



综述：根管穿孔修复的概念和材料

Root perforation repair concepts and materials: A review

Sophie Curtius Seutter von Loetzen, Michael Hulsmann

原载 ENDO (Lond Engl) 2018; 12(2): 87-100. (英文)

程梦琳 译 张珊珊 郑树国 审

摘要

根管穿孔是要管治疗中严重的并发症，甚至有可能导致牙齿缺失。在过去的数十年里提出了许多穿孔修补的概念和材料。本文回顾文献并对相关研究的成果进行总结综述。

1 引言

根管穿孔，曾被认为是根管治疗中出现的最不好的并发症，是导致根管治疗失败的最常见的原因之一。根管穿孔是一种在根管系统和感染的牙和/或口腔牙周组织中人为造成的并发症。它的原因可能是医源性的（如根管预备，打桩前预备），或病理性的（如牙根吸收）。

根据文献报导，根管预备过程中穿孔的发生率约2%到12%。在1961年，Ingle的研究称约有10%的根管治疗失败归因于穿孔。在Kvinnsländ

等的研究中，53%的医源性根管穿孔发生于打桩时，其余47%发生于常规根管治疗中。其中74.5%的案例发生在上颌，而近中颊面和根管中部是最常见发生穿孔的位置。另一方面，Tsesis等的研究发现下颌磨牙有更高的根管穿孔的发生率（54.3%）。

在牙槽嵴顶和上皮附着的关键区域发生的穿孔的预后最差，因为穿孔可能导致微生物污染和随后的牙周组织破坏。牙槽嵴顶处的穿孔经常导致上皮迁移，这会降低（硬组织）再生的可能。

许多冠部的根管穿孔可以使用粘接材料安全地修补或在没有牙周附着的部分明确地替代原来的牙体组织。在根尖区域的根管穿孔预后一般较好，如果在根尖处的牙髓治疗可以充分地严密地把细菌封闭和把穿孔修补。

译者单位 北京大学口腔医学院
北京市海淀区中关村南大街22号 100081

2 穿孔修补材料

过去,根管穿孔修复的预后大多是不可预测的,因为可用的修复材料经常会造成牙周组织的损害,如与直接相邻的骨组织形成纤维性囊性组织。银汞、Cavit、氧化锌丁香酚水门汀(ZOE)和牙胶是过去常用于穿孔修复的材料。

Benenati等报告称使用银汞材料修补穿孔的结果比热牙胶垂直加压更好,而Lantz和Persson的研究则提出相反结论。Harris推荐Cavit并声称其可达到89.3%的成功率,而Jew等的研究中并不能实现。Weine偏向于使用ZOE,而Martin等推荐使用氢氧化钙以利用硬组织的再生。

技术设备的进展如操作显微镜使手术性穿孔修补的需求降低,且新材料如MTA则大大提高了穿孔修补的长期预后的可预测性。MTA一度成为修补材料的首选,直到生物陶瓷材料的出现。

对于修补材料的选择,往往取决于穿孔位置的技术可及性,控制微渗漏的能力和美学因素。

以下为文献中可寻的修补材料:

银汞、Cavit、树脂、牙本质片、箔片(如铁氟龙和铝箔)、Geristore(一种树脂改性的玻璃离子水门汀,尤其用于修补颈部严重的缺损,因其对牙本质有良好的粘接性)、玻璃离子水门汀(GIC)、牙胶(然而Stromberg等于上世纪70年代曾将树脂、牙胶和氟仿的混合物用于24颗人类牙齿穿孔修补的研究结果并不理想,修补效果将受到上皮长入的影响)、羟基磷灰石(HA)、粘接增强的氧化锌丁香酚水门汀(如聚甲基丙烯酸甲酯聚合物,聚苯乙烯和聚碳酸酯,产品举例有IRM)、氢氧化钙、冻干骨粉、伴胶原的MTA、Plaster of Paris(PoP,硫酸钙/锻烧的石膏)、磷酸三钙、氧化锌丁香酚水门汀、增强的氧化锌丁香酚水门汀(通过用2分子的乙氧基苯甲酸和一部分含有无机填料特别是氧化铝的氧化锌替换部分丁香酚而增强的氧化锌丁香酚水门汀,商品如Super-EBA)

