

牙髓及根尖周疾病诊疗技术研究进展

杨 红

重庆医科大学 重庆

【摘要】目的 综述牙髓及根尖周疾病诊疗技术的近年进展，为临床技术应用与研究选题提供参考。**方法** 以牙髓状态评估、活髓保存治疗、根管感染控制、牙髓再生为检索词，检索中国知网、万方、PubMed、Web of Science 等数据库近六年发表的系统评价、Meta 分析、随机对照试验、专家共识与指南，按主题归纳。**结果** 锥形束 CT 的规范化应用与人工智能影像识别显示出改善龋病与根尖周病病变识别的潜力，但影像检查的适用边界与模型的外部验证仍存不足；脉搏血氧测定与激光多普勒血流测量可为牙髓状态评估提供客观信息，但在设备专用化与干扰控制方面仍有局限；以硅酸钙类生物活性材料为支撑的活髓保存治疗适应证由年轻恒牙扩展至成熟恒牙；根管感染的微生物学机制研究与新型封药、再生性牙髓治疗共同形成了保存患牙的新技术路径。**结论** 牙髓及根尖周疾病的诊疗技术正沿诊断客观化、治疗微创化与过程数字化方向发展，今后应重点推进人工智能模型的多中心外部验证与临床效用评价、牙髓血供检测的专用化，以及再生性治疗的标准化与组织学评价。

【关键词】 牙髓及根尖周疾病；锥形束 CT；人工智能；脉搏血氧测定；活髓保存治疗；生物活性材料；牙髓再生；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.20260007

Research progress in diagnosis and treatment technologies for pulp and periapical diseases

Hong Yang

Chongqing Medical University, Chongqing

【Abstract】Objective To review recent advances in diagnostic and therapeutic technologies for pulp and periapical diseases, providing a reference for clinical application and the selection of research topics. **Methods** Using keywords such as pulp status assessment, vital pulp therapy, root canal infection control, and pulp regeneration, a search was conducted across databases including CNKI, Wanfang, PubMed, and Web of Science for systematic reviews, meta-analyses, randomized controlled trials, expert consensus statements, and guidelines published within the last six years; the findings were then summarized by theme. **Results** Standardized application of cone-beam computed tomography (CBCT) and AI-based image recognition demonstrate potential for improving the detection of caries and periapical lesions, though limitations remain regarding the scope of application for imaging and the external validation of models. Pulse oximetry and laser Doppler flowmetry provide objective data for assessing pulp status, yet limitations persist concerning equipment specialization and interference control. Indications for vital pulp therapy—supported by calcium silicate-based bioactive materials—have expanded from young permanent teeth to mature permanent teeth. Research into the microbiological mechanisms of root canal infection, combined with novel intracanal medicaments and regenerative endodontic procedures, has established new technological pathways for tooth preservation. **Conclusion** Diagnostic and therapeutic technologies for pulp and periapical diseases are evolving toward objective diagnosis, minimally invasive treatment, and digital workflows. Future efforts should prioritize the multi-center external validation and clinical utility assessment of AI models, the specialization of pulp blood supply monitoring, and the standardization and histological evaluation of regenerative therapies.

【Keywords】Pulp and periapical diseases; Cone-beam computed tomography (CBCT); Artificial intelligence; Pulse oximetry; Vital pulp therapy; Bioactive materials; Pulp regeneration; Review

1 引言

牙体牙髓疾病是最常见的口腔疾病之一，涵盖龋病、非龋性牙体硬组织疾病、牙髓病与根尖周病，其疾病负担不仅来自疼痛与功能障碍，还来自患牙丧失后的咀嚼、语音与美观影响。随着对牙髓组织生物学认识的加深，牙体牙髓病的诊疗目标已由单纯去除感染、机械清理与充填根管系统，转向保存牙髓活力、维持患牙长期功能并尽可能减少牙体组织损失。这一转变使得“准确判断牙髓真实状态”成为整个诊疗链条的核心环节，也对诊断技术的客观性与敏感性提出了更高要求。

在此背景下，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》明确了根尖片、骀翼片、曲面体层片与口腔颌面锥形束 CT 在牙体牙髓病诊疗中的适用情形与推荐意见，为影像学检查的合理选择提供了规范依据^[1]。与此同时，人工智能影像识别、牙髓血流客观检测、生物活性材料与再生性治疗等方面的研究持续推进，使牙髓状态的判断与治疗决策更具客观性^[2-3]。从疾病负担看，龋病与牙髓根尖周病是口腔门诊最常见的就诊原因，成年人群中未经治疗的龋患与既往根管治疗史均占有相当比例，由此带来的疼痛、咀嚼功能下降与缺牙构成了口腔疾病负担的主要部分^[1-2]。与此同时，根管治疗虽已是一项成熟技术，但治疗后根尖周炎在人群调查中的检出率仍不低，说明“技术可行”并不等同于“长期成功”^[1-2]。这一现实促使学界重新审视治疗目标：与其在技术失败后再行再治疗或拔除，不如在诊断阶段更准确地判断牙髓状态、在治疗阶段更多地保留活髓组织。微创牙髓治疗的理念由此形成，其核心并非缩小切口或减小器械，而是通过更精准的判断减少不必要的组织去除与技术干预^[2-3]。

本文围绕牙髓及根尖周疾病的诊断技术、牙髓状态评估、活髓保存治疗与生物活性材料、感染控制与再生性牙髓治疗四个方面进行综述。

2 龋病与牙髓根尖周病的影像学及人工智能诊断技术

2.1 锥形束 CT 的规范化应用

锥形束 CT (cone beam computed tomography,

CBCT)通过锥形束投影重建获得牙齿及周围组织的三维信息，可在特定临床情境下提供较二维影像更丰富的三维信息，尤其有助于评估复杂根管解剖、牙根吸收及部分根尖周病变。然而，其诊断效能受病变类型、扫描参数和金属伪影等因素影响，不能替代临床检查及常规二维影像。检查前应明确拟解决的临床问题，并依据辐射防护原则（合理可行最低剂量）选择适当的视野与成像参数^[1]。指南同时强调，CBCT 不应作为常规检查手段：一方面，金属修复体、根充材料与正畸弓丝可产生线束硬化伪影，降低小体积病变的可见性；另一方面，视野越大、体素越小并不意味着诊断效能越高，合理选择视野与分辨率是规范使用 CBCT 的前提^[1]。

