

[DOI] 10.12016/j.issn.2096-1456.2021.06.003

· 基础研究 ·

根管超声冲洗的计算流体动力学分析

邢小宇, 李艳萍, 张琳, 何丽娜, 刘会梅, 牛玉梅

哈尔滨医科大学附属口腔医院牙体牙髓科, 黑龙江 哈尔滨(150001)

【摘要】 目的 应用计算机模型分析当超声工作尖位于根管内一定深度时冲洗液的计算流体动力学特点, 以为临床应用提供参考。方法 首先使用扫描激光振测系统扫描超声工作尖, 分析其在一定功率下的振动特点。然后应用ICEM CFD 18.0软件建立根管超声冲洗模型, 设置超声工作尖放置的位置为距根尖止点1 mm, 通过FLUENT 18.0软件获取结果云图, 分析冲洗液的空化体积分数、流动速度及其对根尖压力。结果 超声工作尖振动是以横向振动为主伴轻微的纵向振动; 工作尖各部分横向振动的幅度均不同, 工作尖尖端振幅最大, 越靠近锉基部, 振幅越小。冲洗液空化体积分数大于0的区域集中在工作尖周围; 在工作尖周围冲洗液流速较大, 最高达2 m/s, 在工作尖前方约0.2 mm内, 冲洗液流速大于0.1 m/s, 而在距根尖0.8 mm范围内, 冲洗液流速较小甚至为0; 根尖压力为非正压。结论 根据实验结果推断, 当超声工作尖放在距根尖1 mm处时, 冲洗液不会溢出根尖孔, 冲洗过程相对安全; 同时冲洗液在工作尖前方约0.2 mm内冲洗作用较强。

【关键词】 根管治疗; 根管超声冲洗; 根管冲洗液; 空化; 计算流体动力学; 扫描激光振测法; 振动; 根尖压力

【中图分类号】 R78 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 2096-1456(2021)06-0377-06



开放科学(资源服务)标识码(OSID)

【引用著录格式】 邢小宇, 李艳萍, 张琳, 等. 根管超声冲洗的计算流体动力学分析[J]. 口腔疾病防治, 2021, 29(6): 377-382. doi: 10.12016/j.issn.2096-1456.2021.06.003.

Computational fluid dynamics analysis of the flow of ultrasonic irrigations in root canal XING Xiaoyu, LI Yanping, ZHANG Lin, HE Lina, LIU Huimei, NIU Yumei. Department of Endodontics, The First Affiliated Stomatological Hospital of Harbin Medical University, Harbin 150001, China

Corresponding author: NIU yumei, Email: yumeiniu@163.com, Tel: 86-451-85553234

【Abstract】 Objective To study the computational fluid dynamics (CFD) characteristics of ultrasonic root canal irrigation when the file was placed at a certain depth in the root canal, to provide a reference for clinical application. **Methods** First, scanning laser vibrometry (SLV) was utilized to analyze the characteristics of vibrational ultrasonic files under specific power. Then ICEM CFD 18.0 software was used to establish the root canal ultrasonic irrigation model. The insertion position of the ultrasonic working tip was set 1 mm away from the physiological apical foramen, and cloud images of the results were obtained by FLUENT 18.0 software. Volume fraction, flow velocity and pressure in the root canal were evaluated after setting the computing conditions. **Results** The vibration of the ultrasonic working tip was mainly transverse vibration with slight longitudinal vibration. The amplitude of transverse vibration of each part of the working tip was different. Maximum values were observed at the apical end area of the file, and the closer to the base of the file, the smaller the amplitude. The area where the cavitation volume fraction of the rinsing fluid was greater than 0 was concentrated around the working point. The flow rate of the irrigating fluid was up to 2 m/s, within the area 0.2 mm in front of the working tip, the velocity of the irrigating fluid was greater than 0.1 m/s, while within the area 0.8 mm from the root tip, the velocity of the irrigating fluid was small or even zero. The apical pressure value was non-positive when the tip of the file was 1 mm away from the apical foramen in this model. **Conclusion** Based on the experimental

【收稿日期】 2021-01-05 **【修回日期】** 2021-01-31

【基金项目】 国家自然科学基金面上项目(81970924)

【作者简介】 邢小宇, 医师, 硕士, Email: 1771020419@qq.com

【通信作者】 牛玉梅, 教授, 博士, Email: yumeiniu@163.com, Tel: 86-451-85553234

results, it appears that when the ultrasonic working tip was placed 1 mm short of the working length, the ultrasonic irrigating flow did not overflow the root apical foramen and the irrigation process was relatively safe; the irrigation fluid had a strong irrigation effect within approximately 0.2 mm in front of the working tip.

