综述

关于牙裂综合征的病因和早期诊断的研究进展

范　皓[1]　张　欢[1]　袁　瑞[1]　司敏敏[1]　郝兆楠[1]　冯志远[2,*]

作者单位：[1] 山西医科大学口腔医学院，口腔疾病防治与新材料山西省重点实验室；[2] 山西医科大学第五临床医学院　口腔正畸科

[*] 通讯作者：冯志远，联系方式：0351—4690868，电子邮箱：fengzy00@163.com，通讯地址：山西省太原市迎泽区双塔寺街 29 号，030001

【摘要】 牙裂综合征是一种常见的疾病，本文综述了包括牙齿结构不良、异常殆力和医源性因素等潜在牙裂综合征的病因，以及临床症状、视觉增强、X 线、光学成像和其他新技术在牙裂综合征早期诊断的研究进展，以期为牙裂综合征的预防和诊治提供一定的指导意义。

【关键词】 牙裂综合征；病因；早期诊断；临床表现；治疗

Research Progress on Etiology and Early Diagnosis of Cracked Teeth Syndrome

Hao Fan[1], Huan Zhang[1], Rui Yuan[1], Minmin Si[1], Zhaonan Hao[1], Zhiyuan Feng[2,]. ([1]Shanxi Medical University School and Hospital of Stomatology, Shanxi Province Key Laboratory of Oral Diseases Prevention and New Materials, Taiyuan, Shanxi Province, P.R. China; [2]Department of Orthodontics, The Fifth Clinical Medical College of Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi Province, P.R. China.)*

Correspondence: Zhiyuan Feng. Tel: 0351-4690868. Email: fengzy00@163.com. Address: NO.29 Shuangtasi Street, Yingze District, Taiyuan 030001, Shanxi Province, P.R. China.

【Abstracts】 Cracked teeth syndrome is a common disease. This article reviews the potential etiology of cracked teeth syndrome, including dental dysplasia, abnormal bite forces, and iatrogenic factors, and progress in the early diagnosis of cracked teeth syndrome, including clinical symptoms, visual enhancement methods, X-rays, optical imaging, and other new techniques. The aim of this study is to provide support for the diagnosis, prevention and treatment of cracked teeth syndrome.

【Key words】 cracked teeth syndrome; etiology; early diagnosis; clinical feature; treatment

1　引言

牙裂综合征（Cracked teeth syndrome）是除龋病、牙周病之外导致牙齿脱落的第三大原因，其发病率约为 34~74%。牙裂综合征的病因具有多因素的特点，健康的牙齿受到过大咬合力或牙齿对正常力的耐受性降低是牙裂的主要诱发因素。牙裂综合征的早期诊断对患牙的临床预后有重要影响。早期预防和治疗干预可以防止裂纹进一步扩展从而避免对牙体硬组织、牙髓或牙周组织造成不可逆损伤。当牙裂未深及牙髓时，其临床症状可能并不明显，且症状不具有特异性，这使得牙裂综合征的早期诊断难度较大。为了尽早识别裂纹和准确评估牙裂的深度，口腔医师们致力于对患牙进行更完善的临床检查，开发各项新技术以辅助牙裂综合征的诊断。

Cameron 在 1964 年提出了“牙裂综合征”一词，表现为从牙冠延伸到牙髓的不完全性折裂 [1]。Ellis 在 2001 年将牙齿不完全性折裂定义为深度和方向未知的断裂面可能延伸到牙髓和牙周的现象 [2]。此后，Hasan 将牙裂综合征明确地定义为：一种来源于牙冠、深度未知的裂纹穿过牙齿结构并向龈下延伸、还可能会继续扩展到牙髓和（或）牙周膜的牙齿断裂现象 [3]。牙裂综合征在 30~50 岁的成年人中较为常见，其发病率可达 34~74%[3]。临床中以磨

DOI：10.12337/zgkqjxjyzz.2023.04.003

基 金 项 目：中华口腔医学会中西部口腔正畸临床研究项目（项目编号：CSA—MW02021—14）

Supported by：CSA Orthodontic Clinical Research Project for Central and West China（No.CSA—MW02021—14）

