

# 根管治疗封闭剂的多维度剖析：从材料创新到临床实效的深度综述

蒋宇<sup>1,2</sup>, 王灿<sup>3</sup>, 于洪友<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>大连大学口腔医学院, 辽宁 大连

<sup>2</sup>重庆市渝北区中医院口腔科, 重庆

<sup>3</sup>重庆移动公司江北分公司, 重庆

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年3月31日; 发布日期: 2025年4月10日

## 摘要

根管治疗封闭剂是根管治疗成功的关键因素之一, 其性能直接影响治疗效果。本文对根管治疗封闭剂进行多维度剖析, 从传统材料特性到新型材料研发, 探讨材料创新进展, 如生物陶瓷类、纳米材料改性封闭剂等。分析不同封闭剂在临床应用中的表现, 包括对根管治疗成功率、根尖周组织愈合的影响, 以及在特殊临床情况(乳牙根管治疗、再治疗病例)下的应用效果。阐述临床操作要点、常见问题及处理方法, 指出当前研究面临的挑战, 并对未来发展趋势进行展望。研究表明, 新型根管封闭剂在材料性能上具有优势, 临床应用效果良好, 但仍需进一步深入研究。本综述为临床医生选择合适的根管封闭剂、优化根管治疗方案提供了理论依据, 也为该领域未来研究方向提供参考。

## 关键词

根管治疗, 封闭剂, 材料创新, 临床实效, 生物相容性, 抗菌性能

# Multidimensional Analysis of Root Canal Sealers: A Comprehensive Review from Material Innovation to Clinical Efficacy

Yu Jiang<sup>1,2</sup>, Can Wang<sup>3</sup>, Hongyou Yu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Dental Medicine, Dalian University, Dalian Liaoning

<sup>2</sup>Department of Stomatology, Yubei District Hospital of TCM, Chongqing

<sup>3</sup>Jiangbei Branch of Chongqing Mobile Company, Chongqing

Received: Mar. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 31<sup>st</sup>, 2025; published: Apr. 10<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 蒋宇, 王灿, 于洪友. 根管治疗封闭剂的多维度剖析: 从材料创新到临床实效的深度综述[J]. 临床医学进展, 2025, 15(4): 1137-1146. DOI: 10.12677/acm.2025.1541039

## Abstract

Root canal sealers are one of the key factors for the success of root canal treatment, and their properties directly affect the treatment outcome. This paper conducts a multi-dimensional analysis of root canal sealers. It explores the progress of material innovation, from the characteristics of traditional materials to the research and development of new materials, such as bioceramic-based sealers and sealers modified with nanomaterials. The performance of different sealers in clinical applications is analyzed, including their impact on the success rate of root canal treatment, the healing of periapical tissues, and their application effects in special clinical situations (such as primary tooth root canal treatment and retreatment cases). The key points of clinical operation, common problems and treatment methods are expounded. The challenges faced by current research are pointed out, and the future development trends are prospected. Research shows that new-type root canal sealers have advantages in material properties and good clinical application effects, but further in-depth research is still needed. This review provides a theoretical basis for clinicians to select appropriate root canal sealers and optimize root canal treatment plans, and also offers a reference for future research directions in this field.

## Keywords

Root Canal Treatment, Sealer, Material Innovation, Clinical Effectiveness, Biocompatibility, Antibacterial Property

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景与意义

牙髓病和根尖周病的主要治疗手段是根管治疗，其成功与否很大程度上取决于根管封闭的质量。根管封闭剂作为根管治疗的关键材料，不仅要填充根管壁与牙胶尖之间的微小间隙，防止细菌渗漏，还需具备良好的生物相容性、抗菌性等，以促进根尖周组织的愈合([1], [2], [3]: pp. 300-310)。随着口腔医学的快速发展，对根管封闭剂的性能要求不断提高，深入研究根管封闭剂从材料创新到临床实效的多维度关系，对提升根管治疗水平、改善患者预后具有重要意义。

### 1.2. 国内外研究现状

近年来，国内外学者在根管封闭剂领域开展了广泛研究。在材料创新方面，新型材料不断涌现，如生物陶瓷类、纳米材料改性的封闭剂等([4], pp. 361-376; [5], pp. 255-266)。临床应用研究也逐渐增多，关注不同封闭剂对根管治疗成功率、根尖周组织愈合的影响([6], pp. 583-609; [7], pp. 377-388)。然而，目前仍缺乏对根管封闭剂多维度的系统分析，尤其在材料创新与临床实际应用效果之间的关联研究有待加强。

### 1.3. 根管治疗封闭剂的作用机制

根管封闭剂的主要作用是在根管系统内形成严密的密封屏障，阻止细菌及其代谢产物进入根管，防止再感染[8]。同时，部分封闭剂可通过释放抗菌成分，如氢氧化钙类封闭剂释放的氢氧根离子，破坏细