3 穿孔修补对材料的要求

穿孔修补对材料的要求取决于穿孔修补发生在根管内还是外部。在根管内使用的修补材料要求:降低骨和牙骨质形成的能力、生物相容性、流体密闭性、抑菌性、X线显影性、不吸收性、非致癌性、可获得性、易操作性和相对便宜。除了上述要求以外,额外要求包括:严密封闭细菌的能力、不

受血液影响以及可以预防材料挤压进行周围组织。在MTA发明之前,流动性也是穿孔修补材料需要考虑的重要因素。流动性越好的材料越能够粘附于穿孔壁上。

自1992年来,银汞、Cavit、水门汀、牙胶和如氧化锌水门汀之类的封闭剂就已经能够达到生物相容和不溶解的要求。然而,那个年代的材料并不能满足其他要求。基质的材料一定是要有生物相容性、抑菌或抗菌性、可吸收的、不诱导炎症反应的材料。

满足上述要求的产品在上世纪90年代初就出现了,其中包括冻干骨粉、去矿化骨、磷酸钙材料和羟基磷灰石(HA)。可吸收膜最开始是应用于牙周学的材料。Salman等构建动物模型以其作为牙根管修补材料的基质材料的研究结果称以可吸收的屏障材料放置于髓底的穿孔的效果并不比单独使用树脂改性的玻璃离子水门汀更好。

3.1 银汞

银汞曾经是最常用的穿孔修补材料。在1957年,Grossman推荐使用这种合金作为根管穿孔修补材料。银汞材料的主要优点在于它只需要4分钟即可快速固化。然而,Balla等于1991年指出,银汞的缺点在于其封闭性差,以致炎症发展和牙周组织再生的不足。在1992年,Lemon引入了“根管内穿孔修补的基质概念”,他建议用轻微压力将银汞合金压在外部的羟基磷灰石屏障上。

和许多其他作者一致的是,Mehrvarzfr等发现银汞与微渗漏相关并且不再满足现代根管穿孔修补材料的标准。Souza等认为,虽然众所周知银汞会释放有毒元素,它的细胞毒性仍是低于玻璃离子。铜和锌是银汞中细胞毒性的主要来源,而纯银和汞则并不那么重要。

3.2 Geristore

Geristore(DenMat,圣玛丽亚,加利福尼亚,美国)是一种专门用于修补严重的牙颈部穿孔的树脂改性玻璃离子水门汀的商品名,它与牙本质有良好的粘接性。在一个龈下的缺损被Geristore修补前,牙本质表面一定要用磷酸预处理;此外还需要使用粘接技术,随后对材料进行光固化。

3.3 玻璃离子(GIC)

在Daoudi和Saunders的一项对比MTA和树脂改性玻璃离子水门汀(RMGIC)的封闭性的体外

研究中发现,髓底穿孔的微渗漏更少发生于MTA修补。此外,是否使用手术显微镜对使用GIC还是MTA进行修补的质量没有明显的意义。

Alhadainy和Himel报道称光固化玻璃离子的封闭性优于Cavit和银汞合金,且三者之中银汞合金封闭性最差。同时光固化的RMGIC(Vitrebond)和氢氧化钙表现较传统的化学固化玻璃离子水门汀(Ketac Fil)和氢氧化钙。

Himel和Alhadainy的研究说明不考虑牙本质预备和酸蚀的前提下,光固化RMGIC对亚甲基蓝染色渗漏的抵抗性优于光固化复合树脂。然而,RMGIC修补的经过牙本质预备和酸蚀的表面其染色比没有预备和酸蚀的渗漏更少。

