

## 牙科修复用可切削树脂渗透陶瓷关键性能及应用的研究进展

胡雨欣<sup>1</sup> 吕广超<sup>1</sup> 马骁<sup>1</sup> 曹姗姗<sup>1</sup> 李秋兰<sup>2</sup> 赵克<sup>2</sup> 张新平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华南理工大学材料科学与工程学院, 广州 510640; <sup>2</sup>中山大学附属口腔医院, 光华口腔医学院, 广东省口腔医学重点实验室, 广东省口腔疾病临床医学研究中心, 广州 510055

通信作者: 张新平, Email: mexzhang@scut.edu.cn

**【摘要】** 树脂渗透陶瓷(PICN)复合材料具有陶瓷的天然牙特性和良好美学性能, 以及树脂的易加工等优点成为广受重视的牙科修复材料。本文综述了PICN的关键性能如力学性能、美学性能、生物相容性和粘接性能, 以及各性能在不同使用环境下变化的研究现状, 并对未来发展趋势进行了展望, 旨在为研发人员进一步优化材料设计以改进性能提供参考, 并为牙科医师临床应用时根据患者个人需求和实际应用场景合理选择与使用PICN材料提供依据。

**【关键词】** 牙科材料; 树脂渗透陶瓷; 力学性能; 美学性能; 生物相容性; 粘接性能

**基金项目:** 国家重点研发计划(2022YFC2410100)

**引用著录格式:** 胡雨欣, 吕广超, 马骁, 等. 牙科修复用可切削树脂渗透陶瓷关键性能及应用的研究进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2025, 19(2):132-138.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.02.008

### Research advancement of the key properties and applications of machinable polymer-infiltrated-ceramic-network (PICN) composites for dental restorations

Hu Yuxin<sup>1</sup>, Lyu Guangchao<sup>1</sup>, Ma Xiao<sup>1</sup>, Cao Shanshan<sup>1</sup>, Li Qiulan<sup>2</sup>, Zhao Ke<sup>2</sup>, Zhang Xinping<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; <sup>2</sup>Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangdong Provincial Clinical Research Center of Oral Diseases, Guangzhou 510055, China

Corresponding author: Zhang Xinping, Email: mexzhang@scut.edu.cn

**【Abstract】** Polymer-infiltrated-ceramic-network (PICN) composites have been given increasing attention as dental restorative materials due to the excellent combination of the mechanical compatibility with natural teeth, the lifelike aesthetic property stemmed from ceramics and the good machinability ascribed to the resin. This article presents a state-of-the-art review on PICN composites regarding their key properties, such as mechanical properties, aesthetic properties,

biocompatibility and adhesive properties, as well as the changes of the above properties under different environment conditions, and finally provides an outlook for their future development trend. The main purpose of this article was to provide valuable instructions for researchers to further optimize the design of material properties, and also to offer a basis for dentists to reasonably select and use PICN composites according to patients' personal preferences and practical use scenarios in clinical applications.

**【Key words】** Dental material; Polymer-infiltrated-ceramic-network; Mechanical property; Aesthetic property; Biocompatibility; Adhesive property

**Fund program:** National Key Research and Development Program of China (2022YFC2410100)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.02.008

由龋齿、牙周病、牙外伤、肿瘤和先天牙畸形引起的牙体缺损、牙列缺损与缺失是常见的牙科问题, 其修复诊疗高度依赖可用的牙科修复材料。树脂渗透陶瓷 (polymer-infiltrated-ceramic-network, PICN) 复合材料是一类将液态树脂渗入多孔陶瓷, 通过加热启动树脂单体聚合制成的陶瓷-树脂复合材料, 结合了陶瓷稳定性高、力学和美学性能佳、生物相容性好, 以及树脂粘接性能好、对颌牙磨损小、易切削等特点, 特别适用于基于椅旁计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM) 技术的缺损或缺失牙体快速修复。与传统树脂基复合材料中陶瓷填料分散于树脂基体中的微观结构不同, PICN 由陶瓷骨架和渗透的树脂构成互穿网状结构, 综合了陶瓷和树脂的性能。例如, PICN 硬度 (1.5 ~ 2.4 GPa) 低于氧化锆 (12.9 ~ 13.1 GPa) 或二硅酸锂玻璃陶瓷 (4.5 ~ 6.0 GPa), 高于复合树脂材料 (0.6 ~ 1 GPa)<sup>[1]</sup>。PICN 制成的修复体咬合力分布更好, 对侧牙列的磨损较低, 特别适用于制成咬合间隙较小的修复体<sup>[2]</sup>。PICN 具有比长石陶瓷更高的弯曲强度, 但弯曲模量较低, 可提高其承受咬合载荷变化的能力<sup>[3]</sup>。但是, 即使 PICN 具有诸多优点, 其应用仍受到一定限制, 例如 PICN 本身虽不会促进细菌生长, 也缺乏足够的抗菌能力<sup>[4]</sup>。为了扩大 PICN 应用范围, 迄今已针对 PICN 性能做了大量表征和评价研究, 本文对 PICN 的关键性能如力学性能、美学性

能、生物相容性和粘接性能,以及各性能在不同使用环境下变化情况进行综述和评估,力图为研发人员进一步优化PICN设计以改进性能提供参考,并为牙科医师更全面地了解PICN的适用性以便根据患者个人需求和实际应用场景来合理选用PICN材料提供依据。