【Key words】 root canal therapy; ultrasonic root canal irrigation; root canal irrigant; cavitation; computational fluid dynamics; scanning laser vibrometry; vibration; apical pressure

J Prev Treat Stomatol Dis, 2021, 29(6): 377-382.

【Competing interests】 The authors declare no competing interests.

This study was supported by the grants from National Natural Science Foundation of China (No. 81970924).

根管预备是根管治疗术的关键步骤,包括机械预备和化学预备。研究发现,对感染根管即使严格遵守机械预备的程序,根管壁仍有约20%~60%的区域清理不到^[1],因此根管化学预备对根管系统的清理和消毒起着重要作用,是根管预备过程中不可或缺的部分^[2]。近年来,随着对根管化学预备研究的深入,根管超声冲洗已广泛应用于临床。相较于传统注射器冲洗,将超声与冲洗剂联合应用能够更好地清洁根管系统,且越靠近根尖效果越显著^[3]。但由于根尖孔与根尖周组织相连通,在冲洗过程中一旦将冲洗剂推出根尖孔,会对根尖周组织产生刺激作用^[4]。因此超声工作尖插入的深度对于冲洗效果和根尖溢出有显著影响。目前多数学者认为将超声工作尖置于距工作长度1 mm时,根管冲洗效果最好^[5],但尚缺乏理论与实验的支持。本研究应用计算机模型分析当超声工作尖放在距根尖1 mm时,冲洗液的计算流体动力学特点,包括冲洗液的空化体积分数、流动速度及其对根尖压力的影响,以期为临床应用提供理论与实验支持。

1 材料和方法

1.1 材料

扫描激光振测系统(PSV-I-500, Polytec GmbH, D-76337, Waldbronn, 德国);超声治疗仪(P5, Newtron XS, Satelec, 法国);超声工作尖(Satelec, 法国);标准铁架台(兴泰文教体育, 中国)。

1.2 评估超声工作尖的振动特点

将15号0.02锥度超声工作尖用标准铁架台固定,工作尖悬空且其尖端前表面垂直地面,超声治疗仪功率调至6档,采用扫描激光振测法(scanning laser vibrometry, SLV)评估超声工作尖的振动特点,即应用扫描激光振测系统的激光束垂直聚焦到工作尖前表面,在虚拟测量网格的引导下,激

