

· 材料学专栏 ·

可切削聚合物渗透陶瓷在口腔修复中应用的研究进展

吴承¹ 胥一尘² 万乾炳²

1. 口腔疾病防治全国重点实验室 国家口腔医学中心 国家口腔疾病临床医学研究中心
四川大学华西口腔医学院 成都 610041;
2. 口腔疾病防治全国重点实验室 国家口腔医学中心 国家口腔疾病临床医学研究中心
四川大学华西口腔医院修复 I 科 成都 610041

[摘要] 聚合物渗透陶瓷 (PICN) 作为一种新兴的口腔修复材料, 因其独特的陶瓷-树脂双相互穿网络结构而受到广泛关注。该材料融合了陶瓷和树脂的优秀特性, 能有效抵抗裂纹扩展, 保护基牙及对颌牙, 且具备出色的粘接性, 在单冠、嵌体、部分冠和贴面修复方面展现出了良好的应用潜力和临床效果。本综述围绕 PICN 材料的组成、结构、力学性能、粘接性能、耐磨性、光学特性以及临床表现等方面进行详细阐述, 并对其未来的发展趋势和应用前景进行展望。

[关键词] 聚合物渗透陶瓷; 材料性能; 可切削材料; 计算机辅助设计和计算机辅助制造

[中图分类号] R783.1 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2024056



开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)

Research progress on the application of machinable polymer-infiltrated ceramic network in prosthodonticsWu Cheng¹, Xu Yichen², Wan Qianbing²

1. State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & West China School of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & Dept. of Prosthodontics I, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2022YFC2410103)

Correspondence: Wan Qianbing, Email: champion@scu.edu.cn

[Abstract] Polymer-infiltrated ceramic network (PICN) has emerged as a novel dental restoration material, attracting widespread attention due to its unique ceramic-resin dual interpenetrating network structure. This material blends the superior features of ceramics and resins, effectively resisting crack propagation, protecting abutment and opposing teeth, and exhibiting excellent adhesive properties. It has shown promising application potential and clinical outcomes in prosthodontic treatments of single crowns, inlays, partial crowns, and veneers. This review elaborates on the composition, structure, mechanical properties, adhesive performance, wear resistance, optical characteristics, and clinical manifestations of PICN materials. Furthermore, it anticipates future development trends and application prospects.

[Key words] polymer-infiltrated ceramic network; material property; machinable material; computer-aided design and computer-aided manufacturing

随着计算机辅助设计和计算机辅助制造 (computer aided design and computer aided manufac-

turing, CAD/CAM) 技术在口腔修复领域的应用和普及, 口腔可切削陶瓷材料迅速发展, 力学、生物、美学性能不断提高。目前, 临床应用最为广泛的可切削陶瓷材料可分为玻璃陶瓷和多晶陶瓷2类。以硅酸铝锂为代表的玻璃陶瓷具有较好的美学特性和粘接性能, 但此类材料易于出现疲劳性失效。以二氧化锆为代表的多晶陶瓷具有较高

[收稿日期] 2023-10-06; [修回日期] 2024-03-22

[基金项目] 国家重点研发计划 (2022YFC2410103)

[作者简介] 吴承, 学士, Email: wucheng@alu.scu.edu.cn

[通信作者] 万乾炳, 教授, 博士, Email: champion@scu.edu.cn

的力学强度。然而，其过高的硬度和模量与天然牙力学特性并不匹配，可能造成牙体折裂和对颌牙磨耗。此外，多晶陶瓷因缺乏玻璃相基质，其透明度较差，且不易被氢氟酸酸蚀。虽然高透氧化锆等新型改性材料的透明度已有大幅提高，且对天然牙磨耗较小，但仍受限于复杂的制备过程和较高的制造成本。

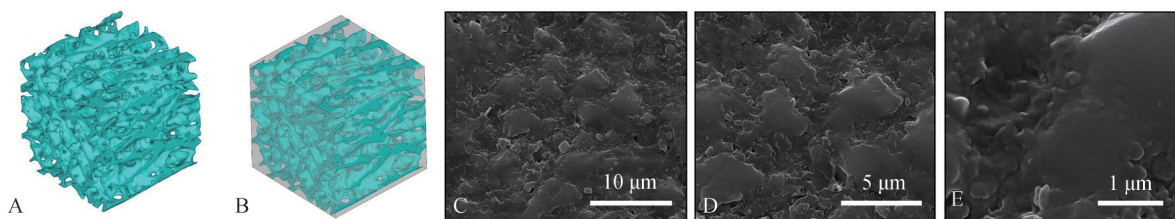
树脂基陶瓷 (resin-matrix ceramic) 是一种新型CAD/CAM陶瓷修复材料^[1]，因弹性模量接近牙本质、对天然牙的磨耗低、美学效果较好、粘接性能佳，兼具了陶瓷和树脂的优点，受到了学界的广泛关注。树脂基陶瓷由树脂与陶瓷组成双相结构，可分为2类：1) 树脂纳米陶瓷 (resin nano ceramic, RNC)，陶瓷粉体分散于树脂基质，预固化成可切削瓷块，代表产品为Lava Ultimate (3M ESPE公司，美国)；2) 聚合物渗透陶瓷 (polymer-infiltrated ceramic network, PICN)，此类材料由树脂渗透入多孔陶瓷基质，固化成聚合物-陶瓷互穿网络结构，代表产品为Enamic (Vita公司，德国)。