### 一、牙科树脂渗透陶瓷复合材料的性能

牙科修复材料应具有可承受口腔内复杂的载荷变化、保护患者天然牙体组织、易于加工和调整,以及安全无毒等特点,尤其需要在口腔内环境下维持长期稳定性。近年来牙科修复材料不仅具有以上特点,还能够做到与天然牙色泽相近、抗染色能力强、不易老化。以PICN为代表的性能优异的口腔修复材料已在临床应用上取得了较好的修复效果。为深化学理解PICN材料及进一步拓展其应用,有必要将其关键性能特点及目前仍存在的问题进行总结和评述。

1. PICN的力学性能:不同于多晶陶瓷过高的模量和硬度值,PICN具有树脂和陶瓷的双相互穿网状结构,故其力学性能能够与天然牙相匹配,这降低了修复体在口腔中导致牙体折裂和磨损对颌牙的风险。同时,由于引入了树脂,材料的边缘稳定性和可切削性能大大提升,能够实现无需烧结的椅旁快速化修复,从而减少患者的就诊时间。

(1)弯曲强度:弯曲强度是牙科材料力学性能的最重要指标之一,其必须满足咬合力的需求。成年人咬合力平均为22.4~68.3 kg,其中磨牙咬合力高于切牙咬合力<sup>[5]</sup>。商用长石质瓷PICN弯曲强度约为150 MPa<sup>[6]</sup>,高于传统长石质瓷(138 MPa),与全瓷材料如白榴石增强玻璃陶瓷(159 MPa)相近<sup>[7]</sup>,远低于树脂纳米陶瓷材料(190~400 MPa)和二硅酸锂玻璃陶瓷(400~530 MPa)<sup>[8-9]</sup>。PICN弯曲强度较低而不适合修复磨牙<sup>[10]</sup>。

PICN中多孔陶瓷的孔隙率是影响其弯曲强度的一个重要因素,低孔隙率陶瓷骨架可提高PICN弯曲强度<sup>[11]</sup>,因此可调整烧结工艺适当降低陶瓷骨架孔隙率来提高PICN弯曲强度。采用纳米颗粒可降低烧结温度并提高烧结质量,多孔陶瓷的孔隙率低而密度更高<sup>[12]</sup>;同时为保证孔隙的连通性,可采用逐步等温烧结的方法<sup>[13]</sup>。陶瓷成分对PICN弯曲强度也有显著影响;相比商用长石质瓷PICN,氧化锆多孔陶瓷PICN弯曲强度可达346 MPa<sup>[10]</sup>,是商用长石质瓷PICN弯曲强度的近3倍。渗透到多孔陶瓷内的树脂经过高温/高压固化后,由于高压补偿了渗透树脂的聚合收缩使得树脂与陶瓷间界面应力降低,界面结合得到改善;同时高温会恢复单体的流动性,弥补高压带来单体转化率随流动性减弱而降低所导致的PICN力学性能下降<sup>[14]</sup>。

(2)断裂韧性:断裂韧性是评价牙科修复材料临床性能的一项关键指标,它反映材料抵抗裂纹扩展的能力。修复体断裂是间接修复失败的主要原因之一,抗断裂性能评估对修复材料临床耐久性至关重要。采用单边V型切口梁法测得商用PICN断裂韧性为1.5 MPa·m<sup>1/2</sup>,高于长石质瓷(1 MPa·m<sup>1/2</sup>)<sup>[3]</sup>,略低于树脂纳米陶瓷(1.86 MPa·m<sup>1/2</sup>)<sup>[15]</sup>,明显低于二硅酸锂玻璃陶瓷(2.37 MPa·m<sup>1/2</sup>)和氧化钇稳定的氧化锆陶瓷

(4.94 MPa·m<sup>1/2</sup>)<sup>[3]</sup>,显然其断裂韧性需进一步提高。四方氧化锆陶瓷的断裂韧性高于大多数陶瓷材料,包括氧化钇稳定的氧化锆多晶陶瓷(7.5~15.5 MPa·m<sup>1/2</sup>)<sup>[16-17]</sup>,并且在纳米多晶中部分钇稳定的氧化锆能使牙科陶瓷强度和半透明度更高,更抗低温老化<sup>[18-19]</sup>;因此,可在硅酸铝钠中掺杂纳米四方氧化锆颗粒并烧结成多孔陶瓷使四方氧化锆在应力诱导下向单斜氧化锆转变产生相变增韧,经树脂渗透和固化后PICN断裂韧性提高至1.82 MPa·m<sup>1/2</sup><sup>[20]</sup>。

(3)显微硬度:口腔修复材料的显微硬度应与天然牙齿匹配,过高会导致对颌牙的磨损,过低则不耐磨耗而只能作为临时修复体材料。全瓷材料具有高强度、美观性和生物相容性,但其高硬度降低了易加工性;复合树脂材料加工性能好,但低硬度和耐磨性差限制了其应用。PICN独特的双相交叉结构使其硬度适中,兼顾加工性能与耐磨性能。PICN制成的冠修复体表现出优异的抗疲劳性能和抗磨损性能<sup>[21]</sup>,且PICN良好的切削性能可降低修复体厚度<sup>[22]</sup>,易于实现前牙的美学修复。此外,PICN良好的加工性能也使切削工具材料可选用成本较低的碳化钨<sup>[23]</sup>。

