

· 专家笔谈 ·

成熟恒牙牙髓炎活髓保存的材料与技术研究进展

张露月¹ 李志翼¹ 崔钰嘉² 孙建勋¹

¹口腔疾病防治全国重点实验室,国家口腔疾病临床医学研究中心,四川大学华西口腔医院牙体牙髓病科,成都 610041; ²口腔疾病防治全国重点实验室,国家口腔疾病临床医学研究中心,四川大学华西口腔医院儿童口腔科,成都 610041

通信作者:孙建勋,Email:jxsun@scu.edu.cn



孙建勋

【摘要】 成熟恒牙牙髓炎的传统治疗以根管治疗(RCT)为主,但其存在治疗周期长、费用较高、需去除全部牙髓组织和术后牙体抗折能力下降等问题。活髓保存治疗(VPT)以去除感染牙髓组织、严密封闭及生物活性材料诱导修复为核心,近年来在材料学与临床技术推动下,已从主要用于可复性牙髓炎及年轻恒牙逐步扩展至部

分成熟恒牙、症状提示不可复性牙髓炎的病例管理。本文按照临床流程,综述成熟恒牙牙髓炎VPT的诊断与术前评估、去龋策略、盖髓与活髓切断术式、材料进展、物理辅助技术及随访评估,并对现有证据的局限、争议与未来研究方向进行辩证讨论,以期临床决策与规范化操作提供参考。

【关键词】 活髓保存; 成熟恒牙; 牙髓炎; 生物材料; 临床技术

基金项目:国家自然科学基金(82571080);四川省自然科学基金(2025ZNSFSC0381);四川大学华西口腔医院探索与研发项目交叉学科创新项目(RD-03-202406)

引用著录格式:张露月,李志翼,崔钰嘉,等.成熟恒牙牙髓炎活髓保存的材料与技术研究进展[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2026,20(3):175-188.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.03.003

Research advances in materials and techniques for vital pulp preservation in permanent teeth pulpitis

Zhang Luyue¹, Li Zhiyi¹, Cui Yujia², Sun Jianxun¹

¹State Key Laboratory of Oral Diseases, National Clinical Research Center for Oral Diseases, Department of Cariology and Endodontics, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China; ²State Key Laboratory of Oral Diseases, National Clinical Research Center for Oral Diseases, Department of Pediatric Dentistry, West China Hospital

of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China
Corresponding author: Sun Jianxun, Email: jxsun@scu.edu.cn

【Abstract】 Conventional management of permanent tooth pulpitis predominantly involves root canal therapy (RCT), which is associated with several limitations, including prolonged treatment time, increased costs, the necessity for complete removal of pulp tissue, and diminished postoperative fracture resistance of the tooth. Vital pulp therapy (VPT), which focuses on excising infected or inflamed pulp tissue, establishing an effective seal, and employing bioactive materials to promote tissue repair, has recently broadened its application. Initially reserved for reversible pulpitis and immature permanent teeth, VPT is now increasingly utilized in selected cases involving mature permanent teeth and clinical presentations suggestive of irreversible pulpitis, facilitated by advancements in biomaterials and clinical methodologies. This review examines the diagnostic and preoperative evaluation processes, caries excavation techniques, pulp capping and pulpotomy procedures, innovations in therapeutic materials, adjunctive physical technologies, and follow-up assessment protocols pertinent to VPT in mature permanent teeth, structured according to the clinical workflow. Furthermore, it critically appraises the current limitations, ongoing debates, and prospective research avenues within the existing literature, with the objective of informing clinical decision-making and promoting standardized treatment practices.

【Key words】 Vital pulp therapy; Mature permanent teeth; Pulpitis; Biomaterials; Clinical techniques

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (82571080); Natural Science Foundation of Sichuan Province (2025ZNSFSC0381); Interdisciplinary Innovation Project of West China Hospital of Stomatology, Sichuan University(RD-03-202406)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.03.003

长期以来,对于临床诊断为不可复性牙髓炎成熟恒牙,根管治疗(root canal therapy, RCT)被视为最常采用的处理策略,其核心路径通常包含对感染坏死或高度炎症牙髓的去除、根管系统机械化学预备与三维充填,并依赖修复实现冠方长期密闭^[1]。然而, RCT在临床实践中存在一定的局限,其治疗过程往往更复杂、更耗时,治疗费用与患者时间成本更高,对术者技术与器械系统的依赖度较大;更重要的是,从治疗理念上, RCT需要对根管系统内牙髓组织进行全部去除。

去除全部牙髓组织后,牙体组织与生物学功能层面也将受到影响。牙髓-牙本质复合体不仅承担感觉功能,更参与牙本质形成、免疫防御与损伤修复;当牙髓失活后,牙体在疾病本身与治疗过程双重作用下结构被削弱,临床上需面对治疗后修复策略复杂化的问题。尽管 RCT后的患牙通常能够获得较高的长期保存率,但其结构预后与剩余牙体组织量、RCT过程中的牙体组织去除范围及后续修复设计密切相关^[2-3]。与活髓牙相比, RCT后的患牙在结构保护和冠方修复方面往往需要更谨慎的策略,折裂风险也受到多因素共同影响,而非单一由失髓状态决定^[4]。

在此背景下,活髓保存治疗(vital pulp therapy, VPT)近年迎来快速发展。美国牙髓病协会(American Association of Endodontists, AAE)将 VPT 定义为“在牙髓因外伤、龋齿或修复操作受损后,保留牙髓活力和功能的手段”,其外延涵盖间接盖髓、选择性去龋/逐步去龋、直接盖髓,以及部分或全部冠髓切断等一系列以控制感染与炎症、保留根髓活力为目标的术式^[5]。其适用范围已从乳牙及年轻恒牙逐步拓展至经过严格病例筛选的部分成熟恒牙牙髓炎病例,尤其是可实现无菌操作、可靠冠方封闭并可在术中完成再评估的患牙。牙髓炎症是一个渐进的过程,炎症早期往往局限于冠髓表层,其深部及根髓组织可能仍保持健康。因此,保留具有免疫防御、营养代谢及本体感觉功能的活髓组织,对于维持牙齿的长期留存至关重要。新材料与新技术的涌现,使得界定牙髓炎症范围并诱导修复性牙本质形成成为可能^[6-8]。

本文按照治疗流程,系统梳理用于成熟恒牙牙髓炎 VPT 的新材料和新技术,旨在促进成熟恒牙牙髓炎 VPT 的临床应用与发展。

一、诊断与术前评估

近年的指南与共识强调,传统“可复性/不可复

性牙髓炎”的二分法更多建立在症状与感觉测试之上,而牙髓炎在真实组织学层面呈现时间-空间连续谱,炎症常在冠髓浅层,冠髓深层和根髓仍可能保留一定修复与免疫防御能力,近年来的证据表明,症状提示不可复性牙髓炎并不必然等同于需直接行 RCT;但这并不意味着 VPT 可广泛替代 RCT,而是提示在严格病例选择、感染控制、可靠封闭及术中再评估条件下,部分成熟恒牙病例可谨慎考虑 VPT^[5,9-10]。

在这一范式转换下,诊断与术前评估的目标不再是追求某个单一检查的绝对判断,而是通过多维信息回答3个关键问题^[6,11]:(1)牙髓是否仍存活,且是否存在可保留的部分健康牙髓?(2)感染源是否可在无菌操作与完善封闭下被有效控制?(3)患牙是否具备长期成功所必需的可修复性与冠方封闭条件?

1. 传统检查的局限性:患者的主诉与疼痛史仍是首要入口,但其本质反映的是疼痛通路与神经敏化,并不能等同于炎症的真实范围与深度。AAE指出,临床常规用于牙髓诊断的冷测/牙髓电活力测试(electrical pulp test, EPT)更准确的名称应为牙髓感觉测试(sensibility tests)^[5],它们评估的是神经反应而非血供状态^[12];现有系统综述表明,基于症状、感觉测试和常规影像的临床牙髓诊断与真实组织学状态并不完全一致^[13]。但是,这种不一致并不意味着检查无用,而提示应采用全面的组合证据与动态再评估来决定 VPT 方法(间接盖髓、直接盖髓、部分或全部冠髓切断)。

目前,常用的传统临床检查包含冷测/EPT、叩诊与影像学检查。冷测/EPT受牙本质厚度、髓腔钙化、外伤史和操作差异等影响,其本质上属于感觉测试,反映的是神经反应而非牙髓真实血供状态,因此可能存在假阴性或假阳性结果^[14],除操作差异外,年龄增长所致的继发性牙本质沉积、髓腔钙化或管腔变窄、全冠或大面积修复体覆盖、既往外伤后短期神经反应迟钝等情况,均可能导致假阴性或结果偏差。换言之,临床上测试无反应并不必然代表牙髓失活,尤其在外伤牙、钙化牙及大范围修复牙中更应结合病史、影像学及必要时的术中表现综合判断^[15-17]。

叩诊多提示根尖周膜机械性痛觉异常,属于炎症影响向根尖周扩展的间接信号,但并不能确定牙髓是否坏死^[18];根尖片或咬翼片能对龋损深度、髓室或根管形态、根尖周透射影等提供关键证据,但

二维影像受重叠与分辨率限制,且根尖周早期炎症可能尚未形成明确骨质改变^[19]。因此,在VPT病例选择中,传统检查更适合作为排除明显禁忌证(如脓肿/窦道、明确牙髓坏死与广泛根尖周病变、不可修复等)与建立初步分层的工具,而不应仅依据单项检查结果就作出必须进行RCT或不可保髓的结论。

