

根管再治疗过程中冲洗剂清除硅酸钙基根管封闭剂效果的研究进展

张波¹ 李霞² 杨梦绮¹

1. 山西医科大学口腔医学院 太原 030001;
2. 山西医科大学口腔医院牙体牙髓一科 太原 030001

[摘要] 近年来硅酸钙基根管封闭剂因其优异的粘接封闭性、生物相容性等特性，在根管治疗中得到广泛应用。其优越的粘接封闭性提高了根管治疗的效果，但当根管治疗失败需要再治疗时，目前的常规根管再治疗方法以及机械预备和化学冲洗的技术改进难以有效地清除硅酸钙基根管封闭剂，根管再治疗的成功率随之受到挑战。因此本文聚焦于冲洗剂对硅酸钙基根管封闭剂的溶解作用，从物理溶解和化学溶解两方面对冲洗剂成分清除硅酸钙基根管封闭剂的能力进行综述，以期为临床上选择有效去除硅酸钙基根管封闭剂的根管冲洗剂，以及探索适宜的根管冲洗策略提供新思路。

[关键词] 硅酸钙基根管封闭剂；冲洗剂；物理溶解；化学溶解；溶解度

[中图分类号] R781.05 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2024047



开放科学（资源服务）
标识码（OSID）

Research progress on the removal of calcium silicate-based root canal sealers during retreatment process

Zhang Bo¹, Li Xia², Yang Mengqi¹

1. School of Stomatology, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China; 2. Dept. of Cariology and Endodontics 1, Hospital of Stomatology, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China

Supported by: Scientific Research Fund of Stomatological Hospital of Shanxi Medical University (KY201904)

Correspondence: Li Xia, Email: lixia6881@163.com

[Abstract] In recent years, Calcium Silicate-based Root Canal Sealers have been widely used in root canal therapy because of its excellent adhesive sealing and biocompatibility. Its superior adhesive sealing improves the effect of root canal therapy, but when the root canal therapy fails and needs to be retreated, the current conventional root canal retreatment methods, as well as the technical improvement of mechanical preparation and chemical irrigation, are difficult to effectively remove the Calcium Silicate-based Root Canal Sealers, and the power of root canal retreatment is also challenged. Therefore, this paper focuses on the dissolution of the irrigating agents on the Calcium Silicate-based Root Canal Sealers, and summarizes the ability of the irrigating agent components to remove the Calcium Silicate-based Root Canal Sealers from both physical dissolution and chemical dissolution, with a view to providing a new idea for the clinical selection of root canal irrigating agent that can effectively remove the Calcium Silicate-based Root Canal Sealers, as well as the exploration of appropriate root canal irrigation strategies.

[Key words] calcium silicate-based root canal sealer; irrigating agent; physical dissolution; chemical dissolution; solubility

[收稿日期] 2023-03-10; **[修回日期]** 2024-04-18

[基金项目] 山西医科大学口腔医院科研基金 (KY201904)

[作者简介] 张波, 医师, 硕士, Email: 1831732479@qq.com

[通信作者] 李霞, 副教授, 博士, Email: lixia6881@163.com

受复杂的根管解剖形态与治疗技术等因素限制，根管治疗后仍有部分患者出现持续的根尖周症状，需要根管再治疗^[1]。根管再治疗成功的关键在于根管系统的感染控制，这需要彻底清除根管内的原充填物并进行严密地根管再充填。研究表

明^[2]根管封闭剂等充填材料难以被各种根管再预备技术完全去除, 硅酸盐水泥类封闭剂更是如此。相较于仅依赖机械预备, 冲洗剂辅助机械预备在清除难溶性根管封闭剂方面表现出更佳的效果。有学者^[3]指出, 冲洗剂之所以能够增强清洁效果, 是因为其不仅能够辅助机械预备, 还能够对一些机械预备难以触及的狭窄区域独立发挥清洁作用。冲洗剂的独立清洁作用可能是通过以下两个方面发挥作用: 首先, 冲洗过程中液体流动的动能作用对黏附的充填材料产生剪切力, 同时可携带充填材料碎片冲出根管; 其次是溶剂对充填材料的溶解作用。为增强根管冲洗剂流动产生的剪切力作用, 学者们已研发出比传统注射器冲洗更高效的超声、声波和激光等冲洗技术。然而, 冲洗剂的独立溶解清除作用仍待深入探讨。溶解过程实际上同时涉及物理和化学两个方面, 为便于研究, 通常根据是否有新化学物质的生成, 将溶解分为物理溶解和化学溶解。本文主要通过物理溶解和化学溶解作用两方面阐述冲洗剂对去除硅酸钙基根管封闭剂的潜在增益效果。

