

恒牙不可复性牙髓炎活髓切断术的研究进展

王璐瑶¹, 刘丽¹(综述), 张晴晴¹, 班建东^{2*}(审校)

(1.河北医科大学口腔医学教研室,河北石家庄 050000;2.河北省眼科医院口腔内科,河北邢台 054000)

[摘要] 根管治疗术是治疗成熟恒牙不可复性牙髓炎的首选方法。随着活髓切断术在乳牙及年轻恒牙不可复性牙髓炎活髓保存治疗方面的临床应用越来越广泛,越来越多的研究聚焦于活髓切断术在成熟恒牙不可复性牙髓炎的临床应用。本文基于该领域的最新研究成果,对成熟恒牙不可复性牙髓炎活髓切断术的组织生物学基础、材料学和临床操作要点等最新进展作一综述。

[关键词] 成熟恒牙;活髓切断术;不可复性牙髓炎;根管治疗 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2024.12.021

[中图分类号] R735.7 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1007-3205(2024)12-1483-06

恒牙龋齿及其引发的牙髓疾病往往会对患者和社会造成巨大的经济负担^[1]。根管治疗术(root canal therapy, RCT)是成熟恒牙不可复性牙髓炎首选的治疗方案。但该治疗方法具有对牙齿组织破坏性大和缩短患牙使用寿命的不足,同时根管治疗存在治疗费用昂贵、技术敏感性高和耗时等缺点^[2]。活髓保存治疗(vital pulp therapy, VPT)以其更微创、更符合生物学治疗、技术敏感性低等优势进入临床视野。现针对活髓保存治疗中的活髓切断术在成熟恒牙不可复性牙髓炎临床应用的组织生物学基础、材料学和临床操作要点等方面的最新研究进展作一综述,以期为该患牙实施活髓切断术提供参考。

1 活髓切断术理论基础的研究进展

1.1 活髓切断术的组织生物学基础 传统观念认为成熟恒牙发生不可复性牙髓炎后牙髓无法愈合,需要去除全部牙髓组织,RCT是处理该类患牙唯一的选择,而活髓切断术仅限于乳牙和年轻恒牙的不可复性牙髓炎。传统上,识别可复/不可复性牙髓炎依赖于患者对症状的主观描述和牙髓敏感性测试,这些测试不能准确或客观地确定炎症程度和发炎牙髓的愈合能力。将发炎的牙髓定义为可复或不可复

性牙髓炎的简单二分法并不符合目前对牙髓生物学和牙髓牙本质复合体防御反应的理解。越来越多的研究表明,目前所有临床评估牙髓状态的方法都不能准确地反映牙髓的真实病理状态^[3]。临床症状,如疼痛的特征和严重程度,并不是牙髓状态、受累深度以及牙髓是否能够开始修复的精确指标。患牙的临床症状与其牙髓的实际组织学状态之间可能缺乏很好的相关性。即使在临床表现和组织学诊断相匹配的病例中,也有可能在距离坏死的牙髓组织数毫米远的区域观察到不受细菌及炎症侵犯的牙髓组织^[4]。正如VPT研究^[5]所证明的那样,其中显示不可复性牙髓炎体征和症状的牙齿至少可以保存部分牙髓。因此,真正决定不可复性牙髓炎采取何种治疗方案的是牙髓组织学状态,而不是临床诊断,以往根据临床症状和体征制定牙髓治疗方案有可能存在过度治疗。

组织学和微生物学研究还表明,部分临床诊断为不可复性牙髓炎的牙齿中存在的炎症和微生物通常仅局限于冠部牙髓组织,而不涉及根部的牙髓组织,即髓中没有细菌入侵和炎症。因此,术语“可复性”和“不可复性”牙髓炎实际上指的是部分牙髓组织的状况,而不是整个牙髓组织的情况。未被炎症侵犯的髓不仅可以适应炎症过程中压力的适度增加,也存在有效的免疫防御反应。同时,研究表明,一旦去除感染组织为剩余牙髓愈合提供有利的条件,牙髓固有的愈合能力就会促使其保持健康状态且发挥正常的修复和防御功能^[6]。活髓切断术正是利用牙髓这一防御和修复机制,在部分不可复性牙髓炎病例中,通过手术彻底去除发生坏死和细菌定植的病变牙髓组织和暴露部位周围柔软的、可

