

# 树脂陶瓷复合材料的研究及临床应用现状

李琳 杨文 王晓东

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: 王晓东, Email: wangxd33@mail.sysu.edu.cn



王晓东

**【摘要】** 近年来新型树脂陶瓷复合材料已用于临床牙体修复和种植上部修复, 主要包括高温聚合的树脂基质混合高比例分散的陶瓷填料(RBC)和聚合物渗透陶瓷网络(PICN)两大类, 本文对树脂陶瓷复合材料的力学性能、美学效果及临床应用情况展开综述。结果显示, 树脂陶瓷复合材料力学性能介于复合树脂与陶瓷之间, 略高于

复合树脂但显著低于增强型玻璃陶瓷和氧化锆陶瓷。此类材料的优势在于弹性模量与牙本质接近, 同时相比陶瓷材料具有更佳的抗疲劳性。但在机械强度和断裂韧性方面仍有待进一步优化。树脂陶瓷复合材料的半透性不及增强型玻璃陶瓷, 颜色稳定性介于复合树脂与陶瓷之间。临床疗效方面, 目前主要用于嵌体、高嵌体和部分冠修复, 并在短期的临床随访中表现出与陶瓷材料相似的存留率。PICN可能更适合用于种植体支持全冠修复。此类材料的长期临床效果仍有待更多的证据支持。

**【关键词】** 树脂陶瓷复合材料; 复合树脂材料; 陶瓷材料; 力学性能; 半透性; 存留率

**基金项目:** 国家重点研发计划(2022YFC2410105)

**引用著录格式:** 李琳, 杨文, 王晓东. 树脂陶瓷复合材料的研究及临床应用现状[JOL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2024, 18(2): 80-88.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.02.002

## Current research status and clinical applications of resin-ceramic composites

Li Lin, Yang Wen, Wang Xiaodong

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: Wang Xiaodong, Email: wangxd33@mail.sysu.edu.cn

**【Abstract】** In recent years, a new type of resin matrix

ceramic composite material has already been applied to restore tooth deflection as well as to manufacture crowns on implants. It mainly includes two categories: Resin-based ceramic (RBC) and polymer-infiltrated ceramic network (PICN). This paper provided a review of the mechanical properties, aesthetic characteristics, and clinical applications of resin matrix ceramic composite materials. The results indicated that the mechanical properties of resin matrix ceramic composite materials were between resin composite and ceramics, which were slightly higher than that of resin but significantly lower than that of reinforced glass-ceramics and zirconia. The advantages of such materials included their elastic modulus being close to that of enamel, and better fatigue resistance compared to ceramics. However, further optimization is needed in terms of mechanical strength and fracture toughness. The transparency of resin matrix ceramic composite materials was not as good as that of reinforced glass-ceramics, and their color stability was between resin composite and ceramics. In terms of clinical performance, resin matrix ceramic composite materials have been mainly used for inlays, onlays, and partial crowns currently, exhibiting similar survival rates to ceramics in the short-term clinical follow-ups. PICN may be more suitable for implant-supported full crowns. More evidence is needed to support the long-term clinical performance of these materials.

**【Key words】** Resin-ceramic composites; Resin composites; Ceramics; Mechanical properties; Translucency; Survival rate

**Fund program:** National Key Research and Development Program of China(2022YFC2410105)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.02.002

近10年来口腔数字化印模及计算机辅助设计与制作(CAD/CAM)等数字化技术在口腔修复领域得到迅速的发展及广泛运用, 依赖于CAD/CAM技术的新型牙科修复材料也在不断发展革新。以增强型玻璃陶瓷、氧化锆陶瓷等为代表的无机陶瓷材料

表现出优良的力学性能和临床疗效。系统评价结果显示,全瓷单冠修复体临床5年存留率可达93.3%<sup>[1]</sup>,瓷嵌体及高嵌体的5年存留率达92%~95%,10年存留率可达91%<sup>[2]</sup>。但其较高的脆性导致陶瓷材料在缺陷/裂纹存在的条件下易发生慢速裂纹扩展进而发生疲劳失效<sup>[3]</sup>,同时其较高的硬度在临床上存在对颌天然牙过度磨损的风险<sup>[4]</sup>。此外,增强型玻璃陶瓷和氧化锆陶瓷的弹性模量高达95~200 GPa<sup>[5]</sup>,显著高于牙本质(10~30 GPa)<sup>[6]</sup>。对于嵌体、高嵌体或髓腔固位冠等嵌入牙体组织的修复体而言,在侧向力作用下可能导致应力集中,进而引起牙齿纵裂等严重并发症<sup>[7]</sup>。

为优化以上不足之处,近年来不断研发出各类新型树脂陶瓷复合材料。此类材料结合了陶瓷与树脂材料特点,力学性能与牙体组织更为接近,具有优良的粘接性及加工性能,同时无聚合收缩风险且无需结晶烧结。目前,此类材料主要应用于贴面、嵌体、高嵌体、全冠及种植上部修复,但相较于传统无机陶瓷材料仍存在不足之处,且长期临床疗效尚存在争议。本文旨在介绍此类新型CAD/CAM树脂陶瓷复合材料的研究进展及临床应用现状。

### 一、树脂陶瓷复合材料的研究现状

1. 分类及其成分结构:根据显微结构及聚合加工方式的不同,目前较为一致的观点是将树脂陶瓷复合材料分为高温聚合的树脂基质混合高比例分散的陶瓷填料(resin-based ceramic, RBC)和聚合物渗透陶瓷网络(polymer-infiltrated ceramic network, PICN)两大类<sup>[8-11]</sup>。

(1)RBC:此类材料的设计与传统复合树脂较为接近,由树脂基质结合高比例的陶瓷填料组成。早期应用于CAD/CAM的商业树脂复合材料如Paradigm MZ100(3M ESPE,美国),就是基于Z100直接修复复合