Fuss等称银玻璃离子水门汀(Chelon Silver, ESPE, 塞费尔德, 德国)比银汞有更好的封闭性。在使用远缘链球菌污染的髓腔的离体牙进行实验, Jantarat等得出结论: Ketac Silver的封闭性较银汞合金好, 然而, 所有研究的材料都在22天内出现了细菌的微渗漏。Mittal等在90颗离体牙上对比了银汞、GIC、树脂、IRM和AH26的封闭性, 以上排顺即封闭性从最差到最好。换句话说, 银汞应该是最不适用于穿孔修补的材料。Chau等对比了光固化GIC和磷酸钙水门汀(CPC)以及两者结合使用的封闭性, 三者之间没有显著差异。Souza等测试了几种修补材料的细胞毒性, 发现GIC有最高的细胞毒性, 因为其对细胞生长有剂量依赖的抑制作用。Geurtsen发现在GIC聚合后, 许多未结合的树脂组分可在液体环境中浸出。

3.4 羟基磷灰石(HA)

在1994年, Bella等报告了一项使用HA、银汞和磷酸三钙修补髓底穿孔的历史研究结果, 没有证据表明出现组织再生但在所有切片中都可观察到大量严重的炎症反应。其中HA的切片表现出更好的组织反应, 然而同时也在同一切片上观察到严重的坏死。在任何切片中都没能观察到新骨形成。

3.5 氢氧化钙

在MTA之前, 氢氧化钙可用于诱导根管外组织再钙化的, 如在间接或直接盖或根尖诱导中。在充足的预备和清理后, 氢氧化钙糊剂用于充填根管直接到希望达到的钙化程度实现(在这一过程中按需要进行重复换药)。

光固化氢氧化钙在根管侧穿修补中比化学固化

的玻璃离子水门汀或银汞有更好的效果。然而, 氢氧化钙也会对髓底骨组织造成严重的炎症反应。

3.6 硫酸钙, 锻烧石膏(Plaster of Paris)

历史上, 锻烧石膏(Plaster of Paris, PoP)产生于巴黎蒙马特地区的一个大石膏采石场, 成分主要是硫酸钙或者说是锻炼后的石膏。PoP是有止血特性的生物相容材料。在放置穿孔处四周左右即可吸收因此是合适的基质材料。

Alhadainy和Himel评估了PoP与银汞和光固化GIC作为屏障材料的效果。在他们的结果中, PoP对牙本质的粘接较差, 可能会导致微渗漏, 因而不应该用于穿孔修补。PoP和银汞和自固化GIC作为屏障都表现出较差的封闭性(银汞100%微渗漏)。另一方面, 使用PoP可以预防超充。Bahn评估了在牙科手术中使用PoP的效果, 如作为骨感染的药物载体或作为拔牙术后、囊肿术后大块骨缺损时的充填材料, PoP表现出稳定性、杀菌性、生物相容性和伴随骨再生而快速吸收的特点。Radentz和Collings发现, PoP可通过在矿化的早期提供钙离子而加速了骨的矿化。

因此, PoP是一种能促进骨再生的骨的屏障材料, 并在再生位点抑制上皮生长, 预防牙周袋的形成, 并促进牙周再附着。

3.7 氧化锌丁香酚(Super-EBA)

在MTA可使用前, Super-EBA(Keystone制造, Gibbstown, NJ, 美国)是用于穿孔修补银汞合金的好的替代品。Weldon等称使用其作为穿孔修补材料时, Super-EBA有媲美于MTA的良好封闭性。对比MTA, Super-EBA表现出更好的封闭性, 但只限24小时内。结合使用MTA和Super-EBA较单独使用任意一种表现出更多的微渗漏。对比GIC, Super-EBA的细胞毒性是中等的。之前的研究表明Super-EBA的细胞毒性是由于液体环境中锌离子的释放。

3.8 MTA(三氧化矿物材料)

MTA是现今广泛应用在骨水平的穿孔修补材料。MTA提高了穿孔牙齿的预后, 否则这些牙齿将归入预后不良。

3.8.1 MTA的物理和化学特性

MTA使用包括两种成分: 亲水性粉末和无菌

水。粉末组成有硅酸三钙，铝酸三钙和三氧化钙和硅酸盐以及氧化铋。原版的MTA是灰色的，经常导致牙齿变色。白色MTA在其后发明出来。和灰MTA不同，它不含铁以及铋含量更低。当水合时，粉末将变为在约4小时凝固的凝胶。MTA的压缩强度可达67Mpa。