为弥补“可复性/不可复性牙髓炎”与组织学不匹配的问题,近年学界提出“轻/中/重度牙髓炎(initial/mild/moderate/severe pulpitis)”等分级概念,强调疾病在时间与空间上连续变化,并与治疗强度建立更可操作的对应关系^[20],许多被诊断为不可逆性牙髓炎的牙髓,在接受微创或保守治疗后,仍可能保留自我修复的能力。这表明,由刺激引发的持续性疼痛通常被视为不可逆性牙髓炎的明确指标,并不总是反映整个牙髓组织处于不可逆的炎症状态。具体而言,对温度刺激出现延迟且持续的疼痛,通常仅表明牙髓腔内局部区域的牙髓组织已发生不可逆性炎症。因此,对牙髓炎症状进行细致评估,并实施精确的牙髓诊断至关重要,治疗决策应基于全面的评估结果^[21]。

2. 诊断新技术:传统检查的核心短板在于多数椅旁测试无法直接回答牙髓血供是否存在、活力是

否维持、炎症是否可逆。因此,近年来以血流或血氧、软组织成像、分子标志物和人工智能(artificial intelligence, AI)辅助识别等为代表的新工具成为前沿方向。这些新技术在提高诊断客观性和减少操作者间差异方面具有潜在价值,但其证据成熟度、临床可及性和标准化程度并不一致,目前多仍处于补充性或探索性应用阶段,尚不能替代“临床检查-影像评估-术中再评估”构成的综合决策链条。表1对传统诊断方法与新兴诊断技术的检测对象、优势、局限和临床可及性进行了归纳,呈现不同方法在成熟恒牙牙髓炎VPT决策中的实际定位。

(1)激光多普勒血流仪(laser Doppler flowmetry, LDF)与脉搏血氧/组织氧饱和度监测:LDF基于多普勒效应检测红细胞运动引起的频移,能在非侵入条件下反映牙髓微循环灌注^[24];组织氧监测或脉搏血氧技术则通过光谱吸收差异估算组织氧饱和度^[28,30],两者共同指向血供与氧合这一更接近牙髓活力本质的指标。系统评价与循证综述提示,在以参考标准(如直接观察/出血、组织学或明确临床结局)对照时,LDF与脉搏血氧往往表现出较高的诊断准确性,被认为是当前活力测试方向最接近理想指标的工具之一^[25]。

表1 成熟恒牙牙髓炎活髓保存治疗(VPT)传统诊断方法与新兴诊断技术比较

类别	方法	检测对象	优势	局限	临床可及性
传统方法	冷测/EPT	牙髓神经反应(感觉测试)。	操作简便,成本低,临床普及度高,可快速初筛牙髓反应 ^[13,17] 。	反映神经反应而非血流,主观性强(依赖患者反馈),受钙化、修复体、外伤等影响可出现假阴性或解释偏差 ^[14-17,22] 。	极高
	叩诊	根尖周膜与根尖周组织的机械敏感性。	操作简便,无设备需求,有助于评估根尖周状态 ^[13] 。	非特异性,无法直接判断牙髓活力,易受牙周或咬合因素干扰 ^[18] 。	极高
	根尖片/咬翼片	龋深、髓室/根管形态、既往修复情况、根尖周骨性改变。	临床普及度高,价格低,评估龋深与髓腔关系,可观察根尖周改变 ^[13,22] 。	存在重叠与空间信息缺失;对早期炎症不敏感,无法直接判断牙髓活力 ^[19,23] 。	高
新兴技术	LDF	牙髓微循环/血流灌注。	直接反映牙髓血流,客观性高,非侵入性,不依赖患者主观反馈 ^[24-25] 。	设备昂贵,操作复杂,易受环境干扰(如运动、温度),标准化不足 ^[15,26-29] 。	低
	SpO ₂ /StO ₂ 监测	牙髓氧合状态。	反映血氧饱和度,客观性高,无创检测 ^[25,28,30] 。	受牙体厚度、光散射影响,灵敏度与特异性有限,缺乏统一阈值标准 ^[15,26-29] 。	低
	MRI	牙髓及根尖周软组织、血管化特征、部分炎症相关信号。	无电离辐射,软组织分辨率高,可评估牙髓结构与状态 ^[31-33] 。	设备昂贵,可及性差,扫描时间长,对金属修复体敏感 ^[33-34] 。	低
	分子标志物	炎症介质、细胞因子、MMP和CRP等分子水平。	直接反映炎症状态,有助于炎症分级 ^[35-36] 。	取样困难,检测平台不统一,阈值标准缺乏,成本高 ^[37-39] 。	低
	AI辅助识别	影像中的龋损、近髓龋、露髓风险、根尖周病变、根管形态等模式识别。	自动化分析,提高诊断一致性,可处理复杂影像数据 ^[40] 。	依赖训练数据质量,外部验证不足,可解释性有限 ^[41-42] 。	中

注:EPT为牙髓电活力测试;LDF为激光多普勒血流仪;SpO₂为脉搏血氧饱和度;StO₂为组织氧饱和度;MRI为磁共振成像;MMP为基质金属蛋白酶;CRP为C反应蛋白;AI为人工智能;临床可及性为基于近五年文献对设备需求、标准化程度及推广障碍的综合归纳。

现有研究认为,这类方法更适合作为传统检查的补充性客观工具,而非其常规替代方案。其主要原因在于操作敏感、成本与标准化不足且对炎症范围仍是间接推断。LDF与脉搏血氧饱和度(peripheral oxygen saturation, SpO_2)/组织氧饱和度(tissue oxygen saturation, StO_2)监测技术对探头稳定性、隔湿、环境光、牙龈血流干扰和个体解剖差异较敏感,缺乏统一的校准体系,跨设备与跨医疗机构的结果可比性有限,除此之外,血流存在并不等于炎症轻微,仍需结合症状、影像与术中止血特征综合判断^[26-27]。其相对更有应用价值的情形主要包括外伤牙的连续随访,尤其是在早期感觉测试可能因神经反应暂时受抑而失真的情况,以及修复体覆盖等导致传统感觉测试结果不可靠的病例。需要注意的是,外伤早期牙髓灌注本身亦可能短暂下降,因此即使是LDF或氧饱和度监测,也应结合病史、影像学表现及随访结果综合判断。对于VPT术后病例,这类方法可用于研究性或选择性随访中的客观活力监测,但目前仍受设备适配、标准化流程不足等因素限制,尚未成为常规临床随访手段^[15,28]。

(2)磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI):MRI具有无电离辐射和较高软组织分辨率的优势,在牙髓及根尖周软组织显示方面具有潜在价值。已有文献提示,牙科MRI及无线口内线圈技术在分辨率和临床可行性方面已有进展,但其应用仍主要限于研究或有限临床场景,尚不能作为成熟恒牙牙髓炎VPT术前评估的常规工具^[31]。一项用于评估牙髓及根尖周病变的牙科MRI研究中,分辨率已达到约0.7 mm,并在无需造影剂的情况下显示牙髓血管化特征、区分健康与炎症牙髓;此外,MRI可通过灌注信号变化提示坏死及更早期的根尖周炎性改变^[31]。更具临床转化潜力的是,无线口内线圈可在短时间内获得更高分辨率的牙科MRI图像,提示其有潜力用于干预规划与术后监测,并且针对临床可行参数的优化研究也在持续推进^[32-33]。

然而,MRI在当前阶段仍主要处于研究与探索阶段,其设备可及性不足、成本较高、扫描时间相对较长且对扫描过程中的受试者运动(如吞咽、呼吸及舌体的细微运动)较为敏感与口内线圈舒适性较差等因素限制了其发展,金属修复体与正畸装置可能造成显著伪影,诊断阈值仍缺乏大规模、多中心临床验证^[34]。值得关注的是,产业界已开始推动牙科专用MRI系统研发,表明该技术可能在未来进入

更广泛的口腔影像学工具箱^[33],但距离常规VPT术前检查仍有待时日。

(3)分子标志物:分子标志物检测是当前牙髓精准诊断中最具转化潜力的方向之一,其核心目标是通过客观分子信号反映牙髓炎症负荷,而不再仅依赖症状和感觉测试^[35]。在缺乏直接活体炎症分型工具的背景下,可以通过对牙本质液(无需露髓)^[36]或牙髓血液(露髓后)^[39]进行即时检测,评估与组织降解或炎症相关的分子标志物。近年研究关注的候选标志物主要包括基质金属蛋白酶类(matrix metalloproteinase, MMP)、白细胞介素家族(interleukin, IL)、肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、C反应蛋白(C-reactive protein, CRP)及其他与炎症反应和细胞外基质降解相关的分子^[22]。系统综述和转化研究提示,这些标志物在不可复性牙髓炎、牙髓坏死及健康牙髓之间可能存在表达差异,并有望用于建立更客观的炎症分层和即时检测体系^[35,38,43-44]。

既往研究亦强调细胞因子等炎症介质在牙髓炎诊断与VPT决策中的潜在价值。但需要辩证指出,标志物检测目前仍受样本获取、检测平台标准化、阈值设定与成本等因素制约,缺乏与长期临床结局稳定关联的标准化证据,尚不足以替代临床-影像-术中再评估的决策链条,更适合作为未来精准VPT的关键突破口^[37-38]。

(4)AI辅助识别:AI在牙体牙髓影像分析中的发展较快,在病理性露髓识别、近髓龋筛查及部分影像学异常判读方面显示出较高潜力。其主要价值在于提高判读一致性、减少重复性工作并为临床提供辅助性风险提示。多中心研究显示,AI模型可在根尖片上对露髓/未露髓做出较高性能的内部验证,并在部分指标上优于临床医师组的共识判读^[40]。

但是,目前相关证据仍以回顾性和实验性研究为主,外部验证和真实世界临床验证相对不足,且模型表现受数据集质量、影像协议、金属伪影和标注标准差异等因素影响较大。因此,AI在VPT决策中仅能起到辅助作用^[41],最终治疗等级仍必须回到可控感染、可封闭性、术中牙髓反应这些生物学与操作学核心^[42]。