PICN显微硬度与陶瓷种类有关。长石质瓷PICN显微硬度约2 GPa<sup>[8,15]</sup>,低于天然牙釉质(3.2~3.7 GPa)<sup>[24]</sup>;二氧化硅PICN硬度为3.8 GPa<sup>[13]</sup>,与天然牙釉质硬度相当<sup>[25]</sup>;由于陶瓷基体中具有弯曲强度超过1 000 MPa<sup>[26-27]</sup>的钇稳定的四方多晶氧化锆,氧化锆PICN显微硬度可达4.3 GPa<sup>[28]</sup>。氧化锆PICN是应用前景很好的牙科修复材料,但高硬度会导致对颌牙磨损。在氧化锆多孔陶瓷表面制备类牙釉质结构的氟磷灰石层并经树脂渗透和固化后制得PICN,可保持较高刚度(杨氏模量为37.4 GPa)的同时降低表面硬度(1.79 GPa)<sup>[29]</sup>。

2. PICN的美学性能:随着人们对牙齿美观需求的提高,人们逐渐将齿科美学修复作为追求自信笑容的重要手段。修复材料的美学性能最直接影响修复体的美学修复效果。PICN作为一种陶瓷含量较高的陶瓷-树脂复合材料,在保留陶瓷光学性能和化学稳定性优良特点的同时,又因含一定量的树脂具有良好的可切削性能,能够较大程度保留患者本体牙,从而提供更为自然的美学效果。

(1)光学性能:牙科修复材料的光学性能是衡量修复体美学性能的一个重要指标,其主要体现在修复材料的颜色、半透性、乳光性和荧光性等。对比PICN与全瓷材料(氧化锆陶瓷、高透二硅酸锂陶瓷、高透氧化锆增强二硅酸锂陶瓷、预烧结氧化锆增强二硅酸锂陶瓷)的光学性能可发现,PICN的半透性值(16.46)高于氧化锆陶瓷(10.87~11.13),低于高透氧化锆增强二硅酸锂陶瓷(18.14),而乳光性值(5.43)明显低于全瓷材料(5.45~12.36)<sup>[30]</sup>。PICN较低的乳光性限制了其遮色能力,故有必要开发乳光性与天然牙釉质相似的PICN。PICN的厚度对其颜色和半透性也有影响,厚度增加时其亮度和色度值随之增加,但色调不变,而半透性随厚度增加而减小<sup>[31]</sup>。

天然牙的光学性能具有一定的梯度特性,不同牙齿的不同区域之间存在明显的颜色和半透性差异。希望PICN具有

这种梯度特性而获得美观的牙齿修复效果。树脂基质中少量无机物的添加可以显著改变修复材料的颜色,如氧化铁和羟基氧化铁的掺杂可使复合树脂呈红色或黄色<sup>[32]</sup>;制备PICN时加入氧化铝、氧化锆或二氧化钛可降低材料的半透性<sup>[33-34]</sup>。有研究制备了力学性能和光学性能呈梯度分布且具有仿生效果的PICN<sup>[1]</sup>。

(2)颜色稳定性:修复体在口腔内的颜色和表面性质受口腔环境的影响。由于PICN中不吸湿的陶瓷相呈网状分布且含量较高<sup>[35]</sup>,模拟二硅酸锂玻璃陶瓷、树脂纳米陶瓷和PICN的正常老化过程并分别测定其颜色变化的结果表明<sup>[34]</sup>,老化后PICN颜色变化( $\Delta E$ )较小( $\Delta E=0.29$ ),与全瓷材料颜色稳定性相当,远低于树脂纳米陶瓷( $\Delta E=2.45$ )。

酸性有色溶液如可乐、红酒、橙汁等对陶瓷-树脂复合材料的颜色和表面粗糙度均会产生影响<sup>[36-37]</sup>。PICN中较高含量的陶瓷和吸水性更低的树脂成分使其在有色溶液中较树脂纳米陶瓷的颜色稳定性更好。树脂纳米陶瓷和PICN材料在咖啡中浸泡时,前者的颜色变化较大( $\Delta E=2.09 \sim 2.45$ ),而PICN颜色变化较小( $\Delta E < 1.8$ )<sup>[34]</sup>。此外,PICN在其他有色溶液如葡萄汁中颜色的变化也小于其他陶瓷-树脂复合材料<sup>[35]</sup>。

作为快捷口腔清洁的漱口水具有改善口腔异味、抑制细菌和防蛀等功能。但部分漱口水的的使用可能改变修复体的颜色。须考虑PICN经漱口水老化后的状态以便于牙科医师根据患者习惯选用PICN材料。由于陶瓷和树脂的结合状态不同,虽然树脂纳米陶瓷和PICN都含有相较于全瓷材料更容易降解的树脂基体,但是研究表明PICN的互穿网状结构使其颜色更易受美白漱口水中增白成分的影响<sup>[38]</sup>。使用传统漱口水模拟漱口后PICN的颜色变化( $\Delta E=0.6$ )与树脂纳米陶瓷( $\Delta E=0.5$ )近似,略高于全瓷材料( $\Delta E=0.2 \sim 0.7$ );而用美白漱口水模拟漱口后PICN的颜色变化( $\Delta E=1.0$ )高于树脂纳米陶瓷,与全瓷材料( $\Delta E=0.7 \sim 1.1$ )近似<sup>[39]</sup>。