牙多见，有研究报道每 100 个成年人中每年有 4.4 颗后牙发生牙裂 [4]。当长而垂直的裂纹发生于前牙区时，不仅影响患者的健康，还会严重影响美观。

美国牙髓病学会根据牙裂的临床症状将其分为五类：①无症状的牙釉质裂纹线；②咬合及冷刺激时牙齿敏感的牙尖折裂；③咬合时疼痛的牙齿开裂；④咀嚼时疼痛的牙体分裂；⑤严重疼痛的牙根纵裂 [5]。根据牙裂的位置及深度不同，牙裂综合征的预后可以分为 4 个等级：优、良、差、无望 [6]。有研究报道 42.2%~67.4% 的牙裂需要接受根管治疗，13.6%~22.9% 的牙齿则需要拔除 [7]。

早期识别并确定牙裂的实际破坏类型对治疗方案的选择和牙齿预后的评估尤为重要，然而目前尚无能准确评估牙裂的标准诊断程序。为此，本文将综述牙裂综合征的病因与早期诊断方法的研究进展。

2　牙裂综合征的潜在病因

牙裂综合征的病因具有多因素的特点，包括牙齿的发育、病理状态及异常功能等自身因素，也涉及到与治疗相关的医源性因素。全面了解牙裂的潜在病因是预防、诊断、治疗的重要前提 [3,7-8]。牙体自身结构差异、增龄性变化以及异常的力学因素在牙裂的发生中占主导地位。

2.1　牙齿结构不良

先天发育有缺陷的牙齿出现牙裂的可能性更高，在发育阶段钙化区域的不完全融合使得局部结构组织变得脆弱，从而增加了牙裂发生的风险 [8]。

随着年龄的增加，牙体组织中有机蛋白质的含量降低，力学特性改变，牙釉质的脆性增加、牙本质的弹性及抗疲劳性能降低、牙体对损伤的耐受性降低 [9,10]。牙齿断裂的风险和深度随年龄而增加，研究报道 50~59 岁的患者更容易发生牙齿断裂 [11]。高而陡的牙尖也是导致牙裂的危险因素之一，随着牙尖的高度与倾斜度增加，会对牙齿产生过大的侧向力，促进了牙裂的形成 [12]。此外，过大的根分叉和髓腔 [8]，或者牙齿的完整结构遭到龋病、楔状缺损等原因破坏时，也可能诱发牙裂。

2.2　异常咬合因素

咀嚼时异常的咬合因素是天然牙发生牙裂最常见的原因。在错颌畸形的患者当中，牙齿更容易承受过大的、非轴向的、不平衡的殆力，因此牙齿实际承受的殆力分布不均匀，局部超过了对正常 3~30 千克咬合力的耐受范围 [8]，导致牙齿结构间的化学键断裂 [7,13]。

患有深覆殆 [8] 和磨牙症 [7] 的患者往往由于异常的咬合承受了过大的殆力，而增加了牙齿的负荷，更容易发生牙裂。在夜间磨牙时，产生的殆力可能比有意识咀嚼时更大，牙齿的磨损程度也更高。下颌第二磨牙由于Ⅱ类杠杆效应和更靠近颞下颌关节的原因，最容易受到过大殆力的影响 [7]。咬合早接触、殆干扰和单侧咀嚼时异常的殆力也是个别牙牙裂的危险因素。如果咬合时上颌腭尖无法作用于下颌中央窝，同时对下颌颊尖与舌尖斜面上施加了楔力，则可能导致牙齿正中裂。

喜食硬物的口腔不良习惯也增加了牙裂的发生风险。有研究报道，50% 的牙裂可能与咀嚼硬物的习惯有关 [7]。此外，温度循环因素也是导致牙裂综合征的病因 [14]。有研究表明 [15]，临床上常见的 50 ℃的温度差会产生足够高的应力水平，在 7000 次左右的冷热交替循环后导致牙釉质裂开。这提示有长期冷热交替饮食习惯的人群更容易出现牙釉质裂开。

2.3　牙体治疗及修复

牙体修复或根管预备的过程，已经被证明会降低牙齿硬度。随着预备过程中去除更多的牙体组织或是使用高速旋转牙科器械时，牙齿上的应力集中可能导致牙裂的发生 [16]。根管治疗时应用次氯酸钠等化学制剂可能使牙齿脆性增加进而导致牙裂 [16] 等。