20世纪90年代末期，3M ESPE公司推出了一款CAD/CAM树脂基陶瓷产品Paradigm MZ100。该材料通过将陶瓷填料颗粒添加到复合树脂中制得，即RNC。在2011年，3M ESPE公司的另一款RNC即Lava Ultimate面世，以更好的力学性能替代了Paradigm MZ100。不久后，Vita公司经过一系列的研 发，于2013年推出了名为Enamic的PICN。Enamic是通过单体树脂尿素二甲基丙烯酸酯 (urethane dimethacrylate, UDMA) 和三乙二醇

二甲基丙烯酸酯 (triethylene glycol dimethacrylate, TEGDMA)^[2-3]渗透预烧结的长石质陶瓷网络制备而成。与分散填料的复合材料不同，其陶瓷网络构成了相互连接的三维支架，能够更有效地向各个方向分散应力。因Vita Enamic的有机和无机组分均为连续相，相比于Lava Ultimate在力学性能上具有更好的表现^[4]。此外，其不同组分可使互穿网络结构中各相性能互补，从而改善陶瓷修复材料的整体性能。因PICN具有较好的研发前景，本文根据现有文献就PICN材料的性能研究进行综述。

1 PICN的组成与结构

树脂基陶瓷是树脂和陶瓷构成的有机-无机复合材料，作为其中一个分类，PICN是将可聚合树脂单体渗透到预烧结的多孔陶瓷孔隙中，然后通过热诱导聚合进行固化，最终形成以多孔陶瓷为骨架、聚合物充填孔隙的聚合物-陶瓷双相互穿网络结构复合材料 (图1)。PICN材料的结构特点使其融合了陶瓷和聚合物的特性：聚合物的弹性可以吸收和缓冲应力，降低材料失效风险；陶瓷的刚性则为材料提供了良好的支撑，这使得PICN在抗压、抗折等力学性能方面具有较好的表现。在制备PICN过程中，为了使树脂能够充分渗入陶瓷，陶瓷的孔隙通常较大。尽管如此，仍可能存在树脂渗透不全、聚合物与陶瓷结合不良的问题，导致材料中形成空洞等缺陷^[5-7]。



A: 陶瓷网络结构示意图; B: 单体树脂渗透陶瓷网络示意图; C-E: PICN电子显微镜图, 放大倍数分别为×1 000、×2 000、×8 000。

图 1 PICN的微观结构

Fig 1 The microstructure of PICN

2 PICN的性能

2.1 力学性能

与一般可切削陶瓷材料相比，PICN材料最大的特点是增加了树脂材料的弹性，减少了陶瓷的

脆性，具有与牙本质更接近的弹性模量，生物应力传导更合理。

2.1.1 制造工艺对力学性能的影响 实验研究^[8-13]表明，烧制陶瓷粉末种类，多孔陶瓷的烧结参数 (温度、持续时间)，多孔陶瓷密度、孔隙率及孔径，树脂单体的成分和比例，渗透压力，渗透时

间等因素对于最终PICN产品的力学性能有影响。He等^[14]在实验室测量不同密度及不同渗透压力下PICN的力学性能后发现:陶瓷密度越高,渗透压力越高,断裂韧性越高,抗蠕变性能越好,但弹性模量和硬度差异无统计学意义。Coldea等^[15]的研究发现:PICN的弹性模量和硬度与预烧结陶瓷密度呈正相关。以氮化硅陶瓷^[12]、氧化锆陶瓷^[10]、硅酸铝钠陶瓷^[8]为陶瓷基的PICN材料具有较好的力学性能。

2.1.2 弯曲强度 Vita Enamic^[180.9±42.2) MPa]弯曲强度远小于二硅酸锂基陶瓷IPS e.max CAD^[(271.6±64.7) MPa],与Lava Ultimate^[(164.3±33.3) MPa]相当,远大于长石质陶瓷Mark II^[(137.8±20.9) MPa]^[16]。在适当调整加工程序后,PICN弯曲强度下降程度会有所改善。Coldea等^[15]研究显示:随着长石质陶瓷体积比从59%增加到100%,多孔陶瓷密度增加,孔径、孔隙率减小,以此制作的PICN弯曲强度降低,由159.88 MPa降低至103.36 MPa。聚合物单体、多孔陶瓷种类对PICN弯曲强度有显著影响。一般来说,PICN复合材料的抗弯强度小于200 MPa,但聚合物渗透氧化锆和氮化硅陶瓷可以制备出抗弯强度大于300 MPa的PICN复合材料^[12]。

2.1.3 硬度、弹性模量、断裂韧性 PICN硬度明显低于大多数商用牙科陶瓷。Vita Enamic^[(1.70±0.12) GPa]硬度明显低于IPS e.max CAD^[(5.83±0.70) GPa],高于Lava Ultimate^[(1.15±0.13) GPa],因牙本质硬度为0.60~0.92 GPa,釉质硬度为3.0~5.3 GPa,因此,PICN具有减少对颌牙磨损的优点^[16]。