MTA有抗细菌和真菌的特性。这是一种能够调节细胞因子产物的生物活性材料。而且，MTA可触发硬组织形成细胞的分化和迁移。MTA释放的钙离子促进细胞的附着和增殖，它的基础Ph约为12.5，形成一种抗菌的环境。MTA表面的氢氧化钙为根牙骨质提供了一个理想的生长条件。

3.8.2 MTA作用下新组织形成

就牙周膜对不同修补材料的反应（银汞、Super-EBA和MTA），Sarkar等发现MTA诱导牙骨质形成的组织反应最好。而Moretton等人的研究结果相反，不仅不认为MTA对骨诱导没有作用，而且对骨传导没有作用。与根尖组织和牙髓接触，MTA刺激硬组织形成，反过来，牙骨质的再生促进牙周组织的再生和再附着。此外，MTA诱导未分化的牙髓细胞增殖成为成骨样细胞和牙周膜的成纤维细胞。这一增殖才能使得骨、牙本质和牙骨质的缺损愈合。

Tziafas等做了一个动物研究，说明MTA能使牙髓细胞发生功能性和细胞学的改变。沿着牙髓-MTA接触界面会形成均匀的晶体结构层。在



图1 右上五-因桩发生在远中根冠1/3的穿孔且远中冠部有牙周膜增宽

所有牙样本的实验中，骨样硬组织会在这一界面加速沉积。这一实验说明MTA诱导修复牙本质形成的能力。Torabinejad等发现MTA促进牙骨质的再生，比别的修补材料能更有效的使穿孔闭合。

3.8.3 MTA的生物相容性

将MTA挤出到周围组织而没有引起病理反应可以说明这种材料的生物相容性。MTA的另一个优点是它没有致突变性。这是没有神经毒性并且是细胞毒性最小的一种材料。对比银汞、玻璃离子、Super-EBA、N-Rickert、MTA、牙胶的生物相容性和细胞毒性研究中，Souza等称MTA有最小的细胞毒性。GIC、N-Rickert和银汞会明显导致实验细胞数量和生长的改变，是有最大细胞毒性的材料。另一方面，牙胶、Super-EBA和MTA被证明是细胞毒性较小的。

Pitt Ford等在狗牙中对比MTA和银汞对细胞增殖的反应并发现了银汞材料在所有切片中都发生炎症，而在MTA修补的切牙切片中只有1/6存在炎症。一项在几内亚猪下颌和胫骨中植入MTA的实验中同样验证了MTA的生物相容性。另外一项研究说明MTA对兼性厌氧或厌氧细菌的生长没有明显的效果。在现有研究中，没有看到白MTA和灰MTA中有明显的生物相容性差异。