树脂材料制造并光固化而成<sup>[12]</sup>;之后Lava Ultimate(LU, 3M ESPE, 美国)取代了Paradigm MZ100, LU中包含约80%(wt)的氧化锆-二氧化硅纳米陶瓷填料,其树脂基质由转化及交联程度更高的氨基甲酸乙酯二甲基丙烯酸酯(urethane dimethacrylate, UDMA)组成,并以高温固化取代了光固化<sup>[8]</sup>(图1A~1B)。日本GC公司和Shofu公司分别研发了Cerasmart和Shofu Block HC。Cerasmart与LU等RBC材料中均具有陶瓷纳米颗粒填料(填料尺寸小于100 nm),因此又被称为“树脂纳米陶瓷”(resin nano ceramic, RNC)<sup>[13]</sup>。虽然这些树脂陶瓷材料在成分和固化条件上有所不同,但本质上均是基于UDMA基质,采用分散填料-树脂混合技术高温聚合制成<sup>[8,10]</sup>。随着高温高压聚合工艺的进步,自2016年以来愈来愈多新型RBC产品被研发并进入市场,包括Brilliant Crios(Coltene, 瑞士)、Tetric CAD(Ivoclar Vivadent, 列支敦士登)和Grandio Blocs(VOCO, 德国)等<sup>[14]</sup>,其中Grandio Blocks填料含量达86%(wt),高于目前市面上大多数的RBC产品。

(2)PICN:PICN是通过有机单体渗透预烧结的陶瓷支架网络,再经过高温聚合所获得的复合材料<sup>[15]</sup>,树脂与陶瓷网络具有三维互联性和相互连续性<sup>[16]</sup>,可有效地向各个方向传导并分散应力<sup>[8,17]</sup>。代表商品为Vita Enamic(VE, VITA Zahnfabrik, 德国),主要由UDMA和三甘醇二甲基丙烯酸酯(triethylene glycol dimethacrylate, TEDGMA)交联的聚合物[14%(wt)]与多空腔长石质陶瓷结构网络[86%(wt)]相互渗透构成<sup>[15]</sup>(图1C~1D)。长石质陶瓷是目前作为PICN的陶瓷支架最常用的材料,但自身力学性能较差。目前,有研究通过在聚合过程中对PICN的陶瓷成分进行修饰,从而获得改善力学性能或生物相容性等实验性PICN,例如对氧化锆粉末进行冷等静压、

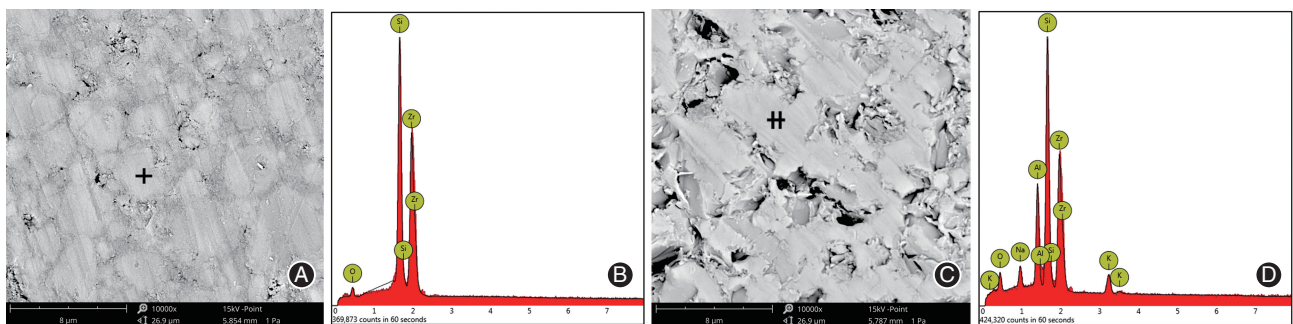


图1 两类树脂陶瓷复合材料微观结构及能谱分析 A:扫描电镜显示Lava Ultimate中无机陶瓷填料分散于树脂基质中;B:图A中+处的能谱分析结果显示陶瓷填料中含有SiO<sub>2</sub>及ZrO<sub>2</sub>颗粒;C:扫描电镜显示Vita Enamic中连续的陶瓷网架与树脂基质分别呈交联结构;D:图C中++处的能谱分析结果显示陶瓷网架中含有SiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>成分。

烧结和树脂聚合物浸润从而获得的氧化锆基PICN<sup>[18]</sup>。氧化锆基陶瓷近年来被认为是一种很有前途的PICN支架材料<sup>[19]</sup>, Li等<sup>[20]</sup>通过水热法在氧化锆基PICN材料表面制备氟磷灰石, 获得类似牙釉质的结构, 其硬度和杨氏模量分别为1.79和37.4 GPa, 并可促进人牙龈成纤维细胞的黏附和增殖, 具有一定临床应用前景。

2. 力学性能: 树脂陶瓷复合材料在力学性能上结合了树脂与陶瓷材料的特点<sup>[21]</sup>。虽然研究间测试方法及标准存在差异, 无法直接进行比较。但总体而言LU和Cerasmart的断裂强度略高于传统复合树脂及VE, 主要归因于其更高的单体转化率, 更完全的固化方式以及更高的填料比例<sup>[8]</sup>, 同时其弹性模量与牙本质非常接近(10~30 GPa)。尤其是近年来进入市场的Grandio Blocs等新型RBC商品, 在力学性能方面有明显提高, 表现在更高的弯曲强度及硬度上。与无机陶瓷相比, 虽然RBC的断裂强度仍显著低于增强型玻璃陶瓷和氧化锆陶瓷, 但RBC相比陶瓷材料具有更优异的抗疲劳性<sup>[22]</sup>, 可以防止循环加载过程中的裂纹扩展<sup>[23]</sup>。Yamaguchi等<sup>[24]</sup>评估了多种商用纳米树脂陶瓷复合材料的长期疲劳行为, 结果显示其表现出良好的甚至优于陶瓷材料的疲劳寿命。然而, 近来发现水储存环境会降低CAD/CAM RBC材料的断裂韧性, 这是因为填料与基质间界面发生水解导致, 其次水老化亦影响材料的循环疲劳行为, 使LU的慢裂纹扩展敏感性增加, 相反Cerasmart和Brilliant Crios降低, Grandio Blocs在水环境中则表现出优异的机械稳定性<sup>[25]</sup>。

