

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2026.03.049

生物陶瓷类根管封闭剂生物相容性及美学性能的研究进展

罗超凡^{1,2}, 胡杨^{1,2}

[1. 新疆医科大学第一附属医院(附属口腔医院)口腔修复种植科, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆维吾尔自治区口腔医学研究所, 新疆 乌鲁木齐 830054]

[摘要] 根管封闭剂凭借其良好的流动性和粘附性, 在根管充填中起到关键的边缘封闭作用。然而, 由于根管系统解剖结构复杂, 在临床操作中封闭剂常不可避免地溢出至根尖周组织。目前常用的封闭剂多具有一定程度的细胞毒性及组织刺激性, 可能引发周围组织的炎症反应、延迟愈合或甚至导致骨吸收。此外, 根管封闭剂也可能影响牙齿最终的美学表现。因此, 根管封闭剂的生物相容性及美学性能已成为临床选择中的重要考量因素。本文聚焦于生物陶瓷类根管封闭剂, 系统综述其在生物相容性及美学性能方面的研究进展, 以为新型封闭剂的研发提供参考。

[关键词] 根管封闭剂; 生物相容性; 细胞毒性; 美学性能

[中图分类号] R783

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949(2026)03-0195-04

Research Progress on Biocompatibility and Aesthetic Performance of Bioceramic Root Canal Sealers

LUO Chaofan^{1,2}, HU Yang^{1,2}

[1. Department of Prosthodontics and Implantology, the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University (Affiliated Stomatological Hospital), Urumqi 830054, Xinjiang, China;

2. Stomatological Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830054, Xinjiang, China]

[Abstract] Root canal sealer plays a crucial marginal sealing role in root canal obturation because of its excellent fluidity and adhesion. However, due to the complex anatomical structure of the root canal system, sealers inevitably extrude into the periapical tissues during clinical operations. Currently used sealers mostly have a certain degree of cytotoxicity and tissue irritation, which may induce inflammatory reactions in surrounding tissues, delay healing, or even lead to bone resorption. In addition, root canal sealers may also affect the final aesthetic performance of teeth. Therefore, the biocompatibility and aesthetic performance of root canal sealers have become important considerations in clinical selection. This paper focuses on bioceramic root canal sealers and systematically reviews the research progress in their biocompatibility and aesthetic performance, aiming to provide references for the development of new types of sealers.

[Key words] Root canal sealer; Biocompatibility; Cytotoxicity; Aesthetic performance

根管治疗 (root canal therapy, RCT) 作为牙髓及根尖周疾病的首选治疗方案, 其疗效已得到广泛认可。该治疗通过彻底清理、合理预备根管系统并进行三维严密充填, 旨在消除感染源、缓解临床症状, 并为根尖周组织的修复创造有利条件^[1]。在这一过程中, 根管封闭剂对于实现持久

的根尖封闭、控制微生物再感染以及促进组织愈合具有关键作用。然而, 传统封闭剂的应用仍面临挑战: 在生物相容性方面, 部分材料可能引发细胞毒性或炎症反应, 从而干扰组织愈合进程; 在美学性能方面, 某些成分可与牙体组织发生化学作用并逐渐渗透, 导致牙齿在术后短期内出现

第一作者: 罗超凡 (2001. 1-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事口腔材料和牙体组织生物力学相关工作

通讯作者: 胡杨 (1983. 4-), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 副主任医师, 主要从事口腔材料和牙体组织生物力学相关工作

灰色或棕色变色,且这种颜色改变通常难以逆转,可能持续影响美观数年之久^[2, 3]。根管封闭剂是现代牙髓治疗成功的关键材料,主要依据其固化方式和成分,分为生物陶瓷类与非生物陶瓷类两大体系。生物陶瓷类根管封闭剂,主要包括硅酸钙基与磷酸钙基两类,以其优异的生物活性、稳定的化学性能和潜在的色泽稳定性,已成为当前临床与研究的热点。因此,封闭剂的生物相容性与美学性能已成为评估其临床应用价值的核心指标。尽管如此,生物陶瓷类封闭剂在长期稳定性、体内降解特性及复杂根管系统内的实际表现等方面,仍存在部分待明确的争议,需通过进一步的基础研究与临床循证加以验证。基于此,本文聚焦于生物陶瓷根管封闭剂的性能特点,通过系统综述其在生物相容性与美学性能方面的研究进展,旨在为未来开发兼具低毒性、高效性与美学友好特性的新型根管封闭材料提供理论依据与临床思路。