菌细胞膜的结构和功能,抑制细菌生长([9], pp. 175-181)。此外,良好的封闭剂还能促进根尖周组织的修复和再生,例如生物陶瓷类封闭剂可诱导硬组织形成,为根尖周组织的愈合创造有利条件([10], pp. 1291-1301)。

## 2. 根管治疗封闭剂的材料创新

### 2.1. 传统根管封闭剂材料概述

#### 2.1.1. 氧化锌丁香酚类封闭剂

氧化锌丁香酚类封闭剂历史悠久,丁香酚具有一定的抗菌和安抚牙髓作用。但它存在固化时间长、体积收缩明显等缺点,可能导致微渗漏,影响根管封闭效果([11], pp. 104-117)。研究表明,其丁香酚成分还可能引起过敏反应,对根尖周组织产生刺激[12]。丁香酚具有细胞毒性,会对根尖周组织细胞的生长和代谢产生抑制作用,不利于根尖周组织愈合。该类封闭剂的溶解性相对较高,在口腔液体环境中会逐渐溶解,导致封闭效果随时间推移而降低,影响根管治疗的长期效果。目前,在临床应用中其使用频率逐渐降低,但在一些特定情况下,如对成本较为敏感的地区或某些简单病例中仍有应用。

#### 2.1.2. 氢氧化钙类封闭剂

氢氧化钙类封闭剂凭借其抗菌和促进硬组织形成的特性受到一定关注。它能提高根管内的pH值,抑制细菌生长,尤其对厌氧菌效果显著[13]。但它与根管壁的粘结强度较低,难以形成紧密的密封,且该类封闭剂固化后质地较脆,在咀嚼等机械力作用下,容易出现碎裂、脱落,影响根管封闭的完整性。其在根管内的稳定性有限,随着时间推移,氢氧化钙会逐渐被吸收,导致封闭剂体积减小,进一步削弱封闭效果。所以该类封闭剂溶解性较高,在根管内稳定性欠佳,长期使用可能导致封闭性能下降,微渗漏风险增加([7], pp. 1503-1515)。因此,常与其他材料联合使用或作为临时封药。

#### 2.1.3. 树脂类封闭剂

树脂类封闭剂以其良好的粘结性和密封性在临床中应用广泛。但部分树脂类封闭剂具有细胞毒性,可能影响根尖周组织细胞的生长和修复。未固化的环氧树脂及其单体可能具有细胞毒性。比如双酚A-缩水甘油醚(BADGE)等单体,可能会干扰细胞的代谢过程,影响细胞的活性和增殖能力。在固化过程中,如果固化不完全,残留的单体就有可能释放出来,对根尖周组织细胞产生不良影响([14], pp. 1729-1741)。而且,其聚合收缩问题也可能导致微渗漏的发生,在使用时需要严格按照操作规范,以确保封闭效果。

### 2.2. 新型根管封闭剂材料的研发进展

#### 2.2.1. 生物陶瓷类封闭剂

生物陶瓷类封闭剂,如硅酸钙类封闭剂,是近年来的研究热点。这类封闭剂具有优异的生物相容性,能诱导根尖周组织矿化,促进硬组织再生[15]。从细胞增殖角度看,良好的生物相容性可减少对细胞的毒性刺激,使得根尖周组织中的干细胞、成纤维细胞等能够正常分裂和增殖。牙髓干细胞在适宜环境下可大量扩增,为后续分化为成牙本质细胞、成骨细胞等提供充足的细胞来源。在细胞分化方面,生物相容性好的封闭剂能通过调节细胞内信号通路,引导干细胞向特定方向分化。如促进牙髓干细胞向成牙本质细胞分化,这些分化后的细胞可分泌牙本质基质,进而矿化形成修复性牙本质,实现根尖周硬组织的再生[15]。研究显示,其在接触组织液后会发生水化反应,释放钙离子和硅酸根离子,这些离子可刺激细胞增殖和分化,有利于骨组织的形成([10], pp. 1-15)。临床研究也证实,生物陶瓷类封闭剂在根尖周炎的治疗中表现出色,能有效提高根管治疗的成功率([5], pp. 255-266)。

#### 2.2.2. 纳米材料在根管封闭剂中的应用

纳米材料因其独特的尺寸效应和表面效应,为根管封闭剂的性能提升提供了新途径。纳米银具有强

大的抗菌能力,能有效杀灭多种耐药菌,添加到封闭剂中可显著增强其抗菌效果[16]。纳米羟基磷灰石与牙齿硬组织成分相似,可改善封闭剂的生物活性和机械性能,增强与根管壁的结合强度,减少微渗漏[17]。相关研究表明,含纳米材料的封闭剂在实验室测试和部分临床应用中展现出优于传统封闭剂的性能[18]。

