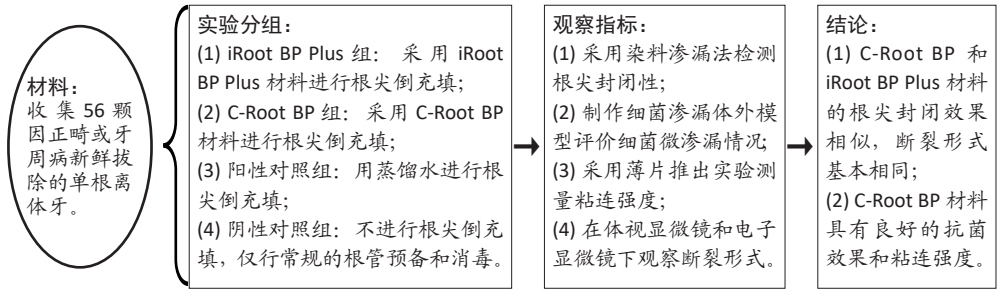
体外环境下 C-Root BP 材料根尖封闭性及抗力强度

周丽静，王 双，向谨姣，王会超，柴雪姣

https://doi.org/10.12307/2026.209
采用日期：2025-07-09
修回日期：2025-09-10
在线日期：2025-11-14
中图分类号：
R459.9；R318.08；R783.1
文章编号：
2095-4344(2026)26-06868-05
文献标识码：B

文章快速阅读： iRoot BP Plus 和 C-Root BP 根尖封闭性能及抗力强度比较



文题释义：

C-Root BP材料：是一种预混合的生物陶瓷根管修复材料，核心成分包括硅酸锶、硅酸钙、氧化钽等无机化合物。C-Root BP材料具备出色的生物相容性、封闭性及骨诱导能力，适用于根管治疗中的根尖封闭与修复，是现代根尖区修复的重要选择之一。

根尖封闭性：是牙科领域评估根管治疗材料或根尖修复材料性能的核心指标，指材料在根尖孔区域形成物理与生物屏障，阻止口腔内细菌、毒素、组织液及外界物质通过根尖孔渗透至根尖周组织的能力。

摘要

背景：近年来，生物陶瓷材料因具有良好的生物相容性和封闭性能逐渐成为根尖倒充填的首选材料，其中生物陶瓷材料C-Root BP、iRoot BP Plus均具有良好的生物相容性和封闭性能。

目的：对比体外环境下C-Root BP与iRoot BP Plus材料的根尖封闭性能及抗力强度。

方法：于2022年6月至2024年6月期间，收集石家庄市第二医院口腔科因正畸或牙周病新鲜拔除的单根离体牙56颗，随机分4组处理：iRoot BP Plus组(*n*=16)、C-Root BP组(*n*=16)根管预备和消毒后分别采用iRoot BP Plus、C-Root BP材料进行根尖倒充填，阳性对照组(*n*=16)根管预备和消毒后使用蒸馏水进行根尖倒充填，阴性对照组(*n*=8)仅行根管预备和消毒(不进行根尖倒充填处理)，采用染料渗透法检测根尖封闭性；制作根管细菌渗漏体外模型，评价细菌微渗漏发生情况；采用薄片推出实验检测填充材料与牙本质之间的粘连强度，并在显微镜下观察断裂形式。

结果与结论：①染料染色7 d后，阳性对照组染料渗透长度大于iRoot BP Plus组、C-Root BP组($P < 0.05$)，iRoot BP Plus组和C-Root BP组染料渗透长度比较差异无显著性意义($P > 0.05$)；②经过90 d培养，阳性对照组细菌微渗漏发生率高于iRoot BP Plus组、C-Root BP组($P < 0.05$)，iRoot BP Plus组和C-Root BP组细菌微渗漏发生率比较差异无显著性意义($P > 0.05$)；③C-Root BP组填充材料与牙本质之间的粘连强度大于iRoot BP Plus组($P < 0.05$)，两组断裂面断裂形式比较差异无显著性意义($P > 0.05$)；④结果表明，采用C-Root BP和iRoot BP Plus材料进行根尖倒充填可产生相似的根尖封闭效果，并且断裂形式也基本一致，但C-Root BP材料具有良好的粘连强度。

关键词：C-Root BP；iRoot BP Plus；根尖倒充填；根尖封闭性；抗力强度；细菌；根管治疗；生物材料

Apical sealing and resistance strength of C-Root BP material in *in vitro* environment

Zhou Lijing, Wang Shuang, Xiang Jinjiao, Wang Huichao, Chai Xuejiao

Department of Stomatology, Shijiazhuang Second Hospital, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China

Zhou Lijing, MS, Associate chief physician, Department of Stomatology, Shijiazhuang Second Hospital, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China

Corresponding author: Zhou Lijing, MS, Associate chief physician, Department of Stomatology, Shijiazhuang Second Hospital, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China

Abstract

BACKGROUND: In recent years, bioceramic materials have become the preferred materials for retrograde apical filling due to their excellent biocompatibility and sealing properties. The bioceramic materials C-Root BP and iRoot BP Plus both exhibit excellent biocompatibility and sealing properties.

