

3D打印图案化微结构氧化锆桩粘接性能及弯曲强度的研究

江琦^{1,2,3,4} 尹路^{1,3,4}

1. 厦门医学院附属口腔医院, 厦门市口腔疾病诊疗重点实验室, 厦门 361003;
2. 仓山区金山街道第二社区卫生服务中心 (仓山区总医院金山街道第二分院), 福州 350007;
3. 厦门医学院, 厦门 361023;
4. 口腔生物材料福建省高校工程研究中心, 厦门医学院, 厦门 361023

[摘要] **目的** 使用集成化编程软件对3D打印氧化锆桩表面进行图案化微结构处理, 研究图案化微结构处理对氧化锆桩粘接性能及弯曲强度的影响。**方法** 以3号3M纤维桩为模型, 使用编程软件HyperMill 2021由桩顶延伸至桩底, 在桩表面设计直线型排溢沟, 共设计5组图案化微结构处理氧化锆桩, 另设3号3M纤维桩为对照组。然后进行微推出试验和三点弯曲试验, 测量不同图案化微结构处理氧化锆桩的粘接强度和弯曲强度; 体视显微镜分析粘接失效模式。**结果** 图案化微结构处理显著增加了氧化锆桩的粘接强度 ($P<0.05$), 根颈部、根中部及根尖部的粘接强度范围分别为 $9.80\text{ MPa}\pm 0.64\text{ MPa}\sim 26.49\text{ MPa}\pm 0.94\text{ MPa}$, $9.26\text{ MPa}\pm 1.08\text{ MPa}\sim 18.51\text{ MPa}\pm 0.93\text{ MPa}$, $6.74\text{ MPa}\pm 0.31\text{ MPa}\sim 13.00\text{ MPa}\pm 0.71\text{ MPa}$ 。图案化微结构处理降低了氧化锆桩的弯曲强度 ($P<0.05$), 弯曲强度范围为 $378.3\text{ MPa}\pm 24.18\text{ MPa}\sim 587.4\text{ MPa}\pm 36.60\text{ MPa}$ 。图案化微结构处理的氧化锆桩粘接失效模式以混合失效为主。**结论** 应用3D打印技术可制备出具有良好弯曲强度和粘接性能的表面图案化氧化锆桩, 可满足临床对于个性化桩核设计的需求。

[关键词] 3D打印; 氧化锆桩; 图案化处理; 粘接强度; 弯曲强度

[中图分类号] R783.2 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025.2025119



本文链接 开放科学标识码

Adhesive property and flexural strength of patterned microstructured zirconia posts fabricated by 3D printing

Jiang Qi^{1,2,3,4}, Yin Lu^{1,3,4}

1. Affiliated Stomatological Hospital of Xiamen Medical University, Xiamen Key Laboratory of Oral Disease Diagnosis and Treatment, Xiamen 361003, China; 2. Jinshan Second Community Healthcare Center of Cangshan District (Jinshan Second Branch of Cangshan District General Hospital), Fuzhou 350007, China; 3. Xiamen Medical University, Xiamen 361023, China; 4. Oral Biomaterials Engineering Research Center of Fujian University, Xiamen Medical University, Xiamen 361023, China

Supported by: Fujian Medical Innovation Project (2022CXB022); Xiamen Science and Technology Project (3502Z2022-4035)

Correspondence: Yin Lu, E-mail: 516021929@qq.com

[Abstract] **Objective** This study aims to design surface patterns using integrated programming software on zirconia posts fabricated through 3D printing. **Methods** A type 3 3M fiber post was built as a research model, and HyperMill

2021 software was applied to design linear overflow grooves extending from the apex to the base on the post surface. The design parameters included the number, depth, and width of the overflow grooves. Five groups of patterned microstructured zirconia posts were designed,

[收稿日期] 2025-03-28

[基金项目] 福建省医学创新课题 (2022CXB022); 厦门市科技计划项目 (3502Z20224035)