此外，修复材料与修复技术的选择也尤为重要 [17-18]，例如：修复材料与牙齿之间热膨胀系数的差异可能导致牙齿结构被破坏 [19]；修复材料变形后咬合力分布异常易导致牙裂 [8]；应用摩擦固位钉或螺纹钉时，应力更集中 [20]；复合树脂对窝洞壁产生了额外的张力 [20]。牙体修复时应用纤维增强复合材料和嵌体能提高牙齿的抗断裂能力 [18]，嵌体治疗和冠内修复体设计时应对牙尖提供足够的保护。

2.4　其他因素

唾液流量的减少可能导致牙釉质 - 牙本质界处的有机物含量降低，从而降低牙体硬组织的断裂韧性，增加牙釉质或牙本质裂纹发生的概率 [21]。其次，患者在疼痛出现前心理上对口腔牙齿健康的关注度不够，忽略了牙齿结构的变化及早期不适感，最终导致牙裂的发生。

关于性别对牙裂的影响目前尚存争议。有研究报道女性牙裂发生的风险较男性更高[22]，但在 Kim 等对牙裂诊断的研究中发现性别间的差异并无统计学意义[11]。也有研究报道头颈部癌症的放射性治疗可能影响牙体结构，但 Palmier 等的研究认为此种辐射剂量对牙齿的影响较低，与牙裂发生的风险增加无关[21]。Nosrat 等的研究发现，在新型冠状病毒肺炎大流行爆发初期和一年后，由于焦虑和抑郁症的增加，口腔不良习惯的频率可能增加，从而导致牙裂的比例也有所增加[23]。

3　牙裂的临床表现及早期诊断

由于折裂的位置和程度不同，牙裂综合征的临床表现也不同。在牙裂形成的初期且裂仅位于牙釉质内时，患者通常没有明显的临床症状。部分裂纹可以被食物或饮料染色，此时通过肉眼能直接观察到。当牙裂进一步发展，患者可能会出现疼痛的症状，如咬合痛（随着咬合力的增大，疼痛越明显）、冷刺激痛、自发性疼痛等。当裂延伸到牙周组织时，还会引起局部的牙周炎，产生窄而深的牙周袋和 / 或广泛的根侧骨吸收[24]。

牙裂的早期诊断对于减轻症状和设计最佳治疗方案至关重要。然而，到目前为止，尚无以循证为基础的牙裂诊断标准程序。临床上牙裂的疼痛症状并不具有特异性，且疼痛与牙裂的相关性较低，不具有唯一标识。此外，患者在牙裂早期阶段时，症状和体征往往不明显或者呈现多样性。因此，单纯凭借临床症状很难对牙裂的程度做出明确的诊断，从而可能导致误诊和治疗的延迟。

在发达国家，牙裂是除龋病、牙周病外导致牙齿脱落常见的第三大原因[11]，因此为了避免由裂缝对牙齿进一步产生不可逆的损伤，例如牙髓炎、牙髓坏死甚至牙齿脱落，牙裂的早期识别和准确诊断十分必要。随着辅助技术的发展和一些新型技术的应用，牙裂的早期准确诊断似乎成为可能。

3.1　完善的临床检查

牙裂位于牙釉质中时往往无明显症状。当牙裂发展至牙本质或者更深、更复杂时，可能出现典型的冷刺激痛及咬合痛。此时应该对可疑牙进行完善的临床检查诱导其症状发生来确诊牙裂，常用的方法包括冷测、热测、叩诊、咬合测试、牙髓电活力测试等。

对发生牙裂的患牙进行不同牙尖位置和方向的叩诊有助于定位患牙牙裂的位置[2]。咬合测试是确定可疑牙症状最具体的方法，特别是咬合释放时的剧烈疼痛是诊断牙裂综合征的重要指标。Yang 等报道应用咬诊检查器（tooth slooth) 和湿棉卷引起咬合痛的相关性分别为 91.3% 和 32.6%，咬诊检查器可以较准确的早期诊断牙裂[25]。不过对可疑牙咬合测试时的殆力可能有增加裂纹进一步扩展的风险，甚至导致牙齿断裂。

3.2　视觉增强辅助观察

应用视觉增强辅助的方法识别裂纹对牙裂的诊断有重要意义，建议使用显微镜、染色法和透光法来加强目视检查。

利用龙胆紫或亚甲基蓝等的染色法有助于牙冠表面裂纹的视觉识别，但是染料仅能渗透至起始于牙齿表面的裂纹，且其聚集倾向可能导致牙釉质深层发生轻微的颜色变化，对美观造成不利影响。