[收稿日期]2023-12-22

[基金项目]河北省“三三三人才工程”资助项目(A202002031);邢台市重点研发计划(2022ZC159)

[作者简介]王璐瑶(1998-),女,湖北襄阳人,河北医科大学医学硕士研究生,从事口腔内科疾病诊治研究。

*通信作者。E-mail:5561754@qq.com

能受感染的牙本质,最终目标是在未感染的牙髓组织中获得一个干净的手术创面,牙髓断面用能保持牙髓活力并促进修复的盖髓材料覆盖,并即刻进行严密的冠部封闭,从而创造一个良好的愈合环境,触发牙髓防御修复机制,诱导修复性牙本质桥形成,最终牙髓炎症消退,剩余的健康牙髓组织得以保存^[7-8]。

1.2 活髓切断术 2 种术式的对比研究进展 活髓切断术根据冠部牙髓组织的切除量不同分为部分冠髓切断术(partial pulpotomy, PP)和全部冠髓切断术(complete pulpotomy, CP)。在乳牙及年轻恒牙不可复性牙髓炎的治疗中,PP 较 CP 的成功率低。在治疗成熟恒牙不可复性牙髓炎时,最新大量研究^[9-11]表明二者的短期成功率差异无统计学意义。

PP 指牙髓组织暴露后先去除露髓孔下方的浅部冠髓组织,将盖髓材料覆盖于牙髓断面后,再行冠部修复^[3]。PP 中对去除冠髓组织量的把握一直是临床操作的一个难点,因为在临床上很难确定疾病进展的深度,以确保完全切除病变组织。欧洲牙髓病学学会(European Society of Endodontology, ESE)建议切除暴露牙髓下方 2~3 mm 厚的牙髓组织,以去除牙髓表层的感染和炎症组织,利于剩余牙髓组织的愈合^[12]。与 CP 相比,PP 仍然可以保留部分富含细胞的冠髓,这确保了颈部牙本质的持续沉积,从而防止牙齿结构变得脆弱,并降低了根管闭塞的风险。此外,由于还有相当多的冠髓组织残留,这允许患牙在随访时进行牙髓敏感性测试^[13],为患牙提供了更可预测的愈合,也更符合微创治疗的理念。

而在 CP 中,是在根管口处将冠髓与根髓进行离断,完全去除了冠髓组织^[3]。相较于冠髓的部分去除,CP 去除炎症和感染更彻底,降低了残留牙髓发炎的可能性,更有利于牙髓组织愈合。以根管口为明确的标志点降低了其技术敏感性,同时根管口水平的髓室底能为盖髓材料提供更坚实的支撑。因此,CP 相对于 PP 临床操作难度明显降低。然而,由于冠髓的细胞成分多于根髓且根髓中纤维成分含量更多,因此 CP 术后发生牙髓变性、萎缩和钙化的可能性较大,增加了将来进行根管治疗的难度,且患牙因冠髓组织缺失不能进行牙髓敏感性测试^[14]。同时,CP 的术后疼痛强度和镇痛药摄入量显著降低,表明使用 CP 可以更好地实现疼痛控制的短期目标^[15]。

目前,PP 和 CP 的确切适应证尚不清楚。虽然 2 种治疗方案都显示出了成功的结果,但各自技术的优点和缺点让临床医生在面对这 2 个选择时造成

了困惑。鉴于 PP 更为保守的性质,在伴有不可复性牙髓炎症状的成熟恒牙中,在进行 CP 之前,可以先尝试 PP,如果不能在合理的时间内止血,则应修改治疗程序,从 PP 改为 CP,或从 CP 改为 RCT。

