

根管治疗技术的临床应用与发展研究

王 燕

大连大学 辽宁大连

【摘要】目的 综述根管治疗技术在器械、冲洗、充填及复杂病例处理方面的临床应用与发展。**方法** 检索中国知网、万方、PubMed 及 Web of Science 数据库中 2019-2025 年发表的相关文献，围绕根管预备、冲洗消毒、根管充填、器械分离、数字化导板及显微根尖手术等主题进行筛选与归纳。重点关注系统评价、Meta 分析、临床研究及与技术机制相关的实验研究，并结合研究类型和证据层级讨论其临床应用价值与局限性。本文为基于上述检索的叙述性综述，未采用系统评价的固定检索式、偏倚评价流程与可重复性检索报告。**结果** 热处理镍钛器械与往复运动系统改善了器械抗疲劳性能，但次氯酸钠暴露与温度等因素仍影响其寿命；冲洗活化技术提升了玷污层与感染物的清除效果，但不同活化方式之间的相对优势尚无一致结论；以生物陶瓷封闭剂为基础的单尖充填改变了以牙胶为主的传统充填理念；数字化导板与显微技术拓展了钙化根管与根尖手术的处理能力。**结论** 根管治疗技术呈现微创化与数字化趋势，器械分离处理、充填质量评价、导板精度与远期疗效证据仍是今后研究的重点。

【关键词】 根管治疗；镍钛器械；根管冲洗；生物陶瓷封闭剂；单尖充填；导板牙髓治疗；显微根尖手术；综述

【收稿日期】 2026 年 5 月 15 日 **【出刊日期】** 2026 年 6 月 25 日 **【DOI】** 10.12208/j.iosr.20260008

Research on the clinical application and development of root canal treatment techniques

Yan Wang

Dalian University, Dalian, Liaoning

【Abstract】 Objective To review the clinical application and development of root canal treatment techniques regarding instrumentation, irrigation, obturation, and the management of complex cases. **Methods** Relevant literature published between 2019 and 2025 was retrieved from the CNKI, Wanfang, PubMed, and Web of Science databases. The literature was screened and summarized based on topics such as root canal preparation, irrigation and disinfection, obturation, instrument separation management, digital guides, and microscopic periapical surgery. Emphasis was placed on systematic reviews, meta-analyses, clinical studies, and experimental research concerning technical mechanisms; the clinical value and limitations of these techniques were discussed in the context of study types and levels of evidence. This article is a narrative review based on the aforementioned search; it did not employ the fixed search strategies, bias assessment protocols, or reproducible search reporting typical of systematic reviews. **Results** Heat-treated nickel-titanium (NiTi) instruments and reciprocating motion systems have improved fatigue resistance, although factors such as sodium hypochlorite exposure and temperature continue to affect their service life. Irrigation activation techniques have enhanced the removal of the smear layer and infectious debris, though there is no consensus regarding the relative advantages of different activation methods. Bioceramic sealer-based single-cone obturation has shifted the traditional paradigm centered on gutta-percha. Digital guides and microscopic techniques have expanded capabilities for managing calcified root canals and performing periapical surgery. **Conclusion** Root canal treatment techniques are trending toward minimally invasive and digital approaches. Future research should focus on the management of separated instruments, the assessment of obturation quality, guide accuracy, and evidence regarding long-term clinical outcomes.

【Keywords】 Root canal treatment; NiTi instruments; Root canal irrigation; Bioceramic sealer; Single-cone obturation; Guided endodontics; Microscopic periapical surgery; Review

1 引言

根管治疗是治疗牙髓病与根尖周病最主要的方法,其核心步骤为根管预备、化学—机械消毒与三维严密充填。理想的根管充填应在充分清理和成形的基础上,尽可能实现充填材料的均匀分布与可靠封闭,并合理控制充填长度,避免明显欠填或不必要的超填;根管充填质量是影响根管治疗预后的重要因素之一,但治疗成功还取决于清创质量、治疗前根尖周状态及冠方修复等因素^[1]。近年来,镍钛器械的材料与运动方式、冲洗活化技术、充填材料与充填理念,以及数字化导板与显微外科技术均取得明显进展,使复杂根管的处理更为可控^[2]。同时,中华口腔医学会牙体牙髓病学专业委员会发布的《牙体牙髓病诊疗中口腔放射学的应用指南》对根尖片与锥形束 CT 在根管治疗术前、术中、术后的合理选择给出了推荐意见,为疗效评估提供了影像学依据^[2]。

在讨论技术进展之前,有必要明确根管治疗的决策前提。是否对患牙实施根管治疗,取决于三个方面的综合判断:患牙的牙髓与根尖周状态是否确需干预、患牙是否具备可修复的条件、以及患牙在整体口腔治疗计划中的价值。随着种植修复的普及,临床中出现了“保留患牙”与“拔除后种植”两条路径的取舍问题。对于具有良好可修复性和牙周支持条件的患牙,保留天然牙通常是值得优先考虑的治疗策略;但根管治疗与拔牙后种植修复的选择应综合患牙状况、预期疗效、治疗成本及患者意愿进行个体化决策,不能脱离患牙可修复性、牙周支持、裂纹情况等因素作出普遍判断^[1-2]。因此,根管治疗技术的改进方向并非与种植竞争,而是提高适应证范围内患牙的长期存留率与功能表现^[1-2]。

从失败原因看,根管治疗后病变持续或复发通常与三类因素有关:根管内持续感染,包括漏治的根管以及峡区、侧支根管内残留的生物膜;根管外感染,包括根尖区的生物膜储存与囊性病变;以及冠方微渗漏所致的再感染^[1-2]。区分这些原因对治疗方案的选择具有参考意义:持续或复发性根尖周病变可能与根管内感染、根管外因素及冠方封闭不良等有关,应结合临床检查、影像学表现及既往治疗情况分析病因,并在评估患牙可修复性后,选择非

手术再治疗、根尖手术或其他适宜方案;完善的冠方修复是维持治疗效果的重要环节^[1]。因此在评价治疗失败时,应先检查冠方修复的完整性与边缘密合性,再评估根管内因素,这一顺序有助于避免将本可预防的再感染误判为难治性根尖周炎,也可减少不必要的再治疗或拔牙^[1-2]。本文就上述技术方向的临床应用与发展进行综述。