1 硅酸钙基根管封闭剂

硅酸钙基材料早在19世纪就被应用在牙科领域^[4]。硅酸钙基材料在体内潮湿环境下具有稳定性, Camilleri^[5]据此特性研究出一种根管修复材料“矿物三氧化物凝聚体”(mineral trioxide aggregate, MTA), 主要被应用于盖髓、根管侧穿修补以及根管倒充填治疗。为弥补根管充填过程中氢氧化钙类、氧化锌丁香油类封闭剂稳定性以及树脂基封闭剂生物相容性的不足, 研究者又推出一些基于MTA的根管封闭剂材料, 如2009年后相继推出的iRoot SP、TotalFill BC等根管封闭剂。在过去的各项研究中硅酸钙基材料又被称为“水硬性硅酸钙水泥”“硅酸盐类水泥”“硅酸钙基封闭剂”“生物陶瓷类封闭剂”等。基于此类材料特有的硅酸钙成分及水化反应特性, 本文选用“硅酸钙基根管封闭剂”来代指用于根管充填中的硅酸钙基材料。

近年来, 硅酸钙基根管封闭剂如iRoot SP, 被广泛应用于根管充填治疗, 获得了不亚于甚至优于树脂基封闭剂AH Plus的根管治疗效果^[6-7]。这主要得益于硅酸钙基根管封闭剂材料良好的粘接封闭特性。1) 具有良好的流动性, 能够扩散到牙本

质小管中, 形成微机械嵌合。2) 硅酸钙基根管封闭剂的配方中主要包含有硅酸三钙、磷酸二氢钙等成分, 当与牙本质小管液接触时, 封闭剂中硅酸三钙水化反应产生的钙离子与磷酸二氢钙以及组织液中存在的磷酸盐生成磷灰石晶体, 最终和牙本质发生化学粘接^[8]。然而, 当根管治疗后根尖周症状持续存在, 需要进行根管再治疗时, 根尖区难以清除的硅酸钙基根管封闭剂会成为阻碍, 影响根管预备过程中形成通畅顺滑的根管。因此, 需要研究和开发一种能够有效清除硅酸钙基根管封闭剂的再预备技术, 以提高根管再治疗的成功率。

2 根管冲洗剂

使用根管冲洗剂的主要目的在于提升机械预备对根管的清洁效果。在1940年以前, 水是最常用的冲洗剂^[9], 仅承担润滑根管、冲出碎屑的功能。后续相继推出的过氧化氢、氯己定、次氯酸钠、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)等溶液又逐渐丰富了根管冲洗剂杀灭细菌、溶解坏死物质、去除玷污层等功能^[10]。各种根管冲洗剂的功能主要依靠溶液中的溶质成分来发挥作用, 而上述冲洗剂中的各溶质成分并不能有效清除硅酸钙基根管封闭剂^[11-12], 所以需要探索有效清除硅酸钙基根管封闭剂的冲洗剂成分, 提高对根管内充填材料的清除效果。

3 冲洗剂对硅酸钙基根管封闭剂的溶解效果

3.1 溶剂成分的物理溶解效果

物理溶解能力是指一种物质在特定溶剂中的最大溶解限度, 也称为溶解度(solubility)^[13], 通常以材料在溶剂中浸泡后的质量损失率来衡量。材料溶解度的测量受材料性质、溶剂类型、材料处理方式、溶解时间等因素影响, 为方便比较, 水溶解度测量通常采用去离子水作为溶剂^[14]。去离子水通常是指除去了离子形式杂质后的纯水。而颜料等有机原料可采用有机溶剂如三氯乙烷、氯仿等作为溶剂进行溶解度测量。

3.1.1 水的物理溶解效果 由于观察评估手段和测试标准不同, 硅酸钙基根管封闭剂的水溶解度测量结果存在差异。例如, 有学者^[15]测定AH Plus和4种含硅酸钙的牙髓材料(iRoot SP、MTA Fillapex、Sealapex和MTA-A)凝固后的溶解度, 结果

发现iRoot SP、MTA Fillapex的溶解度较高,未满足ANSI/ADA 96/2000标准。有学者^[16]测量出BC Sealer、MTA Fillapex、AH Plus的溶解度分别为2.9%、1.1%、0.6%,符合ISO 6876/2001标准。同年Faria-Júnior等^[17]同样根据ISO 6876/2001相关实验方法,测量出MTA Fillapex的溶解度约为16.15%,但未达ISO 6876/2001标准。2017年,Siboni等^[18]评估经聚维酮和聚羧酸改性BioRoot RCS的物理性质,测量出BioRoot RCS和MTA Fillapex的溶解度超过13.3%,未达到ISO 4049/2009要求。

上述各研究中不同学者所测量的硅酸钙基根管封闭剂的溶解度结果一致性较差,可能有以下几点原因。1) 测量溶解度标准所采取的标准类型不同,如ANSI/ADA 96是针对水硬性充填材料,ISO 4049是针对聚合性修复材料^[19]。2) 溶解度测量标准反复被修订^[4],如ANSI/ADA 96,有ANSI/ADA 96/2000、ANSI/ADA 96/2012、ANSI/ADA 96/2019版本。3) 有部分实验研究^[18]可能对测量标