1 生物陶瓷根管封闭剂生物相容性

1.1 矿物三氧化物聚集体(MTA)类根管封闭剂
MTA是生物陶瓷类根管封闭剂中的代表性材料,凭借其优良生物相容性、抗菌性能、良好的封闭能力和亲水性已在临床广泛应用。其主要活性成分硅酸三钙和硅酸二钙在水合反应中生成氢氧化钙并形成碱性环境,有助于促进细胞增殖与矿化,同时抑制细菌生长^[4]。然而,传统MTA也存在技术敏感性较高、可能引起牙本质染色以及凝固时间较长等局限^[5]。后续改良材料如MTA Repair HP(MTA-HP)通过纳米技术以钨酸钙替代传统放射显影剂氧化铋,提升了临床操作性能^[6]。研究表明^[7],Bio-C Repair(BCR)、Endosequence BC Root Repair(ERRM)、MTA Angelus(MTA-Ang)及MTA-HP 4种材料对体外小鼠胚胎成骨前体细胞(MC3T3-E1)均无明显细胞毒性;同时,BCR、MTA-HP、MTA Flow及IRM在动物实验中也展现出良好的生物相容性^[8]。由此可见,基于对成骨细胞、人牙周膜干细胞等多种模型的研究,MTA及其衍生材料普遍表现出良好的生物相容性与矿化潜力,长期观察结果支持其在口腔临床中具有可靠的应用前景。

1.2 iRoot SP、C-Root SP生物陶瓷根管封闭剂
iRoot SP是一种性能与MTA相近的硅酸钙基生物陶瓷根管封闭剂,其成分为硅酸钙、磷酸钙、氧化

锆和氢氧化钙等。研究表明^[9-11],该材料及其同类产品不仅具有良好的生物相容性,能促进人根尖乳头干细胞(hSCAPs)的增殖、迁移与成骨分化,还可通过调控SPAG9基因及miR-141-3p表达进一步推动成骨进程。细胞毒性实验亦证实其对小鼠成纤维细胞无明显毒性。然而,iRoot SP价格较高,促使研究者寻求更具成本效益的替代材料。C-Root SP便是一种经济型的硅酸锶基生物陶瓷封闭剂,主要成分为硅酸锶、磷酸二氢钙、磷酸二氢钾及二氧化锆。硅酸锶成分不仅能抑制TNF- α ,还具有一定镇痛作用^[12]。研究进一步显示^[13, 14],C-Root SP在生物相容性方面表现与iRoot SP相当,对hSCAPs和小鼠细胞具有低细胞毒性,甚至在部分成骨指标上表现更优。总之,iRoot SP在生物相容性与促成骨性能方面表现卓越;而C-Root SP作为一种经济型替代材料,不仅具备类似的生物相容性、低细胞毒性和促成骨潜力,其含有的硅酸锶成分还可能提供额外的抗炎与镇痛效益,展现出良好的临床应用前景。

1.3 AH plus生物陶瓷根管封闭剂(AHPB)
AHPB是一种硅酸钙基生物陶瓷类根管封闭剂,该材料具备良好的生物相容性:其对牙周膜成纤维细胞、牙龈成纤维细胞及成骨细胞均表现出优异的生物活性,可促进细胞附着并增强细胞活力,效果优于传统环氧树脂类封闭剂AH Plus。在与其他生物陶瓷类封闭剂比较中,AHPB展现出其综合性优势:它不仅具有良好的生物相容性与抗炎潜力,且未表现出明显的遗传毒性。相比之下,部分其他生物陶瓷封闭剂(如BioRoot系列材料)虽具有较高的生物活性,但现有研究^[15-18],提示其可能存在潜在遗传毒性及诱导细胞凋亡的风险。由此可见,AHPB在细胞毒性方面低于传统AH Plus封闭剂,生物活性与当前主流生物陶瓷类材料相当,并在促进细胞附着、维持细胞活性方面表现突出,同时兼具无遗传毒性及良好抗炎潜力,展现了作为新一代根管封闭剂的良好应用前景。

1.4 其他生物陶瓷类根管封闭剂
EndoSequence BC(ESB)根管封闭剂是一种预混合可注射的硅酸钙基生物陶瓷材料,主要成分为硅酸三钙、硅酸二钙、氢氧化钙、氧化锆及增稠剂。该材料不仅具备良好的生物相容性与抗菌性能,还能促进牙周膜细胞向成骨方向分化。Alchawoosh A等^[19]研究表明,ESB、Bio-C Sealer及Well-Root ST均能