在牙体牙髓病领域，CBCT 较明确的适用情形主要包括以下几类。其一，牙根纵裂的辅助判断：当根管内无充填材料时，CBCT 可与根尖片互补、提高折裂线显示率并呈现颊舌侧折线与牙槽骨破坏范围；但一旦根管内存在金属桩或高密度根充材料，伪影可能掩盖折裂影像，且即便使用 CBCT 也不能保证检出所有裂纹^[1]。其二，牙根吸收：CBCT 在显示轻微牙根吸收的位置、范围与体积方面优于根尖片，并有助于鉴别内吸收与外吸收^[1]。其三，复杂根管解剖的术前评估：当根尖片提示根管系统形态异常，或术中发现额外根管、怀疑复杂根管形态可能影响疗效时，CBCT 可提供更有价值的信息^[1]。至于牙外伤（冠根折延伸、脱位性损伤的矢状向移位）与牙源性上颌窦炎，CBCT 在特定复杂病例中确有帮助，但属于相对有限的适应证，应在二维影像不能充分回答临床问题时方才考虑，不宜作为常规筛查^[1]。在疗效随访环节，基于 CBCT 的根尖周指数可更精确地描述骨缺损的体积与位置，从而提高不同研究间疗效评价的可比性；但该判读同样受伪影与扫描参数影响，且缺乏被广泛接受的临界值定义，因此常规临床仍以二维影像随访为主，仅在二维结果不确定或需术前规划时才追加 CBCT，而非将术后常规拍摄 CBCT 作为评估治疗质量的固定步骤^[1-2]。总体而言，CBCT 的价值在于解决二维影像“回答不了”的特定问题，而非替代二维影像成为常规筛查工具^[1]。

需要补充强调的是，CBCT 的使用还涉及操作

规范与读片责任两个层面。一方面,放射参数设置(管电压、管电流、曝光时间、视野与体素组合)直接关系到图像质量与患者所受剂量,应在满足诊断需求的前提下遵循尽可能低剂量的原则;另一方面,CBCT图像中包含了牙体、牙周、颌骨乃至气道的全部信息,阅片者需要具备识别牙体牙髓以外病变的意识与能力,或将其转交具备相应资质的医师评估,这也是指南强调“读片责任”的原因^[1]。从质控角度看,建立明确的拍摄指征记录、统一的阅片流程与报告规范,是CBCT由“能做”走向“用好”的必要条件^[1]。

2.2 人工智能辅助诊断

人工智能在龋病诊疗中的应用涵盖龋病诊断与风险预测两方面,其图像识别技术为龋病的早期发现与个体化防控提供了新思路^[3]。从数据来源看,研究已覆盖咬翼片、根尖片、口内数码照片、近红外透照图像与CBCT图像等多种模态。在骀面与邻面龋检测方面,一项整群随机交叉对照试验评估了商业化人工智能辅助诊断软件对咬翼片邻面龋检出的影响^[4];研究者亦构建了基于深度卷积神经网络的模型,用于口内照相图像的龋损自动检出^[5]。除二维影像外,深度学习还被应用于近红外透照图像的龋损识别,为该无辐射成像方式提供了自动判读的可能^[6]。

系统评价对上述证据进行了整合。一项系统评价汇总了基于X线影像的龋损检测人工智能模型并评价其诊断效能^[7];针对根尖片的深度学习模型研究显示,卷积神经网络在早期龋检出方面具有一定准确性,但研究间异质性较大^[7]。在临床应用层面,有研究开发了可同时识别根尖片上龋病与根尖周炎的深度学习评价工具^[8];深度学习亦被应用于基于CBCT图像的龋损检出及其范围与位置的分类^[9]。

从技术路线看,现有研究主要采用分类、目标检测与分割三类任务,其中分类任务应用最多,常用的性能评价指标包括敏感度、特异度与准确率^[3]。三类任务解决的是不同层面的问题:分类回答“有无病变”,目标检测回答“病变位置”,分割则进一步回答“病变边界与面积”,后者对龋损深度分级与后续充填决策更具意义但标注成本也最高^[3,8]。在评价人工智能的应用价值时,应区分三个递进层次:第一是模型性能,即模型在特定测试集上识别病变的能力;第二是临床诊断效用,即AI辅助后医师的诊断准确性、一致性或工作效率是否改善;第

三是患者结局,即是否减少漏诊、不必要治疗或改善长期预后^[3,7-8]。目前多数研究仅停留在模型性能层面,后两个层次的证据仍有限。人工智能在龋病诊疗中的价值首先体现为在模型性能层面显示出改善病变识别的潜力,并进一步通过风险预测支持以“龋风险评估”为核心的现代龋病管理决策,但这并不等同于真实临床环境中医师诊断质量的必然提高^[3]。

现有研究在数据来源、标注标准与验证方式上差异较大,模型的可泛化性仍受限制^[3,7]。归纳起来,限制因素主要包括:训练样本量偏小且多来自单中心,难以覆盖不同人群、不同拍摄设备与不同临床环境的变异;金标准本身存在争议,多数研究以医师判读而非组织学或显微CT作为参照;外部验证缺失使报告的性能指标难以外推;发表偏倚也可能导致阴性结果未被纳入。这里还需澄清一个常见的认识误区:人工智能的输出本质上是对影像的概率性判断,而非病理诊断。因此在临床应用中应保持“医师主导”的责任框架——由医师在患者症状、临床检查与影像信息的综合背景下解读人工智能结果,并在两者不一致时以临床判断为准^[3,7]。与此同时,人工智能对早期龋的“过度检出”可能带来不必要的备洞干预,这一点在以龋病进展风险评估为核心的现代管理模式下尤需警惕;理想的应用边界是提高医师对可疑区域的注意力与判读一致性,而非替代医师作出侵入性治疗决策^[3]。人工智能模型的报告质量与外部验证仍不充分,尚需更多前瞻性与多中心研究支持其临床转化,并从关注“模型性能”转向关注“临床效用”,即能否真正改善医师诊断质量、治疗方案与患者结局^[3,7]。

除龋病外,人工智能的应用正在向牙髓病与根尖周病的其他环节延伸。在根尖周炎检出方面,模型已被用于根尖片上根尖周低密度影的识别,显示出辅助基层与年轻医师关注早期病变的潜力^[8];但需强调,模型在测试集中的敏感度并不等同于真实临床环境中医师诊断准确性的提高,更不能直接推导至患者预后改善,上述获益仍有待以临床对照设计加以验证^[3,7-8]。在根管解剖识别方面,研究者尝试利用锥形束CT图像自动分割根管系统并辅助识别额外根管与根管分型,这对术前评估具有直接价值^[9];在疗效评价方面,亦有探索将模型用于根尖周病变面积的自动测量与随访比较,以减少人工测量造成的