2 活髓切断术中盖髓材料的研究进展

2.1 传统盖髓材料及其评价 氢氧化钙曾是活髓切断术的不二选择,但越来越多的研究表明其不仅对剩余牙髓组织的封闭能力较差,且形成的钙化桥质量较低,还可能引发牙髓退变及弥漫性钙化等问题^[16]。20 世纪 90 年代后,无机三氧化物聚合物(mineral trioxide aggregate, MTA)在 RCT 和 VPT 领域得到了广泛的应用,MTA 以其优越的性能取代了氢氧化钙,现已经成为活髓切断术盖髓材料的金标准。但 MTA 也存在一些不足,如导致牙齿变色、操作性差,临床使用时需要先进行调拌,难以保证材料的均质性、凝固时间长和治疗后去除难度大等^[17-18]。以上不足严重限制了 MTA 在活髓切断术等治疗中的应用。

2.2 新型生物陶瓷材料在活髓切断术中的应用 在 2000 年代初期,出现了许多改良的 MTA 产品,克服了传统 MTA 的缺点,同时保留了其原有的优良性能。在 2000 年代末和 2010 年代初,随着材料技术的发展,MTA 以外的生物陶瓷被开发出来,这类材料被称为新型生物陶瓷材料。iRoot BP 系列、Biodentine、TheraCal LC、EndoSequence 牙根修复材料、BioAggregate 和富含钙的混合物(calcium-enriched mixture, CEM)等产品已在临床实践中得到广泛应用,其具有与 MTA 相当的生物学特性,如抗菌活性、低细胞毒性和轻度炎症反应^[19-20]。与现有的手工调拌的 MTA 相比,这些材料的操作性能有了革命性的提升,且相较于 MTA 具有更好的颜色稳定性。Biodentine 具有更高的机械强度和更快的凝固速度。BioAggregate 已被证明具有优异且稳定的黏接强度和密封性能。CEM 在价格上更合理。同时,通过大量临床试验、体外实验和病例报告,已证明新型生物陶瓷材料运用于成熟恒牙活髓切断术中具有与 MTA 相当甚至更好的临床疗效^[21-25]。但是,与 MTA 相比,没有足够的研究评估新型生物陶瓷材料,并且各种体外模型的方法和结果存在差异。因此,还需要更全面的实验和长期临床研究对这些材料进行更明确的评估。另外,新型生物陶瓷材料昂贵的费用可能会限制其使用。目前没有一种生物陶瓷材料是完全理想的,其在实际应用中总是有其各自的局限性。未来生物陶瓷的抗

菌性能、机械性能、凝固时间和溶解度仍有待提高^[20]。目前的研究一方面侧重于评估现有生物陶瓷材料的性能和临床效果,一方面则侧重于现有生物陶瓷产品的更新。尽管目前缺乏临床数据,但新的生物陶瓷仍然在不断开发,例如与30%钨酸钙(TCS+CaWO₄)相关的硅酸三钙修复材料^[26]。

3 活髓切断术疗效及其影响因素研究进展

3.1 活髓切断术与根管治疗术临床疗效对比研究进展 相关研究^[7,27]表明,在治疗成熟恒牙不可复性牙髓炎时,PP和CP的临床和影像学成功率与RCT相当,甚至更好,活髓切断术可以作为RCT的可行替代方案。此外,疼痛是患者寻求牙髓治疗的主要主观症状。在解除有症状不可复性牙髓炎疼痛方面,活髓切断术已显示出优越的止痛效果。一项随机对照临床试验对活髓切断术和RCT的术后疼痛程度和成功率进行了比较,研究^[28]结果表明,活髓切断术组术后疼痛和不适症状缓解更多,活髓切断术可以作为紧急缓解疼痛的替代治疗方法,与Eghbal等^[29]研究结果一致,活髓切断术后疼痛减轻更多,而且耗时更短,活髓切断术可使治疗持续时间缩短近50%,显著提高患者的舒适度。确定严格的适应证是必要的,仍然需要具有足够样本量和长期随访的随机临床试验进一步比较2种治疗方法。