透光法是检测牙裂时最常用的方法，其原理为裂纹与正常牙体组织的折射率不同，裂纹对光的折射和散射可以清晰地显示牙裂，进而提高牙裂的诊断率。光纤透照时将光纤探头放置于牙冠表面观察是否存在裂纹[8]，Kim 等的体外研究发现光纤透照法对特别是接近牙齿表面的裂纹有良好的敏感性[11]。在 Sapra 等的临床研究中，利用 810nm 的近红外二极管激光作为辅助手段观察识别和定位裂纹，应用激光照射裂纹时也可能诱发不适的临床症状而诊断裂纹，他们将发现的裂纹治疗 4 年后，大多数患者预后良好[26]。

然而，视觉法在一定程度上很难发现和识别发生于邻面和根面的牙裂。

3.3　基于 X 线成像

常规的二维根尖 X 线片光束入射角对分辨率和成像效果有较大影响，往往只能诊断已经发生明显移位的牙裂，如果 X 线束未穿过牙裂时容易误诊。而且大多数裂纹，特别是小的初始裂纹无法被检测。有研究报道，X 线片检测牙根裂的敏感性仅为 26.3%[27]。

现代 X 线技术已有很大进步。相较二维 X 线片，锥形束计算机断层扫描（cone beam computed tomography，CBCT）提供了精确的三维图像和高的空间分辨率，能更有效地检测牙裂，可以评价复杂裂纹的方向和形状，并在一定程度上预测了裂纹的深度。近年来，CBCT 被广泛用于牙根部垂直裂的

诊断，且诊断准确率较高。然而，由于牙裂的多变性和影像的重叠性及有限的分辨率，CBCT 对宽裂纹的敏感性较高，对一些狭窄裂纹敏感性较低。据报道，CBCT 的分辨率为 0.2mm 时，可能是临床诊断牙裂合适的选择。虽然增加辐射强度可以提升其分辨率，但是相关的副作用也会增大，因此并不可取 [28]。

Gao 等综述了应用 CBCT 进行识别除了牙釉质裂纹线之外的其他 4 种牙裂（牙尖折裂、牙齿开裂、牙体分裂、牙根纵裂）的诊断价值 [29]。他们认为，虽然在 CBCT 图像上牙根纵裂和侧支根管 / 牙根外吸收有一定的相似之处 [29]，但是 CBCT 从不同方向对牙齿的综合评价有助于牙裂的鉴别诊断。因此，对 CBCT 图像判读的高级培训十分必要。

由于 X 射线在通过牙齿断裂面的同时必须通过大量不透射线的健康牙齿结构，因此裂纹的显现并不明显。采取造影剂使裂纹影像的密度高于牙体健康组织结构，可能实现对裂纹的高分辨率成像，而不至于被牙体健康结构掩盖。应用造影剂后的牙齿表面进行 CBCT 扫描可能增加牙裂纹的检出率。

Zhou 等的体外研究表明，应用真空造影剂增强 CBCT 能显著提高裂纹的检出率，但不能准确测量裂纹深度 [30]。Hu 等的体外研究则发现以碘化钠加二甲基亚砜溶剂为造影剂的增强 CBCT 扫描对牙裂纹数量的识别和深度检测的可行性 [31]。不过在应用造影剂时，裂纹内部唾液很难去除，存在唾液阻塞造影剂渗透通路的问题。因此，具有渗透性和流动性更好的造影剂仍需被开发。

高分辨率显微电子计算机断层扫描（computed tomography，CT）比 CBCT 的灵敏性更高，其分辨率可达 9μm，是体外检测牙裂纹最常用的金标准诊断方法 [28]，有研究认为其能识别大于 80μm 的裂纹 [32]，有效实现了牙根纵裂的早期发现。但是其超高分辨率伴随的高辐射剂量决定了其在临床应用需要慎重。考虑到大多数裂纹是倾斜的，因此在平面上研究裂纹并不准确。今后在对裂纹的评估研究中可以考虑尝试基于三维空间研究裂纹的实际路径及深度。

X 线暗场断层扫描是通过裂纹区域形貌的变化来检测牙齿微裂纹。在相对较暗的背景下，X 线暗场断层扫描同时采集衰减和散射信息，从而突出牙齿整体结构及形态，并可视化裂纹。Jud 等对 3 颗离体牙的原理分析，证明了其可能是诊断牙裂的有力工具 [32]。