主观差异^[1,3]。这些应用的共同挑战仍在于标注金标准的缺乏与数据集规模的限制,尤其是根管解剖的标注高度依赖操作者经验,其标注者间一致性本身即构成误差来源,因而外部验证的数据集应尽可能由多位独立医师共同标注^[3,7]。

2.3 其他影像与光学诊断技术

除锥形束 CT 与二维 X 线检查外,若干成像技术也在牙体牙髓领域得到探索。近红外透照成像利用牙釉质与龋损组织对近红外光的散射与吸收差异成像,可在不使用电离辐射的前提下显示牙面与邻面的早期脱矿,其与深度学习相结合的研究已显示出自动判读的可行性^[6]。定量光致荧光等技术则通过测量荧光强度的变化对脱矿程度进行半定量评价,适用于龋病进展的纵向监测与再矿化效果的观察^[3,6]。在牙体细微结构的评价方面,显微 CT 虽因辐射与视野限制无法用于活体,但作为离体研究的参照标准被广泛用于验证其他成像方法的准确性,也是人工智能模型训练中获取高精度标注的重要工具^[1]。数字化口内扫描虽不能显示牙体内部结构,却可与锥形束 CT 数据配准用于导板设计与手术规划,已成为数字化牙髓治疗流程中的常规组成部分^[1-2]。

成像方式的增加并未改变诊断的基本逻辑:任何影像所见都应临床检查、症状与病史相互印证。新技术带来的是信息维度的增加,而非诊断确定性的必然提升;当不同方法的结果不一致时,应以临床判断为主并结合随访复查,避免因过度依赖单一影像而作出不可逆的治疗决策^[1-3]。

3 牙髓状态评估与生物学诊断

传统牙髓活力测试(冷测、热测、电活力测试)本质上是基于神经反应的感觉测试,而非对牙髓血供的直接测定^[2]。其结果依赖患者主观反应与医师判读,在年轻恒牙牙根尚未发育完成、牙外伤后暂时性牙髓休克、多根牙部分根髓坏死以及已行修复的全冠患牙中易出现假阳性或假阴性^[2]。需要明确的是,牙髓感觉测试、牙髓血流检测与影像学检查所回答的问题并不相同:冷测、电活力测试主要反映感觉神经的反应,脉搏血氧测定与激光多普勒血流测量旨在反映血供或灌注,而影像学主要评价牙体结构、根尖周组织及相关病变;三者均不能直接推断牙髓炎症是否可逆、组织修复能力如何,也不能等同于“是否应保留活髓”的最终治疗决策——活力有无、炎症范围、修复能力与术式选择是相关

但并不等同的判断^[2]。此外,测试结果通常以“有反应/无反应”二分呈现,难以反映牙髓炎症的可逆与否这一连续过程,而后者才是决定采用活髓保存还是根管治疗的关键^[2]。客观检测牙髓血流的思路因此受到重视^[2-3]。

从技术细节看,三类传统测试的误差来源各不相同。冷测依赖致冷剂使牙本质小管内液体流动刺激牙髓神经,其结果受致冷剂种类、棉签湿度与隔湿程度影响,在老年患者牙本质小管闭塞或患牙有全冠修复时反应可明显减弱;热测通过热传导引起类似反应,但温度过高有造成牙髓损伤的风险;电活力测试则以电流刺激神经纤维,其读数受探头位置、接触介质与患者紧张程度影响,在牙颈部釉质薄弱处甚至可通过牙周组织产生假阳性反应^[2]。此外,这三类测试均只反映“是否有神经传导”,而不能区分炎症的可逆与否,也不能反映部分根髓坏死的混合状态,这正是其临床价值有限的根本原因^[2]。

脉搏血氧测定通过测量牙髓组织的氧饱和度评估牙髓血供,其原理是含氧血红蛋白与还原血红蛋白对不同波长光的吸收存在差异。一项系统评价纳入 24 项临床研究、以诊断准确性研究质量评估工具第 2 版(QUADAS-2)工具评价研究质量,认为脉搏血氧测定可为牙髓血供评估提供补充信息,但其合并的敏感度与特异度在不同研究中差异较大且置信区间较宽,结论受纳入研究的人群、设备设计与参照标准一致性影响;该评价同时指出,缺乏牙科专用探头、探头适配以及不同全身与口腔疾病对血氧饱和度读数的影响尚未明确,限制其临床应用^[10]。激光多普勒血流测量是另一类客观方法,通过检测多普勒频移反映牙髓组织血流灌注量。一项采用自身对照设计的临床研究将 44 颗外伤牙与 44 颗健康对照牙纳入分析,以外伤牙与未外伤牙的牙髓血流测量值差异为主要结局,结果显示激光多普勒血流测量可反映外伤后牙髓血流变化,可作为外伤牙牙髓状态的客观评价指标与再血管化的监测工具^[11]。

脉搏血氧测定操作相对简便、设备成本较低,因而更易在门诊推广,但在牙冠变色、修复体存在及髓腔钙化等情形下信号质量可能受影响^[10]。激光多普勒血流测量直接反映灌注量、灵敏度高,尤其适用于外伤牙的连续复查与血流恢复趋势监测,但对隔湿、探头稳定与患者配合要求更高,牙龈血流的干扰亦需通过严格隔湿与测量位点控制加以排除^[11]。需要

注意的是,目前支持其临床价值的关键证据(如一项采用自身分口对照、纳入44颗外伤牙与44颗健康对照牙、对象为平均年龄约10岁儿童的研究)主要观察外伤后牙髓血流变化,其结果不宜直接推广至所有年龄、所有牙髓疾病或所有临床诊断场景^[1]。国内学者对牙髓根尖周病的诊断技术进展进行了系统梳理,认为诊断技术的发展方向是由主观症状判断转向结合血流、影像学及生物学指标的多模态评估^[2]。在这一框架下,CBCT等影像学检查与客观血流检测互为补充:影像回答“有无病损及其范围”,血流回答“组织是否仍有活性”,二者共同用于判断牙髓的真实状态,从而决定采取活髓保存还是根管治疗^[1-2,10]。

除上述两类血供层面的检测外,研究者也在探索更具“生物学”特征的诊断途径,例如通过检测龈沟液或牙本质液中的特异性炎症介质、基质金属蛋白酶与神经生长因子等分子标志物来反映牙髓的炎症程度与修复潜能。这类方法的优势在于能够提供炎症活动强度的信息,理论上更接近“可逆与否”的判断需求;但目前多数研究仍处于体外或动物实验阶段,取样部位、检测阈值与健康人群参考区间的确定尚无共识,距离临床应用仍有距离^[2]。综合现有证据可以认为,短期内尚难出现单一“金标准”式的牙髓状态检测方法,更为可行的路径是将症状询问、感觉测试、客观血流检测与影像学表现综合纳入评估,形成结构化的判断框架,以缩小不同医师之间的诊断差异^[1-2,10-11]。