2 根管预备器械与技术

2.1 热处理镍钛器械与往复运动系统

镍钛器械之所以取代不锈钢器械成为根管预备的主流,在于其超弹性与形状记忆效应,使其在弯曲根管中较不锈钢器械更易于维持中心定位;但合理设计的镍钛器械虽有助于维持根管原有形态,实际效果仍受器械设计、根管解剖及操作技术影响,不能单独保证降低台阶、偏移或穿孔风险;而其抗循环疲劳与抗扭转折断性能,则主要由合金处理工艺与运动方式共同决定。热机械处理通过在低温/中温条件下对镍钛合金进行加工,诱导产生可控的马氏体与 R 相组织,从而在保持柔韧性的同时提高抗疲劳性能^[3-5]。

在运动方式上,往复运动(reciprocation)通过不对称的“切削—释放”角度组合降低器械在弯曲根管内承受的累积应力,部分往复运动系统在特定实验条件下表现出较高的循环疲劳抗力,但抗循环疲劳性能取决于合金、器械设计、运动参数和实验条件,不能笼统推广到所有器械系统。一项体外研究比较了多种热处理往复镍钛器械在新器械与模拟临床使用后的循环疲劳抗力,结果显示模拟使用后器械的疲劳抗力发生变化,提示临床使用次数应纳入器械寿命管理^[3]。动态循环疲劳模型的比较研究表明,不同热处理往复器械在疲劳测试中的抗力存在差异^[4];另一项在体温条件下开展的循环疲劳与扭转抗力评价同样报告了不同系统间的性能差异,提示实验温度这一变量对结果具有实质影响^[5]。

多方法学研究从设计、冶金学与机械性能角度系统比较了三种热处理往复系统,并同时评价其成形能力与冲洗液流动特性,为器械选择提供了综合依据^[6]。这类研究的意义在于,器械的设计参数(锥度、横截面、螺距与尖端设计)不仅决定成形效果,还影响冲洗液在根管内的流动与交换,因而器械选

择与冲洗方案应作为一个整体加以考虑^[6]。单支铰往复系统的推广简化了操作流程、缩短了预备时间,减少了器械更换与交叉感染管理的环节,但也对术者的手感判断、根尖通畅度维持与滑行通道建立提出了要求^[3-5]。国内研究比较了三种机用镍钛器械根管预备的中心定位能力,结果显示不同器械在维持根管原始解剖位置方面存在差别^[7],提示在弯曲根管预备中应根据器械的中心定位性能进行选择,并重视术前对根管弯曲度与钙化程度的影像学评估^[2,7]。

上述设计优势需配合规范操作方能体现:术前影像学评估有助于依据根管弯曲度与钙化程度选择器械系统,预备中维持根尖通畅与充分冲洗、避免器械在干燥或碎屑堆积状态下持续受力,是降低并发症的基础要求^[3-7]。狭窄钙化的根管不宜以强行扩大的方式处理,而应结合小号器械疏通与技术方案的及时调整^[3-4,7]。

从器械设计角度看,以下参数决定了其临床行为:横截面形状影响切削效率与抗折断能力,较大的核心直径可提高强度但降低柔韧性;锥度决定成形后的根管形态与冲洗空间,可变锥度设计可在同一支器械上兼顾冠部敞开与根尖成形;螺距与刃口角度影响切削效率与碎屑排出能力^[3-6]。此外,器械尖端的处理方式(是否具有切削能力)关系到其通过狭窄区域时的安全性,非切削尖端设计可能有助于引导器械沿既有通道前进、降低根尖穿孔与偏移的发生风险,但临床结果仍取决于根管弯曲度、器械使用方式等因素^[6-7]。理解这些参数的含义,有助于术者依据根管的具体特点选择器械,而不是依据品牌或使用习惯作出决定^[6]。

2.2 影响器械性能与折断风险的因素

除合金与运动方式外,临床使用环境同样改变器械行为,相关研究主要围绕以下几个方面展开。其一,次氯酸钠冲洗液可在器械表面引发腐蚀,是体外研究中反复被验证的影响因素:一项系统评价与Meta分析汇总了体外研究,评价次氯酸钠对镍钛器械循环疲劳抗力的影响^[8]。该研究同时提示,体外实验条件在浸泡时间、溶液温度、是否为动态浸泡等方面差异较大,与临床实际存在差距,因此体外结论向临床外推需谨慎^[8]。其二,体温环境下的测试更接近真实临床状态,这也是近年疲劳实验条件改进的方向之一^[5,8]。其三,使用次数与根管弯曲程度是器械疲劳研究中的核心变量,单支铰往复系统的

推广虽简化了流程,但也对术者的手感判断、根尖通畅度维持与滑行通道建立提出了更高要求^[3-5,7]。

从证据角度看,影响器械安全的因素可归纳为器械相关与非器械相关两类。器械相关因素包括合金与热处理工艺、器械横截面与锥度设计、运动参数(转速、扭矩及运动方式)以及冲洗液暴露;非器械相关因素则包括根管弯曲度、钙化程度、术者经验与操作规范^[3-8]。需要强调的是,这些变量的作用并非孤立:同一器械在不同根管解剖与操作条件下表现可能差异显著,因此研究结论的外推应结合具体情境^[6-8]。

在器械复用与再处理方面,重复使用及再处理对不同热处理器械性能的影响可能存在差异,其具体表现取决于器械材质、清洗灭菌流程与损伤累积情况,相关操作应遵循制造商说明和当地感染控制规范^[3,8]。对弯曲程度较大、钙化严重或其他折断风险较高的病例,应更加审慎地评估器械状态和使用策略;器械的报废与检查也应建立在产品说明、感染控制要求及器械损伤风险管理的基础上,而非单一固定的使用次数标准^[3,8]。术者经验水平同样是影响器械安全性的重要非器械因素,规范化的技能训练与循序渐进的病例进阶有助于降低并发症^[3-5,8]。