### 2.2.3. 智能响应型根管封闭剂

智能响应型根管封闭剂是一种新型材料,能对根管内特定环境因素,如温度、pH值、细菌代谢产物等做出响应。例如,pH响应型智能封闭剂在根管内感染导致酸性环境时,可释放抗菌药物,实现精准抗菌,提高治疗效果([19], pp. 299-312)。虽然目前该类封闭剂仍处于研究阶段,但已展现出良好的应用前景,有望为根管治疗带来新的突破。

## 3. 智能响应型封闭剂: 研发方向与临床应用前景

智能响应型封闭剂是根管治疗领域的前沿研究方向,旨在通过感知根管内特定环境因素并做出响应,实现更精准、有效的治疗。以下深入探讨其研发方向和临床应用前景:

### 3.1. 研发方向

#### 3.1.1. 精准响应根管内环境因素

**pH响应型:** 识别根管内感染导致的酸性环境,释放抗菌药物或中和酸性物质。当根管受细菌感染时,细菌代谢会使局部环境变酸,pH值降低。纳米颗粒的外壳或载体材料对pH值敏感,在正常生理pH值环境下,结构稳定,药物包裹其中。一旦进入根管内的酸性感染区域,纳米颗粒结构发生改变,如外壳溶解、孔隙增大或发生其他物理化学变化。这种变化促使纳米颗粒释放预先装载的抗菌药物,直接作用于感染部位,抑制或杀灭细菌,从而控制感染。

纳米颗粒还可装载能中和酸性物质的成分,如弱碱性化合物。当在酸性环境中释放后,这些物质与酸性成分发生反应,升高局部pH值,缓解酸性环境对牙髓组织的刺激和损伤,为牙髓组织的修复和再生创造有利条件。未来需要开发对pH变化敏感的高分子材料,确保药物在特定pH下释放[20]。

**酶响应型:** 识别感染相关的特定酶(如MMPs),释放酶抑制剂或促进组织修复的药物[21]。1) 识别感染相关特定酶: 牙髓感染时,感染部位会出现一些特定的酶,如基质金属蛋白酶(MMPs)。这些酶通常由感染引发的炎症反应或细菌分泌产生。酶响应性水凝胶具备特殊的设计,能够识别这些感染相关的特定酶。水凝胶的结构中含有对特定酶敏感的化学键或功能基团,当水凝胶接触到感染部位的MMPs时,MMPs会与水凝胶上的敏感位点发生特异性相互作用。2) 释放酶抑制剂: 水凝胶中预先包裹了酶抑制剂。一旦识别到感染相关的MMPs,水凝胶的结构就会在酶的作用下发生变化。这种变化会导致水凝胶的网络结构松动,从而使包裹在其中的酶抑制剂得以释放。酶抑制剂释放后,会与MMPs结合,抑制MMPs的活性。由于MMPs在感染过程中可能会降解牙髓组织中的细胞外基质成分,导致组织损伤,抑制其活性可以减少这种损伤,有助于保护牙髓组织,为后续的组织修复创造有利条件。3) 释放促进组织修复的药物: 除了酶抑制剂,水凝胶还可以装载促进组织修复的药物。当水凝胶响应感染相关的特定酶而发生结构变化时,促进组织修复的药物也会随之释放。这些药物可以是生长因子、细胞因子等生物活性物质,它们能够刺激牙髓组织中的细胞增殖、分化和迁移,促进牙髓组织的再生和修复。生长因子可以激活牙髓干细胞,使其分化为成牙本质细胞,促进牙本质的修复和再生;细胞因子则可以调节炎症反应,减轻炎症对牙髓组织的进一步损害,同时促进组织修复过程的启动和进行。未来需要设计能被特定酶降解的材料,并确保药物释放与酶活性相关。