PICN在无机填料的比上与RBC接近甚至更高, 表现出更高的弯曲模量和维氏硬度<sup>[10]</sup>, 即更高的材料刚性。但同时却表现出与之不相符的较低的弯曲强度及断裂韧性。有学者认为, 这一特性可能与其特殊的多孔隙陶瓷网络结构有关, 整体性的陶瓷网架为材料提供了刚性的支撑, 但陶瓷网架与其间的渗透树脂界面结合力不足可能降低弯曲强度<sup>[10]</sup>, 因此, 目前的商用PICN机械强度低仍是一个关键的缺点, 可能会限制其临床应用, 更高强度的PICN材料成为目前的研究重点。Ikemoto等<sup>[18]</sup>于2023年制备了一种高强度的氧化锆基PICN, 其弯曲强度高达346 MPa, 显著高于Cerasmart和VE, 这是因为树脂基质中添加的MDP单体可促进氧化锆骨架与渗透树脂之间的化学键合, 增强两者的相互交联作用。PICN的弹性模量介于牙釉质与牙本质之

间, 并因占主导地位的陶瓷网络具有与人牙釉质相似的耐磨性<sup>[17]</sup>, 使其具有替代牙釉质的应用潜力。近来, Eldafrawy等<sup>[26]</sup>就设计并制造了一种牙齿仿生功能梯度的PICN材料, 其弯曲强度和Weibull模量从类牙釉质区至类牙本质区递增, 而弯曲模量、硬度、脆性和陶瓷体积百分比则呈下降趋势, 模拟了天然牙的梯度力学特性。

临床常见的CAD/CAM树脂陶瓷复合材料的部分力学性能比较见表1。树脂陶瓷复合材料展现出优于传统复合树脂的力学性能, 表现出更高的材料强度和刚性, 且其硬度与长石质陶瓷相似, 相比其他陶瓷材料减少了磨耗对颌牙的风险; 而且, 相比于传统复合树脂与各种陶瓷材料, 树脂陶瓷复合材料的弹性模量与牙本质更为接近, 作为牙体修复材料具有显著优势。然而, 尚且缺乏树脂基质与无机陶瓷界面对力学性能影响的深入研究, 如何提高材料的水稳定性以及增强界面交联作用, 从而研发出力学性能更为优异的树脂陶瓷复合材料仍是未来研究的重点和挑战。

3. 美学效果: 稳定而优异的美学效果对于临床应用至关重要, 传统复合树脂在水热作用下发生老化变色一直以来是限制其长期成功率的主要问题之一<sup>[49]</sup>。目前, 对树脂陶瓷复合材料美学方面的研究主要涉及其半透性和颜色稳定性。半透性是修复牙齿美学效果的重要因素之一, 通常用半透性参数(translucency parameter, TP)表示, TP值越高表明其半透性越佳。Sen等<sup>[50]</sup>的研究结果表明, LU的TP值显著高于VE, 该研究认为前者的高透光率可能归因于其中的纳米级填料, 直径小于可见光波长的粒子从而减少了光的散射, 增加透射效果<sup>[51]</sup>, 而后的低TP值可能与其中更高的氧化铝含量[8.31%(wt)]相关<sup>[52]</sup>。但两者的TP值均低于增强型玻璃陶瓷材料。在颜色稳定性方面, Al Amri等<sup>[53]</sup>研究发现PICN材料的颜色稳定性优于RNC, 因其预烧结的陶瓷网架结构更加致密。一篇2023年的系统综述结果表明总体而言树脂陶瓷复合材料的颜色稳定性优于传统复合树脂, 但仍逊色于陶瓷材料<sup>[54]</sup>。

## 二、树脂陶瓷复合材料的临床应用情况

树脂陶瓷复合材料投入临床使用已有近10年时间, 包括牙体缺损修复及种植上部冠修复。已有多篇临床研究报道了树脂陶瓷复合材料临床疗效, 表2展示了CAD/CAM树脂陶瓷复合材料应用于固定修复的临床研究结果, 然而对其临床适应证选择

表1 椅旁计算机辅助设计与制作(CAD/CAM)加工材料的力学性能

材料种类	生产商	组成		弯曲强度 (MPa)	硬度 (HV)	弹性模量 (GPa)	断裂韧性 (MPa·m <sup>1/2</sup> )
		单体	填料				
PICN	Vita Enamic、 Vita Zahnfabrik	UDMA、TEGDMA	富含 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的长石质陶瓷	140~161 <sup>[10,27]</sup>	195~205 <sup>[28-29]</sup>	30.0 <sup>a</sup>	1.22~1.54 <sup>[30]</sup>
树脂基陶瓷	Lava Ultimate、 3M ESPE	Bis-GMA、UDMA、 Bis-EMA、TEGDMA	SiO <sub>2</sub> 、ZrO <sub>2</sub> 纳米颗粒	198~203 <sup>[10,31]</sup>	96~114 <sup>[23,28-29,32]</sup>	12.7~16.8 <sup>[33-35]</sup>	1.56~1.90 <sup>[30]</sup>
	Cerasmart、GC	Bis-MEPP、UDMA、 DMA	SiO <sub>2</sub> -glass、Ba-glass 纳米颗粒	176~228 <sup>[10,27,31]</sup>	62~80 <sup>[23,29,32,36]</sup>	8.4~8.5 <sup>[35,37]</sup>	1.06~1.24 <sup>[30]</sup>
	Shofu block HC、 Shofu	UDMA、TEGDMA	SiO <sub>2</sub> 、ZrSiO <sub>4</sub>	158~166 <sup>[10,31]</sup>	73~87 <sup>[30,33,37]</sup>	8.2 <sup>[37]</sup>	0.97~1.15 <sup>[30]</sup>
	Paradigm、 MZ1003M ESPE	Bis-GMA、TEGDMA	超细 SiO <sub>2</sub> 、ZrO <sub>2</sub> 颗粒	146 <sup>a</sup>	103 <sup>[23]</sup>	14.1 <sup>[23]</sup>	1.50~1.92 <sup>[30]</sup>
	Brilliant Crios、 Coltene	Bis-GMA、Bis-EMA、 TEGDMA	Ba-glass、SiO <sub>2</sub> 纳米颗粒	198 <sup>[14]</sup>	73~78 <sup>[38]</sup>	10.3 <sup>[14]</sup>	1.55~1.27 <sup>[39]</sup>
	Tetric CAD、 Ivoclar Vivadent	Bis-GMA、Bis-EMA、 TEGDMA、UDMA	SiO <sub>2</sub> 、Ba-glass	274 <sup>[14]</sup>	72~77 <sup>[38]</sup>	10.2 <sup>[14]</sup>	-
	Grandio Blocs、 VOCO	UDMA、DMA	SiO <sub>2</sub> 纳米颗粒、 Ba-glass	250~290 <sup>[14]</sup>	135~146 <sup>[38]</sup>	15.5 <sup>[14]</sup>	1.59~1.89 <sup>[30]</sup>
	复合树脂	Filtek Z350 XT、 3M ESPE	Bis-GMA、UDMA、 TEGDMA、Bis-EMA	SiO <sub>2</sub> 、ZrO <sub>2</sub> 纳米颗粒	119 <sup>[40]</sup>	70~78 <sup>[41]</sup>	5.3~6.3 <sup>[40,42]</sup>
长石质陶瓷	VITABLOCS Mark II、 Vita Zahnfabrik	长石质陶瓷 (SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Na <sub>2</sub> O、K <sub>2</sub> O、CaO、TiO <sub>2</sub> )		139~169 <sup>a</sup>	449~455 <sup>[44]</sup>	44.5~45.5 <sup>a</sup>	1.36~1.45 <sup>[45]</sup>
增强型玻璃陶瓷	IPS e.max CAD、 Ivoclar Vivadent	二硅酸锂玻璃陶瓷 (SiO <sub>2</sub> 、Li <sub>2</sub> O、K <sub>2</sub> O、MgO、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		530 <sup>a</sup>	452~731 <sup>[13]</sup>	58.0~110.0 <sup>[13]</sup>	2.11 <sup>a</sup>
氧化锆陶瓷	IPS e.max ZirCAD、 Ivoclar Vivadent	3 mol% 钇稳定四方多晶氧化锆 (3Y-TZP)		850~1200 <sup>a</sup>	1506~1579 <sup>[46]</sup>	201.4 <sup>[33]</sup>	3.60~5.10 <sup>a</sup>
牙釉质	-	-	-	-	300~500 <sup>[6]</sup>	40.0~100.0 <sup>[6]</sup>	0.65~2.50 <sup>[47]</sup>
牙本质	-	-	-	-	50~100 <sup>[6]</sup>	10.0~30.0 <sup>[6]</sup>	2.20~3.40 <sup>[48]</sup>