显著降低RAW264.7与Kusa-A1细胞中促炎因子的表达,且不影响细胞黏附,表现出优良的生物相容性。其他多项研究也进一步证实,ESB在体外及体内实验中均表现出稳定的生物学性能^[7, 15]。Bio-C Repair (BCR)是一种即用型生物陶瓷材料,主要成分为硅酸钙、氧化锆及氧化铁等。Silva ECA等^[20]在大鼠模型中观察到BCR具有良好的组织相容性;另有研究指出,BCR对Saos-2人成骨细胞无毒性作用,并能支持其正常增殖与迁移^[21]。此外,对其他主流生物陶瓷封闭剂的研究也一致表明^[22-26],此类材料普遍具有细胞毒性低、促成骨活性及抗炎作用等生物学优势。

目前针对生物陶瓷类根管封闭剂的研究仍以体外实验为主,普遍证实其生物相容性良好。然而,体外与体内环境存在显著差异,材料在机体组织中的代谢过程及具体作用机制尚待进一步阐明,仍需更多基础研究及临床实验加以验证。

2 生物陶瓷根管封闭剂美学性能

2.1 硅酸钙基生物陶瓷封闭剂的颜色稳定性 以Endosequence BC Sealer、BioRoot RCS和TotalFill BC Sealer为代表的硅酸钙基封闭剂,在多项中长期研究中展现出优异的美学性能。其颜色稳定性主要得益于水化产物化学性质稳定,且配方中不含易导致牙本质染色的氧化铋、碘仿或某些胺类成分。研究表明^[27-29],在长达3年的体外观察中,该类材料引起的牙齿颜色变化(ΔE 值)多维持在临床可接受范围内($\Delta E < 3.7$),其稳定性不劣于甚至优于广泛使用的环氧树脂基封闭剂AH Plus。这提示新一代硅酸钙基封闭剂能在实现良好生物封闭的同时,有效维持牙齿的长期色泽。

2.2 MTA类封闭剂的变色特性及其改进 以MTA Fillapex为代表的传统MTA类封闭剂,其美学性能具有两面性。短期(1个月~1年)研究显示^[27, 30],其引起的变色程度轻于氧化铋丁香酚类(如Tubliseal)或树脂基(如AH26)封闭剂。然而,其长期变色风险依然存在,可能与早期配方中所含的氧化铋显影剂或杂质有关。为改善这一问题,新一代材料如MTA Repair HP采用钨酸钙作为替代显影剂,在保持放射显影性的同时,初步研究显示其颜色稳定性有所提升。尽管如此,临床操作中仍建议对MTA类材料在美学区的应用保持谨慎^[6]。

2.3 操作因素对美学结果的影响 封闭剂在根管内的冠方位置是影响术后牙冠变色的关键操作因

素。研究表明^[30, 31],将封闭剂控制在距根管口以下2 mm处进行充填,相比完全充满髓腔直至冠部,能显著减少牙冠的可见变色。这强调了精确的充填技术和恰当的冠部封闭在美学区根管治疗中的重要性,该原则适用于所有类型的根管封闭剂。

3 总结

在生物相容性方面,以MTA-HP、iRoot SP、C-Root SP、AHPB、ESB及BCR为代表的生物陶瓷类根管封闭剂,在多项研究中均显示出良好的生物学表现。这些材料通过释放钙离子、形成碱性环境及调控相关信号通路(如miR-141-3p/SPAG9/MAPK),可有效促进干细胞增殖、迁移及矿化过程,具有良好的组织修复潜能。其中,C-Root SP作为一种经济型硅酸锶基封闭剂,不仅展现出与iRoot SP相当的生物相容性与成骨诱导能力,其硅酸锶成分还可能带来一定的抗炎与镇痛作用,体现出良好的临床应用潜力。在美学性能方面,以Endosequence BC、BioRoot RCS及TotalFill BC为代表的硅酸钙基封闭剂,在长期观察中引起的牙齿颜色变化多处于临床可接受范围。而MTA Fillapex类材料在短期内的颜色稳定性较好,但充填深度与时间仍是影响其美学表现的关键因素,提示在临床操作中应控制封闭剂在根管内的冠方位置,以减少染色风险。总体而言,生物陶瓷类根管封闭剂在生物相容性与颜色稳定性方面均优于传统材料,且部分产品兼具经济性与附加功能,展现出广阔的临床应用前景。

[参考文献]