准中的实验流程进行改良。4) 不同硅酸钙基根管封闭剂的主要成分存在差异(表1)^[20-22],有学者^[23]在研究中发现TotalFill BC、Sealer Plus BC、Bio-C Sealer的溶解度分别为7.82%、6.45%、20.53%,表明溶解度会受到材料主要成分差异的影响。5) 水性环境差异影响溶解度测量结果,有学者^[24]发现与去离子水相比,硅酸钙基根管封闭剂在磷酸缓冲盐溶液(phosphate buffered saline, PBS)中的溶解度有所降低。各项研究中,硅酸钙基根管封闭剂的溶解度范围为1.1%~20.6%。这表明,仅仅依赖水性溶液的物理溶解作用,对于这类封闭剂的去除效果可能并不显著。此外,根据现行的ISO标准以及我国的医药行业标准规定,根管封闭剂的水溶解度应低于3%^[25-26]。因此,通过提高水溶解度来增强对根管封闭剂的去除效果并不可行,这提示需要探索更为有效的冲洗剂成分来清除硅酸钙基根管封闭剂。

表 1 含硅酸钙基材料的类型以及主要组分

Tab 1 Types and main components of calcium silicate-based materials

商品名	生产商	主要成分
MTA Fillapex	Septodont公司, 法国	单组份: 水杨酸基树脂、稀释树脂、天然树脂、三氧化二铋、纳米二氧化硅颗粒、MTA 和颜料
MTA-A	Angelus公司, 巴西	粉剂: 氧化钾、氧化钠、氧化硫、氧化钙、氧化镁、三氧化二铋、三氧化二铝、硫酸钾、硅酸钠、二氧化硅晶体 液剂: 水
White ProRoot MTA	Dentsply Sirona公司, 美国	粉剂: 白色硅酸钙、氧化铋 液剂: 水
Neo-MTA Plus	Avalon Biomed公司, 美国	粉剂: 硅酸三钙、硅酸二钙、钽铁矿、硫酸钙、二氧化硅 液剂: 水凝胶
Biodentine	Septodont公司, 法国	粉剂: 硅酸三钙 液剂: 氯化钙水溶液、赋形剂
iRoot SP	Innovative BioCeramix Inc公司, 加拿大	单组份: 硅酸钙、磷酸钙、氢氧化钙、氧化铋、氧化锆
EndoSequence BC Sealer	Brasseler公司, 美国	单组份: 硅酸钙、磷酸二氢钙、氢氧化钙、氧化锆、氧化钽、填料、增稠剂
EndoSequence BC Sealer HiFlow	Brasseler公司, 美国	单组份: 硅酸钙、磷酸二氢钙、氢氧化钙、氧化锆、氧化钽、填料、增稠剂
BioRoot RCS	Septodont公司, 法国	粉剂: 硅酸三钙、二氧化锆、聚维酮 液剂: 水、氯化钙、聚羧酸盐
Bio-C Sealer	Angelus公司, 巴西	单组份: 硅酸钙、铝酸钙、氧化钙、氧化锆、氧化铁、二氧化硅、聚乙二醇
Sealer Plus BC	MK Life公司, 巴西	单组份: 氧化锆、硅酸三钙、硅酸二钙、氢氧化钙、丙二醇
TotalFill BC	FKG Dentaire SA公司, 瑞士	单组份: 氧化锆、硅酸钙、磷酸钙、氢氧化钙、填料、增稠剂
EdgeBioCeramic	EdgeEndo, 美国	单组份: 氧化锆、硅酸三钙、硅酸二钙、氢氧化钙、填料、增稠剂

3.1.2 有机溶剂的物理溶解效果 早在1990年,已有学者^[27]开始尝试使用有机溶剂如氯仿、氟烷、橙油与桉树油等去除牙胶尖等充填材料,并在临床上得到验证肯定^[28]。2000年,有学者^[29]发现,环氧树脂类封闭剂在氯仿和氟烷中的溶解度超过96%,表明有机溶剂能有效去除AH Plus封闭剂。

后续有学者进一步探索了有机溶剂是否也能有效清除硅酸钙基根管封闭剂,然而,实验结果并不理想。据2015年一项研究^[30]报道,MTA Fillapex在氯仿溶剂中的溶解度远低于AH Plus,表明传统有机溶剂氯仿可能并不能有效溶解含硅酸钙基材料的根管封闭剂。2016年,有学者^[31]比较MTA Filla-

pex和2种环氧树脂(AH 26和AH Plus)在传统有机溶剂中的溶解度, 得出了相似的测量结果。有机溶剂通常对无机物的溶解性较弱。在上述研究中, MTA Fillapex在有机溶剂中部分溶解的原因可能是在于其组分中含有少量的水杨酸盐树脂、稀释树脂和天然树脂等有机成分。