2.3 预备策略与工作长度的确定

器械性能的改进只有在合理的预备策略下才能转化为临床获益。就预备顺序而言,冠向下技术强调先完成根管冠部与中段的成形,再向根尖方向推进,其优势在于提前去除冠部阻力、减少器械尖端所受的扭转载荷,并为冲洗液提供更充分的进入通道;与之相对的逐步深入技术在特定病例中仍有其适用性,但两种预备策略的适用性均取决于根管形态、器械设计及操作方案,不宜简单将器械折断风险归因于预备顺序^[3-6]。就根尖区预备大小而言,需要在清创效果与牙根抗折之间权衡:预备不足难以去除感染牙本质,过度预备则削弱牙根结构并增加穿孔与根裂风险,因此应以术前根尖周状态与根管初始直径为参考确定终末预备尺寸,而非追求统一的锥度标准^[6-7]。

工作长度的确定是另一项基础环节。电子根尖定位仪通过测量根尖孔处的电阻抗特征确定工作长度,可提高工作长度测定的客观性,通常应与临床检查和必要的影像学信息结合使用,尤其适用于根尖孔位置变异或解剖结构重叠的病例;但在根尖孔宽大、根管内充满强电解质冲洗液或存在金属修复体时,其读数可能偏移,因此临床上宜将电子测量与影像学检查相

互印证^[2]。此外,工作长度在预备过程中可能因根管拉直效应而发生细微改变,故在完成根尖区预备后应重新确认,以避免最终充填长度出现偏差^[2,6]。

3 根管冲洗、消毒与封药

3.1 冲洗液与活化技术

仅依靠机械准备无法彻底清理感染的根管系统,根管冲洗承担了组织溶解、抗菌、润滑与去除玷污层四项功能。次氯酸钠凭借其溶解有机组织与广谱抗菌能力仍是核心冲洗液,其效果受浓度、温度、用量、接触时间与新鲜程度共同影响;螯合剂用于去除玷污层中的无机成分,通常在终末阶段配合超声活化使用;而常规注射器冲洗由于冲洗液置换范围受限于针头前端,其在根尖三分之一的效果有限,这也是冲洗活化技术成为研究热点的直接原因^[9]。

在活化技术方面,体外研究提供了不同技术间的横向对比。一项体外研究评价了被动超声活化乙二胺四乙酸溶液后联合不同浓度次氯酸钠冲洗对玷污层的清除效果,结果显示活化与冲洗方案之间存在协同作用^[10];另一项体外研究比较了 Er,Cr:YSGG 激光、二极管激光、被动超声冲洗与常规注射器冲洗在玷污层清除方面的效能,并考察了冲洗液化学性质对结果的影响;但该研究主要比较玷污层清除效果,尚不足以据此认定冲洗液化学性质的作用整体优于活化方式的选择,两者作用机制不同,且体外的玷污层清除结果不能直接等同于临床抗菌效果或治疗成功率^[11]。

除超声与激光外,负压冲洗、声波活化及光诱导光声流等技术亦被用于提升冲洗液在根尖区的置换效率,其共同目标是使冲洗液与整个根管壁表面尤其是根尖部分充分接触^[12]。从机制上看,超声通过空化效应与声流作用扰动液体,激光通过产生气泡的膨胀与塌缩形成冲击与二次空化,负压系统则通过在根尖区形成持续负压实现冲洗液的连续更新。临床证据层面的综述指出,声学与超声活化在细菌减少方面均优于常规注射器冲洗,但两者之间的抗菌效能差异尚无一致结论^[12]。这意味着在临床选择活化方式时,现有证据在体外研究、微生物学指标与临床结局之间存在明显差距,具体方式可根据根管解剖、设备条件和操作者经验选择,而不宜仅凭机制推断某种活化方式必然优于其他方式;良好的针头设计(如侧方开口、在保证回流通路的前提下合理调整插入深度)往往是任何活化方式发挥作用的前提^[9,12]。

在追求冲洗效果的同时,安全性是不容忽视的另一面。次氯酸钠具有较强的组织刺激性,一旦超出根尖孔进入根尖周组织可引起剧烈疼痛、肿胀甚至组织坏死,因此应在橡皮障隔离下使用侧方开口的冲洗针头、避免针头卡紧于根管内形成压力积聚,并保证根尖区具备通畅的回流通路^[9,12]。同时不宜使用过大压力推注,更换冲洗液时还需注意不同溶液间的相互作用与配伍,以减少化学性损伤及由此产生的术后反应^[9-12]。

玷污层的处理同样存在权衡。玷污层一方面构成细菌及其毒素的储存库并妨碍封闭剂与牙本质贴合,另一方面在一定程度上可封闭牙本质小管、缓冲细菌产物向根尖周的扩散。因此,终末螯合冲洗的目标应是去除表层玷污层以改善充填密封性,而非无限延长作用时间或盲目增大剂量;过度脱矿会降低牙本质微硬度,并可能损害牙根的力学性能^[9-12]。这也解释了为什么在体外研究中,仅以“玷污层完全去除”作为唯一指标并不能代表临床意义上的清创质量^[10-11]。

在冲洗液的物理参数方面,温度与浓度的作用常被低估。适当加热次氯酸钠可增强其组织溶解与抗菌能力,但同时也会加快其分解并增加对牙周组织的刺激性,因此温度的设定需要在效力与安全之间取得平衡;浓度的提高虽可增强溶解能力,但细胞毒性亦同步上升,且高浓度溶液在操作中一旦发生外溢,其组织损伤更为严重^[9,12]。在超声冲洗活化的参数设置上,功率与活化时间需与器械规格及工作尖类型相匹配;需注意区分“超声冲洗活化”与“超声器械切削”两种不同情形,前者以扰动冲洗液为主,后者涉及牙本质切削,相关结论应分别引用对应研究,在无直接证据时不宜对器械尖端断裂作出确定性判断^[10-12]。目前体外研究对上述参数的设定并不统一,这也是不同研究间结果难以横向比较的重要原因之一^[10-12]。