3.4　基于光学成像

牙釉质在近红外波长下具有较高透明度，因此利用近红外光源对牙齿成像非常适合检测牙釉质裂纹，是最新的诊断方法。Zheng 等研究发现 850nm 的近红外光在检测牙釉质裂纹方面有很好的临床实用性 [33]。Li 等也发现应用吲哚菁绿对牙面染色 1 分钟后，再应用 950~1700nm 近红外荧光成像检测牙釉质 - 牙本质裂纹的可行性 [34]。倾斜透光较平行透光可以产生更好的裂纹图像对比度，近红外成像具有对疾病区域快速筛查的能力，但是近红外成像不能区分不同类型的裂缝，也不能提供关于裂缝深度的精确信息。

光学相干断层扫描技术（optical coherencetomography，OCT）是近年来具有发展前途的零辐射新型层析成像技术，已尝试在牙裂的诊断中应用。其原理为利用红外波扫射牙齿内部微结构，通过检测入射相干光聚焦在牙齿不同深度产生的反射和散射信号，构建牙齿结构的二维或三维图像。激光扫描相干层析成像利用合适频率波长的激光光源发射近红外波长的光波扫射牙面，牙釉质呈现高度透明，可以显示可能存在的裂纹，因此，具有很高的灵敏度。

有研究报道应用该方法诊断准确率高于视觉法、光纤透光法和高分辨率显微 CT[35]。激光扫描相干层析成像用于检测牙釉质 - 牙本质裂纹时，敏感性和特异性较高，可以检测 3mm 深度内的裂纹 [30]。但是牙釉质的厚度不同部位不尽相同，这可能对激光的穿透深度和图像对比度产生影响。

光学偏振成像在实时诊断方面具有潜在的应用价值。牙齿表面表现出独特的光学双折射特性，随着入射光的偏振方向不同反射光的强度随之变化。有研究报道，当牙体硬组织发生病变时，正常牙齿的双折射特性丧失，偏振光照射到牙齿后，反射光的偏振状态改变，通过获得反射的斯托克斯（Stokes）信号，利用卢 - 奇普曼（Lu-Chipman）程序分解构建穆勒（Mueller）图像并进行分析后得到的衰减、线性延迟、去极化图像等信息，能区分异常组织进而诊断牙裂综合征 [36]。

此外，Son 等应用定量光诱导荧光设备，在 405nm 可见光下靠近牙面检测了牙齿的荧光反应。在此过程中利用荧光增强图像来识别裂纹并预测裂纹的深度。定量光诱导荧光技术对牙釉质和牙本质裂纹的早期诊断特异性较高 [37]。

3.5　创新技术应用

磁共振成像利用非电离射频电磁辐射获得高密度钙化组织的高质量横截面图像，这在一定程度上可以用来诊断牙裂。Idiyatullin 等以高分辨率显微 CT 结果为参考标准，发现磁共振成像对牙裂宽度的检测极限为 20μm，可以有效地检测牙齿中的微裂纹。他们认为磁共振成像有可能成为人类牙裂的体内检测方法之一 [38]。

随着人工智能的发展，基于卷积神经网络算法的现代图像特征提取的处理能力越来越强，使更加智能和自动化的人工智能分析检测牙裂成为可能，这有助于提高诊断的效率和准确性。根据以卷积神经网络算法为代表的方法对裂纹检测的处理方式不同，一般可以分为三类，包括基于图像分类的方法、基于目标对象检测的方法和基于语义分割的方法 [28]。

Zhang 等提出了一种基于数字图像相关的裂纹路径识别方法和裂纹定量表征方法，其结果与高分辨率显微 CT 的结果较为吻合 [39]。Guo 等提出一种基于图像利用卷积神经网络分类器与滑动窗口算法相结合的裂纹检测方法，该方法经过深度学习后在 100 张分辨率为 1920 × 1080 像素的图像上进行裂纹检测，平均准确率可达 90.39%[40]。因此，人工智能识别检测牙裂可能对牙裂综合征的筛查有重要意义。