即便采用最先进的术前工具,成熟恒牙牙髓炎是否适合保留根髓,仍常需依赖术中直接观察与止血反应来完成最终分流。AAE立场声明与我国牙髓专家共识均指出,在显微镜下对牙髓组织颜色、质地、出血量与止血可达性进行再评估,是决定继

续VPT还是转RCT的关键节点^[5-6]。同时需要强调的是,当前证据并不支持将VPT视为成熟恒牙牙髓炎的普遍替代治疗。对症状提示不可复性牙髓炎的成熟恒牙,仅在满足严格病例选择的前提下方可考虑VPT,包括患牙具有保留价值且可修复;可在橡皮障隔离和无菌条件下完成治疗;冠方能够获得可靠、持久的封闭;术中牙髓组织经去除表层受累组织后获得止血可控的创面。相对而言,若存在无法控制的感染、无法修复的冠部缺损、明确且范围较大的根尖周病变、脓肿或窦道、术中持续无法控制的出血,或进一步暴露出明显坏死或化脓征象,则应慎重评估并倾向选择RCT^[6,13,45]。

二、去龋

去龋并非单纯的操作步骤,更是VPT的病因控制与术中再评估窗口。去龋方式、龋坏识别手段与无菌管理将直接影响真实牙髓状态的暴露与判断,从而决定最终采用何种VPT方式。欧洲牙髓病学学会(European Society of Endodontology, ESE)关于深龋与露髓管理的立场文件明确提出,对深龋和极深龋的治疗应在橡皮障隔离、牙体消毒、无菌器械条件下进行,必要时辅以放大视野与消毒冲洗,以优化VPT结局^[11]。

1. 传统方法检测龋坏的局限性:传统操作往往倾向于将龋坏“清到硬”(non-selective carious-tissue removal to hard dentine)^[11]。然而在深龋(尤其接近髓角或髓室顶的龋损)中,这一做法会显著增加意外露髓发生率,并将治疗推向更具侵入性的牙髓切断乃至RCT^[46-47]。现代循证与共识已逐步否定深龋必须“清到硬”的单一目标。ESE立场文件指出,在深龋病例中,非选择性(完全)去龋已不再被视为首选,近期共识认为其可能构成过度治疗^[48],更倡导选择性去龋或分步去龋以降低露髓风险、维护牙髓健康。

在深龋去除中,临床常用颜色、湿度和触感硬度(刮挖阻力)来判断龋损进展前沿,但这存在天然主观性。深龋底部牙本质常呈深色或湿润,即便已转为受累牙本质(可再矿化、菌量低),仍可能被误判为感染牙本质而被过度去除;髓角区牙本质更接近髓腔、矿化程度和管径分布不同,单纯依赖探针容易造成医师间差异;影像学(根尖片/咬翼片)能提示龋深与髓腔关系,但无法实时显示残余感染牙本质的边界,更难指导术中每一步的去龋终点^[49-50]。

2. 龋坏检测新技术:新型龋坏检测技术的共同目标是在避免遗漏感染牙本质与避免过度去除受

累牙本质导致露髓之间建立更稳定的平衡,尤其服务于深龋与VPT场景下的微创去龋(minimally invasive excavation)。

(1) 龋检测染色剂(caries detector dyes):龋染色剂操作简便、成本低,能在一定程度上辅助识别软化、有机基质暴露较多的牙本质区域。但是龋染色剂多为非特异性蛋白染色,并不直接染细菌,而是更倾向染色低矿化牙本质的有机基质,因此可能将正常近髓牙本质或受累牙本质也染色,造成过度去除与非必要露髓风险^[51]。

(2) 激光荧光(laser fluorescence):激光荧光设备通过检测龋相关代谢产物(如卟啉类)所产生的荧光信号,辅助识别龋坏或残余感染牙本质。既往系统综述与Meta分析显示,荧光法总体具有一定诊断价值,尤其在进展的龋损中表现更好^[52]。例如DIAGNOdent对早期龋检测准确率高达80%~90%^[53]。这种温和的测量方法可以减少手用挖器的使用,减少对健康牙釉质的磨除,实现微创治疗,从而提高患者的接受度^[54]。

但是荧光法结果易受牙面菌斑、牙石、色素沉着、部分修复材料或粘接剂残留等影响产生假阳性,不同的设备或阈值设定、操作者清洁与干燥标准不一也会影响可重复性,且深龋底部受累牙本质与需去除的感染牙本质之间的界限仍非绝对,需要与触感分级、临床经验结合^[55]。激光荧光更适合用于选择性去龋的补充验证,而不是替代临床硬度终点,其最大意义在于帮助减少主观差异,并在不增加露髓风险的前提下优化去龋质量^[56]。

(3) 光学相干断层成像(optical coherence tomography, OCT):OCT利用近红外光获得牙体组织的高分辨率断层图像,可在无辐射条件下显示牙釉质及牙本质结构变化,具备早期龋损检测、龋深评估,以及部分情况下对裂纹和修复体边缘缺陷的辅助识别潜力^[57]。OCT包括扫频型光学相干断层成像(swept-source optical coherence tomography, SS-OCT)和交叉偏振光学相干断层成像(cross-polarization optical coherence tomography, CP-OCT)等,在龋检测与监测方面显示出较高潜力。一项对咬合面釉质龋的诊断实验表明,对于临床经验不足的检查者使用SS-OCT进行检查的结果与经过校准的牙医的最终诊断结果高度一致^[58]。然而,在未来的研究中仍须考虑解决一些局限性,例如设备成本与临床普及度仍有限,口内不同部位的探头可达

性、成像角度与牙面湿度影响图像质量等^[59]。

因此,龋检测染色剂、激光荧光和 OCT 等技术可作为深龋微创去除的辅助工具,但目前尚不能单独决定去龋终点,应结合龋损部位、牙本质硬度、术者经验、放大视野及术中牙髓反应综合判断。

三、盖髓与活髓切断

在完成术前诊断、评估及去龋之后,临床决策的核心转入在严格感染控制与可靠冠部封闭的前提下,依据术中牙髓创面的出血特征及止血时间对牙髓状态进行再评估,选择合适的活髓保存方式治疗,并配合生物活性材料与操作技术,尽可能实现可预测的临床疗效。如图 1 所示,成熟恒牙牙髓炎 VPT 不能仅凭“可复性/不可复性牙髓炎”的二分诊断直接决定治疗方式,而应该综合考虑症状表现、

牙髓感觉测试、影像学检查、术中露髓情况、次氯酸钠(sodium hypochlorite, NaOCl)辅助止血反应、创面再评估结果及冠方封闭条件等多方面信息而得出最终治疗决策。

1. 术式定义及选择:ESE 在关于深龋与露髓管理的立场声明中明确了 VPT 的范畴与术式定义,包括间接盖髓、直接盖髓、部分冠髓切断与全部冠髓切断等^[60],并强调深龋或露髓情境下应突出“微创、生物学导向、避免根尖周炎”的原则^[11]。

对于未露髓或仅剩薄层牙本质屏障的患牙倾向于选择间接盖髓(或选择性去龋后一步法/分步法),关键在于周边牙釉质牙本质完全清洁与可密封边缘,再以材料促进牙髓-牙本质复合体稳定;而点状或小范围露髓,污染可控、创面止血良好的患