PICN弹性模量(22~32 GPa)介于树脂(7~14 GPa)与陶瓷(30~60 GPa)之间,更接近于牙本质(18 GPa)。相较于具有高弹性模量的多晶陶瓷,PICN与牙本质之间的应力传递更均匀,对牙体的保护作用更好^[17-19]。其较低的弹性模量使修复体能够通过自身的形变来缓冲外界应力,减少对牙体的冲击载荷。然而,低弹性模量的PICN在受力时产生的较大弹性形变可能会降低修复体边缘的密合性,也不利于精细切削^[20]。

一般来说,PICN的断裂韧性低于单相陶瓷。Della Bona等^[21]采用单边缺口梁法评估了Vita Enamic的断裂韧性,得到的平均值为1.09 MPa/m²。Coldea等^[22]采用单边缺口梁法比较了自制PICN与其他陶瓷材料的断裂韧性,结果显示:PICN的断

裂韧性为1.51 MPa/m²,略高于长石质陶瓷Mark II(1 MPa/m²)和VM9(0.82 MPa/m²),低于氧化铝玻璃渗透陶瓷ICALumina(3.73 MPa/m²)、二硅酸锂玻璃陶瓷IPS e.max CAD(2.37 MPa/m²)和氧化钇稳定的四方氧化锆(yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals, Y-TZP)(4.94 MPa/m²)。

2.1.4 耐磨性 Silva等^[23]通过实验室模拟测试发现:在旋转式三平面滚珠摩擦计试验机上,相比于锆锂硅酸盐增强玻璃陶瓷Vita Suprinity(3.2×10⁻⁵ mm³/Nm),PICN材料Vita Enamic(5.3×10⁻⁵ mm³/Nm)具有更高的磨损率,他们推测PICN材料耐磨性较低的原因是陶瓷相与聚合物相缺乏化学键合。在另一项研究中,Borrero-Lopez等^[24]报道,在往复式滑动摩擦计试验机上,Vita Enamic(3.7×10⁻⁵ mm³/Nm)的磨损率介于3%氧化钇部分稳定氧化锆(3% yttria partially stabilized zirconia, 3Y-PSZ)(2.7×10⁻⁶ mm³/Nm)与二硅酸锂玻璃陶瓷IPS e.max CAD(1.2×10⁻⁴ mm³/Nm)之间。需要注意的是,粘接过程中的酸蚀操作会导致PICN聚合物相中的甲基丙烯酸酯键水解,使表面粗糙度升高,易于发生更加严重的磨粒磨损,因此PICN材料更需要良好的抛光。

2.1.5 疲劳行为 因需要在口内承受复杂的循环咀嚼应力,修复体疲劳行为与长期寿命密切相关。需要指出的是,PICN疲劳行为相关的研究缺乏统一的测试标准,用于表征疲劳行为的参数有较大差异。总体来说,因PICN的力学强度低于硅酸铝锂和二氧化锆陶瓷,其疲劳相关的绝对强度值也相应较低。Homaci等^[25]通过三点弯曲测试比较了Zirconia Cercon、IPS e.max CAD和Vita Enamic三类陶瓷修复材料的疲劳行为,以应力水平与失效循环次数关系曲线(stress amplitude versus number of cycles to failure, S-N)拟合计算最大疲劳应力,结果表明:Vita Enamic(73.8 MPa)的最大疲劳应力显著低于IPS e.max CAD(168.4 MPa)和Zirconia Cercon(500.1 MPa)。类似地,Lf等^[26]通过双轴弯曲强度比较分析了陶瓷修复材料的疲劳失效载荷(fatigue failure load, FFL)和失效循环次数(number of cycles for failure, CFF),结果发现:PICN的FFL和CFF优于长石质陶瓷,但低于硅酸锂玻璃陶瓷和二氧化锆陶瓷。

虽然PICN疲劳相关的绝对强度值较低,但疲劳载荷对其力学性能影响较小。Aboushelib等^[27]的研究发现:经370万次循环应力(400 N、0.3 Hz)

作用后, Vita Enamic的断裂强度仅降低15.75%, 优于Lava Ultimate (15.99%)、IPS e.max CAD (27.14%)、IPS Empress CAD (32.26%)和Zirconia (34.03%)。Elragal等^[28]的研究显示: 经100万次循环应力(50 N、1 Hz)处理后, Vita Enamic的弯曲强度未见明显降低, 显著优于二硅酸锂和二氧化锆陶瓷。所以, PICN中的聚合物相赋予了材料一定的塑性^[29-30], 进一步增强了陶瓷材料的损伤容限^[31-33], 有效地避免了在受力过程中的裂纹扩展^[29]。

2.2 粘接性能

修复材料的粘接性能决定了其使用寿命, PICN的粘接性能受到其微观结构、组成成分和预处理方式的影响^[34-36]。

2.2.1 氢氟酸酸蚀 氢氟酸可以溶解硅基陶瓷中含有的二氧化硅, 使得材料表面形成蜂窝状, 可有效增大粘接面积, 同时树脂水门汀渗入形成树脂突而形成微机械固位。氧化锆基PICN则由于氧化锆不易被氢氟酸酸蚀, 酸蚀对粘接强度没有明显的提高。