- [1]王镇.半导体激光应用于前牙一次性根管治疗临床疗效的观察[J].临床口腔医学杂志,2024,40(11):680-682.
- [2]颜愈佳,邹玲.生物陶瓷类根管封闭剂的研究进展[J].国际口腔医学杂志,2022,42(5):578-585.
- [3]Ahmed HM,Abbott PV.Discolouration potential of endodontic procedures and materials: a review[J].Int Endod J,2012,45(10):883-897.
- [4]Wang X,Xiao Y,Song W,et al.Clinical application of calcium silicate-based bioceramics in endodontics[J].J Transl Med,2023,21(1):853.
- [5]游月华,周珊羽,元博,等.生物陶瓷材料iRoot BP plus和矿物三氧化聚合体MTA应用于成人恒牙根尖屏障术的临床疗效分析[J].实用医学杂志,2021,37(7):869-873.

- [6] Ghilotti J, Sanz JL, López-García S, et al. Comparative Surface Morphology, Chemical Composition, and Cytocompatibility of Bio-C Repair, Biodentine, and ProRoot MTA on hDPCs[J]. *Materials*(Basel), 2020, 13(9):2189.
- [7] Abrão SMS, Gregorio D, Azevedo MKC, et al. Cytotoxicity and genotoxicity of Bio-C Repair, Endosequence BC Root Repair, MTA Angelus and MTA Repair HP[J]. *Braz Dent J*, 2023, 34(2):14-20.
- [8] Inada RNH, Queiroz MB, Lopes CS, et al. Biocompatibility, bioactive potential, porosity, and interface analysis calcium silicate repair cements in a dentin tube model[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(7):3839-3853.
- [9] Yan Y, Li Y, Chi Y, et al. Correction to: A comparative study of biological properties of three root canal sealers[J]. *Clin Oral Investig*, 2024, 28(1):96.
- [10] 薛凯洋. 生物陶瓷密封剂 iRoot SP 通过 miR-141-3p/SPAG9/MAPK 信号通路促进人根尖乳头干细胞成骨分化[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- [11] 戴怡茹, 杨健. 新型根管充填材料 HiFlow 的体外细胞毒性研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2020, 36(5):744-747.
- [12] 李冬, 闫胜男, 徐娟娟. C-Root SP 硅酸锆在慢性根尖周炎患者根管治疗中的应用效果及对根尖骨缺损修复的作用[J]. *黑龙江医药科学*, 2025, 48(4):139-140, 143.
- [13] 张昊, 石劭婧, 张琛. 新型生物陶瓷材料对人根尖乳头干细胞增殖及成骨分化的影响[J]. *北京口腔医学*, 2024, 32(2):120-124.
- [14] 杨习良, 郑天霞, 李文, 等. 硅酸盐根管封闭剂的体外细胞毒性、成骨潜力和抗菌活性评价[J]. *上海口腔医学*, 2023, 32(3):246-250.
- [15] Kwak SW, Koo J, Song M, et al. Physicochemical Properties and Biocompatibility of Various Bioceramic Root Canal Sealers: In Vitro Study[J]. *J Endod*, 2023, 49(7):871-879.
- [16] Radwanski M, Rozpedek-Kaminska W, Galita G, et al. Cytotoxicity and genotoxicity of bioceramic root canal sealers compared to conventional resin-based sealer[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):4124.
- [17] Chen JH, Raman V, Kuehne SA, et al. Chemical, Antibacterial, and Cytotoxic Properties of Four Different Endodontic Sealer Leachates Over Time[J]. *J Endod*, 2024, 50(11):1612-1621.
- [18] Sanz JL, López-García S, García-Bernal D, et al. Comparative bioactivity and immunomodulatory potential of the new Bioroot Flow and AH Plus Bioceramic sealer: An in vitro study on hPDLSCs[J]. *Clin Oral Investig*, 2024, 28(3):195.
- [19] Alchawoosh A, Hashimoto K, Kawashima N, et al. Hydraulic calcium silicate-based root canal sealers mitigate proinflammatory cytokine synthesis and promote osteogenesis in vitro[J]. *J Dent Sci*, 2023, 18(4):1731-1739.
- [20] Silva ECA, Pradelli JA, da Silva GF, et al. Biocompatibility and bioactive potential of NeoPUTTY calcium silicate-based cement: An in vivo study in rats[J]. *Int Endod J*, 2024, 57(6):713-726.
- [21] Campi LB, Rodrigues EM, Torres FFE, et al. Physicochemical properties, cytotoxicity and bioactivity of a ready-to-use bioceramic repair material[J]. *Braz Dent J*, 2023, 34(1):29-38.
- [22] Inada RNH, Silva ECA, Lopes CS, et al. Biocompatibility, bioactivity, porosity, and sealer/dentin interface of bioceramic ready-to-use sealers using a dentin-tube model[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):16768.
- [23] Sheela S, Nassar M, AlGhalban FM, et al. In Vitro Cytotoxicity and Mineralization Potential of an Endodontic Bioceramic Material[J]. *Eur J Dent*, 2023, 17(2):548-555.
- [24] Badawy RE, Mohamed DA. Evaluation of new bioceramic endodontic sealers: An in vitro study[J]. *Dent Med Probl*, 2022, 59(1):85-92.
- [25] 杨习良, 郑天霞, 杨诺亚, 等. 3种根管封闭剂体外细胞相容性、促成骨性及抗菌性的实验研究[J]. *口腔医学研究*, 2022, 38(11):1071-1075.
- [26] Alfahlawy A, Selim MAA, Hassan HY. Biocompatibility of three different root canal sealers, experimental study[J]. *BMC Oral Health*, 2023, 23(1):715.
- [27] Alobaid AS, Mkhreb SS, Ali ABM, et al. Comparative Spectrophotometric Assessment of Crown Discoloration from Diverse Endodontic Sealers[J]. *Med Sci Monit*, 2025, 31:e947874.
- [28] Ekici MA, Ekici A, Kaskatı T, et al. Tooth crown discoloration induced by endodontic sealers: a 3-year ex vivo evaluation[J]. *Clin Oral Investig*, 2019, 23(5):2097-2102.
- [29] Lena C, Herrero A, Lloret S, et al. Effect of calcium silicate-based endodontic sealers on tooth color: A 3-year in vitro experimental study[J]. *Heliyon*, 2023, 9(2):e13237.
- [30] Lena IM, Bagnara CDR, Visentini JE, et al. Tooth discoloration induced by endodontic sealers and cervical limit: 1-year in vitro evaluation[J]. *Braz Dent J*, 2023, 34(6):30-39.
- [31] 王艺桥, 汪敏, 刘文佳, 等. 根管治疗材料及药物引起牙齿变色的研究进展[J]. *牙体牙髓牙周病学杂志*, 2017, 27(5):295-300, 270.