从不同活化方式的适用情形看,超声活化对设备要求相对较低、可与常规冲洗针头配合;声波活化操作简便但空化效应相对温和;负压系统通过持续负压吸引在根尖区形成冲洗液的连续更新,理论上可降低根尖外推出的风险,但需专用设备与配套针头^[9,12];激光活化则依赖特定波长与参数设置,其对牙周组织的产热风险需要加以控制^[11]。现有文献多基于体外模型或微生物学指标,尚缺乏直接比较不同活化方式临床成功率的高质量研究,因此活化

技术的选择应基于病例特点、解剖条件与设备可及性，并认识到现有证据尚不足以将体外表现简单等同于更高的临床成功率^[9-12]。

3.2 根管封药

对于感染较重或需分次完成的病例，根管封药是两次就诊之间控制残留感染的关键环节。氢氧化钙因其高碱性环境、较好的生物相容性与促进硬组织修复的作用被广泛使用，但对部分耐药菌种作用有限且长期留置可能影响牙本质力学性能；氯己定具较强抗菌活性与一定的吸附缓释特性，但缺乏组织溶解能力；抗生素制剂虽抗菌谱广，却存在过敏风险、耐药性顾虑以及引起牙冠变色的可能^[13]。因此，以抗菌肽、纳米颗粒为代表的新型抗菌药物被提出作为根管药物消毒的潜在发展方向，其核心思路是在保持抗菌效力的同时降低对宿主组织的毒性并减少耐药风险^[13]。总体来看，封药研究的难点在于寻找“抗菌效力—组织安全性—对后续充填的影响”三者之间的平衡点，现有新型制剂多为体外证据，临床转化仍需规范试验支持^[13]。

关于是否常规使用封药，目前的观念正趋于个体化：对于单次就诊即可完成充分清理与严密充填的病例，一次法根管治疗可减少就诊次数、降低两次就诊之间的再感染机会；而对于感染负荷较重、渗液难以控制或解剖复杂难以一次完成的病例，分次治疗并规范封药仍是更为稳妥的选择^[13]。因此，封药决策的核心不在于“必须”或“不必”，而在于判断余留感染风险与单次就诊所能达成的清理程度之间存在多大差距^[9,13]。

在操作层面，封药的疗效取决于药物与根管壁的充分接触以及冠方封闭的可靠性。若药物未能输送至根管全长或在根尖区形成空隙，其作用范围将大打折扣；若暂时封闭材料不严密或厚度不足，则口腔细菌可在两次就诊之间再次进入根管系统，使前期的清创努力付诸东流^[13]。以氢氧化钙为例，其输送方式应根据病例与产品要求选择，规范的放置应确保药物到达目标区域并建立可靠的冠方暂封；影像学检查应根据临床指征决定，不宜仅为确认封药密度而常规增加辐射暴露^[13]。取出时则需结合冲洗与器械清理，避免残留药物影响后续封闭剂的渗透与固化，进而损害充填的长期密封性^[13]。

3.3 冲洗方案的组合与机械准备

在冲洗方案的组织上，顺序与配伍往往比单一

药物的选择更能决定最终效果。常规做法是：预备过程中以次氯酸钠持续冲洗并频繁更换，终末以整合剂去除玷污层，必要时再以次氯酸钠或生理盐水完成最后冲洗^[9-10]。需要注意的是，次氯酸钠与氯己定直接接触可能产生沉淀，序贯使用时应避免两者直接混合，并依据相关证据采用适当的中间冲洗方案，不宜将某一中间冲洗步骤理解为能够完全消除所有化学相互作用^[9]。在冲洗液的输送方面，针头直径、开口形式与插入深度共同决定置换效率与安全性：侧方开口针头可降低根尖外推出的风险，冲洗针头应在不发生卡紧的前提下进入根管，并根据根管解剖、针头设计及根尖回流条件调整插入深度，避免过度加压及冲洗液根尖外溢^[9,12]。

在机械准备层面，充分的冠部敞开与根管通畅是各类冲洗技术发挥作用的前提：若冠部未充分敞开，冲洗针头难以到达根尖区；若根尖区碎屑堵塞，活化技术亦无从发挥作用，因此预备中应分次回锉维持通畅并配合足量冲洗^[9,12]。

4 根管充填技术与材料

4.1 生物陶瓷封闭剂与单尖充填

传统根管充填以牙胶为主体、封闭剂为辅助，追求以尽可能多的牙胶充填根管腔隙；水硬性硅酸钙类（生物陶瓷）封闭剂的应用推动了以封闭剂为主、牙胶为辅的单尖充填理念的转变。这一转变带来的直接优势是操作简便、节省椅旁时间，并降低了对根管预备锥度与宽度的严格要求；但能否保留更多牙体组织取决于具体预备方案与根管形态，并非单尖充填本身必然带来的结果，且其临床效果仍依赖充分的化学—机械清创、适当的根管预备形态及可靠的冠方封闭^[14]。

在充填体的微观质量方面，体外研究评价了热流动型生物陶瓷封闭剂在连续波与垂直加压等热充填技术以及单尖充填技术下的牙本质小管内渗透情况^[15]；另有研究采用显微 CT 比较单尖充填与连续波热牙胶加压充填使用生物陶瓷封闭剂时的充填体内部空隙体积，为不同技术致密性提供了三维评价依据^[16]。两项研究共同提示：单尖充填并不必然带来更多空隙，其充填质量很大程度上取决于封闭剂的导入方式、根管预备形态与牙胶尖匹配程度^[15-16]。

单尖充填的技术要点包括：选择与根管预备锥度相匹配的主牙胶尖并确认到达工作长度时有紧缩感；采用直接注入或螺旋充填器将封闭剂导入距工

作长度 1~2 mm 处；插入主牙胶尖时缓慢上下提拉以使封闭剂挤入不规则区；必要时追加副尖而无需侧方加压^[14]。从适应证看，在根管形态与匹配牙胶尖适宜的情况下，单尖充填可作为一种操作相对简便的充填选择；但弯曲细小根管是否适合某种充填方式仍需结合预备形态、牙胶尖匹配程度及材料特性判断，不能仅依据根管是否弯曲作出选择。卵圆形根管中单尖充填易在牙胶尖两侧形成较多缝隙，需配合多根牙胶尖或热牙胶垂直加压^[14]。此外，单尖充填并不意味着根管预备可以不足，生物陶瓷封闭剂的使用也不能替代对根管内空隙、残留感染物的控制与封闭质量的关注^[14,16]。