在离体牙模型实验中, 关于有机溶剂对硅酸钙基根管封闭剂等充填材料的去除效果, 不同研究得出了不同的结论。这种差异可能受到氯仿溶剂使用方式、根管壁上主要残余充填材料类型等多种因素的影响。具体来说, 一项针对充填方式与根管封闭剂iRoot SP去除效果关联性的研究^[32]显示, 在热连续波充填组中, 使用氯仿溶剂后充填材料残余率为8.64%, 而不使用氯仿溶剂则为6.52%; 在冷侧压充填组中, 使用氯仿溶剂与否, 充填材料残余率分别为3.5%和4.4%。由此可见, 氯仿溶剂对于根管封闭剂iRoot SP等材料的去除效果可能并不理想。然而, Oltra等^[33]的研究发现不同的结果。他们发现氯仿溶剂对EndoSequence BC Sealer和AH Plus两种根管封闭剂的去除效果具有增益作用。这主要是因为氯仿溶剂能有效溶解牙科材料^[34], 而在研究中观察到根管纵剖面上的残余材料以牙科材料为主。因此, 氯仿溶剂在去除牙科材料方面具有实际意义。不过, 由于氯仿溶剂对无机材料溶解效果不佳, 并且受到试验方法的局限, 氯仿溶剂对于硅酸钙基根管封闭剂的实际去除作用可能不如研究结果所示那么显著。

通过对硅酸钙基根管封闭剂相关的物理溶解度实验以及临床应用研究的回顾, 发现不论是去离子水还是各类有机溶剂, 对硅酸钙基根管封闭剂的物理溶解作用均较弱, 并不能发挥有效的清除作用。

3.2 溶剂成分的化学溶解效果

在水性环境下, 硅酸钙基材料内部的组分能够发生水合固化反应, 形成硅酸钙、磷灰石等主要成分^[8]。这种材料作为建筑水泥的主要成分, 在工程建筑中得到了广泛应用。然而, 在管道运输和精密仪器中, 它可能会逐渐沉积形成水泥垢层, 从而影响仪器的正常工作运转。有学者^[35-36]借鉴建筑水泥腐蚀原理, 开发出多款高效清洁剂, 有效去除水泥垢, 保障管道和精密仪器顺畅运行。清洁剂主要分为酸性物质及钙金属离子螯合剂两大类。因此, 对于硅酸钙基根管封闭剂类材料的化学清除主要考虑酸性溶液以及钙离子螯合剂这两类物质。

3.2.1 酸的化学溶解效果 据2010年的1项体外研究^[37]报道, 酸性溶液可能对硅酸钙基材料表面有一定腐蚀作用。报道中通过不同溶液处理后White ProRoot MTA模块表面的显微硬度变化来评估溶解能力, 结果发现在21 d后, 相较于EDTA组, 碳酸组和葡萄糖酸氯己定组White ProRoot MTA的表面硬度显著降低。据此推测, 酸性溶液可能通过腐蚀作用改变了材料表面的结构。然而, 这一表面硬度变化主要反映了溶液对材料表面微观结构的影响和力学特性的改变, 并不一定能够全面客观地体现溶液对材料的化学溶解能力。

有研究通过材料的显微硬度联合宏观表现或是微观结构来评估溶液对硅酸钙基材料的化学溶解作用。2013年, Saghiri等^[38]通过显微硬度测试以及推出法测验发现经盐酸溶解处理后的硅酸钙基材料White MTA的显微硬度以及粘接强度均显著下降, 表明盐酸溶液可能是一种能够有效去除硅酸钙基材料的化学清洁剂。2015年, Wang等^[39]探究丁酸溶液的pH值对硅酸三钙材料的显微硬度的影响, 通过显微硬度仪观察到MTA在pH值为5.4、6.4及7.4组的维氏显微硬度值(Vickers microhardness number, VHN)分别是23.3、30.5、33.8, 进一步验证了酸性溶液对硅酸钙基材料的腐蚀作用。该研究通过扫描电子显微镜观察到材料表面的微观结构变化, 与经典晶体生长理论中的溶解过程相符^[40], 表明低pH值的酸溶液可能更有效地化学溶解硅酸钙基根管封闭剂。无论是有机酸(如葡萄糖酸氯己定、丁酸)还是无机酸(如碳酸、盐酸), 均能改变硅酸钙基根管封闭剂材料的微观结构, 显示出它们作为“水泥垢”化学清洁剂的潜力。

到目前为止, 通过离体牙实验直接探究在根管再治疗时酸性溶液去除硅酸钙基根管封闭剂效果的研究并不多。2020年, Garrib等^[41]报道可用甲酸来去除根管内充填的硅酸钙基根管封闭剂材料, 研究中用Gutta percha牙科材料和TotalFill BC封闭剂对离体牙进行单尖法充填后, 分别使用10%甲酸、17% EDTA注射器冲洗联合ProTaper Gold去除充填材料, 通过MicroCT扫描对比了根管再治疗前后的充填物体积变化, 发现甲酸组对硅酸钙基根管封闭剂的去除效果明显优于EDTA组。这一结果提示, 甲酸溶液可能是去除硅酸钙基根管封闭剂的有效冲洗剂。另外研究中还发现, 相较于10%甲酸, 20%甲酸处理牙本质5 min会显著降低其表面

