

利用近场微波系统检测不同方法干燥根管的效果

王佳莎^{1*}, 王培育^{2*}, 梁宇红^{1,3,Δ}

(1. 北京大学口腔医学院·口腔医院,牙体牙髓科 国家口腔疾病临床医学研究中心 口腔数字化医疗技术和材料国家工程实验室 口腔数字医学北京市重点实验室,北京 100081; 2. 北京大学工学院力学与工程科学系,湍流与复杂系统国家重点实验室,北京 100871; 3. 北京大学国际医院口腔科,北京 102206)

[摘要] 目的: 建立近场微波检测系统,并评价其测量含水量的准确性,观察不同方法干燥根管的效果。方法: 构建近场微波反射检测系统,检测 Eppendorf 管中、离体牙根管内已知定量的蒸馏水并记录微波反射系数,评价近场微波系统测量含水量的准确性。将 12 颗牙根发育完全、根管弯曲度小于 10° 的单根管下颌前磨牙截冠后保留 14 mm 牙根,机械预备至 F3 后烘干,向根管内注入 10 μL 蒸馏水,按照不同干燥方法分为 4 组($n=12$)。采用近场微波系统检测烘干后和干燥完成后含水量的变化,评价其干燥效果:(1) 阴性对照组,根管内注入 10 μL 蒸馏水,不采用任何干燥方法;(2) 纸尖干燥实验组,用 4 根 #60 纸尖依次插入根管中上 1/3 至有阻力,再用 #40 纸尖插入根管内至工作长度,重复至立体显微镜下纸尖尖端无水痕视为干燥完成;(3) 95% (体积分数) 乙醇干燥实验组,使用纸尖干燥根管(干燥方法同纸尖实验组)后,向根管内注入 10 μL 95% 乙醇,静置 10 s 后,再用纸尖干燥;(4) 70% (体积分数) 异丙醇干燥实验组,使用纸尖干燥根管(干燥方法同纸尖实验组)后,向根管内注入 10 μL 70% 异丙醇,静置 10 s 后,再用纸尖干燥。采用线性回归分析比较近场微波法和物理测量法检测含水量的相关性,计算 Pearson 相关系数。采用卡方检验比较不同方法干燥根管的差异,并进行两两比较。结果: Eppendorf 管及离体根管内含水量的近场微波反射系数和含水量的物理测量值呈线性关系, R^2 分别为 0.991 和 0.970。不同干燥方法的实验组之间的微波反射系数差异具有统计学意义($P < 0.05$)。纸尖干燥后根管内残余的含水量最多,微波反射系数最大,为 0.023。70% 异丙醇进行根管干燥,残余的含水量最少,微波反射系数为 0.006,干燥效果最佳。结论: 近场微波系统可以用来检测根管内含水量的变化,70% 异丙醇干燥根管的效果优于 95% 乙醇和纸尖干燥法。

[关键词] 根管充填; 近场微波; 水; 双尖牙

[中图分类号] R781.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-467X(2019)06-1124-06

doi: 10.19723/j.issn.1671-467X.2019.06.026

Effects of different methods on drying root canal by near-field microwave detection system

WANG Jia-sha^{1*}, WANG Pei-yu^{2*}, LIANG Yu-hong^{1,3,Δ}

(1. Department of Cariology and Endodontology, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Department of Stomatology, Peking University International Hospital, Beijing 102206, China)

ABSTRACT Objective: To set up near-field microwave detection system, to evaluate the accuracy of measuring water and to compare the effects of different methods on drying root canal. **Methods:** Known and quantitative distilled water in Eppendorf tube and root canal was detected by near-field microwave detection system which was set up first. The microwave reflection coefficient was recorded so as to evaluate the accuracy of the measuring water. 12 single-rooted mandibular premolar teeth with apical matureness and a curvature less than 10° were decoronated, leaving roots 14 mm in length. After instrumentation to F3, the root canals were air-dried and injected with 10 μL distilled water each. Then all the root canals were assigned to 4 groups ($n=12$) according to different methods on root canal drying. Near-field microwave detection system was used to detect the change of water after air-drying and root canal drying so as to evaluate the effects of different root canal drying methods: (1) negative control group, the canals were injected with 10 μL distilled water and no root canal drying method was performed; (2) paper points drying experimental group, four #60 paper points were used to blot-dry the middle and upper part of the canal, followed by #40 paper points blot-drying the apical area. The above step was repeated with the tip of paper point that appeared with no water under microscope as finished; (3) 95% (volume fraction)