陶瓷的稳定性使其不易受紫外线影响,经紫外线照射后颜色变化更均匀,因此修复材料在紫外线下的颜色稳定性受内部陶瓷含量的影响。各修复材料中陶瓷含量不同,树脂纳米陶瓷中陶瓷占比71%~80%,PICN中陶瓷占比86%,长石质瓷和氧化锆增强二硅酸锂玻璃陶瓷等为全瓷材料<sup>[6,40]</sup>。对比这几种CAD/CAM修复材料经紫外线老化后颜色变化的结果发现<sup>[41]</sup>,PICN颜色受紫外线的影响( $\Delta E=0.59 \sim 0.66$ )略高于长石质瓷( $\Delta E=0.31 \sim 0.34$ ),与氧化锆增强二硅酸锂玻璃陶瓷( $\Delta E=0.49 \sim 0.69$ )相近,而远低于树脂纳米陶瓷( $\Delta E=2.30 \sim 3.21$ )。

3. PICN的生物相容性:齿科修复材料的生物相容性直接关系到修复体的临床修复效果,进而影响患者健康。对修复材料生物相容性的评价主要围绕材料的细胞毒性、过敏源性和长期稳定性展开。PICN对细胞形态、细胞增殖、细胞外基质合成不产生影响,无细胞毒性<sup>[42]</sup>,生物相容性良好。此外,由于PICN制备时高温/高压树脂聚合方式提高了单体的转化率,其在口腔内的长期稳定性较好<sup>[43]</sup>。但PICN中有机

聚合物聚合不良时可能导致有毒单体释放、微渗漏或继发龋产生,且PICN本身并不具备抗菌特性。因此,在追求PICN更高生物相容性的同时研究提高其抗菌性的方法。

目前,PICN抗菌技术的研究方向有添加抗菌剂、表面改性和表面涂层等。丙烯酸树脂中添加氧化锌可减少黏蛋白和变形链球菌的黏附,降低正畸患者继发龋的风险<sup>[44]</sup>;因此,氧化锌有望作为抗菌剂掺入作为渗透相的丙烯酸树脂中以提高PICN抗菌性能。采用表面改性方法如将纳米银颗粒沉积到PICN表面可使其具有较好的抗菌效果(金黄色葡萄球菌的减少率为90%)<sup>[44]</sup>;在PICN表面人工制备氟磷灰石层也可有效抑制大肠杆菌的生长(减少率约37%)<sup>[29]</sup>。但是,过高的抗菌性能可能会抑制口腔内正常菌群的活性。因此,同样需要研究提高PICN生物相容性的方法,以达到两种性能的平衡。

添加生物活性物质可提高PICN生物相容性。具有良好的生物矿化作用的生物活性玻璃能促进成骨细胞增殖和角蛋白形成细胞分化<sup>[45]</sup>。例如,在羟基磷灰石中添加生物活性玻璃后制得的PICN具有较好的生物相容性(72 h人牙龈成纤维细胞活性为90.78%)<sup>[46]</sup>。制备PICN时加入促进生物活性的羟基磷灰石可改善大鼠骨髓间充质干细胞在PICN上的附着与增殖,表明生物相容性得以提高<sup>[47]</sup>。

4. PICN的粘接性能:修复材料的粘接性能对确保修复体和基牙之间具有更均匀的应力分布至关重要。修复材料具有较好的粘接性能可提高修复体抗裂性、获得良好的边缘适应性和增加固位力。PICN因陶瓷部分含硅易被氢氟酸酸蚀而具有较好的粘接性能,特殊的微观结构使其表面酸蚀后变得凹凸不平,提供了大量粘接位点,增强了机械固位力和化学结合力。对比PICN与不同的CAD/CAM修复材料(树脂纳米陶瓷和长石质瓷)粘接强度发现,PICN的粘接强度为28 MPa,与长石质瓷(25 MPa)和树脂纳米陶瓷(28~31 MPa)相近<sup>[48]</sup>。

影响PICN粘接性能的主要因素是粘接前的预处理方法,包括常用的喷砂、氢氟酸酸蚀和硅烷偶联剂等方法。喷砂是最常用的材料表面粗化处理之一,能增大材料表面粗糙度、增强机械锁合力,并使材料表面产生残余应力层。氧化铝颗粒喷砂处理PICN后其表面化学性质不变,但表面粗糙度增加,易形成表面裂纹导致粘接强度降低,故不适用于PICN修复体粘接前预处理<sup>[49]</sup>。因PICN粘接操作流程与硅基陶瓷相似,可参考硅基陶瓷粘接流程,用5%氢氟酸酸蚀剂处理含硅陶瓷PICN表面,酸蚀时长为60 s<sup>[9]</sup>。氢氟酸溶液酸蚀后可明显提高PICN粘接强度(20 MPa),且在安全浓度范围内氢氟酸浓度越高则PICN粘接强度越高、越稳定<sup>[50]</sup>。PICN表面粗糙度下降程度受氢氟酸处理时长影响,存在最适合的PICN前预处理时长,同时氢氟酸预处理前酸洗或超声清洗不会影响PICN粘接性能<sup>[51]</sup>。

具有互穿网状结构的PICN酸蚀后表面积增加更多,微机械锁合效果增加<sup>[52]</sup>,因此用硅烷偶联剂处理PICN后其粘接强度(22~32 MPa)比树脂纳米陶瓷(4~31 MPa)更高<sup>[53]</sup>。

同时,由于硅烷偶联剂水解后一端与PICN中二氧化硅表面形成硅氧烷桥(Si-O-Si),另一端与树脂水门汀单体发生共聚反应而使PICN与树脂水门汀紧密结合,PICN的表面润湿性增强,促进树脂水门汀的扩散并与高表面粗糙度的PICN产生微机械锁合,因此粘接前使用硅烷偶联剂可提高树脂水门汀和PICN的界面断裂韧性<sup>[52]</sup>。此外,通用粘接剂与PICN中陶瓷相和树脂相均可以产生键合,比单独使用硅烷偶联剂时提高粘接性能效果更好<sup>[54]</sup>。粘固PICN修复体时常用树脂水门汀,自粘接树脂水门汀适用于固位型良好的情况<sup>[55]</sup>。修复体的厚度会影响树脂水门汀的聚合效果,当修复体厚度较高时应参考选用自固化效果优异的树脂水门汀<sup>[56]</sup>。