光在摆动的工作尖前表面扫描,扫描后的数据返回到工作站,收集并进行后处理。

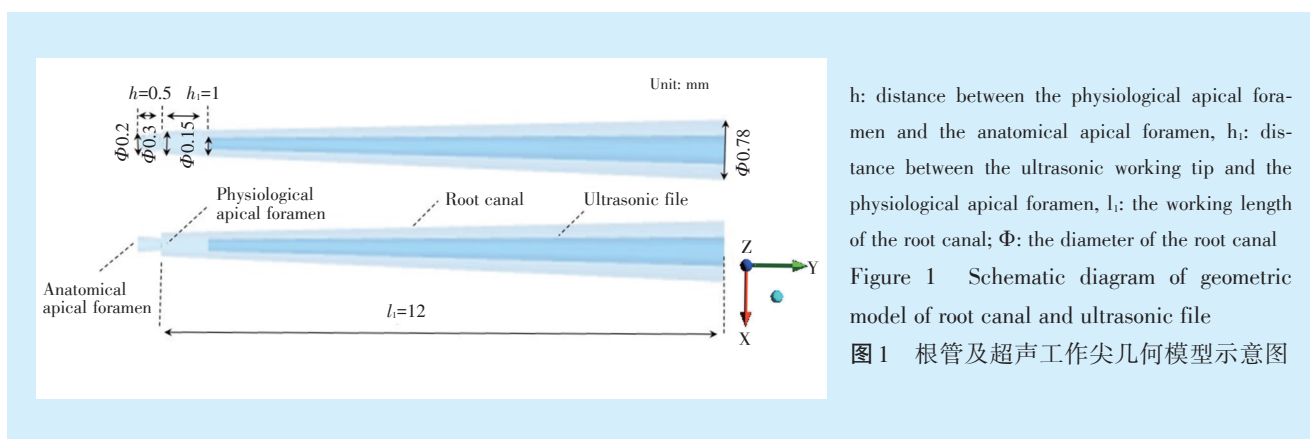
1.3 根管超声冲洗计算机建模及流体动力学分析

利用计算机建立根管超声冲洗模型^[6]。将根管模拟为倒置的圆台样几何体,设定根管工作长度12 mm,锥度0.04,根尖止点直径0.3 mm(ISO标准大小30号),在根尖止点下方0.5 mm处为解剖性根尖孔,直径0.2 mm,根管口直径0.78 mm。超声工作尖模拟为锥形圆针,长度21 mm,锥度0.02,尖端横截面为直径0.15 mm的圆形,设置超声工作尖放置的位置为距根尖止点1 mm进行网格划分及网格检查,确保最小网格不为负,根管内假设提前注满根管冲洗液,根管口设定为压力出口,压力定为大气压力,根管壁及针头壁面均为壁面边界条件,其中根管壁静止不动(图1)。

使用ANSYS 18.0软件包(ANSYS, 美国)中的FLUENT 18.0软件对根管内冲洗液的空化体积分数、流动速度及其对根尖压力进行计算,并对各结果后处理。假设重力方向与冲洗液进入根管方向一致,将冲洗液模拟为可压缩的牛顿流体,先进行定常计算,然后将定常结果作为非定常计算的初场以便使非定常计算快速收敛。计算后的图像使用Photoshop CS3(Adobe Systems, Inc, 美国)进行处理。

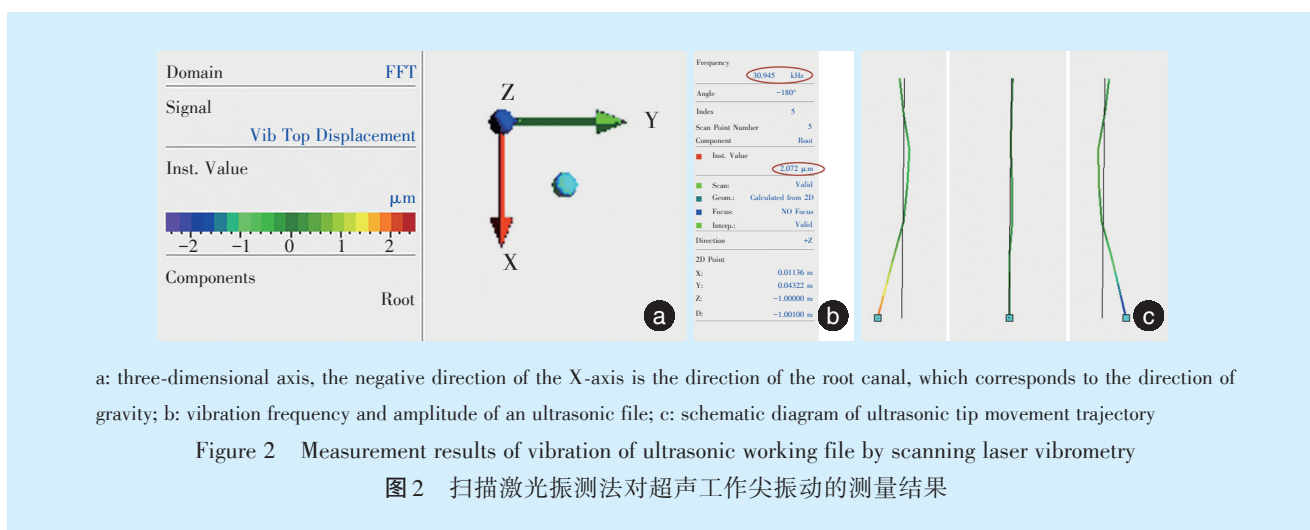
2 结果

超声工作尖及根管的方向与重力方向一致,即X轴负方向(图2a);超声工作尖运动频率为30 kHz;最大振幅位于工作尖尖端,约为2 μm(图2b);经分析发现超声工作尖并非做传统认知的单纯摆动,其实际运动轨迹为扁椭圆形,但由于其在前后方向上运动距离小,可忽略不计,因此将其看作左右摆动运动,且两侧摆动距离相等。同时,超声工作尖整体非协同运动,同一时刻运动的工作