OBJECTIVE: To compare the apical sealing performance and resistance strength of C-Root BP and iRoot BP Plus materials *in vitro*.

METHODS: From June 2022 to June 2024, 56 freshly extracted single detached teeth at the Department of Stomatology, Shijiazhuang Second Hospital due to orthodontics or periodontal disease were collected and randomly divided into four groups. The iRoot BP Plus group (*n*=16) and C-Root BP group (*n*=16) were respectively treated with iRoot BP Plus and C-Root BP materials for root tip filling. The positive control group (*n*=16) was treated with distilled water for root

石家庄市第二医院口腔科，河北省石家庄市 050000
第一作者：周丽静，女，1986 年生，河北省石家庄市人，汉族，硕士，副主任医师，主要从事牙体牙髓及牙周、黏膜临床相关疾病方面的研究。
通讯作者：周丽静，硕士，副主任医师，石家庄市第二医院口腔科，河北省石家庄市 050000
https://orcid.org/0009-0009-8036-9599 (周丽静)

基金资助：河北省 2025 年度医学研究课题 (20251097)，项目负责人：周丽静
引用本文：周丽静，王双，向谨姣，王会超，柴雪姣 . 体外环境下 C-Root BP 材料根尖封闭性及抗力强度 [J]. 中国组织工程研究，2026，30(26):6868-6872.

tip filling, while the negative control group (*n*=8) was not treated with root tip filling and only underwent routine root canal preparation and disinfection. Dye penetration method was used to detect the apical sealing. A root canal bacterial leakage model was made *in vitro*, and bacterial microleakage was evaluated. The adhesion strength between the filling material and dentin was measured by wafer extrusion test, and the fracture form was observed under a microscope. **RESULTS AND CONCLUSION:** (1) After 7 days of dye staining, the dye penetration length of the positive control group was greater than that of the iRoot BP Plus group and C-Root BP group ($P < 0.05$). There was no significant difference in dye penetration length between the iRoot BP Plus group and the C-Root BP group ($P > 0.05$). (2) After 90 days of cultivation, the incidence of bacterial microleakage in the positive control group was higher than that in the iRoot BP Plus group and C-Root BP group ($P < 0.05$), while there was no significant difference in the incidence of bacterial microleakage between the iRoot BP Plus group and C-Root BP group ($P > 0.05$). (3) The adhesion strength between the filling material and dentin in the C-Root BP group was greater than that in the iRoot BP Plus group ($P < 0.05$), and there was no significant difference in the fracture surface pattern between the two groups ($P > 0.05$). (4) These findings indicate that the use of C-Root BP and iRoot BP Plus materials for root tip filling can produce similar root tip sealing effects, and the fracture mode is also basically the same. However, C-Root BP material has good adhesion strength.
Key words: C-Root BP; iRoot BP Plus; retrograde root tip filling; apical sealing; resistance strength; bacteria; root canal treatment; biomaterial

Funding: *Hebei Province 2025 Medical Research Project, No. 20251097 (to ZLJ)*
How to cite this article: *ZHOU LJ, WANG S, XIANG JJ, WANG HC, CHAI XJ. Apical sealing and resistance strength of C-Root BP material in in vitro environment. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2026;30(26):6868-6872.*

0 引言 Introduction

根尖周病是口腔科常见的感染性疾病，严重影响患者的口腔健康和生活质量[1]。根尖倒充填术是治疗根尖周病的重要手段，可通过切除根尖病变组织、充填根管末端阻止根管内感染物质进入根尖周组织，从而促进根尖周病变愈合[2-3]。但传统的根尖倒充填材料存在根尖封闭性不佳的问题，容易出现微渗漏情况，从而降低根尖倒充填术的治疗效果[4-5]。因此，如何研发和应用新型根尖倒充填材料，成为口腔医学领域研究的热点。

C-Root BP 与 iRoot BP Plus 为生物陶瓷类根尖倒充填材料，近年来在临床中的应用逐渐增多。C-Root BP 是一种含有硅酸锶的生物陶瓷修复材料，适用于复杂的根尖周病变情况，如根尖囊肿、根尖肉芽肿等，可有效清除组织并促进骨组织修复[6-8]。iRoot BP Plus 是一种硅酸钙基生物陶瓷材料，具有良好的封闭性、生物相容性和生物活性，操作相对简便[9-10]。然而，目前关于 C-Root BP 与 iRoot BP Plus 材料在根尖倒充填应用中的比较研究仍较少，尚不能明确上述两种材料在根尖封闭性、抗力强度、细菌微渗漏等方面的差异。基于此，此次研究旨在探讨体外环境下 C-Root BP 与 iRoot BP Plus 材料的根尖封闭性能及抗力强度，为临床应用提供依据。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 体外对比观察实验。