图1和5说明了在根冠1/3使用MTA进行穿孔修补的情况。

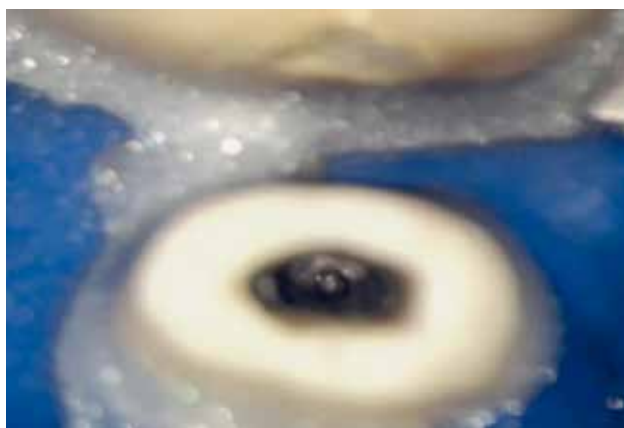


图2 去除桩后的远中穿孔



图3 使用MTA修补穿孔

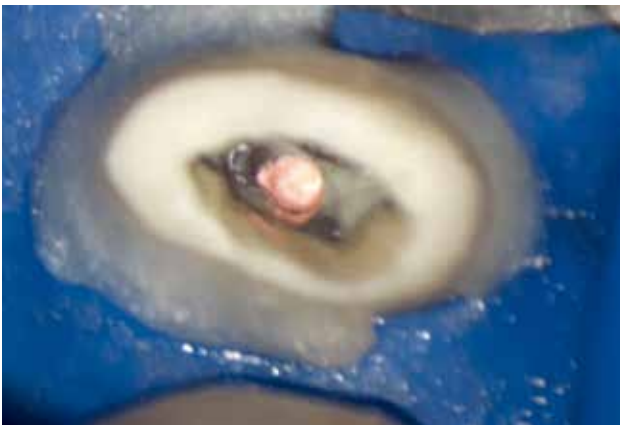


图4 根管充填



图5 穿孔修补后的X线片

3.8.4 MTA 的缺点

MTA 主要的缺点是它可能会引起牙齿变色(灰MTA)，长固化时间和高费用，以及难操作和难去除。

3.8.5 MTA 的作用方式

MTA 的作用基于以下机制：形成氢氧化钙并释放钙离子、PH 值约 12.5 的碱性环境、诱导细胞因子形成、促进与硬组织形成有关的细胞的分化和迁移、在 MTA 表面形成羟基磷灰石；

Pitt Ford 等总结了上述描述的结果只在穿孔被快速修补的前提下实现。如果操作慢了，即便有 MTA 提供的良好条件，也可能使修补处发生炎症。De-Deus 等对比了 MTA 与波兰水门汀的封闭能力，而这两者间没有显著差异。Al-Hezaimi 等使用粪肠球菌和血链球菌评估了灰白 MTA 的抗菌性能，结果发现灰 MTA 表现出完全的防止细菌生长的能力，而白 MTA 对粪肠球菌的抑制能力则稍弱。

Soluti 等在体外对比了 MTA、IRM 和银汞的封闭性。和其他材料对比，MTA 有更好的封闭结果，并最低程度地出现超充倾向，而 IRM 表现出欠填倾向。两个对穿孔修补材料封闭性的研究说明血液污染对 MTA 的封闭性没有影响，但对银汞、Super-EBA 和 IRM 的封闭性有影响。

Mente 等用 MTA 在 64 颗牙上做了一个长期的穿孔修补试验并称在平均 4-9 年的随访中其成功率达 86%。多数失败病例发生在 MTA 修补的第 4 年。

表 1 展示更多 MTA 修补的结果。

3.9 生物陶瓷

生物陶瓷是一种非金属无机材料，在约 2008 引入牙髓治疗之间闻名于其在医疗领域的应用，如关节置换。生物陶瓷可用于穿孔修补和根管倒充填、直接盖髓和根尖诱导。生物陶瓷材料增强的生物相容性远超过传统的封闭材料。一项体外研究表示在生物陶瓷材料表面可观察到人骨髓间充质干细胞、牙周膜细胞和牙髓干细胞的粘着、增殖和存活。与 MTA 不一样，这种材料的另外一个优点是，生物陶瓷不会导致牙齿变色。

Total Fill BC RRM 是 FKG Dantire (La Chaux-de-Fonds, 瑞士) 生产的生物陶瓷类的根管修补材料，其成分包括硅酸钙、氧化锆、氧化

钽、磷酸钙。生物陶瓷需要液体进行固化，因此有非常好的亲水性。根据厂家的说明，RRM Putty 的固化时间约有 2 小时。FKG Dantire 的 Fast-Set Putty 有更短的约为 20 分钟的固化时间，这一点点也优于 MTA，因为这可使口腔医师在使用牙胶充填其他部分时同时用生物陶瓷材料进行穿孔修补。生物陶瓷突出的硬度可以说是它的缺点，硬度使其固化后非常难以去除。

3.10 基质技术

根管穿孔修补的最大改变在于实现了止血和控制修补材料的放置。在上世纪 60 到 70 年代，预备穿孔处外侧壁是防止超充的方法。而近年来，基质技术发展成为预防修补材料超出的技术。在 1969 年，Auander 和 Weinberg 提出使用铝箔作为基质先于银汞用于修补穿孔。然而 Aguirre 等在 1986 年通过影像和既往病例发现，使用银汞和牙胶修补根分叉穿孔的结果比使用铝箔更好。大量不同的可吸收材料如胶原，冻干脱矿的异体骨，羟基磷灰石，