尖上存在节点(运动幅值最小点)与波腹(运动幅值最大点),其中节点的位置随着实验条件的变化

发生改变,第一节点约在距工作尖尖端4~5 mm处;波腹的位置恒定,在工作尖的尖端(图2c)。

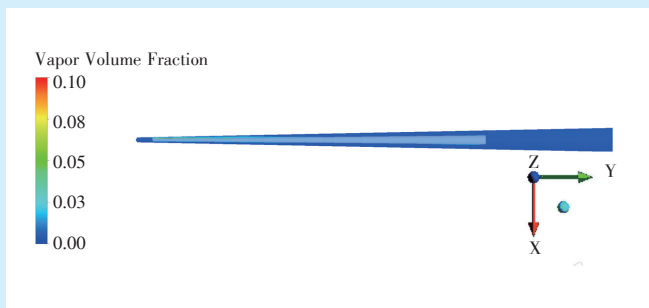


实验结果表明:当工作尖开始振动时,冲洗液空化体积分数大于0,空化现象即开始产生,且空化现象集中发生在工作尖周围,沿着工作尖的表面分布,在根尖1 mm之内空化体积分数为0,未见空化现象(图3)。在工作尖周围冲洗液速度值较大,最高可达2 m/s,一旦超过工作尖,速度值骤然减小,在工作尖前方约0.2 mm内,冲洗液的速度大于0.1 m/s,而在距根尖0.8 mm范围内,冲洗液速度值较小甚至为0;同时冲洗液的流动不稳定,为湍流(图4a、4b);冲洗液在根管内各处绝对压力值均小于或等于大气压力(101 325 Pa),因此根管内各处相对压力值等于0或为负值(图5)。

3 讨论

近年来,超声冲洗因能更好地清除根管内的

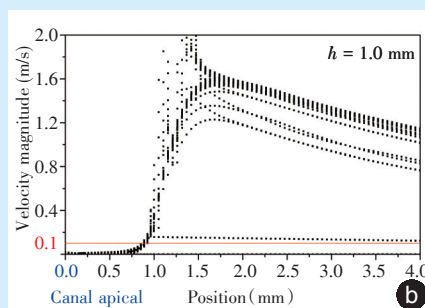
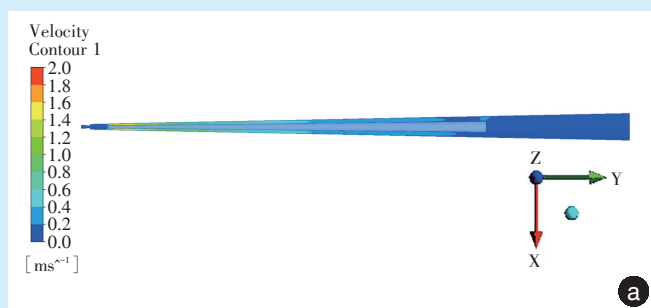
细菌、玷污层和牙本质碎屑等,已被广泛应用于临床。为更好地应用超声设备,使其发挥最佳性能,许多学者致力于超声设备运动特点的研究,了解超声工作尖的振动特点,根据振动特点调节操作过程,有助于更好地发挥超声冲洗作用,因此本实验借助扫描激光振测法对超声工作尖的振动特点进行评估。扫描激光振测法采用非接触式的测量方式,可检测液体或极小物体表面的振动,包括物体的变形、振动、速度及位移等参数^[7]。其原理是将显微镜、扫描激光多普勒振动计和扫描白光干涉仪集成在一起,基于从目标表面反射的激光束的多普勒频移测量来确定入射光束的表面速度和位移,进而确定待测物体的速度与位移^[8]。本实验结果显示,当超声治疗仪频率调至6档,超声工作尖运动频率为30 kHz,运动模式为近似左右摆动,



