论

本文针对 VRF 好发的椭圆形根管牙根,通过切片观察法评估牙本质微裂纹的产生情况。结果表明,对照组切片过程未引入微裂纹,而实验组根管壁微裂纹的发生率达 10%。实验组微裂纹的制造是通过过度的根管预备、降低锉的转速和提高切削时锉的前进速度等,放大了器械与根管壁接触产生的应力<sup>[19]</sup>,从而人为增加微裂纹的发生率,目的是明确椭圆形根管牙根受力时微裂纹产生的位置,不特指某一根管内操作,也不影响椭圆形根管牙根微裂纹发生的规律。比较实验组牙根不同部位发现,根尖部裂纹的产生率达 20%,而根颈部无裂纹产

生,这一规律与以往对圆形根管的研究规律一致<sup>[20]</sup>。微裂纹往往出现在根管壁的颊舌侧,自根管壁向牙根表面进展,这些均符合临床所见的 VRF 好发位置及扩展方向<sup>[21]</sup>。

根据断裂力学原理,裂纹萌生后,材料受外力时裂纹附近应力重新分布,使裂纹尖端极小区域内的应力迅速增大,当超过材料的极限抗张强度时,裂纹迅速发生失稳扩展并开裂。因此,牙本质作为一种脆性材料<sup>[22]</sup>,微裂纹的存在可能改变牙根的应力分布<sup>[23]</sup>,牙根抗折力明显降低,在后续根管充填、桩修复等根管内受力及后期咬合载荷下,微裂纹继续扩展,成为 VRF 的“起始缺陷”。

有限元分析部分根据体外实验结果构建了引入微裂纹后的模型,模拟根管预备、根管充填和桩道制备等根管内操作过程中根管壁受到的侧向力,施加垂直于根管壁的载荷<sup>[24]</sup>。考虑到椭圆形根管预备后的复杂形态,本文建立了两种预备后的根管形态,分析其对牙根应力分布的影响。结果表明,不论根管壁是否存在微裂纹,椭圆形根管两种预备形态下应力均集中在颊舌侧根管壁,这与体外实验观察到的微裂纹位置一致,也是微裂纹产生于此的原因。模型 B 光滑的根管壁应力峰值比模型 A 减小了 15.3%~20.3%;模型 A 牙根表面的应力与模型 B 相比降低了 16.8%~26.7%,表明模型 A、B 两种根管预备形态对整个牙根抗折性的影响各有利弊。实际上,在椭圆形根管牙根的临床治疗中,根管预备后近远中侧根管壁产生隆起是难以避免的。

比较微裂纹产生前后的应力分布特点,发现微裂的存在并未改变上述两个预备形态下的整体应力分布规律。但是,微裂纹的引入使根管内壁的高应力区向裂纹尖端转移,应力峰值迅速增加了近 5 倍。这一应力集中在裂纹轴向尖端更为明显,提示裂纹极可能沿牙根长轴方向扩展。但两种根管预备形态下,微裂纹处的最大应力有明显差异,模型 B2 裂纹轴向尖端的应力峰值比模型 A2 低约 20.3%,但裂纹径向尖端的应力峰值较模型 A2 高约 256.1%。该结果表明,模型 B2 的裂纹较 A2 更容易产生径向方向的扩展。

## 4 结论

由于椭圆形根管牙根在颊舌侧根管壁的应力

集中,微裂纹往往会萌生于此处。微裂纹的产生不改变这一应力集中的特点,也不改变两种根管预备形态下牙根的总体应力分布规律。但是,微裂纹的产生使裂纹尖端极小区域内出现剧增的应力集中,尤其在牙体长轴方向,使微裂纹迅速沿轴向延伸。两种根管预备形态下微裂纹的延伸有所不同,扩大的椭圆形根管与存在不规则隆起的形态相比,更易沿径向向牙根表面扩展。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**陈词、许海平负责选题、实验设计;陈词、王通完成有限元模型构建;陈词负责有限元计算;李慧影、郭婧涵负责体外实验;陈词、付静负责论文撰写;许海平负责论文修改。

## 参考文献:

- [1] SEE WK, HO JC, HUANG CF, *et al.* The association between clinical diagnostic factors and the prevalence of vertical root fracture in endodontic surgery [J]. J Formos Med Assoc, 2019, 118(3): 713-720.
- [2] GUO XL, LI G, YIN S, *et al.* Effect of fracture orientation on detection accuracy of vertical root fractures in non-endodontically treated teeth using cone beam computed tomography [J]. Clin Oral Investig, 2019, 23(12): 4433-4439.
- [3] PRADEEPKUMAR AR, SHEMESH H, VAN LOVEREN C, *et al.* Impact of apical extent of root canal filling on vertical root fracture: A case-control study [J]. Int Endod J, 2019, 52(9): 1283-1289.
- [4] ZELIC K, VUKICEVIC A, JOVICIC G, *et al.* Mechanical weakening of devitalized teeth: Three-dimensional finite element analysis and prediction of tooth fracture [J]. Int Endod J, 2015, 48(9): 850-863.
- [5] MUNARI LS, BOWLES WR, FOK ASL. Relationship between canal enlargement and fracture load of root dentin sections [J]. Dent Mater, 2019, 35(5): 818-824.
- [6] LERTCHIRAKARN V, PALAMARA J, MESSER H. Patterns of vertical root fracture: Factors affecting stress distribution in the root canal [J]. J Endod, 2003, 29(8): 523-528.
- [7] WU MK, VAN DER SLUIS LW, WESSELINK PR. Comparison of mandibular premolars and canines with respect to their resistance to vertical root fracture [J]. J Dent, 2004, 32(4): 265-268.
- [8] WU MK, R'ORIS A, BARKIS D, *et al.* Prevalence and extent of long oval canals in the apical third [J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2000, 89(6):

739-743.