VHN并造成损伤。因此,甲酸作为根管冲洗剂需探索适宜的浓度和时间。2021年的一项研究^[42]评估了5%乙酸、37%磷酸和氯仿辅助C锉在清除根尖区2 mm的EndoSequence BC封闭剂方面的效用。结果显示,乙酸组在达到工作长度的时间上表现更短,提示乙酸可能是去除硅酸钙基根管封闭剂的有效冲洗剂。到了2023年,国外学者^[43]发现盐酸溶液能够有效去除硅酸钙基根管封闭剂。该研究通过对比氯仿、17% EDTA、10%甲酸溶液和20%盐酸溶液联合C锉在实现根管通畅时间上的差异,评估了不同溶液对硅酸钙基根管封闭剂的清洁效果。除氯仿组外,其余各组均实现了根管的通畅,且盐酸组的速度最快,这表明盐酸溶液可能对硅酸钙基根管封闭剂具有良好的化学溶解作用。

然而据部分研究报道,酸性溶液并不能有效辅助甚至可能阻碍机械预备去除硅酸钙基根管封闭剂。Carrillo^[44]在研究中发现,无论是使用Edge-BioCeramic还是Neo-MTA Plus作为根管封闭剂,6%次氯酸钠、5%乙酸和碳酸在去除硅酸钙基根管封闭剂后实现根管通畅的效果均没有显著差异。然而,该团队在后续的研究^[45]中进一步指出,5%乙酸和碳酸等溶液的辅助冲洗并未带来增益效果,甚至可能阻碍机械预备对封闭剂的清除。这可能是由于封闭剂材料微间隙中的溶液对镍钛锉切削运动产生的缓冲作用。尽管如此,笔者认为上述研究结果的差异可能还受多种因素影响,包括但不限于封闭剂的主成分、封闭剂的固化环境及时间、去除充填材料的程序、酸溶液的类型、酸的浓度以及作用时长等。

综上所述,各种有机酸、无机酸溶液不仅能够降低硅酸钙基根管封闭剂的表面硬度,还能够溶解该类材料,且溶解能力受溶液pH值影响。各酸性溶液在去除根管内的硅酸钙基根管封闭剂方面可能具有增益效果,但同时也可能对牙本质的微观结构造成一定破坏。因此,在选择酸性溶液作为冲洗剂时,需要权衡其对牙本质结构的影响和去除封闭剂的效果。具体来说,应考虑溶液的浓度和作用时间,以确保在最小程度影响牙本质结构的前提下,尽可能多地去除根管内的硅酸钙基根管封闭剂,从而提高根管再预备的整体效果。

3.2.2 螯合剂的化学溶解效果

在根管治疗中,螯合剂常被用作根管冲洗剂,其不仅能够有效去除机械预备过程中产生的玷污层,还能发挥“润滑”作用,从而有利于机械预备的顺利进行。

Kaushal等^[46]曾在体外对比17%EDTA、10%柠檬酸(citric Acid, CA)、7%顺丁烯二酸(maleic acid, MA)去除根管内玷污层的效果,结果发现各冲洗剂对玷污层均有较好的清洁效果。但那些通过螯合钙离子发挥清洁作用的根管冲洗剂是否同样能够有效去除硅酸钙基根管封闭剂,需要进一步研究以确定。2017年, Ballal等^[47]研究QMix(由EDTA、氯己定和表面活性剂混合组成的根管冲洗剂)、7% MA、17% EDTA和蒸馏水4组溶液对MTA显微硬度、微观结构及化学成分的影响。研究结果发现EDTA、MA显著改变了MTA的微观结构及化学成分,这或许是因为其对材料的水化反应有抑制作用。另外该研究中发现QMix组具有比EDTA组更好的溶解效果,这可能是QMix根管冲洗剂叠加各组分优势的原因。2022年, Dabrowska等^[48]通过光学显微镜和扫描电子显微镜观察经过40% CA处理后硅酸钙基类材料Biodentine模块表面出现很多类似于蚀刻的圆形缺陷和空心凹坑,导致单位面积内的材料损失明显增大,通过能量色散X射线光谱分析,他们发现材料模块表面的钙离子含量显著降低。这些结果表明,40%柠檬酸溶液可能是一种能够有效去除硅酸钙基根管封闭剂的根管冲洗剂。