[第一作者] 江琦, 医师, 硕士, E-mail: 807764508@qq.com

[通信作者] 尹路, 副教授, 博士, E-mail: 516021929@qq.com

with the 3M fiber post as the control group. Micro-push-out and three-point bending tests were used to measure the bonding and flexural strengths of the patterned microstructured zirconia posts. The failure mode of bonding was analyzed by using a stereomicroscope. **Results** The patterned microstructure significantly increased the bond strength of zirconia posts ($P<0.05$). Bonding strength ranged from 9.80 MPa \pm 0.64 MPa to 26.49 MPa \pm 0.94 MPa at the base of the root, from 9.26 MPa \pm 1.08 MPa to 18.51 MPa \pm 0.93 MPa at the center of the root, and from 6.74 MPa \pm 0.31 MPa to 13.00 MPa \pm 0.71 MPa at the apex of the root. The implementation of patterned microstructures reduced the flexural strength of the zirconia post ($P<0.05$), and flexural strength ranged from 378.3 MPa \pm 24.18 MPa to 587.4 MPa \pm 36.60 MPa. The failure mode of zirconia post adhesions treated with patterned microstructures was mainly mixed failure. **Conclusion** Patterned microstructured zirconia posts with improved flexural strength and adhesive properties could be produced by using 3D printing. The bonding and flexural strengths of the patterned zirconia posts can meet the clinical requirements for custom post-and-core design.

[Key words] 3D printing; zirconia post; patterned treatment; bonding strength; flexural strength

重度龋坏、牙外伤等导致牙体硬组织大量丢失的牙体缺损通常需要桩核修复来提供固位并提高抗折性^[1]。因此,能延长修复体寿命并提供美学优势的非金属桩核系统日益成为研究重点。氧化锆材料被广泛应用于口腔修复,与其他陶瓷材料相比,其力学性能优越、美观度高,具有足够的X线阻射性和抗微生物黏附^[2]等优点,是目前临床经常使用的个性化桩核材料。氧化锆桩弹性模量接近于铸造金属桩,可在变形发生前承受较大的咬合力,其优越的力学和美观性能使其成为一种很有前途的桩核材料,可能成为玻璃纤维桩核系统的替代选择。但由于氧化锆结构完全由晶相构成,不存在玻璃相,利用传统的氢氟酸酸蚀、硅烷化等表面处理并不能改善表面形貌,氧化锆桩难以获得理想的粘接效果^[3]。

目前关于氧化锆桩粘接相关研究主要集中在氧化锆表面的预处理,如热浓硫酸酸蚀^[4],使用含有不同浓度的10-甲基丙烯酰氧癸二氢磷酸酯(10-methacryloyloxydecyl dihydrogen, 10-MDP)的通用粘接剂^[5]。引入图案化微结构处理是另一种改善桩表面与粘接剂之间结合的方法。有学者^[6]利用3D打印技术成功设计并制作了一种附在氧化锆粘接面的六边形微结构,该结构增加了粘接剂与氧化锆的粘接接触面积,证实利用3D打印技术修饰氧化锆表面是提高粘接强度的一种有效方法。如今打印技术和生物多孔材料的发展,可为桩核材料的发展提供新思路。目前现有文献中尚缺乏数据表明使用相同的材料制造的桩是否可以通过图案化处理来表现出不同的力学行为及粘接性能。本研究旨在研究3D打印图案化微结构处理对氧化锆桩的粘接性能及弯曲强度的影响。

1 材料和方法

1.1 主要的材料和设备

氧化锆墨水(C800, XJET公司,瑞士);牙胶尖(0625#、0430#)、机扩系统(X SMART)(Densply公司,美国);3%次氯酸消毒液[朗力生物医药(武汉)有限公司];17%EDTA(MD-Chelcream, META BIOMED公司,韩国);0.9%氯化钠注射液(湖北兴华制药有限公司);麝香草酚粉末(AR, 佳惠,天津市天新精细化工开发中心);吸潮纸尖(25#, GAPADENT, 天津加发医疗器械有限公司);根管充填糊剂(iroot SP, 加拿大);3M通用粘接剂(八代)、树脂水门汀(RelyX U200)、纤维桩(3号)、纤维桩桩道预备钻(1~3#)(3M公司,美国);热牙胶根充系统(SuperEndo, B&L公司,美国);金刚砂车针(B系列、F系列, MANI公司,日本)。

