

·综述·

复合树脂修复体边缘微渗漏检测方法研究进展

秦艺凤¹ 吕欣¹ 林梦蝶¹ 邵丽娜²¹中国医科大学口腔医学院,沈阳 110002; ²中国医科大学口腔医学院·附属口腔医院

牙体牙髓病科,辽宁省口腔疾病重点实验室,沈阳 110002

通信作者:邵丽娜,Email:429530054@qq.com

【摘要】 复合树脂是窝洞充填最常用的材料,但其固化过程中发生聚合收缩常导致复合树脂修复体和牙体组织界面产生微渗漏,影响充填疗效。本文回顾了复合树脂修复体边缘微渗漏检测方法的相关研究,分析比较了各种检测方法的优点和局限性,总结归纳了各种检测方法的最新应用情况,以期复合树脂充填疗效的评估提供科学依据。

【关键词】 微渗漏; 聚合收缩; 复合树脂

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2020-BS-111); 中国医科大学大学生创新创业训练计划(X202310159068)

引用著录格式: 秦艺凤,吕欣,林梦蝶,等. 复合树脂修复体边缘微渗漏检测方法研究进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2024, 18(2): 123-131.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.02.008

Research progress in detection methods of margin microleakage for composite resin restorations

Qin Yifeng¹, Lyu Xin¹, Lin Mengdie¹, Shao Lina²

¹School of Stomatology, China Medical University, Shenyang 110002, China; ²Department of Endodontics, School and Hospital of Stomatology, China Medical University, Liaoning Provincial Key Laboratory of Oral Diseases, Shenyang 110002, China

Corresponding author: Shao Lina, Email: 429530054@qq.com

【Abstract】 Composite resin has become the most commonly used restorative material for cavity filling, but the polymerization shrinkage during its curing process often leads to microleakage between composite resin restorations and the tooth interface, which affects the efficacy of the filling. This article reviewed the relevant research on marginal microleakage detection methods for composite resin restorations, analysed and compared the advantages and limitations of different detection methods, and summarized the latest applications of different detection methods to provide a scientific basis for evaluating the efficacy of composite resin fillings.

【Key words】 Microleakage; Polymerization shrinkage; Composite resins

Fund programs: Natural Science Foundation of Liaoning Province (2020 - BS - 111); Innovation and Entrepreneurship

Training Program for College Students of China Medical University(X202310159068)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.02.008

复合树脂是窝洞充填最常用的材料,但其在固化过程中常发生聚合收缩,使树脂充填体与窝洞之间的边缘适应性遭到破坏,充填体边缘产生缝隙即微渗漏。此外,粘接剂的聚合收缩和化学组成、牙齿和树脂材料之间的热膨胀系数不匹配、循环加载导致的疲劳等也能够导致微渗漏的形成^[1-2]。微渗漏是口腔中的细菌及其代谢产物、液体、分子或离子的通道,长期边缘适应性的破坏和微渗漏形成能够导致修复体边缘变色、继发龋、牙髓刺激和术后敏感等,是影响树脂修复体临床预后的关键因素^[3-4]。

无论从临床还是牙科材料研究角度,复合树脂修复体边缘微渗漏的检测都非常重要。临床上主要通过肉眼或显微镜下观察,以及X线片等影像学技术评估微渗漏。然而,前者不包含底层组织的信息,后者由于伪影、低分辨率,以及将3D复杂结构视为2D叠加图像所带来的问题检测能力较低;同时,X线片也只能检测到大于40 μm的半透明区域^[5-6]。因此,在临床早期微渗漏并不能被检测到。光学相干断层成像(optical coherence tomography, OCT)也可用于临床上体内检测复合树脂修复体边缘微渗漏^[1,7]。为了科学客观地评估复合树脂修复体边缘微渗漏,有很多方法应用于体外研究,常用的方法有:染料渗漏法、染料提取法、激光共聚焦扫描显微镜(confocal laser scanning microscopy, CLSM)、扫描电镜(SEM)、微生物渗漏法、流体滤过法、电化学法、放射性同位素法、微型CT(micro-computed tomography, Micro-CT)和OCT等^[8]。复合树脂修复体边缘微渗漏不同的检测方法具有各自的优缺点及应用范围(图1)。

一、染料渗漏法

1. 染料渗漏法的实验方法:染料渗漏法需要将样品通过冷热循环实验,封闭根尖,修复体边缘1~2 mm以外区域涂上指甲油,将样品在染料浸泡后冲洗、风干、切片,最后在光学显微镜下检查^[9],是体外检测微渗漏最简单、最常用、最古老的方法^[8]。通常,使用预定值范围对渗漏程度分级进行主观地评估^[4,10],也可定量测量微渗漏宽度^[11-12]。