5. 疲劳与老化行为:在口腔的湿热环境内,修复体常处于反复咀嚼的功能状态。修复体能否在理想的使用寿命内充分行使功能,除了受修复材料力学性能、美学性能和生物相容性等影响,还由其在复杂环境下的疲劳与老化行为决定。相较全瓷材料和复合树脂,PICN材料作为一种新型牙科修复材料其发展时间较短,修复体的长期临床表现需要根据材料的疲劳和老化行为来判断。PICN比全瓷材料强度和模量更低导致其疲劳性能低于全瓷材料,例如PICN的热疲劳失效载荷(1 769 N)远低于氧化锆陶瓷(8 557 N)<sup>[57]</sup>。并且,PICN特殊的互穿网状结构可能导致其内部存在未完全渗透孔隙和不连通的封闭孔。因此,即使在陶瓷含量相同的情况下,PICN动态疲劳性能(失效循环次数=1.1×10<sup>6</sup>)仍低于树脂纳米陶瓷(失效循环次数=4.8×10<sup>6</sup>)<sup>[58]</sup>。有研究表明,PICN中韧性树脂含量的增加可以提高材料的损伤容限,进而提高材料的疲劳寿命<sup>[59]</sup>。

材料的老化行为随临床应用环境变化而变化。酸性环境对牙科材料弯曲强度有很大影响。PICN和不同CAD/CAM修复材料(如氧化锆陶瓷、二硅酸锂玻璃陶瓷和树脂纳米陶瓷)在酸性环境下的微观结构和力学性能变化程度不同,其中PICN的多孔结构经酸蚀后更易出现陶瓷基质中玻璃相溶解,显著降低弯曲强度(62~77 MPa),远低于其他几种修复材料(202~741 MPa)<sup>[60]</sup>。此外,口腔环境的温度和湿度变化会破坏修复材料的微观结构,进而对材料性能产生不利影响。热循环老化后PICN表面粗糙度增加,这将使细胞黏附、增殖和迁移能力降低,进而导致细胞活性下降。研究发现热循环过程中树脂吸水导致了PICN内的树脂相和连接陶瓷-树脂界面的硅烷偶联剂产生膨胀和塑化后发生水解,材料内部产生孔隙并促使裂纹形成,故热循环老化后PICN断裂韧性和维氏硬度明显下降<sup>[61]</sup>。而无论在老化处理热循环后还是咖啡溶液浸泡后,PICN的半透性值均显著降低(16~19),明显低于玻璃陶瓷(19~21)和树脂纳米陶瓷(19~23),其原因与PICN中含有质量比为8.31%的氧化铝有关<sup>[34]</sup>。

紫外光主要引起PICN的美学性能老化。缘于玻璃陶瓷和树脂基质吸收紫外光能力的不同其主要引起PICN半透性变化。因此,几种不同CAD/CAM修复材料(氧化锆陶瓷、玻璃陶瓷、树脂纳米陶瓷和PICN)经紫外光老化后半透性参数也呈现显著变化<sup>[62]</sup>;其中,PICN相对半透性参数变化值(1.7)

与氧化锆增强二硅酸锂玻璃陶瓷(1.9)相近,明显高于玻璃陶瓷(0.6)和树脂纳米陶瓷(3.9)。

## 二、展望

PICN是性能优良的口腔修复材料,适用于制备单冠、嵌体和贴面等,能够保留较多的天然牙体组织而实现微创修复,为数字化口腔诊治提供了新的可能。为进一步优化PICN材料设计、制备工艺及提升其综合性能,助力于牙科医师全面了解PICN的适用性以扩大其应用,目前仍需从以下几个方面进行系统而深入研究。

1. PICN力学性能的梯度仿生特性:目前PICN仍难以用于磨牙修复,对颌为氧化锆修复体时存在过度磨损风险,而对颌为树脂基复合材料时又易使对方产生高磨损;根据天然牙的力学性能各向异性特征,研究PICN力学性能梯度特性的机理及模仿天然牙微观结构,制备具有梯度力学性能的可切割分层PICN,使修复体能承受更复杂的咬合力变化,扩大其应用范围。

2. PICN光学性能的仿生特性及修复体美学性能:PICN多孔和多界面微观结构特点使光线在其中传播较复杂;PICN结构与光学参数之间的关系不明导致其美学修复效果难以预测;亟须建立PICN物理光学模型,研究自然光在PICN表面及内部的光线传播机理,以开发光学性能与天然牙相似的PICN材料。

3. PICN抗菌性及抗菌能力增强技术:目前对PICN抗菌性及提高其抗菌能力的研究很缺乏,亟须从PICN成分优化、表面改性和表面涂层等方面研究抗菌技术,提高其生物相容性,避免修复体周围菌群堆积、感染等发生,使修复体在口腔环境下能长久、稳定地发挥作用。

4. PICN修复体粘接前最适宜表面处理研究方法:目前主要从成分设计、制备工艺和改性方法等方面提高PICN各项性能,不同PICN间存在成分和结构上的差异;成分和结构的改变会对PICN粘接性能产生影响,因此需要探究不同PICN材料对应的粘接前最适宜表面处理方法,以提高其粘接性能,降低修复体在口腔内折断风险,延长其寿命。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参 考 文 献