凝胶泡沫和磷酸钙可用于作为根管穿孔修补的基质材料，但胶原和磷酸钙是最常用于此的材料，因为他们容易操作。使用时，胶原被裁成小片并使用手柄或 MTA 输送器一次一片将其放入（穿孔处）牙周膜，它将在 4-6 周内被吸收。

4 讨论

牙根穿孔修补的预后取决于穿孔发生和修补的时间，穿孔发生时对牙周膜损害的严重程度，穿孔位置发生在龈上或龈下，穿孔的大小和使用修补材料的封闭性，修补的质量和穿孔导致感染的严重程度。各种对比 MTA 与其他修补材料的治疗效果的研究总结如表 1。图 6-11 展示了临床病例。

过时的修补材料的不足表现在他们封闭穿孔的能力较差以至于不能防止口腔环境与内部受累牙齿之间相通，同时也是由于其生物相容性的不足。MTA 之前使用的修补材料没有一种可以停止炎症进展从而使牙周附着丧失或无法维持穿孔位点处的组织健康。在另一方面，MTA 是一种可以刺激组

表 1 使用 MTA 进行穿孔修补的研究

作者	年份	随访时间	成功率
Main 等	2004	12-45 月	100%
Pace 等	2008	60 月	90%
Mente 等	2010	12-65 月	80%
Pontius 等	2013	6-116 月	92%
Krupp 等	2013	12-120 月	73.30%