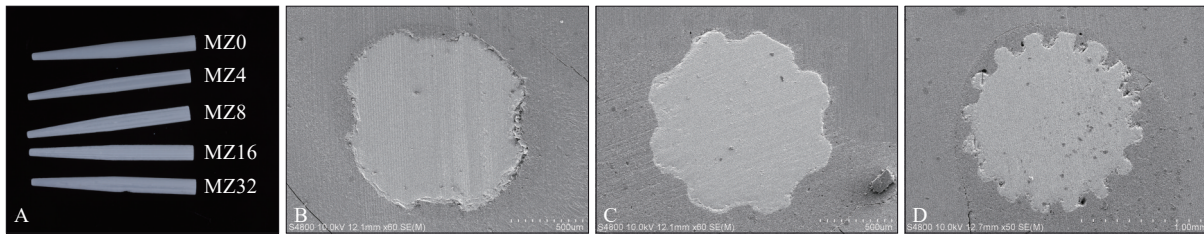
机备镍钛针(Protaper, Densply公司,美国);电子数显游标卡尺(0~150 mm, 上海工具厂有限公司);体式显微镜(SMZ745T, Nikon公司,日本);喷墨打印机(PGJ180, 杭州泰利斯医疗科技有限公司);口腔扫描仪(E4, 3Shape公司,丹麦);精密切割机(ISO Met 5000, Buehler公司,美国);扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(VK-S250)、激光扫描共聚焦显微镜(VK-X250K)(Keyence公司,日本);万能力学实验材料机(68FM-100和4466, LNSTRO公司,美国);力学试验加载头(陕西昭磊博机电科技有限公司加工制作)。

1.2 图案化微结构氧化锆桩的设计

将3号3M纤维桩置于3Shape仓扫描仪,获得3

号3M纤维桩STL文件，使用编程软件HyperMill 2021由桩顶延伸至桩底，在桩表面设计直线型排溢沟，排溢沟的数量为0、4、8、16、32，深度为200 μm，沟的宽度及间距为面周长的1/2N（N为排溢沟个数），排溢沟的深度及宽度随着桩体锥度的减小而减小。以直线型排溢沟个数为命名方式，

共设计5组图案化氧化锆桩，分别为MZ0、MZ4、MZ8、MZ16、MZ32。将3D打印获得的氧化锆生胚样品在高温炉中进行脱脂和烧结。催化脱脂和烧结工艺的最高温度分别为600 °C和1 450 °C，SEM下观察截面（图1）。



A: 氧化锆桩样品；B~D: 分别为MZ4、MZ8、MZ16的氧化锆桩截面。

图 1 图案化微结构处理的氧化锆桩样品及SEM下截面图

Fig 1 Patterned microstructure-treated zirconia post sample and its cross-sectional SEM image

1.3 离体牙收集及试件制备

收集2024年2月1日—2025年2月1日于厦门医学院附属口腔医院因正畸或牙周病拔除的下颌前磨牙80颗。纳入标准：仅有单根且为直根管（排除根管弯曲大于10°的离体牙）；无根龋且根尖发育成熟；无牙体折裂及根管治疗；数显游标卡尺测量离体牙唇舌径为5.5~6.5 mm，近远中径为6.5~7.5 mm。存储在0.1%麝香草酚溶液中。于釉牙骨质界上方2 mm截冠后常规进行根向预备根管及充填至0625#或0430#，流体树脂封闭根管口，常温下置于氯化钠溶液1周。本研究经厦门医学院附属口腔医院伦理学审核批准（KS20240-527001）。

按厂家说明书推荐方法使用3M纤维桩道预备钻进行桩道预备至3号，根尖保留5 mm牙胶。将72颗离体牙随机分为6组进行编号，分别为对照组（3号3M纤维桩）、MZ0、MZ4、MZ8、MZ16、MZ32组（n=12）。干燥根管，使用RelyX U200粘接，垂直于桩的方向下就位，形成均匀的树脂粘接层，短暂光固化5 s后探针轻轻去除边缘多余粘接剂，再光固化40 s，确保粘接剂聚合。用自凝树脂将离体牙包埋至边长为20 mm的正方体模具内，桩长轴与模具长轴平行，为避免树脂聚合过程中产生的热量导致离体牙脱水，将树脂块放入水中冷却静置。静置24 h后固定于精密切割机进行切割，各取根尖部、根中部、根颈部1 mm切片，要求切片粘接层无气泡、空隙。