染料渗漏法的样本制作可分为2D技术和3D技术^[13]。2D技术是将牙齿分别沿着牙体长轴向近远中、颊舌向切割

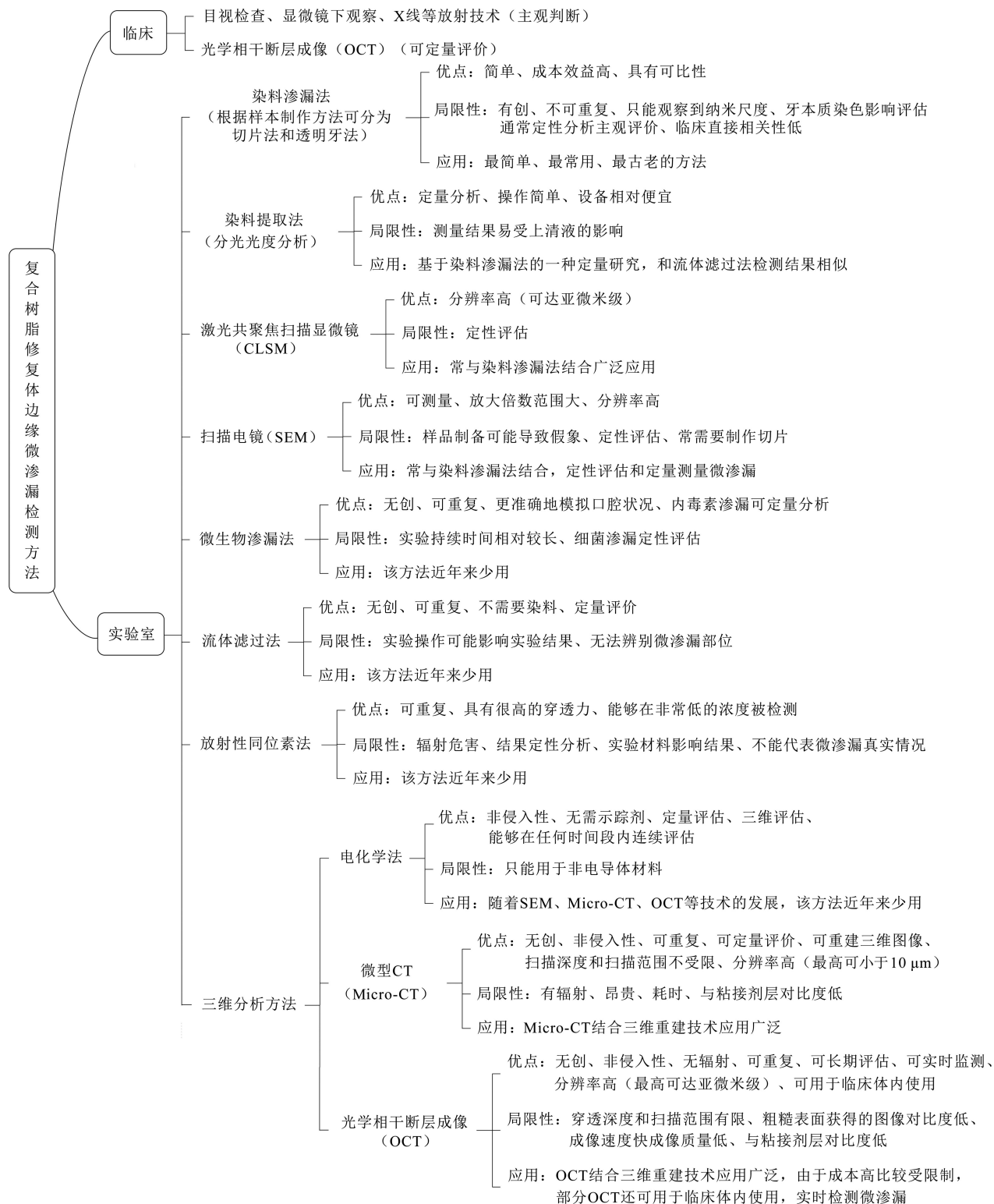


图1 复合树脂修复体边缘微渗漏检测方法优缺点及其应用

或直接水平切割。测量值通过部分截面获得的,不能反映样本整体的渗漏情况,结果应谨慎解释^[11]。复合树脂-牙体组织界面微渗漏形态和分布不规则,渗漏程度的评价一般基于最深渗透区域的测量值或是样品不同部位测量值的平均值^[14]。此外,切片过程可能造成部分牙体组织与染料丢失,

影响准确性。2D技术评估微渗漏准确性欠佳,且受实验操作人员的影响。Mosharrafian等^[15]使用2D技术评估大块充填树脂和传统复合树脂充填乳磨牙Ⅱ类洞时牙釉质和牙本质边缘微渗漏,两组微渗漏结果差异不具有统计学意义。Ma等^[16]使用2D技术评估由不同的树脂基质组成的复合树

脂充填Ⅱ类洞时产生的边缘微渗漏,实验组树脂基质为新型非雌激素二甲基丙烯酸酯,对照组树脂基质为双酚A-二甲基丙烯酸酯(bisphenol A diglycidyl methacrylate, Bis-GMA),结果显示该新型树脂基质组成的复合树脂表现出更小的边缘微渗漏,作者认为该新型树脂基质作为Bis-GMA的替代品具有广阔的应用前景。

透明牙法作为普遍使用的3D技术,可从三维方向观察染料渗透的最大深度。其不破坏牙体组织,但操作复杂,需先后进行10%硝酸脱矿、乙醇梯度脱水和水杨酸甲酯溶液处理至透明,要求所使用的染料不溶于酸性溶液。Khoroushi等^[13]使用2D和3D技术分别评估复合树脂修复体边缘微渗漏,结果显示3D技术比2D技术更为精确。

2. 不同染料的应用:常用的染料有亚甲蓝、碱性品红、硝酸银、荧光染料和龙胆紫等^[17]。示踪剂的类型、浓度和稳定性、浸泡溶液的pH值、浸泡时间、示踪剂与牙体硬组织的化学亲和力等都会影响微渗漏的评价^[18]。

亚甲蓝是一种低相对分子质量物质,粒径小于牙本质小管的内径(1~4 μm),比口腔环境中的一些细菌要小,穿透能力强^[9,19]。其易着色、染色程度深、在光学显微镜下与牙体组织形成明显色差、可视化好^[20],是目前最常用的染料之一。然而,亚甲蓝容易渗透到牙齿有水存在的区域,特别是在自酸蚀粘接时会增加亲水性,导致高估微渗漏深度^[21]。

碱性品红相对分子质量小、易于渗透。但碱性品红已被证明与牙本质有结合倾向^[22-23],可能会高估微渗漏的深度。

硝酸银的渗透能力很强,银离子的直径(0.059 nm)与细菌的平均直径(0.5~1.0 μm)相比非常小^[24],同时也会使邻近牙本质染色,可能会高估微渗漏的深度。银的原子序数比牙体硬组织和树脂中的元素高得多,因此银在致密时能够呈现良好的不透射线便于观察^[4]。这些使得它常作为体式显微镜、SEM、透射电子显微镜和Micro-CT等技术的示踪剂^[25]。Alaghemand等^[26]实验表明,硝酸银染料渗透可用于边缘密封性高的测试,特别适用于纳米尺度微渗漏的观察。然而,硝酸银溶液呈弱酸性,对牙本质有腐蚀作用而产生假阳性结果。因此,常用氯化硝酸银作为示踪剂。

3. 染料渗漏法的优点与局限性:染料渗漏法是一种简单、成本效益高和具有可比性的评估微渗漏的方法^[11]。但其也是一种破坏性技术,且结果的评估也具有高度主观性^[27],实际微渗漏需要与一定程度的牙本质染色进行区分^[28]。即使染料渗漏实验中交界面内部几乎未见染料渗漏现象,但也不能排除其存在微渗漏的可能。且间隙内的空气能够限制染料渗透,可采用真空或离心状态下的主动染料渗透^[29]。Krifka等^[30]对染料渗漏法进行了临床相关性评估,发现多种因素和各种测试方法均可能影响此方法的结果,临床直接相关性低。因此,临床研究不能被体外微渗漏研究所取代,也不能仅用染料渗漏法预测临床表现。

二、染料提取法

1. 染料提取法的实验方法:染料提取法即分光光度分

析,是基于染料渗漏法的一种定量实验^[31]。其借助硝酸浸泡,释放渗透到间隙的所有染料,经离心后,获得上清液,用浓硝酸作空白对照,读取上清液染料吸光度,不同染料对光的选择性吸收波长及相应的吸收系数是固定的物理常数^[32]。根据公式计算染料浓度

$$A = EC$$

其中A为吸光度值,E为摩尔吸收系数,C为浓度。

分光光度计吸收的光与染料浓度成正比^[33],吸光度值越大,染料浓度越高,微渗漏程度越严重。染料提取法敏感且易于使用,优于染料渗漏法(定性方法),其回收所有已渗透的染料,且避免了染料渗漏法制作切片对微渗漏评估的影响。染料提取法操作简单,与SEM、Micro-CT等相比不需要昂贵的设备,但其测量结果受上清液中的杂质和温度变化等影响。常用染料有亚甲蓝、甲苯胺蓝和碱性品红等。