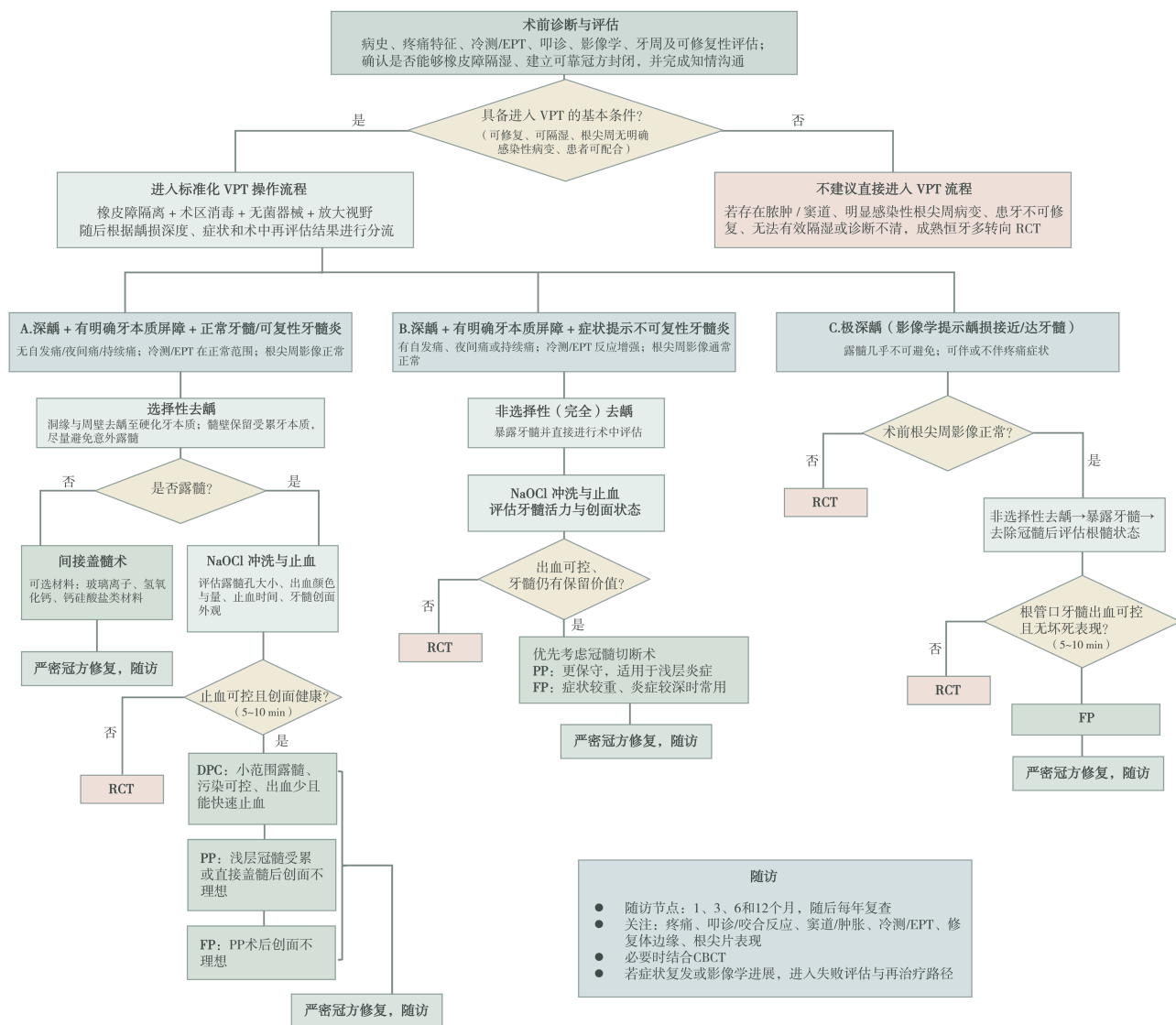


图1 成熟恒牙牙髓炎活髓保存治疗(VPT)诊疗路径流程图
NaOCl:次氯酸钠;EPT:牙髓电活力测试;CBCT:锥形束CT。

DPC:直接盖髓术;PP:部分冠髓切断术;FP:全部冠髓切断术;RCT:根管治

牙,应选择直接盖髓;对于龋源性露髓或症状提示炎症更深但希望保留根髓的病例,可选择部分冠髓切断或全部冠髓切断^[61]。ESE认为,在严格无菌条件下,部分或全部冠髓切断可作为深龋露髓后的重要选择;但对于“症状提示不可复性牙髓炎”的病例,需更高质量长期证据支持,并强调无菌前提与感染控制的重要性。AAE则更明确地指出,即使是临床不可复性牙髓炎,仍可能存在适合VPT的病例^[5,11]。

2. 术中感染控制与创面再评估:ESE在深龋管理声明中强调,深龋处理全程应使用橡皮障与无菌操作,对于Class II(龋源污染区露髓),更应采用“增强流程(enhanced operative protocol)”,即在放大视野下完成创面处理,使用消毒冲洗液清洁露髓创面,并以水硬性硅酸钙类材料进行盖髓后立即完成永久修复。AAE同样强调,露髓后的诊断分层与治疗决策很大程度上依赖于对牙髓创面的直视观察及止血后的组织评估,应在橡皮障隔离与术野消毒的条件下建立可控的无菌操作环境,并使用显微镜在放大视野下观察牙髓组织外观与止血情况,以判断炎症程度并识别可能需要去除的坏死组织。并且,将NaOCl定位为VPT中极关键的溶液,兼具止血、消毒、界面生物膜清除、化学去除血凝块和纤维蛋白、清除牙本质碎屑与损伤细胞等作用^[5,11],NaOCl实现止血通常通过被动冲洗或NaOCl浸湿棉球作用于创面,持续约5~10 min^[62-63]。NaOCl可在直接接触牙髓组织的情况下安全使用,临床常见应用浓度范围为0.5%~5%^[11,64],且不影响牙髓修复相关的细胞募集、分化与硬组织沉积过程^[65-66]。

需要强调的是,临床上难以直接证明细菌或感染已完全清除,更常采用术中可观察与可操作的替代指标来判断。在完成龋坏去除并获得清洁术野后,在放大视野下观察残余牙髓组织的颜色、质地与出血特征,并以止血所需时间作为重要分流参考。若在NaOCl辅助下可在5~10 min获得稳定止血,并暴露出外观更健康的创面,则可认为已达到相对干净的组织界面;若止血持续难以控制或暴露出提示不可逆受累/坏死的表现(存在黄色液化区域或暗色无出血区域、肉眼或显微镜下观察结构松散、组织破碎样、可见脓液等)^[67],则提示炎症可能更深,应继续去除部分冠髓组织,直至获得可评估且止血可控的创面;若在进一步去除后仍无法获得可控止血或出现明显坏死特征,则需重新评估是否应转为RCT^[68-69]。

3. 盖髓材料发展:盖髓材料的选择是影响VPT预后的关键因素之一^[70]。与传统氢氧化钙相比,水硬性硅酸钙类材料(hydraulic calcium silicate cement, HCSC)因具有较好的封闭性、生物相容性、碱性抗菌环境和诱导硬组织形成能力,已逐渐成为直接盖髓、部分冠髓切断和全部冠髓切断中的主流材料^[7]。现有研究中,矿物三氧化物凝聚体(mineral trioxide aggregate, MTA)仍是证据积累最充分的代表性材料,但其存在操作复杂、凝固时间较长和牙齿变色等不足^[71]。Biodentine、iRoot BP Plus和TotalFill等新一代或预混型硅酸钙基材料,以及富钙混合物(calcium-enriched mixture, CEM)等材料,在操作性、凝固时间或变色控制方面显示出一定优势,但不同材料之间的直接比较研究有限,长期随访证据仍不均衡。因此,材料比较不宜仅依据单一成功率数字判断,而应结合材料组成、操作特性、适应证、随访时间、结局定义和证据等级综合评价。基于上述考虑,本文对常用盖髓材料的主要特性、临床适应证及证据基础进行了归纳(表2)。

(1)MTA:MTA被认为是VPT的金标准^[76],具有良好的密封性、生物相容性、抗菌性并诱导羟基磷灰石的形成,成功率更高,可达85%^[6]。然而,MTA的临床应用及混合过程并不简单,且各组分的配比是否得当直接影响MTA的物理性能^[77]。此外,MTA凝固时间较长,需过量水分以完成完全凝固过程^[78],且可能导致牙齿变色^[79]。

(2)Biodentine:Biodentine是一种硅酸钙基水门汀,其成分与MTA几乎相同,只是液体成分是氯化钙,这有助于凝固和提升操作性能^[6],使其更有利于在单次就诊中完成盖髓并立即进行永久性修复^[80]。Biodentine能提高细胞代谢活性和细胞存活率,使存活细胞比例较高,且不影响细胞周期。此外,在分化和矿化过程的后期阶段,其碱性磷酸酶表达量、牙本质涎磷蛋白水平及钙结节形成均显著升高^[81]。现有系统综述与网络Meta分析提示,在成熟恒牙VPT中,Biodentine与MTA在6~24个月内的失败率差异无统计学意义^[71],但不同研究在术式类型、随访期限和结局定义方面存在差异,因此相关成功率数据不宜直接比较,且Biodentine在临床应用时间较短,远期疗效仍需进一步观察^[82]。

(3)iRoot BP和iRoot BP Plus:iRoot BP和iRoot BP Plus二者成分相似,前者为注射糊剂,后者为膏体^[83],均具有良好的生物相容性、抗菌性、流动性和

表2 常用盖髓/冠髓切断材料的特性、临床适应证及证据基础比较

材料	分类与组成特点	凝固时间与操作性	变色风险	生物相容性/抗菌性/硬组织诱导	主要适应证	主要临床证据类型及代表性随访结果	当前证据定位
氢氧化钙 [Ca(OH) ₂] ^[7,71]	强碱性材料,释放氢氧根离子。	操作简便,凝固较快。	一般不作为主要变色风险来源。	抗菌性较强,促进矿化能力有限,牙本质桥质量较低。	间接盖髓;作为对照材料。	AAPD 2025年指南指出,在恒牙(包括成熟恒牙和未成熟恒牙)DPC中,钙硅酸盐材料较Ca(OH) ₂ 显著提高36个月成功率;网络Meta分析认为Ca(OH) ₂ 类材料失败率较高,不再推荐用于直接盖髓术或冠髓切断。	作为对照和部分间接盖髓材料保留意义较大;不宜作为成熟恒牙VPT核心推荐材料。
MTA ^[71,72]	水硬性硅酸钙材料,含钡氧化物显影剂,水化反应固化。	操作要求高,凝固时间长。	可导致牙齿变色,在美学区需谨慎。	生物相容性好,促进修复性牙本质形成,抗菌性中等。	DPC、PP、FP,深龋及露髓病例。	临床研究报告MTA在恒牙龋源性或外伤性露髓中的临床成功率较高;AAPD 2025年指南中钙硅酸盐材料较Ca(OH) ₂ 在DPC中36个月成功率更高;MTA在成熟恒牙VPT中证据积累较充分。	证据成熟度最高,仍可作为参照或标准材料;但需重视操作性、凝固时间和变色问题。
Biodentine ^[71,73]	三钙硅酸盐基材料,氧化钡显影剂,快速水化反应。	操作较MTA简便,凝固时间短,适合单次治疗。	较低。	生物相容性好,促进矿化与牙本质桥形成,抗菌性中等。	DPC、PP、FP,美学区优先。	网络Meta分析提示Biodentine在6、12、24个月失败率方面优于Ca(OH) ₂ ,并可作为MTA的合适替代选择。	短中期证据较好,操作性及美学优势明显;成熟恒牙长期直接比较证据仍需补充。
iRoot BP Plus ^[71,74]	预混型硅酸钙基材料,含磷酸盐成分,即用型糊剂。	无需调拌,操作简便,凝固时间适中。	较低。	生物相容性好,促进矿化,抗菌性中等。	DPC、PP、FP,适合操作要求高和减少变色风险的病例。	系统综述总结,iRoot BP Plus在部分或全部冠髓切断中有较高临床和影像学成功率;一项成熟恒牙不可复性牙髓炎研究中,PP和FP临床成功率分别为90.9%和84.6%,随访为3个月至1年以上。	以前瞻性及回顾性研究为主;但成熟恒牙长期、多中心、直接比较证据仍不足。
CEM ^[71,75]	含多种钙化合物,释放钙离子,水化固化。	操作性较好,凝固时间较短。	较低。	生物相容性好,促进矿化,抗菌性中等。	DPC、PP、FP。	2024年系统性分析总结CEM具有良好的理化与生物学特性,并已用于VPT、根尖开放、根吸收/穿孔修复等多种场景;但作者也强调仍需长期、设计良好的临床试验。	材料学和临床应用前景较好;成熟恒牙VPT中的长期高质量证据仍不足。