The outermost periphery represents the root canal wall, the inner gray part represents the ultrasonic tip, and the gap between the two represents the root canal irrigation fluid. The color of the rinse fluid represents the value of the vapor

Figure 3 The vapor volume fraction on the X-Y axis of the irrigation fluid in the root canal when the ultrasonic tip was 1 mm away from the root tip

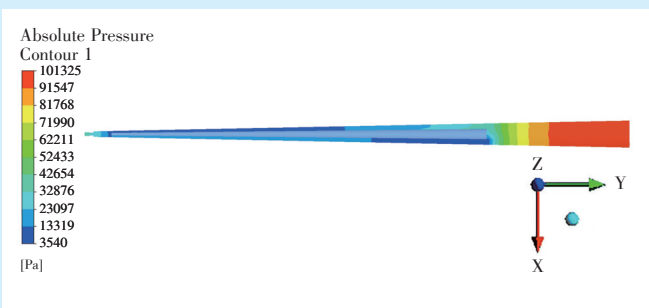
图3 超声工作尖在距根尖1 mm时根管内冲洗液的X-Y轴面空化体积分数



a: cloud diagram, the outermost periphery represents the root canal wall, the inner gray part represents the ultrasonic tip, and the gap between the two represents the root canal irrigation fluid, the color of the rinse fluid represents the value of the speed value; b: distribution of irrigant velocity as a function of position on the X-Y plane, velocities higher than 0.1 m/s (horizontal red line) are considered to be clinically effective

Figure 4 The velocity on the X-Y axis of the irrigation fluid in the root canal when the ultrasonic tip is 1 mm away from the root tip

图4 超声工作尖在距根尖1 mm时根管内冲洗液的X-Y轴面速度



The outermost periphery represents the root canal wall, the inner gray part represents the ultrasonic tip, and the gap between the two represents the root canal irrigation fluid. The color of the rinse fluid represents the value of the apical pressure

Figure 5 Apical pressure on the X-Y axis of the irrigation fluid in the root canal when the ultrasonic tip was 1 mm away from the root tip

图5 超声工作尖距根尖1 mm时根管内冲洗液的X-Y轴面冲洗液对根尖的压力

且两侧摆动距离相等,最大振幅位于工作尖尖端(约为 $2\ \mu\text{m}$)。但是本实验中扫描激光振测法是在空气中而不是在溶液中进行的,这应被视为一项研究限制,因此记录的位移测量值可能比实际临床中的值大。由于根管自身结构以及超声工作尖运动特点,超声工作尖在运动过程中易与管壁接

触,导致振荡幅度降低,影响冲洗效果。根据本实验结果推断,当选择的超声工作尖尖端直径为 $0.15\ \text{mm}$,根管预备直径若不小于 $0.2\ \text{mm}$,摆动的超声工作尖便不会接触根管壁,完全符合被动超声冲洗的概念^[9]。研究表明,当根尖预备直径为 $0.3\ \text{mm}$ 时,冲洗液即可在根尖 $1/3$ 处发挥作用^[10]。综合以

上因素,根管超声冲洗模型根尖止点直径设为0.3 mm。

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础上的一门新型独立学科,其原理主要为通过计算机和图像显示的方法,对包含流体流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析,在时间和空间上定量描述流场的数值解,从而达到研究物理问题的目的^[11]。计算流体动力学既克服了理论分析方法需将计算对象进行简化和抽象的缺点,又避免了实验测量方法遇到的模型尺寸等实验条件的局限性。计算流体动力学最初仅应用于工业和工程领域,随着科技的进步及计算机的发展,目前计算流体动力学已成为研究根管冲洗的一种新方法。本实验应用计算流体动力学构建根管超声冲洗的模型,并分析工作尖放在距根尖1 mm时,冲洗液的空化体积分数、速度以及根尖压力。

超声工作尖在液体中振动时,液体介质由于涡流或超声波作用,某一区域会形成局部暂时的负压,在外周环境压力的作用下该负压处即可产生气泡,称为空化^[12],这些气泡在瞬间破裂的同时可产生高压,使悬浮在液体中的细胞以及微生物、固体杂质等遭到破坏,称为空化现象^[13]。空化效应越大,根管冲洗的效果相对越好。本研究中,工作尖放在距根尖1 mm,当工作尖开始振动时,空化现象即开始产生,但空化效应未达根尖区,该结果提示我们根尖区的清洁效率较低。因此若想提高根尖区的冲洗效果,需要扩大空化效应的范围。根据以下公式分析空化效应产生的必要条件: $1/2\rho\mu^2 = \Delta P$ (ρ 为冲洗液的密度; μ 为工作尖振动速度; ΔP 为大气压强加上流体蒸气压);若想产生空化效应,工作尖振动产生的压强必须要大于 ΔP ,其中 ρ 和 ΔP 为定值,因此工作尖振动速度必须达到某一值才会产生空化效应;同时 $f = \mu/D$ (f 为振动频率; μ 为工作尖振动速度; D 为工作尖振幅)。在振动频率一定的条件下, μ 、 D 成正比^[11]。因此工作尖振动速度越快,振幅越大,空化效应越大。因此在本实验条件下可尝试增大超声设备的功率来达到理想效果。

有文献指出,当冲洗液的速度达到0.1 m/s时,冲洗液就具有冲洗作用^[14]。本实验结果显示,在工作尖前方约0.2 mm内,冲洗液的速度可达0.6 m/s,瞬时可达到2 m/s,因此在工作尖前方约0.2 mm处,超声冲洗具有相对较强的冲洗效果;但在距根

尖0.8 mm范围内,冲洗液速度较小,甚至在根尖区可能会小于0.1 m/s,无冲洗作用。分析原因,超声冲洗时工作尖产生的作用力使冲洗液主要沿着工作尖表面及向侧方分布,因此冲洗液向前的动力小,即越靠近根尖区速度越小,因此冲洗根尖区的清洁效果较差。但根管解剖结构复杂,尤其是根尖区,若根管冲洗未能在该处充分发挥作用,将极大降低根管治疗的成功率。因此,在冲洗液不会溢出的前提下,将超声工作尖尽量向根尖放置,增大根尖处冲洗液的速度,对根尖区的清洁具有重要意义。

根管内相对压力值为:相对压力=绝对压力-大气压力(101 325 Pa),本实验所得结果为根管内绝对压力,最大值为101 325 Pa,因此根管内压力相对压力值为0,甚至某一时刻会出现负值,也就是说冲洗液在根尖孔处无正压力,冲洗液因此不会冲出根尖孔,冲洗相对安全。但当超声工作尖放在根管内位置发生改变时根尖区压力如何变化尚未明确,同时冲洗液冲出根尖孔的压力阈值目前也未知。有学者认为根尖压力阈值与患者自身及临床情况相关,血压值可能有助于推断结果,骨内空间的血压约为30 mmHg,考虑到骨内正弦波受髓质骨保护,其壁是刚性的,并且在静脉压力降低时无法塌陷;毛细血管床中的血压值接近25 mmHg,间隙压力在20~30 mmHg波动,因此25 mmHg(3 333 Pa)被认为是冲洗液冲出根尖孔的压力阈值^[15]。

本实验中超声设备的功率及根管参数均是定值,因此本实验结果具有一定的局限性,改变这些参数,流体动力学分析的结果也将改变;临床根管形态复杂,本实验仅模拟直且单根管,未能更好贴合临床实际情况;本实验中的计算流体动力学模型未将根管系统表面的不规则情况(包括玷污层)及根管弯曲度纳入其中,这可能会影响不同情况下的冲洗情况(如冲洗液的流动方向、向根管侧壁的渗透深度以及冲洗液的更新能力);同时本研究中的结论都是通过模型获得,缺乏与根管超声冲洗的真实临床效果的对比,这都将列入本课题组下一步的研究计划。

综上所述,根据实验结果推断:当超声工作尖放在距根尖1 mm时,冲洗液不会溢出根尖孔,保证了冲洗安全,冲洗液对工作尖前方约0.2 mm范围内有较强冲洗作用,因此在保证工作尖不会接触到根管壁且冲洗液不能溢出根尖孔的情况下,

应将工作尖尽量向根尖区放置,尽可能地清理整个根管。

【Author contributions】 Xing XY performed the experiments, analyzed the data, and wrote the article. Li YP, Zhang L, He LN, Liu HM revised the article. Niu YM designed the study. All authors read and approved the final manuscript as submitted.

参考文献

- [1] Pereira TC, Dijkstra R, Petridis X, et al. Chemical and mechanical influence of root canal irrigation on biofilm removal from lateral morphological features of simulated root canals, dentine discs and dentinal tubules[J]. *Int Endod J*, 2020, 54(1): 112-129. doi: 10.1111/IEJ.13399.
- [2] Lacerda M, Marceliano-Alves MF, Pérez AR, et al. Cleaning and shaping oval canals with 3 instrumentation systems: a correlative micro-computed tomographic and histologic study[J]. *J Endod*, 2017, 43(11): 1878-1884. doi: 10.1016/j.joen.2017.06.032.
- [3] Buldur B, Hascizmeci C, Aksoy S, et al. Apical extrusion of debris in primary molar root canals using mechanical and manual systems [J]. *Eur J Paediatr Dent*, 2018, 19(1): 16-20. doi: 10.23804/ejpd.2018.19.01.03.
- [4] Düzgün S, Topçuoğlu HS, Kahraman Ö. Evaluation of apically extruded debris during the canal preparation using new heat-treated nickel-titanium files in curved canals[J]. *Aust Endod J*, 2020: 12459. doi: 10.1111/aej.12459.
- [5] 樊明文. 牙体牙髓病学[M]. 4版. 北京: 人民卫生出版社, 2014: 303-304.
Fan MW. *Endodontics*[M]. 4th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2014: 303-304.
- [6] Boutsoukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E. Irrigant flow within a prepared root canal using different flow rates: a computational fluid dynamics study[J]. *Int Endod J*, 2009, 42(2): 144-155. doi: 10.1111/j.1365-2591.2008.01503.x.
- [7] Hasheminejad N, Vuye C, Margaritis A, et al. Characterizing the complex modulus of asphalt concrete using a scanning laser doppler vibrometer[J]. *Materials (Basel)*, 2019, 12(21): 3542. doi: 10.3390/ma12213542.
- [8] Pecheva E, Sammons RL, Walmsley AD. The performance characteristics of a piezoelectric ultrasonic dental scaler[J]. *Med Eng Phys*, 2016, 38(2): 199-203. doi: 10.1016/j.medengphy.2015.10.008.
- [9] 蔡雪, 王晓燕. 根管超声冲洗效果的影响因素[J]. *国际口腔医学杂志*, 2014, 41(1): 72-76.
Cai X, Wang XY. Relevant factors for passive ultrasonic irrigation in root canal treatment[J]. *Int J Stomatol*, 2014, 41(1): 72-76.
- [10] Sekiya M, Maeda M, Katsuomi I, et al. Evaluation of four instruments with different working motion using artificial plastic model with C-shaped single canal[J]. *Odontology*, 2018, 106(4): 422-428. doi: 10.1007/s10266-018-0348-3.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 1-6.
Wang FJ. *Computational fluid dynamics analysis - CFD software principle and application*[M]. Beijing: Qinghua University Press, 2014: 1-6.
- [12] Ma Y, Zeng Z, Xu W, et al. Directional transport and random motion of particles in ALF ultrasonic cavitation structure[J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 72: 105439. doi: 10.1016/j.ultsonch. 2020. 105439.
- [13] Vyas N, Grewal M, Kuehne S, et al. High speed imaging of biofilm removal from a dental implant model using ultrasonic cavitation [J]. *Dent Mater*, 2020, 36(6): 733-743. doi: 10.1016/j.dental. 2020.03.003.
- [14] Liu L, Shen C, Ye W, et al. Investigation of an improved side-vented needle and corresponding irrigation strategy for root canal therapy with CFD method[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2020, 195: 105547. doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105547.
- [15] Loroño G, Zaldivar JR, Arias A, et al. Positive and negative pressure irrigation in oval root canals with apical ramifications: a computational fluid dynamics evaluation in micro-CT scanned real teeth[J]. *Int Endod J*, 2020, 53(5): 671-679. doi: 10.1111/iej.13260.

(编辑 张琳, 曾雄群)



官网



公众号