

• 综述 •

树脂-陶瓷复合材料在后牙区种植冠部修复应用的研究进展

陈思凡 卓盈颖 陈姚 姜醒 郑志强 林捷

福建医科大学附属口腔医院特诊科 福州 350002

[摘要] 近年来树脂-陶瓷复合材料在后牙区种植冠修复中的应用逐步增多。本文综述了树脂-陶瓷复合材料的类型、力学性能和生物学特性，重点探讨其在种植修复中的基台设计和冠部形态优化等关键问题，分析该材料对种植体周围骨组织吸收的影响机制，并详细讨论表面处理技术和水门汀选择策略，为树脂-陶瓷复合材料在临床种植修复中的规范化应用提供理论依据和参考。

[关键词] 树脂-陶瓷复合材料；种植牙；冠修复；机械性能；应力分布；基台设计

[中图分类号] R783.4 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026623



本文链接

OSID 码

Research progress on the application of resin-ceramic composites in crown restoration of posterior dental implants*Chen Sifan, Zhuo Yingying, Chen Yao, Jiang Xing, Zheng Zhiqiang, Lin Jie**Dept. of VIP Dental Service, School and Hospital of Stomatology, Fujian Medical University, Fuzhou 350002, China**Supported by: Fujian Province Natural Science Foundation (2023J01701)**Correspondence: Lin Jie, Email: linjie.dds@gmail.com*

[Abstract] In recent years, the application of resin-ceramic composites in the restoration of implant-supported crowns in the posterior tooth region have been on the rise. This article comprehensively reviews the classification, mechanical properties, and biological characteristics of resin-ceramic composites. It specifically delves into key aspects in implant restoration, such as the design of abutments and the optimization of crown morphology when using these materials. The mechanism by which resin-ceramic composites affect the bone resorption around implants is analyzed in detail. Additionally, surface treatment techniques and strategies for selecting luting cements are elaborated. By summarizing current research findings, this review aims to provide a theoretical foundation and practical reference for the standardized application of resin-ceramic composites in clinical implant restoration.

[Key words] resin-ceramic composites; dental implants; crown restoration; mechanical property; stress distribution; abutment design

近年来，树脂-陶瓷复合材料（resin-ceramic composites, RCCs）凭借其独特的物理特性，在口腔修复中的应用逐步增多，成为口腔修复治疗的新选择。种植修复体承受复杂咬合力，导致其

在修复过程中可能发生修复体崩裂、脱粘接、折裂以及螺丝松动或断裂等并发症，影响修复体寿命，增加治疗失败的风险。与传统全瓷材料相比，RCCs弹性更大，有助于分散咬合力，减少骨组织和种植体应力集中。RCCs的应力缓冲特性和近似牙体的机械性能，使相关并发症减少^[1]。本研究回顾RCCs在种植冠修复中的研究现状，对其材料特性、临床表现、并发症及预防措施等方面进行探讨，为临床应用提供理论依据和指导。

[收稿日期] 2025-03-11；**[修回日期]** 2026-03-31

[基金项目] 福建省自然科学基金（2023J01701）

[第一作者] 陈思凡，硕士，Email: 645387152@qq.com

[通信作者] 林捷，副主任医师，博士，Email: linjie.dds@gmail.com

1 RCCs的类型

口腔RCCs的研发主要遵循三个目标：一是通过优化材料弹性模量，使其接近天然牙本质的生物力学特性，从而提升修复体与天然牙的功能适配性；二是突破传统玻璃基陶瓷（如二硅酸锂类 e.max CAD）及氧化锆陶瓷的加工局限性，开发更易切削的临床适用材料；三是便于修复体后期维护与修补。