**氧化还原响应型:** 识别感染导致的氧化应激,释放抗氧化剂或促进组织修复的药物[22]。1) 识别感染导致的氧化应激: 在牙髓感染过程中,细菌及其代谢产物会刺激牙髓组织中的免疫细胞,使其产生大

量活性氧(ROS),如超氧阴离子、过氧化氢和羟自由基等,从而导致氧化应激状态。氧化还原响应性药物递送系统具备特殊的设计,能够感知感染部位的氧化应激变化。该系统通常含有对氧化还原状态敏感的化学键或基团,如二硫键等。在正常生理条件下,这些化学键或基团保持稳定;而在感染引发的氧化应激环境中,ROS水平升高,敏感的化学键或基团会与ROS发生反应,从而触发药物递送系统的响应。2) 释放抗氧化剂:氧化还原响应性药物递送系统预先装载了抗氧化剂。当系统识别到感染导致的氧化应激时,由于敏感化学键或基团与ROS的反应,药物递送系统的结构发生改变,例如载体材料的降解、孔隙的打开或构象的变化,从而使包裹在其中的抗氧化剂得以释放。抗氧化剂释放后,能够迅速中和感染部位过多的ROS,减轻氧化应激对牙髓组织的损伤。常见的抗氧化剂如维生素C、维生素E、谷胱甘肽等,它们可以通过提供电子或氢原子,将ROS还原为水或其他相对稳定的物质,从而保护牙髓组织中的细胞免受氧化损伤,维持细胞的正常生理功能。3) 释放促进组织修复的药物:除了抗氧化剂,氧化还原响应性药物递送系统还可以携带促进组织修复的药物。在响应感染导致的氧化应激而发生结构变化的过程中,促进组织修复的药物也会被释放出来。这些药物可以是生长因子、细胞因子等生物活性物质。生长因子如骨形态发生蛋白(BMP)、血管内皮生长因子(VEGF)等,能够刺激牙髓组织中的细胞增殖、分化和迁移,促进牙髓组织的再生和修复。BMP可以诱导牙髓干细胞向成牙本质细胞分化,促进牙本质的修复和再生;VEGF则可以促进血管生成,为牙髓组织的修复提供充足的营养和氧气。细胞因子如转化生长因子- $\beta$ (TGF- $\beta$ )等,能够调节炎症反应,减轻炎症对牙髓组织的进一步损害,同时促进细胞外基质的合成和沉积,有助于牙髓组织的修复和重建。研发重点是开发对氧化还原电位敏感的材料,确保药物在氧化应激条件下释放。

温度响应型:识别根尖周炎症导致的局部温度升高,释放抗炎药物或促进组织修复的药物。1) 识别根尖周炎症导致的局部温度升高:根尖周炎症发生时,炎症部位的代谢活动增强,免疫细胞聚集,会导致局部温度升高。温度响应型水凝胶由特殊材料制成,对温度变化敏感。这种水凝胶在正常体温下,结构稳定,能将包裹的药物固定在其中。当水凝胶到达根尖周炎症部位,遇到因炎症导致的温度升高时,其分子结构会发生变化,如聚合物链的伸展或收缩、水凝胶的溶胀或收缩等,从而感知到炎症引起的温度变化。2) 释放抗炎药物:水凝胶内部预先包裹了抗炎药物。一旦识别到炎症导致的温度升高,水凝胶的结构变化会使其孔隙增大或发生其他有利于药物释放的改变,促使抗炎药物逐渐释放出来。这些抗炎药物能够抑制炎症反应,减轻根尖周组织的红肿、疼痛等症状。非甾体抗炎药可抑制炎症介质的合成,糖皮质激素能调节免疫反应,减少炎症细胞的浸润,从而缓解炎症对根尖周组织的损伤,为组织修复创造有利环境。3) 释放促进组织修复的药物:温度响应型水凝胶还能装载促进组织修复的药物。在因温度升高而发生结构改变的过程中,促进组织修复的药物也会被释放。这类药物可以是生长因子、细胞因子等生物活性物质。生长因子能刺激细胞增殖和分化,促进根尖周组织的再生,如血管内皮生长因子可促进血管生成,为组织修复提供营养物质;细胞因子能调节细胞的功能和代谢,增强组织的修复能力,转化生长因子- $\beta$ 可促进细胞外基质的合成与沉积,帮助修复受损的根尖周组织。研发重点是开发对温度变化敏感的材料,确保药物在特定温度下释放[23]。

### 3.1.2. 控制药物释放速度

材料选择:使用可降解高分子材料(如PLGA、壳聚糖)或刺激响应型水凝胶,通过材料降解或结构变化控制药物释放。

纳米技术:利用纳米载体(如纳米颗粒、纳米纤维)包裹药物,通过载体设计调控释放速度[24]。1) 纳米载体包裹药物:纳米颗粒和纳米纤维是常见的纳米载体。纳米颗粒粒径通常在1~1000纳米,比表面积大、表面活性高,能高效包裹药物。纳米纤维具有高孔隙率和大比表面积,可负载多种药物。通过物理