3.2 活髓切断术操作过程对牙髓炎症状态判断方法的研究进展

3.2.1 术前对牙髓炎症状态判断方法的研究进展

基于牙髓神经血管变化的准确牙髓诊断是成功进行牙髓治疗的先决条件。最常用的诊断牙髓状况的方法是牙髓敏感性测试,如冷测实验(cold pulp testing, CPT)、热测实验(heat pulp testing, HPT)和电活力测试(electric pulp testing, EPT)。CPT是鉴别牙髓坏死最有效的测试方法^[30],准确率达86%,EPT和HPT的准确率分别为81%和71%。但以上3种牙髓活力检测方法易受患者主观因素影响,尤其是患者的生理和心理状态,并且无法检测牙髓血流。另外,患牙牙髓敏感测试无反应不等同于患牙无活髓组织存在。为了克服牙髓敏感性测试的缺点,激光多普勒血流测定(laser doppler flowmetry, LDF)及脉搏血氧测定(pulse oximetry, PO)已成为真正的牙髓活力测试方法。一项系统综述得出结论,术前判断牙髓状态最准确的方法是LDF和PO,最不准确的方法是HPT,因为LDF与PO可以在不依赖患者反应的情况下直接检测牙髓血流^[31]。但这2种检测方法的准确性会受一些操

作因素的影响,如会因探头移动、周围组织、患者体位或年龄而干扰测试结果,另外其应用标准也有待进一步临床试验的验证。影像学诊断技术在过去几十年中取得了进步,X线片、CT或CBCT和MRI等影像学方法可以显示出牙髓良好的图像,是一种非常有前途的牙髓异常可视化和检测工具,但通过影像学测量准确评估实际牙髓状态尚无统一的标准。另外,影像学方法在临床实践中也存在一些局限性,首先,图像质量可能会因金属结构而降低,其次,图像上特有的伪影可能会干扰牙髓状态的评估,最后,检查过程中任何移动都会影响成像。综合而言,目前尚缺乏一种理想的测试方法能在术前准确判断牙髓的状态。

3.2.2 术中对牙髓炎症状态判定方法的研究进展

在确定治疗计划时,术中对牙髓组织的评估比术前的临床诊断更具有指导意义^[6]。目前缺乏能够描绘牙髓真实状态或帮助测量炎症进入牙髓距离的准确诊断工具。牙髓发炎组织切除后控制出血的能力被认为是一个重要的预后因素,也是判断牙髓炎症程度更有力的指标^[32]。目前的研究以10 min为达到止血的最大限度,如果在规定的时间内没有达到止血效果,则立即改行RCT^[32-33]。一项前瞻性研究^[34]表明,在年轻恒牙不可复性牙髓炎中,止血时间和活髓切断术结果之间的关系是非线性的,当止血时间超过4 min时,活髓切断术的结果与止血时间呈负相关。但据报道,即使在被诊断为不可复性牙髓炎的成熟恒牙中,84%的病例在PP或CP中牙髓出血可以在6 min内得到控制^[35]。在Singla等^[32]研究中,大多数病例(87%)在4~8 min内实现止血。另一方面,Taha等^[24]研究中98%的病例在2~6 min内实现了止血。也有关于长时间出血病例成功完成了活髓切断术的报道,其中1颗出血长达10 min,另一颗出血长达15 min。研究^[13,33]表明,达到止血所需的时间没有影响活髓切断术后的结果。晚期牙髓炎症可能会导致牙髓出血,难以停止,因此,如果进行了止血,但仍无法控制出血,则应改变治疗策略,从PP改为CP或RCT^[36]。由于没有特定的临床测试可以实时确定炎症的实际程度,因此用放大镜和显微镜直接观察牙髓组织被认为是临床了解牙髓状况的最佳策略。在放大镜和显微镜下检查牙髓断面,如果没有观察到健康的牙髓组织,则应进一步切除牙髓组织,并在显微镜下再次检查剩余的牙髓状态,然后重复该过程,直到观察到健康的牙髓断面。健康牙髓断面的特征包括连续的血液充盈且无崩解的牙髓组织和周围健康、质地坚硬的