2. 染料提取法的应用:Kumar等^[33]使用染料提取法评估两种复合树脂充填V类洞时的密封能力和产生的微渗漏,结果显示两种树脂的吸光度值差异有统计学意义。Camps等^[34]比较传统的染料渗漏法和染料提取法,并以流体滤过法作为对照,结果显示染料渗漏法与其他两种技术相比微渗漏评估结果准确性较差,染料提取法得到了与流体滤过法相同的结果,但节省了更多实验时间。染料提取法与流体滤过技术研究结论相似,但可避免后者存在的水渗透到不规则性区域的情况,导致过滤值随着时间推移而降低^[35]。

三、激光共聚焦扫描显微镜

1. CLSM的实验方法:CLSM常与染料渗漏法结合,使用荧光染料(通常是罗丹明b)浸泡,切片后在CLSM下通过评分系统定性评估标本的微渗漏,还可利用数字标尺,定量测量微渗漏宽度^[36]。CLSM使用透镜聚焦在观察表面以下数微米处,避免了样本切片导致的染料扩散和抛光伪影,CLSM依次逐点、逐行扫描样本,并将像素信息组合成一张图像^[37]。CLSM的最大理论分辨率可达0.2 μm^[38]。

2. 激光共聚焦扫描显微镜的应用:Shenoi等^[39]在荧光模式下使用CLSM评估采用流动树脂和Cention-N修复材料充填V类洞时的边缘微渗漏,结果发现Cention-N比流动树脂表现出更小的微渗漏。Sengar等^[36-37,40]使用CLSM评估复合树脂修复体边缘微渗漏。CLSM能够记录光学截面,并重建三维图像,获得的图像具有高灵敏度、对比度和分辨率,且不需要样本的物理切片^[36,38],可以期待未来用于三维评估微渗漏。

四、扫描电镜

1. SEM的实验方法:SEM是介于透射电镜和光学显微镜之间的一种微观形貌观察手段,通过聚焦电子束向样品发射电子,依据电子与样品中的原子相互作用,原子发出的二次电子中包含有关样品表面形貌和成分的信息,然后检查样品中二次电子的发射情况。通过电子束逐点扫描,将扫描结果拼接在一起形成完整的图像^[41]。SEM常与染料渗漏法结合,用于体外研究定性或定量评估微渗漏。常用的染料是硝酸银(如50%氨硝酸银^[4])。银离子的数量和分布揭示了微渗

漏的程度,其他染料如碱性品红或亚甲蓝,在样本的切片制作过程中容易被冲洗掉^[14]。SEM成像主要由扫描速度和分辨率决定,扫描速度越快,分辨率越低,成像质量越差。可调整加速电压、倾斜角度和孔径等以优化成像质量^[42]。SEM放大倍数在20~20万倍之间连续可调,分辨率可达微米级^[43],视野大、成像富有立体感。SEM观察需要特殊的制备,充分干燥、喷镀金膜以防止水分污染,可能会使粘接界面产生裂隙,导致人工假象^[27]。

2. SEM的应用:Ranjbar等^[12]同时使用SEM与染料渗漏法,定量和定性评估了复合树脂充填Ⅱ类洞时产生的微渗漏,两种方法显示出相同的结果,可靠性都很高。Şenol等^[2]使用SEM评估一种流动复合树脂使用不同分层厚度(2、4 mm)充填Ⅱ类洞时的边缘微渗漏,结果显示使用4 mm厚度会产生更大的微渗漏。Boaru等^[44]使用SEM评估氯己定溶液进行牙本质预处理对全酸蚀和自酸蚀粘接系统边缘封闭性的影响,结果显示氯己定溶液预处理对微渗漏没有影响。由于SEM比Micro-CT和OCT等高分辨仪器使用方便,成本更低,常与染料渗漏法结合,用于体外研究定性评估和定量测量微渗漏。

五、微生物渗漏法

1. 微生物渗漏法的实验方法:微生物渗漏法利用细菌或内毒素作为示踪物质,可定性或定量评估微渗漏。此方法无创、具有可重复性^[45]。通常选择变异链球菌作为示踪微生物。Nematollahi等^[46]认为,使用细菌作为评估微渗漏的指标可以更准确地模拟口腔状况。评估细菌渗漏有三种主要方法,包括构建双室渗漏模型、使用SEM、检测细菌及聚合酶链反应^[47]。最常用的是双室渗漏模型,细菌通过毛细管和髓腔与牙齿表面之间建立的通道迁移,随后到达牙齿修复界面,进入下方的肉汤^[48],此模型以肉汤浑浊的天数作为微渗漏的指标。显色萤变形细胞裂解物(limulus amoebocyte lysate, LAL)测试是用于内毒素的检测^[49],颜色改变后可用分光光度计定量测量。此方法需防止其他微生物污染,实验操作要求严格无菌。为确认渗透的细菌,可通过血琼脂培养基培养,观察菌落形态,或使用对应染色剂染色。若采用双室渗漏模型,则实验持续时间长,需每隔一天更新上腔室的细菌悬浮液^[45]以保持细菌活力,需每天检查样品并确认穿透的细菌^[46]。

2. 微生物渗漏法的应用:Nematollahi等^[46]使用以变异链球菌为指示剂的微生物渗漏法比较不同复合树脂材料和不同修复技术修复Ⅴ类洞的微渗漏情况。结果表明,在Ⅴ类洞中加入薄层流动复合树脂或树脂改性玻璃离子聚合物不会降低微渗漏。此外,近年来使用微生物渗漏法评估复合树脂修复体边缘微渗漏的实验较少,微生物渗漏法更多用于根管、根尖和种植体-基台界面等微渗漏的评估。因此,需要更准确地模拟口腔状况可考虑使用微生物渗漏法评估微渗漏。

六、流体滤过法

1. 流体滤过法的实验方法:流体滤过法是通过观察引入毛细管的气泡运动来检测冠方微渗漏的一种定量检测方法^[50]。

将样本通过充满水的管道与压力装置相连接,通过注射器引入小气泡,在正压力下水通过微渗漏,同时小气泡发生相应位移^[51]。气泡位移数据可被转换为流体流量,单位为 $\mu\text{L}/\text{min}/\text{cmH}_2\text{O}$,用以下公式表达^[52-53]

$$V=(\pi \cdot \Delta P \cdot r^4)/(8 \cdot L \cdot \eta),$$

其中 V 为流量(m^3/s), ΔP 为两端静水压差(Pa), L 为充填物长度(m), r 为空隙半径(m), η 为流体黏度(Pas)。

实验过程所使用压力和毛细管的直径会影响系统灵敏度,测量时间、施加压力、含有气泡管的直径和气泡长度等可能会影响实验结果^[54]。

2. 流体滤过法和其他方法的比较:与染料渗漏法相比,流体滤过法无创,不需要示踪剂,且消除了染料对牙本质的亲和力等相关问题,允许一段时间内重复测量,可避免操作人员偏差^[55-56],结果可定量评价,流体过滤法具有更好的准确性和可比性^[53]。同时,不需要像细菌渗漏法和放射性同位素法那样复杂的材料。但其无法辨别微渗漏所在部位^[57]。