与RNC相比, PICN是陶瓷与树脂构成的双网状结构, 被氢氟酸酸蚀后网状陶瓷结构较稳定不易塌陷, 更适宜于氢氟酸酸蚀处理。实际应用中应注意控制酸蚀剂浓度和酸蚀时间, 避免过度酸蚀造成PICN的两相网络结构破坏而不利于粘接。Schwenter等^[37]的研究表明, Vita Enamic使用氢氟酸酸蚀在30 s内粘接强度逐渐提高, 但超过30 s后粘接强度会下降; 董林林^[38]的研究则表明, Vita Enamic分别使用质量分数为4%和9.5%的氢氟酸进行酸蚀时, 扫描电子显微镜下可见9.5%氢氟酸酸蚀的材料表面出现断裂的网状结构。

2.2.2 喷砂 在修复材料粘接前进行喷砂处理得到不规则表面, 可以去除玷污层、增大粘接面积以及与水门汀形成微机械固位, 能显著提高粘接强度。但是有部分学者^[34,39-40]的研究认为, 喷砂处理可能会对树脂基陶瓷材料的粘接有不利影响, 可能是过度喷砂处理破坏了材料表面结构导致机械强度下降所致。

2.2.3 硅烷偶联剂 对于PICN的粘接, 部分学者^[41-43]认为, 硅烷偶联剂形成的化学粘接力小于机械固位力, 硅烷偶联剂处理应该与其他机械处理方式联合使用。一些学者^[34,44]的研究显示: 对于Vita Enamic, 酸蚀联合硅烷偶联剂的粘接效果优于仅酸蚀处理。但由于实验研究条件的差异, 许

多研究中使用的粘接剂本身含有硅烷偶联剂成分, 因此单独使用与联合使用硅烷偶联剂对PICN粘接效果的影响目前还存在争议。

2.2.4 可修补性 除了保障修复体的固位和稳定, PICN较好的粘接性能使其具备一定的可修补性^[45]。Bello等^[46]的研究显示: 应用硅烷偶联剂可以显著提高PICN与修补复合树脂的拉伸粘接强度(30~35 MPa), 超越临床所需的最低强度标准(10~13 MPa)^[47]。

2.3 光学特性

研究^[48]表明, PICN的半透性受陶瓷密度、晶粒尺寸以及陶瓷-聚合物互穿网络结构的影响, 总体略低于RNC和长石质陶瓷。与市售氧化锆增强玻璃陶瓷(Vita Suprinity)、长石质陶瓷(Vita-blocks Mark II)和IPS e.max CAD相比, Vita Enamic的透光性较低^[49]。

修复材料的透光性会影响光固化型树脂水门汀的聚合, 进而影响修复材料的粘接。PICN半透性受材料种类、厚度和颜色影响, 因此应仔细评估每个因素, 使光聚合型树脂水门汀得到最佳聚合^[50]。Barutçigil等^[39]的研究显示: 光固化水门汀随着PICN厚度的增加其聚合程度降低, 而PICN厚度并不影响双重固化水门汀的聚合度, 因此使用双重固化水门汀粘接效果更优。这是由于厚度增加导致透光量减少, 而双重固化水门汀兼具自固化和光固化性能, 可弥补一部分透光量不足^[51]。减小修复体厚度可以提高光固化型水门汀聚合度, 但修复体也需要保持一定的厚度以保证其临床寿命, 尤其是切缘和功能咬合尖的最小的厚度应为1.5 mm^[52-56]。Passos等^[57]发现: 随着PICN色度和饱和度增加, 透光率显著降低。PICN在相同材料和厚度的情况下, 1M1组透光率最高, 3M2组透光率最低, 这可能是由于色深PICN瓷块中的色素杂质吸收了透射光。

修复体的半透性还和美学特性直接相关, 在临床应用中应视具体情况选择修复材料。在一般情况下, 可选择半透性较高的PICN, 但牙体变色严重则建议使用半透性较低的修复材料来遮色^[50]。PICN相较纳米树脂陶瓷, 其表面光泽度较低, 表面更粗糙, 这是其陶瓷和聚合物两相互穿结构所导致的。一些学者^[58-59]的实验研究显示: Lava Ultimate[(7.75±0.10) nm]、Cerasmart[(11.67±0.20) nm]和Grandio Bloc[(13.16±0.50) nm]这3类RNC的表面粗糙度均小于Vita Enamic[(22.69±

1.40) nm], 而Lava Ultimate (91.8±1.4)、Ceramart (82.0±3.9)和Grandio Bloc (75.0±0.7)的表面光泽度(ΔE*SCE-SCI算法^[59])均大于Vita Enamic (58.6±2.0)。除了影响美学特性, PICN表面较高的粗糙度可能造成菌斑堆积, 进而影响修复体的使用效果, 因此在使用前需要对PICN高度的打磨抛光^[59]。