根据现有研究提出一种分步骤的综合评估思路(属作者提出的评估框架,尚待前瞻性研究验证,并非已经确立的标准化诊断工具)。第一步采集症状史,重点记录疼痛的性质、持续时间与诱发因素,并结合临床检查了解龋损深度、牙周状况、叩诊与松动度;第二步以影像学检查明确龋损与根尖周状态,必要时追加锥形束CT;第三步在感觉测试结果不确定,或患牙为外伤牙、年轻恒牙、已行全冠修复者时,补充客观血流检测;第四步综合以上信息将牙髓状态判定为“健康或可逆性炎症”“可疑”“不可逆性炎症”三类,并据此分别选择观察与再矿化、活髓保存治疗或根管治疗^[1-2,10-11]。这一思路的价值在于把原本依赖个人经验的主观判断转化为可记录、可复核的结构化信息,既有利于医师之间的沟通与会诊,也为后续疗效比较提供了可追

溯的基线资料;但其具体的权重设置、诊断阈值与一致性指标仍有待研究验证,不应被视为可直接套用的确定性方案^[2]。

4 活髓保存治疗与生物活性材料

4.1 从年轻恒牙到成熟恒牙的适应证拓展

随着对深龋组织病理学与牙髓防御修复机制认识的深入,活髓保存治疗(vital pulp therapy, VPT)的适应证由年轻恒牙扩展至成熟恒牙^[12-13]。这一转变的生物学基础在于:牙髓炎症并非“可逆—不可逆”的二元状态,而是由冠部向根部渐进发展的连续过程;即使临床诊断为不可复性牙髓炎,病变也可能局限于冠髓而根髓仍相对健康^[13-14]。中华口腔医学会牙体牙髓病学专业委员会发布的《恒牙活髓保存治疗专家共识》对恒牙活髓保存治疗的适应证、操作要点与疗效评价作出规范^[12]。相关研究指出,牙髓炎检测方法与诊断理念的进步使临床医师能够更准确地识别牙髓真实状态,并选择间接盖髓术、直接盖髓术、部分或完全牙髓切断术等活髓保存方案^[13]。需说明的是,活髓保存治疗以保留仍有活力的牙髓组织为目标,而牙髓再生术/再生性牙髓治疗针对的是牙髓坏死(尤其是年轻恒牙)病例,二者在适应证与干预对象上并不相同,后者(再生性牙髓治疗)的具体内容与证据将在第5章单独讨论。有综述从牙髓保存策略的角度归纳了深龋与露髓患牙的处理路径,强调牙髓组织自身的防御与修复能力是治疗决策的生物学基础^[14],国内研究亦对龋源性露髓成熟恒牙活髓保存治疗的研究进展进行了系统回顾^[15]。

在操作层面,以下几项要点决定了活髓保存治疗的成败:其一,橡皮障隔离与严格的无菌操作是避免二次感染的前提;其二,去龋策略应由传统的“彻底去净”转向分层、有选择的去龋,以尽量保留可被再矿化的牙本质并降低露髓风险;其三,露髓后的出血控制与止血时间被视为判断根髓炎症程度的临床替代指标,但不应将其绝对化而延长至造成创伤;其四,冠部封闭的严密程度直接关系到长期疗效,微渗漏被普遍认为是活髓保存治疗晚期失败的重要原因^[12-15]。

在术式选择上,间接盖髓术适用于预计去除龋损后可避免露髓的病例,其核心是靠严密的冠部封闭使剩余牙本质内的细菌进入休眠状态;一旦发生露髓,则需综合无菌条件、牙髓组织状态、出血控制

情况、影像学表现与术者判断来决定采用直接盖髓、部分牙髓切断还是完全牙髓切断,而非仅凭术前症状或露髓大小作出决定。一般而言,在无菌操作可靠、出血可在短时间内控制、牙髓组织仍呈健康外观的病例中,直接盖髓或牙髓切断可获得可接受的疗效;但若露髓孔较大、出血难以控制或伴有持续性自发性痛,则更倾向于选择完全牙髓切断,并需结合对牙髓炎症范围的术中判断^[12-13,15]。值得注意的是,传统教科书中“病程越长、越趋于不可逆”的线性假设在临床实践中并不总是成立,术前疼痛症状的强度与组织学炎症程度之间的一致性有限,这也正是近年主张以治疗的生物学结局而非症状标签作为决策依据的原因^[13-14]。

去髓策略的选择是活髓保存治疗的另一项关键决策。传统的彻底去髓要求去除全部感染与软化牙本质,优点是获得确定的组织学边界,但在近髓区域极易造成露髓,反而迫使治疗升级为牙髓切断或根管治疗。分步去髓的策略是先去除外周软化牙本质、保留近髓的少量软化组织并以严密暂时充填封闭,待修复性牙本质形成后再二次进入完成最终去髓,其目的是降低露髓风险;选择性去髓则主张仅去除外周软化牙本质而保留近髓的皮革样牙本质,一次性完成永久修复^[12,15]。两者的分歧在于二次进入是否必要:分步去髓虽可降低露髓风险,却增加了再次就诊与暂时封闭失效的可能;选择性去髓减少了就诊次数与二次污染的机会,但要求术者能够准确判断牙本质的硬度分层^[12-13,15]。现有证据(主要基于选择性或分步去髓且冠部封闭可靠的研究)倾向于认为,在规范的无菌操作与可靠冠部封闭前提下,保留近髓软化牙本质并不会增加治疗失败风险,反而有利于维持牙髓活力;但该结论的适用范围受去髓策略、冠部封闭条件与随访时长限制,不宜不加限定地外推至所有临床情形^[14-15]。无论采取何种策略,橡皮障隔离、放大视野下的精细操作以及对露髓风险的预案准备都是必要前提^[12-13]。

在疗效判定方面,建议采用临床与影像学双重标准:临床标准包括无自发痛、无叩痛、牙髓活力测试有反应;影像学标准包括根尖周无新发低密度影、无内吸收或根管钙化进展、修复性牙本质桥可见^[12,15]。随访节点宜设定在术后3个月、6个月与1年,其后每年复查一次,以便及时发现迟发的牙髓坏死^[12,15]。