3. 流体滤过法的应用:Moosavi等^[50]采用流体滤过法评估了复合树脂充填Ⅰ类洞时不同气流持续时间对自酸蚀粘接系统微渗漏的影响,发现某些粘接剂的最佳干燥时间可能和制造商的使用说明不同。Shabzendedar等^[51]采用流体滤过法评估氟化物治疗前后对复合树脂和玻璃离子聚合物微渗漏的影响,发现与未受氟化物处理的复合树脂相比,玻璃离子聚合物放置后氟化物凝胶导致微渗漏显著增加。近年来,随着其他定量测量技术和三维成像技术的发展,和流体滤过法无法辨别微渗漏部位等局限性,其少用于评估复合树脂修复体边缘微渗漏,而多用于评估根管微渗漏。

七、放射性同位素法

1. 放射性同位素法的实验方法:放射性同位素法是将样品浸入同位素标记的溶液中,然后放置在 γ 射线计数容器中的相同位置,用计算机 γ 射线计数器测定样品中放射性同位素值。 γ 射线计数器具有非常高的灵敏度和特异性,能够计算出放射性物质的准确剂量,进而直观反映出微渗漏的大小^[58]。常用的放射性同位素有 ^{45}Ca 、 ^{131}I 、 ^{35}S 、 ^{22}Na 、 ^{32}P 、 ^{86}Rb 和 ^{14}C 等^[59],直径小且具有很高的穿透力,能提供更精细的细节。因此,同位素比染料示踪剂穿透更深,且放射自显影技术允许检测出微量的示踪剂^[60]。放射性同位素法的结果可能会受同位素类型、样品的形状和表面纹理、辐射源和溶液之间的距离,以及不同的暴露时间等的影响^[61]。如同位素 ^{45}Ca ,对牙齿结构或修复材料具有亲和力,导致测量误差增加^[62]。而水合铊 $^{201}(\text{}^{201}\text{Tl})$ 离子的大小与水合钾离子大小相似,更能够模拟口腔生理状况^[63]。

2. 放射性同位素法的应用:Gogna等^[64]使用放射性同位素 ^{45}Ca 比较了三种纳米复合树脂材料的微渗漏,结果显示三种材料协同作用具有最小的微渗漏。Paulo等^[65]使用放射性同位素比较三种不同临时修复材料的密封能力,研究认为对照组复合树脂材料的微渗漏明显低于所有测试的临时材料。放射自显影的解释依赖于对示踪剂穿透深度和路径的定性判断,难以定量评估^[60]。此外,放射性同位素直径比细

菌小,分布也不相同,不能代表微渗漏的真实情况^[58]。此方法无创、具有可重复性,但需要特定设备且具有辐射危险^[64]。

八、电化学法

1. 电化学法的实验方法:电化学法是基于电解池原理,依赖离子形成连续的电解质路径,定量评估微渗漏。它封闭除充填体和根尖孔外的其余部分,将冠方和根方分别浸入2个电解池中,电极由同一电源相连,测量通过充填体的电流、电压,再行欧姆定律运算,计算的阻抗用复数形式表示,实部对应电阻,虚部对应电容和电感^[66]。微渗漏的大小与离子扩散产生的电流成正比,与阻抗成反比。该实验可使用直流或交流电源。实验结果受电解质的组成、电极类型、两个电极之间的距离、电极厚度和离子溶液的电导率等的影响^[67],离子溶液的电导率与离子的浓度直接相关,并受牙科材料释放的离子成分影响^[68]。由于盐溶液的渗透压和离子组成与组织液相似,常用其作为电解质溶液^[69]。

2. 电化学法的应用:Pradelle-Plasse等^[70]使用电化学法定量评估复合树脂修复体边缘微渗漏。Lim^[71]强调使用电化学法评估微渗漏能够实现同一样品的连续测试和不同样品的同时测试的优势。电化学法可量化数据,并可评估热循环、机械应力等对树脂-牙齿界面的影响^[70],为非侵入技术,不需要示踪剂^[69]。但近年来随着SEM、Micro-CT和OCT等三维成像技术的发展,很少使用电化学法评估复合树脂修复体边缘微渗漏。

3. 电化学法和其他方法的比较:Iwami等^[72]通过对复合树脂边缘微渗漏染料渗透的三维分析,评估电化学法检测微渗漏的准确性,结果显示电化学法的检测结果与三维边缘渗透量(染料渗透表面积和染料渗透速率)的相关性有统计学意义,电化学法可用于评估复合树脂修复体边缘微渗漏。

九、微型CT

1. Micro-CT的实验方法:Micro-CT使用微焦点X射线源和高分辨率探测器,对样本进行扫描(S1、S2),由探测器收集信号,利用软件设置阈值区分牙体组织、修复材料和间隙,使用两种方法量化微渗漏的空间分布。

第一种方法是对数据进行分区,以间隙宽度来判断是否存在渗漏,渗漏间隙的标准为大于16 μm ,由此生成微渗漏图像并以2D图像呈现,此方法可不进行S1扫描。

另外一种方法是为S1、S2扫描感兴趣区域,利用软件对齐图片,生成微米级(最高分辨率可小于10 μm)3D重建图像^[14,73]。但这比较昂贵和耗时,Micro-CT每次扫描约1 min,扫描每颗牙齿的时间约2 h^[14]。通常使用银溶液(如50%氨硝酸银)作为X射线造影剂用于显示微渗漏。

2. Micro-CT的应用:Micro-CT结合三维重建技术已被广泛用于评估复合树脂修复体边缘微渗漏。Rizzante等^[73]使用Micro-CT从2D图像和3D分析分别评估复合树脂充填Ⅱ类洞时的边缘微渗漏,结果显示2D和3D分析结果差异有统计学意义,3D分析评估微渗漏更准确、更可靠。Bilgili Can等^[74]使用Micro-CT从2D图像和3D分析分别评估预热到不同温度、不同厚度和不同聚合模式的大块树脂充填Ⅱ类洞时的微

渗漏,结果显示应用2 mm厚度的预热大块树脂可减少微渗漏,预热至68℃为最佳。Nie等^[3]采用Micro-CT评估不同收缩率和不同黏度的流动复合树脂衬垫对复合物树脂充填Ⅱ类洞时产生的微渗漏的影响,结果显示流动复合树脂收缩率、黏度与微渗漏显著相关。

3. Micro-CT与其他方法的比较:Micro-CT成像过程无损,可重复检测,扫描后样品仍可进行其他测试^[73],且其能够重建3D图像,可以使用分析软件定量测量微渗漏的长度、面积和体积^[3],但渗漏路径仍需SEM观察。Micro-CT和OCT都能够重建牙体组织和修复体的3D图像,有效无损评价微渗漏。由于X射线的穿透能力强,Micro-CT评价微渗漏可以不考虑扫描深度和扫描范围^[28],由于红外光的穿透距离短,OCT穿透深度和扫描范围有限^[75]。Jacker-Guhr等^[14]比较染料渗漏法和Micro-CT在评价复合树脂-牙齿界面微渗漏的有效性,结果是两种方法不具有可比性。原因是如果使用相同的标本进行评估,Micro-CT数据采集需要很长时间,在此期间,标本可能会脱水,产生假阳性间隙或出现运动伪影,将会影响染料渗漏法的评估结果;再者很难确保评估的切片来自样品中的同一区域。Neves等^[25]认为,微渗漏宽度较大时,硝酸银在复合树脂-牙齿界面处呈浸润模式扩散,Micro-CT评估效果更好,微渗漏宽度较小时,硝酸银以弥漫的模式扩散,体式显微镜评估效果更好。Daghery等^[18]和Tosco等^[76]比较染料渗漏法和Micro-CT评估复合树脂修复体边缘微渗漏测量,结果显示Micro-CT对微渗漏的评估更可靠。但如果粘接剂没有足够的抗辐射能力,则很难通过Micro-CT三维重建进行可视化,难以区分粘接剂层和微渗漏层。这种情况下,SEM能够以比Micro-CT更高的放大倍率下观察Micro-CT表明可能存在间隙的区域^[76],Zotti等^[77]也认为SEM和Micro-CT综合分析可更准确评估间隙宽度。