牙本质。暴露的牙髓组织明显变红,这表明牙髓处于充血状态,是炎症的间接迹象。在没有出血的情况下,髓室底和暴露的髓角呈深色也表明牙髓坏死。如果牙髓可逆性发炎,即没有坏死区域、微脓肿迹象和感染灶,牙髓可以完整保存^[6]。如果牙髓内有坏死组织、牙本质碎片或黄色的无血管组织,则应切除更多的牙髓组织,直到观察到健康的结构^[12]。如果牙髓暴露部位颜色苍白发黄、没有出血和渗出,或者暴露部位持续出血和渗出太多,那么牙髓多半无法保留,则应改行 RCT^[6,12]。建议在检查牙本质最深处和暴露的牙髓组织后,再最终决定在每种情况下选择最合适的治疗方法。

新的研究报告称,发炎牙髓中的生物炎症介质水平升高,这可能有助于量化牙髓炎症的程度。临床诊断为不可复性牙髓炎牙齿的牙髓样本中白细胞介素(interleukin, IL)-8、肿瘤坏死因子(tumor necrosis factor, TNF)- α 、基质金属蛋白酶(matrix metalloproteinase, MMP)-9 和晚期糖基化终产物受体(receptor for advanced glycation end products, RAGE)的基因和蛋白表达增加,这表明有可能使用选定的分子作为牙髓炎症的诊断生物标志物。最近一项系统综述表明,在所研究的生物分子中,IL-8 和 IL-6 表现出足够的诊断准确性,具有高敏感度、特异度和诊断优势比,可以区分健康牙髓和有症状不可复性牙髓炎的牙髓^[37]。不同炎症程度的牙髓组织基质金属蛋白酶抑制剂 1(tissue inhibitor of metalloproteinase-1, TIMP-1)水平差异显著, TIMP-1 浓度与根方 3/4 牙髓组织炎症程度具有较强的正相关关系,验证了应用生物标志物识别牙髓炎特定病理状况的可行性^[38]。最近的一项临床试验也强调了采集的牙髓血液中 MMP-9 和中性粒细胞明胶酶浓度与活髓切断术的结果显著相关,提示 MMP-9 可用作评估牙髓炎状态和 VPT 预后的潜在生物标志物^[39]。

3.3 活髓切断术中牙髓消毒和止血材料及方法的研究进展 活髓切断术的结果还取决于在切除炎症牙髓组织后的及时止血。次氯酸钠(NaClO)由于其止血和抗菌性能,是用于 VPT 的推荐溶液。据报道,NaClO 与牙髓组织具有生物相容性,对牙髓组织无毒,并在 VPT 中作为止血剂显示出良好的效果^[7]。在目前的研究中,牙髓组织切断后常在牙髓创面上放置 NaClO 浸泡的无菌棉球,或 NaClO 冲洗来止血。一旦牙髓暴露,用 NaClO 冲洗牙髓可以最大限度地减少细菌负荷,并防止牙本质碎片沉积到牙髓组织中,不干扰牙髓愈合^[12]。NaClO 还具有

选择性溶解坏死软组织的独特特性,不仅能消毒,还能分解生物膜。NaClO 还可以消除复合染色,解决美观问题^[40]。因此,在 VPT 中,它可能是物理去除牙髓的一个很好的替代方案,可以减少机械切除感染组织的必要性。

目前还未能确定用于活髓切断术中 NaClO 溶液的理想浓度。研究显示,6% 较高浓度的 NaClO 在体外与牙髓细胞群接触数小时后细胞毒性明显。浓度在 0.5%~5% 之间的 NaClO 可直接与牙髓组织直接接触,不会对牙髓细胞的募集、分化和硬组织沉积造成不良影响^[6]。Ballal 等^[41]一项随机对照试验表明,与惰性生理盐水相比,用 2.5% NaClO 溶液冲洗牙髓创面可显著减少术后不适和早期疼痛。合理规范使用 NaClO 有助于降低 VPT 术后疼痛发生率,提高治疗成功率。未来的研究可以比较不同种类及不同浓度的止血剂用于牙髓断面的冲洗效果。