牙裂的声学特征通常与牙釉质和牙本质相似，在分析超声成像信号时会产生一定的困难，这可能是近几年应用超声诊断牙裂研究较少的原因。

4　鉴别诊断

牙裂综合征临床表现具有多样性，容易与其他疾病相混淆。疼痛往往是促使牙裂综合征患者就医的主要原因。因此，医生应将牙裂综合征引起的疼痛与以下情况导致的疼痛相鉴别：包括急性根尖周炎、可逆性牙髓炎、牙本质过敏、银汞合金修复体形成电流导致的电痛感、复合树脂修复体边缘微渗漏引起的牙齿敏感、制作的不良修复体造成的咬合早接触、一些不良习惯引起的殆创伤、三叉神经痛引起的口面部疼痛等 [3]。

5　牙裂综合征的治疗

目前对于诊断为牙裂综合征的患牙治疗尚未达成共识。治疗的措施主要基于对牙髓的判断，但在牙髓状况类似的情况下，治疗措施也存在差异。治疗的基本原则主要为调磨患牙，减小负荷；保护患牙，防止裂纹进一步扩展。

治疗的方法有正畸带环、临时冠等临时治疗手段以及全冠永久修复手段 [8]。对于发生纵裂的牙齿，裂纹贯穿髓室底或牙槽嵴以下的病例，应予以拔除 [17]。一项对牙裂综合征治疗管理的系统性评价结果显示，不论牙髓是否经过治疗，全冠永久修复方法对活髓及牙齿的保留率（高达 80%~100%）显著高于临时修复手段（50%~70%），且表现出更好的咀嚼效率、生活质量和较低的牙周指数（periodontal index，PI）[41]。

6　结论

发生牙裂的患牙预后情况需要谨慎评估，早期发现牙裂并去除病因有助于提高患牙的长期生存率。因此，牙裂的检查及评估方法对临床中牙裂综合征的早期发现、精准诊断和治疗方案的设计有重要价值。尤其是无症状裂纹的早期诊断提高了患者和口腔医师对患牙的关注度和保护意识，避免了裂纹进一步扩展所致的患者痛苦甚至牙齿拔除，对牙裂综合征的防治起到了积极的作用。

然而，牙裂早期往往无明显临床症状和体征，此时需要对可疑牙进行完善的临床检查，并结合最新技术手段，进而实现牙裂综合征的早期诊断以及在一定程度上预测裂纹的深度。增强 CBCT、基于光学成像信息和人工智能等最新技术在准确识别裂纹，预测裂纹深度和精准医疗方面具有潜在的应用价值。这些创新技术的进一步研究和探索，有助于将来临床进行牙裂综合征的大规模筛查及无创诊断技术的发展。

参考文献

[1] Cameron CE. Cracked-tooth syndrome[J]. J Am Dent Assoc. 1964; 68(3): 405-411.

[2] Ellis SG. Incomplete tooth fracture-proposal for a new definition[J]. Br Dent J. 2001; 190(8):424-428.

[3] Hasan S, Singh K, Salati N. Cracked tooth syndrome: Overview of literature[J]. Int J Appl Basic Med Res. 2015; 5(3):164-168.

[4] Bader J, Martin J, Shugars D. Incidence rates for

complete cusp fracture[J]. Community Dent Oral Epidemiol. 2001; 29(5):346-353.

[5] American Association of Endodontists. Endodontics: Colleagues for Excellence-Cracking the cracked tooth code[M]. Chicago, IL: Fall/ Winter 1997.

[6] Clark LL, Caughman WF. Restorative treatment for the cracked tooth[J]. Oper Dent. 1984; 9(4):136-142.

[7] Nuamwisudhi P, Jearanaiphaisarn T. Oral Functional Behaviors and Tooth Factors Associated with Cracked Teeth in Asymptomatic Patients[J]. J Endod. 2021; 47(9):1383-1390.

[8] Li F, Diao Y, Wang J, et al. Review of Cracked Tooth Syndrome: Etiology, Diagnosis, Management, and Prevention[J]. Pain Res Manag. 2021; 12(15):3788660.

[9] Zhang S, Li X, Qi Y, et al. Comparison of Autogenous Tooth Materials and Other Bone Grafts[J]. Tissue Eng Regen Med. 2021; 18(3):327-341.

[10] Yahyazadehfar M, Zhang D, Arola D. On the importance of aging to the crack growth resistance of human enamel[J]. Acta Biomater. 2016; 32:264-274.

[11] Kim JH, Eo SH, Shrestha R, et al. Association between longitudinal tooth fractures and visual detection methods in diagnosis[J]. J Dent. 2020; 101:103466.