1.4 微推出试验

使用0.01 mm精度的电子数显游标卡尺测量切

片冠向半径、根向半径和切片厚度。在500 N传感元件力学万能实验材料机上使用定制夹具固定样品切片，直径0.8 mm（小于桩直径）的定制金属推头以0.5 mm/min的速度于桩中心进行推出试验，直到脱粘接，记录使桩位移的最大载荷（F）。粘接强度（MPa）=F/[π(r+R)×h]，R为冠向半径（mm），r为根向半径（mm），h为切片厚度（mm）。使用体视显微镜在30~60×放大倍数下分析氧化锆桩根颈部切片的粘接失效模式。失效模式分为：氧化锆桩与树脂水门汀的粘接失效；牙本质与树脂水门汀的粘接失效；树脂水门汀内的黏聚失效；混合失效（包含任意2种失效模式）。

1.5 三点弯曲试验

在万能实验材料机上进行三点弯曲实验测试。实验装置符合ISO 6872: 2024^[7]标准。将试样平稳地放置于2个支撑辊上，确保其中心与加载头（尖端截面直径3 mm）对中，加载头以0.5 mm/min速率向下移动，对试样中心施加载荷，直至其断裂。记录桩样品直径（d）、断裂载荷（F），根据公式计算桩样品的弯曲强度（σ），σ（MPa）=8FL/(πd³)^[8]，L为跨度距离（10.0 mm）。

1.6 统计学分析

使用HyperMill 2021软件测算MZ4、MZ8、MZ16、MZ32图案化处理后增加的粘接表面积；使用GraphPadPrism 9.5、EXCEL软件绘制微推出粘接强度、弯曲强度与增加的粘接表面积关系曲线；使用SPSS 27.0统计软件进行数据处理，对计量资料进行正态性检验和方差齐性检验。数据以均值±标准差表示，数据分析采用单因素方差分析

和 Tukey HSD 检验。各组粘接失效模式差异分析采用卡方检验。检验水平 $\alpha=0.05$ 。样本含量计算使用 G*power 软件, 根据预实验结果获得均值差和标准差计算效应量 f 。组数为 6, 设定 0.8 的统计功效和 95% 的置信区间, 计算样本量 $n=12$ 。

2 结果

2.1 图案化处理氧化锆桩的粘接强度

不同处理组在根颈部、根中部及根尖部的粘接强度分布情况见表 1。在根颈部, MZ4、MZ8 和 MZ16 组粘接强度显著高于对照组 ($P<0.05$), 而对照组粘接强度虽高于 MZ0 与 MZ32 组, 但组间差异无统计学意义 ($P>0.05$), 且 MZ0 与 MZ32 组间差异也无统计学意义 ($P>0.05$)。在根中部, MZ4、MZ8、MZ16 组的粘接强度较对照组提升显著 ($P<0.0001$), 而对照组仍优于 MZ0 组 ($P<0.05$)。在根尖部, MZ4、MZ8、MZ16 组的粘接强度同样显著高于对照组 ($P<0.0001$), 且对照组显著优于 MZ0 与 MZ32 组 ($P<0.05$)。

2.2 粘接失效模式

各组粘接失效模式的分布特征见图 2。统计学分析表明, 图案化微结构处理对氧化锆桩的失效模式具有显著调控作用 ($P<0.001$)。值得注意的

是, 随着粘接强度的提高, 各组内混合失效比例呈现显著上升趋势。

表 1 各组的微推出粘接强度

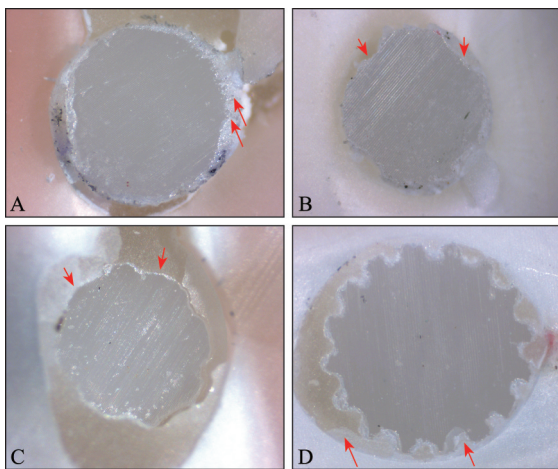
Tab 1 Micro-push-out bond strength of different groups MPa