口内修复体长期使用都会发生不同程度变色, 材料本身的老化, 口腔内冷热交替、咀嚼运动、光照辐射、饮料食品中的色素等, 都可使修复体变色。一般而言, PICN与RNC的颜色稳定性相当。一些学者^[60-61]报道: 在咖啡和红酒中浸泡后Vita Enamic的颜色稳定性优于Lava Ultimate。总体而言, 树脂基陶瓷的颜色稳定性略优于复合树脂^[62], 略逊于IPS e.max CAD^[60-61], Karaokutan等^[63]认为, Lava Ultimate的颜色稳定性较长石陶瓷(CEREC Blocs、Sirona Dental GmbH)差。Sasany等^[64]的研究发现: 在PICN陶瓷块中添加纳米硼酸粉末可有效地保持PICN陶瓷块的颜色稳定性和半透明性, 但维持纳米硼酸粉末的结构稳定是一个难题, 因此纳米粉末硼酸在陶瓷中的应用还处于初级阶段, 尚需进一步的研究。

3 PICN的临床表现

目前, PICN主要用于制作单冠、部分冠、嵌体和贴面。虽然PICN材料机械强度一般, 但其具有一定的弹性, 能有效抵抗裂纹扩展。相较于其他修复材料, PICN对厚度要求相对较低, 在少预备或无预备的微创修复中展现出了一定的优势。因弹性模量与牙本质接近, 对釉质磨损较少, PICN还可以保护牙体组织。

3.1 单冠修复

在PICN用于单冠修复的临床报告中, Spitznagel等^[65]对76例Vita Enamic单冠修复体进行了为期3年的队列研究, 根据美国公共卫生服务(United States Public Health Service, USPHS)的评价标准, Vita Enamic单冠存留率为93.9%, 成功率为92.7%。在随访过程中, 未发现继发龋和脱粘接现象, 主要的失效模式为修复体破损。修复体在颜色匹配、解剖外形和边缘适合方面具有良好的表现, 但随时间推移修复体出现了边缘变色和表面粗糙度增加的现象。

类似地, Chirumamilla等^[66]对45例Vita Enamic

单冠修复体进行了为期2年的临床研究, 评价显示修复体的存留率>90%。根据加州牙科协会(California Dental Association, CDA)的评价标准, 除了表面纹理外(86%), 修复体所有类别的alfa得分均超过90%。基于现有临床观察结果, 该作者认为Vita Enamic适宜于单冠修复。

3.2 嵌体和部分冠修复

在PICN应用于嵌体修复的研究中, Spitznagel等^[67]在47例患者口内应用Vita Enamic陶瓷进行了45例嵌体和58例部分冠的后牙修复, 3年前瞻性研究结果显示: 嵌体和部分冠的存留率分别为97.4%和95.6%, 其中主要的失效模式为修复体折裂, 未观察到继发龋和脱粘接现象。根据USPHS标准, Vita Enamic嵌体和部分冠的临床成功率分别为84.8%和82.4%, 修复体在颜色匹配和解剖外形方面有良好表现, 但随修复时间的增加出现了边缘适合性下降、修复体边缘变色和表面粗糙度增加的现象。基于此研究结果, 该作者认为Vita Enamic用于嵌体和部分冠修复具有良好的临床表现。

在另一项研究中, Lu等^[68]用PICN Vita Enamic和长石质陶瓷Vitablocs Mark II对101例后牙缺损进行了高嵌体修复, 修复体置入3年后Vita Enamic和Vitablocs Mark II的存留率分别高达97%和90.7%, 两者无显著性差异。

3.3 贴面修复

Attia等^[69]使用Vita Enamic陶瓷为6例患者做了54个贴面修复, 并评估了1年期临床修复效果, 结果显示: 未观察到术后敏感、继发龋、牙髓并发症、修复体断裂和脱粘接, 不足之处是在6个月和1年随访时观察到修复体颜色匹配度的降低。在研究期限内, 所有患者均对Vita Enamic表现出高临床满意度。

在另一项2年期的前瞻性研究中, Oudkerk等^[70]使用Vita Enamic陶瓷为7例全口重度磨耗的患者做了192个无牙体预备超薄咬合重建贴面, 结果显示: 修复体存留率高达100%, 临床成功率为93.5%, 最常见的并发症为修复体边缘的轻微破损。49条目口腔健康影响程度量表(Oral Health Impact Profile-49, OHIP-49)结果显示患者满意度良好。

4 总结与展望

可切削PICN在口腔修复的应用中具有可接受

的力学、粘接和美学性能,其主要优点是:1)可以抵抗裂纹扩展,对厚度要求较低,可应用于微创修复;2)与牙本质弹性模量接近,可有效保护基牙,减小对颌牙磨耗;3)可通过适当的预处理实现良好的口内粘接。在单冠、部分冠、嵌体和贴面的临床应用中,PICN表现出了较高的修复体存留率和临床成功率,获得了较高的患者满意度,但长期临床应用效果仍需进一步观察和研究。作为新兴修复材料,PICN在口腔修复领域展现了巨大潜力和良好前景,但PICN现有商业化产品较为单一,需要进一步迭代研发以提高其材料性能。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