注:<sup>a</sup>数据来源于生产商。PICN为聚合物渗透陶瓷网络;UDMA为氨基甲酸酯二甲基丙烯酸酯;TEGDMA为三乙二醇二甲基丙烯酸酯;Bis-GMA为双酚A二甲基丙烯酸缩水甘油醚;Bis-EMA为乙氧基化双酚A二甲基丙烯酸酯;Bis-MEPP为双酚A乙氧基二甲基丙烯酸酯;DMA为二甲基丙烯酸。“-”为无数据。

以及各类修复体的成功率和主要失效模式目前尚无系统报道,在临床粘接等使用方式上也存在一定争议。

1. PICN:目前在临床上应用的PICN商品主要为VE。德国VITA公司对其适应证限定在:前牙或后牙的单冠、嵌体/高嵌体/部分冠、贴面、前牙或后牙的种植体冠。目前多篇临床研究结果表明VE作为单冠、部分冠、嵌体以及高嵌体修复材料在1~3年期临床随访中表现出较为理想的修复效果,存留率达93%~97%<sup>[57-58,61,65-66]</sup>。在少数失败病例中,修复体折裂和失粘接是主要的失效模式。一项临床研究发现,VE在临床应用2年后存在咬合面磨耗的情况,这可能导致修复体厚度进一步降低从而引发折裂<sup>[61]</sup>。考虑到材料自身强度不足,生产商及目前的临床指南建议后牙全冠及高嵌体釉面牙体预备

的最低厚度为1.0~1.5 mm,全冠肩台0.8~1 mm、轴面1~1.5 mm<sup>[66]</sup>。Gierthmuehlen等<sup>[67]</sup>的体外研究发现,釉面磨除量为1 mm的PICN后牙全冠具有良好的抗疲劳性能,且失效载荷高于2 000 N,因此可考虑作为一种保守的预备方式。其次,考虑到VE材料中较多的长石质陶瓷成分,对于粘接界面的处理目前仍推荐氢氟酸酸蚀+硅烷化处理,并推荐使用树脂水门汀粘接。Mine等<sup>[68]</sup>的1篇综述分析亦提出,粘接前的氢氟酸蚀刻可帮助PICN表面产生微机械固位,再通过进一步的硅烷化可确保其化学黏附。单纯喷砂处理或者树脂改良型玻璃离子的粘接效果可能不理想<sup>[55,58]</sup>。

种植单冠修复方面PICN的临床报道较少,在为数不多的几篇研究中,PICN后牙种植单冠取得了较好的短期(1~2年)临床疗效<sup>[69]</sup>,与硅酸锂增强型玻

表2 CAD/CAM树脂陶瓷复合材料在固定修复中的临床应用

年份	作者	修复体种类	材料	失败/并发症(%)					随访时间(月)	成功率(%)	存留率(%)
				样本量	继发龋	折裂	脱落	崩瓷			
2016	Chirumamilla等 <sup>[55]</sup>	单冠	Vita Enamic	45	7.1	无(1例隐裂基牙折裂)	7.1	无	24	无报道	树脂水门汀:96.8; 树脂改良型玻璃离子:92.9
2018	Zimmermann等 <sup>[56]</sup>	部分冠	Lava Ultimate	42	无报道	无(2例基牙折裂)	7.1	无报道	24	无报道	85.7
2018	Spitznagel等 <sup>[57]</sup>	嵌体、部分冠	Vita Enamic	103	无	3.8	无	5	36	嵌体:84.8 部分冠:82.4	嵌体:97.4 部分冠:95.6
2018	Lu等 <sup>[58]</sup>	高嵌体	Vita Enamic	67	无	无(1例基牙折裂)	1.5	无报道	36	无报道	97
2019	Tunac等 <sup>[59]</sup>	嵌体	Lava Ultimate	60	无	无	无	无报道	24	100	100
2019	Miura等 <sup>[60]</sup>	单冠(部分为RPD基牙)	Lava Ultimate Cerasmart Block HC KZR-CAD	60 547 (30个为RPD基牙)	无报道	1.6	12.8	无报道	36	71.7	96.4
2020	Spitznagel等 <sup>[61]</sup>	单冠	Vita Enamic	76	无	6.5	无	无报道	36	92.7	93
2020	Fasbinder等 <sup>[62]</sup>	高嵌体	Lava Ultimate	60	无报道	1.6	无报道	1.6	60	无报道	95
2020	Coşkun等 <sup>[63]</sup>	嵌体、高嵌体	Cerasmart	30	无	无	无	无报道	24	100	100
2022	Rocha等 <sup>[64]</sup>	嵌体、高嵌体	Grandio Blocs	30	无	3.33	3.33	3.33	24	90	90
2023	Deniz等 <sup>[65]</sup>	单冠	Vita Enamic	12	无	无	无	无报道	12	无报道	100