《医学美容美容》 审稿专家任职条件

诚邀海内外杰出学者加入本刊审稿专家库，共同守护学术质量，引领学科发展。我们期待您具备以下学术素养与实践能力：

一、基本资质

- （一）职称与导师资格：原则上应具有副教授、副研究员或以上专业技术职务，并已被正式聘任为硕士研究生导师。
- （二）科研活跃度：近三年（以申请日期起算）以第一作者或通讯作者身份，在本学科领域高水平学术期刊上持续有科研成果发表，展现出活跃的研究前沿跟踪能力与学术产出水平。

二、学术能力

- （一）前沿洞察力：熟悉所在学科及交叉领域的研究动态、热点与未来方向，能准确判断研究工作的创新性与学术价值。
- （二）方法论严谨性：具备扎实的科研方法论素养，能对研究设计的合理性、逻辑性、伦理合规性及统计方法的恰当性进行专业评估。
- （三）写作与评判能力：具有优秀的学术写作能力，并能对他人论文的逻辑结构、论证力度、表述清晰度及规范性提出建设性、可操作的修改意见。

三、实践素养

- （一）“实战”经验转化能力：不仅拥有丰富的自身科研经验，更能将研究过程中遇到的真实挑战、解决方案与心得感悟，系统转化为对青年研究者有切实帮助的指导性意见。
- （二）高效的沟通与指导方式：善于通过清晰、精准、友善的书面语言进行学术交流，反馈意见应具体、明确、具有建设性，能够引导作者有效提升稿件质量，而非简单评判。
- （三）责任与时效意识：承诺遵守审稿时效要求，并能以对学术共同体负责的态度，投入必要的时间与精力，完成严谨、公正的评审工作。

四、申请方式

请访问本刊官网“下载中心”下载“《〈医学美容美容〉审稿专家申请表》”，完整填写后经所在单位盖章，将扫描件/照片发送至指定邮箱：yxeditor@qq.com。我们将对申请材料进行审核，符合要求的专家，编辑部将主动与您联系并正式发出邀请。

我们相信，卓越的审稿人不仅是学术的评判者，更是知识的传递者和科研生态的建设者。诚挚邀请符合条件的学者加入我们，共同打造一个专业、严谨、富有建设性的学术交流平台。