5 参考文献

- [1] Spitznagel FA, Boldt J, Gierthmuehlen PC. CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth [J]. *J Dent Res*, 2018, 97(10): 1082-1091.
- [2] Venturini AB, Prochnow C, Pereira GKR, et al. Fatigue performance of adhesively cemented glass-, hybrid- and resin-ceramic materials for CAD/CAM monolithic restorations[J]. *Dent Mater*, 2019, 35(4): 534-542.
- [3] Ionescu AC, Hahnel S, König A, et al. Resin composite blocks for dental CAD/CAM applications reduce biofilm formation *in vitro*[J]. *Dent Mater*, 2020, 36(5): 603-616.
- [4] Mainjot AK, Dupont NM, Oudkerk JC, et al. From artisanal to CAD-CAM blocks: state of the art of indirect composites[J]. *J Dent Res*, 2016, 95(5): 487-495.
- [5] Hampe R, Theelke B, Lümkmann N, et al. Fracture toughness analysis of ceramic and resin composite CAD/CAM material[J]. *Oper Dent*, 2019, 44(4): E190-E201.
- [6] Lima EL, Vieira WF Jr, do Amaral FLB, et al. Influence of universal adhesive system application strategies on the long-term bond strength to dentin of CAD-CAM restorative materials[J]. *J Adhes Sci Technol*, 2019, 33(24): 2696-2706.
- [7] Zhi L, Bortolotto T, Krejci I. Comparative *in vitro* wear resistance of CAD/CAM composite resin and ceramic materials[J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 115(2): 199-202.
- [8] Cui BC, Li J, Wang HN, et al. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic (sodium aluminum silicate) composites for dental restoration[J]. *J Dent*, 2017, 62: 91-97.
- [9] Kang LZ, Zhou Y, Lan JL, et al. Effect of resin composition on performance of polymer-infiltrated feldspar-network composites for dental restoration[J]. *Dent Mater J*, 2020, 39(5): 900-908.
- [10] Li J, Cui BC, Lin YH, et al. High strength and toughness in chromatic polymer-infiltrated zirconia ceramics[J]. *Dent Mater*, 2016, 32(12): 1555-1563.
- [11] Mironov RA, Georgiu IF, Solovev AA, et al. The effect of polymer concentration on thermophysical, structural and mechanical properties of siloxane-infiltrated silica ceramics[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(7): 9888-9895.
- [12] Wang F, Guo JS, Li K, et al. High strength polymer/silicon nitride composites for dental restorations[J]. *Dent Mater*, 2019, 35(9): 1254-1263.
- [13] Wang YH, Luo SH, Dou YX, et al. Preparation and mechanical properties of polymer infiltrated feldspar ceramic for dental restoration materials[J]. *J Polym Res*, 2022, 29(11): 464.
- [14] He LH, Swain M. A novel polymer infiltrated ceramic dental material[J]. *Dent Mater*, 2011, 27(6): 527-534.
- [15] Coldea A, Swain MV, Thiel N. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials [J]. *Dent Mater*, 2013, 29(4): 419-426.
- [16] Albero A, Pascual A, Camps I, et al. Comparative characterization of a novel CAD-CAM polymer-infiltrated-ceramic-network[J]. *J Clin Exp Dent*, 2015, 7(4): e495-e500.
- [17] Facenda JC, Borba M, Corazza PH. A literature review on the new polymer-infiltrated ceramic-network material (PICN)[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2018, 30(4): 281-286.
- [18] Lauvahutanon S, Takahashi H, Shiozawa M, et al. Mechanical properties of composite resin blocks for CAD/CAM[J]. *Dent Mater J*, 2014, 33(5): 705-710.
- [19] Ramos NDEC, Campos TM, Paz IS, et al. Microstructure characterization and SCG of newly engineered dental ceramics[J]. *Dent Mater*, 2016, 32(7): 870-878.