Δ Corresponding author's e-mail: leungyuhong@sina.com

* These authors contributed equally to this work

网络出版时间:2018-9-42 9:31:52 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4691.R.20180910.1517.008.html>

ethanol drying experimental group, after the distilled water was removed with paper points (similar to paper points experimental group) , 10 μ L 95% ethanol was injected into the canal and was left in place for 10 s , then paper points were used to dry the canal; (4) 70% (volume fraction) isopropyl alcohol drying experimental group , after the distilled water was removed with paper points (similar to paper points experimental group) , 10 μ L 70% isopropyl alcohol was injected into the canal and was left in place for 10 s , then paper points were used to dry the canal. The linear correlation analysis was used to test the accuracy of the measuring water by near-field microwave detection method and physical measurement. The Pearson correlation coefficient was calculated based on the data. The effects of different methods on drying root canal were analyzed by Chi square test. **Results:** The R^2 for the microwave reflection coefficient and the physical measurement of the water in Eppendorf tube and root canal were 0.991 and 0.970. The microwave reflection coefficient in all the experimental groups showed significant difference ($P < 0.05$) . After drying with paper points , the residual water was the most , and the microwave reflection coefficient was the highest: 0.023. While after 70% isopropyl alcohol drying root canal , the residual water was the least with the microwave reflection coefficient 0.006 , showing that the effect of drying was the best. **Conclusion:** Near-field microwave detection system could detect the change of water in root canal. The effect of root canal drying by 70% isopropyl alcohol was superior to 95% ethanol and paper points. **KEY WORDS** Root canal obturation; Near-field microwaves; Water; Bicuspid

根管充填的目的是严密充填整个根管系统 , 消除死腔 , 隔绝再感染的途径^[1]。根管预备后 , 根管内残余的水和冲洗液存在于根管的主要腔隙 , 也存在于不规则结构区和牙本质小管内 , 这些液体占据根管物理空间 , 阻碍充填材料进入主根管、根管的不规则区、牙本质小管和侧支根管 , 从而影响根管充填质量^[2]。

根管干燥对保证根管充填质量具有重要意义^[3]。现有文献中最常用的根管干燥方法为纸尖法^[4] , 但纸尖法只能干燥一些机械预备达到的主根管区域 , 对于根管不规则区域(如根管峡部) 、侧支根管等可能无法干燥^[5]。因此 , 有研究者尝试用有机溶剂辅助纸尖干燥来提高干燥效果^[5-8] , 但关于不同有机溶剂对干燥效果的改善情况尚无统一定论。近年来近场微波作为一种检测手段 , 凭借其快速、无损、准确性高的特点在工农业生产、科学研究、医学、生物学等方面广泛应用^[9-11]。本研究尝试建立近场微波检测系统 , 并评价其测量含水量的准确性 , 观察不同方法干燥根管的效果 , 为临床提供参考。

1 资料与方法

1.1 近场微波系统的构建

根据近场微波反射检测原理设计并构建近场微波反射系统(图 1) , 该系统可测量样本内不同含水量水分的 S11 参数(幅值和相位) , 其主要仪器和组件包括矢量网络分析仪(型号 E8363C , 美国 Agilent Technologies 公司) 、同轴传输线、开口矩形波导(西安恒达微波技术开发公司) 、金属短路板以及自制的空腔体模具。

1.1.1 矢量网络分析仪 矢量网络分析仪(图 1)

工作频率 10 MHz 至 40 GHz , 发射微波信号最大功率 1 mW。检测过程中 , 利用矢量网络分析仪的端口 1 发射测量信号 , 该信号通过同轴传输线传输到终端连接的待测样本发生反射 , 反射信号再被端口 1 接收 , 经过矢量网络分析仪内部处理得到微波反射系数。

1.1.2 开口矩形波导 选用开口矩形波导作为近场微波检测探头 , 根据需要可换用不同工作频段的波导(图 1) 。本实验选取的波导工作频段为 12.4 ~ 18.0 GHz , 波导腔尺寸为 15.72 mm \times 7.82 mm \times 6.48 mm。