RCCs主要分为两大类。第一类为高温聚合型树脂-陶瓷复合材料（resin-based ceramic，RBC），

材料体系以树脂为连续相基质，通过高温聚合工艺将高比例的陶瓷填料均匀分散于树脂相中。典型产品包括美国 3M 公司的 Lava Ultimate 与日本 GC 公司的 Cerasmart。第二类为聚合物渗透陶瓷网络（polymer-infiltrated ceramic network，PICN），采用独特的互穿双网络结构，长石质陶瓷骨架经毛细作用渗入树脂单体。典型产品为德国 Vita 公司的 Vita Enamic。由于陶瓷骨架的支撑作用，其弹性模量较第一类 RBC 高，约为 30 GPa^[2]，但弯曲强度（130~140 MPa）略低于 RBC^[3]。RCCs 和传统牙科陶瓷的物理性能和成分比较见表 1。

表 1 RCCs 和传统牙科陶瓷的物理性能和成分比较

Tab 1 Comparison of physical properties and composition between RCCs and traditional dental ceramics

材料类别	代表产品	厂家	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa	单冠抗折力/N	弹性模量/GPa	泊松比	化学成分
RCCs	LAVA Ultimate	3M ESPE	516 ^[4]	198 ^[4]	2 484 ^[5]	12 ^[6]	0.37 ^[6]	25%Bis-GMA、Bis-EMA、TEGDMA、UDMA，75%的 SiO ₂ 和 ZrO ₂ 填料 ^[7]
	Vita Enamic	VITA Zahnfabrik	370 ^[4]	131 ^[4]	1 952 ^[5]	37 ^[6]	0.24 ^[6]	25%UDMA、TEGDMA，75%的铝硅酸盐玻璃填料 ^[7]
氧化锆陶瓷	LAVA plus	3M ESPE	N/A	1 007 ^[8]	6 065 ^[4]	205 ^[9]	0.19 ^[9]	3 mol%Y ₂ O ₃ 稳定的四方晶 ZrO ₂ 陶瓷 ^[10]
二硅酸锂陶瓷	IPS e.max CAD	Ivoclar Vivadent AG	N/A	301 ^[4]	2 863 ^[5]	102 ^[6]	0.22 ^[6]	11.0%~19.0%Li ₂ O，0.0%~11.0%P ₂ O ₅ ，0.0%~5.0%Al ₂ O ₃ ，0.0%~13.0%K ₂ O，57.0%~80.0%SiO ₂ ，其中晶相 Li ₂ Si ₂ O ₅ 和 Li ₃ PO ₄ 占 60%，非晶相占 40% ^[11]
长石质陶瓷	CEREC Blocs	Dentsply Sirona	202 ^[12]	154 ^[13]	236 ^[5]	45 ^[14]	0.30 ^[14]	56%~64%SiO ₂ ，20%~23%Al ₂ O ₃ ，6%~9%Na ₂ O，6%~8%K ₂ O，0.3%~0.6%CaO，0%~0.1%TiO ₂ ，颜料<0.1% ^[13]

注：Bis-GMA 为双酚 A-二甲基丙烯酸缩水甘油酯，Bis-EMA 为双酚 A-乙氧基二甲基丙烯酸酯，TEGDMA 为三乙二醇二甲基丙烯酸酯，UDMA 为氨基甲酸酯二甲基丙烯酸酯，N/A 为不适用。

RCCs 以三维陶瓷网络为连续基质相，并含有占比高达 75%~90% 的无机强化相（如二氧化硅、氧化锆纳米颗粒）。因其无机填料含量接近传统陶瓷，美国牙医协会（American Dental Association，ADA）基于成分占比将其归类为陶瓷材料^[15]。然而材料学研究^[16]表明，该体系的力学行为本质上依赖有机树脂基质的黏弹性特性，与传统烧结陶瓷通过离子键/共价键结合的刚性结构不同，RCCs 的无机填料通过硅烷偶联剂与有机高分子链形成界面结合。这一独特结构导致 RCCs 在临床应用中存在显著限制：不可采用高温烧结工艺，其修复体成型需依赖计算机辅助设计/计算机辅助制造（computer aided design/computer aided manufacturing，CAD/CAM）切削或树脂聚合工艺。