1.2 时间及地点 实验于 2022 年 6 月至 2024 年 6 月在石家庄市第二医院口腔科完成。

1.3 材料

1.3.1 牙齿样本 在 2022 年 6 月至 2024 年 6 月期间，从石家庄市第二医院收集 56 颗因正畸或牙周病新鲜拔除的单根离体牙。供者对实验知情同意并签署了知情同意书。研究已获得石家庄市第二医院医学伦理委员会批准 (SEY-KYLL-2024-020)。

纳入标准：单根管离体牙；牙根发育完全；根尖孔直径在 0.3–0.5 mm 之间。

排除标准：根管钙化；牙根存在龋坏、裂纹及断裂等情况；牙根内外吸收。

1.3.2 根尖封闭材料 iRoot BP Plus 与 C-Root BP 材料介绍，见**表 1**。

1.4 实验方法 采用随机数字表法将 56 颗离体牙分为 iRoot BP Plus 组 (*n*=16)、C-Root BP 组 (*n*=16)、阳性对照组 (*n*=16)、阴性对照组 (*n*=8)。

表 1 | iRoot BP Plus 与 C-Root BP 材料介绍
Table 1 | **iRoot BP Plus and C-Root BP material introduction**

项目	iRoot BP Plus	C-Root BP
生产厂家	加拿大 Innovative BioCeramix Inc.	北京赛汝特口腔医疗器械公司
注册证编号	国械注进 20153173774	国械注准 20243171756
材质或成分组成	氧化锆、硅酸钙、磷酸钙、氢氧化钙、填料和增稠剂	硅酸锶、磷酸钙、氧化锆、氧化钽、氢氧化钙、填料和增稠剂
适应证	根管侧穿的修补，根吸收的修补、根尖外科倒充填、根尖诱导形成术和盖髓术	根尖外科倒充填、根管侧穿的修补、根吸收的修补、根尖诱导成形术和盖髓术
不良反应	尚不明确	尚不明确

样本处理：应用 1401S-4 高速涡轮机 (佛山市德克医疗器械有限公司) 在牙冠合适位置开槽，揭去髓顶，充分暴露根管口；使用 M3-PRO 根管锉 (常州益锐医疗器械有限公司) 探查根管走向和深度，初步疏通根管，确定根管的工作长度；使用根管锉扩大根管，同时用生理盐水和次氯酸钠溶液交替冲洗根管，去除根管内的牙髓组织、细菌、毒素和玷污层，直至根管壁光滑，用无菌纸尖干燥根管；完成根管预备后，选择合适根充材料进行充填，iRoot BP Plus 组、C-Root BP 组在水冷却状态下使用超声倒预备工作尖，沿根管方向进行根尖倒预备，预备出深度为 3 mm、直径为 1 mm 的洞形，完成预备后用无菌生理盐水彻底冲洗洞口并干燥，使用垂直加压器压紧根尖冠方的牙胶，在显微镜下再次观察倒预备的窝洞侧壁，排除微裂纹；用纸尖吸干后，iRoot BP Plus 组、C-Root BP 组分别用 iRoot BP Plus、C-Root BP 材料行根尖倒充填，然后用湿棉球清理根断面，去除多余充填材料，阳性对照组使用蒸馏水进行根尖倒充填，随后将样本置于 DK-450B 电子恒温箱 (上海森信实验仪器有限公司) 保存 7 d，确保材料能充分固化。阴性对照组仅行常规的根管预备和消毒 (不进行根尖倒充填处理)。以上操作均由同一组医师完成。

1.5 主要观察指标

1.5.1 根尖封闭性 每组取 8 个完成根尖倒充填的离体牙，采用染料渗透法检测 4 组的根尖封闭性。取完成根尖倒充填的离体牙，用纸巾吸去水分，用指甲油封闭根尖孔 2 mm 以上的整个牙面，仅暴露根尖孔，保证染料仅能从根尖孔渗入根管。待指甲油彻底干燥后，将离体牙浸入 1% 亚甲蓝溶液中，置于恒温箱中 7 d。7 d 后从恒温箱中取出离体牙，先用流动水仔细冲洗牙根表面附着的染料，再使用刮治器小心清除牙根表面残留的指

甲油，最后对牙根进行干燥处理。应用自凝树脂包埋样本，再用 SYJ-160 低速切割机 (上海群弘仪器设备有限公司) 将离体牙沿牙体长轴方向纵向切开，置于 OLYMPUS SZX7 体视显微镜 (×20) 下观察，利用 ISCaptrue 软件测量染料从根尖孔向根管内渗入的最长距离 (精确到 0.001 mm)，评价材料的根尖封闭性。

1.5.2 细菌微渗漏测试 每组取 8 个完成根尖倒充填的离体牙，参照王冬梅等 [11] 研究制作根管细菌渗漏体外模型，评价 iRoot BP Plus 组、C-Root BP 组和阳性对照组的细菌微渗漏发生率。将建立好的模型放入恒温箱中孵育 48 h，观察青霉素小瓶中的脑心浸液培养基，若呈透明状，表明灭菌达标可继续使用；若浑浊则弃用。