在临床结局方面，一项系统评价与 Meta 分析评价了成熟恒牙初次根管治疗与再治疗中采用单尖充填技术联合硅酸钙类封闭剂的临床与影像学失败率，为这一技术的实际应用效果提供了汇总证据^[17]。需要注意的是，生物陶瓷封闭剂固化后难以从根管内去除，可能增加再治疗与桩道预备的难度，其远期疗效仍待更多长期随访研究验证^[14,17]。

此外，充填完成后的冠部处理同样影响治疗结局。充填后应及时建立有效的临时或永久冠部封闭，避免唾液与细菌沿充填材料与修复体之间的界面渗入根管系统；对于后牙尤其是承担较大咬合负荷者，应在适当时机完成全冠或高嵌体修复，以降低牙折风险^[14]。这一环节虽不属于根管充填技术本身，却往往是决定患牙远期存留的关键变量^[14,17]。

从理化特性看，生物陶瓷封闭剂的固化依赖环境中的水分，这一亲水特性使其在轻度潮湿的根管内仍能完成固化，但过度干燥会延缓固化过程；其固化后呈碱性并具有一定体积稳定性，理论上有利于长期封闭，而较低的溶解性则保证了充填的持久性^[14]。需要警惕的是，这些优点在再治疗情境下会转化为缺点：固化后的材料难以用常规溶剂溶解，机械取出耗时且可能损伤根管壁，因此对于需要预留桩道的患牙，应谨慎选择以封闭剂为主的单尖充填，或在病历中明确记录所用材料的种类，以便后续处理时提前准备器械与方案^[14,17]。

4.2 充填质量与预后

充填长度与致密程度直接影响预后。综述研究显示，恰填的根管治疗成功率明显高于超填与欠填，超填可导致异物反应并延缓根尖周组织愈合，其影响因治疗前牙髓与根尖周状态而异：对已有根尖周

病变者，根管充填质量是影响预后的重要因素之一，但评价预后还需综合考虑清创质量、治疗前根尖周状态、冠方修复及随访情况，不能将影像学上的致密或恰填直接等同于治疗成功^[1]。充填质量还与邻近组织结构（如下颌管、上颌窦）的反应及术后疼痛反应相关，临床上需通过术前评估根尖解剖位置、严格控制工作长度以及术中试尖与影像确认加以预防和处理^[1]。影像学评估方面，指南建议在根管治疗术前以根尖片初步判断根管解剖形态，形态异常时使用锥形束 CT；术中用于确认复杂根管形态；术后用于评估充填质量并在复查时以相同或近似条件比较，以判断根尖周病变愈合情况^[2]。

疗效评价的时间窗亦需合理设定。根尖周骨组织的影像学修复通常需要数月甚至更长时间，过早评价易将正在愈合的病例误判为失败，因此多数研究建议以术后至少一年作为初步评价时点，并结合临床症状与影像学表现双重判定^[1-2]。在以锥形束 CT 随访时，应特别注意伪影干扰以及不同时点扫描条件的可比性，避免因设备参数差异造成假性变化，导致对疗效的错误解读^[2]。

除技术因素外，宿主因素同样参与预后的形成。术前是否存在根尖周病变及其范围、牙周组织状况、患牙的解剖条件以及患者的全身状况，都会改变愈合的概率与速度。在这一意义上，根管治疗的成功并非单纯由充填影像的外观决定，而是“感染负荷—清创程度—宿主修复能力”三者平衡的结果^[1-2]；这也提示在术前沟通时应避免以充填影像作为唯一的预后承诺依据^[1-2]。

在修复时机方面，根管治疗后的修复应根据患牙剩余牙体组织、牙位、咬合负荷及修复方案综合决定。治疗后应尽早建立可靠的冠方封闭，并在适当时机完成最终修复；对于需要进一步评估或存在特殊临床问题（如剩余牙体组织较少、存在裂纹风险或修复体类型待定）的病例，应结合具体情况制定修复与随访计划，不宜将“观察”与“即刻修复”视为适用于所有病例的固定取向^[1-2]。

4.3 主要充填技术的比较与选择

除单尖充填外，临床上仍在使用的充填技术各有特点。冷侧方加压操作简便、可控性较好且便于再治疗时取出，但对不规则区域的适应性较差、易在牙胶尖之间形成空隙，且侧方加压过程可能产生楔力，理论上存在增加根裂的风险^[14,16]。热牙胶垂直

加压通过加热软化牙胶使其流动并加压充填,对峡区、侧支根管等不规则区域适应性更好,但设备依赖程度高,降温收缩可能产生微隙,且对操作者的温度与时间控制要求较高^[14,16]。连续波技术将垂直加压分为下行与回填两个阶段,简化了操作流程,是目前应用较广的热充填方式^[16]。载体充填则以塑料载体携牙胶进入根管,操作快速、充填均匀性依赖根管预备形态,且在再治疗时相对易于取出^[14]。

在比较单尖充填与上述技术时,需要区分“充填体致密性”与“临床疗效”两个层面:体外研究多以微渗漏、空隙体积与牙本质小管渗透深度为指标,结果因评价方法与根管模型不同而异^[15-16];而临床研究则以症状与影像学愈合为结局,现有汇总证据尚未显示单尖充填在失败率上劣于传统技术^[17]。因此,技术选择更应基于根管形态、术者熟练程度与设备条件综合判断,而非追求某一技术的绝对优势^[14,17]。对卵圆形根管、峡区发达的后牙以及需要预留桩道的病例,更应结合上述因素审慎决策^[14,17]。

5 数字化与显微技术在复杂病例中的应用

根管治疗过程中可能发生器械分离、根管壁穿孔、台阶形成、偏移与根尖堵塞等并发症。这些并发症的共同特点是改变了根管原有的解剖通道,使后续的清理与充填难以按计划进行,且多数发生在钙化、弯曲或解剖变异的根管中^[18]。手术显微镜结合超声器械的价值在于将上述处理由“盲探”转为可视操作,从而在取出分离器械、修整穿孔与建立旁路等场景中显著提升可控性^[18]。