[12] Xie N, Wang P, Wu C, et al. Impact of cusp inclinations on dental fractures in cracked tooth syndrome model and relevant risk evaluation[J]. Exp Ther Med. 2017; 14(6):6027-6033.

[13] Rusu Olaru A, Popescu MR, Dragomir LP, et al. Clinical Study on Abfraction Lesions in Occlusal Dysfunction[J]. Curr Health Sci J. 2019; 45(4):390-397.

[14] Qiao F, Chen M, Hu X, et al. Cracked Teeth and Poor Oral Masticatory Habits: A Matched Case-control Study in China[J]. J Endod. 2017; 43(6):885-889

[15] Brown WS, Jacobs HR, Thompson RE. Thermal fatigue in teeth[J]. J Dent Res. 1972, 51: 461-467.

[16] Shantiaee Y, Dianat O, Mosayebi G, et al. Effect of Root Canal Preparation Techniques on Crack Formation in Root Dentin[J]. J Endod. 2019; 45(4):447-452.

[17] 樊犖 , 许庆安 . 隐裂牙综合征研究进展 [J]. 口腔医学研究 , 2022, 38(03):223-225

[18] Shi R, Meng X, Feng R, et al. Stress Distribution and Fracture Resistance of repairing Cracked Tooth with Fiber-reinforced Composites and Onlay[J]. Aust Endod J. 2022; 48(3):458-464.

[19] Gill T, Pollard AJ, Baker J, et al. Cracked Tooth Syndrome: Assessment, Prognosis and Predictable Management Strategies[J]. Eur J Prosthodont Restor Dent. 2021; 29(4):209-217.

[20] Lynch CD, McConnell RJ. The cracked tooth syndrome[J]. J Can Dent Assoc. 2002; 68(8):470-475.

[21] Palmier NR, Madrid CC, Paglioni MP, et al. Cracked tooth syndrome in irradiated patients with head and neck cancer[J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol. 2018; 126(4):335-341.

[22] Fennis WM, Kuijs RH, Kreulen CM, et al. A survey of cusp fractures in a population of general dental practices[J]. Int J Prosthodont. 2002; 15(6):559-563.

[23] Nosrat A, Yu P, Verma P, et al. Was the Coronavirus Disease 2019 Pandemic Associated with an Increased Rate of Cracked Teeth[J]. J Endod. 2022; 48(10):1241-1247.

[24] Hilton TJ, Funkhouser E, Ferracane JL, et al. Correlation between symptoms and external characteristics of cracked teeth[J]. J Am Dent Assoc. 2017; 148(4):246-256.

[25] Yang Y, Chen G, Hua F et al. Biting pain reproduced by the Tooth Slooth: an aid for early diagnosis of cracked tooth[J]. Quintessence Int. 2019; 50(1):82-87.

[26] Sapra A, Darbar A, George R. Laser-assisted diagnosis of symptomatic cracks in teeth with cracked tooth: A 4-year in-vivo follow-up study[J]. Aust Endod J. 2020; 46(2):197-203.

[27] Wang P, Yan XB, Lui DG, et al. Detection of dental root fractures by using cone-beam computed tomography[J]. Dentomaxillofac Radiol. 2011; 40(5):290-298.

[28] Guo J, Wu Y, Chen L, et al. A perspective on the diagnosis of cracked tooth: imaging modalities evolve to AI-based analysis[J]. Biomed Eng Online. 2022; 21(1):36.

[29] Gao A, Cao D, Lin Z. Diagnosis of cracked teeth using cone-beam computed tomography: literature review and clinical experience[J]. Dentomaxillofac Radiol. 2021; 50(5):20200407.

[30] Zhou J, Fu J, Xiao M, et al. New technique for detecting cracked teeth and evaluating the crack depth by contrast-enhanced cone beam computed tomography: an in vitro study[J]. BMC Oral Health. 2022; 22(1):48.

[31] Hu Z, Wang T, Pan X, et al. Comparison of diagnosis of

cracked tooth using contrast-enhanced CBCT and micro-CT[J]. Dentomaxillofac Radiol. 2021; 50(7):20210003.

[32] Jud C, Sharma Y, Günther B, et al. X-ray dark-field tomography reveals tooth cracks[J]. Sci Rep. 2021; 11(1):14017.