注:AAPD为美国儿科学会;DPC为直接盖髓术;VPT为活髓保存治疗;MTA为矿物三氧化物硅酸钙基材料;PP为部分冠髓切断术;FP为全部冠髓切断术;CEM为富钙混合物。表中“成功率”及“代表性随访结果”来自不同研究或系统综述,受病例选择、牙髓诊断标准、术式类型、止血标准、冠方修复方式、随访时间和结局定义影响,不宜在不同材料之间进行简单横向比较。目前证据较充分的材料仍主要集中于MTA和Biodentine,iRoot BP Plus、CEM等材料显示出一定临床潜力,但长期、多中心、直接比较研究仍需进一步补充^[7,72,73]。

亲水性^[6]。其在牙本质小管中会形成硅酸钙及羟基磷灰石水凝胶,从而增强其密封性能和生物活性。与MTA相比,iRoot BP Plus具有类似的抗菌效果,且不会导致牙齿变色,使其成为活髓治疗中一种很有前景的替代品^[72,84]。

Zhu等^[74]的随机对照研究提示,在特定纳入标准下,使用iRoot BP Plus进行全部冠髓切断在12个月内可获得与RCT相近的临床结果,并在早期疼痛、就诊时间和费用方面显示出一定优势。但该项研究存在局限性,两组患者的影像学评估结果存在明显差异,且未进行盲法研究,这不可避免地会导致偏倚。另一个局限性是随访时间较短,只能够反映短期、单中心研究结果,限制了对牙髓和根尖周病变的检测。未来仍需在更多临床场景中进行验证。

(4)CEM:CEM是一种含有钙化合物的硅酸钙水门汀(calcium-silicate cement,CSC),具有良好的封闭性、生物相容性,可以持续释放钙和磷酸根离子,有助于羟基磷灰石的形成和矿化组织的再生。CEM还具有抗菌和抗真菌特性,有助于控制感染,促进牙本质桥和牙骨质的形成。此外,CEM具有良好的操作特性,经济实惠,与其他牙科材料兼容,可以成功地与修复及义齿治疗相结合^[85]。然而,其凝固和性能可能会受到环境因素的影响,例如严重的血液污染,可能会影响其性能和临床结果,并且对操作要求较高,目前针对成熟恒牙牙髓炎VPT的长期、高质量随机对照证据仍相对有限,因此其临床优势仍需在更规范的前瞻性研究中进一步验证^[86]。

4. 物理辅助技术:VPT的成功并非材料革命的单点驱动,在盖髓与活髓切断步骤中,物理辅助技术的发展提升了流程可控性与临床成功率。

(1)激光:激光可提升治疗效果,尤其是在与生物活性牙本质修复材料联合使用时^[87],可确保更好的牙本质桥形成和临床成功率。已有研究进行了Er:YAG激光辅助髓源性露髓恒牙直接盖髓术的临床与影像学评估,结果表明在治疗中加入Er:YAG激光可提升治疗效果,成功率显著提高,特别是在促进牙本质桥形成与降低术后敏感度方面^[88]。这种方法为成熟恒牙的活髓治疗提供了一种很有前景的替代方案。

然而,研究异质性,包括激光类型、参数、照射方式、联合材料和适应证等可能导致结论可迁移性有限,设备成本、学习曲线与热损伤风险也是其临

床应用的局限因素^[88-90]。

(2)显微牙科:在VPT过程中需要借助显微镜仔细观察露髓处周围牙本质形态、牙髓组织的颜色及质地、创面出血及止血情况,判断牙髓炎症的范围与状态,从而决定去除牙髓的范围^[67]。显微牙科的发展帮助临床医师更准确地识别和去除污染牙本质与坏死、高度炎症的冠髓,使得止血反应与创面状态评估更可靠,更利于材料放置厚度控制与避免污染,从而提升VPT质量^[91]。

目前,激光等物理辅助技术在VPT中的应用仍受到研究设计、参数设置、样本量及联合材料差异的影响,现有证据更适合支持其作为潜在辅助手段。

四、随访与疗效评估

VPT需要强调随访,因为其失败往往并非立刻发生,常与冠方微渗漏、残余感染负荷、术中炎症范围判断偏差及个体修复反应差异有关,这些因素只有通过规范、分层的随访体系才能被及时识别和干预。

为避免不同研究终点混用,VPT疗效评价应首先区分不同层级或维度的结局指标。临床成功主要指患牙无自发痛、持续性冷热痛、咬合痛或叩痛等症状,无软组织肿胀、窦道或牙龈瘘管等感染体征^[6];影像学成功主要指根尖周组织维持健康或原有病变不进展/逐渐愈合,未见内吸收、外吸收、进行性根尖周透射影或异常钙化等失败征象^[6];综合成功通常要求临床和影像学均达到成功标准^[7]。与此不同,牙存留率更强调患牙是否仍保留于口内并具备功能,即使曾接受再治疗,也可能被计入存留^[92];而失败或再治疗事件则包括症状复发、感染体征出现、影像学病变进展、需行RCT、再VPT、外科干预或拔除等^[93]。基于上述结局分层,本文进一步归纳VPT随访中应重点记录的观察项目及相应失败预警信号(表3)。

表3归纳的是随访评价的总体框架,实际临床复查时仍需将这些指标落实到具体检查项目中。随访应包括症状体征、冠方修复体状况、牙髓感觉测试及影像学监测(根尖改变、吸收或钙化等)^[95]。ESE建议于术后6和12个月,以及此后每年进行1次评估,持续5年^[11]。

随访时应系统记录疼痛类型,比如冷热痛是否仍存在、是否在诱发后持续、是否出现新的自发痛或夜间痛,软组织是否存在肿胀、窦道和牙龈瘘管等。Zhang等^[6]在成熟恒牙牙髓炎冠髓切断疗效评价标准中,将无疼痛、无软组织肿胀或窦道作为临

表3 成熟恒牙活髓保存治疗(VPT)随访结局指标与失败预警信号

评价维度	可归属的结局指标	支持成功/稳定表现	提示失败、需进一步评估或干预的表现
主观症状 ^[7,94]	临床成功;疼痛结局。	无疼痛,或短期术后不适逐渐缓解;无新的自发痛、夜间痛或持续性冷热痛。	新发或加重的自发痛、夜间痛、持续性冷热痛,需长期镇痛药控制。
软 组 织 情 况 ^[7,94]	临床成功;感染体征。	无软组织肿胀、窦道或牙龈瘻管;牙周情况稳定。	出现肿胀、窦道、瘻管、局部压痛或异常松动,提示感染或根尖周受累。
叩诊/咬合反应 ^[7,94]	临床成功;失败预警。	无叩痛或咬合痛;咬合关系稳定。	持续或新发叩痛、咬合痛,尤其合并根尖周影像异常时提示失败风险。
牙髓感觉测试 ^[6-7]	牙髓活力辅助指标;临床随访辅助指标。	在可行条件下维持正常或可解释的感觉反应;结果与症状、影像学一致。	冷测/EPT长期无反应,或反应异常且伴随疼痛/影像改变;牙髓切断术后EPT结果解释需谨慎。
冠方修复体/边缘封闭 ^[7]	修复体成功;再感染风险评估。	修复体完整,边缘密合,无继发龋或裂纹;冠方封闭稳定。	边缘渗漏、继发龋、修复体脱落/裂纹、食物嵌塞,提示再感染风险增加。
根尖片/咬翼片 ^[6-7]	影像学成功;失败预警。	根尖周组织维持健康;无新发或扩大的根尖周透射影;无内/外吸收;无异常进行性钙化。	新发或扩大的根尖周透射影、内/外吸收、进行性根管钙化、牙周膜间隙增宽或硬骨板破坏。
修复性牙本质桥 ^[6]	组织修复辅助指标。	可见修复性牙本质桥形成可作为有利征象。	未形成牙本质桥本身不应直接判定失败;若伴随症状或影像病变才需警惕。
CBCT ^[7]	影像学补充指标;再治疗决策依据。	在有明确适应证时,CBCT未见根尖周病变、内/外吸收、牙根裂纹或其他需干预的三维影像异常。	CBCT显示根尖周病变、内/外吸收、疑似牙根裂纹、根管/根尖复杂病变或其他可解释症状的病理改变,提示需进一步诊断或转入RCT、外科治疗或拔除等处理。
是否需再治疗 ^[95-96]	失败事件;再治疗率;牙存留率。	无需进一步牙髓/根尖治疗;患牙保留并功能稳定。	因疼痛、感染、影像学病变进展、冠方封闭失败或牙体不可修复等原因需行再次VPT、RCT、根尖外科治疗或拔除。
牙存留率 ^[92]	牙存留率。	患牙保留于口内并具备功能,即使曾接受再治疗,也可单独计入“存留”。	患牙拔除或功能丧失。
综合成功 ^[7,94]	综合成功率。	无症状、无感染体征、影像学稳定或愈合、修复体封闭良好、无需再治疗。	任一维度出现持续性异常,尤其症状、感染体征和影像病变共同出现。