5.1 器械分离的处理

器械分离是根管治疗中值得关注的并发症之一,其处理涉及发生原因分析、处理决策、临床处置流程与取出技术要点^[18]。从发生原因看,除器械材料本身的疲劳累积外,未建立直线通路、在未充分扩大根管中上部时强行深入、使用次数过多未及时更换、以及术者操作经验不足均是常见诱因^[18]。在处理决策上,需要根据分离器械的位置(根管中上段还是根尖段)、是否位于弯曲部位之后、患牙是否有根尖周病变、剩余解剖条件是否允许建立旁路等因素综合判断:并非所有分离器械都需要取出,部分病例通过建立旁路并完成严密充填同样可以获得可接受的治疗结局^[18]。在技术层面,超声器械配合专用套管、在显微镜下逐步去除分离器械周围牙本质、并由冠方逐步建立空隙,是较为成熟的取出路径^[18]。

取出分离器械并不必然提高治疗成功率,操作过程还可能造成过度去除牙本质、穿孔或牙根结构削弱,因此该领域的主要目标应是在充分的风险—获益评估前提下规范处理决策,而非单纯追求取出^[18]。

沟通与记录环节同样重要。器械分离属于诊疗过程中的已知风险,术前宜将其作为知情同意的内容之一向患者说明,并在病历中记录器械分离发生的时间、分离器械的种类、长度与所在根管部位;一旦发生,应及时告知并记录处理方案与后续随访安排,这既是医疗安全的需要,也有助于在出现争议时还原诊疗过程^[18]。此外,取出操作通常耗时较长并可能磨除较多牙本质,削弱牙根的抗折能力,因此术前应对获益与风险充分权衡后再作决定,而不宜将“取出”作为唯一决策选项^[18]。

从技术细节看,既有研究提示,器械位置及根管解剖条件是影响取出难度的重要因素:位于根管直线段且在显微镜下可视的器械通常取出条件较好,而位于弯曲之后或根尖三分之一者难度明显上升,且取出过程中磨除的牙本质越多,牙根的抗折能力下降越明显,具体成功率与系统性证据需结合所引文献判断^[18]。因此,术者应在显微评估之后再决定方案,并在操作中尽量采用可控的、分步骤的方式,避免因急于取出而造成穿孔或根管壁的过度切削;对于取出困难或风险过高的病例,建立旁路并完成严密充填后定期随访,同样是循证支持的合理选择^[18]。

5.2 钙化根管与导板牙髓治疗

牙髓钙化与根管闭塞可由增龄性改变、龋病与充填史、牙外伤、正畸治疗等多种原因引起,其临床难点不在于寻找根管口本身,而在于如何在软硬组织参照消失的情况下避免过度磨除牙体组织造成穿孔。数字化导板技术为此提供了解决方案:基于锥形束CT与口内光学扫描数据,在软件中完成配准后虚拟规划到达钙化根管口的通路,再借助三维打印导板实现静态导航下的精准定位^[19]。国内研究报道,数字化导板引导技术可在疏通根管内钙化组织的同时尽可能保留健康牙体组织,在前牙钙化根管的微创治疗中取得了可接受的偏差范围与组织保存效果^[20]。有研究比较了不同计算机导航系统辅助钙化根管开髓的精度,为系统选择提供了参考^[21];综述研究则系统梳理了数字化导板在牙髓治疗中的工作流程及其在非手术牙髓治疗与根尖手术中的应用现状^[22];此外,锥形束CT导航联合显微超声技术

亦被用于牙髓钙化患牙的临床处理^[23]。

同时,静态导航存在明确的适应证与技术局限:导板制作与配准需要时间,对开口受限、后牙区操作空间不足、余留牙支持不足导致导板就位稳定性差以及已行修复体密合度差的病例适用性下降;导板及套管本身占据膜龈空间,可能影响冷却效果与视野,且套管与车针之间存在间隙带来的累计偏差无法完全消除^[24]。因此,在导板设计与临床应用时应通过充分的术前评估、合理的通路设计与就位验证来控制误差,并结合病例特点在静态导航、动态导航与常规显微治疗之间作出选择^[21,24]。

动态导航是近年受到关注的另一条技术路线。其通过实时反馈术前规划的位置信息引导术者操作,无需制作实体导板,但仍需完成影像配准、系统校准及术中定位,在处理后牙区或开口受限病例时具备一定灵活性,并可在术中根据情况调整通路方向;但同时也存在设备成本高、配准流程较长与学习曲线陡峭等问题,其在钙化根管处理中的精度与成本效益仍需与静态导板开展更多直接比较^[21-22,24]。因此,现阶段更为务实的做法是依据病例解剖条件、设备可及性与术者经验选择导航方式,而非预设某种技术具有普遍优势^[22,24]。

从制作流程看,静态导板的精度受多个环节的误差累积影响:锥形束 CT 扫描的分辨率与伪影水平、口内扫描或模型扫描的精度、两种数据的配准误差、虚拟规划中通路方向的设定、导板打印材料的收缩以及套筒与车针之间的配合间隙,任一环节控制不当都会被放大为最终的偏差^[19,22]。因此,临床上应采用统一的配准标记或稳定的咬合记录以提高配准可靠性,在虚拟规划阶段预留安全边界以避免损伤邻近结构,并在导板就位后通过就位指示窗或影像学检查确认其稳定性^[19-20,24]。此外,导板设计时还应考虑车针的工作长度与冷却水通路,避免因冷却不足导致骨内产热^[24]。

对于不适合或不具备导板条件的病例,传统的显微超声逐步探查仍然是基础方法,其要点在于充分放大视野、使用尖端纤细的超声工作尖、以及在每次去除少量牙本质后重新确认方向;锥形束 CT 导航与显微超声技术的联合应用,可在这一过程中提供实时的解剖参照^[23]。若经冠方处理确无可能,则应考虑显微根尖手术等外科手段,而非无限延长冠方探查的时间,因为后者的牙体损失与穿孔风险会