激光技术具有显著的优点,包括及时止血、降低污染风险、建立无菌手术环境以及减轻术后水肿和疼痛。口腔科中使用的主要激光器类型包括钕:钇铝石榴石(Nd:YAG),二氧化碳(CO₂),氩,铷:钇铝石榴子石(Er:YAG),铷,铬:钇钆石榴石(Er,Cr:YSGG)和二极管激光器。激光技术已被证明在 VPT 中具有诊断和治疗的价值,激光与盖髓材料联合使用有利于提高 VPT 的成功率^[42]。Dronamraju 等^[43] 研究显示,与 NaClO 相比,磷酸钛氧钾(potassium titanyl phosphate, KTP)激光在有症状不可复性牙髓炎活髓切断术中用作止血和消毒剂术后疼痛评分更低,止痛效果更强。

3.4 活髓切断术冠方封闭时机和材料的研究进展

严密的冠部封闭是活髓切断术保持长期成功的重要条件。有研究^[33]分析显示,使用玻璃离子水门汀做冠方封闭的材料失败风险最大,晚期失败常与冠方渗漏引起牙髓再感染有关。研究^[40]显示,使用银汞合金或复合树脂作为最终修复体时,成功率没有差异。建议活髓切断术后立即行复合树脂黏接修复,以防止微渗漏,保护生物活性材料,降低术后敏感性,并为后期牙尖覆盖修复体建立基础,应每隔适当的时间对材料的完整性进行临床和放射线照相检查,以确保手术的长期成功。

3.5 活髓切断术的术后随访 随访期的长短仍然是一个有争议的话题。研究表明,6 个月的随访似乎足以初步评估活髓切断术的结果^[3],需要 2 年的随访才能预测牙髓治疗的成功。ESE 则建议在术后 6 个月和 12 个月随访,进行临床和影像学检查以及敏感性测试,以后每年进行一次,持续 4 年。活

髓切断术的早期失败表现为对治疗没有反应或出现疼痛,晚期失败表现为出现新的病变或原有病变未恢复^[33]。早期失败通常被认为是在治疗后立即发生的(最多3个月)^[41],晚期失败通常被视为在治疗后6个月以上发生。因此,建议术后2周、3个月、6个月、12个月和每年一次的时间间隔内,通过病史、临床和影像学检查仔细评估髓切断术后疗效,持续4年。

综上所述,牙髓组织良好的修复防御能力,为具有不可复性牙髓炎症状的成熟恒牙的活髓切断术奠定了良好的基础,新型生物相容性材料的开发和牙髓组织处理技术的进步为成熟恒牙的冠髓切断术创造了条件。成熟恒牙不可复性牙髓炎的治疗方案,需要结合患者的临床病史、牙髓敏感测试、影像学检查、牙髓止血的时间,显微镜下牙髓状态甚至炎症介质的生物指标等综合评估。

[参考文献]