实验开始前，制作 5 个细菌培养模型装置，用亚甲蓝染料观察 90 d，若染料未渗漏，则说明模型封闭性良好。在细菌渗漏模型的 Eppendor 管中加入 0.1 mL 粪肠球菌 [购自梅里埃诊断产品 (上海) 有限公司，产品编号：NCTC 12697] 悬液，浓度为 3×10^8 CFU/mL，每 2 d 更换 1 次菌液；观察 90 d，记录青霉素小瓶中的脑心浸液培养基是否变浑浊，若培养基变浑浊，则表明有细菌渗漏到根尖周组织。同时，对浑浊的培养基进行革兰染色和细菌培养，鉴定渗漏的细菌种类，以明确细菌微渗漏情况。

1.5.3 填充材料与牙本质之间的粘连强度 取根尖封闭性实验的离体牙，采用薄片推出实验测量 iRoot BP Plus、C-Root BP 材料与牙本质之间的粘连强度。将完成根尖倒充填的离体牙切成厚度约 1 mm 的薄片，使充填材料位于薄片的中心位置，将薄片固定于特制的夹具上，使用 LS5 万能材料试验机 (英国 Lloyd) 对充填材料施加垂直于牙本质表面的推力，加载速度为 1.0 mm/min，直至充填材料从牙本质表面分离。记录材料分离时所承受的最大载荷，计算粘连强度 (最大载荷 / 粘接面积)。

采用 SZX7 体视显微镜和 Phenom 扫描电子显微镜 (赛默飞世尔) 观察 iRoot BP Plus、C-Root BP 材料的断裂形式，完成粘连强度测试后，将断裂的样本用 UC-02 超声波清洗机 (宁波悦医行齿科设备有限公司) 清洗干净，去除表面的杂质和碎屑，先在体视显微镜下对样本进行初步观察，记录断裂的宏观特征，如断裂位置、方向和整体形态；再对样本进行喷金处理，使用扫描电子显微镜对样本进行高倍观察，观察断裂面的微观结构，如裂纹扩展路径、材料内部结构变化等，记录材料的断裂特征。断裂形式分为粘接型断裂、内聚型断裂和混合型断裂 3 种形式 [12-14]：①粘接型断裂：断裂发生在根尖封闭材料与牙本质之间的界面处，显微镜下可见断裂线清晰穿过根尖封闭材料与牙本质的交界面；②内聚型断裂：断裂发生在根尖封闭材料内部，而材料与牙本质的界面保持完整，显微镜下可见断裂线未穿过根尖封闭材料与牙本质的交界面，但在材料内部断裂；③混合型断裂：断裂同时涉及粘接型和内聚型两种形式，显微镜下可见断裂线既穿过材料与牙本质的交界面，又在材料内部断裂。

1.6 统计学分析 采用 SPSS 23.0 软件分析数据，计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示，行 *t* 检验；多组间比较采用单因素方差检验，进一步两两比较采用 LSD-*t* 检验。计数资料以 *n*/% 表示，行 Fisher 精确检验。双侧检验水准 α=0.05。该文统计学方法已经石家庄市第二医院生物统计学专家审核。

2 结果 Results

2.1 各组样本根尖封闭性比较 染色 7 d 后，体视显微镜下观察 4 组染料微渗漏情况，见**图 1**。

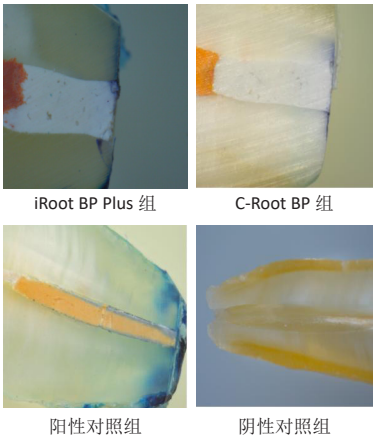


图 1 | 体视显微镜下观察 4 组样本染料微渗漏情况 (×20)
Figure 1 | **Dye microleakage of four groups of samples observed under a stereomicroscope (×20)**

阳性对照组染料渗透长度大于 iRoot BP Plus 组、C-Root BP 组 (P < 0.05)，iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组染料渗透长度比较差异无显著性意义 (P > 0.05)，见**表 2**。

表 2 | 各组样本染料渗透长度比较 ($\bar{x}\pm s$，*n*=8，mm)
Table 2 | **Comparison of dye penetration length of each group of samples**

组别	染料渗透长度
iRoot BP Plus 组	1.20±0.23[a]
C-Root BP 组	1.23±0.31[a]
阳性对照组	3.56±0.52
阴性对照组	0
F 值	104.906
P 值	< 0.001