在去除硅酸钙基根管封闭剂的离体牙研究中,17% EDTA溶液常作为对照组(常规冲洗剂),探究不同溶剂去除充填材料的效果。Garrib等^[49]以仅机械预备为对照组,对比17% EDTA和10%甲酸冲洗去除硅酸钙基根管封闭剂TotalFill BC的效果,结果发现17% EDTA组去除效果弱于对照组和甲酸组。另外该研究也比较17% EDTA和10%甲酸对硅酸钙基根管封闭剂TotalFill BC样品表面硬度的影响,结果发现17% EDTA浸泡5 min后会增加表面硬度,这或许能够解释为何17% EDTA组在去除充填材料方面的效果较差。Ballal等^[49]研究了不同冲洗策略对硅酸钙基根管封闭剂去除效果的影响,指出MA和羟基乙叉二膦酸(etidronic acid, HEDP)可能比EDTA更有效地清除硅酸钙基根管封闭剂。Zhekov^[50]在探讨硅酸钙基根管封闭剂Bio-Root RCS去除方案的研究中发现,40% CA可能增强对根管内根尖区封闭剂的清除效果。研究表明,当充填的牙胶尖短于工作长度2 mm时,与氯仿组及对照组相比,40% CA组的离体牙具有更高的根尖通畅率;当牙胶尖达到工作长度时,所有组均能实现通畅,但柠檬酸组在根管壁上残留的封闭

剂材料更少。

各类螯合剂通过螯合脱钙作用，均能在一定程度上化学溶解硅酸钙基根管封闭剂。然而，它们对材料表面硬度的影响程度不同，可能导致去除效果上的差异。CA和MA不仅具备螯合剂的特性，还拥有酸性溶液的性质，因此它们对硅酸钙基根管封闭剂的清除效果较强，但同时也会对牙体组织结构产生一定影响。QMix溶液主要包含EDTA、氯己定和表面活性剂等成分。其中的CHX含有多种钙离子螯合剂成分，如枸橼酸盐、醋酸盐和葡萄糖酸盐。QMix溶液中的多种螯合剂成分相互作用，在有效清除目标材料的同时，减少了对牙体组织抗力的影响。在工程机械领域，研究者们开发的多种溶液混合清洁剂，在高效清洁水垢层的同时，也避免了对精密仪器的过度腐蚀^[51]。因此，为了平衡硅酸钙基根管封闭剂的清洁效果与牙体结构的保护，除了考虑冲洗溶液的浓度和作用时间，多种溶液的混合策略也可能成为提升根管冲洗剂清除效果的新方向。

4 总结与展望

硅酸钙基根管封闭剂固化后能与牙本质形成良好的物理和化学粘接，且固化后坚硬，一旦有根管再治疗的需要，难以被常规再治疗手段清除。本文从物理和化学的作用原理出发，深入分析了各种化学试剂在清除硅酸钙基根管封闭剂方面的能力以及它们作为根管冲洗剂的潜力。研究发现，酸类溶液和螯合剂溶液均能通过化学溶解作用独立清除硅酸钙基根管封闭剂，同时有效降低材料表面硬度，从而显著提升机械预备对硅酸钙基根管封闭剂的清除效果。然而，这些化学试剂在使用过程中也存在对牙体组织结构造成过度破坏的风险。Garrib等^[41]在研究中报道，在10%甲酸冲洗5 min条件下，牙体组织几乎不受影响，并且根管内硅酸钙基根管封闭剂能被有效清除。还有研究指出，20%盐酸能有效清除硅酸钙基根管封闭剂，但对牙本质的微观结构也有显著破坏^[43]。经10% CA作用10 min后，硅酸钙基根管封闭剂材料以及牙本质的表面硬度均显著降低^[52]。依据上述研究结果推测机械预备可以联合以下3种冲洗方案：1) 机械预备联合10%甲酸冲洗5 min；2) 机械预备联合10%盐酸冲洗5 min；3) 机械预备联合10% CA冲洗5 min。冲洗剂的浓度和时长影响其清除硅酸

钙基根管封闭剂的效果，并可能对牙体组织产生不同程度的影响。为了平衡清洁效果和牙体保护，需通过实验探索适宜的冲洗条件和溶液混合策略。同时，动能冲洗设备能增强清洁效果，但也可能加剧对牙本质的破坏，这同样需要深入探索。

利益冲突声明：作者声明本文无利益冲突。

5 参考文献

- [1] Hargreaves KM, Cohen S, Berman LH. Preface[M]// Cohen's pathways of the pulp. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [2] Rossi-Fedele G, Ahmed HM. Assessment of root canal filling removal effectiveness using micro-computed tomography: a systematic review[J]. *J Endod*, 2017, 43(4): 520-526.
- [3] 马昂. Er: YAG激光活化冲洗技术对根管内氢氧化钙清除效果和根尖封闭性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Ma A. Effect of Er: YAG laser activation irrigation technology on removal effect of calcium hydroxide in root canals and apical sealing ability[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [4] Primus CM, Tay FR, Niu LN. Bioactive tri/dicalcium silicate cements for treatment of pulpal and periapical tissues[J]. *Acta Biomater*, 2019, 96: 35-54.
- [5] Camilleri J. Classification of hydraulic cements used in dentistry[J]. *Front Dent Med*, 2020, 1: 9.
- [6] Akcay M, Arslan H, Durmus N, et al. Dentinal tubule penetration of AH Plus, iRoot SP, MTA fillapex, and guttaflow bioseal root canal sealers after different final irrigation procedures: a confocal microscopic study[J]. *Lasers Surg Med*, 2016, 48(1): 70-76.
- [7] Atav Ates A, Dumani A, Yoldas O, et al. Post-obturation pain following the use of carrier-based system with AH Plus or iRoot SP sealers: a randomized controlled clinical trial[J]. *Clin Oral Investig*, 2019, 23(7): 3053-3061.
- [8] Kebudi Benezra M, Schembri Wismayer P, Camilleri J. Interfacial characteristics and cytocompatibility of hydraulic sealer cements[J]. *J Endod*, 2018, 44(6): 1007-1017.
- [9] Harrison JW. Irrigation of the root canal system[J]. *Dent Clin North Am*, 1984, 28(4): 797-808.