组别	根颈部	根中部	根尖部
对照组	13.05±0.32	11.18±0.62	9.10±0.39
MZ0	9.94±0.58	8.79±0.63*	6.68±0.45*
MZ4	18.86±0.96*	15.81±0.47**	10.95±0.36**
MZ8	22.04±1.59*	17.67±0.61**	12.06±0.60**
MZ16	26.49±0.94*	18.51±0.93**	13.00±0.71**
MZ32	9.80±0.64	9.26±1.08	6.74±0.31*

注: 与对照组相比, * $P<0.05$, ** $P<0.0001$ 。

2.3 图案化处理氧化锆桩的弯曲强度

各组的弯曲强度见图 3。MZ0、MZ4、MZ8、MZ16、MZ32 和对照组的弯曲强度分别为 (931.1±40.28)、(587.4±36.60)、(476.6±23.07)、(398.2±36.6)、(378.3±24.18)、(485.80±29.56) MPa。MZ0 组弯曲强度显著高于对照组 ($P<0.01$); 对照组与 MZ8、MZ16、MZ32 组间差异无统计学意义 ($P>0.05$)。MZ0 与 MZ4、MZ8、MZ16、MZ32 组间差异均有统计学意义 ($P<0.05$)。MZ4 弯曲强度大于对照组 ($P<0.05$)。



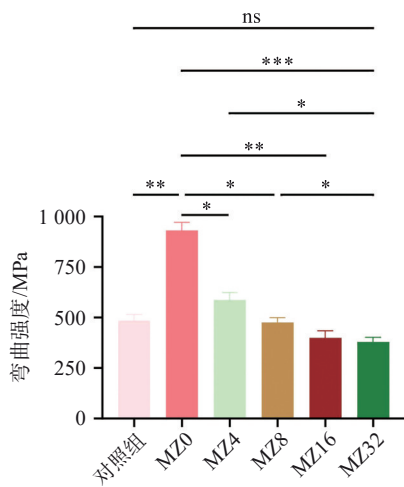
A~D: 图案化氧化锆桩推出标本, 分别为 MZ0 氧化锆与树脂水门汀的粘性失效、MZ4 混合失效、MZ8 混合失效、MZ16 混合失效 (箭头示); E: 各组断裂模式, 不同字母标注表示组间差异具有统计学意义。

图 2 代表性的图案化微结构氧化锆桩推出标本及各组断裂模式

Fig 2 Representative specimens after the micro-push-out test and the fracture modes of each group

使用 GraphPadPrism 9.5、EXCEL 软件绘制图案化微结构处理氧化锆桩粘接强度、弯曲强度 (Y 轴) 与增加的粘接表面积关系 (X 轴) 曲线 (图 4)。图案化微结构处理可以降低氧化锆桩弯曲强度, 同时增加其粘接强度。但当直线型排溢沟个

数设置为 32 时 (MZ32), 理论上可以增加的表面积为 269.36%, 但生产技术及材料性质的限制造成氧化锆桩表面结构剥脱、塌陷, 造成粘接强度和弯曲强度一同下降。



ns为 $P>0.05$, * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。

图 3 各组的弯曲强度

Fig 3 Flexural strength for each group

3 讨论

氧化锆表面处理的目的是通过增加有效粘接表面积或表面能来提高氧化锆—树脂水门汀之间的微机械固位和化学结合。表面积的增加可以暴露氧化锆表面额外的羟基，增加与树脂水门汀内的化学官能团结合^[9]。结果可见树脂水门汀可完全填充表面微观结构，这是增加粘接表面积的关键。