表注：与阳性对照组比较，[a]P < 0.05。

2.2 各组样本细菌微渗漏情况比较 经过 90 d 培养，阳性对照组细菌微渗漏发生率高于 iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组 (P < 0.05)，iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组细菌微渗漏发生率比较差异无显著性意义 (P > 0.05)，见**表 3**。

表 3 | 各组样本根管细菌微渗漏模型中细菌微渗漏发生率比较 (*n*/%，*n*=8)
Table 3 | **Comparison of the incidence of bacterial microleakage in the root canal bacterial microleakage model among the samples in each group**

组别	细菌微渗漏发生率
iRoot BP Plus 组	3/38[a]
C-Root BP 组	0[a]
阳性对照组	8/100
x^2 值	17.160
P 值	< 0.001

表注：与阳性对照组比较，[a]P < 0.05。

2.3 C-Root BP 组与 iRoot BP Plus 组样本中填充材料与牙本质之间粘连强度的比较 C-Root BP 组样本中填充材料与牙本质之间的粘连强度大于 iRoot BP Plus 组 (P < 0.05)，见**表 4**。

2.4 iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组样本断裂形式比较 Root BP Plus 组和 C-Root BP 组样本均以混合型为主要断裂形式，两组断裂形式比较差异无显著性意义 (P > 0.05)，见**表 5**。

表 4 | iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组样本中填充材料与牙本质之间粘连强度的比较 ($\bar{x}\pm s$，n=8，MPa)

Table 4 | Comparison of adhesion strength between filling materials and dentin in the iRoot BP Plus and C-Root BP groups

组别	粘连强度
iRoot BP Plus 组	12.56±1.96
C-Root BP 组	15.27±2.35
t 值	2.505
P 值	0.025

表 5 | iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组样本退出实验中断裂形式比较 (n/%，n=8)

Table 5 | Comparison of fracture patterns in the iRoot BP Plus and C-Root BP groups during the withdrawal experiment

组别	粘接型	内聚型	混合型
iRoot BP Plus 组	1/12	3/38	4/50
C-Root BP 组	2/25	1/13	5/63
x^2 值	1.470		
P 值	0.648		

3 讨论 Discussion

根管治疗的成功在很大程度上依赖于根尖倒充填材料的封闭性能和粘连强度，理想的根尖倒充填材料不仅具备良好的封闭性，能有效阻止微渗漏和细菌侵入，同时还具备足够的粘连强度，可承受口腔环境中的咬合力 [15-17]。近年来，生物陶瓷材料因良好的生物相容性和封闭性能逐渐成为根尖倒充填的首选材料。iRoot BP Plus 和 C-Root BP 为两种常用的生物陶瓷型材料，在临床应用中表现出良好的性能 [18-20]，然而，关于二者在体外环境下作为根尖倒充填材料的封闭性能和抗力强度仍需进一步比较研究。

根尖封闭性是评价根尖倒充填材料性能的关键指标，影响着根尖周病的治疗效果。此次研究结果显示，阳性对照组染料渗透长度大于 iRoot BP Plus 组、C-Root BP 组 (P < 0.05)，而 iRoot BP Plus 组和 C-Root BP 组间染料渗透长度比较无显著差异 (P > 0.05)，提示 C-Root BP 和 iRoot BP Plus 作为根尖倒充填材料的根尖封闭效果相似，分析原因：C-Root BP 和 iRoot BP Plus 为生物陶瓷类生物材料，能在根尖区域形成较为紧密的充填，并与根管内的组织液反应，在牙体表面形成羟基磷灰石层，为根尖提供良好的封闭环境，确保封闭效果 [21-22]。此外，从适应性方面来看，在根尖孔较大或根尖形态不规则情况下，C-Root BP 材料能凭借其自身良好的流动性和回溯性更好地适应根尖复杂形态，从而提供较为理想的封闭效果 [23-24]；iRoot BP Plus 材料的边缘适应性较强，与根管壁牙体组织之间的粘接界面结合后能较好地填充根尖区域，在根尖倒充填治疗中形成有效封闭，从而提高根尖封闭效果 [25-27]。李立等 [28] 采用流体动力学检测 iRoot 用于根尖倒充填的封闭性，结果显示 iRoot BP、iRoot BP Plus 的微渗漏测定值比较无显著差异，进一步说明了 C-Root BP 和 iRoot BP Plus 材料的根尖封闭效果相似。因此，建议临床可根据根尖孔形态合理选择根尖倒充填材料，如当根尖孔直径较大或形态不规则时，可优先选择 C-Root BP 材料，以更好地适应根尖孔的复杂解剖结构，形成紧密的物理封闭；而在根尖孔较小或根管壁完整的病例中，可选择 iRoot BP Plus 材料进行根尖倒充填。