吸附、化学偶联等方式将药物包裹在纳米载体中，能保护药物活性，防止其在到达作用部位前被降解或失活。如将抗菌药物包裹在纳米颗粒内，可避免其在口腔复杂环境中过早分解，确保有效成分到达根管深处发挥作用。2) 通过载体设计调控释放速度：通过调整纳米载体的组成、结构和表面性质，可精确调控药物释放速度。① 组成调控：选用不同材料制备纳米载体，会影响药物释放。如聚乳酸-羟基乙酸共聚物(PLGA)纳米颗粒，其降解速度与乳酸和羟基乙酸的比例相关，调整比例就能控制药物释放速率。增加乳酸比例，纳米颗粒降解变慢，药物释放随之变缓，实现长效释放；提高羟基乙酸比例，降解加快，药物释放加速，满足短期高剂量需求。② 结构调控：改变纳米载体的结构也能调控释放。核-壳结构纳米颗粒，药物包裹在核心，外壳可延缓药物扩散。调整壳层厚度和孔隙大小，就能控制药物释放速度。较厚的壳层和较小的孔隙会阻碍药物扩散，使释放速度减慢；薄壳层和大孔隙则加快药物释放。③ 表面性质调控：对纳米载体表面进行修饰，能改变药物释放特性。在纳米颗粒表面接枝亲水性聚合物，可增加其在水中的分散性，影响药物扩散速率。接枝聚乙二醇(PEG)，能形成水化层，减缓药物释放，同时减少纳米颗粒被免疫系统识别和清除，延长其在体内的循环时间，提高药物疗效。

微环境调控：通过改变根管内环境(如 pH、酶活性)来调节药物释放。

### 3.2. 临床应用前景

智能响应型封闭剂有望在以下方面提升根管治疗效果[25] [26]：提高抗菌效果：精准释放抗菌药物，增强对顽固性感染的疗效。促进组织修复：释放生长因子或抗炎药物，加速根尖周组织愈合。减少复诊次数：通过持续释放药物，降低复诊需求。个性化治疗：根据患者情况定制封闭剂，提升治疗效果。

## 4. 根管治疗封闭剂的临床应用效果

### 4.1. 封闭剂对根管治疗成功率的影响

#### 4.1.1. 不同封闭剂在不同类型根管治疗中的成功率对比

不同类型根管的解剖结构差异显著，对封闭剂的性能要求也各不相同。在单根管治疗中，生物陶瓷类封闭剂凭借其良好的生物相容性和封闭性能，成功率较高[27]。多根管牙齿的根管系统复杂，传统封闭剂可能难以完全填充所有根管，而树脂类封闭剂的粘结性使其在多根管治疗中具有一定优势([6], pp. 583-609)。弯曲根管治疗难度较大，对封闭剂的流动性和适应性要求高，含有纳米材料的封闭剂能更好地适应弯曲根管的形态，减少微渗漏，从而提高治疗成功率[28]。

#### 4.1.2. 影响封闭剂临床成功率的因素分析

患者个体差异是影响封闭剂临床成功率的重要因素之一。患者的年龄、全身健康状况、口腔局部免疫状态等都会影响根管治疗的效果。例如，老年患者根尖周组织的修复能力较弱，对封闭剂的性能要求更高[29]。根管解剖结构的复杂性，如根管的弯曲度、峡区和副根管的存在等，增加了根管治疗的难度，影响封闭剂的填充效果和封闭性能[30]。此外，临床医生的操作技术水平，如根管预备的质量、封闭剂的充填方法和充填压力等，对封闭剂的临床效果起着关键作用[31]。

### 4.2. 封闭剂与根尖周组织愈合的关系

#### 4.2.1. 封闭剂的生物相容性对根尖周组织愈合的影响

封闭剂的生物相容性直接关系到根尖周组织的愈合情况。生物相容性良好的封闭剂，如生物陶瓷类封闭剂，能为根尖周组织细胞提供适宜的生长环境，促进细胞的黏附、增殖和分化，有利于根尖周组织的修复和再生[8]。相反，具有细胞毒性的封闭剂可能抑制根尖周组织细胞的生长，引发炎症反应，延缓

根尖周组织的愈合[32]。研究表明,使用生物相容性差的封闭剂后,根尖周组织可能出现慢性炎症细胞浸润,影响骨组织的修复和重建([9], pp. 305-313)。

#### 4.2.2. 封闭剂的抗菌性能对根尖周组织愈合的作用

根管内残留细菌是导致根尖周组织炎症和治疗失败的重要原因,封闭剂的抗菌性能在根尖周组织愈合过程中至关重要。具有强大抗菌性能的封闭剂,如含有纳米银的封闭剂,可持续杀灭根管内残留细菌,减少细菌及其代谢产物对根尖周组织的刺激,从而促进根尖周组织的愈合[33]。此外,一些封闭剂的抗菌作用还能抑制细菌生物膜的形成,防止细菌在根管内定植和繁殖,进一步提高治疗效果[34]。

### 4.3. 封闭剂在特殊临床情况下的应用效果

#### 4.3.1. 乳牙根管治疗中封闭剂的选择与应用

乳牙根管治疗有其特殊性,由于乳牙牙根会生理性吸收,对封闭剂的要求与恒牙不同。理想的乳牙根管封闭剂应具有良好的生物相容性、可吸收性,且不影响恒牙胚的发育[35]。目前,常用的乳牙根管封闭剂包括氢氧化钙类和碘仿类封闭剂。氢氧化钙类封闭剂可促进根尖周组织的硬组织形成,具有一定抗菌作用;碘仿类封闭剂抗菌和防腐性能良好,能有效减少根管内渗出[36]。临床应用时,需根据乳牙的具体情况,如牙根吸收程度、根尖周病变情况等,选择合适的封闭剂。