- [ 9 ] ALATTAR S, NEHME W, DIEMER F, *et al.* The influence of brushing motion on the cutting behavior of 3 reciprocating files in oval-shaped canals [ J ]. *J Endod*, 2015, 41(5): 703-709.
- [ 10 ] JOU YT, KARABUCAK B, LEVIN J, *et al.* Endodontic working width: Current concepts and techniques [ J ]. *Dent Clin North Am*, 2004, 48(1): 323-335.
- [ 11 ] PRADEEPKUMAR AR, SHEMES H, CHANG JW, *et al.* Preexisting dentinal microcracks in nonendodontically treated teeth: An *ex vivo* micro-computed tomographic analysis [ J ]. *J Endod*, 2017, 43(6): 896-900.
- [ 12 ] TAWIL PZ, SARAIYA VM, GALICIA JC, *et al.* Periapical microsurgery: The effect of root dentinal defects on short- and long-term outcome [ J ]. *J Endod*, 2015, 41(1): 22-27.
- [ 13 ] SOARES CJ, RODRIGUES MP, FARIA ESAL, *et al.* How biomechanics can affect the endodontic treated teeth and their restorative procedures? [ J ]. *Braz Oral Res*, 2018, 32 (suppl 1): e76.
- [ 14 ] 张旻, 张淞柏, 王君俊. 口腔生物力学 2022 年研究进展 [ J ]. *医用生物力学*, 2023, 38(5): 854-863.  
ZHAGN M, ZHANG BS, WANG JJ. Research advances in dental biomechanics in 2022 [ J ]. *J Med Biomech*, 2023, 38(5): 854-863.
- [ 15 ] 李静静. 上颌第二前磨牙早期牙根纵裂根管充填不同材料后的三维有限元分析[ D ]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- [ 16 ] LERTCHIRAKARN V, PALAMARA JEA, MESSER HH, *et al.* Patterns of vertical root fracture: Factors affecting stress distribution in the root canal [ J ]. *J Endod*, 2003, 29 (8): 523-528.
- [ 17 ] ZHANG Z, ZHOU S, LI Q, *et al.* Sensitivity analysis of bi-layered ceramic dental restorations [ J ]. *Dent Mater*, 2012, 28 (2): e6-14.
- [ 18 ] 仲麒, 黄雨捷, 张轶凡, 等. 远中邻牙合腭面缺损的上颌第 1 磨牙纤维桩-树脂核修复的有限元分析[ J ]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1107-1113.  
ZHONG Q, HUANG YJ, ZHANG YF, *et al.* Finite element analysis on frc post-and-resin core restored maxillary first molar with disto-occluso-palatal defect [ J ]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1107-1113.
- [ 19 ] ABDELKAWY A, HOSSAM M, EL-HOFY H. Mathematical model of thrust force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials based on the ductile-to-brittle transition phenomenon [ J ]. *Int J Adv Manuf Tech*, 2019, 101(1): 801-813.
- [ 20 ] FRÁTER M, JAKAB A, BRAUNITZER G, *et al.* The potential effect of instrumentation with different nickel titanium rotary systems on dentinal crack formation—An *in vitro* study [ J ]. *PLoS One*, 2020, 15(9): e0238790.
- [ 21 ] VON ARX T, BOSSHARDT D. Vertical root fractures of endodontically treated posterior teeth: A histologic analysis with clinical and radiographic correlates [ J ]. *Swed Dent J*, 2017, 127(1): 14-23.
- [ 22 ] 徐远志, 杨启祥, 汪饶饶, 等. 年龄与位置对牙本质力学性质的影响[ J ]. *医用生物力学*, 2017, 32(6): 519-523.  
XU YZ, YANG QX, WANG RR. Effects of aging and location on mechanical properties of human dentin [ J ]. *J Med Biomech*, 2017, 32(6): 519-523.
- [ 23 ] PAWAR AM, THAKUR B, KFIR A, *et al.* Dentinal defects induced by 6 different endodontic files when used for oval root canals: An *in vitro* comparative study [ J ]. *Restor Dent Endod*, 2019, 44(3): e31.
- [ 24 ] SATHORN C, PALAMARA JE, MESSER HH. A comparison of the effects of two canal preparation techniques on root fracture susceptibility and fracture pattern [ J ]. *J Endod*, 2005, 31(4): 283-287.