研究表明，细菌微渗漏是造成根尖周病复发的重要因素，严重影响根尖倒充填术的治疗效果 [29-30]。此次研究结果显示，阳性对照组细菌微渗漏发生率为 100%，提示蒸馏水不具备抗菌活性，无法在根尖区域形成有效封闭，进一步验证了实验的有效性；iRoot BP Plus 组细菌微渗漏发生率为 38%，C-Root BP 组无细菌微渗漏发生，表明与 iRoot BP Plus 材料相比，C-Root BP 作为根尖倒填充填材料可能会产生更好的抗菌效果。C-Root BP 材料中的关键成分硅酸锶具有一定的抗菌活性，能干扰细菌的代谢过程并改变细菌细胞膜的通透性，从而有效抑制根尖区细菌生长和繁殖，降低细菌微渗漏的发生率 [31-33]；C-Root BP 材料在固化过程中使周围环境的 pH 值升高，形成强碱性环境，更有效地破坏细菌细胞膜结构，使细菌的酶蛋白变性失活，从而对细菌生长产生抑制作用 [34-35]。而 iRoot BP Plus 材料的致密性较差，存在较多的微小孔隙，使得细菌在孔隙内附着、繁殖，并与周围环境中的营养物质接触，从而降低抗菌效果 [36-37]。因此，对于感染性根尖周炎 (如根尖脓肿、瘘管形成)，建议临床优先选用 C-Root BP 材料，以提高抗菌效果、降低术后感染风险；而 iRoot BP Plus 材料由于孔隙较多、抗菌性较弱，更适合用于非感染性的根尖封闭 (如创伤露髓、根管超填修复)。

粘连强度可衡量根尖倒充填材料与根管壁结合后的牢固程度，良好的粘连强度可提高根尖倒填充术的治疗效果。此次研究发现，C-Root BP 组填充材料与牙本质之间的粘连强度明显大于 iRoot BP Plus 组 (P < 0.05)，提示相较于 iRoot BP Plus 材料，使用 C-Root BP 材料进行根尖倒充填可提高粘连强度。C-Root BP 材料固化后表面相对粗糙，微观上有较多的凹凸结构，能与牙本质表面形成更好的机械锁合，从而增加材料与牙本质之间的摩擦力和咬合力，提高粘连强度 [38-39]；与此同时，C-Root BP 材料在固化过程中还会释放出锶离子，能与牙本质中的一些成分 (如羟基磷灰石、磷酸根离子等) 发生化学反应，形成化学吸附，从而增强材料与牙本质之间的粘连强度 [40-41]。而 iRoot BP Plus 材料固化后表面较为光滑，机械锁合作用相对较弱，整体粘连强度可能会受到一定影响 [42]；并且 iRoot BP Plus 材料的主要成分为钙离子，与牙本质结合后所形成的化学键和吸附作用相对较弱，从而导致粘连强度下降 [43-44]。在断裂形式方面，此次研究中 C-Root BP 组、iRoot BP Plus 组均以混合型为主要断裂形式，可能是因为 C-Root BP 和 iRoot BP Plus 材料固化后的体积较稳定且固化收缩力相似，因此断裂形式也基本一致 [45]。在临床应用中，对于前磨牙、磨牙这类承担主要咀嚼力的患牙，C-Root BP 材料能提供更高的粘连强度，有助于降低充填材料脱落的风险。而 iRoot BP Plus 则适用于前牙或低负荷区域，该材料表面光滑，虽然粘连强度低，但可减少对颌牙的磨损。

综上所述，采用 C-Root BP 材料进行根尖倒充填的根尖封闭效果与 iRoot BP Plus 材料相似，并且断裂形式基本一致，但 C-Root BP 材料可提高抗菌效果和粘连强度；同时研究发现 C-Root BP 的硅酸锶成分是其具有抗菌活性和抗力强度的关键机制，这为临床材料的选择提供了全新视角。然而，该研究仅为体外实验，

未模拟口腔动态环境 (如唾液成分、咀嚼力) 对材料性能产生的影响，也未对材料的长期稳定性和生物相容性进行评估。针对上述不足不之处，未来研究可引入唾液成分、咀嚼力等因素，更全面地评估材料的性能；同时开展大规模的长期随访研究，以便更好地了解材料的根尖封闭性、抗力强度的持久性以及对根尖周组织的长期影响，为临床应用提供更可靠的依据。

作者贡献：周丽静负责实验设计，王双、向谨姣负责实验实施，王会超负责实验评估，柴雪姣负责资料收集，周丽静成文，周丽静审校。

利益冲突：文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明：这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名－非商业性使用－相同方式共享 4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让：文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范：该文章撰写遵守了国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。文章经小同行外审专家双盲外审，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