[33] Zheng Y, Oh MH, Song WS, et al. Infrared Clinical Enamel Crack Detector Based on Silicon CCD and Its Application: A High-Quality and Low-Cost Option[J]. J Imaging. 2021; 7(12):259.

[34] Li Z, Holamoge YV, Li Z, et al. Detection and analysis of enamel cracks by ICG-NIR fluorescence dental imaging[J]. Ann N Y Acad Sci. 2020; 1475(1):52-63.

[35] Lee SH, Lee JJ, Chung HJ, et al. Dental optical coherence tomography: new potential diagnostic system for cracked-tooth syndrome[J]. Surg Radiol Anat. 2016; 38(1):49-54.

[36] Hsiao TY, Lee SY, Sun CW. Optical Polarimetric Detection for Dental Hard Tissue Diseases Characterization[J]. Sensors (Basel). 2019; 19(22):4971.

[37] Son SA, Kim JH, Park JK. The Effectiveness of a Quantitative Light-induced Fluorescent Device for the Diagnosis of a Cracked Tooth: A Case Report[J]. J Endod. 2021; 47(11):1796-1800.

[38] Idiyatullin D, Garwood M, Gaalaas L, et al. Role of MRI for detecting micro cracks in teeth[J]. Dentomaxillofac Radiol. 2016; 45(7):20160150.

[39] Zhang C, Mo D, Guo J, et al. A method of crack detection based on digital image correlation for simulated cracked tooth[J]. BMC Oral Health. 2021; 21(1):539.

[40] Guo J, Wu Y, Chen L, et al. Automatic Detection of Cracks in Cracked Tooth Based on Binary Classification Convolutional Neural Networks[J]. Appl Bionics Biomech. 2022; 2022:9333406

[41] Kakka A, Gavriil D, Whitworth J. Treatment of cracked teeth: A comprehensive narrative review[J]. Clin Exp Dent Res. 2022; 8(5):1218-1248.

（上接 239 页）

[62] Monea A, Beresescu G, Boeriu S, et al. Bone healing after low-level laser application in extraction sockets grafted with allograft material and covered with a resorbable collagen dressing: a pilot histological evaluation[J]. BMC Oral Health. 2015; 15:134.

[63] Rosero KAV, Sampaio RMF, Deboni MCZ, et al. Photobiomodulation as an adjunctive therapy for alveolar socket preservation: a preliminary study in humans[J]. Lasers Med Sci. 2020; 35(8):1711-1720.

[64] Saucedo CL, Courtois EC, Wade ZS, et al. Transcranial laser stimulation: Mitochondrial and cerebrovascular effects in younger and older healthy adults[J]. Brain Stimul. 2021; 14(2):440-449.

[65] Behrangi E, Roohaninasab M, Sadeghzadeh-Bazargan A, et al. A systematic review on the treatment of pediatric severe alopecia areata by topical immunotherapy or Anthralin (contact sensitization) or low-level light/laser therapy (LLLT): focus on efficacy, safety, treatment duration, recurrence, and follow-up based on clinical studies[J]. J Cosmet Dermatol. 2022; 21(7):2727-2741.

[66] Magri AMP, Parisi JR, de Andrade ALM, et al. Bone substitutes and photobiomodulation in bone regeneration: A systematic review in animal experimental studies[J]. J Biomed Mater Res A. 2021; 109(9):1765-1775.

[67] Sampurna MTA, Etika R, Utomo MT, et al. An evaluation of phototherapy device performance in a tertiary health facility[J]. Heliyon. 2020; 6(9):e04950.

[68] Phan DT, Bui NT, Vo TH, et al. Development of a LED light therapy device with power density control using a Fuzzy logic controller[J]. Med Eng Phys. 2020; 86:71-77.

[69] Yoon JS, Ku WY, Lee JH, et al. Low-level light therapy using a helmet-type device for the treatment of androgenetic alopecia: A 16-week, multicenter, randomized, double-blind, sham device-controlled trial[J]. Medicine (Baltimore). 2020; 99(29):e21181.

[70] Montealegre A, Charpak N, Parra A, et al. Effectiveness and safety of two phototherapy devices for the humanised management of neonatal jaundice[J]. An Pediatr (Engl Ed). 2020; 92(2):79-87.

[71] Sorbellini E, Rucco M, Rinaldi F. Photodynamic and photobiological effects of light-emitting diode (LED) therapy in dermatological disease: an update[J]. Lasers Med Sci. 2018; 33(7):1431-1439.