注:EPT为牙髓电活力测试;CBCT为锥形束CT;RCT为根管治疗;VPT为活髓保存治疗。不同研究中随访时间、结局定义、再治疗处理方式和影像学评价标准不完全一致,不同结局指标之间不宜直接替代或横向比较。

床首要结局指标。VPT随访的对象是牙髓与修复体组成的整体封闭系统。若冠方封闭失败,即使术中牙髓处理得当,也可能因再感染而失败。因此,随访需常规检查冠方修复体与边缘封闭,比如是否有边缘染色、探针卡滞、食物嵌塞和修复体裂纹等^[95]。除此之外,牙髓感觉测试(冷测/EPT)同样是必要的,同时结合症状体征及影像综合判断。

在传统影像学随访中,根尖片是VPT随访的一线工具。ESE建议在1年时用根尖片评估,并在不确定时继续定期复查^[11]。随访观察的重点包括是否出现根尖周透射影扩大、内/外吸收迹象、异常或进行性钙化/髓腔变窄、冠方渗漏相关的继发龋线索等^[96],必要时建议采用平行投照技术以获得更标准化的对比图像。

锥形束CT(cone-beam computed tomography, CBCT)能提供三维信息,但随访中更要强调适应证,避免过度检查。AAE与美国口腔颌面放射学学会(American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology, AAOMR)联合立场文件明确指出,CBCT

应仅在收益大于风险时使用,不应作为牙髓病诊断或筛查的常规手段。当症状或体征提示失败(持续叩痛、咬合痛、窦道等)但根尖片不典型,怀疑裂纹、外吸收、复杂解剖导致的漏诊,需要明确根尖周病变的三维范围以指导后续RCT或外科治疗时可考虑进行CBCT检查^[97]。

LDF与SpO₂/StO₂监测技术、MRI等技术不仅用于术前判断,更有望在VPT的长期疗效评估中弥补传统感觉测试的局限。LDF与SpO₂/StO₂监测技术更接近活力(血流/血氧)本质,比冷测/EPT更少受神经敏感性、修复体隔绝的影响,而MRI作为非电离辐射的补充随访方式,在特定情境下可评估根尖周软组织及炎症变化,二者有望作为更客观的活髓结局评价补充指标。但是,这些方法在VPT长期随访中的应用目前仍主要限于研究性或选择性场景,现阶段更适合作为传统症状、感觉测试和影像学随访的补充,而尚未形成可广泛推广的常规结局评价体系。

五、展望

总体而言,成熟恒牙牙髓炎VPT的核心已从症

状二分决定去髓转向以生物学与感染控制为导向的分层决策,术前更强调对牙髓活力的判断,并认识到牙髓炎症在程度与范围上呈连续变化及空间分层,术中以无菌隔离、创面止血与直视评估完成再分流,材料层面以水硬性硅酸钙类生物陶瓷为主干,并以可靠冠方封闭与规范随访来维持长期成功。未来临床与研究更应聚焦于优化VPT标准流程,减少操作者差异对结局的影响,并建立更客观的活力与炎症分层工具链,材料创新的重点从生物活性转变为更可控、更可操作、更可监测,并合理利用数字化与AI辅助降低不确定性,而不是替代临床判断,同时建立可共享的病例登记与结局数据库,通过长期的多中心前瞻性研究与真实世界队列,系统评估VPT的远期存留率与功能结局,形成更可靠的长期证据基础,推动适应证边界、流程要点与培训标准的持续优化。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Martin DM. Specialization in endodontics [J]. *Int Endod J*, 1991, 24(4):204-211. DOI:10.1111/j.1365-2591.1991.tb00133.x.
- [2] Patel SR, Jarad F, Moawad E, et al. The tooth survival of non-surgical root-filled posterior teeth and the associated prognostic tooth-related factors: A systematic review and Meta-analysis [J]. *Int Endod J*, 2024, 57(10):1404-1421. DOI:10.1111/iej.14116.
- [3] Mannocci F, Bitter K, Sauro S, et al. Present status and future directions: The restoration of root filled teeth [J]. *Int Endod J*, 2022, 55(Suppl 4):1059-1084. DOI:10.1111/iej.13796.
- [4] Patel SR, Youngson C, Jarad F. Principles guiding the restoration of the root-filled tooth [J]. *Br Dent J*, 2025, 238(7):508-516. DOI:10.1038/s41415-025-8401-4.
- [5] AAE Special Committee on Vital Pulp Therapy. AAE Position Statement on Vital Pulp Therapy [J]. *J Endod*, 2021, 47(9):1340-1344. DOI:10.1016/j.joen.2021.07.015.
- [6] Zhang L, Lin C, Chen Z, et al. Expert consensus on pulpotomy in the management of mature permanent teeth with pulpitis [J]. *Int J Oral Sci*, 2025, 17(1):4. DOI:10.1038/s41368-024-00333-9.
- [7] Coll JA, Dhar V, Guelmann M, et al. Guideline for use of vital pulp therapy in permanent teeth [J]. *Pediatr Dent*, 2025, 47(5):299-311.
- [8] 李泽齐,刘青梅.成熟恒牙牙髓炎活髓保存治疗的研究与应用[J]. *口腔医学研究*, 2023, 39(4):300-303. DOI:10.13701/j.cnki.kqxyj.2023.04.003.
- [9] 秦志明,李佳洋,徐华兴,等.成熟恒牙龋源性不可复性牙髓炎活髓保存治疗的临床疗效观察[J]. *复旦学报(医学版)*, 2025, 52(2):263-269. DOI:10.3969/j.issn.1672-8467.2025.02.013.
- [10] 孙新新,米拉·巴合提,王梦琪,等.活髓保存治疗在成熟恒牙不可复性牙髓炎治疗中的临床效果的Meta分析[J]. *临床口腔医学杂志*, 2024, 40(12):758-762. DOI:10.3969/j.issn.1003-1634.2024.12.013.
- [11] Duncan HF, Galler KM, Tomson PL, et al. European Society of Endodontology position statement: Management of deep caries and the exposed pulp [J]. *Int Endod J*, 2019, 52(7):923-934. DOI:10.1111/iej.13080.
- [12] Patro S, Meto A, Mohanty A, et al. Diagnostic accuracy of pulp vitality tests and pulp sensibility tests for assessing pulpal health in permanent teeth: A systematic review and Meta-analysis [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(15):9599. DOI:10.3390/ijerph19159599.
- [13] Donnermeyer D, Dammaschke T, Lipski M, et al. Effectiveness of diagnosing pulpitis: A systematic review [J]. *Int Endod J*, 2023, 56(Suppl 3):296-325. DOI:10.1111/iej.13762.
- [14] Sui H, Lv Y, Xiao M, et al. Relationship between the difference in electric pulp test values and the diagnostic type of pulpitis [J]. *BMC Oral Health*, 2021, 21(1):339. DOI:10.1186/s12903-021-01696-9.
- [15] Krastl G, Weiger R, Filippi A, et al. Endodontic management of traumatized permanent teeth: A comprehensive review [J]. *Int Endod J*, 2021, 54(8):1221-1245. DOI:10.1111/iej.13508.
- [16] Vinagre A, Castanheira C, Messias A, et al. Management of pulp canal obliteration - systematic review of case reports [J]. *Medicina(Kaunas)*, 2021, 57(11):1237. DOI:10.3390/medicina57111237.
- [17] Almutairi W, Aminoshariae A, Williams K, et al. The validity of pulp tests on crowned teeth: A clinical study [J]. *Eur Endod J*, 2021, 6(2):151-154. DOI:10.14744/eej.2020.94840.
- [18] Jang YE, Kim Y, Kim BS. Influence of preoperative mechanical allodynia on predicting postoperative pain after root canal treatment: A prospective clinical study [J]. *J Endod*, 2021, 47(5):770-778.e771. DOI:10.1016/j.joen.2021.01.004.
- [19] Pitts NB. The use of bitewing radiographs in the management of dental caries: Scientific and practical considerations [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2014, 25(1):5-16. DOI:10.1259/dmfr.25.1.9084279.
- [20] Wolters WJ, Duncan HF, Tomson PL, et al. Minimally invasive endodontics: A new diagnostic system for assessing pulpitis and subsequent treatment needs [J]. *Int Endod J*, 2017, 50(9):825-829. DOI:10.1111/iej.12793.
- [21] Taha NA, Ahmad MB, Ghanim A. Assessment of Mineral Trioxide Aggregate pulpotomy in mature permanent teeth with carious exposures [J]. *Int Endod J*, 2017, 50(2):117-125. DOI:10.1111/iej.12605.
- [22] Walsh D, Quigley R, Ekperuoh A, et al. Objectively diagnosing pulpitis: Opportunities and methodological challenges in the development of point-of-care assays [J]. *Int J Mol Sci*, 2026, 27(1):355. DOI:10.3390/ijms27010355.
- [23] Gliga A, Imre M, Grandini S, et al. The limitations of periapical X-ray assessment in endodontic diagnosis: A systematic review