注:RPD为可摘局部义齿。

璃陶瓷后牙种植单冠相比,不论在功能性种植体修复评分(functional implant prosthodontic score, FIPS)还是患者满意度方面均未见明显差异<sup>[70]</sup>,但当前研究缺乏长期的临床随访结果支持。

综合文献及厂家资料,不建议在固定桥中使用VE,对于有较严重的磨牙症等不良口腔习惯的患者需要谨慎使用。然而近来一种使用PICN修复严重牙列磨损的技术——“One-step No-prep”被提出,其特点是不进行牙体预备及过渡修复阶段<sup>[71]</sup>。Oudkerk等<sup>[72]</sup>的临床研究采用此技术为7例全口重度牙列磨损进行咬合重建修复,2年随访期间修复体存留率达100%,仅少数较薄的修复体边缘发生崩瓷。但这一技术仍需要更多循证医学证据的支持。

2. RBC:RBC在固定修复方面的适应证与PICN材料相似。多项临床研究表明,LU在嵌体、高嵌体和部分冠中取得了理想的临床效果<sup>[59,62]</sup>。Fasbinder

等<sup>[62]</sup>一项随机对照临床试验显示,LU高嵌体的5年存留率高达95%,其临床效果与白榴石增强型玻璃陶瓷相同,且修复体折裂的发生率更低。Cerasmart及Grandio Blocs嵌体和高嵌体修复2年后的临床疗效也与CAD/CAM陶瓷修复体相似<sup>[63-64]</sup>。Miura等<sup>[60]</sup>的回顾性队列研究则分析了树脂陶瓷复合材料作为游离端缺失可摘局部义齿末端基牙(前磨牙)冠修复材料的临床效果,结果表明可摘局部义齿(removable partial denture, RPD)基牙修复体发生并发症的风险明显高于正常天然牙修复体,最常发生的为冠脱落,这提示在使用树脂陶瓷冠修复RPD基牙时需注意病例选择、咬合力以及适当的牙体预备。近来, Schlichting等<sup>[73]</sup>的一项随机对照试验着眼于比较LU与二硅酸锂增强型玻璃陶瓷贴面在牙列磨损患者中的临床修复效果,3年随访结果表明两者的临床存留率分别为84%(LU)和100%(IPS e.max CAD),LU

主要表现出一些可修复的崩缺(restorable chipping),在表面粗糙度和表面降解(surface degradation)等方面稍逊色增强型玻璃陶瓷贴面。

Grandio Blocs、Cerasmart等RBC材料被用于种植体上部结构的修复。Salem等<sup>[74]</sup>的前瞻性临床研究显示Cerasmart种植支持单冠2年成功率约为90%,在色泽和形貌稳定性上不及超透氧化锆陶瓷冠。Schepke等<sup>[75]</sup>的一项临床研究结果则发现LU与氧化锆种植体基台的脱粘接率在1年内达到80%,这可能与咀嚼过程中LU与氧化锆基台间过大的弹性模量差异有关。3M公司于2015年取消了LU的全冠和种植单冠指征。Schepke等<sup>[76]</sup>在后期的体外研究中发现,LU长期浸泡于水中会发生体积膨胀,从而导致失粘接。

综上所述,根据目前的临床随机对照研究及观察性研究结果,树脂陶瓷复合材料嵌体、高嵌体、部分冠中的存活率则为85.7%~100%,短期修复效果与陶瓷材料修复效果相似。脱落与部分崩折为最常见的失败方式,其修复的成功率与适应证的选择、粘接处理方式及病例选择均相关。PICN相比RBC材料可能更适合用于天然牙及种植单冠修复,但仍需要循证医学证据的支持。

### 三、总结与展望

树脂陶瓷复合材料兼具复合树脂与陶瓷的特点,其力学性能介于复合树脂与陶瓷之间,略高于复合树脂但显著低于增强型玻璃陶瓷和氧化锆陶瓷。从力学性能角度来看,树脂陶瓷复合材料最大的优势在于弹性模量与牙本质非常接近,同时相比陶瓷材料具有更佳的抗疲劳性。但是,在机械强度和断裂韧性方面仍有待进一步优化,对树脂陶瓷复合材料树脂-陶瓷界面的进一步深入研究可能是可行的研究方向。美学效果方面,树脂陶瓷复合材料的半透性不及增强型玻璃陶瓷,颜色稳定性介于复合树脂与陶瓷之间。临床疗效方面,目前主要用于嵌体、高嵌体和部分冠修复,并在短期的临床随访中表现出与陶瓷材料相似的存留率,考虑其与天然牙更为接近的力学性质与优良的粘接性能,对于嵌入牙体的修复体的材料选择可能更具有临床潜力。PICN相比RBC材料可能更适合用于种植体支持全冠修复。然而,目前的临床研究数量较少,随访期较短,对于新研发上市的CAD/CAM树脂陶瓷复合材料亦缺乏相关的临床研究效果验证,在临床适应证选择及牙体预备设计等方面仍需要更多证

据支持。

随着CAD/CAM技术取得重大进展,除了常见的减材制造,增材制造常称为3D打印技术,也开始被应用于义齿制作中,其通过逐层添加材料来制造三维结构对象。目前氧化锆和二硅酸锂玻璃陶瓷是3D打印牙科修复体的主要材料<sup>[77-78]</sup>,3D打印的树脂基材料多作为临时修复体使用,较少作为永久修复体材料<sup>[79]</sup>,VarseoSmile Crown plus(BEGO,德国)是第一个被批准用于最终修复的3D打印材料,可用于单牙修复如全冠、嵌体或贴面<sup>[80]</sup>,其由甲基丙烯酸酯基体和陶瓷填料组成,可被归类为树脂基陶瓷材料,但目前尚缺乏其临床循证资料<sup>[81]</sup>。PICN作为3D打印材料在制造上具有一定的技术敏感性,Sodeyama等<sup>[82]</sup>成功开发了一种可3D打印的PICN复合材料,其硬度和弹性模量与天然牙具有机械相容性,具有良好的弯曲强度和可接受的吸水性及溶解度,表明其作为间接修复材料的应用潜力。然而,目前尚缺乏对3D打印PICN复合材料的打印精度、磨损和疲劳行为的研究,且无相关的临床研究,仍需进一步研究完善其性能与临床应用价值。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