随时间累积^[19,23-24]。

在病例选择上,导板治疗更适用于以下情形:锥形束 CT 能够清晰显示由根管口至目标段的钙化通路、患牙具备足够的牙体组织以稳定支持导板、且开口度允许导板与车针顺利就位^[19,22]。反之,若通路在影像上无法辨认、钙化段过长或位于弯曲之后、患牙为重度松动的牙周病患牙,则导板带来的获益有限;此时应综合通路可规划性、剩余牙体组织、患牙可修复性及是否存在根尖周病变决定是否改行常规显微治疗或根尖手术,而非将根尖手术作为所有导板治疗失败病例的直接替代方案^[19,24]。术前还应向患者说明导板制作所需的时间与费用、可能存在的偏差风险以及备选方案,使其在充分知情的前提下参与决策;这一过程本身也是减少医患争议的重要环节^[22,24]。

5.3 显微根尖手术

显微根尖手术是处理根管治疗或再治疗失败、根管解剖严重变异(如根尖区峡部、重度弯曲、根管堵塞)以及需探查明确诊断病例的有效手段。手术显微镜与超声倒预备装置的应用使手术由“经验性刮除”转向“可视化精确处理”,倒预备的深度与同轴度、根尖切除的角度与范围、上颌窦与下颌神经管等解剖结构的规避均可获得更可靠的控制。国内学者提出显微根尖手术的全周期管理理念,涵盖术前全身与口腔术区评估、术中激光技术、骨窗技术与动静态导航的应用,以及术后基于病史、临床表现与影像学标准的疗效评定与近远期随访^[25]。

在疗效与影响因素方面,一项纳入 302 例病例的回顾性研究显示,病损类型与牙位对显微根尖手术疗效有显著影响:前牙疗效优于后牙,上颌牙优于下颌牙,下颌磨牙成功率最低,这与手术入路的解剖可达性、颊侧骨板厚度以及峡部等解剖复杂程度密切相关;而根管充填质量(充填长度与致密度)及是否为根尖再手术在其分析中未显示统计学显著性^[26]。受研究设计及样本特征限制,这些结果仍需在不同人群中进一步验证,不宜据此得出手术因素总体上超过根管内因素的结论,术前评估仍应同时关注病变范围、牙位解剖条件、根管治疗质量与邻近重要结构^[25-26]。此外,该研究还评估了 Kim 和 Kratchman 显微根尖手术病例分类对疗效判断的价值,为术前病例分类与预后沟通提供了工具^[26]。

在术后随访方面,应以症状、临床检查与影像

学结果联合判定,并按近期(术后数周)、中期(半年至一年)与远期(一年以上)设定复查节点,以便及时发现复发并评价愈合的稳定性^[25-26]。在适应证把握上,显微根尖手术并非适用于所有失败的病例:冠根比例严重失调、牙周支持组织严重丧失、存在根纵裂以及全身状况不能耐受手术者通常不宜采用;而对于经冠方无法拆除的根尖堵塞、需病理确诊的根尖病变以及根管解剖难以经冠方处理的病例,可考虑显微根尖手术,具体方案应结合患牙可修复性、病变性质及患者意愿决定,并仍需权衡观察、非手术再治疗、其他保留方案及拔牙等选择^[25-26]。

在设备与团队方面,显微根尖手术对手术显微镜、超声装置与专用器械的依赖程度较高,其学习曲线较陡峭,初学者宜从解剖位置表浅、视野良好的前牙病例开始,逐步过渡至后牙与上颌磨牙^[25]。团队合作同样影响手术质量:助手负责牵拉瓣、吸引与冲洗以保持视野清晰,术者则专注于根尖区处理,两者的配合熟练度直接影响手术时长与组织创伤程度^[25]。在术前准备方面,当常规影像不能充分显示病变范围或邻近解剖结构、且检查结果可能影响治疗决策时,可考虑锥形束 CT 检查以明确病变范围、与邻近解剖结构的关系以及骨缺损形态;必要时请相关专科会诊,并对患者说明手术的预期获益与可能的并发症^[2,25]。

5.4 显微根尖手术操作要点

在手术操作层面,瓣的设计应保证血供与术区显露并避开美学敏感区域^[25];骨开窗应在术前影像引导下确定,兼顾病变显露与颊侧骨板保留,并规避上颌窦、下颌神经管等重要结构^[25]。根尖切除常推荐切除约 3 mm 并尽量使切面接近垂直于牙体长轴,但这一范围并非所有病例的固定要求,具体切除范围需结合根尖解剖、病变范围及手术条件确定,目的在于去除根尖分歧与峡部等感染持续存在的区域^[25-26]。超声倒预备可在与根管长轴一致的方向形成窝洞,随后以生物活性材料倒充填,材料的封闭性与操作性决定根尖封闭质量^[25-26]。

术中止血与术区清洁对疗效同样关键,良好的止血为倒充填创造有利条件,但不同生物活性材料是否要求绝对干燥应按其特性与产品说明处理;骨腔内肉芽组织应彻底清除以减少术后感染^[25]。随访除症状与影像学外,还应关注牙周附着与牙龈退缩,尤其前牙美学区软组织结局亦是疗效组成部分^[25-26]。

6 结语

根管治疗技术的发展呈现三条主线:其一,器械材料与运动方式的改进提升了预备的安全性及效率,但次氯酸钠暴露、测试温度等因素对疲劳抗力的影响提示器械寿命管理应更精细化^[3,6-8];其二,冲洗活化与新型封药在清除感染方面取得进展,但声学与超声活化的相对优势尚无定论,新型抗菌药物的临床转化仍处早期^[11-13];其三,生物陶瓷封闭剂与单尖充填改变了以牙胶为主的传统充填理念,数字化导板与显微技术拓展了钙化根管与根尖手术的处理边界^[14,19-20,25]。今后研究可重点关注:一是建立器械分离预防与处理的规范化流程,并评价不同处理决策对患牙远期存留的影响;二是开展生物陶瓷封闭剂单尖充填的长期疗效随访,针对“固化后难以取出”这一问题形成再治疗与桩道预备的应对策略;三是推进导板牙髓治疗与动态导航的精度比较、误差控制研究与成本效益评价;四是以锥形束 CT 等三维影像为基础,统一根管治疗疗效评价标准,使不同研究间的成功率具有可比性。