粗糙的牙本质壁或在根管壁上形成凹陷可以显著增加桩的固位力，然而，这通常涉及去除牙

体组织，可能会影响牙根强度。引入宏观增强固位桩设计是另一种改善桩表面与粘接系统之间嵌合固位力方法。研究^[10]显示，对带有表面设计与无表面设计的不同成品纤维桩进行微推出实验，表面图案化设计的纤维桩获得了更高的粘接强度值。以往对于图案化微结构的设计通常是圆形或方形^[11]。Liu等^[12]在氧化锆瓷块上设计各种表面形状（圆形、三角形、正方形、五角形、六角形），通过体外剪切实验证实表面图案化处理可以有效增加氧化锆与树脂的粘接，但该实验缺乏对实际修复的模拟。为了从临床实际出发，本研究选择直线型排溢沟设计。建立的桩模型对象为3号3M纤维桩（直径1.9 mm）。由于氧化锆材料脆性大，考虑螺旋结构和中空多孔结构易在微结构表面产生应力集中和断裂。在桩的表面图案化处理应有利于应力在根表面均匀分布和粘接剂的排溢^[13]，因此本研究选择的图案化微结构处理为设计直线型排溢沟，在桩模型上设计不同个数（0、4、8、16、32）直线型排溢沟，排溢沟的宽度为曲面周长的1/2N。研究^[14]显示，100~300 μm 桩道粘接间隙为临床接受范围，将排溢沟的深度设置为200 μm，可降低对桩密合度及粘接厚度的影响。排溢沟的宽度及深度随着桩的锥度一同减小，保证结构的均质性。在本实验中，样本打印后未经任何其他表面处理，所有打印组都有相同的制造步骤和脱脂、烧结温度。

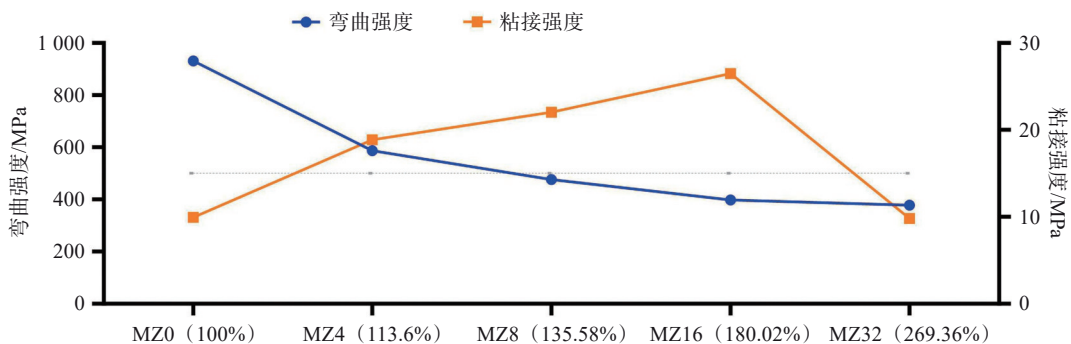


图 4 粘接强度、弯曲强度与氧化锆桩增加表面积之间的关系曲线

Fig 4 Bond strength and flexural strength as a function of the increased surface area of zirconia post

根管系统的特殊解剖结构存在临床操作双重困境—狭窄空间导致的视野受限与湿度控制困难，本研究选用自粘接树脂水门汀以简化粘接流程。微推出实验中如果采用较厚的切片会导致不规则的应力分布^[7]，进一步导致误差增大，1 mm厚的切片可以消除这种限制^[15]。在本研究中使用微推出实验评估根颈部、根中部、根尖部的粘接强度，结果显示MZ16的粘接强度值最大。相较于Zhang

等^[6]报道的正六边形微结构使氧化锆—树脂粘接强度提升55.97%，本研究采用的直线型排溢沟设计实现更显著的强度增幅，图案化微结构处理显著改善了氧化锆桩的粘接性能。经图案化微结构处理的氧化锆桩粘接强度大于对照组同体积模型的3M纤维桩，当直线型排溢沟个数为32时，图案化微结构处理的氧化锆桩粘接强度接近于未处理组，说明此时图案化微结构处理的精准度受到3D打印