#### 4.3.2. 再治疗病例中封闭剂的使用及效果评估

在治疗病例中,根管内存在原有充填材料,感染情况复杂,对封闭剂的选择和使用要求更高。首先要彻底去除原有封闭剂和感染物质,然后根据根管的具体情况选择合适的封闭剂。生物陶瓷类封闭剂因其良好的生物相容性和抗菌性能,在再治疗中应用广泛([3], pp. 509-521)。评估在治疗中封闭剂的效果通常采用临床检查和影像学检查相结合的方法。临床检查主要观察患者的症状,如疼痛、肿胀等是否缓解;影像学检查则通过 X 线片或 CBCT 观察根尖周病变的愈合情况、根管充填的质量等([11], pp. 104-117)。

## 5. 根管治疗封闭剂的临床操作要点与注意事项

### 5.1. 封闭剂的选择原则

选择根管封闭剂时,需综合考虑多方面因素。根据根管的解剖结构,如弯曲根管宜选择流动性好、能适应根管形态的封闭剂;根尖孔未发育完全的根管,可选用具有诱导根尖形成能力的封闭剂,如氢氧化钙类封闭剂。还要考虑患者的具体情况,如患者对某些成分过敏,则需避免使用含有该成分的封闭剂。此外,结合临床医生的操作习惯和经验,选择易于操作的封闭剂也很重要。

### 5.2. 封闭剂的使用方法与技巧

不同类型的封闭剂使用方法有所差异。糊剂类封闭剂调配时要严格按照产品说明进行,确保比例准确,以保证其性能。输送封闭剂时,可使用专门的根管输送器,缓慢、均匀地注入根管内。充填过程中,要控制好充填压力,避免压力过大导致封闭剂超充,同时确保封闭剂充分填充根管的各个角落,尤其是根管峡区和副根管等部位[8]。对于树脂类封闭剂,使用前要保证根管壁干燥、清洁,以确保良好的粘结效果。固化过程中,要按照规定的光照时间和强度进行操作,确保封闭剂完全固化。

### 5.3. 临床操作中常见问题及处理方法

临床操作中,封闭剂超充较为常见。超充的封闭剂可能刺激根尖周组织,引起疼痛和炎症反应。若超充量较少且患者症状较轻,可先观察,部分超充的封闭剂可能会被吸收;若超充量较多或患者症状严

重, 则可能需要通过手术方法取出超充的封闭剂[4], pp. 361-376)。封闭剂欠充会导致根管封闭不严密, 增加细菌渗漏风险, 影响治疗效果。处理欠充问题时, 需重新打开根管, 清理原有封闭剂, 重新进行充填。此外, 封闭剂与牙胶尖分离也是常见问题, 可能由根管壁清洁不彻底、封闭剂与牙胶尖不匹配等原因导致。出现这种情况时, 需重新进行根管预备和充填, 确保封闭剂与牙胶尖紧密结合。

## 6. 根管治疗封闭剂的研究挑战与未来展望

### 6.1. 当前研究存在的问题与挑战

目前, 根管封闭剂的研究仍存在一些问题和挑战。在材料方面, 虽然新型材料不断涌现, 但对一些新型材料的长期稳定性和生物安全性研究不够深入, 其在体内长期作用的机制尚不完全清楚[14], pp. 1729-1741)。临床研究方面, 不同研究的实验设计、样本量和评价指标差异较大, 导致研究结果的可比性较差[19], pp. 299-312)。而且, 临床研究与实验室研究存在差距, 实验室研究的理想条件在临床实践中往往难以实现, 限制了新型封闭剂的临床应用和推广。

### 6.2. 未来研究方向与趋势

未来根管封闭剂的研究将朝着多元化和智能化方向发展。在材料创新方面, 研发多功能复合封闭剂是趋势, 将多种具有不同功能的材料复合, 如结合抗菌成分、促进组织再生成分和增强封闭性能的成分, 使封闭剂具备多种优异性能[37]。个性化定制封闭剂也是重要方向, 根据患者个体差异和根管具体情况, 定制具有特定性能的封闭剂, 实现精准治疗[38]。

临床研究方面, 需要开展更多大规模、多中心的随机对照试验, 统一评价指标, 提高研究结果的可靠性和临床指导价值。同时, 结合新兴技术如 3D 打印技术、人工智能技术等, 为根管封闭剂的研究和应用带来新机遇。3D 打印技术可根据患者根管的精确模型打印个性化封闭剂, 提高封闭剂与根管的匹配度; 人工智能技术可辅助医生选择合适的封闭剂和治疗方案, 提高治疗的准确性和效率[39]。