- [J]. J Clin Med, 2023, 12(14):4647. DOI:10.3390/jcm12144647.
- [24] Ghouth N, Duggal MS, BaniHani A, et al. The diagnostic accuracy of laser Doppler flowmetry in assessing pulp blood flow in permanent teeth: A systematic review [J]. Dent Traumatol, 2018, 34(5):311-319. DOI:10.1111/edt.12424.
- [25] Brignardello - Petersen R. Laser Doppler flowmetry and pulse oximetry seem to have high accuracy in detecting vital and nonvital teeth and perform better than cold, heat, and electric pulp testing [J]. J Am Dent Assoc, 2018, 149(11):e152. DOI: 10.1016/j.adaj.2018.05.019.
- [26] Lotfi H, Falcão B, Vassilenko V. Implementation, validation and clinical testing of oximetry device for microcirculation assessment in oral tissue [J]. Sensors, 2025, 25(21):6604. DOI:10.3390/s25216604.
- [27] Ajan A, Roberg K, Fredriksson I, et al. Reproducibility of Laser Doppler Flowmetry in gingival microcirculation. A study on six different protocols [J]. Microvasc Res, 2024(153):104666. DOI: 10.1016/j.mvr.2024.104666.
- [28] Kasper RH, Coelho MR, Miguens-Jr SAQ, et al. Pulse oximetry as a dental pulp test: A scoping review to identify barriers hindering the use of oximeters in clinical practice [J]. Saudi Dent J, 2024, 36(2):262-269. DOI:10.1016/j.sdentj.2023.11.006.
- [29] Afkhami F, Wright PP, Chien PY, et al. Exploring approaches to pulp vitality assessment: A scoping review of nontraditional methods [J]. Int Endod J, 2024, 57(8):1065-1098. DOI: 10.1111/iej.14073.
- [30] Mainkar A, Kim SG. Diagnostic accuracy of 5 dental pulp tests: A systematic review and Meta-analysis [J]. J Endod, 2018, 44(5):694-702. DOI:10.1016/j.joen.2018.01.021.
- [31] Flügge T, Gross C, Ludwig U, et al. Dental MRI-only a future vision or standard of care? A literature review on current indications and applications of MRI in dentistry [J]. Dentomaxillofac Radiol, 2023, 52(4):20220333. DOI: 10.1259/dmfr.20220333.
- [32] Ludwig U, Eisenbeiss AK, Scheifele C, et al. Dental MRI using wireless intraoral coils [J]. Sci Rep, 2016, 6(1):23301. DOI: 10.1038/srep23301.
- [33] Spagnuolo G, Soltani P. Magnetic resonance imaging in digital dentistry: The start of a new era [J]. Prosthesis, 2024, 6(4):798-802. DOI:10.3390/prosthesis6040056.
- [34] Nakamura T. Dental MRI: A road beyond CBCT [J]. Eur Radiol, 2020, 30(12):6389-6391. DOI:10.1007/s00330-020-07321-7.
- [35] Mora M, Pacheco-Yanes J, Sigurdsson A. The future of endodontic diagnosis: A narrative review focusing on biological markers [J]. JADA Found Sci, 2025(4):100050. DOI: 10.1016/j.jfscie.2025.100050.
- [36] Zehnder M, Wegehaupt FJ, Attin T. A first study on the usefulness of matrix metalloproteinase 9 from dentinal fluid to indicate pulp inflammation [J]. J Endod, 2011, 37(1):17-20. DOI:10.1016/j.joen.2010.10.003.
- [37] Elsalhy M, Azizieh F, Raghupathy R. Cytokines as diagnostic markers of pulpal inflammation [J]. Int Endod J, 2013, 46(6):573-580. DOI:10.1111/iej.12030.
- [38] Wahyudi R, Aguilar P, Changsiripun C, et al. Inflammatory biomarkers in irreversible pulpitis and pulp necrosis: A systematic review and Meta-analysis [J]. Int Dent J, 2026, 76(2):109453. DOI:10.1016/j.identj.2026.109453.
- [39] Mente J, Petrovic J, Gehrig H, et al. A prospective clinical pilot study on the level of matrix metalloproteinase-9 in dental pulpal blood as a marker for the state of inflammation in the pulp tissue [J]. J Endod, 2016, 42(2):190-197. DOI:10.1016/j.joen.2015.10.020.
- [40] Altukroni A, Alsaedi A, Gonzalez-Losada C, et al. Detection of the pathological exposure of pulp using an artificial intelligence tool: A multicentric study over periapical radiographs [J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1):553. DOI: 10.1186/s12903-023-03251-0.
- [41] Lee JH, Kim DH, Jeong SN, et al. Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm [J]. J Dent, 2018(77):106-111. DOI: 10.1016/j.jdent.2018.07.015.
- [42] Karobari MI, Adil AH, Basheer SN, et al. Evaluation of the diagnostic and prognostic accuracy of artificial intelligence in endodontic dentistry: A comprehensive review of literature [J]. Comput Math Methods Med, 2023(1):7049360. DOI:10.1155/2023/7049360.
- [43] Muñoz P, Ruiz-Pérez VH, Martínez-Martínez A, et al. Rapid point-of-care quantification of high-sensitivity C-reactive protein in pulpal blood as an objective biomarker for irreversible pulpitis: A pilot diagnostic accuracy study [J]. Front Dent Med, 2026(6):1729860. DOI:10.3389/fdmed.2025.1729860.
- [44] Elfezary MT, Waly AS, Mohamed EH. Feasibility of a rapid C-reactive protein chairside point-of-care test for detecting inflammation in exposed dental pulp: A pilot exploratory study [J]. BDJ Open, 2025, 11(1):51. DOI: 10.1038/s41405-025-00340-w.
- [45] 王明浩, 朱小苗, 何文喜. 成熟恒牙不可复性牙髓炎牙髓切断术活髓保存治疗的临床应用与展望 [J]. 中国实用口腔科杂志, 2024, 17(3):265-270. DOI:10.19538/j.kq.2024.03.002.
- [46] 陈智, 陈瑞甜. 龋病再认识 [J]. 口腔医学研究, 2020, 36(1):1-6. DOI:10.13701/j.cnki.kqxyj.2020.01.001.
- [47] Maltz M, Garcia R, Jardim JJ, et al. Randomized trial of partial vs. stepwise caries removal: 3-year follow-up [J]. J Dent Res, 2012, 91(11):1026-1031. DOI:10.1177/0022034512460403.
- [48] Schwendicke F, Frencken JE, Bjørndal L, et al. Managing carious lesions: Consensus recommendations on carious tissue removal [J]. Adv Dent Res, 2016, 28(2):58-67. DOI:10.1177/0022034516639271.
- [49] Banerjee A, Frencken JE, Schwendicke F, et al. Contemporary operative caries management: Consensus recommendations on minimally invasive caries removal [J]. Br Dent J, 2017, 223(3):215-222. DOI:10.1038/sj.bdj.2017.672.