- [1] Eldafrawy M, Nguyen JF, Mainjot AK, et al. A functionally graded PICN material for biomimetic CAD-CAM blocks [J]. J Dent Res, 2018, 97(12): 1324-1330. DOI: 10.1177/0022034518785364.
- [2] Bona AD, Corazza PH, Zhang Y. Characterization of a polymer-infiltrated ceramic-network material [J]. Dent Mater, 2014, 30(5): 564-569. DOI: 10.1016/j.dental.2014.02.019.
- [3] Coldea A, Swain MV, Thiel N. *In vitro* strength degradation of dental ceramics and novel PICN material by sharp indentation [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2013, 26: 34-42. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.05.004.
- [4] Hodásová L, Morena AG, Tzanov T, et al. 3D-printed polymer-infiltrated ceramic network with antibacterial biobased silver

- nanoparticles [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2022, 5(10): 4803-4813. DOI: 10.1021/acsabm.2c00509.
- [5] 何三纲. 口腔解剖生理学[M]. 8版. 北京: 人民卫生出版社, 2020:244-245.
- [6] Goujat A, Abouelleil H, Colon P, et al. Mechanical properties and internal fit of 4 CAD-CAM block materials [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(3): 384-389. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.03.001.
- [7] Argyrou R, Thompson GA, Cho SH, et al. Edge chipping resistance and flexural strength of polymer infiltrated ceramic network and resin nanoceramic restorative materials [J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 116(3): 397-403. DOI: 10.1016/j.prosdent.2016.02.014.
- [8] 郑梓婷, 闫文娟. 椅旁CAD/CAM可切削材料相关性能的研究进展[J]. *口腔材料器械杂志*, 2019, 28(3): 46-51. DOI: 10.11752/j.kqcl.2019.03.09.
- [9] 孙瑞瞳, 李享宜, 胡一淳, 等. 硅基陶瓷的临床应用现状与展望[J/OL]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2021, 15(2): 72-78. DOI: 10.3877/ema.j.issn.1674-1366.2021.02.002.
- [10] Ikemoto S, Nagamatsu Y, Masaki C, et al. Development of zirconia-based polymer-infiltrated ceramic network for dental restorative material [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2024, 150: 106320. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.106320.
- [11] Li WY, Sun J. Effects of ceramic density and sintering temperature on the mechanical properties of a novel polymer-infiltrated ceramic-network zirconia dental restorative (filling) material [J]. *Med Sci Monitor*, 2018, 24: 3068-3076. DOI: 10.12659/MSM.907097.
- [12] Ikeda H, Nagamatsu Y, Shimizu H. Preparation of silica-poly(methyl methacrylate) composite with a nanoscale dual-network structure and hardness comparable to human enamel [J]. *Dent Mater*, 2019, 35(6): 893-899. DOI: 10.1016/j.dental.2019.03.006.
- [13] Maryamnegari SM, Nateghi MR, Mohebat R. Effect of sintering and infiltration conditions on nanoscale dual network SiO<sub>2</sub>/polymethyl methacrylate composites mimicking human enamel [J]. *J Dent*, 2022, 126: 104311. DOI: 10.1016/j.jdent.2022.104311.
- [14] 胡雨欣, 吕广超, 马骁, 等. 牙科树脂渗透陶瓷复合材料制备的研究进展[J]. *国际口腔医学杂志*, 2025, 52(1): 133-140. DOI: 10.7518/gjkq.2025012.
- [15] Peskersoy C, Sahar HM. Finite element analysis and nanomechanical properties of composite and ceramic dental onlays [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2022, 25(14): 1649-1661. DOI: 10.1080/10255842.2022.2032004.
- [16] Jansen JU, Lümekemann N, Sener B, et al. Comparison of fracture toughness measurements for zirconia materials using two test methods [J]. *Dent Mater J*, 2019, 38(5): 806-812. DOI: 10.4012/dmj.2018-361.
- [17] Maleki M, Sheikh-Al-Eslamian SM, Hasani E, et al. Comparative study on the microstructure and mechanical behavior of monolithic ceramic and laminated composite of high strength 3Y-TZP and high fracture toughness 12Ce-TZP [J]. *J Alloy Compd*, 2019, 776: 166-171. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.10.255.
- [18] Zang ST, He NX, Sun XT, et al. Influence of additives on the purity of tetragonal phase and grain size of ceria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals (Ce-TZP) [J]. *Ceram Int*, 2019, 45: 394-400. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.179.
- [19] Shahmiri R, Standard OC, Hart JN, et al. Optical properties of zirconia ceramics for esthetic dental restorations: A systematic review [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(1): 36-46. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.07.009.
- [20] Mohammed NY, Wahsh MM, Motawea IT, et al. Fabrication and characterization of polymer-infiltrated ceramic network materials based on nano-tetragonal zirconia [J]. *J Korean Ceram Soc*, 2021, 58: 359-372. DOI: 10.1007/s43207-020-00102-4.
- [21] Zhawi HE, Kaizer MR, Chughtai A, et al. Polymer infiltrated ceramic network structures for resistance to fatigue fracture and wear [J]. *Dent Mater*, 2016, 32(11): 1352-1361. DOI: 10.1016/j.dental.2016.08.216.
- [22] Oudkerk J, Sanchez C, Grenade C, et al. The One-step No-prep technique for non-invasive full-mouth rehabilitation of worn dentition using PICN CAD-CAM restorations: Up to 9-year results from a prospective and retrospective clinical study [J]. *Dent Mater*, 2025, 41(4): 414-424. DOI: 10.1016/j.dental.2024.12.016.
- [23] Song XF, Kang N, Yin L. Effect of bur selection on machining damage mechanisms of polymer infiltrated ceramic network material for CAD/CAM dental restorations [J]. *Ceram Int*, 2020, 46(14): 23116-23126. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.089.
- [24] Tokunaga J, Ikeda H, Nagamatsu Y, et al. Castable polymer-infiltrated ceramic network composite for training model tooth with compatible machinability to human enamel [J]. *Dent Mater J*, 2022, 41(4): 520-526. DOI: 10.4012/dmj.2021-299.
- [25] Tokunaga J, Ikeda H, Nagamatsu Y, et al. Wear of polymer-infiltrated ceramic network materials against enamel [J]. *Materials*, 2022, 15(7): 1-13. DOI: 10.3390/ma15072435.
- [26] Alves MFRP, de Campos LQB, Simba BG, et al. Microstructural characteristics of 3Y-TZP ceramics and their effects on the flexural strength [J]. *Ceramics*, 2022, 5(4): 798-813. DOI: 10.3390/ceramics5040058.
- [27] Wille S, Möller R, Kern M. Influence of shading on zirconia's phase transformation and flexural strength after artificial aging [J]. *Dent Mater*, 2023, 39(8): 702-707. DOI: 10.1016/j.dental.2023.06.005.
- [28] Gautam C, Joyner J, Gautam A, et al. Zirconia based dental ceramics: Structure, mechanical properties, biocompatibility and applications [J]. *Dalton T*, 2016, 45(48): 19194-19215. DOI: 10.1039/c6dt03484e.
- [29] Li K, Kou HM, Rao JC, et al. Fabrication of enamel-like structure on polymer-infiltrated zirconia ceramics [J]. *Dent Mater*, 2021, 37(4): e245-e255. DOI: 10.1016/j.dental.2021.01.002.