**作者贡献声明** 李琳:资料收集、文献查阅、文章撰写;扬文:技术支持、文章审核;王晓东:主题设计、文章审核与定稿

### 参 考 文 献

- [1] Pjetursson BE, Sailer I, Zwahlen M, et al. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part I: Single crowns [J]. Clin Oral Implants Res, 2007, 18 Suppl 3: 73-85. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2007.01467.x.
- [2] Morimoto S, Rebello de Sampaio FBW, Braga MM, et al. Survival rate of resin and ceramic inlays, onlays, and overlays: A systematic review and meta-analysis [J]. J Dent Res, 2016, 95 (9): 985-994. DOI: 10.1177/0022034516652848.
- [3] Ruse ND, Sadoun MJ. Resin-composite blocks for dental CAD/CAM applications [J]. J Dent Res, 2014, 93 (12): 1232-1234. DOI: 10.1177/0022034514553976.
- [4] Mundhe K, Jain V, Pruthi G, et al. Clinical study to evaluate the wear of natural enamel antagonist to zirconia and metal ceramic crowns [J]. J Prosthet Dent, 2015, 114 (3): 358-363. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.03.001.
- [5] Dal Piva AMO, Tribst JPM, Borges ALS, et al. CAD-FEA modeling and analysis of different full crown monolithic restorations [J]. Dent Mater, 2018, 34 (9): 1342-1350. DOI: 10.1016/j.dental.2018.06.024.
- [6] Zhang YR, Du W, Zhou XD, et al. Review of research on the mechanical properties of the human tooth [J]. Int J Oral Sci,

- 2014,6(2):61-69. DOI:10.1038/ijos.2014.21.
- [7] Veselinova M, Diamantopoulou S, Paximada C, et al. *In-vitro* comparison of fracture strength of endocrowns and overlays in endodontically treated teeth manufactured with monolithic lithium disilicate and zirconia [J]. *J Funct Biomater*, 2023, 14(8):422. DOI:10.3390/jfb14080422.
- [8] 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. DOI:10.1177/0022034516634286.
- [9] Spitznagel FA, Boldt J, Giertmuehlen PC. CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth [J]. *J Dent Res*, 2018, 97(10):1082-1091. DOI:10.1177/0022034518779759.
- [10] Ling L, Ma Y, Malyala R. A novel CAD/CAM resin composite block with high mechanical properties [J]. *Dent Mater*, 2021, 37(7):1150-1155. DOI:10.1016/j.dental.2021.03.006.
- [11] Skorulska A, Piszko P, Rybak Z, et al. Review on polymer, ceramic and composite materials for CAD/CAM indirect restorations in dentistry - application, mechanical characteristics and comparison [J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(7):1592. DOI:10.3390/ma14071592.
- [12] Nguyen JF, Migonney V, Ruse ND, et al. Properties of experimental urethane dimethacrylate - based dental resin composite blocks obtained via thermo-polymerization under high pressure [J]. *Dental Materials*, 2013, 29(5):535-541. DOI:10.1016/j.dental.2013.02.006.
- [13] Rexhepi I, Santilli M, D'Addazio G, et al. Clinical applications and mechanical properties of CAD-CAM materials in restorative and prosthetic dentistry: A systematic review [J]. *J Funct Biomater*, 2023, 14(8):431. DOI:10.3390/jfb14080431.
- [14] Marchesi G, Camurri Piloni A, Nicolin V, et al. Chairside CAD/CAM materials: Current trends of clinical uses [J]. *Biology (Basel)*, 2021, 10(11):1170. DOI:10.3390/biology10111170.
- [15] Coldea A, Swain MV, Thiel N. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials [J]. *Dent Mater*, 2013, 29(4):419-426. DOI:10.1016/j.dental.2013.01.002.
- [16] Furtado de Mendonca A, Shahmoradi M, Gouvêa CVD, et al. Microstructural and mechanical characterization of CAD/CAM materials for monolithic dental restorations [J]. *J Prosthodont*, 2019, 28(2):e587-e594. DOI:10.1111/jopr.12964.
- [17] Swain MV, Coldea A, Bilkhair A, et al. Interpenetrating network ceramic - resin composite dental restorative materials [J]. *Dent Mater*, 2016, 32(1):34-42. DOI:10.1016/j.dental.2015.09.009.
- [18] 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.
- [19] Gautam C, Joyner J, Gautam A, et al. Zirconia based dental ceramics: Structure, mechanical properties, biocompatibility and applications [J]. *Dalton Trans*, 2016, 45(48):19194-19215. DOI:10.1039/c6dt03484e.
- [20] Li K, Kou H, Rao J, 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.
- [21] Spitznagel FA, Horvath SD, Guess PC, et al. Resin bond to indirect composite and new ceramic/polymer materials: A review of the literature [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2014, 26(6):382-393. DOI:10.1111/jerd.12100.
- [22] Shembish FA, Tong H, Kaizer M, et al. Fatigue resistance of CAD/CAM resin composite molar crowns [J]. *Dent Mater*, 2016, 32(4):499-509. DOI:10.1016/j.dental.2015.12.005.
- [23] Lawson NC, Bansal R, Burgess JO. Wear, strength, modulus and hardness of CAD/CAM restorative materials [J]. *Dent Mater*, 2016, 32(11):e275-e283. DOI:10.1016/j.dental.2016.08.222.
- [24] Yamaguchi S, Kani R, Kawakami K, et al. Fatigue behavior and crack initiation of CAD/CAM resin composite molar crowns [J]. *Dent Mater*, 2018, 34(10):1578-1584. DOI:10.1016/j.dental.2018.07.002.
- [25] Wendler M, Stenger A, Ripper J, et al. Mechanical degradation of contemporary CAD/CAM resin composite materials after water ageing [J]. *Dent Mater*, 2021, 37(7):1156-1167. DOI:10.1016/j.dental.2021.04.002.
- [26] 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.
- [27] Lucsanzky IJR, Ruse ND. Fracture toughness, flexural strength, and flexural modulus of new CAD/CAM resin composite blocks [J]. *J Prosthodont*, 2020, 29(1):34-41. DOI:10.1111/jopr.13123.
- [28] Ludovichetti FS, Trindade FZ, Werner A, et al. Wear resistance and abrasiveness of CAD - CAM monolithic materials [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 120(2):318.e1-318.e8. DOI:10.1016/j.prosdent.2018.05.011.
- [29] Alamoush RA, Sung R, Satterthwaite JD, et al. The effect of different storage media on the monomer elution and hardness of CAD/CAM composite blocks [J]. *Dent Mater*, 2021, 37(7):1202-1213. DOI:10.1016/j.dental.2021.04.009.
- [30] Ling L, Lai T, Malyala R. Fracture toughness and brittleness of novel CAD/CAM resin composite block [J]. *Dent Mater*, 2022, 38(12):e308-e317. DOI:10.1016/j.dental.2022.11.012.
- [31] Ducke VM, Ilie N. Aging behavior of high-translucent CAD/CAM resin-based composite blocks [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021, 115:104269. DOI:10.1016/j.jmbbm.2020.104269.
- [32] Fuchs F, Schmidtke J, Hahnel S, et al. The influence of different storage media on Vickers hardness and surface roughness of CAD/CAM resin composites [J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2023, 34(3):13. DOI:10.1007/s10856-023-06713-7.
- [33] Belli R, Wendler M, de Ligny D, et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 1: Measurement of elastic constants and microstructural characterization [J]. *Dent Mater*, 2017, 33(1):84-98. DOI:10.1016/j.dental.2016.10.009.