- [20] Awada A, Nathanson D. Mechanical properties of resin-ceramic CAD/CAM restorative materials[J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 114(4): 587-593.
- [21] Della Bona A, Corazza PH, Zhang Y. Characterization of a polymer-infiltrated ceramic-network material[J]. *Dent Mater*, 2014, 30(5): 564-569.
- [22] 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.
- [23] Silva CS, Henriques B, Novaes de Oliveira AP, et al. Micro-scale abrasion and sliding wear of zirconium-lithium silicate glass-ceramic and polymer-infiltrated ceramic network used in dentistry[J]. *Wear*, 2020, 448/449: 203214.
- [24] Borrero-Lopez O, Guiberteau F, Zhang Y, et al. Wear of ceramic-based dental materials[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019, 92: 144-151.
- [25] Homaei E, Farhangdoost K, Tsoi JKH, et al. Static and fatigue mechanical behavior of three dental CAD/CAM ceramics[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2016, 59: 304-313.
- [26] Lf G, Soares P, Werner A, et al. Fatigue performance of distinct CAD/CAM dental ceramics[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020, 103: 103540.
- [27] Aboushelib MN, Elsafi MH. Survival of resin infiltrated ceramics under influence of fatigue[J]. *Dent Mater*, 2016, 32(4): 529-534.
- [28] Elraggal A, Afifi RR, Alamoush 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.
- [29] Leung BT, Tsoi JK, Matinlinna JP, et al. Comparison of mechanical properties of three machinable ceramics with an experimental fluorophlogopite glass ceramic[J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 114(3): 440-446.
- [30] Takeshige F, Kawakami Y, Hayashi M, et al. Fatigue behavior of resin composites in aqueous environments[J]. *Dent Mater*, 2007, 23(7): 893-899.
- [31] 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.
- [32] Carvalho AO, Bruzi G, Giannini M, et al. Fatigue resistance of CAD/CAM complete crowns with a simplified cementation process[J]. *J Prosthet Dent*, 2014, 111(4): 310-317.
- [33] Belli R, Geinzer E, Muschweck A, et al. Mechanical fatigue degradation of ceramics versus resin composites for dental restorations[J]. *Dent Mater*, 2014, 30(4): 424-432.
- [34] Elsaka SE. Bond strength of novel CAD/CAM restorative materials to self-adhesive resin cement: the effect of surface treatments[J]. *J Adhes Dent*, 2014, 16(6): 531-540.
- [35] Flury S, Schmidt SZ, Peutzfeldt A, et al. Dentin bond strength of two resin-ceramic computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) materials and five cements after six months storage [J]. *Dent Mater J*, 2016, 35(5): 728-735.
- [36] Ustun S, Ayaz EA. Effect of different cement systems and aging on the bond strength of chairside CAD-CAM ceramics[J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 125(2): 334-339.
- [37] Schwenter J, Schmidli F, Weiger R, et al. Adhesive bonding to polymer infiltrated ceramic[J]. *Dent Mater J*, 2016, 35(5): 796-802.
- [38] 董林林. 不同酸蚀处理对CAD/CAM可切削陶瓷表面形貌及内部微观结构的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- Dong LL. Effect of different etching treatments on surface morphology and internal microstructure of CAD/CAM etchable ceramics[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [39] Barutçigil K, Barutçigil Ç, Kul E, et al. Effect of different surface treatments on bond strength of resin cement to a CAD/CAM restorative material[J]. *J Prosthodont*, 2019, 28(1): 71-78.
- [40] Campos F, Almeida CS, Rippe MP, et al. Resin bonding to a hybrid ceramic: effects of surface treatments and aging[J]. *Oper Dent*, 2016, 41(2): 171-178.
- [41] Chuenjit P, Suzuki M, Shinkai K. Effect of various surface treatments on the bond strength of resin luting agent and the surface roughness and surface energy of CAD/CAM materials[J]. *Dent Mater J*, 2021, 40(1): 16-25.
- [42] Lise DP, van Ende A, De Munck J, et al. Microten-

- sile bond strength of composite cement to novel CAD/CAM materials as a function of surface treatment and aging[J]. *Oper Dent*, 2017, 42(1): 73-81.
- [43] Maawadh AM, Almohareb T, Al-Hamdan RS, et al. Repair strength and surface topography of lithium disilicate and hybrid resin ceramics with LLLT and photodynamic therapy in comparison to hydrofluoric acid[J]. *J Appl Biomater Funct Mater*, 2020, 18: 2280800020966938.
- [44] Peumans M, Valjakova EB, De Munck J, et al. Bonding effectiveness of luting composites to different CAD/CAM materials[J]. *J Adhes Dent*, 2016, 18(4): 289-302.
- [45] Silva PNFD, Martinelli-Lobo CM, Bottino MA, et al. Bond strength between a polymer-infiltrated ceramic network and a composite for repair: effect of several ceramic surface treatments[J]. *Braz Oral Res*, 2018, 32: e28.
- [46] 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.
- [47] Lee Y, Kim JH, Woo JS, et al. Analysis of self-adhesive resin cement microshear bond strength on leucite-reinforced glass-ceramic with/without pure silane primer or universal adhesive surface treatment [J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015: 361893.
- [48] Stawarczyk B, Awad D, Ilie N. Blue-light transmittance of esthetic monolithic CAD/CAM materials with respect to their composition, thickness, and curing conditions[J]. *Oper Dent*, 2016, 41(5): 531-540.
- [49] 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.
- [50] Duran Í, Kaleli N, Ural Ç, et al. Evaluation of the light transmission of chairside polymer infiltrated hybrid ceramics in different shades and thicknesses [J]. *J Appl Biomater Funct Mater*, 2019, 17(1): 22808-00018807109.
- [51] Barutçigil K, Büyükkaplan UŞ. The effect of thickness and translucency of polymer-infiltrated ceramic-network material on degree of conversion of resin cements[J]. *J Adv Prosthodont*, 2020, 12(2): 61-66.
- [52] Alp G, Subaşı MG, Seghi RR, et al. Effect of shading technique and thickness on color stability and translucency of new generation translucent zirconia [J]. *J Dent*, 2018, 73: 19-23.
- [53] An JS, Son HH, Qadeer S, et al. The influence of a continuous increase in thickness of opaque-shade composite resin on masking ability and translucency [J]. *Acta Odontol Scand*, 2013, 71(1): 120-129.
- [54] Bilgin MS, Erdem A, Tanriver M. CAD/CAM endocrown fabrication from a polymer-infiltrated ceramic network block for primary molar: a case report [J]. *J Clin Pediatr Dent*, 2016, 40(4): 264-268.
- [55] Pop-Ciutrila IS, Ghinea R, Ducea D, et al. The effects of thickness and shade on translucency parameters of contemporary, esthetic dental ceramics[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2021, 33(5): 795-806.
- [56] Shiraiishi T, Watanabe I. Thickness dependence of light transmittance, translucency and opalescence of a ceria-stabilized zirconia/alumina nanocomposite for dental applications[J]. *Dent Mater*, 2016, 32(5): 660-667.
- [57] Passos SP, Kimpara ET, Bottino MA, et al. Effect of ceramic shade on the degree of conversion of a dual-cure resin cement analyzed by FTIR[J]. *Dent Mater*, 2013, 29(3): 317-323.
- [58] Alharbi N, Teerakanok S, Satterthwaite JD, et al. Quantitative nano-mechanical mapping AFM-based method for elastic modulus and surface roughness measurements of model polymer infiltrated ceramics [J]. *Dent Mater*, 2022, 38(6): 935-945.
- [59] Egilmez F, Ergun G, Cekic-Nagas I, et al. Comparative color and surface parameters of current esthetic restorative CAD/CAM materials[J]. *J Adv Prosthodont*, 2018, 10(1): 32-42.
- [60] Alharbi A, Ardu S, Bortolotto T, et al. In-office bleaching efficacy on stain removal from CAD/CAM and direct resin composite materials[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2018, 30(1): 51-58.
- [61] Karakaya İ, Cengiz E. Effect of 2 bleaching agents with a content of high concentrated hydrogen peroxide on stained 2 CAD/CAM blocks and a nanohybrid composite resin: an AFM evaluation[J]. *Biomed*