- [50] Schwendicke F, Walsh T, Lamont T, et al. Interventions for treating cavitated or dentine carious lesions [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2021, 7 (7) : Cd013039. DOI: 10.1002/14651858.CD013039.pub2.
- [51] McComb D. Caries - detector dyes: How accurate and useful are they? [J]. *J Can Dent Assoc*, 2000, 66(4) : 195-198.
- [52] Gimenez T, Braga MM, Raggio DP, et al. Fluorescence-based methods for detecting caries lesions: Systematic review, Meta-analysis and sources of heterogeneity [J]. *PLoS One*, 2013, 8 (4) : e60421. DOI: 10.1371/journal.pone.0060421.
- [53] Yehua D, Yiyuan Y, Yihao L, et al. Evaluation of DIAGNOdent pen for initial occlusal caries diagnosis in permanent teeth [J]. *BMC Oral Health*, 2024, 24(1) : 1111. DOI: 10.1186/s12903-024-04889-0.
- [54] Lussi A, Hibst R, Paulus R. DIAGNOdent: An optical method for caries detection [J]. *J Dent Res*, 2004, 83(Spec Iss C) : C80-C83. DOI: 10.1177/154405910408301s16.
- [55] Bader JD, Shugars DA. A systematic review of the performance of a laser fluorescence device for detecting caries [J]. *J Am Dent Assoc*, 2004, 135(10) : 1413-1426. DOI: 10.14219/jada.archive.2004.0051.
- [56] Iglesias - Poveda A, Flores - Fraile J, González - Gil D, et al. Comparative evaluation of caries detector dyes and laser fluorescence systems for intraoperative diagnosis during selective caries removal: A scoping review [J]. *Front Dent Med*, 2025(6) : 1600500. DOI: 10.3389/fdmed.2025.1600500.
- [57] Fried D, Xie J, Shafi S, et al. Imaging caries lesions and lesion progression with polarization sensitive optical coherence tomography [J]. *J Biomed Opt*, 2002, 7(4) : 618-627. DOI: 10.1117/1.1509752.
- [58] Tabata T, Nakagawa H, Kobayashi K, et al. Diagnosis of occlusal caries using optical coherence tomography in a real clinical situation [J]. *Asian Pacific Journal of Dentistry*, 2023, 23(2) : 20-23. DOI: 10.47416/apjod.23-0004.
- [59] Balhaddad AA, Alharamlah F, Albrahim HF, et al. Assessing diagnostic accuracy and monitoring of caries progression using optical coherence tomography (OCT) : A systematic review [J]. *J Dent*, 2025(155) : 105628. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.105628.
- [60] 刘红艳, 郑思怡, 韦曦. 不可复性牙髓炎的活髓保存治疗: 生物学基础与临床进展 [J]. *口腔医学*, 2024, 44(6) : 401-407. DOI: 10.13591/j.cnki.kqyx.2024.06.001.
- [61] Lim ZE, Duncan HF, Moorthy A, et al. Minimally invasive selective caries removal: A clinical guide [J]. *Br Dent J*, 2023, 234(4) : 233-240. DOI: 10.1038/s41415-023-5515-4.
- [62] Parinyaprom N, Nirunsittirat A, Chuveera P, et al. Outcomes of direct pulp capping by using either proroot mineral trioxide aggregate or biodentine in permanent teeth with carious pulp exposure in 6- to 18-year-old patients: A randomized controlled trial [J]. *J Endod*, 2018, 44(3) : 341-348. DOI: 10.1016/j.joen.2017.10.012.
- [63] Suhag K, Duhan J, Tewari S, et al. Success of direct pulp capping using mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide in mature permanent molars with pulps exposed during carious tissue removal: 1-year follow-up [J]. *J Endod*, 2019, 45(7) : 840-847. DOI: 10.1016/j.joen.2019.02.025.
- [64] Harms CS, Schäfer E, Dammaschke T. Clinical evaluation of direct pulp capping using a calcium silicate cement - treatment outcomes over an average period of 2.3 years [J]. *Clin Oral Investig*, 2019, 23(9) : 3491-3499. DOI: 10.1007/s00784-018-2767-5.
- [65] Witherspoon DE. Vital pulp therapy with new materials: New directions and treatment perspectives: Permanent teeth [J]. *J Endod*, 2008, 34(7 Suppl) : S25-S28. DOI: 10.1016/j.joen.2008.02.030.
- [66] Tang HM, Nordbø H, Bakland LK. Pulpal response to prolonged dentinal exposure to sodium hypochlorite [J]. *Int Endod J*, 2000, 33(6) : 505-508. DOI: 10.1046/j.1365-2591.2000.00348.x.
- [67] Ricucci D, Siqueira JF, Li Y, et al. Vital pulp therapy: Histopathology and histobacteriology - based guidelines to treat teeth with deep caries and pulp exposure [J]. *J Dent*, 2019(86) : 41-52. DOI: 10.1016/j.jdent.2019.05.022.
- [68] Cho SY, Seo DG, Lee SJ, et al. Prognostic factors for clinical outcomes according to time after direct pulp capping [J]. *J Endod*, 2013, 39(3) : 327-331. DOI: 10.1016/j.joen.2012.11.034.
- [69] Linsuwanont P, Wimonutthikul K, Pothimoke U, et al. Treatment outcomes of mineral trioxide aggregate pulpotomy in vital permanent teeth with carious pulp exposure: The retrospective study [J]. *J Endod*, 2017, 43(2) : 225-230. DOI: 10.1016/j.joen.2016.10.027.
- [70] 史景华, 张蕾, 刘双凤, 等. 不同生物材料在因龋露髓成熟恒牙活髓保存治疗中的效果研究 [J]. *中国实用口腔科杂志*, 2024, 17(3) : 326-331. DOI: 10.19538/j.kq.2024.03.011.
- [71] Komora P, Vámos O, Gede N, et al. Comparison of bioactive material failure rates in vital pulp treatment of permanent matured teeth: A systematic review and network Meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1) : 18421. DOI: 10.1038/s41598-024-69367-7.
- [72] Riandani AP, Cahyanto A, Diab RAL, et al. Clinical and radiographic outcomes of pulpotomy materials in permanent teeth: A systematic review of calcium hydroxide, MTA, biodentine, and iRoot BP plus [J]. *BMC Oral Health*, 2025, 26(1) : 42. DOI: 10.1186/s12903-025-07322-2.
- [73] Lu L, Zheng W. Evaluation of vital pulp therapy with Biodentine in young permanent teeth: A systematic review and Meta-analysis [J]. *J Clin Pediatr Dent*, 2025, 49(3) : 9-20. DOI: 10.22514/jocpd.2025.045.
- [74] Zhu L, Liu W, Deng X, et al. Full pulpotomy versus root canal therapy in mature teeth with irreversible pulpitis: A randomized controlled trial [J]. *BMC Oral Health*, 2024, 24(1) : 1231. DOI: 10.1186/s12903-024-05011-0.
- [75] Asgary S, Aram M, Fazlyab M. Comprehensive review of composition, properties, clinical applications, and future

- perspectives of calcium - enriched mixture (CEM) cement: A systematic analysis [J]. BioMedical Engineering OnLine, 2024, 23(1):96. DOI:10.1186/s12938-024-01290-4.
- [76] Parirokh M, Torabinejad M, Dummer PMH. Mineral trioxide aggregate and other bioactive endodontic cements: An updated overview—Part I : Vital pulp therapy [J]. Int Endod J, 2018, 51(2):177-205. DOI:10.1111/iej.12841.
- [77] Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: A comprehensive literature review—Part I : Chemical, physical, and antibacterial properties [J]. J Endod, 2010, 36(1):16-27. DOI:10.1016/j.joen.2009.09.006.
- [78] Islam I, Chng HK, Yap AU. Comparison of the physical and mechanical properties of MTA and portland cement[J]. J Endod, 2006, 32(3):193-197. DOI:10.1016/j.joen.2005.10.043.
- [79] Nagas E, Ertan A, Eymirli A, et al. Tooth discoloration induced by different calcium silicate - based cements: A two - year spectrophotometric and photographic evaluation *in vitro* [J]. J Clin Pediatr Dent, 2021, 45(2):112-116. DOI:10.17796/1053-4625-45.2.7.
- [80] Paula A, Laranjo M, Marto CM, et al. Biodentine™ Boosts, WhiteProRoot® MTA Increases and Life® suppresses odontoblast activity [J]. Materials, 2019, 12(7):1184. DOI: 10.3390/ma12071184.
- [81] Widbiller M, Lindner SR, Buchalla W, et al. Three-dimensional culture of dental pulp stem cells in direct contact to tricalcium silicate cements [J]. Clin Oral Investig, 2016, 20(2):237-246. DOI:10.1007/s00784-015-1515-3.
- [82] 王萍,张映娟. Biodentine的材料特性及临床应用现状[J]. 口腔疾病防治, 2019, 27(11):745-748. DOI:10.12016/j.issn.2096-1456.2019.11.011.
- [83] 李羽弘, 韦曦. iRoot BP 和 iRoot BP Plus 应用于牙髓治疗的研究现状[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2016, 10(3):208-211. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2016.03.011.
- [84] 郑金鑫, 鲍萍萍. iRoot BP plus 在因龋露髓成熟恒牙活髓保存中的应用[J]. 实用口腔医学杂志, 2025, 41(4):557-561. DOI:10.3969/j.issn.1001-3733.2025.04.020.
- [85] Utneja S, Nawal RR, Talwar S, et al. Current perspectives of bio-ceramic technology in endodontics: Calcium enriched mixture cement - review of its composition, properties and applications [J]. Restor Dent Endod, 2015, 40(1):1-13. DOI:10.5395/rde.2015.40.1.1.
- [86] Asgary S, Shamszadeh S, Shirvani A. Management strategies for pulpitis in vital permanent teeth in children and adolescents: A systematic review and Meta-analysis of randomized clinical trials [J]. Eur Arch Paediatr Dent, 2025, 26(3):451-463. DOI: 10.1007/s40368-025-01021-w.
- [87] Guan L, Cai C, Cui J, et al. Effect of chitosan and CMCS on sentin after Er: YAG laser irradiation: Shear bond strength and surface morphology analysis[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1):1-10. DOI:10.1186/s12903-024-04097-w.
- [88] Jasrasaria N, Yadav RK, Tiwari R. Clinical and radiographic evaluation of Er: YAG laser - assisted direct pulp capping in permanent teeth with carious exposure [J]. Laser Med Sci, 2025, 40(1):242. DOI:10.1007/s10103-025-04496-7.
- [89] Haghighi R, Molaasadolah F, Taghizade F, et al. Three - year outcome of diode laser pulpotomy of primary molars using three pulp capping agents: A split-mouth randomized clinical trial [J]. J Evid Based Dent Pract, 2023, 23(4):101920. DOI:10.1016/j.jebdp.2023.101920.
- [90] Afkhami F, Rostami G, Xu C, et al. The application of lasers in vital pulp therapy: Clinical and radiographic outcomes [J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1):333. DOI:10.1186/s12903-024-04026-x.
- [91] Sadhana SM, Abdul M, Anjali SS. Endodontic microsurgery: A paradigm shift in modern endodontic practice [J]. Asian J Dent Sci, 2025, 8(1):396-406. DOI:10.9734/ajds/2025/v8i1258.
- [92] Asgary S, Roghanizadeh L, Eghbal MJ, et al. Outcomes and predictive factors of vital pulp therapy in a large - scale retrospective cohort study over 10 years [J]. Sci Rep, 2024, 14(1):2063. DOI:10.1038/s41598-024-52654-8.
- [93] Asgary S, Roghanizadeh L, Eghbal MJ, et al. Managing failed vital pulp therapies in mature permanent teeth in a retrospective cohort study, with success and survival rates of managing protocols [J]. Sci Rep, 2024, 14(1):11621. DOI:10.1038/s41598-024-62565-3.
- [94] Zanjir M, Cardoso E, Harman NL, et al. Development of a core outcome set in endodontics (COS-ENDO): Part 4—COS-ENDO for studies of vital pulp therapy in permanent teeth [J]. J Endod, 2025, 51(4):442-456. DOI:10.1016/j.joen.2025.01.009.
- [95] Boyer KR, Nguyen JT. An update on vital pulp therapy[J]. J Calif Dent Assoc, 2023, 51(1):224470. DOI:10.1080/19424396.2023.2244707.
- [96] Sarsam W, Davies J, Al - Salehi SK. The role of imaging in endodontics [J]. Br Dent J, 2025, 238(7):448-457. DOI:10.1038/s41415-025-8511-z.
- [97] Sousa Melo SL, Fayad MI, Gohel A, et al. AAE and AAOMR joint position statement: Use of cone-beam computed tomography in endodontics 2025 update [J]. J Endod, 2026, 52(1):4-13. DOI:10.1016/j.joen.2025.09.008.

(收稿日期:2026-04-16)

(本文编辑:王嫚)