技术局限性和氧化锆材料本身特性的限制。当直线型排溢沟个数为4~16时,氧化锆桩的粘接强度随着直线型排溢沟个数增加而增加,但能否应用于临床应进一步探讨其力学性能。

对于齿科材料来说,弯曲强度是最重要的力学性能之一^[16],也是评价氧化锆陶瓷力学性能的常用方法。迄今为止,报告的不同种类氧化锆陶瓷的弯曲强度范围为200~1 400 MPa^[17]。弯曲强度参数也是抗断裂性的决定因素,该数值越高表示样品更抗断裂。弯曲强度取决于实验试样结构,并通过试样所能承受的最高荷载值计算。根据ISO 6872:2024^[18]中推荐的涉及磨牙的单个陶瓷修复体弯曲强度为500 MPa,在MZ4组和MZ8组检测到结果可满足此标准。类似材料的弯曲强度报告的差异可以归因于实验设计、试样制备方法及桩的厚度和形状的差异^[19]。在本实验中,随着直线型排溢沟个数增加,图案化微结构处理组氧化锆桩的弯曲强度下降。在氧化锆桩设计图案化微结构,可产生凹凸不平的氧化锆表面,在增大粘接面积的同时削弱了氧化锆桩的弯曲强度。在基牙上预备固位洞、固位沟等,虽然可以增加有效粘接表面积,但却降低了牙体强度^[20]。对修复体进行图案化微结构处理,在增大粘接强度的同时保存了牙体组织。本实验中,MZ0组的弯曲强度最大,MZ8组与对照组的弯曲强度差异无统计学意义,而MZ4组的弯曲强度值和粘接强度值均大于对照组,可认为4个直线型排溢沟的微结构处理可作为一种改善氧化锆桩性能方式。

目前对于桩材料的理想弹性模量尚有争议。先前的一些研究^[21]建议使用高弹性模量的桩来降低应力值,认为弹性模量高的桩增加了对轴向作用力的阻力,减少了颊舌向的偏转,即减小了对基牙舌侧和颊颈部的压力。另一研究^[22]建议使用弹性模量接近牙本质的桩,与牙本质形成均匀的整体,提高生物力学性能。最近一项体外断裂强度试验显示在可修复断裂的样本数量中氧化锆桩高于纤维桩和聚醚醚酮桩,而氧化锆的弹性模量远高于牙本质^[23],所以氧化锆桩因其美学优势仍具有发展前景。

综上所述,在本实验限定条件下可以得出结论:1)图案化微结构处理显著改善了氧化锆桩的粘接性能并降低了其弯曲强度,可通过控制图案化处理的个数降低其对弯曲强度的削弱。2)当图案化处理为4个或8个直线型排溢沟时,图案化微结构处理氧化锆桩的粘接强度和弯曲强度均大于

3M纤维桩,考虑到对陶瓷修复体的强度需求,4个直线型排溢沟的图案化微结构处理可作为一种改善氧化锆桩性能方式。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Saad KB, Bakry SI, AboElhassan RG. Fracture resistance of endodontically treated teeth, restored with two post-core systems in different post space diameters (*in vitro* study)[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 992.
- [2] Baysal N, Tuğba Kalyoncuoğlu Ü, Ayyıldız S. Mechanical properties and bond strength of additively manufactured and milled dental zirconia: a pilot study[J]. J Prosthodont, 2022, 31(7): 629-634.
- [3] 李斯文,李施施,王艳红,等.不同表面处理对氧化锆陶瓷微观结构和粘接强度影响的研究[J].华西口腔医学杂志,2017,35(1):43-50.
Li SW, Li SS, Wang YH, et al. Effects of different surface modifications on micro-structure and adhesion of zirconia ceramic: an *in vitro* study[J]. West China J Stomatol, 2017, 35(1): 43-50.
- [4] Sokolowski G, Szczesio-Włodarczyk A, Szykowska-Jóźwik MI, et al. The shear bond strength of resin-based luting cement to zirconia ceramics after different surface treatments[J]. Materials (Basel), 2023, 16(15): 5433.
- [5] Grasel R, Santos MJ, Rêgo HC, et al. Effect of resin luting systems and alumina particle air abrasion on bond strength to zirconia[J]. Oper Dent, 2018, 43: 282-290.
- [6] Zhang C, Meng J, Zhang L, et al. Influence of 3D printed surface micro-structures on molding performance and dental bonding properties of zirconia[J]. J Dent, 2024, 144: 1049370.
- [7] Braga RR, Meira JB, Boaro LC, et al. Adhesion to tooth structure: a critical review of "macro" test methods[J]. Dent Mater, 2010, 26(2): e38-e49.
- [8] Hesham M, Hashem A, Hamza F. Effect of different surface treatments of glass fiber posts on their surface roughness and flexure properties[J]. Maced J Med Sci, 2021, 9(D): 229-234.
- [9] Paes PNG, Bastian FL, Jardim PM. The influence of Y-TZP surface treatment on topography and ceramic/resin cement interfacial fracture toughness[J]. Dent Mater, 2017, 33(9): 976-989.
- [10] Binus S, Koch A, Petschelt A, et al. Restoration of endo-