- [34] Palacios T, Tarancón S, Abad C, et al. Saliva influence on the mechanical properties of advanced CAD/CAM composites for indirect dental restorations[J]. *Polymers (Basel)*, 2021, 13(5): 808. DOI:10.3390/polym13050808.
- [35] 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. DOI:10.1016/j.dental.2022.03.002.
- [36] Papathanasiou I, Kamposiora P, Dimitriadis K, et al. *In vitro* evaluation of CAD/CAM composite materials [J]. *J Dent*, 2023, 136:104623. DOI:10.1016/j.jdent.2023.104623.
- [37] Niem T, Youssef N, Wöstmann B. Influence of accelerated ageing on the physical properties of CAD/CAM restorative materials [J]. *Clin Oral Investig*, 2020, 24 (7) : 2415 - 2425. DOI: 10.1007/s00784-019-03101-w.
- [38] Grzebieluch W, Mikulewicz M, Kaczmarek U. Resin composite materials for chairside CAD/CAM restorations: A comparison of selected mechanical properties [J]. *J Healthc Eng*, 2021: 8828954. DOI:10.1155/2021/8828954.
- [39] Hampe R, Theelke B, Lümekemann N, et al. Fracture toughness analysis of ceramic and resin composite CAD/CAM material [J]. *Oper Dent*, 2019, 44(4):E190-E201. DOI:10.2341/18-161-L.
- [40] Rodrigues Junior SA, Zanchi CH, Carvalho RV, et al. Flexural strength and modulus of elasticity of different types of resin-based composites [J]. *Braz Oral Res*, 2007, 21 (1) : 16 - 21. DOI: 10.1590/s1806-83242007000100003.
- [41] Bahbishi N, Mzain W, Badeeb B, et al. Color stability and micro-hardness of bulk - fill composite materials after exposure to common beverages [J]. *Materials (Basel)*, 2020, 13 (3) : 787. DOI:10.3390/ma13030787.
- [42] Eweis AH, Yap AUJ, Yahya NA. Dynamic analysis of bulk-fill composites: Effect of food-simulating liquids [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2017, 74: 183-188. DOI: 10.1016/j.jmbm.2017.06.004.
- [43] Daabash R, Alshabib A, Alqahtani MQ, et al. Ion releasing direct restorative materials: Key mechanical properties and wear [J]. *Dent Mater*, 2022, 38 (12) : 1866 - 1877. DOI: 10.1016/j.dental.2022.09.007.
- [44] 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. DOI:10.4012/dmj.2014-208.
- [45] Belli R, Wendler M, Zorzin JI, et al. Practical and theoretical considerations on the fracture toughness testing of dental restorative materials [J]. *Dent Mater*, 2018, 34(1):97-119. DOI: 10.1016/j.dental.2017.11.016.
- [46] Winter A, Schurig A, Odenthal AL, et al. Impact of different layers within a blank on mechanical properties of multi-layered zirconia ceramics before and after thermal aging [J]. *Dent Mater*, 2022, 38(5):e147-e154. DOI:10.1016/j.dental.2022.03.009.
- [47] Soderholm KJ. Review of the fracture toughness approach [J]. *Dent Mater*, 2010, 26(2) : e63-e77. DOI:10.1016/j.dental.2009.11.151.
- [48] Ivancik J, Arola DD. The importance of microstructural variations on the fracture toughness of human dentin [J]. *Biomaterials*, 2013, 34(4):864-874. DOI:10.1016/j.biomaterials.2012.10.032.
- [49] Tuncdemir AR, Güven ME. Effects of fibers on color and translucency changes of bulk - fill and anterior composites after accelerated aging [J]. *Biomed Res Int*, 2018: 2908696. DOI: 10.1155/2018/2908696.
- [50] 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.
- [51] Lee YK. Influence of scattering/absorption characteristics on the color of resin composites [J]. *Dent Mater*, 2007, 23 (1) : 124-131. DOI:10.1016/j.dental.2006.01.007.
- [52] Noort V. Introduction to dental materials [M]. 4th ed. Edinburgh: Mosby/Elsevier, 2013.
- [53] Al 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.
- [54] Paolone G, Mandurino M, de Palma F, et al. Color stability of polymer-based composite CAD/CAM Blocks: A systematic review [J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 15(2):464. DOI:10.3390/polym15020464.
- [55] 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. DOI:10.1111/jerd.12206.
- [56] Zimmermann M, Koller C, Reymus M, et al. Clinical evaluation of indirect particle - filled composite resin CAD/CAM partial crowns after 24 months [J]. *J Prosthodont*, 2018, 27 (8) : 694 - 699. DOI:10.1111/jopr.12582.
- [57] 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. DOI: 10.1007/s00784-017-2293-x.
- [58] 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. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.04.022.
- [59] Tunac AT, Celik EU, Yasa B. Two-year performance of CAD/CAM fabricated resin composite inlay restorations: A randomized controlled clinical trial [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2019, 31 (6) : 627-638. DOI:10.1111/jerd.12534.
- [60] Miura S, Kasahara S, Yamauchi S, et al. A possible risk of CAD/CAM-produced composite resin premolar crowns on a removable partial denture abutment tooth: A 3 - year retrospective cohort study [J]. *J Prosthodont Res*, 2019, 63(1):78-84. DOI:10.1016/