RCCs 材料的优势体现在聚合物相对具有弹性，有助于防止在机械疲劳过程中出现的裂纹扩展。显微硬度测试^[17]表明，RCCs 较传统玻璃陶瓷

材料硬度更软，易于切削，切削时产生的微裂纹可通过填料阻挡效应和树脂基质韧性得到抑制。此外，材料可通过双固化复合树脂直接修补局部破损，为临床调改提供了便利的可修复性。

2 RCCs 力学性能的影响因素及抗压强度优化设计

材料的机械性能由成分和微观结构决定，不同类型的 RCCs 的力学性能存在差异。通常来说，RCCs 的弯曲强度为 150~270 MPa，弹性模量为 10~30 GPa^[15]。

2.1 RCCs 的力学性能影响因素

Bergamo 等^[17]对 Shofu Hard（精细结构的硅酸锆和甲基丙烯酸酯单体）、Cerasmart（长石陶瓷和甲基丙烯酸酯单体）、Enamic（长石陶瓷网络和甲基丙烯酸酯单体）及 Shofu HC（硅酸锆和甲基丙烯酸酯单体）4 种典型 RCCs 材料在不同载荷条件

下的疲劳寿命、失效模式、最大主应力及应变分布进行系统评估。基于此,本研究从疲劳性能、失效模式特征及断裂韧性机制三个方面,对这4种材料的力学性能的影响因素及抗压强度优化设计进行阐述。

2.1.1 疲劳测试与弹性模量

与常规玻璃陶瓷相比,RCCs因脆性较低而具有较高的损伤容限。断裂韧性测试^[18]显示,RCCs裂纹形成量较玻璃陶瓷减少约60%。这一特性与其较低的弹性模量和优异的能量吸收能力直接相关:较低的弹性模量(如非连续纳米填充体系Shofu Hard和Cerasmart)使材料在受力时能产生更大弹性形变,通过裂纹偏转增韧效应改变裂纹扩展路径,同时高能量吸收能力增强了材料的R曲线行为(即断裂韧性随裂纹扩展而增加的特性)。具体而言,非连续纳米填充体系凭借纳米级陶瓷填料与树脂基质的分散结构,相较于连续陶瓷网络体系(如Enamic)表现出更优的弹塑性变形能力与冲击吸收性能,这种结构差异使其能够有效降低临界缺陷处的应力集中,从而提高裂纹萌生的临界载荷,具有更优异的抗疲劳破坏能力。

2.1.2 失效模式

种植修复体的失效模式主要包括内聚断裂(如崩瓷)、分层剥离、基台暴露性陶瓷断裂及多块断裂(灾难性失效)。其中崩瓷与分层剥离是最常见的临床失效形式。不同材料的失效起始载荷与裂纹扩展路径存在显著差异。Shofu HC与Enamic主要为内聚断裂,起始载荷约为600 N,裂纹均始于咬合压痕区,引发亚表面损伤,并向修复体的近中及颈缘方向扩展;而Shofu Hard与Cerasmart的断裂多发生于高载荷(>1 000 N)条件下,裂纹从压痕区向修复体边缘延伸,最终导致基台暴露性断裂,断口可见放射纹、停滞线及扭曲放射纹等典型脆性断裂特征。这一现象与有限元分析结果高度吻合,最大主应力及应变的分布峰值区域正是裂纹萌生的咬合面,并沿近中邻接区及颈缘方向形成应力集中扩展路径。这揭示了修复体失效的力学本质与结构薄弱环节。