1.1.3 自制腔体模具 利用硬质吸波泡沫板设计波导空腔结构(图 2) , 在模具上正对待测样本根管口的位置设计贯通的注射孔 , 实现原位注射和检测。

1.2 近场微波系统的校准方法

为了消除矢量网络分析仪内部误差以及线缆和波导探头的损耗等 , 在测量之前需要先进行单端口反射校准。将波导端口依次紧贴短路金属板和已知负载器件下(其中一块金属板含 1/4 波长波导腔延迟) 通过校准软件将校准数据存储为校准文件以备调用。通过校准 , 开口矩形波导的波口端面即为测量参考面。

1.3 近场微波系统的检测步骤

将待测样本内嵌于硬质泡沫板的空腔中 , 泡沫板的一侧与开口矩形波导紧贴并保证波导口与泡沫板空腔正对 , 泡沫板的另一侧紧贴金属短路板。用螺丝钉固定四角 , 将待测样本夹紧固定于波导与金属板之间。

打开矢量网络分析仪检测软件 , 设置检测频率为 12.4 ~ 18.0 GHz , 与波导工作频段一致 , 然后调

用校准文件 ,设置检测信号为 S11 并触发测量 ,获得 S11 与频率的关系曲线 ,即反射频谱 ,同时记录微波反射系数。

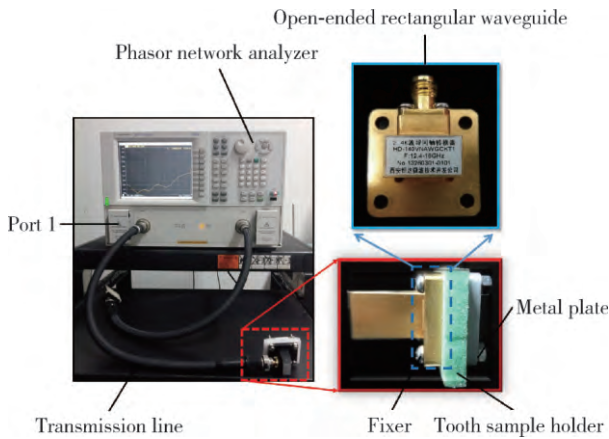


图 1 近场微波检测系统实物图

Figure 1 The physical view of near-field microwave detection

1.4 近场微波系统检测含水量的准确性

1.4.1 近场微波系统检测 Eppendorf 管内含水量

用微量注射器(上海高鸽工贸有限公司)将不同量的蒸馏水注入 200 μL Eppendorf 管(Axygen, 杭州爱思进生物技术有限公司)内 ,采用近场微波系统检测并记录微波反射系数。注射水量分别为: 0 ~ 1.0 μL ,间隔 0.2 μL ,共 6 个检测样本; 1.0 ~ 3.0 μL ,间隔 0.4 μL ,共 5 个检测样本; 5 ~ 150 μL ,间隔 5 μL ,共 30 个检测样本。

1.4.2 近场微波系统检测离体根管内含水量

向根管内注入 5 μL 蒸馏水 ,依次用#30 标准纸尖(02 锥度 ,柳苑 ,天津达雅鼎医疗器械有限公司)干燥根

管 ,纸尖插入根管内到达工作长度 ,停留 1 s 后取出 ,直至立体显微镜下纸尖尖端无水痕认定为干燥结束。电子天平(中国梅特勒-托利多公司)称量注水前及每次干燥前后根管的质量 ,重复称重 3 次取平均值并记录数据(精确到 0.1 mg) 。同时用近场微波系统检测并记录微波反射系数。

1.5 不同方法干燥根管的效果

1.5.1 样本准备

将正畸拔除的新鲜单根下颌前磨牙储存于蒸馏水中 ,在立体显微镜(ZOOM-630E ,上海长方光学仪器有限公司)下观察。选取牙根发育完成、无牙根折裂的牙 ,拍摄近、远中向和颊舌向根尖片 ,选择单根管、根管弯曲度小于 10° (Schneider 法)、未经根管治疗的 12 颗离体牙。于釉牙骨质界处将离体牙截冠后 ,保留 14 mm 牙根 ,初锉 \leq #15 不锈钢 K 锉疏通根管至 #15 ,于根尖孔可见 #15 K 锉尖端处减 1 mm 作为工作长度。ProTaper Universal 镍钛系统进行根管预备至 F3。每次更换器械时 ,使用 1 mL 新鲜配制的 1.25% (体积分数) 次氯酸钠溶液冲洗根管。将两步法自酸蚀粘接系统 Clearfil SE Bond(日本 Kuraray 公司)按照说明书要求涂于根尖孔 ,中等气流轻吹 ,干燥牙面 ,使用毛刷轻力双向涂擦 ,涂布预处理剂 ,静置 20 s ,充分吹干 ,涂布粘接剂 ,轻吹至一均匀薄层 ,固化 10 s。将 Filtek™ Z350XT 通用型纳米流动树脂(美国 3M 公司)覆盖于根尖孔 ,形成 1 mm 薄层 ,固化 20 s ,完成根尖孔的封闭。将离体根管放入 58 $^\circ\text{C}$ 鼓风干燥箱(BPG-9040A ,上海一恒科学仪器有限公司)中烘干 6 h ,连续两次质量测量值不再变化视为烘干完成。

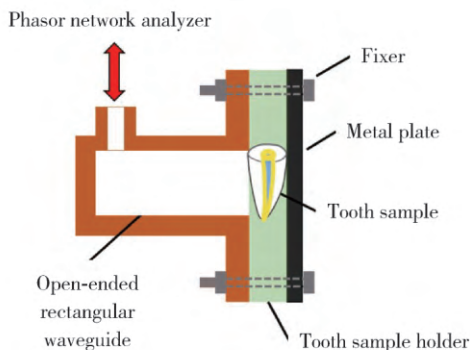


图 2 自制腔体模具示意图及实物图

Figure 2 The schematic diagram and physical view of self-made cavity mould

1.5.2 近场微波系统检测

烘干完成的离体根管进行近场微波系统检测并记录微波反射系数。向根管内注入 10 μL 蒸馏水 ,用不同方法进行干燥 ,每次干燥后再次进行近场微波系统检测 ,记录干燥后的微波反射系数。按照干燥方法分为不同的

实验组 ,重新烘干后采用下一种根管干燥方法进行实验。

1.5.3 根管干燥方法及分组

按照不同干燥方法进行根管干燥: (1) 阴性对照组: 根管内注入 10 μL 蒸馏水 ,不采用任何干燥方法; (2) 纸尖干燥实验

组: 选用 4 根 #60 纸尖依次插入根管中上 1/3 至有阻力进行干燥, 再用 #40 纸尖插入管内至工作长度蘸干根尖区, 直至立体显微镜下纸尖尖端无水痕视为干燥完成; (3) 95% (体积分数) 乙醇干燥实验组: 使用纸尖干燥根管(同纸尖干燥实验组)后, 向根管内注入 10 μL 95% 乙醇, 静置 10 s 后, 继续以纸尖用上述方法蘸干根管内水分; (4) 70% (体积分数) 异丙醇干燥实验组: 使用纸尖干燥根管(同纸尖干燥实验组)后, 向根管内注入 10 μL 70% 异丙醇, 静置 10 s 后, 继续以纸尖用上述方法蘸干根管内水分。

1.6 统计学分析

使用 SPSS Statistics 20.0 软件(美国 IBM)对实验数据进行统计处理。采用线性回归分析比较物理测量法和近场微波法检测含水量的相关性, 计算 Pearson 相关系数。采用卡方检验比较不同方法干燥根管的差异(中位数), 并用 Wilcoxon 法进行两两比较。双侧检验水准 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

对 Eppendorf 管内和离体牙根管内的含水量采用近场微波检测方法进行检测, 其含水量反射系数和含水量物理测量值均呈线性关系, R^2 分别为 0.991 和 0.970(图 3、4)。根据线性分析得到拟合公式为 $y = -0.06 + 0.02x$ 。检测系统对含水量的临界值为 60 μL (图 5)。

干燥前所有样本含水量均为 10 μL , 不同方法干燥根管后, 实验组之间残余含水量的微波反射系数差异具有统计学意义($P < 0.05$, 图 6)。纸尖干燥后的微波反射系数最大, 为 0.023, 根管内残余的含水量最多, 为 4.15 μL ; 70% 异丙醇进行根管干燥, 干燥效果最佳, 微波反射系数最小, 为 0.006, 根管内残余含水量 3.3 μL 。

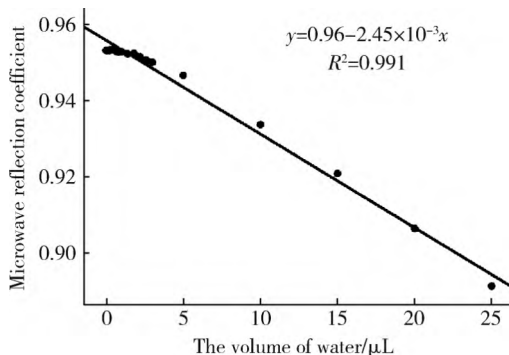


图 3 Eppendorf 管内含水量的近场微波反射系数与含水量的物理测量值关系

Figure 3 The relationship between the microwave reflection coefficient and the physical measurement of water in Eppendorf tube

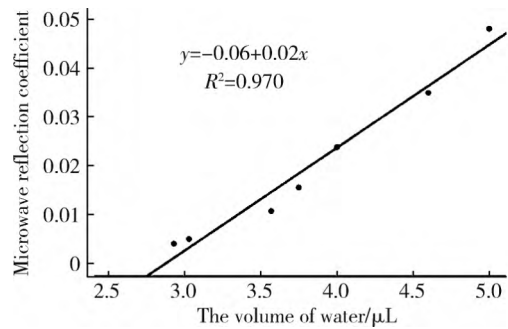


图 4 离体根管内含水量的近场微波反射系数与含水量的物理测量值关系

Figure 4 The relationship between the microwave reflection coefficient and the physical measurement of water in root canal

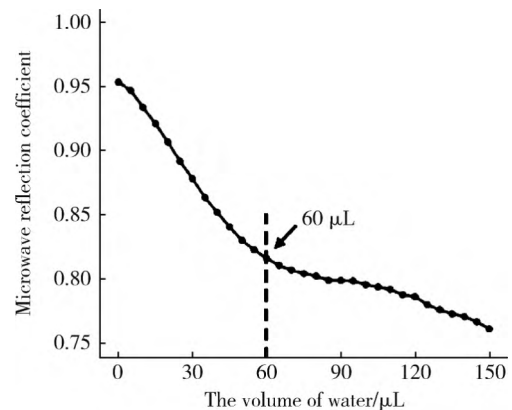
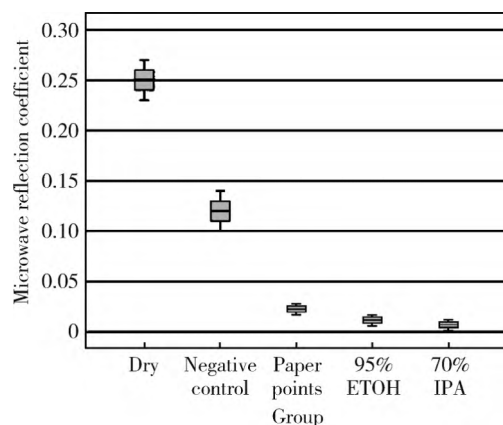


图 5 近场微波检测系统的含水量临界值

Figure 5 The critical value of water in near-field microwave detection system



ETOH, ethanol; IPA, isopropyl alcohol.

图 6 不同方法干燥后根管内残余含水量的微波反射系数

Figure 6 The microwave reflection coefficient of residual water after different drying methods on root canal

3 讨论

以往研究中测定根管内含水量的方法通常为物理称重法, 即测量根管烘干前后的质量差, 得到内部的水分含量, 该方法需要天平的精度达到万分之一,

要求严格^[12]。亦有研究采用间接法,如推出强度实验(push-out)和微渗漏实验(microleakage)进行根管内含水量的测定^[13-14]。本研究探索应用近场微波系统进行根管内含水量的检测,并对比不同干燥方法的干燥效果。

微波是一种频率在 300 MHz 至 300 GHz 之间、波长在 1 mm 至 1 m 之间的电磁波,根据辐射距离远近分为近场和远场微波,检测距离在毫米量级属于近场微波^[15-16]。近年来近场微波作为一种检测手段,在工农业生产和医学、生物学科学研究等方面广泛应用。

当微波经过物体时,微波和组成物体的物质微粒发生作用,一部分能量被物体吸收,与此同时在物体表面发生的反射波能量以及穿透物体的透射波能量通过检测系统可以进行检测^[17]。当微波通过含水物质时,由水分引起的微波能量损耗远远大于其他物质引起的损耗^[18-19]。利用这个特性,可以对样本内部的含水量进行测定,如测量蔬菜内部的水分含量及检测材料内部缺陷等^[20-21]。通过测量接收到的反射波与入射波能量的比值,可计算得到反射系数,该测量装置较为简便,只需要单端口,而透射系数的实验装置需用到两个端口,较为复杂。此外多数研究采用反射系数作为评价指标进行检测。因此,本研究用反射系数来测量样本内的含水量。

本研究构建的近场微波系统检测范围为 15.72 mm × 7.82 mm × 6.48 mm,频率范围为 12.4 ~ 18.0 GHz,能够覆盖待测样本。由于本研究需要检测样本内部的含水量,依据 Cole-Cole 图(水分子复合介电常数模型图),微波最佳测量频率应选择水分子复合介电常数实部和虚部均较大的区域,即 9.36 ~ 23.62 GHz^[22]。根据样本大小,确定检测频率在 12.4 ~ 18.0 GHz 频段内,在构建检测系统过程中,发现 15 GHz 处的检测结果最稳定,因此本研究选择的检测频率为 15 GHz。在该系统中,自制腔体模具的空腔位置与波导腔体正对,便于微波信号穿过空腔内的样本(图 2)。硬质材料能够支撑并固定样本,可以避免因样本位置移动造成测量误差,而且硬质材料内部的大量微孔吸波结构还能降低腔体侧壁的反射杂波对待测样本反射信号的干扰,保证了实验结果的准确性。

本研究采用近场微波检测系统分别对 Eppendorf 管及离体根管内的含水量进行检测。Eppendorf 管内无水时的微波反射系数为 0.953,接近 1,可认为反射波能量与入射波能量一致,微波能量无损耗。当离体根管内无水时,微波反射系数为 0.250,将该

能量损耗作为基线减去,以排除牙根硬组织的影响,所得差值代表每次纸尖干燥完成后根管内残余含水量的微波反射系数。研究结果显示,Eppendorf 管及离体根管内含水量的微波反射系数和含水量的物理测量值呈线性关系, R^2 分别为 0.991 和 0.970,从而说明近场微波系统可以检测根管内部的含水量,且不受根管壁影响。

Eppendorf 管内含水量的测试梯度分别为:0.2 μL 、0.4 μL 和 5.0 μL 。当注水梯度为 0.2 μL 时,微波可以精确检测。当 Eppendorf 管内含水量超过 60 μL 时,发现微波反射系数和物理测量值不再呈线性关系,提示本研究注水量的临界值为 60 μL (图 5)。Stuchly^[23]在 1970 年也发现了这个现象,他将斜率开始出现不同对应的水量称为水量临界值;该现象在 2012 年也被 McKeown 等^[20]进一步证实,他在测量蔬菜(洋葱)中适宜保存的水分含量时发现,当洋葱含水量超过 40% 后,直线的斜率下降,线性关系不佳,测量的准确性受到影响。本研究中所有样本的含水量检测值最大为 10 μL ,在临界值范围内。

比较不同方法干燥根管效果的结果显示(图 6),使用有机溶剂(95% 乙醇、70% 异丙醇)进行根管干燥的效果优于单独使用纸尖进行干燥。已有研究证实^[6],当对比有机溶剂(95% 乙醇)干燥法和仅使用纸尖干燥法对根管充填效果的影响时,有机溶剂(95% 乙醇)干燥组中封闭剂渗入牙本质小管的平均深度为 265 μm ,远高于仅使用纸尖干燥组的 141 μm 。同时,在扫描电镜下的观察也发现,有机溶剂(95% 乙醇)干燥组中的根管封闭剂与管壁牙本质的结合更好。Engel 等^[24]在使用有机溶剂(70% 异丙醇)干燥法和仅使用纸尖干燥法对根管充填效果影响的研究中,也得到了类似的结果。分析纸尖干燥效果弱于有机溶剂的原因可能是:有机溶剂分子量小,渗透性强,可以渗入根管的不规则腔隙、侧支根管甚至牙本质小管内,与其内部的水分互溶,且不发生反应,并随着有机溶剂的挥发而带出内部水分。本研究发现,70% 异丙醇干燥根管后,根管内的残余含水量比 95% 乙醇干燥后减少 2.4%。异丙醇又称二甲基甲醇,因含有两组甲基使其渗透性及亲脂性大大增强,优于乙醇仅带有一组乙基^[25],因此异丙醇可以比乙醇更好的渗入根管的不规则腔隙、侧支根管甚至牙本质小管内,带出内部水分,干燥效果优于乙醇。

随着新型生物陶瓷根充材料应用于临床,其凝固过程需要水^[5],因此解读本研究结果需审慎,应

根据根充材料特点选择适宜的干燥方法。

综上所述,本研究构建的近场微波系统可以用来检测根管内含水量的变化,且快速、无创、准确性高。本实验条件下,70%异丙醇干燥根管的效果优于95%乙醇干燥法及纸尖干燥法。

参考文献

- [1] 高学军,岳林,董艳梅,等. 牙体牙髓病学[M]. 2版. 北京: 北京大学医学出版社,2013: 387.
- [2] Wong Y, Spencer P. Continuing etching of an all-in-one adhesive in wet dentin tubules [J]. J Dent Res, 2005, 84(4): 350 - 354.
- [3] Hasselgren G. The prognosis for endodontic treatment of obliterated root canals [J]. J Endod, 1988, 14(11): 565 - 567.
- [4] Bence RW. Handbook of clinical endodontics [M]. London: Mosby, 1980.
- [5] Nagas E, Uyanik MO, Eymirli A, et al. Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers [J]. J Endod, 2012, 38(2): 240 - 244.
- [6] Stevens RW, Strother JM, McClanahan SB. Leakage and sealer penetration in smear-free dentin after a final rinse with 95% ethanol [J]. J Endod, 2006, 32(8): 785 - 788.
- [7] Gibby SG, Wong Y, Kulild JC, et al. Novel methodology to evaluate the effect of residual moisture on epoxy resin sealer/dentine interface: a pilot study [J]. Int Endod J, 2011, 44(3): 236 - 244.
- [8] Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, et al. Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer [J]. J Endod, 2007, 33(1): 31 - 33.
- [9] 黎粤华,李靖宇. 基于微波技术的温室作物含水量检测[J]. 森林工程, 2013(3): 90 - 92.
- [10] 杨厚荣,罗友哲,陈小英. 微波雷达水分传感器应用于有耗介质水分测量研究[J]. 计测技术, 2010(S1): 52 - 56.
- [11] Takeyama T, Nikawa Y. Diagnosis of dental caries using millimeter wave reflection [C]// Asia Pacific Microwave Conference. Europe: Microwave Conference, 2009: 1196 - 1199.
- [12] Komabayashi T, Zhu Q, Jiang J, et al. A rapid nondestructive method for root dentin moisture measurements: *in vitro* pilot study [J]. Oral Surg Oral Medo, 2009, 107(3): e107 - e111.
- [13] Pane ES, Palamara JEA, Messer HH. Critical evaluation of the push-out test for root canal filling materials [J]. J Endod, 2013, 39(5): 669 - 673.
- [14] Tay FR, Pashley DH, Yoshiyama M. Two modes of nanoleakage expression in single-step adhesives [J]. J Dent Res, 2002, 81(7): 472 - 476.
- [15] Zoughi R. Microwave non-destructive testing and evaluation principles [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] Pozar DM. Microwave engineering [M]. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [17] 周在杞. 微波检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [18] Sacilik K, Tarimci C, Colak A. Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range [J]. J Food Eng, 2007, 78(4): 1111 - 1116.
- [19] Krupka J. Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies [J]. Meas Sci Technol, 2006, 17(6): R55.
- [20] McKeown MS, Trabelsi S, Tollner EW, et al. Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in *Vidalia* onions [J]. J Food Eng, 2012, 111(3): 505 - 510.
- [21] Wang PY, Zhou L. Near-field microwave identification and quantitative evaluation of liquid ingress in honeycomb sandwich structures [J]. NDT & E Int, 2016(83): 32 - 37.
- [22] Gao M, Tang J, Johnson JA, et al. Dielectric properties of ground almond shells in the development of radio frequency and microwave pasteurization [J]. J Food Eng, 2012, 112(4): 282 - 287.
- [23] Stuchly SS. Dielectric properties of some granular solids containing water [J]. J Microwave Power, 1970, 5(2): 62 - 68.
- [24] Engel GT, Goodell GG, McClanahan SB. Sealer penetration and apical microleakage in smear-free dentin after a final rinse with either 70% isopropyl alcohol or Peridex [J]. J Endod, 2005, 31(8): 620 - 623.
- [25] 邢其毅,徐瑞秋,裴伟伟,等. 基础有机化学[M]. 4版. 北京: 北京大学出版社, 2016: 7.

(2017-12-06 收稿)
(本文编辑: 赵 波)