- [1] Tibúrcio-Machado CS, Michelon C, Zanatta FB, et al. The global prevalence of apical periodontitis: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int Endod J*, 2021, 54(5): 712-735.
- [2] Kawahara H, Inoue M, Okura K, et al. Risk factors for tooth loss in patients with ≥ 25 remaining teeth undergoing mid-long-term maintenance: a retrospective study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(13): 7174.
- [3] 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.
- [4] Demant S, Dabelsteen S, Bjørndal L. A macroscopic and histological analysis of radiographically well-defined deep and extremely deep carious lesions: carious lesion characteristics as indicators of the level of bacterial penetration and pulp response[J]. *Int Endod J*, 2021, 54(3): 319-330.
- [5] Cushley S, Duncan HF, Lappin MJ, et al. Pulpotomy for mature carious teeth with symptoms of irreversible pulpitis: A systematic review[J]. *J Dent*, 2019, 88: 103158.
- [6] Ricucci D, Siqueira JFJ, 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.
- [7] Philip N, Suneja B. Minimally invasive endodontics: a new era for pulpotomy in mature permanent teeth [J]. *Br Dent J*, 2022, 233(12): 1035-1041.
- [8] Lin LM, Ricucci D, Saoud TM, et al. Vital pulp therapy of mature permanent teeth with irreversible pulpitis from the perspective of pulp biology[J]. *Aust Endod J*, 2020, 46(1): 154-166.
- [9] Jassal A, Nawal RR, Yadav S, et al. Outcome of partial and full pulpotomy in cariously exposed mature molars with symptoms indicative of irreversible pulpitis: A randomized controlled trial[J]. *Int Endod J*, 2023, 56(3): 331-344.
- [10] Lin GSS, Hisham ARB, Cher CY, et al. Success rates of coronal and partial pulpotomies in mature permanent molars: a systematic review and single-arm meta-analysis [J]. *Quintessence Int*, 2021, 52(3): 196-208.
- [11] Ramani A, Sangwan P, Tewari S, et al. Comparative evaluation of complete and partial pulpotomy in mature permanent teeth with symptomatic irreversible pulpitis: A randomized clinical trial[J]. *Int Endod J*, 2022, 55(5): 430-440.
- [12] Taha NA, About I, Sedgley CM, et al. Conservative management of mature permanent teeth with carious pulp exposure[J]. *J Endod*, 2020, 46(9s): S33-S41.
- [13] Careddu R, Duncan HF. A prospective clinical study investigating the effectiveness of partial pulpotomy after relating preoperative symptoms to a new and established classification of pulpitis[J]. *Int Endod J*, 2021, 54(12): 2156-2172.
- [14] Sadaf D. Success of coronal pulpotomy in permanent teeth with irreversible pulpitis: an evidence-based review [J]. *Cureus*, 2020, 12(1): e6747.
- [15] Taha NA, Abdelkhalder SZ. Outcome of full pulpotomy using Biodentine in adult patients with symptoms indicative of irreversible pulpitis[J]. *Int Endod J*, 2018, 51(8): 819-828.
- [16] Kunert M, Lukomska-Szymanska M. Bio-inductive materials in direct and indirect pulp capping-a review article [J]. *Materials (Basel)*, 2020, 13(5): 1204.
- [17] Souza LC, Yadlapati M, Dorn SO, et al. Analysis of radiopacity, pH and cytotoxicity of a new bioceramic material [J]. *J Appl Oral Sci*, 2015, 23(4): 383-389.
- [18] 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.
- [19] Jerez-Olate C, Araya N, Alcántara R, et al. In vitro antibacterial activity of endodontic bioceramic materials against dual and multispecies aerobic-anaerobic biofilm models[J]. *Aust Endod J*, 2022, 48(3): 465-472.
- [20] Dong X, Xu X. Bioceramics in endodontics: updates and future perspectives[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(3): 354.
- [21] Abuelniel GM, Duggal MS, Kabel N. A comparison of MTA and Biodentine as medicaments for pulpotomy in traumatized anterior immature permanent teeth: A randomized clinical trial[J]. *Dent Traumatol*, 2020, 36(4): 400-410.
- [22] Asgary S. Micro-computed tomography assessment of full pulpotomy in a mature molar after five years: a case report [J]. *Iran Endod J*, 2022, 17(4): 223-224.
- [23] Bakhtiar H, Nekoofar MH, Aminishakib P, et al. Human pulp responses to partial pulpotomy treatment with theracal as compared with biodentine and proroot MTA: A clinical trial [J]. *J Endod*, 2017, 43(11): 1786-1791.
- [24] Taha NA, Al-Rawash MH, Imran ZA. Outcome of full