- dontically treated teeth with major hard tissue loss—bond strength of conventionally and adhesively luted fiber-reinforced composite posts[J]. Dent Traumatol, 2013, 29(5): 339-354.
- [11] Ma Q, Ding Q, Zhang L, et al. Surface characteristics and flexural strength of porous-surface designed zirconia manufactured via stereolithography[J]. J Prosthodont, 2023, 32(4): e81-e89.
- [12] Liu L, Zhang J, Zhu L, et al. The effect of surface texture on the bonding performance of zirconia fabricated by nanoparticle jetting additive manufacturing[J]. Ceram Int, 2025, 51(1): 1-8.
- [13] Saritha MK, Paul U, Keswani K, et al. Comparative evaluation of fracture resistance of different post systems [J]. J Int Soc Prev Community Dent, 2017, 7(6): 356-359.
- [14] Kharboutly NA, Allaf M, Kanout S. Three-Dimensional finite element study of endodontically treated maxillary central incisors restored using different post and crown materials[J]. Cureus, 2023, 15(1): e33778.
- [15] Otani A, Amaral M, May LG, et al. A critical evaluation of bond strength tests for the assessment of bonding to Y-TZP[J]. Dent Mater, 2015, 31: 648-656.
- [16] Revilla-León M, Al-Haj Husain N, Ceballos L, et al. Flexural strength and Weibull characteristics of stereolithography additive manufactured versus milled zirconia [J]. J Prosthet Dent, 2021, 125(4): 685-690.
- [17] Zenthöfer A, Schwindling FS, Schmitt C, et al. Strength and reliability of zirconia fabricated by additive manufacturing technology[J]. Dent Mater, 2022, 38(10): 1565-1574.
- [18] ISO. ISO 6872:2024; Dentistry-Ceramic materials[S]. 2024.
- [19] Alonso de la Peña V, Darriba IL, Caserio Valea M, et al. Mechanical properties related to the microstructure of seven different fiber reinforced composite posts[J]. J Adv Prosthodont, 2016, 8(6): 433-438.
- [20] Ağaccioğlu M, Sirin Karaarslan E, Aytac Bal F, et al. Bond strength comparison of a fiber-reinforced composite resin: different dentin conditions and preparation techniques[J]. Microsc Res Tech, 2024, 87(6): 1250-1261.
- [21] Asmussen E, Peutzfeldt A, Sahafi A. Finite element analysis of stresses in endodontically treated, dowel-restored teeth[J]. J Prosthet Dent, 2005, 94(4): 321-329.
- [22] Nakamura T, Ohyama T, Waki T, et al. Stress analysis of endodontically treated anterior teeth restored with different types of post material[J]. Dent Mater J, 2006, 25(1): 145-150.
- [23] Direk A, Tekin S, Khurshid Z. Fracture strength of cad-cam milled polyetheretherketone (PEEK) post-cores vs conventional post-cores; an *in vitro* study[J]. PeerJ, 2024, 12: e18012.

(本文编辑 杜冰)

《人工智能在口腔领域的应用》出版发行

书籍名称：人工智能在口腔领域的应用

原著：Kaan Orhan, Rohan Jagtap

主译：金作林, 翟广涛, 牛丽娜

出版社：人民卫生出版社

内容介绍：近年来人工智能发展迅速，在各个领域中均发挥了重要的作用。口腔行业是处在飞速发展中的行业，各种新技术不断革新，人工智能正在以多种方式改变口腔行业，从提高诊断速度和准确性到治疗精度和疗效。本书籍详细讲述了人工智能的发展现状，对口腔医学各个领域，包括牙体牙髓病学、口腔修复学、口腔正畸学、颌面外科学、牙周学等各个学科及口腔医学教育领域的应用，并对人工智能未来在口腔医学领域可能的应用进行展望。