图 6 诊断片示再治疗前在近颊根处发生了器械分离



图 7 使用超声器械去除分离器械时发生了近中颊根近中面的穿孔，最后使用生物陶瓷材料 (BC TotalFill) 修补

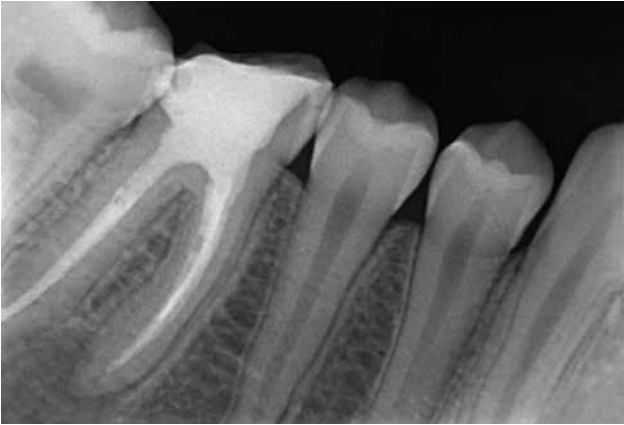


图8 再治疗前的诊断片示纤维桩在牙槽嵴下很深的位置而阻碍了根管入路



图9 当使用超声寻找MB根管入口时发生了穿孔，使用MTA尝试进行修补

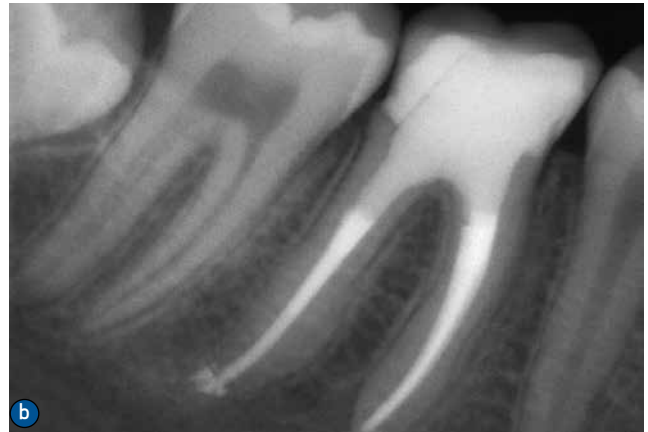


图10a和b 根充前后X线片：由于穿孔位置位于牙槽嵴顶边缘，MTA没有硬化，完全被冲出（进入口腔）。因而使用粘接材料修补近中的缺损

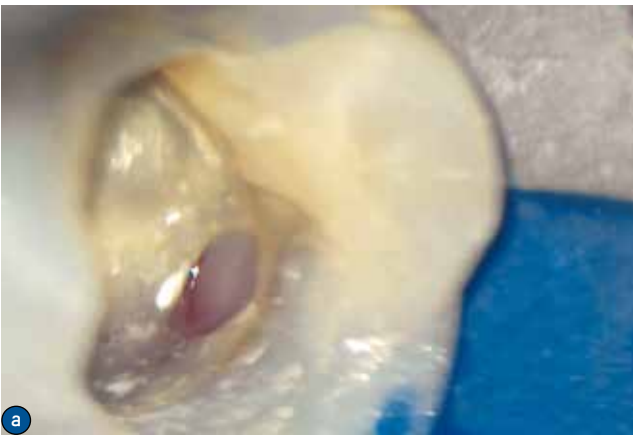


图11a和b 转诊后的情况：在其他地方做了根管治疗后，病人主诉仍有症状。发现一处远中牙槽嵴上的穿孔，即刻使用粘接材料进行修补

表2 MTA与其他老旧的穿孔修补材料效果对比的结果(作者们的报告)

作者	年份	体内	体外	数量 / 位置 / 研究对象	研究参数
Aguirre 等	1986	×		48 颗上磨牙 / 根分叉 / 狗	组织学, 影像学 and 临床检查, 炎症严重程度, 骨, 牙本质, 牙骨质吸收, 愈合类型, 上皮增生
Alhadainy&Himel	1994		×	60 颗牙齿 / 根分叉 / 人	染色; 使用立体显微镜测量
Sluyk 等	1998		×	32 颗上颌和下颌磨牙 / 根分叉 / 人	从硬组织表面去除 MTA 所需的力
Salman 等	1999	×		30 颗下颌前磨牙 / 根分叉 / 狗	基质的组织反应
Daoudi&Sauders	2002		×	46 颗磨牙 / 根分叉 / 人	染色;
Weldon 等	2002		×	51 颗上颌磨牙 / 根分叉 / 人	液体渗漏
Main 等	2004	×		16 人	成功率; 影像学表现
Yidirim 等	2005	×		90 颗下颌前磨牙和磨牙 / 根分叉穿孔 / 狗	组织学检查; 炎症严重程度和愈合类型
Al Hezaimi 等	2006		×		对粪肠球菌和血链球菌的抗菌反应
Al-Daafas & Al-Nazhan	2007	×		72 颗后牙 / 根分叉 / 狗	组织愈合反应; 炎症严重程度; 愈合类型; 上皮增殖; 骨吸收; 牙本质; 牙骨质
Holland 等	2007	×		30 颗牙齿 / 根管侧穿 / 狗	组织形态学和组织生理学反应
Pace 等	2008	×		10 / 根分叉 / 人	成功率, 临床和影像检查
Samiee 等	2009	×		34 颗的前磨牙 / 根分叉 / 狗	组织反应; 炎症严重程度; 上皮增殖
Krupp 等	2013	×		90 颗牙齿 / 人	成功率, 影像检查
Pontius 等	2013	×		50 颗牙齿 / 根分叉穿孔和根管侧穿 / 人	成功率; 临床和影像检查; 长期研究
Mente 等	2014	×		64 颗牙齿 / 人	长期研究; 封闭性

表2 MTA 与其他老旧的穿孔修补材料效果对比的结果 (作者们的报告) (续表)