- Res Int, 2017, 2017: 6347145.
- [62] Seyidaliev A, Rues S, Evagorou Z, et al. Color stability of polymer-infiltrated-ceramics compared with lithium disilicate ceramics and composite[J]. J Esthet Restor Dent, 2020, 32(1): 43-50.
- [63] Karaokutan I, Yilmaz Savas T, Aykent F, et al. Color stability of CAD/CAM fabricated inlays after accelerated artificial aging[J]. J Prosthodont, 2016, 25(6): 472-477.
- [64] Sasany R, Eyüboğlu TF, Özcan M. Long-term effect of nanosized boric acid powder on optical properties of polymer infiltrated ceramic CAD-CAM material [J]. Coatings, 2023, 13(3): 483.
- [65] Spitznagel FA, Scholz KJ, Vach K, et al. Monolithic polymer-infiltrated ceramic network CAD/CAM single crowns: three-year mid-term results of a prospective clinical study[J]. Int J Prosthodont, 2020, 33(2): 160-168.
- [66] Chirumamilla G, Goldstein CE, Lawson NC. A 2-year retrospective clinical study of enamic crowns performed in a private practice setting[J]. J Esthet Restor Dent, 2016, 28(4): 231-237.
- [67] Spitznagel FA, Scholz KJ, Strub JR, et al. Polymer-infiltrated ceramic CAD/CAM inlays and partial coverage restorations: 3-year results of a prospective clinical study over 5 years[J]. Clin Oral Investig, 2018, 22(5): 1973-1983.
- [68] Lu T, Peng L, Xiong F, et al. A 3-year clinical evaluation of endodontically treated posterior teeth restored with two different materials using the CEREC AC chair-side system[J]. J Prosthet Dent, 2018, 119(3): 363-368.
- [69] Attia YS, Sherif RM, Zaghoul HH. Survival of Hybrid Laminate Veneers using two different tooth preparation techniques: randomized clinical trial[J]. Braz Dent J, 2021, 32(6): 36-53.
- [70] Oudkerk J, Eldafrawy M, Bekaert S, et al. The one-step no-prep approach for full-mouth rehabilitation of worn dentition using PICN CAD-CAM restorations: 2-yr results of a prospective clinical study[J]. J Dent, 2020, 92: 103245.

(本文编辑 王姝)

《儿童口腔科普绘本（全4册）》出版发行

书籍名称：儿童口腔科普绘本（全4册）

著者：王晴，沃嘉伟

出版社：东方出版社

内容简介：全套书是专为0~6岁儿童打造的儿童口腔科普绘本，共4册，精装彩绘，分别为《小海豚Xixi害怕去看牙》《鲛鱼Papa爱吃甜食》《小海胆Lulu想当牙医》《小章鱼Momo爱吃手》。本书旨在一站解决儿童的口腔难题，有效培养儿童自主爱护牙齿的意识，轻松帮助儿童养成良好的口腔卫生习惯，激发儿童爱护牙齿的兴趣，牢牢吸引儿童关注牙齿健康。本书内附专家导读，解读爱牙护齿的专业知识，对亲子阅读给予关键指导。此外，本书配有免费故事音频，由专业动画片配音演员朗读，绘声绘色，可以边看边听，让孩子认为看牙是非常有趣好玩的事情，以便每次都可以积极配合医生和护士完成牙齿检查和治疗。