4.2 成熟恒牙牙髓切断术的疗效证据

针对龋源性露髓的成熟恒牙,牙髓切断术的疗效证据近年明显增加。一项系统评价汇总了成熟恒牙后牙有症状不可复性牙髓炎患牙接受活髓保存治疗的临床与影像学转归,提示在有症状的成熟患牙中保留部分活髓具有可行性^[16];一项基于随机对照试验的系统评价与Meta分析报告了使用生物活性材料行恒牙牙髓切断术的成功率,为临床选择提供了量化依据^[17];另一项定量系统评价比较了使用硬性硅酸钙类材料行牙髓切断术与根管治疗在龋源性露髓成熟恒牙中的疗效,评估其作为根管治疗替代方案的可行性^[18]。综述性研究从生物学基础与临床结局角度进一步说明,成熟恒牙诊断为不可复性牙髓炎时,牙髓切断术可作为根管治疗之外保留活髓的选择^[19]。

上述证据也暴露出现有研究的共同局限:多数随机对照试验样本量有限、随访时间集中在半年至两年,不同研究对“成功”的定义并不一致,有的以无症状为标准,有的要求同时满足影像学检查正常。因此,部分研究显示,在严格病例选择和规范操作条件下,活髓保存治疗可获得较好的临床与影像学结局;但与根管治疗的相对疗效仍需结合具体术式、病例纳入标准与随访证据谨慎判断,其远期表现特别是对患牙长期存留率的影响,仍需更长随访周期的前瞻性研究确认^[16-19]。此外,活髓保存治疗失败通常表现为不可复性疼痛或牙髓坏死,多数病例仍可行根管治疗补救,这一“可逆性”也是其在临床决策中被日益接受的重要原因^[18-19]。

进一步分析失败模式有助于理解其临床定位。现有研究提示,活髓保存治疗的失败多发生在术后早期,表现为持续性疼痛或牙髓坏死;一旦度过术后早期且影像学检查正常,其后的失败率明显降低,这一时间分布规律与其他牙髓治疗相似^[17-19]。此外,不同牙位的疗效存在差异:前磨牙与磨牙因髓腔解剖与咬合负荷不同,成功率并不完全一致,术前症状的持续时间与强度亦被部分研究纳入失败预测因素^[16,18]。因此,在临床实践中应重视病例选择,对症状持续时间过长、术前影像学已显示根尖周病变或露髓面积过大者,仍宜直接选择根管治疗而非勉强保留活髓;术式的最终确定应综合无菌条件、牙髓组织状态、止血情况、影像学表现与术者判断,而非仅凭术前症状或露髓大小。只有在严格把握适应证的前提下,活髓保存治疗的高成功率才具有可外推

性^[18-19]。

4.3 生物活性材料

硅酸钙类生物活性材料是活髓保存治疗取得进展的重要支撑。国内综述系统介绍了生物活性材料在牙髓治疗中的应用现状^[20]。体外与动物实验研究比较了多种新型硅酸钙水门汀的生物相容性与矿化潜能,结果显示不同产品在组织愈合反应与矿化能力方面存在差异,其中部分产品在组织愈合过程中表现更优,提示材料选择不能仅凭理化参数一概而论^[21]。

生物活性材料的作用机制与其理化性能密切相关:亲水性使其能在潮湿的牙髓创面环境中完成固化;固化过程中释放的钙离子与碱性环境(高 pH)被体外与动物实验证实具有抗菌与促成骨/成牙本质样细胞分化的作用,但在临床环境中其“诱导硬组织形成”的程度还受牙髓状态、封闭质量与随访时长影响;良好的流动性使其具备被压入狭窄区域的能力;而体积稳定性与低溶解性则关系到长期的边缘封闭^[20-21]。同时,材料选择需结合临床场景权衡多个维度:固化时间长会影响冠部即刻修复的实施节奏,操作手感与调拌方式会影响临床易用性,而牙冠变色在前牙区尤其是需要优先考虑的美观问题^[20]。综合来看,理想的活髓保存材料应兼顾生物相容性、矿化诱导能力、封闭性能、操作性能与美观稳定性,现有产品尚未能在所有维度上同时达到最优,这也是材料研发的主要方向^[20-21]。

从材料类别看,矿物三氧化物凝聚体(MTA)是最早被广泛应用的硅酸钙类材料,其良好的生物相容性与诱导硬组织形成的能力奠定了活髓保存治疗的现代基础,但其固化时间较长、操作性能欠佳及可能导致牙冠变色等不足也较为突出。此后出现的树脂改良型与含新型添加剂的硅酸钙水门汀,在固化速度、操作手感与颜色稳定性方面作出改进,从而拓展了在前牙区的适用范围^[20-21]。尽管理化性能的改进提升了临床便利性,但哪一种材料在真实临床场景中更具优势尚无定论,随机对照试验的比较结果受病例选择、随访时长与术者经验的共同影响,因此材料的选择仍应立足具体临床需求并与医师的操作经验相结合^[20-21]。

从生物学过程看,材料植入后的组织反应可大致分为三个阶段:早期以炎症细胞浸润与材料表面磷灰石样沉积为主,中期可见成牙本质细胞样细胞

沿材料界面排列并形成修复性牙本质桥,晚期则表现为炎症消退与牙本质桥的成熟增厚——上述阶段划分主要依据离体与动物实验观察,其在人体内的具体进程与一致性仍需临床证据支持^[20-21]。材料释放的钙离子与碱性环境在实验中既具抗菌作用,也可通过激活成牙本质细胞的分化程序促进硬组织形成;但若材料本身的细胞毒性偏高或固化过程放热明显,则可能加重早期炎症反应并延迟愈合,因此,评价一种活髓保存材料不能仅依据短期成功率,还应结合组织学反应、牙本质桥的连续性与厚度以及牙髓活力的长期维持情况综合判断,而这些指标恰恰是目前临床研究中报告最不充分的部分^[20-21]。

4.4 冠部封闭与后续修复

活髓保存治疗的远期成败在很大程度上取决于冠部封闭的质量,这一点在既往文献中常被低估。其机制在于:即使牙髓创面愈合良好,一旦修复体边缘发生微渗漏,口腔细菌及其产物可持续经牙本质小管向髓腔扩散,重新激活炎症并最终导致治疗失败^[12,15]。因此,在完成牙髓处理后应力求在一次就诊中建立可靠的冠方封闭,并依据剩余牙体组织条件选择适当的修复方式(如薄弱后牙考虑保护性修复以降低牙折风险)^[12-13]。同时需注意硅酸钙类材料与树脂粘接的时序配合,部分材料需待其初步固化后再行粘接,以免影响边缘密合性^[20]。与根管治疗相比,活髓保存治疗后患牙牙髓感觉功能与生理反应性得以保留,这一特点在需长期承受咬合负荷的后牙及需避免过度磨除的年轻恒牙中尤为突出,也是活髓保存相对根管治疗的核心价值之一^[13-14]。