2.1.3 断裂韧性

Swain等^[19]对陶瓷体积分数为72%和64%的PICN材料(如Enamic)的断裂韧性进行测量,单边V型缺口梁(single edge V-notched beam, SEVNB)法测得断裂韧性为1~1.5 MPa·m^{1/2},压痕强度弯曲法(indentation strength bending me-

thod, ISB)测得断裂韧性为1.4~1.9 MPa·m^{1/2}。这些数值均显著低于Nguyen等^[20]采用英国国家物理实验室(The National Physical Laboratory, NPL)法获得的结果。该差异可能源于测试原理的本质区别,NPL法测量的是材料在稳定裂纹扩展后的韧性值,而SEVNB法测量的是裂纹萌生阶段的初始韧性值。另外,研究^[8]进一步通过强度与断裂韧性数据估算的临界缺陷尺寸表明,PICN材料可能也存在典型的R曲线行为,这一现象可能与材料微观结构中树脂相的塑性变形及陶瓷网络的裂纹偏转机制密切相关。

2.2 RCCs力学性能的影响因素及抗压强度优化设计

尽管不同RCCs的基础组成及聚合模式具有相似性,但其力学性能具有显著差异,其原因可能源于多维度因素(如填料特性、微观结构等)^[21]。这些因素通过影响材料内部的应力传导路径、裂纹扩展阻力及界面载荷分布,最终导致不同RCCs系统在力学性能上表现不同。

2.2.1 填料

RCCs的机械性能差异与填料特性密切相关。填料的粒径、空间分布、重量占比及其与树脂基体的界面结合方式,均会显著影响材料的界面黏附强度及内部孔隙缺陷分布^[17]。小尺寸填料可通过微裂纹偏转效应提升断裂韧性,高密度填料则能形成刚性骨架网络以增强弯曲强度。在相同疲劳条件测试下时,传统填料体系易发生严重亚表面损伤与体积损失,而纳米颗粒/团簇构成的体系仅出现微小碎片破裂^[21]。这一差异可能源于纳米填料与树脂基体通过硅烷偶联剂形成的高强度界面结合,其既能抑制裂纹扩展,又能通过“填料-树脂协同耗能机制”减少疲劳损伤累积。

2.2.2 微观结构

聚合物基复合体系的微观结构劣化的关键机制可能与软质聚合物基体的磨耗损伤、增强陶瓷相的断裂/颗粒脱落相关。这类损伤会为裂纹提供扩展通道,促使裂纹从材料表面向内部延伸,进而降低其疲劳抗力^[21]。Enamic系统所采用的PICN结构中,树脂基体固化过程产生的收缩应力会在陶瓷骨架边界形成微观缺陷,这种应力集中效应会在高载荷循环下加速裂纹萌生与扩展,对材料的疲劳性能产生显著负面影响^[16]。该现象揭示了聚合物基复合材料中陶瓷-树脂界面相容性与固化应力调控对疲劳寿命的关键影响。

2.2.3 桥联结构

高陶瓷体积分复合材料中径向裂纹形成时, 聚合物网络跨越裂纹形成桥联结构, 从而提升断裂韧性。这种聚合物桥联引起的裂纹闭合效应受多重因素调控, 如聚合物与陶瓷基体的结合质量、聚合物内残余应力水平、单体/低聚物的聚合转化程度、桥联聚合物的屈服应力与断裂应变等^[19]。

3 树脂-陶瓷种植冠修复的应力优化和对骨组织吸收的影响

由于缺乏牙周膜, 种植体与骨组织直接接触, 咬合载荷通过植体直接传递到周围组织, 影响修复体及周围骨的应力传递及骨吸收, 因此植体的咬合载荷是决定种植体成功的关键因素之一^[22]。与氧化锆冠相比, RCCs在缓冲种植体周围骨内应力方面具有更好的表现^[23]。但种植体-骨界面的应力状态还受修复冠设计、材料力学特性等多因素调控^[24], 这种多维度影响机制要求临床修复中需综合考量材料选择与结构设计, 以优化种植体周围的应力传导路径。