- [10] Boutsoukis C, Arias-Moliz MT, Chávez de Paz LE. A critical analysis of research methods and experimental models to study irrigants and irrigation systems[J]. *Int Endod J*, 2022, 55(Suppl 2): 295-329.
- [11] Eren SK, Örs SA, Aksel H, et al. Effect of irrigants on the color stability, solubility, and surface characteristics of calcium-silicate based cements[J]. *Restor Dent Endod*, 2022, 47(1): e10.
- [12] Reboloso de Barrio E, Gancedo-Caravia L, García-Barbero E, et al. Effect of exposure to root canal irrigants on the push-out bond strength of calcium silicate-based cements[J]. *Clin Oral Investig*, 2021, 25(5): 3267-3274.
- [13] Barton AFM. Solubility parameters[J]. *Chem Rev*, 1975, 75(6): 731-753.
- [14] Salimi A, Roosta A. Experimental solubility and thermodynamic aspects of methylene blue in different solvents[J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 675: 134-139.
- [15] Borges RP, Sousa-Neto MD, Versiani MA, et al. Changes in the surface of four calcium silicate-containing endodontic materials and an epoxy resin-based sealer after a solubility test[J]. *Int Endod J*, 2012, 45(5): 419-428.
- [16] Zhou HM, Shen Y, Zheng W, et al. Physical properties of 5 root canal sealers[J]. *J Endod*, 2013, 39(10): 1281-1286.
- [17] Faria-Júnior NB, Tanomaru-Filho M, Berbert FL, et al. Antibiofilm activity, pH and solubility of endodontic sealers[J]. *Int Endod J*, 2013, 46(8): 755-762.
- [18] Siboni F, Taddei P, Zamparini F, et al. Properties of BioRoot RCS, a tricalcium silicate endodontic sealer modified with povidone and polycarboxylate[J]. *Int Endod J*, 2017, 50(Suppl 2): e120-e136.
- [19] Camilleri J, Wang C, Kandhari S, et al. Methods for testing solubility of hydraulic calcium silicate cements for root-end filling[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 7100.
- [20] Komabayashi T, Colmenar D, Cvach N, et al. Comprehensive review of current endodontic sealers[J]. *Dent Mater J*, 2020, 39(5): 703-720.
- [21] Antunes TBM, Janini ACP, Pelepenko LE, et al. Heating stability, physical and chemical analysis of calcium silicate-based endodontic sealers[J]. *Int Endod J*, 2021, 54(7): 1175-1188.
- [22] Eskandari F, Razavian A, Hamidi R, et al. An updated review on properties and indications of calcium silicate-based cements in endodontic therapy[J]. *Int J Dent*, 2022, 2022: 6858088.
- [23] Torres FFE, Zordan-Bronzel CL, Guerreiro-Tanomaru JM, et al. Effect of immersion in distilled water or phosphate-buffered saline on the solubility, volumetric change and presence of voids within new calcium silicate-based root canal sealers[J]. *Int Endod J*, 2020, 53(3): 385-391.
- [24] Donnermeyer D, Bürklein S, Dammaschke T, et al. Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review[J]. *Odontology*, 2019, 107(4): 421-436.
- [25] 国家食品药品监督管理局. 牙科根管封闭材料: YY 0717—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- State Food and Drug Administration of the People's Republic of China. Dental root canal sealing materials: YY 0717—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [26] International Organization for Standardization. Dentistry—Root canal sealing materials: ISO 6876: 2012 [S]. International Organization for Standardization, 2012.
- [27] Dotto L, Sarkis-Onofre R, Bacchi A, et al. The use of solvents for gutta-percha dissolution/removal during endodontic retreatments: a scoping review[J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2021, 109(6): 890-901.
- [28] Katunarić A, Dijanić P, Jurić Kačunić D, et al. Efficiency evaluation of various solvents in retreatment of endodontic filling in extracted teeth[J]. *Acta Stomatol Croat*, 2022, 56(1): 2-11.
- [29] Whitworth JM, Boursin EM. Dissolution of root canal sealer cements in volatile solvents[J]. *Int Endod J*, 2000, 33(1): 19-24.
- [30] Bayram E, Dalat D, Bayram M. Solubility evaluation of different root canal sealing materials[J]. *J Contemp Dent Pract*, 2015, 16(2): 96-100.
- [31] Alzraikat H, Taha NA, Hassounch L. Dissolution of a mineral trioxide aggregate sealer in endodontic solvents compared to conventional sealers[J]. *Braz Oral Res*, 2016, 30: S1806-S83242016000100215.

- [32] Ma JZ, Al-Ashaw AJ, Shen Y, et al. Efficacy of Pro-Taper Universal Rotary Retreatment system for gutta-percha removal from oval root canals: a micro-computed tomography study[J]. *J Endod*, 2012, 38(11): 1516-1520.
- [33] Oltra E, Cox TC, LaCourse MR, et al. Retreatability of two endodontic sealers, EndoSequence BC Sealer and AH Plus: a micro-computed tomographic comparison[J]. *Restor Dent Endod*, 2017, 42(1): 19-26.
- [34] Kaplowitz GJ. Evaluation of gutta-percha solvents [J]. *J Endod*, 1990, 16(11): 539-540.
- [35] 张文文. 硬化水泥石高效清洗剂的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2014.
Zhang WW. Study on the highly efficient cleaning agent of hardened cement stone[D]. Tianjin: Tianjiong University, 2014.
- [36] Wang T, Wu K, Kan LL, et al. Current understanding on microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the evaluation methods and mitigation measures[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 247: 118539.
- [37] Nandini S, Natanasabapathy V, Shivanna S. Effect of various chemicals as solvents on the dissolution of set white mineral trioxide aggregate: an *in vitro* study[J]. *J Endod*, 2010, 36(1): 135-138.
- [38] Saghiri MA, Garcia-Godoy F, Gutmann JL, et al. Removal of white mineral trioxide aggregate cement: a promising approach[J]. *Biomed Res Int*, 2013, 2013: 469164.
- [39] Wang Z, Ma J, Shen Y, et al. Acidic pH weakens the microhardness and microstructure of three tricalcium silicate materials[J]. *Int Endod J*, 2015, 48(4): 323-332.
- [40] Scrivener K, Ouzia A, Juilland P, et al. Advances in understanding cement hydration mechanisms[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 124: 105823.
- [41] Garrib M, Camilleri J. Retreatment efficacy of hydraulic calcium silicate sealers used in single cone obturation[J]. *J Dent*, 2020, 98: 103370.
- [42] Inderpal SS. *In vitro* evaluation of the solubility of Endosequence BC sealer in acidic solutions[D]. Richmond Virginia: Virginia Commonwealth University, 2021.
- [43] Rezaei G, Liu XH, Jalali P. Efficacy of different solvents for achieving patency in teeth obturated using bioceramic sealer[J]. *J Endod*, 2023, 49(2): 219-223.
- [44] Carrillo CA. Retreatability of tricalcium silicate-based root canal sealing materials using different solutions[D]. Texas: University of Texas School of Dentistry, 2020.
- [45] Carrillo CA, Kirkpatrick T, Freeman K, et al. Retrievability of calcium silicate-based root canal sealers during retreatment: an *ex vivo* study[J]. *J Endod*, 2022, 48(6): 781-786.
- [46] Kaushal R, Bansal R, Malhan S. A comparative evaluation of smear layer removal by using ethylenediamine tetraacetic acid, citric acid, and maleic acid as root canal irrigants: an *in vitro* scanning electron microscopic study[J]. *J Conserv Dent*, 2020, 23(1): 71-78.
- [47] Ballal NV, Sona M, Tay FR. Effects of smear layer removal agents on the physical properties and microstructure of mineral trioxide aggregate cement [J]. *J Dent*, 2017, 66: 32-36.
- [48] Dąbrowska K, Palatyńska-Ulatowska A, Klimek L. The effect of irrigation with citric acid on biodentine tricalcium silicate-based cement: SEM-EDS *in vitro* study[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(10): 3467.
- [49] Ballal NV, Ulusoy Öİ, Rao S, et al. The efficacy of different irrigation protocols in removing tricalcium silicate-based sealers from simulated root canal irregularities[J]. *Microsc Res Tech*, 2019, 82(11): 1862-1868.
- [50] Zhekov K. Obstruction of the root canal system with hydraulic condensation and bioceramic sealer[D]. Bulgaria: Pharmacy Plovdiv University, 2022.
- [51] 青岛四通八达商贸有限公司. 一种精密仪器雾化器积垢清洁剂: 201711086951.5[P]. 2019-05-14.
Qingdao Sitong Bada Trading Co Ltd. A scale cleaner for precision instrument atomizer: 201711086-951.5 [P]. 2019-05-14.
- [52] Halder N, Vemuri S, Guptha Anila BS, et al. To compare the efficacy of various organic solvents on retrievability of Biodentine and their effect on microhardness of Biodentine and radicular dentin: an *in vitro* study[J]. *J Conserv Dent*, 2023, 26(1): 98-103.