十、光学相干断层成像

1. OCT的实验方法:OCT是一种无创、无辐射和高分辨率的光学方法,可以在二维和三维模式下检测组织的微观结构^[78]。常用牙科OCT包括时域OCT(time Domain-OCT,TD-OCT)、傅里叶域OCT(fourier Domain-OCT,FD-OCT)。FD-OCT分为扫频OCT(swept Source-OCT,SS-OCT)和谱域OCT(spectral Domain-OCT,SD-OCT)。TD-OCT利用了光的相干特性,通过将低相干光耦合到干涉仪中,光被分裂成样品臂和参考臂,当来自参考臂的反射和来自样品的后向散射光重新组合时,在相干长度内检测到干扰信号,由探测器记录生成深度分辨扫描和横断面扫描,可以获得高分辨率的二维图像或创建三维图像^[5,79]。OCT图像上信号强度增强的区域显示为明亮的聚集图像即为微渗漏^[75,79]。FD-OCT系统组件与TD-OCT几乎相同,但增加了光栅(用于傅里叶变换)、传感器阵列或光谱仪。OCT具有优异的纵向和横向空间分辨率(小于10 μm)^[7]。

2. OCT与其他方法的比较:目前OCT用于复合树脂-牙体组织成像能力在分辨率和扫描所需时间方面都超过了Micro-CT^[6,27]。OCT 3D扫描所需时间约为4 s,而Micro-CT扫

描所需时间约为几分钟^[27]。常规的微渗漏检测方法通常需要染料的渗透和样品的破坏,很难同时或在不同时间评估微渗漏^[79],OCT则可用于微渗漏的无创长期评估^[27]。Rominu等^[80]在检测粘接剂与牙齿结构和复合树脂之间的界面时观察到OCT和Micro-CT分析之间具有良好一致性。Nedeljkovic等^[81]研究发现,复合树脂-牙体组织界面间隙宽度超过60 μm可能会导致牙齿损伤的发展,从而导致术后敏感性和继发龋的发生。因此,具有高分辨率的Micro-CT、OCT评估微渗漏更具优势。Zhou等^[82]使用SS-OCT和CLSM评估树脂-牙本质界面间隙形成,如间隙类型、深度和宽度等,先用SS-OCT无创检测,再用CLSM观察以确认SS-OCT结果,显示OCT的间隙量表相对误差为11.347%,与CLSM的间隙量表显著相关,表明OCT评估微渗漏具有高准确性。SS-OCT系统的轴向分辨率(12 μm)和横向分辨率(20 μm)^[28,83],其无法精确测量几微米的间隙大小。因此,SS-OCT和CLSM的联合使用能更准确地评估微渗漏。

3. OCT的应用:OCT已被广泛用于三维分析评估复合树脂修复体边缘微渗漏。Naguib等^[84]使用OCT评估将玉米醇溶蛋白包覆氧化镁(zMgO)纳米填料掺入复合树脂材料对其边缘微渗漏的影响,结果显示掺入0.3%和0.5% zMgO纳米颗粒有助于改善复合树脂材料边缘微渗漏。Makishi等^[5]和Abdelaziz等^[85]认为OCT三维成像可被认为是一种快速检测修复界面间隙的无创技术。OCT的实时和非侵入性成像能力为临床牙科诊断和监测提供了一个新的方向。Haak等^[6]介绍的SS-OCT系统带有手持式口内探针可实时扫描提供口腔内牙齿结构的2D和3D图像,它可以为临床上更换和(或)修复有缺陷的修复体提供参考。OCT由于红外光的穿透距离,成像深度在1~3 mm,限制了它的使用^[78]。Katkar等^[7]认为,牙科OCT临床应用的局限性主要是成本高、缺乏商业可行性。OCT根据不同材料的折射率之间的差异检测不同材料之间的界面,因此粘接剂层和空气层难以分辨^[80]。Rominu等^[80]通过在粘接剂层加入氧化锆改变其光学特性来增加粘接剂层的对比度。

综上所述,对于体外检测复合树脂修复体边缘微渗漏的方法,目前尚无不同方法的统一标准,且部分方法定性评估易受观察者的影响。此外,体外实验难以完全模拟口腔内的微生态环境,部分检测方法被认为临床相关性低^[30]。如何统一不同方法的评价标准,如何将不同的方法结合使评估更加精确^[12,77],如何完善检测方法的局限性,如何提高检测方法的临床相关性,研究可以直接用于体内检测的方法等,是未来复合树脂修复体边缘微渗漏检测方法研究的方向。