3.1 牙冠材料及厚度的影响

树脂-陶瓷复合冠不同厚度的设计, 会影响修复体的力学性能。不同厚度RCCs牙冠对种植修复体的力学影响研究^[25]表明, 随着牙冠厚度的增加, 修复体内部的最大主应力逐步减小。这一现象的原因在于RCCs的弹性模量与天然牙本质高度接近, 当牙冠材料厚度增加时, 较厚的材料层能通过树脂基质的塑性变形吸收更多咬合能量, 同时陶瓷填料构成的微观结构可有效分散应力集中区域, 从而显著降低修复体承受的峰值应力。张思佳等^[23]采用数字光弹法研究发现, 与氧化锆冠相比, RCCs冠在垂直与斜向加载条件下, 应力达到峰值的时间显著延长, 具有更优异的骨应力缓冲能力。然而, Kaleli等^[26]采用静态有限元研究发现, 尽管RCCs具有较低的应力值, 但不同牙冠材料在种植体和周围骨中的应力分布相似, 这表明牙冠材料的变化对周围骨的静态应力分布影响较小。Martins等^[27]同样认为, 在相同载荷条件下, 不同弹性模量的材料对缓冲种植体周围骨的应力效应无显著影响。

3.2 基台设计的影响

在基台选择方面, 个性化基台较成品基台可明显降低修复体内部应力^[25]。这一现象源于个性化基台通过增加种植冠与基台的接触面积, 有效

减少了冠-基台界面的应力集中, 实现了垂直应力的高效缓冲。Lin等^[28]研究发现, 2 mm厚的Vita Enamic RCCs牙冠与个性化基台组合时, 种植冠修复体的抗弯强度达到最大值, 其断裂载荷显著高于搭配成品基台的修复体。Taha等^[29]研究个性化基台设计中不同材料对RCCs冠内部应力分布的影响, 结果表明氧化锆基台与聚醚醚酮基台对RCCs冠内部应力分布的影响无明显差异。这可能是尽管聚醚醚酮材料因其低弹性模量可降低修复体内应力, 但支撑力不足会对牙冠产生额外压力, 导致未起到显著增加缓冲应力的作用。

3.3 种植体设计的影响

Elfadaly等^[4]比较了不同种植修复体设计下RCCs冠周围骨的平均微应变值, 结果显示, 标准种植体设计的周围骨微应变值最高, 双微型种植体次之, 短-宽种植体最低。短-宽种植体通过双重机制优化应力传导, 一方面, 增大的种植体直径与短柱状结构提升了自身结构强度, 有效降低非轴向载荷引发的扭矩效应; 另一方面, 扩大的种植体-树脂冠接触面积及修复平台直径, 通过增加力传导路径的分散性, 减少了应力集中现象。该研究揭示了种植体几何设计与骨界面微应变的量化关系, 为临床选择低应力传导的种植修复方案提供了力学依据。

4 粘接对RCCs的影响

种植冠的固位方式主要包括粘接固位、螺丝固位和摩擦固位三种类型。在临床应用中, 脱粘接是种植体支持式陶瓷单冠及固定桥较为常见的并发症^[30], 这可能与水门汀材料、修复体表面预处理方式、修复体粘接环境及基台材料等多因素相关。

4.1 水门汀的选择

Bjelopavlovic等^[31]测试了5种水门汀对RCCs在钛种植体基牙上的固位力, 结果显示RelyX Unicem与Fujicem对RCCs的粘接固位力最优。高抗压强度水门汀可显著提升RCCs的断裂载荷^[32]。随着粘接剂抗压强度的递增, 牙冠的断裂载荷呈同步增长^[33]。粘接剂的性能对种植冠修复体的固位力及抗折性能具有显著影响, 当使用抗压强度较高的粘接剂时, RCCs材料的抗折性能明显增强, 这一现象可能与粘接界面的应力分散能力及材料协同承载效应密切相关^[22]。