- [30] Shirani M, Savabi O, Mosharraf R, et al. Comparison of translucency and opalescence among different dental monolithic ceramics [J]. J Prosthet Dent, 2021, 126(3): 446.e1-446.e6. DOI:10.1016/j.prosdent.2021.04.030.
- [31] Ruiz-López J, Espinar C, Lucena C, et al. Effect of thickness on color and translucency of a multi-color polymer-infiltrated ceramic-network material [J]. J Esthet Restor Dent, 2023, 35(2): 381-389. DOI:10.1111/jerd.12952.
- [32] Emamia N, Sjö Dahl M, Söderholm KM. How filler properties, filler fraction, sample thickness and light source affect light attenuation in particulate filled resin composites [J]. Dent Mater, 2005, 21(8): 721-730. DOI: 10.1016/j.dental.2005.01.002.
- [33] Pulgar R, Lucena C, Espinar C, et al. Optical and colorimetric evaluation of a multi-color polymer-infiltrated ceramic-network material [J]. Dent Mater, 2019, 35(7): e131-e139. DOI: 10.1016/j.dental.2019.03.010.
- [34] Amri MD, Labban N, Alhijji S, et al. *In vitro* evaluation of translucency and color stability of CAD/CAM polymer-infiltrated ceramic materials after accelerated aging [J]. J Prosthodont, 2021, 30(4): 318-328. DOI: 10.1111/jopr.13239.
- [35] Sulaiman TA, Suliman AA, Mohamed EA, et al. Optical properties of bisacryl-, composite-, ceramic- resin restorative materials: An aging simulation study [J]. J Esthet Restor Dent, 2021, 33(6): 913-918. DOI: 10.1111/jerd.12653.
- [36] Acar O, Yilmaz B, Altintas SH, et al. Color stainability of CAD/CAM and nanocomposite resin materials [J]. J Prosthet Dent, 2016, 115(1): 71-75. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.06.014.
- [37] Dos Santos DM, da Silva EVF, Watanabe D, et al. Effect of different acidic solutions on the optical behavior of lithium disilicate ceramics [J]. J Prosthet, 2017, 118(3): 430-436. DOI: 10.1016/j.prosdent.2016.10.023.
- [38] Sen N, Us YO. Mechanical and optical properties of monolithic CAD-CAM restorative materials [J]. J Prosthet Dent, 2018, 119(4): 593-599. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.06.012.
- [39] Lee JH, Kim SH, Yoon HI, et al. Colour stability and surface properties of high-translucency restorative materials for digital dentistry after simulated oral rinsing [J]. Eur J Oral Sci, 2020, 128(2): 170-180. DOI: 10.1111/eos.12676.
- [40] Kilinc H, Turgut S. Optical behaviors of esthetic CAD-CAM restorations after different surface finishing and polishing procedures and UV aging: An *in vitro* study [J]. J Prosthet Dent, 2018, 120(1): 107-113. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.09.019.
- [41] Choi YS, Kang KH, Att W. Evaluation of the response of esthetic restorative materials to ultraviolet aging [J]. J Prosthet Dent, 2021, 126(5): 679-685. DOI: 10.1016/j.prosdent.2020.09.007.
- [42] Tassin M, Bonte E, Loison-Robert LS, et al. Effects of high-temperature - pressure polymerized resin - infiltrated ceramic networks on oral stem cells [J]. Plos One, 2016, 11(5): e0155450. DOI: 10.1371/journal.pone.0155450.
- [43] Pomès B, Behin P, Jordan L, et al. Influence of polymerization pressure and post - cure treatment on conversion degree and viscoelastic properties of polymer infiltrated ceramic network [J]. J Mech Behav of Biomed, 2021, 115: 104286. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2020.104286.
- [44] Puspitasari R, Irnawati D, Widjijono. The effect of zinc oxide (ZnO) nanoparticle concentration on the adhesion of mucin and streptococcus mutans to heat-cured acrylic resin [J]. Dent Mater J, 2023, 42(6): 791-799. DOI: 10.4012/dmj.2023-016.
- [45] Tang FL, Li JL, Xie WH, et al. Bioactive glass promotes the barrier functional behaviors of keratinocytes and improves the Re-epithelialization in wound healing in diabetic rats [J]. Bioact Mater, 2021, 6(10): 3496-3506. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2021.02.041.
- [46] Chen YY, Sun C, Cao JF, et al. Mechanical properties and *in vitro* biocompatibility of hybrid polymer-HA/BAG ceramic dental materials [J]. Polymers, 2022, 14(18): 3774. DOI: 10.3390/polym14183774.
- [47] Cui BC, Zhang RR, Sun FB, et al. Mechanical and biocompatible properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials for dental restoration [J]. J Adv Ceram, 2020, 9(1): 123-128. DOI: 10.1007/s40145-019-0341-5.
- [48] Sismanoglu S, Gurcan AT, Yildirim-Bilmez Z, et al. Mechanical properties and repair bond strength of polymer-based CAD/CAM restorative materials [J]. Int J Appl Ceram Technol, 2021, 18: 312-318. DOI: 10.1111/ijac.13653.
- [49] Yano HT, Ikeda H, Nagamatsu Y, et al. Effects of alumina airborne-particle abrasion on the surface properties of CAD/CAM composites and bond strength to resin cement [J]. Dent Mater J, 2021, 40(2): 431-438. DOI: 10.4012/dmj.2020-023.
- [50] Wanderico CM, Pico MZ, Kury M, et al. Alternative surface treatments strategies for bonding to CAD/CAM resin - matrix ceramics [J]. J Adhes Sci Technol, 2022, 37(8): 1471-1484. DOI: 10.1080/01694243.2022.2079333.
- [51] Tuncer B, Aktas G, Baris Guncu M, et al. Effects of surface treatments and cement type on shear bond strength between titanium alloy and All-Ceramic materials [J]. Materials, 2023, 16(18): 86240. DOI: 10.3390/ma16186240.
- [52] Eldafrawy M, Greimers L, Bekaert S, et al. Silane influence on bonding to CAD - CAM composites: An interfacial fracture toughness study [J]. Dent Mater, 2019, 35(9): 1279-1290. DOI: 10.1016/j.dental.2019.05.019.
- [53] Komagata Y, Nagamatsu Y, Ikeda H. Comparative bonding analysis of computer-aided design/computer-aided manufacturing dental resin Composites with various resin cements [J]. J Compos Sci, 2023, 7(10): 1-11. DOI: 10.3390/jcs7100418.
- [54] Bello YD, Di Domenico MB, Magro LD, et al. Bond strength between composite repair and polymer - infiltrated ceramic - network material: Effect of different surface treatments [J]. J Esthet Restor Dent, 2019, 31(3): 275-279. DOI: 10.1111/jerd.12445.
- [55] 王淑君,张楚晗,唐一阳,等. 自粘接树脂水门汀的临床应用及