还有两个方向值得关注。其一是技术评价的维度需要从“能否做到”转向“是否值得推广”,即在获得技术精度的同时评价其学习成本、设备投入与患者实际获益,这对于导板治疗与动态导航等新兴技术尤为重要^[22,24]。其二是证据体系的完善需要更多以患者为中心的结局指标,除影像学愈合与患牙存留外,还应纳入术后疼痛程度、咀嚼功能恢复、就诊次数与费用负担等指标,以便在不同的治疗方案之间作出更符合患者利益的决策^[1-2]。只有在技术指标与患者结局之间建立联系,根管治疗技术的进步才能真正转化为可感知的临床价值^[1-2,17]。

参考文献

- [1] 李宝玉, 龚启梅. 根管超填临床预后的研究进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2021, 56(2): 210-215.
- [2] 中华口腔医学会牙体牙髓病学专业委员会, 边专, 孟柳燕. 牙体牙髓病诊疗中口腔放射学的应用指南[J]. 中华口腔医学杂志, 2021, 56(4): 311-317.
- [3] Duque J A, Bramante C M, Duarte M A H, et al. Cyclic fatigue resistance of nickel-titanium reciprocating instruments after simulated clinical use[J]. J Endod, 2020, 46(11): 1771-1775.

- [4] Sobral T K M, Piasecki L, Tomazinho F S F, et al. Dynamic cyclic fatigue resistance of heat-treated nickel titanium instruments in reciprocating motion[J]. *Eur Endod J*, 2023, 8(3): 201-206.
- [5] Weissheimer T, Duarte M A H, Só M V R, et al. Evaluation of cyclic and torsional fatigue resistance of several heat-treated reciprocating nickel-titanium instruments[J]. *Aust Endod J*, 2023, 49(3): 524-529.
- [6] Silva E J N L, Martins J N R, Ajuz N C, et al. Design, metallurgy, mechanical properties, and shaping ability of 3 heat-treated reciprocating systems: a multimethod investigation[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(5): 2427-2436.
- [7] 王天祺, 李家有, 许家宁, 等. 三种机用镍钛器械根管预备中心定位能力的体外研究[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2022, 15(3): 304-308.
- [8] Dos Reis-Prado A H, Abreu L G, de Arantes L C, et al. Influence of sodium hypochlorite on cyclic fatigue resistance of nickel-titanium instruments: a systematic review and meta-analysis of in vitro studies[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(11): 6291-6319.
- [9] Khoury R D, de Carvalho L S, do Nascimento M F R, et al. Endodontic irrigants from a comprehensive perspective[J]. *World J Clin Cases*, 2024, 12(21): 4460-4468.
- [10] Orlowski N B, Schimdt T F, Teixeira C D S, et al. Smear layer removal using passive ultrasonic irrigation and different concentrations of sodium hypochlorite[J]. *J Endod*, 2020, 46(11): 1738-1744.
- [11] Abaza M M, Harhash T A H, Zaky A A. Comparative analysis of laser and ultrasonic irrigation techniques for smear layer removal in endodontics[J]. *Lasers Med Sci*, 2025, 40(1): 522.
- [12] Cheung A W T, Lee A H C, Cheung G S P. Clinical efficacy of activated irrigation in endodontics: a focused review[J]. *Restor Dent Endod*, 2021, 46(1): e10.
- [13] 刘红艳, 韦曦, 凌均荣. 根管封药的应用现状及研究进展[J]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2023, 17(2): 69-74.
- [14] Cardinali F, Camilleri J. A critical review of the material properties guiding the clinician's choice of root canal sealers[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(8): 4147-4155.
- [15] Casino-Alegre A, Aranda-Verdú S, Zarzosa-López J I, et al. Intratubular penetration ability in the canal perimeter using HiFlow bioceramic sealer with warm obturation techniques and single cone[J]. *J Clin Exp Dent*, 2022, 14(8): e639-e645.
- [16] Alkahtany S M, AlHussain A A, AlMthen H A, et al. Obturation quality of bioceramic sealers with different obturation techniques: a micro-CT evaluation[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 31146.
- [17] Sabeti M A, Karimpourtalebi N, Shahravan A, et al. Clinical and radiographic failure of nonsurgical endodontic treatment and retreatment using single-cone technique with calcium silicate-based sealers: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Endod*, 2024, 50(6): 735-746.e1.
- [18] 王祥柱. 根管治疗器械分离的临床管理[J]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2023, 17(3): 153-161.
- [19] Connert T, Weiger R, Krastl G. Present status and future directions: guided endodontics[J]. *Int Endod J*, 2022, 55(Suppl 4): 995-1002.
- [20] 高羽轩, 汪臻, 傅裕杰, 等. 数字化导板引导技术辅助微创治疗前牙钙化根管[J]. *华西口腔医学杂志*, 2022, 40(1): 111-120.
- [21] García Franco C, Riad Deglow E, Montero J, et al. Endodontic access with different computer navigation systems in calcified root canals[J]. *J Am Dent Assoc*, 2024, 155(12): 1043-1052.
- [22] 焦明阳, 周煜萃, 蒋正源, 等. 数字化导板技术在牙髓治疗领域的研究进展[J]. *国际口腔医学杂志*, 2024, 51(5): 550-557.
- [23] 王瑛瑛, 薛明. 锥形束CT导航下应用显微超声技术治疗牙髓钙化1例报告[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2021, 14(1): 126-128.
- [24] Connert T, Walter E, Benz L, et al. Guided endodontics: potential and limitations[J]. *Aust Dent J*, 2025, 70(Suppl 1): S118-S128.
- [25] 黄湘雅, 蔡艳玲, 韦曦. 显微根尖手术的全周期管理[J]. *口腔疾病防治*, 2021, 29(10): 649-655.
- [26] 陈益燕, Pradan Siras Prasad, 杨锦波. 302例显微根尖手术的回溯性研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 2021, 39(4): 458-463.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS