

基于 Micro-CT 的根管充填封闭性评价研究进展

姚月 李飒 李任 白宇宏^(通讯作者)

华北理工大学口腔医学院 河北 唐山 063210

【摘要】：根管充填材料的封闭性是影响根管治疗结果的关键因素。Micro-CT 作为一种高分辨率三维成像技术，能够在无损条件下对根管内充填物及孔隙结构进行精确定量与三维可视化分析，已成为根管封闭性评价的重要工具。本文系统回顾了 Micro-CT 在根管充填封闭性评价中的研究进展，比较了其与传统微渗漏检测方法的优势与局限，重点综述了不同根管封闭剂及充填技术对封闭性能的影响。同时，本文讨论了 Micro-CT 技术面临的高阻射伪影干扰、扫描参数标准化缺失等挑战，展望了人工智能在图像自动化分割与三维模型构建中的应用前景。

【关键词】：微计算机断层扫描；根管封闭剂；界面孔隙；三维定量分析；孔隙率

DOI:10.12417/2705-098X.26.18.088

1 引言

根管治疗的核心目标在于彻底清洁并严密充填根管系统，从而有效预防再感染。作为治疗的关键环节，根管充填材料需能严密充填各根管解剖结构，进而阻隔细菌入侵^[1]。若充填不完善，充填材料中存在的孔隙将成为细菌入侵通道或残留感染菌的温床^[2]。因此，根管充填材料需要具备良好的封闭性，封闭性也成为评价充填材料性能的重要指标。

2 传统测量方法与 Micro-CT 三维测量的对比

当前用于评估封闭性能的方法多种多样，常用方法有染料渗透法、细菌渗透法、流体过滤法、葡萄糖定量分析法以及 Micro-CT 扫描和三维重建测量法等^[3]。

2.1 封闭性的传统测量方法及其局限性

(1) 染料渗透法是目前最常用的方法之一，主要方法为将离体牙浸泡入染料一定时间，显微镜下测定根管中染料的渗透长度来对比根管封闭剂的封闭效果。由于对牙体的剖开可能会使部分牙体和染料损失，影响实验数据的准确性。后有学者发明透明牙法，不会损失牙体组织，但长时间浸泡在酸性溶液中，可能会导致染色剂的溶解，影响检测结果^[4]。

(2) 细菌渗透法是将细菌混悬液充当渗透液，将其置于牙根的冠方位置，而牙根根方则放置培养基。通过观察根方培养基的浑浊程度，并结合细菌培养手段，依据细胞形态特征来证实浑浊现象是由目标菌种所致，以此定性评估根尖的封闭性能^[5]。其仅能对根尖封闭性进行定性评价，无法实现定量分析。

(3) 流体过滤法是 Derkson 等^[6]发明，1993 年被 Wu 等^[7]进行改良用于评估根尖封闭性的方法，是将离体牙的一端与含一定高度液柱的细管相连，根尖方与含有一个气泡的毛细管相连，冠方施加压力，液体在根管中流动引起毛细管中气泡的移动，最后定量测量气泡移动距离来评估封闭性。该方法可重复，结果定量化，然而，其没有标准化的实验参数，只能检测连续性孔隙，盲端孔隙检测不敏感。

(4) 葡萄糖渗透模型是一种定量分析方法，采用了小分

子质量的葡萄糖作为示踪物质，运用分光光度法对从根方渗漏出的葡萄糖浓度进行精确测定，依据所测得的浓度数据实现根管微渗漏的定量分析^[8]。然而，葡萄糖溶液存在液体蒸发问题，溶液量的减少会导致渗漏葡萄糖的浓度发生变化。

2.2 Micro-CT 扫描和三维重建测量法及其特点

Micro-CT (又称为高分辨率显微 CT、显微 CT 或 μ CT) 是一项新兴技术，在牙科多个领域中具有广泛应用前景。其分辨率从早期的 $81\mu\text{m}$ 逐步优化至 $25\mu\text{m}$ ，最新机型更达到小于 $4\mu\text{m}$ 。前人研究^[9]证实了根管充填三维重建的可行性，已成功应用于根管充填体的体积测量^[10]。近年来，得益于 Micro-CT 分辨率的持续提升，以及与之配套的图像分析软件不断研发并投入使用，Micro-CT 技术已经成为一种能够较为准确呈现根管内充填材料孔隙状况的非侵入式检测手段^[11]。

作为体外评估方法，Micro-CT 具备诸多突出优势。首先，它具有精确定量和高准确性的特点，通过将充填牙根的显微 CT 图像与组织学切片进行对比分析，发现二者具有强相关性。其次，该种技术能在不破坏样本完整性的前提下获取根管内充填材料的详细信息，这使得实验具备可重复性，不同研究者可在不同时间对同一类型样本进行检测，可得到具有可比性的结果。此外，研究人员既能对数据进行定性分析，直观观察根管内充填材料孔隙的分布、形态等特征；又能开展定量测定，精确计算孔隙的数量、大小、体积等参数，为深入探究根管充填材料的性能提供了全面、准确的数据支持。

然而，在操作过程中，Micro-CT 扫描需要耗费较多的时间，这在一定程度上限制了其在大规模样本检测中的应用效率。而且，扫描所获得的图像需借助专业软件进行阈值分割及三维重建等处理，对研究人员的软件操作能力要求较高。

3 Micro-CT 评价不同充填材料与技术对封闭性的影响

3.1 传统树脂类与新型生物陶瓷封闭剂的封闭性对比

国内外 Micro-CT 研究表明，新型生物陶瓷类封闭剂的封闭性显著高于传统树脂类。例如，Huang 等 (2017)^[11]通过显

微 CT 比较 Total BC Sealer (生物陶瓷) 和 AH Plus 在单尖法下的孔隙率, 结果显示生物陶瓷封闭剂 (Total BC Sealer) 的孔隙率显著低于 AH Plus。国内研究, 赵麒麟等^[12]通过 Micro-CT 技术评估比较了三种根管封闭剂 (C-Root SP、iRoot SP 和 AH-Plus Jet) 在单尖法根管充填中的根尖封闭性能, 结果显示 C-Root SP 的封闭性能与 iRoot SP 相当, 且优于 AH-Plus, 尤其在根尖区表现更优。

3.2 充填技术对孔隙三维分布的影响

近几十年来, 生物陶瓷封闭剂因其优异的流动性和生物相容性^[13], 使临床使用单尖法充填成为了可能^[14]。在单尖法充填技术中, 封闭剂将占据牙胶尖和根管壁之间的更多空间^[15]。因此, 减少封闭剂中的孔隙, 提高封闭质量很重要。目前研究表明, 热牙胶充填与生物陶瓷单尖法充填能显著降低充填孔隙率, 相比之下冷侧方加压法充填孔隙率较高。张纪敏等^[16]通过 Micro-CT 技术, 比较生物陶瓷材料 (i-MTA SP 和 iRoot SP) 在热牙胶充填法、单尖法、全生物陶瓷材料充填法下的孔隙率, 结果显示: i-MTA SP 单尖充填的根尖孔隙率显著低于热牙胶和全生物陶瓷充填。Keleş 等^[17](2014)对冷侧方加压 (CLC) 与热垂直加压 (WVC) ——在椭圆形根管中的充填质量进行了三维微计算机断层扫描评估, 结果显示, 热垂直加压技术相比冷侧方加压能提供更高的牙胶充填率和更低的孔隙率。

4 界面孔隙随时间变化与临床生物学相关性

4.1 封闭剂固化后长期稳定性的无损随访研究

Radwanski 等^[18]通过 Micro-CT 技术比较了三种生物陶瓷封闭剂在初始 (7 天) 和长期 (6 个月) 储存后的孔隙体积与孔隙率变化, 显示 BioRoot RCS 的长期孔隙率增加^[19]。Milanovic 等^[20]通过 6 个月的研究发现, 硅酸钙基封闭剂在 PBS 缓冲液环境下展现出良好的体积稳定性。尽管生物陶瓷材料在发挥生物活性过程中存在一定的溶解性, 但其产生矿化沉积的能力能修补界面微间隙, 维持甚至增强长期的三维封闭性。

4.2 界面孔隙三维定量指标与细菌微渗漏的关联性

Micro-CT 研究将孔隙精确分为三类: 内部孔隙、界面孔隙和结合孔隙^[11]。内部孔隙由于被封闭剂包裹, 通常不会导致残存感染扩散。而界面孔隙若在三维空间内形成相互贯通的通道, 在毛细管力的驱动下, 极易成为细菌及其毒素微渗漏的通道。孔隙率已成为衡量充填质量的核心指标。研究指出, 虽然目前尚无公认的导致根管失败的孔隙阈值, 但根尖 3mm 内的界面孔隙被认为是影响根管治疗成功率的关键^[21]。

参考文献:

- [1] Chen Z, Yang Y, Fan W. Reducing apical voids for intra-canal sealer injection using a modified passive deflation needle[J/OL]. *Odontology*, 2024, 112(3):839-846.
- [2] Liu H, Lai W W M, Hieawy A, et al. Micro-computed Tomographic Evaluation of the Quality of Root Canal Fillings in Mandibular

5 Micro-CT 技术未来挑战与展望

5.1 伪影干扰与扫描分辨率的影响

在显微 CT 成像过程中, 牙胶和封闭剂中含有的氧化锆、氧化铋等高阻射性成分会引发射线硬化现象和条纹伪影干扰。此类伪影可能掩盖微小孔隙 (<10 μm) 并导致定量误差。其次, 研究所使用的 Micro-CT 分辨率若低于 11.2 μm, 往往会低估材料的实际微孔隙率。

5.2 扫描参数缺乏标准化

目前的研究中所用的 Micro-CT 扫描图像分辨率、体素尺寸和其他设置方面缺乏标准化, 导致关于根管充填孔隙的研究得出了不同的结论。针对这一问题, Orhan 等(2018)^[22]通过比较不同体素尺寸在微计算机断层扫描 (Micro-CT) 和纳米计算机断层扫描 (Nano-CT) 下的成像效果, 建议在评估根管充填孔隙时将 11.2 μm 的体素尺寸作为阈值, 其认为该数值是一个在图像质量和扫描效率之间有优势的选择。然而, 这一标准能否广泛适用仍待后续学者深入论证。

5.3 数字化前沿: 人工智能在 Micro-CT 图像自动化分割中的应用

当前研究正向多模态融合与人工智能深度转化。首先是自动化分割技术的进展, 深度学习神经网络已被证明能对大量扫描切片进行自动分割, 提升了识别材料、孔隙及遗漏根管的准确率。这有望解决目前人工分割主观性强、效率低的问题。此外, 传统图像处理算法亦有所应用, 例如, Habberthür 等人^[23]利用自动化图像处理技术, 使用自动 Otsu 阈值方法从显微 CT 中进行根管分割, 显著提升了大样本牙齿内部形态研究的效率、标准化程度和可重复性。此外, 从显微 CT 图像中分割出的根管通常被转换成 3D 模型, 用于有限元分析 (FEA) 或基于边界元法 (BEM) 的模拟, 用于评估根管预备、应力分布或疲劳断裂风险。未来可进一步探索其在根管充填的自动化评估方面的应用。

6 结论

Micro-CT 相较于传统封闭性检测方法具有非破坏性、三维定量、可重复的核心优势; 现有显微 CT 证据表明, 硅酸钙基生物陶瓷封闭剂在降低充填孔隙率方面优于传统树脂类封闭剂; 未来的研究应致力于减小或消除高阻射材料产生的伪影干扰, 并建立统一的三维定量评价标准; 随着数字化及人工智能技术的引入, Micro-CT 三维定量分析有望在自动化程度和测量精度方面实现进一步突破。

Molars after Obturation for 54 Months[J/OL].Journal of Endodontics,2021,47(11):1783-1789.

[3] 张淑存,葛堂娜,熊世江.根尖封闭性评估方法研究进展[J/OL].中国实用口腔科杂志,2016,9(1):54-58.

[4] Lothamer C W,Anderson A,Hetzel S J,et al.Apical Microleakage in Root Canals Obturated With 2 Different Endodontic Sealer Systems in Canine Teeth of Dogs[J/OL].Journal of Veterinary Dentistry,2017,34(2):86-91.

[5] Alves A M H,Pozzobon M H,Bortoluzzi E A,et al.Bacterial penetration into filled root canals exposed to different pressures and to the oral environment-in vivo analysis[J/OL].Clinical Oral Investigations,2018,22(3):1157-1165.

[6] Derkson G D,Pashley D H,Derkson M E.Microleakage measurement of selected restorative materials:A new in vitro method[J/OL].The Journal of Prosthetic Dentistry,1986,56(4):435-440.

[7] Wu M-K,Gee A J D,Wessellink P R,et al.Fluid transport and bacterial penetration along root canal fillings[J/OL].International Endodontic Journal,1993,26(4):203-208.

[8] 方玉叶,吕长海.微渗漏检测方法的研究进展[J/OL].医学综述,2019,25(11):2242-2247.

[9] Lares C,ElDeeb M E.The sealing ability of the thermafil obturation technique[J/OL].Journal of Endodontics,1990,16(10):474-479.

[10] Endal U,Shen Y,KnutÅ,et al.A High-resolution Computed Tomographic Study of Changes in Root Canal Isthmus Area by Instrumentation and Root Filling[J/OL].Journal of Endodontics,2011,37(2):223-227.

[11] Huang Y,Celikten B,De Faria Vasconcelos K,et al.Micro-CT and nano-CT analysis of filling quality of three different endodontic sealers[J/OL].Dentomaxillofacial Radiology,2017,46(8):20170223.

[12] 赵麒麟,王艳茹,张敏,等.3种根管封闭剂根尖封闭性能的 Micro-CT 研究[J/OL].口腔医学,2024,44(6):443-447.

[13] Guivarc'h M,Jeanneau C,Giraud T,et al.An international survey on the use of calcium silicate-based sealers in non-surgical endodontic treatment[J/OL].Clinical Oral Investigations,2020,24(1):417-424.

[14] Donnermeyer D,Bürklein S,Dammaschke T,et al.Endodontic sealers based on calcium silicates:a systematic review[J/OL].Odontology,2019,107(4):421-436.

[15] Heran J,Khalid S,Albaaj F,et al.The single cone obturation technique with a modified warm filler[J/OL].Journal of Dentistry,2019,89:103181.

[16] 张纪敏,乔玮玮,狄跃,等.新型根管充填材料 i-MTA SP 的根管封闭性能初探[J/OL].临床口腔医学杂志,2024,40(9):515-519.

[17] KeleşA,Alcin H,Kamalak A,et al.Micro-CT evaluation of root filling quality in oval-shaped canals[J/OL].International Endodontic Journal,2014,47(12):1177-1184.

[18] Radwanski M,Leski M,Puszkars A K,et al.A Micro-CT Analysis of Initial and Long-Term Pores Volume and Porosity of Bioactive Endodontic Sealers[J/OL].Biomedicines,2022,10(10):2403.

[19] Al-Rayesse R,Al-Jabban O,Eid A,et al.Influence of Bioceramic Cements on the Quality of Obturation of the Immature Tooth:An In Vitro Microscopic and Tomographic Study[J/OL].Bioengineering,2024,11(3):213.

[20] Milanovic I,Milovanovic P,Antonijevic D,et al.Immediate and Long-Term Porosity of Calcium Silicate-Based Sealers[J/OL].Journal of Endodontics,2020,46(4):515-523.

[21] Angerame D,De Biasi M,Pecci R,et al.Filling ability of three variants of the single-cone technique with bioceramic sealer:a micro-computed tomography study[J/OL].Journal of Materials Science:Materials in Medicine,2020,31(11).

[22] Orhan K,Jacobs R,Celikten B,et al.Evaluation of Threshold Values for Root Canal Filling Voids in Micro-CT and Nano-CT Images[J/OL].Scanning,2018,2018:1-6.

[23] Haberthür D,Hlushchuk R,Wolf T G.Automated segmentation and description of the internal morphology of human permanent teeth by means of micro-CT[J/OL].BMC Oral Health,2021,21(1):185.