- 展望[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2024, 18(4): 276-286. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.04.010.
- [56] David-Pérez M, Ramírez-Suárez JP, Latorre-Correa F, et al. Degree of conversion of resin-cements (light-cured/dual-cured) under different thicknesses of vitreous ceramics: Systematic review [J]. *J Prosthodont Res*, 2022, 66(3): 385-394. DOI: 10.2186/jpr.JPR\_D\_20\_00090.
- [57] Spitznagel FA, Röhrig S, Langner R, et al. Failure load and fatigue behavior of monolithic translucent zirconia, PICN and rapid-layer posterior single crowns on zirconia implants [J]. *Materials(Basel)*, 2021, 14(8): 1990. DOI: 10.3390/ma14081990.
- [58] Rosentritt M, Krifka S, Preis V, et al. Dynamic fatigue of composite CAD/CAM materials [J]. *J Mech Behav Biomed*, 2019, 98: 311-316. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.07.002.
- [59] Coldea A, Fischer J, Swain MV, et al. Damage tolerance of indirect restorative materials (including PICN) after simulated bur adjustments [J]. *Dent Mater*, 2015, 31(6): 684-694. DOI: 10.1016/j.dental.2015.03.007.
- [60] Elraggal A, Afifi RR, Alamouh RA, et al. Effect of acidic media on flexural strength and fatigue of CAD - CAM dental materials [J]. *Dent Mater*, 2023, 39(1): 57-69. DOI: 10.1016/j.dental.2022.11.019.
- [61] Turker I, Kursoglu P. Effects of thermal ageing on the mechanical properties of cad-cam ceramic materials [J]. *Ceramics-Silikáty*, 2023, 67(4): 496-504. DOI: 10.13168/cs.2023.0049.
- [62] Turgut S, Kılınç H, Bağış B. Effect of UV aging on translucency of currently used esthetic CAD - CAM materials [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2019, 31(2): 147-152. DOI: 10.1111/jerd.12460.

(收稿日期: 2024-12-03)

(本文编辑: 王嫚)