随访时间	使用材料	材料结果	评论
2 和 6 个月	1. 银汞; 2. 牙胶; 3. 钢箔 + 银汞	银汞和牙胶间没有显著差异	
2 周	1. PoP+ 银汞; 2. 银汞; 3. PoP+ 光固化 GIC; 4. 光固化 GIC	1. 光 固 化 GIC; 2. PoP+GIC; 3. 银 汞; 4. PoP+ 银汞	使用干或湿的棉球覆盖没有差异, 但保持湿润使放入材料到穿孔位置有更好的结果; MTA 在放置后 72 小时的抗力比 24 小时强
24 小时和 72 小时	MTA, 覆盖干或湿棉球	MTA	
3 个月	1. RMGIC; 2. Atrisorb+RMGIC	没有差异	MTA 明显更好; 但在有或无 OPMI 上没有明显差别
72 小时	1. MTA; 2. RMGIC (vitrebond) + 使用或不使用显微镜 (OMPI, 26* 放大);	MTA	MTA: 在 4 小时或更长时间后可以获得让人满意的封闭性; Super-EBA: 超过 24 小时后才可以获得较好的封闭性;
30 分钟; 4 小时; 24 小时; 1 周; 1 月	1. MTA; 2. Super-EBA; 3. MTA+Super-EBA	没有差异	100% 成功率
≥ 1 年	MTA	MTA	MTA: 在 4 小时或更长时间后可以获得让人满意的封闭性; Super-EBA: 超过 24 小时后才可以获得较好的封闭性;
1 月; 3 月; 6 月	1. MTA; 2. Super-EBA;	没有显著差异	抗菌效果取决于 MTA 的浓度
1 小时; 24 小时; 72 小时	1. 白 MTA; 2. 灰 MTA	MTA	使用硫酸钙作为基质会导致炎症反应; 即刻修补需要 MTA
4 个月	1. 灰 MTA; 2. 灰 MTA+ 磷酸钙; 3. 银汞; 4. 银汞 + 磷酸钙	MTA	MTA 在非感染穿孔处表现更好; 临时用氢氧化钙糊剂充填不会使结果有明显差异
90 天	MTA 封闭污染的穿孔 (加氢氧化钙或不加氢氧化钙糊剂); MTA 封闭非感染穿孔	灰 MTA	100% 成功率
6 个月到 5 年	MTA	只使用灰 MTA	90% 成功率
3 个月	1. MTA; 2. 富含钙的水门汀	MTA 封闭非感染穿孔	73.3% 成功率; 术前穿孔部分的病损和穿孔位置是否和口腔存在直接相通是影响愈合的预后因素
1 到 10 年	MTA	MTA	90% 成功率
6 月到 9.5 年	1. MTA; 2. MTA + 胶原; 3. MTA+ 磷酸钙; 4. Geristore; 5. Flow; 6. 牙胶; 7. Flow+ 磷酸钙; 8. MTA+Biomed	两种材料之间没有统计学差异	好的封闭质量依赖于穿孔位置 / 86% 成功率。
1 到 8 年	MTA	MTA	

织再生而使组织附着和牙骨质形成的材料。

Pontius 等在（使用 MTA 修补根管穿孔）平均随访时间超过 37 个月的研究中实现了 90% 的成功率。此外在 50 例穿孔的研究中，他们你观察到，根据术前是否存在根尖周，或者穿孔部位牙周状况的不同，使用 MTA 修补即刻穿孔或再治疗穿孔之间没有显著差异。预后因素如穿孔位置和大小，修补时间或受累牙的类型便变得不那么重要。在一项 1—8 年长期随访的研究中，只有那些穿孔直径超过 3mm 的样本有更低的修补成功率。然而，另外两项影响修补成功的因素还包括口腔医师的经验和修补后是否在根管内打桩。

即使拥有上述所描述的众多优点，MTA 仍然有缺点需要注意到。它的主要缺点包括：固化时间长（2 小时 45 分钟 \pm 5 分钟）；技术敏感性高；相对价格高昂；重金属成分；当使用 MTA 进行牙槽

峭上或龈上修补时可能会在完全硬固前被液体冲出进入口腔内。这种情况可以使用粘接材料修补龈上的缺损。另外，有牙齿变色风险。

在穿孔修补的仿生方法上，Alsanea 等成功在大鼠皮下植入含有人类牙髓干细胞（DPSCs）和牙本质基质蛋白的牙本质晶片而实现诱导 DPSCs 分化为成骨样细胞而分泌基质以修复牙本质桥。这一方法给未来通过内源性组织再生实现穿孔修补带来希望。

5 结论

现代穿孔修补材料使牙根穿孔的处理大大提高。Seltzer 等在 1967 年还称穿孔是牙髓治疗中最惨重的失败。长期的研究也证明了根管穿孔修补材料可以使牙齿保存的问题上有很好的结果。