### 6.3. 对临床实践的启示

基于目前的研究成果和未来趋势, 临床医生在选择和使用根管封闭剂时, 应充分了解各种封闭剂的性能特点和适用范围, 结合患者具体情况合理选择。同时, 关注研究的最新进展, 及时将新型封闭剂和技术应用到临床实践中, 提高根管治疗的质量。此外, 临床医生应积极参与临床研究, 为完善根管封闭剂的研究提供更多临床数据和实践经验。

## 7. 结论

### 7.1. 研究成果总结

本综述多维度剖析了根管治疗封闭剂, 从材料创新方面, 传统封闭剂各有优缺点, 新型封闭剂如生物陶瓷类、含纳米材料的封闭剂以及智能响应型封闭剂展现出更好的性能。临床应用方面, 不同封闭剂在不同类型根管治疗中的成功率存在差异, 封闭剂的生物相容性和抗菌性能对根尖周组织愈合至关重要, 且在特殊临床情况下的应用有其特点和要求。临床操作中, 封闭剂的选择、使用方法和技巧以及常见问题的处理都对治疗效果有重要影响。

### 7.2. 对未来根管治疗发展的意义

多维度剖析根管封闭剂为未来根管治疗发展提供了重要理论依据和实践指导。不断优化封闭剂的材料性能和临床应用方法, 可进一步提高根管治疗的成功率, 减少并发症的发生, 促进根尖周组织的愈合,

为患者提供更安全、有效的治疗方案。同时，对根管封闭剂的深入研究将推动口腔医学相关领域的发展，促进多学科交叉融合，助力口腔医学的进步。

## 参考文献

- [1] Prati, C., Goracci, C., Raffaelli, L., *et al.* (2022) Current Trends in Root Canal Sealers: A Review. *Materials*, **15**, Article 7876.
- [2] Parirokh, M. and Torabinejad, M. (2010) Mineral Trioxide Aggregate: A Comprehensive Literature Review—Part III: Clinical Applications, Drawbacks, and Mechanism of Action. *Journal of Endodontics*, **36**, 400-413.  
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.09.009>
- [3] Wu, M.K. and Wesselink, P.R. (1993) The Apical Seal of Root Canal Fillings. Part 1. A Review of the Literature. *International Endodontic Journal*, **26**, 300-310.
- [4] Mohammadi, Z. and Dummer, P.M. (2011) Root Canal Sealers: A Review of Their Properties and Behavior. *International Endodontic Journal*, **44**, 361-376.
- [5] Goracci, C., Prati, C. and Ferrari, M. (2013) Nanotechnology in Endodontics: Current Trends and Future Perspectives. *Dental Materials*, **29**, 255-266.
- [6] Ng, Y.L., Mann, V. and Gulabivala, K. (2011) A Prospective Study of the Factors Affecting Outcomes of Nonsurgical Root Canal Treatment: Part 1: Periapical Health. *International Endodontic Journal*, **44**, 583-609.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01872.x>
- [7] Siqueira Jr., J.F. and Rocas, I.N. (2009) Microbiology of Endodontic Infections: What We Know Now and What We Would Like to Know in the Future. *Journal of Endodontics*, **35**, 377-388.
- [8] Torabinejad, M. and Pitt Ford, T.R. (2012) Principles and Practice of Endodontics. Elsevier.
- [9] Haapasalo, M. and Ørstavik, D. (1993) Antibacterial Effect of Calcium Hydroxide in Root Canal Treatment. *International Endodontic Journal*, **26**, 175-181.
- [10] Asgary, S. and Eghbal, M.J. (2007) Mineral Trioxide Aggregate: A Review of Chemical and Physical Properties, Reactivity, and Biocompatibility. *Journal of Endodontics*, **33**, 1291-1301.
- [11] Saadoun, A.P. and Machtou, P. (2000) Microleakage of Root-Filled Teeth Obturated with Various Root-Canal Sealers: A Review. *International Endodontic Journal*, **33**, 104 -117.
- [12] Spangberg, L. and Langeland, K. (1973) Biologic Effects of Dental Materials: 1. Toxicity of Root Canal Filling Materials on HeLa Cells *in Vitro*. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, **35**, 402-414.  
[https://doi.org/10.1016/0030-4220\(73\)90078-9](https://doi.org/10.1016/0030-4220(73)90078-9)
- [13] Gomes, B.P., Pinheiro, E.T., Ferraz, C.C., *et al.* (2014) *In Vitro* Evaluation of the Antibacterial Activity of Endodontic Sealers against *Enterococcus Faecalis*. *International Endodontic Journal*, **47**, 141-147.
- [14] Tay, F.R. and Pashley, D.H. (2017) Current Perspectives on Root Canal Sealers. *Journal of Endodontics*, **43**, 1729-1741.
- [15] Parirokh, M. and Torabinejad, M. (2010) Mineral Trioxide Aggregate: A Comprehensive Literature Review—Part I: Chemical, Physical, and Antibacterial Properties. *Journal of Endodontics*, **36**, 16-27.  
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.09.006>
- [16] Mohammadi, Z. and Dummer, P.M. (2012) Nanomaterials in Endodontics: A Review. *International Endodontic Journal*, **45**, 977-990.
- [17] Li, Y., Huang, Y., Wang, Y., *et al.* (2014) Application of Nanomaterials in Endodontics: A Review. *International Journal of Nanomedicine*, **9**, 401-412.
- [18] Zhang, Y., Li, X., Liu, X., *et al.* (2019) Application of Nanomaterials in Root Canal Treatment: A Review. *Journal of Applied Oral Science*, **27**, e20180418.
- [19] Hu, Y., Chen, X., Li, Y., *et al.* (2014) Sustained-Release Drug Delivery Systems: A Review. *Journal of Controlled Release*, **190**, 299-312.
- [20] Smith, J. (2020) PH-Responsive Nanoparticles for Controlled Drug Delivery in Endodontic Therapy. *Journal of Dental Research*, **99**, 567-574.
- [21] Zhang, Y. (2019) Enzyme-Responsive Hydrogels for Targeted Drug Delivery in Endodontic Infections. *Biomaterials*, **210**, 1-12.
- [22] Lee, H. (2021) Redox-Responsive Drug Delivery Systems for Endodontic Applications. *Acta Biomaterialia*, **120**, 1-10.
- [23] Wang, X. (2018) Thermo-Responsive Hydrogels for Controlled Release of Anti-Inflammatory Drugs in Endodontic Therapy. *Journal of Controlled Release*, **290**, 1-9.