[1] SEBRING D, BUHLIN K, LUND H, et al. Endodontic Inflammatory Disease and Future Cardiovascular Events and Mortality:A Report from the PAROKRANK Study. J Endod. 2024;50(8):1073-1081.
[2] MOHAMED KHAZIN S, ABDULLAH D, LIEW AKC, et al. Pulpal and periapical disease in crowned vital teeth:A prospective matched cohort study. Aust Endod J. 2022;48(1):8-19.
[3] CHAUDHARI PS, CHANDAK MG, JAISWAL AA, et al. Comparative evaluation of push-out bond strength of three retrograde filling materials in teeth with root apices resected at 90°:Mineral trioxide aggregate Angelus, Zirconomer, and Bioactive bone cement. J Conserv Dent. 2022;25(6):605-609.
[4] VERGAÇAS JHN, DE LIMA CO, BARBOSA AFA, et al. Marginal gaps and voids of three root-end filling materials:A microcomputed tomographic study. Microsc Res Tech. 2022;85(2):617-622.
[5] S A, AZHAR S, MANAN R, et al. Comparison of the Microleakages of Four Root-End Filling Materials: An In Vitro Study. Cureus. 2023;15(6):e40461.
[6] 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.
[7] CHAO YC, CHEN PH, SU WS, et al. Effectiveness of different root-end filling materials in modern surgical endodontic treatment:A systematic review and network meta-analysis. J Dent Sci. 2022;17(4):1731-1743.
[8] ZHOU G, ZHAO Y, CAI L, et al. Cytotoxicity and cell migration evaluation of a strontium silicate-based root canal sealer on stem cells from rat apical papilla:an in vitro study. BMC Oral Health. 2024;24(1):1023.
[9] DONG X, SU Q, LI W, et al. The outcome of combined use of iRoot BP Plus and iRoot SP for root-end filling in endodontic microsurgery:a randomized controlled trial. Clin Oral Investig. 2024;28(3):188.
[10] ZHOU W, ZHENG Q, TAN X, et al. Comparison of Mineral Trioxide Aggregate and iRoot BP Plus Root Repair Material as Root-end Filling Materials in Endodontic Microsurgery:A Prospective Randomized Controlled Study. J Endod. 2017;43(1):1-6.
[11] 王冬梅 , 沈嵩 , 高学军 . 根管细菌渗漏体外模型的建立 [J]. 牙体牙髓牙周病学杂志 ,2006,16(5):250-253.
[12] 任颖超 , 孔祥红 , 何苗苗 , 等 . 根管封闭剂 iRoot SP 和 AH Plus 与牙本质粘接强度的体外研究 [J]. 口腔医学研究 ,2022,38(10):936-940.
[13] JUNIOR LR, BAROUDI K, BARROSO LS, et al. Bond strength of self-adhesive resin cement to dentin using different adhesion protocols. J Clin Exp Dent. 2022;14(1):e35-e39.
[14] SHIMIZU K, SATOH T, SHINKAI K. Evaluation of Restorative Techniques for Vertically Fractured Roots. Materials (Basel). 2021;14(9):2099.
[15] KUNAM D, BODE Y, NARRA PM, et al. Comparative evaluation of apical microleakage of mineral trioxide aggregate, Biodentine, and Bio-C Repair as root-end filling materials using dye extraction method:An in vitro study. J Conserv Dent Endod. 2024;27(12):1305-1309.
[16] AKHTAR H, NAZ F, HASAN A, et al. Exploring the Most Effective Apical Seal for Contemporary Bioceramic and Conventional Endodontic Sealers Using Three Obturation Techniques. Medicina (Kaunas). 2023;59(3):567.
[17] WANG YH, LIU SY, DONG YM. In vitro evaluation of the impact of a bioceramic root canal sealer on the mechanical properties of tooth roots. J Dent Sci. 2024;19(3):1734-1740.
[18] WANG L, REN S, SUN X, et al. Six-year clinical evaluation of iRoot BP Plus as apical barrier in permanent teeth of periapical periodontitis. Aust Endod J. 2024;50(1):115-122.
[19] ORTEGA MA, RIOS L, FRAILE-MARTINEZ O, et al. Bioceramic versus traditional biomaterials for endodontic sealers according to the ideal properties. Histol Histopathol. 2024;39(3):279-292.
[20] HE X, LIU K, ZHANG Z, et al. Assessment of Physical Properties, Obturation Quality, and Cytocompatibility/Osteogenic Potential of KP-Root SP: A New Calcium Silicate-based Bio-ceramic Sealer. J Endod.2025;51(6):768-780.
[21] 王群 , 黄念 , 张平 , 等 .Iroot BP 在原发性下颌磨牙发生不可逆性牙髓炎牙髓切断术中的应用效果 [J]. 中国医师杂志 ,2024,26(9):1390-1393.
[22] ZAMPARINI F, PRATI C, TADDEI P, et al. Chemical-Physical Properties and Bioactivity of New Premixed Calcium Silicate-Bioceramic Root Canal Sealers. Int J Mol Sci. 2022;23(22):13914.