- pulpotomy in mature permanent molars using 3 calcium silicate-based materials: A parallel, double blind, randomized controlled trial[J]. *Int Endod J*,2022,55(5):416-429.
- [25] Asgary S, Eghbal MJ, Shahravan A, et al. Outcomes of root canal therapy or full pulpotomy using two endodontic biomaterials in mature permanent teeth: a randomized controlled trial[J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26(3): 3287-3297.
- [26] Queiroz MB, Inada RNH, Jampani JLA, et al. Biocompatibility and bioactive potential of an experimental tricalcium silicate-based cement in comparison with Bio-C repair and MTA Repair HP materials[J]. *Int Endod J*,2023, 56(2):259-277.
- [27] Taha NA, Al-Khatib H. 4-Year Follow-up of full pulpotomy in symptomatic mature permanent teeth with carious pulp exposure using a stainproof calcium silicate-based material [J]. *J Endod*,2022,48(1):87-95.
- [28] Taha NA, Abuzaid AM, Khader YS. A randomized controlled clinical trial of pulpotomy versus root canal therapy in mature teeth with irreversible pulpitis: outcome, quality of life, and patients' satisfaction[J]. *J Endod*,2023,49(6):624-631.e2.
- [29] Eghbal MJ, Haeri A, Shahravan A, et al. Postendodontic pain after pulpotomy or root canal treatment in mature teeth with carious pulp exposure: a multicenter randomized controlled trial[J]. *Pain Res Manag*,2020,2020:5853412.
- [30] Proulx C, Dumais Y, Beauchamp G, et al. Reliability of electric pulp test, cold pulp test or tooth transillumination to assess pulpal health in permanent dog teeth[J]. *J Vet Dent*, 2022,39(2):133-141.
- [31] 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.
- [32] Singla R, Laller V, Gill GS, et al. Comparative assessment of the outcome of complete pulpotomy using mineral trioxide aggregate and Biodentine in mature permanent mandibular molars with symptomatic irreversible pulpitis: A randomized clinical trial with 18 months of follow-up[J]. *J Conserv Dent Endod*,2023,26(4):402-408.
- [33] Tan SY, Yu VSH, Lim KC, et al. Long-term pulpal and restorative outcomes of pulpotomy in mature permanent teeth [J]. *J Endod*,2020,46(3):383-390.
- [34] Sheng M, Zhang D, Yan J, et al. Relationship between time to hemostasis and outcomes of pulpotomy using iRoot BP Plus in symptomatic young permanent teeth: a prospective study [J]. *J Clin Pediatr Dent*,2023,47(6):142-149.
- [35] Duncan HF, El-Karim I, Dummer PMH, et al. Factors that influence the outcome of pulpotomy in permanent teeth[J]. *Int Endod J*,2023,56(Suppl 2):62-81.
- [36] Zenaldeen R, Kaddoura R, Alzoubi H, et al. Partial pulpotomy in mature permanent molars with symptoms indicated irreversible pulpitis using MTA: a study of three case reports over four-year follow-up [J]. *Case Rep Dent*, 2023, 2023: 1344101.
- [37] Karrar RN, Cushley S, Duncan HF, et al. Molecular biomarkers for objective assessment of symptomatic pulpitis: A systematic review and meta-analysis[J]. *Int Endod J*,2023, 56(10):1160-1177.
- [38] Li M, Tian J, Xu Z, et al. Histology-based profile of inflammatory mediators in experimentally induced pulpitis in a rat model: screening for possible biomarkers[J]. *Int Endod J*,2021,54(8):1328-1341.
- [39] Sharma R, Kumar V, Logani A, et al. Association between concentration of active MMP-9 in pulpal blood and pulpotomy outcome in permanent mature teeth with irreversible pulpitis- a preliminary study[J]. *Int Endod J*,2021,54(4):479-489.
- [40] AAE position statement on vital pulp therapy[J]. *J Endod*, 2021,47(9):1340-1344.
- [41] Ballal NV, Duncan HF, Rai N, et al. Sodium hypochlorite reduces postoperative discomfort and painful early failure after carious exposure and direct pulp capping-initial findings of a randomized controlled trial[J]. *J Clin Med*,2020,9(8): 2408.
- [42] Afkhami F, Rostami G, Xu C, et al. The application of lasers in vital pulp therapy: a review of histological effects [J]. *Lasers Med Sci*,2023,38(1):215.
- [43] Dronamraju S, Baig MM, K S, et al. To assess the efficacy of various disinfection and hemostasis procedures in providing postoperative pain relief following pulpotomy in cases of symptomatic irreversible pulpitis[J]. *Cureus*, 2023, 15(9): e45163.

(本文编辑:何祯)