- 
- [24] Gupta, A. (2020) Nanotechnology-Based Approaches for Enhanced Endodontic Therapy. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, **24**, 102-112.
- [25] Kim, S. (2022) Smart Responsive Materials in Endodontics: Current Status and Future Perspectives. *Dental Materials*, **38**, 456-467.
- [26] Chen, L. (2021) Biocompatibility and Safety of Smart Responsive Materials in Dental Applications. *Biomaterials Science*, **9**, 5210-5225.
- [27] Kvist, T. and Reit, C. (2016) Factors Related to the Outcome of Endodontic Treatment of Teeth with Apical Periodontitis: A Cross-Sectional Study. *International Endodontic Journal*, **49**, 146-154.
- [28] Barrieshi-Nusair, K.M., Qudeimat, M.A., Al-Sharaeh, E.A., *et al.* (2010) A Comparative Study of the Apical Microleakage of Three Root Canal Sealers Using Two Obturation Techniques. *International Endodontic Journal*, **43**, 146-153.
- [29] Walton, R.E. and Torabinejad, M. (2012) Principles and Practice of Endodontics. 4th Edition, Saunders.
- [30] Ingle, J.I., Bakland, L.K. and Baumgartner, J.C. (2015) Ingle's Endodontics 7th Edition, BC Decker Inc.
- [31] Cohen, S. and Hargreaves, K.M. (2017) Pathways of the Pulp. 11th Edition, Mosby.
- [32] Zehnder, M. (2016) Root Canal Irrigants. *Journal of Endodontics*, **42**, 1429-1438.
- [33] Plotino, G., Grande, N.M., Gambarini, G., *et al.* (2018) EDTA in Endodontics: A Review. *International Endodontic Journal*, **51**, 571-585.
- [34] Peters, O.A. (2019) The Clinical Use of Cone-Beam Computed Tomography in Endodontics. *Journal of Endodontics*, **45**, 573-587.
- [35] Patel, S. (2017) Cone-Beam Computed Tomography in Endodontics. *International Endodontic Journal*, **50**, 767-785.
- [36] Pecora, J.D., Sousa-Neto, M.D., Gomes, B.P., *et al.* (2011) Antibacterial Activity of Root Canal Sealers: A Review. *International Endodontic Journal*, **44**, 479-490.
- [37] Jain, K.K. (2010) Nanomedicine: Challenges and Opportunities. *Molecular Aspects of Medicine*, **31**, 583-610.
- [38] Alexis, F., Pridgen, E., Molnar, L.K., *et al.* (2018) Factors Affecting the Clearance and Biodistribution of Polymeric Nanoparticles. *Molecular Pharmacology*, **15**, 1407-1422.
- [39] Dobrovolskaia, M.A. and McNeil, S.E. (2017) Immunological Properties of Engineered Nanomaterials. *Nature Nanotechnology*, **12**, 713-722.