[23] 许明明 , 麦天倩 , 殷亮亮 , 等 .iRoot BP 与 Dycal 盖髓剂联合三种不同垫底材料对树脂材料粘接强度及微渗漏的影响 [J]. 现代口腔医学杂志 ,2023,37(3):155-160.
[24] BADAWY RE, MOHAMED DA. Evaluation of new bioceramic endodontic sealers:An in vitro study. Dent Med Probl. 2022;59(1):85-92.
[25] DONG X, XIE Q, XU X. In vitro evaluation of the sealing ability of combined use of iRoot BP Plus and iRoot SP for root-end filling. Clin Oral Investig. 2023;27(6):2969-2977.
[26] CHEN X, ZHANG H, ZHONG J, et al. Retraction Note:Comparison of indirect pulp treatment and iRoot BP Plus pulpotomy in primary teeth with extremely deep caries:a prospective randomized trial. Clin Oral Investig. 2022;26(4):3793.
[27] HUANG X, GE X, FU W, et al. Effects of Novel Nanoparticulate Bioceramic Endodontic Material on Human Dental Pulp Stem Cells In Vitro. Int Dent J. 2024;74(3):482-491.
[28] 李立 , 刘佳 , 尹仕海 , 等 .iRoot 用于根尖倒充填封闭性的体外研究 [J]. 重庆医学 ,2017,46(22):3097-3100.
[29] 李娜 , 李祥伟 . 根管系统封闭性的影响因素及其检测方法 [J]. 口腔医学研究 ,2021,37(3):200-203.
[30] MINICH DJ, MARROW JC, SADAR MJ, et al. High incidence of complications following intraoral extractions and treatment of periapical infections in the management of domestic rabbit (Oryctolagus cuniculus) dental disease (51 cases). J Am Vet Med Assoc. 2024;263(2):193-198.
[31] ABDALLA MM, LUNG CYK, BIJLE MN, et al. Physicochemical Properties and Inductive Effect of Calcium Strontium Silicate on the Differentiation of Human Dental Pulp Stem Cells for Vital Pulp Therapies:An In Vitro Study. Materials (Basel). 2022;15(17):5854.
[32] PELEPENKO LE, MARCIANO MA, FRANCATI TM, et al. Can strontium replace calcium in bioactive materials for dental applications. J Biomed Mater Res A. 2022;110(12):1892-1911.
[33] RUBAIYA Y,DOBLE M. Dentin remineralizing ability and enhanced antibacterial activity of strontium and hydroxyl ion co-releasing radiopaque hydroxyapatite cement. J Mater Sci Mater Med. 2017; 28(6):95.
[34] 黄子璇 , 王小聪 , 乐曼妮 , 等 .MTA 和三种改良盖髓剂对人牙髓干细胞增殖及分化为成牙本质细胞的促进作用观察 [J]. 山东医药 ,2024,64(30):44-49.
[35] YANG X, XIA L, CHEN Y, et al. Cytotoxicity and Bone Biocompatibility of the C-Root SP Experimental Root Canal Sealer. Aust Endod J. 2025;51(1):124-132.
[36] 石力吉 , 袁煜松 , 李丽洁 .iRoot BP plus 和 MTA 材料用于牙髓血运重建术在治疗年轻恒牙根尖感染的临床比较疗效研究 [J]. 中国医学装备 ,2023,20(12):130-133.
[37] DONG X, SU Q, LI W, et al. The outcome of combined use of iRoot BP Plus and iRoot SP for root-end filling in endodontic microsurgery:a randomized controlled trial. Clin Oral Investig. 2024;28(3):188.
[38] ZAMPARINI F, PRATI C, TADDEI P, et al. Chemical-Physical Properties and Bioactivity of New Premixed Calcium Silicate-Bioceramic Root Canal Sealers. Int J Mol Sci. 2022;23(22):13914.
[39] 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..
[40] YUAN X, WU T, LU T, et al. Effects of Zinc and Strontium Doping on In Vitro Osteogenesis and Angiogenesis of Calcium Silicate/Calcium Phosphate Cement. ACS Biomater Sci Eng. 2023;9(10):5761-5771.
[41] ZHANG S, DONG Y, CHEN M, et al. Recent developments in strontium-based biocomposites for bone regeneration. J Artif Organs. 2020;23(3):191-202.
[42] ZHANG L, YIN L, WU J, et al. Clinical influencing factors of vital pulp therapy on pulpitis permanent teeth with 2 calcium silicate-based materials:A randomized clinical trial. Medicine (Baltimore). 2024;103(18):e38015.
[43] PELOZO LL, SOUZA-GABRIEL AE, ALVES DOS SANTOS GN, et al. Canal Drying Protocols to Use with Calcium Silicate-based Sealer:Effect on Bond Strength and Adhesive Interface. J Endod. 2023;49(9):1154-1160.
[44] HU X, LIANG Z, WANG Q, et al. A retrospective study of iRoot BP Plus pulpotomy compared with Vitapex pulpectomy for irreversible pulpitis of primary molars with the presence of coronal pulp tissue. Int J Paediatr Dent. 2023;33(2):216-226.
[45] KWAK SW, KOO J, SONG M, et al. Physicochemical Properties and Biocompatibility of Various Bioceramic Root Canal Sealers:In Vitro Study. J Endod. 2023;49(7):871-879.

(责任编辑：关伟，邱杨，张楠)