5 感染控制与再生性牙髓治疗

5.1 根管感染的微生物学机制

根管系统的解剖复杂性是感染难以彻底清除的根本原因。除主根管外,峡区、侧支根管、副根管与牙本质小管构成了机械预备难以触及的“死角”,研究显示部分复杂根管存在约 30%的根管壁未被清理^[22]。在一项关于顽固感染根管的研究中,检出的根尖段微生物群落里粪肠球菌占比可达 99.6%,提示其在特定感染情境下的重要性;但不同研究报道的 *E. faecalis* 检出率差异很大,且该同一文献也报告了放线菌属(54.1%)、链球菌属(44.7%)等其他菌属在根尖段的检出,说明根管感染本质上是多菌种协同的群落行为,不宜将 *E. faecalis* 视为所有持续性根尖周感染的唯一或普遍主导病原体^[22]。*E.*

faecalis 可在根管壁形成牢固附着的生物膜, 耐受寡营养与高碱性 ($\text{pH}>11.5$) 等极端环境, 并与疼痛等症状及根尖周组织持续炎症相关^[22]。近年来, 随着分子生物学检测手段的普及, 研究者认识到根管感染是多菌种协同的群落行为, 而非单一病原菌的感染, 这为理解慢性根尖周炎的持续存在提供了新视角^[22]。因此, 从致病机制角度深化对顽固感染的认识, 是提升根管治疗成功率的研究重点^[22]。

从临床应对看, 上述认识带来两方面的启示: 其一, 化学—机械预备的“彻底性”存在天然上限, 因而更应强调在有限清创基础上通过有效的冲洗与封药削减细菌负荷, 而非一味扩大预备锥度, 后者既削弱牙根抗折能力又无法换来更高的清除率; 其二, 防治策略应从“单一病原菌清除”转向“阻断毒力调控与生物膜形成”, 包括维持冲洗液的持续更新、避免将感染物推至根尖外、以及在封药环节选择具有抗生物膜能力的方案^[22]。此外, 对治疗后持续性感染病例, 应重视宿主因素与感染负荷之间的平衡, 必要时通过外科手段去除根尖区域的生物膜储存库, 这也是显微根尖手术存在价值的重要机制基础之一^[22]。

在研究方法层面, 检测手段的进步改变了人们对根管感染的认识。传统的细菌培养只能检出可培养菌种, 且取样过程本身易受污染, 因而低估了根管内的微生物多样性; 而以 16S 核糖体 RNA 测序与宏基因组学为代表的分子生物学方法可在无需培养的条件下全面描绘群落构成, 揭示了包括厌氧菌、真菌与古菌在内的复杂群落结构^[22]。这一方法学进步带来两个临床启示: 其一, 既往基于单一菌种建立的体外抗菌证据, 其外推价值有限, 因为真实感染环境中的群落互作可能显著改变单个菌种对药物与冲洗液的敏感性; 其二, 疗效评价不应仅以“培养阴性”为标准, 而应结合临床症状与影像学愈合综合判断^[22]。未来若能将分子检测结果与临床结局相关联, 有望建立以微生物负荷与群落特征为依据的个体化治疗决策依据^[22]。

5.2 根管封药

根管封药是感染根管治疗的重要步骤, 通过在两次就诊之间将消毒药物置于根管内发挥抑菌、防止再感染与促进修复的作用^[23]。临床常用的氢氧化钙通过高碱性环境破坏细菌细胞膜与蛋白质结构, 但也存在作用谱有限、对粪肠球菌作用相对较弱、

留置时间过长可能影响牙本质机械性能等问题; 氯己定虽具良好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、耐药性顾虑以及导致牙冠变色的可能^[23]。分子生物学与纳米科技的进步推动了以抗菌肽、纳米颗粒为代表的新型抗菌药物的发展, 构成根管药物消毒的潜在方向: 抗菌肽通过破坏细菌膜结构发挥作用且不易诱导耐药, 纳米颗粒则兼具载药、缓释与渗透生物膜的能力^[23]。总体来看, 新型封药的研究多处于体外与动物实验阶段, 其临床转化仍需通过规范的临床试验验证有效性^[23]与安全性^[23]。

在具体选择上, 临床医师需要在药物特性、病例特点与治疗阶段三者之间取得平衡。就氢氧化钙而言, 其发挥作用依赖羟基离子的释放, 因而要求根管内保持一定湿度环境, 封药时间需权衡抑菌需要与对牙本质的影响, 但何为“适宜时长”尚缺乏统一结论, 应结合病例与临床指南把握; 就氯己定而言, 文献报道其与次氯酸钠接触后可产生有色沉淀并可能降低冲洗效果, 二者序贯使用时通常以生理盐水等适当溶剂充分间隔, 但这一现象对临床疗效的实际影响仍存在争议^[23]。此外, 近年提出的辅助消毒手段还包括光动力疗法与激光辅助消毒, 其原理是通过光敏剂产生活性氧或利用激光能量直接破坏细菌结构, 在体外研究中显示出对生物膜内细菌的杀灭能力, 但临床疗效与参数设置尚无统一标准^[23]。总体看来, 封药研究的评价难点在于缺乏公认的微生物学终点, 多数临床试验以症状与影像学愈合作为替代结局, 难以敏感地反映不同封药方案之间的差异, 这也部分解释了为何现有临床研究难以得出明确的优选方案^[23]。

5.3 再生性牙髓治疗

再生性牙髓治疗(regenerative endodontic therapy, RET)在临床实践中常指用于牙髓坏死(尤其年轻恒牙)病例的再生性程序, 以控制感染、诱导根尖出血与形成冠方封闭为核心; 而从组织工程角度, 真正意义上的牙髓—牙本质复合体再生还涉及干细胞、支架与生长因子等要素的协同, 目前尚不能与常规血运重建术完全等同^[13,24]。对于冠髓弥漫性炎症或根髓炎症、难以实施活髓保存的患牙, 除根管治疗外, 牙髓血运重建可作为治疗选择^[13]。在系统评价层面, 有研究通过网络 Meta 分析比较了年轻恒牙牙髓坏死病例中不同支架选择对再生性治疗结局的影