- j.jpor.2018.08.005.
- [61] 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. DOI:10.11607/ijp.6548.
- [62] Fasbinder DJ, Neiva GF, Heys D, et al. Clinical evaluation of chairside Computer Assisted Design/Computer Assisted Machining nano-ceramic restorations: Five-year status [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2020, 32(2):193-203. DOI:10.1111/jerd.12516.
- [63] Coşkun E, Aslan YU, Özkan YK. Evaluation of two different CAD-CAM inlay-onlays in a split-mouth study: 2-year clinical follow-up[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2020, 32(2):244-250. DOI:10.1111/jerd.12541.
- [64] Rocha Gomes Torres C, Caroline Moreira Andrade A, Valente Pinho Mafetano AP, et al. Computer-aided design and computer-aided manufacturer indirect versus direct composite restorations: A randomized clinical trial [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2022, 34(5):776-788. DOI:10.1111/jerd.12820.
- [65] Deniz D, Aktas G, Guncu MB, et al. A randomized clinical trial of monolithic single-tooth crowns: 1-year preliminary results[J]. *Int J Prosthodont*, 2023, 36(4):426-435. DOI:10.11607/ijp.8269.
- [66] 中华口腔医学会口腔修复学专业委员会. 树脂陶瓷复合材料椅旁计算机辅助设计与辅助制作修复技术指南[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(9):895-898. DOI:10.3760/cma.j.cn112144-20220721-00399.
- [67] Gierthmuehlen P, Rübél A, Stampf S, et al. Effect of reduced material thickness on fatigue behavior and failure load of monolithic CAD/CAM PICN molar crowns [J]. *Int J Prosthodont*, 2019, 32(1):71-74. DOI:10.11607/ijp.5946.
- [68] Mine A, Kabetani T, Kawaguchi-Uemura A, et al. Effectiveness of current adhesive systems when bonding to CAD/CAM indirect resin materials: A review of 32 publications [J]. *Jpn Dent Sci Rev*, 2019, 55(1):41-50. DOI:10.1016/j.jdsr.2018.10.001.
- [69] Lambert F, Eldafrawy M, Bekaert S, et al. One-tooth one-time (1T1T), immediate loading of posterior single implants with the final crown: 2-year results of a case series [J]. *Int J Oral Implantol (Berl)*, 2020, 13(4):369-383.
- [70] Kunavisarut C, Jarangkul W, Pornprasertsuk-Damrongsri S, et al. Patient-reported outcome measures (PROMs) comparing digital and conventional workflows for treatment with posterior single-unit implant restorations: A randomized controlled trial [J]. *J Dent*, 2022, 117:103875. DOI:10.1016/j.jdent.2021.103875.
- [71] Mainjot AKJ. The one step-no prep technique: A straightforward and minimally invasive approach for full-mouth rehabilitation of worn dentition using polymer-infiltrated ceramic network (PICN) CAD-CAM prostheses [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2020, 32(2):141-149. DOI:10.1111/jerd.12432.
- [72] 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. DOI:10.1016/j.jdent.2019.103245.
- [73] Schlichting LH, Resende TH, Reis KR, et al. Ultrathin CAD-CAM glass-ceramic and composite resin occlusal veneers for the treatment of severe dental erosion: An up to 3-year randomized clinical trial [J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(2):158.e1-158.e12. DOI:10.1016/j.prosdent.2022.02.009.
- [74] Salem MT, El-Layeh M, El-Farag SAA, et al. Clinical assessment of different implant-supported esthetic crown systems fabricated with semi-digital workflow: Two-year prospective study [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2022, 34(8):1247-1262. DOI:10.1111/jerd.12961.
- [75] Schepke U, Meijer HJ, Vermeulen KM, et al. Clinical bonding of resin nano ceramic restorations to zirconia abutments: A case series within a randomized clinical trial [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2016, 18(5):984-992. DOI:10.1111/cid.12382.
- [76] Schepke U, Filius D, Lohbauer U, et al. Dimensional changes of CAD/CAM polymer crowns after water aging - An *in vitro* experiment [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2022, 128:105109. DOI:10.1016/j.jmbbm.2022.105109.
- [77] Wang W, Yu H, Liu Y, et al. Trueness analysis of zirconia crowns fabricated with 3-dimensional printing [J]. *J Prosthet Dent*, 2019, 121(2):285-291. DOI:10.1016/j.prosdent.2018.04.012.
- [78] Baumgartner S, Gmeiner R, Schönherr JA, et al. Stereolithography-based additive manufacturing of lithium disilicate glass ceramic for dental applications [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2020, 116:111180. DOI:10.1016/j.msec.2020.111180.
- [79] Revilla-León M, Meyers MJ, Zandinejad A, et al. A review on chemical composition, mechanical properties, and manufacturing work flow of additively manufactured current polymers for interdental restorations [J]. *J Esthet Restor Dent*, 2019, 31(1):51-57. DOI:10.1111/jerd.12438.
- [80] Schweiger J, Edelhoff D, Güth JF. 3D printing in digital prosthetic dentistry: An overview of recent developments in additive manufacturing [J]. *J Clin Med*, 2021, 10(9):2010. DOI:10.3390/jcm10092010.
- [81] Graf T, Erdelt KJ, Güth JF, et al. Influence of pre-treatment and artificial aging on the retention of 3D-printed permanent composite crowns [J]. *Biomedicines*, 2022, 10(9):2186. DOI:10.3390/biomedicines10092186.
- [82] Sodeyama MK, Ikeda H, Nagamatsu Y, et al. Printable PICN composite mechanically compatible with human teeth [J]. *J Dent Res*, 2021, 100(13):1475-1481. DOI:10.1177/00220345211012930.

(收稿日期:2023-11-30)

(本文编辑:王嫚)