利益冲突 所有作者均声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] Yu F, Liu B, Lyu C, et al. Evaluating the effect of preheating on resin composites in pit-and-fissure caries treatments with a digital intraoral scanner[J]. Dent Mater, 2023, 39(6): 577-585. DOI: 10.1016/j.dental.2023.03.006.
- [2] Şenol AA, Karabulut Gençer B, Tarçın B, et al. Microleakage and marginal integrity of ormocer/methacrylate-based bulk-fill resin restorations in MOD cavities: SEM and stereomicroscopic evaluation[J]. Polymers (Basel), 2023, 15(7): 1716. DOI: 10.3390/polym15071716.
- [3] Nie J, Yap AU, Wang XY. Influence of shrinkage and viscosity of flowable composite liners on cervical microleakage of Class II restorations: A Micro-CT analysis[J]. Oper Dent, 2018, 43(6): 656-664. DOI: 10.2341/17-091-L.
- [4] Zhao XY, Li SB, Gu LJ, et al. Detection of marginal leakage of Class V restorations *in vitro* by micro-computed tomography[J]. Oper Dent, 2014, 39(2): 174-180. DOI: 10.2341/12-182-L.
- [5] Makishi P, Shimada Y, Sadr A, et al. Non-destructive 3D imaging of composite restorations using optical coherence tomography: Marginal adaptation of self-etch adhesives[J]. J Dent, 2011, 39(4): 316-325. DOI: 10.1016/j.jdent.2011.01.011.
- [6] Haak R, Wicht MJ, Hellmich M, et al. Detection of marginal defects of composite restorations with conventional and digital radiographs[J]. Eur J Oral Sci, 2002, 110(4): 282-286. DOI: 10.1034/j.1600-0722.2002.21271.x.
- [7] Katkar RA, Tadinada SA, Amaechi BT, et al. Optical coherence tomography[J]. Dent Clin North Am, 2018, 62(3): 421-434. DOI: 10.1016/j.cden.2018.03.004.
- [8] Bajabaa S, Balbaid S, Taleb M, et al. Microleakage evaluation in Class V cavities restored with five different resin composites: *In vitro* dye leakage study[J]. Clin Cosmet Investig Dent, 2021, 13: 405-411. DOI: 10.2147/CCIDE.S331426.
- [9] Taori P, Nikhade P, Chandak M, et al. Comparative evaluation of microleakage in Class II restorations using open- and closed-sandwich techniques with zirconomer as an intermediate material: An *in-vitro* study[J]. Cureus, 2022, 14(10): e30109. DOI: 10.7759/cureus.30109.
- [10] Klaisiri A, Vongsang J, Leelaudom T, et al. Methylene blue penetration of resin infiltration and resin sealant in artificial white-spot lesions[J]. Eur J Dent, 2022. DOI: 10.1055/s-0042-1756689.
- [11] Najjar YM, Burhan AS, Hajeer MY, et al. Effects of the conventional, soft start, and pulse delay modes produced by light-emitting diode device on microleakage beneath metal brackets: An *in vitro* comparative study[J]. Int Orthod, 2022, 21(1): 100718. DOI: 10.1016/j.ortho.2022.100718.
- [12] Ranjbar Omidi B, Heidari S, Farahbakhshpour F, et al. The effect of dental adhesive composition and etching mode on microleakage of bonding agents in primary molar teeth[J]. J Dent (Shiraz), 2022, 23(2 Suppl): 393-401. DOI: 10.30476/DENTJODS.2021.90489.1497.
- [13] Khoroushi M, Ehteshami A. Marginal microleakage of cervical composite resin restorations bonded using etch-and-rinse and self-etch adhesives: Two dimensional vs. three dimensional methods[J]. Restor Dent Endod, 2016, 41(2): 83-90. DOI: 10.5395/rde.2016.41.2.83.

- [14] Jacker-Guhr S, Ibarra G, Oppermann LS, et al. Evaluation of microleakage in Class V composite restorations using dye penetration and Micro-CT[J]. Clin Oral Investig, 2016, 20(7): 1709-1718. DOI: 10.1007/s00784-015-1676-0.
- [15] Mosharrafian S, Farahmand N, Poorzandpoush K, et al. *In vitro* microleakage at the enamel and dentin margins of Class II cavities of primary molars restored with a bulk - fill and a conventional composite[J]. Clin Exp Dent Res, 2023, 9(3): 512-517. DOI: 10.1002/cre2.729.
- [16] Ma X, Zhang X, Huang X, et al. Low shrinkage bulk-filled dental resin composites with non-estrogenic dimethacrylate [J]. Biomater Sci, 2023, 11(10): 3669-3682. DOI: 10.1039/d3bm00154g.
- [17] Punathil S, Almalki SA, AlJameel AH, et al. Assessment of microleakage using dye penetration method in primary teeth restored with tooth-colored materials: An *in vitro* study [J]. J Contemp Dent Pract, 2019, 20(7): 778-782. DOI: 10.5005/jp-journals-10024-2596.
- [18] Daghrery A, Yaman P, Lynch M, et al. Evaluation of Micro-CT in the assessment of microleakage under bulk fill composite restorations[J]. Am J Dent, 2022, 35(2): 128-132.
- [19] Ranadheer E, Shah UD, Neelakantappa KK, et al. Comparative analysis of microleakage of zirconia-infused glass ionomer cement with miracle mix and amalgam: An *in vitro* study [J]. Cureus, 2018, 10(12): e3672. DOI: 10.7759/cureus.3672.
- [20] Butail A, Dua P, Mangla R, et al. Evaluation of marginal microleakage and depth of penetration of different materials used as pit and fissure sealants: An *in vitro* study [J]. Int J Clin Pediatr Dent, 2020, 13(1): 38-42. DOI: 10.5005/jp-journals-10005-1742.
- [21] Patil BS, Kamatagi L, Saojii H, et al. Cervical microleakage in giomer restorations: An *in vitro* study [J]. J Contemp Dent Pract, 2020, 21(2): 161-165.
- [22] Alani AH, Toh CG. Detection of microleakage around dental restorations: A review [J]. Oper Dent, 1997, 22(4): 173-185.
- [23] Bud MG, Pop RC, Pricope R, et al. Comparative microleakage outcomes of different techniques used for creating the occlusal anatomy in occlusal direct restorations using the dental operating microscope [J]. Clin Exp Dent Res, 2022, 8(6): 1623-1629. DOI: 10.1002/cre2.664.
- [24] Douglas WH, Fields RP, Fundingsland J. A comparison between the microleakage of direct and indirect composite restorative systems [J]. J Dent, 1989, 17(4): 184-188. DOI: 10.1016/0300-5712(89)90072-9.
- [25] Neves AA, Jaecques S, Van Ende A, et al. 3D-microleakage assessment of adhesive interfaces: Exploratory findings by μ CT [J]. Dent Mater, 2014, 30(8): 799-807. DOI: 10.1016/j.dental.2014.05.003.
- [26] Alaghemand H, Abolghasemzadeh F, Pakdel F, et al. Comparison of microleakage and thickness of resin cement in ceramic inlays with various temperatures [J]. J Dent Res Dent Clin Dent Prospects, 2014, 8(1): 45-50. DOI: 10.5681/joddd.2014.008.
- [27] Bakhsh TA, Sadr A, Shimada Y, et al. Non-invasive quantification of resin - dentin interfacial gaps using optical coherence tomography: Validation against confocal microscopy [J]. Dent Mater, 2011, 27(9): 915-925. DOI: 10.1016/j.dental.2011.05.003.
- [28] Han SH, Sadr A, Tagami J, et al. Non-destructive evaluation of an internal adaptation of resin composite restoration with swept-source optical coherence tomography and Micro - CT [J]. Dent Mater, 2016, 32(1): e1-e7. DOI: 10.1016/j.dental.2015.10.009.
- [29] Balasubramanian SK, Saraswathi V, Ballal NV, et al. A comparative study of the quality of apical seal in resilon/epiphany SE following intra canal irrigation with 17% EDTA, 10% citric acid, and MTAD as final irrigants - A dye leakage study under vacuum [J]. J Clin Diagn Res, 2017, 11(2): ZC20-ZC24. DOI: 10.7860/JCDR/2017/21420.9256.
- [30] Krifka S, Federlin M, Hiller KA, et al. Microleakage of silorane- and methacrylate-based Class V composite restorations [J]. Clin Oral Investig, 2012, 16(4): 1117-1124. DOI: 10.1007/s00784-011-0619-7.
- [31] Irzooqee AF, Al Haidar AHMJ, Abdul-Kareem M. The effect of different obturation techniques in primary teeth on the apical microleakage using endoflas: A comparative *in vitro* study [J]. Int J Dent, 2023; 4982980. DOI: 10.1155/2023/4982980.
- [32] Gupta R, Kewalramani R. *In-vitro* evaluation of microleakage of bioceramic root-end filling materials: A spectrophotometric study [J]. J Oral Biol Craniofac Res, 2021, 11(2): 330-333. DOI: 10.1016/j.jobcr.2021.03.001.
- [33] Kumar AA, de Ataide IN, Fernandes M. Comparative evaluation of sealing ability of two self - adhesive flowable composites following various restorative techniques in Class V lesions: An *in vitro* study [J]. J Conserv Dent, 2021, 24(5): 508-513. DOI: 10.4103/jcd.jcd_268_21.
- [34] Camps J, Pashley D. Reliability of the dye penetration studies [J]. J Endod, 2003, 29(9): 592-594. DOI: 10.1097/00004770-200309000-00012.
- [35] Deb A, Pai V, Nadig RR. Evaluation of immediate and delayed microleakage of Class V cavities restored with chitosan - incorporated composite resins: An *in vitro* study [J]. Int J Clin Pediatr Dent, 2021, 14(5): 621-627. DOI: 10.5005/jp-journals-10005-2043.
- [36] Sengar EV, Mulay S, Beri L, et al. Comparative evaluation of microleakage of flowable composite resin using etch and rinse, self-etch adhesive systems, and self-adhesive flowable composite resin in Class V cavities: Confocal laser microscopic study [J]. Materials (Basel), 2022, 15(14): 4963. DOI: 10.3390/ma15144963.
- [37] Nanda BD, Sharma P, Moudgil M, et al. *In vitro* evaluation and comparison of microleakage of two restorative composite resins in Class II situations using confocal laser scanning microscopy [J]. J Contemp Dent Pract, 2018, 19(9): 1100-1104. DOI: 10.5005/JP-