响^[25]；另一项系统评价与 Meta 分析对再生性牙髓治疗后牙根发育情况进行了定量评价，报告了生存率与愈合率^[26]；针对牙髓坏死伴根尖周炎的年轻恒牙，亦有系统综述比较了再生性治疗与根尖诱导成形等方案的长期疗效^[27]。

再生性治疗的临床价值可从不同层次评价：在症状与根尖周愈合层面，其可在控制感染、缓解症状方面获得与传统根尖诱导成形术相当的效果；在牙根发育层面，部分病例可实现根管壁增厚与根长继续发育，从而降低薄弱牙根发生根折的风险，这对尚处于生长发育期的年轻恒牙尤为重要^[25-27]。但需强调，影像学显示的根管壁增厚或根长增加并不等同于正常牙髓组织已经再生——再生治疗后根管内出现的矿化组织沉积，其组织学构成未必是正常牙髓—牙本质复合体，因此仅凭根长、根管壁厚度或根尖闭合情况不能认定牙髓组织实现了功能性再生^[24-27]。同时需要注意几个技术要点与局限：第一，再生治疗后根管内常可观察到矿化组织沉积，这一现象在部分病例中甚至形成根管腔的广泛闭塞，一旦治疗失败需要再处理，根管通路的重新建立将极为困难；第二，部分充填材料与药物可导致牙冠变色，在前牙区影响美观；第三，疗效评价标准尚未统一，不同研究分别以症状消失、影像学阴影缩小、根长增加、根管壁增厚或根尖孔闭合等作为结局指标，导致证据间难以直接比较^[24-27]。国内研究对牙髓血运重建术后根管内矿化组织的形成机制与影响因素进行了综述，认为其与支架、冠部材料、残余细菌负荷及宿主细胞分化方向均有关联^[24]；临床病例报告亦显示，在牙体发育畸形伴根尖周炎的年轻恒牙中应用牙髓血运重建可获得根尖周病变愈合与牙根继续发育的效果^[28]。

在标准操作流程层面，目前较为通行的做法是两次就诊方案：首次就诊以温和的化学预备配合封药尽量降低根管内细菌负荷；复诊时在根管深部诱导出血形成以血凝块为支架的内源性环境，再以生物活性材料完成冠方封闭。该流程的关键环节包括：控制冲洗与预备的强度以保护根管壁与根尖区干细胞；确保诱导出血达到预定深度并形成稳定血凝块；以及依靠严密的冠部封闭防止再次感染^[13,24-25]。任何环节的失控——尤其是冠部封闭失效——都可能导致治疗失败并最终退化为根尖修复模式，因此对病例选择与操作细节的重视程度应与治疗的先进性

本身同等重要^[24-25]。

从组织工程的角度看，理想的再生性治疗依赖干细胞、支架与生长因子三要素的协同；但在当前临床实践中，常规血运重建主要依赖以血凝块为内源性支架、由血液归巢的间充质干细胞提供细胞来源，真正意义上由外源干细胞与生长因子介导的牙髓再生仍多处于实验研究阶段^[13,24-25]。具体而言，干细胞来源包括根尖乳头干细胞、牙髓干细胞与经血液归巢的间充质干细胞，其存活与分化以感染被有效控制为前提；支架为细胞黏附与增殖提供三维结构，血凝块是最常用的内源性支架，富血小板纤维蛋白等血液制品亦被作为替代方案加以比较^[25]；生长因子方面，牙本质基质中固有的转化生长因子等生物活性分子可在冲洗与预备过程中被释放并参与细胞分化调控，这也是近年强调避免过度、过强化学预备的原因之一^[13,24]。三要素中任一环节的缺失都可能使治疗退化为简单的根尖封闭，因此在临床操作中应尽量兼顾感染控制与生物学环境的保护，避免在追求彻底清创的同时破坏了再生所必需的细胞与基质条件^[24-25]。

5.4 年轻恒牙的治疗决策路径

年轻恒牙因牙根尚未发育完成、根管壁薄、根尖孔开放，其治疗决策与成熟恒牙有本质差异。核心目标是控制感染并尽可能保留牙根继续发育的潜能，因为牙根长度与根管壁厚度直接决定了患牙的长期抗折能力与存留率^[24-25]。目前可供选择的方案主要包括三类：根尖诱导成形术、以矿物三氧化物凝聚体等材料形成根尖屏障的根尖封闭术，以及再生性牙髓治疗^[25-27]。

三者的适用情形各有侧重。根尖诱导成形术通过长期封药诱导根尖形成钙化屏障，其疗程长、需多次复诊，且形成的屏障形态不规则、封闭效果难以预测，同时长期封药可能影响牙根的继续发育与抗折性能^[27]。根尖屏障术可在较短时间内完成，通过根尖段置入生物活性材料形成人工止点，操作可控性较好，但不能促进牙根继续发育，因而对牙根严重短小者长期预后仍不理想^[27]。再生性治疗则在控制感染的基础上，通过诱导根尖出血引入干细胞与生长因子，有可能实现根管壁增厚与牙根延长，从生物学上最接近“恢复器官功能”的目标，但其疗效受感染控制质量、支架形成与冠部封闭等多环节影响，个体差异较大^[24-26]。

因此,在选择方案时应遵循“先控制感染、再评估发育潜能”的顺序:若患牙仍有牙髓活力且炎症局限于冠部,应优先考虑活髓保存治疗;若牙髓已坏死但根尖区感染可控、牙根发育潜力尚存,可考虑再生性治疗;若感染难以控制或牙根发育潜力有限,则宜采用根尖屏障术以确保可预期的封闭效果^[13,25-27]。无论采取何种方案,严密的冠部封闭、规范的随访与对牙根发育指标的动态观察都是评价疗效的必要环节^[24-26]。

6 结语与展望

牙髓及根尖周疾病的诊疗技术正沿着诊断客观化、治疗微创化与过程数字化方向发展。CBCT的规范化应用与人工智能影像识别显示出改善龋病与根尖周病病变识别的潜力,但其适用边界的把握与模型的临床效用验证仍需加强^[1,3,7];脉搏血氧测定与激光多普勒血流测量可为牙髓状态评估提供客观信息,但设备专用化、干扰因素控制与操作流程标准化尚待推进^[10-11];以硅酸钙类生物活性材料为基础的活髓保存治疗已由年轻恒牙扩展至成熟恒牙,并积累了较多随机对照试验与系统评价证据,但远期疗效评价仍需延长随访^[12,17-19];根管感染的微生物学机制研究、新型封药与再生性治疗共同拓展了保存患牙的技术路径^[22-23,25]。今后可在以下方向深入:第一,开展人工智能诊断模型的多中心外部验证与临床效用评价,建立统一的图像标注标准与数据集;第二,推进牙髓血供检测设备的专用化与影响因素研究,明确其在年轻恒牙与外伤牙中的判读阈值;第三,延长活髓保存治疗与再生性治疗的随访周期,并建立涵盖临床症状、根尖周愈合、牙根发育、牙髓活力与组织学证据的多层次疗效评价标准;第四,推动抗菌肽、纳米颗粒等新型封药材料从体外研究向规范临床试验转化。