- JOURNALS-10024-2388.
- [38] Bayguinov PO, Oakley DM, Shih CC, et al. Modern laser scanning confocal microscopy [J]. *Curr Protoc Cytom*, 2018, 85 (1):e39. DOI:10.1002/cpcy.39.
 - [39] Shenoi PR, Kokane VB, Thawale HV, et al. Comparing marginal microleakage in Class V cavities restored with flowable composite and Cention-N using confocal microscope-an *in-vitro* study [J]. *Indian J Dent Res*, 2021, 32 (3) : 348-353. DOI: 10.4103/ijdr.IJDR_90_20.
 - [40] Gavini S, Devalla S, Shankarappa P, et al. Effect of fluoride recharge on the microleakage of fluoride - releasing restorative materials: An *ex vivo* confocal laser scanning microscopy study [J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2022, 12 (2) : 216-225. DOI:10.4103/jispcd.JISPCD_283_21.
 - [41] Tsiper S, Dicker O, Kaizerman I, et al. Sparsity-based super resolution for SEM images [J]. *Nano Lett*, 2017, 17 (9) : 5437-5445. DOI:10.1021/acs.nanolett.7b02091.
 - [42] Gunjal S, Nagesh L, Raju HG. Comparative evaluation of marginal integrity of glass ionomer and resin based fissure sealants using invasive and non-invasive techniques: An *in vitro* study [J]. *Indian J Dent Res*, 2012, 23 (3) : 320-325. DOI: 10.4103/0970-9290.102214.
 - [43] Bilgrami A, Maqsood A, Alam MK, et al. Evaluation of shear bond strength between resin composites and conventional glass ionomer cement in Class II restorative technique-An *in vitro* study [J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15 (12) : 4293. DOI: 10.3390/ma15124293.
 - [44] Boaru MO, Tărăboanță I, Stoleriu S, et al. The influence of chlorhexidine gluconate dentine pre - treatment on adhesive interface and marginal sealing [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2023, 59 (2):278. DOI:10.3390/medicina59020278.
 - [45] Wuerschling SN, Moser L, Obermeier KT, et al. Microleakage of restorative materials used for temporization of endodontic access cavities [J]. *J Clin Med*, 2023, 12 (14) : 4762. DOI: 10.3390/jcm12144762.
 - [46] Nematollahi H, Bagherian A, Ghazvini K, et al. Microbial microleakage assessment of Class V cavities restored with different materials and techniques: A laboratory study [J]. *Dent Res J (Isfahan)*, 2017, 14 (5) : 344-350. DOI: 10.4103/1735-3327.215958.
 - [47] Savadkouhi ST, Bakhtiar H, Ardestani SE. *In vitro* and *ex vivo* microbial leakage assessment in endodontics: A literature review [J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2016, 6 (6) : 509-516. DOI: 10.4103/2231-0762.195516.
 - [48] Snigdha NTS, Kamarudin A, Baharin F, et al. Evaluation of bacterial leakage and marginal adaptation of the bioceramics pulp dressing materials: An *in vitro* study [J]. *BMC Oral Health*, 2023, 23 (1):462. DOI:10.1186/s12903-023-03129-1.
 - [49] Harder S, Dimaczek B, Açıl Y, et al. Molecular leakage at implant-abutment connection—*In vitro* investigation of tightness of internal conical implant-abutment connections against endotoxin penetration [J]. *Clin Oral Investig*, 2010, 14 (4) : 427-432. DOI: 10.1007/s00784-009-0317-x.
 - [50] Moosavi H, Forghani M, Managhebi E. Effect of different air-drying time on the microleakage of single-step self-etch adhesives [J]. *Restor Dent Endod*, 2013, 38 (2) : 73-78. DOI: 10.5395/rde.2013.38.2.73.
 - [51] Shabzendedar M, Moosavi H, Kebriaee F, et al. The effect of topical fluoride therapy on microleakage of tooth colored restorations [J]. *J Conserv Dent*, 2011, 14 (3) : 297-301. DOI: 10.4103/0972-0707.85820.
 - [52] Al Kahtani AM. The effect of root canal sealers and timing of cementation on the microleakage of the parapost luted with resin cement [J]. *Saudi Dent J*, 2010, 22 (2) : 57-62. DOI: 10.1016/j.sdentj.2010.02.003.
 - [53] Hajihassani N, Mohammadi N, Karimi Kelayeh A, et al. Comparison of the effect of post space preparation time on the apical seal of two different sealers [J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22 (1):356. DOI:10.1186/s12903-022-02367-z.
 - [54] Xu Q, Fan MW, Fan B, et al. A new quantitative method using glucose for analysis of endodontic leakage [J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2005, 99 (1) : 107-111. DOI:10.1016/j.tripleo.2004.06.006.
 - [55] Zarei M, Javidi M, Kazemi Z, et al. In vitro evaluation of apical sealing ability of HEROfill® obturator versus cold lateral condensation in curved root canals [J]. *J Dent (Tehran)*, 2015, 12 (8):599-606.
 - [56] Koç C, Aslan B, Ulusoy Z, et al. Sealing ability of three different materials to repair furcation perforations using computerized fluid filtration method [J]. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*, 2021, 15 (3):183-187. DOI:10.34172/joddd.2021.031.
 - [57] Suri NK, Nikhil V, Jha P, et al. Evaluation of effect of addition of 2% chlorhexidine on the sealing ability of Biodentine: An *in vitro* study [J]. *J Conserv Dent*, 2015, 18 (6) : 479-482. DOI: 10.4103/0972-0707.168816.
 - [58] Marques Ferreira M, Martinho JP, Duarte I, et al. Evaluation of the sealing ability and bond strength of two endodontic root canal sealers: An *in vitro* study [J]. *Dent J (Basel)*, 2022, 10 (11) : 201. DOI:10.3390/dj10110201.
 - [59] Anıl N, Hekimoglu C, Büyükbas N, et al. Microleakage study of various soft denture liners by autoradiography: Effect of accelerated aging [J]. *J Prosthet Dent*, 2000, 84 (4) : 394-399. DOI: 10.1067/mpd.2000.108775.
 - [60] Going RE. Microleakage around dental restorations: A summarizing review [J]. *J Am Dent Assoc*, 1972, 84 (6) : 1349-1357. DOI:10.14219/jada.archive.1972.0226.
 - [61] Khalilak Z, Vali T, Danesh F, et al. The effect of one-step or two-step MTA plug and tooth apical width on coronal leakage in open apex teeth [J]. *Iran Endod J*, 2012, 7 (1):10-14.
 - [62] Modaresi J, Baharizade M, Shareghi A, et al. Copper ion as a new leakage tracer [J]. *J Dent (Shiraz)*, 2013, 14 (4):155-159.
 - [63] Sadighpour L, Geramipناه F, Allahyari S, et al. *In vitro*

- evaluation of the fracture resistance and microleakage of porcelain laminate veneers bonded to teeth with composite fillings after cyclic loading[J]. J Adv Prosthodont, 2014,6(4):278-284. DOI:10.4047/jap.2014.6.4.278.
- [64] Gogna R, Jagadis S, Shashikal K. A comparative *in vitro* study of microleakage by a radioactive isotope and compressive strength of three nanofilled composite resin restorations[J]. J Conserv Dent, 2011,14(2):128-131. DOI:10.4103/0972-0707.82609.
- [65] Paulo S, Abrantes AM, Xavier M, et al. Microleakage evaluation of temporary restorations used in endodontic treatment—An *ex vivo* study [J]. J Funct Biomater, 2023, 14 (5) : 264. DOI: 10.3390/jfb14050264.
- [66] Ho YC, Lai YL, Chou IC, et al. Effects of light attenuation by fibre posts on polymerization of a dual-cured resin cement and microleakage of post-restored teeth[J]. J Dent, 2011,39(4):309-315. DOI:10.1016/j.jdent.2011.01.009.
- [67] Kazempoor M, Modaresi J, Zandi H, et al. Lack of correlation between microbial penetration method and electro chemical technique for assessment of leakage through the root canal fillings [J]. Contemp Clin Dent, 2014,5(1):71-74. DOI:10.4103/0976-237X.128670.
- [68] Modaresi J, Baharizade M, Shareghi A, et al. Copper ion as a new leakage tracer[J]. J Dent (Shiraz), 2013,14(4):155-159.
- [69] Khedmat S, Rezaefar M. Electrochemical evaluation on apical leakage of AH26 sealer after smear layer removal[J]. Iran Endod J, 2006,1(4):141-144.
- [70] Pradelle -Plasse N, Wenger F, Picard B, et al. Evaluation of microleakage of composite resin restorations by an electrochemical technique: The impedance methodology [J]. Dent Mater, 2004,20(5):425-434. DOI:10.1016/j.dental.2003.06.003.
- [71] Lim KC. Microleakage of intermediate restorative materials[J]. J Endod, 1990,16(3):116-118. DOI:10.1016/S0099-2399(06)81586-4.
- [72] Iwami Y, Hayashi M, Takeshige F, et al. The accuracy of electrical method for microleakage evaluation by a three - dimensional analysis[J]. J Dent, 2007,35(3):268-274. DOI: 10.1016/j.jdent.2006.09.003.
- [73] Rizzante FAP, Sedky RAF, Furuse AY, et al. Validation of a method of quantifying 3D leakage in dental restorations [J]. J Prosthet Dent, 2020,123(6):839-844. DOI:10.1016/j.prosdent.2019.05.019.
- [74] Bilgili Can D, Özarslan M. 3D-2D microleakage assessment of preheated bulk - fill composite resin applied with different parameters: A Micro-CT analysis[J]. Odontology, 2023 Mar 27. DOI:10.1007/s10266-023-00805-0.
- [75] Ali S, Gilani SBS, Shabbir J, et al. Optical coherence tomography's current clinical medical and dental applications: A review [J]. F1000Res, 2021, 10:310. DOI:10.12688/f1000research.52031.1.
- [76] Tosco V, Vitiello F, Furlani M, et al. Microleakage analysis of different bulk-filling techniques for Class II restorations: μ -CT, SEM and EDS Evaluations[J]. Materials (Basel), 2020, 14(1): 31. DOI:10.3390/ma14010031.
- [77] Zotti F, Vincenzi S, Zangani A, et al. Stamp technique: An explorative SEM analysis[J]. Dent J (Basel), 2023, 11(3):77. DOI:10.3390/dj11030077.
- [78] Naguib GH, Bakhsh TA, Turkistani AA, et al. Noninvasive adaptation appraisal of antiMicrobial nano -filled composite [J]. Int Dent J, 2022; S0020-6539 (22) 00263-5. DOI: 10.1016/j.identj.2022.11.004.
- [79] Turkistani A, Nakashima S, Shimada Y, et al. Microgaps and demineralization progress around composite restorations [J]. J Dent Res, 2015,94(8):1070-1077. DOI:10.1177/0022034515589713.
- [80] Rominu M, Manescu A, Sinescu C, et al. Zirconia enriched dental adhesive: A solution for OCT contrast enhancement. Demonstrative study by synchrotron radiation Microtomography [J]. Dent Mater, 2014,30(4):417-423. DOI:10.1016/j.dental.2014.01.004.
- [81] Nedeljkovic I, Teughels W, De Munck J, et al. Is secondary caries with composites a material - based problem? [J]. Dent Mater, 2015, 31 (11) : e247- e277. DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.001.
- [82] Zhou Y, Matin K, Shimada Y, et al. Detection and analysis of early degradation at resin-dentin interface by optical coherence tomography (OCT) and confocal laser scanning Microscope (CLSM) [J]. J Dent, 2021, 106: 103583. DOI: 10.1016/j.jdent.2021.103583.
- [83] Bakhsh TA, Khan SJ, Gharamah HA, et al. Nondestructive evaluation of microleakage in restored primary teeth using CP-OCT[J]. Niger J Clin Pract, 2021, 24 (6) : 919-924. DOI: 10.4103/njcp.njcp_442_20.
- [84] Naguib GH, Bakhsh TA, Turkistani AA, et al. Noninvasive adaptation appraisal of antiMicrobial nano -filled composite [J]. Int Dent J, 2023, 73(4):533-541. DOI: 10.1016/j.identj. 2022.11.004.
- [85] Abdelaziz M, Zuluaga AF, Betancourt F, et al. Optical coherence tomography (OCT) for the evaluation of internal adaptation of Class V resin restorations on Dentin [J]. Proc SPIE Int Soc Opt Eng, 2020,11217:1121706. DOI:10.1117/12.2544684.

(收稿日期:2023-07-06)

(本文编辑:王嫒)