除上述技术与材料层面的方向外,诊疗组织方式同样值得反思。其一,活髓保存治疗与再生性治疗对无菌操作、显微设备与材料储备均有较高要求,其在基层医疗机构的推广需要与人员培训和设备配置同步推进,否则技术层面的进步难以转化为实际的患牙保存率提升^[12,15]。其二,牙髓及根尖周疾病的诊疗决策日益依赖多学科协作,牙髓治疗、牙周治疗、修复与正畸之间的先后顺序与相互影响需要在治疗计划阶段统筹考虑,单一学科的视角容易导致治疗反复^[1-2]。其三,患者对“保留活髓”等理念的

认知程度直接影响治疗选择,加强健康教育、使患者理解不同方案的利弊与费用—疗效权衡,是技术规范落地不可或缺的环节^[13-14]。综上,牙髓及根尖周疾病诊疗的进步既来自影像、材料与再生技术的突破,也来自诊断流程的规范化与治疗决策的个体化;未来只有在两个方向上同步推进,才能真正实现“尽可能保留天然牙及其功能”这一目标^[1-3]。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 姜葳,梁景平.牙髓根尖周病的诊断技术进展概述[J].中华口腔医学杂志,2022,57(3):227-232.
- [3] 庞亮月,林焕彩.人工智能在龋病诊疗中的应用[J].中华口腔医学研究杂志(电子版),2023,17(3):162-166.
- [4] Mertens S, Krois J, Cantu A G, et al. Artificial intelligence for caries detection: randomized trial[J]. J Dent, 2021, 115: 103849.
- [5] Kühnisch J, Meyer O, Hesenius M, et al. Caries detection on intraoral images using artificial intelligence[J]. J Dent Res, 2022, 101(2): 158-165.
- [6] Schwendicke F, Elhennawy K, Paris S, et al. Deep learning for caries lesion detection in near-infrared light transillumination images: a pilot study[J]. J Dent, 2020, 92: 103260.
- [7] Albano D, Galiano V, Basile M, et al. Artificial intelligence for radiographic imaging detection of caries lesions: a systematic review[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 274.
- [8] Li S, Liu J, Zhou Z, et al. Artificial intelligence for caries and periapical periodontitis detection[J]. J Dent, 2022, 122: 104107.
- [9] Esmacilyfard R, Bonyadifard H, Paknahad M. Dental caries detection and classification in CBCT images using deep learning[J]. Int Dent J, 2024, 74(2): 328-334.
- [10] Almudever-Garcia A, Forner L, Sanz J L, et al. Pulse oximetry as a diagnostic tool to determine pulp vitality: a systematic review[J]. Appl Sci, 2021, 11(6): 2747.
- [11] Belcheva A, Shindova M, Hanna R. Efficacy of laser Doppler

- flowmetry, as a diagnostic tool in assessing pulp vitality of traumatised teeth: a split mouth clinical study[J]. *J Pers Med*, 2021, 11(8): 801.
- [12] 中华口腔医学会牙体牙髓病学专业委员会. 恒牙活髓保存治疗专家共识[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(8): 785-792.
- [13] 何文喜, 余擎. 牙髓炎的活髓保存及再生治疗新进展: 从基础到临床[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(1): 16-22.
- [14] Duncan H F. Present status and future directions: vital pulp treatment and pulp preservation strategies[J]. *Int Endod J*, 2022, 55(Suppl 3): 497-511.
- [15] 陈嘉琪, 董艳梅. 龋源性露髓成熟恒牙活髓保存治疗的研究进展[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(1): 95-100.
- [16] Santos J M, Pereira J F, Marques A, et al. Vital pulp therapy in permanent mature posterior teeth with symptomatic irreversible pulpitis: a systematic review of treatment outcomes[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2021, 57(6): 573.
- [17] Silva E J N L, Pinto K P, Belladonna F G, et al. Success rate of permanent teeth pulpotomy using bioactive materials: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J]. *Int Endod J*, 2023, 56(9): 1024-1041.
- [18] Wang W, Zeng Q, Li Y, et al. Effectiveness of pulpotomy in managing carious exposure in mature permanent teeth: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Dent*, 2024, 150: 105392.
- [19] Kahler B, Taha N A, Lu J, et al. Vital pulp therapy for permanent teeth with diagnosis of irreversible pulpitis: biological basis and outcome[J]. *Aust Dent J*, 2023, 68(Suppl 1): S110-S122.
- [20] 张露, 陈智. 生物活性材料在牙髓治疗中的应用[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(1): 31-37.
- [21] Kim B, Lee Y H, Kim I H, et al. Biocompatibility and mineralization potential of new calcium silicate cements[J]. *J Dent Sci*, 2023, 18(3): 1189-1198.
- [22] 胡涛, 雷蕾, 周学东. 顽固感染根管内粪肠球菌的致病机制及其控制方法进展[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(1): 10-15.
- [23] 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.
- [24] 高碧聪, 吕柯佳, 沈晨露, 等. 牙髓血运重建术后根管矿化组织形成的研究进展[J]. *口腔医学*, 2022, 42(6): 571-576.
- [25] Sabeti M, Ghobrial D, Zanjir M, et al. Treatment outcomes of regenerative endodontic therapy in immature permanent teeth with pulpal necrosis: a systematic review and network meta-analysis[J]. *Int Endod J*, 2024, 57(3): 238-255.
- [26] Ong T K, Lim G S, Singh M, et al. Quantitative assessment of root development after regenerative endodontic therapy: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Endod*, 2020, 46(12): 1856-1866.e2.
- [27] Wikström A, Brundin M, Lopes M F, et al. What is the best long-term treatment modality for immature permanent teeth with pulp necrosis and apical periodontitis?[J]. *Eur Arch Paediatr Dent*, 2021, 22(3): 311-340.
- [28] 袁婧, 余思静, 游梦, 等. 上颌侧切牙年轻恒牙中牙伴根尖周炎的牙髓血运重建治疗 1 例[J]. *华西口腔医学杂志*, 2022, 40(6): 716-720.
- 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**