4.2 预处理方式的影响

不同类型的RCCs在表面预处理方式上具有显著差异。Vita Enamic (RBC类材料)经HF酸蚀后再进行硅烷化处理,获得的粘接强度最高;而Lava Ultimate (PICN类材料)HF酸蚀与硅烷处理联用相比单独HF酸蚀,在提升粘接效果上并无明显优势^[34]。张皓等^[35]研究发现,氧化铝和玻璃珠喷砂能显著改变Vita Enamic和Lava Ultimate的表面微观形貌,采用110 μm 玻璃珠和50 μm 氧化铝进行喷砂处理,既能有效提升材料的粘接强度,又可避免产生微裂纹。此外,在粘接氧化锆基台种植体时,使用氧化锆预处理剂能显著增强自粘接水门汀及其他粘接水门汀的抗剪切强度^[36],这为临床根据不同RCCs材料特性选择合适的预处理方案提供了重要依据。

4.3 粘接环境的影响

口腔温度环境变化也会对RCCs粘接产生一定影响。Çakmak等^[37]研究发现,热循环处理会显著改变RCCs的水接触角、表面粗糙度及显微硬度,从而影响RCCs性能。

4.4 基台材料的影响

Schepke等^[38]对RCCs与个性化氧化锆基台的粘接成功率进行了为期1年的随访研究,结果显示该组合的粘接失败率较高。进一步分析表明,这可能与RCCs在水环境中的尺寸稳定性相关。材料暴露于口腔唾液环境,其体积变化幅度达水门汀可补偿范围的10倍以上,这种显著的尺寸差异在粘接界面产生持续的应力集中,最终导致RCCs冠与氧化锆基台的粘接失效^[39]。该研究揭示了RCCs在长期临床应用中因吸水性引发的界面稳定性问题,为优化种植修复体的材料组合提供了重要参考。

5 修复成功率

近年来,数字化口腔技术的迅猛发展为传统牙冠制造工艺提供了新的技术路径,基于CAD/CAM切削或3D打印的半数字化工作流程已成为主流,其中氧化锆、RCCs和聚醚醚酮因良好的力学适配性被广泛应用于种植体支持冠修复^[40]。然而,一项针对种植体支持单冠临床性能的系统综述分析显示,第一代RCCs系统的5年折裂率高达33%,显著高于二硅酸锂玻璃陶瓷(9%)和氧化锆(9%)等全陶瓷系统^[41]。其原因可能与牙冠材

料、基台设计、水老化等因素有关。

5.1 牙冠材料的影响

影响种植单冠临床成功率的一个重要因素是牙冠材料的力学性能^[42]。Bergamo等^[17]对Shofu Hard、Cerasmart、Enamic和Shofu HC这4种RCCs材料制作的种植体支持磨牙冠的体外疲劳性能进行评估,结果显示,在300 N生理载荷条件下,4种材料冠的存留率无显著差异;而当载荷提升至800 N时,Shofu HC和Enamic材料冠的存留率显著下降。这表明4种RCCs材料冠在磨牙生理负荷下均具有较高的存留率,而Shofu Hard和Cerasmart在较高负荷下的表现优于Enamic和Shofu HC。这种差异可能源于材料微观结构的性能优势,Shofu Hard和Cerasmart含有二氧化硅/氧化锆纳米颗粒及纳米团簇,可实现无机成分含量超70%的高填料体系^[16],这种小尺寸颗粒与高填料含量的组合不仅增强了材料的刚性骨架网络,还通过微裂纹偏转效应提升了抗疲劳断裂能力,使其在高载荷条件下仍能保持较好的结构稳定性。

5.2 基台设计的影响

种植单冠的修复成功率还与种植体-基台组件的应力分布及稳定性密切相关。Gökçimen等^[43]研究发现,无论牙冠采用何种材料,氧化锆基台的应力均略高于钛基台,这提示氧化锆基台可能面临更高的机械失效风险。Südbeck等^[44]分析不同种植冠材料在钛基台与无钛基台条件下的修复成功率,结果表明,使用钛基台的RCCs修复体未出现冠破裂、螺丝松动或结构破坏等问题,而无钛基台的RCCs修复成功率仅为33%。这一结果表明,钛基台凭借其优异的力学相容性与弹性形变能力,可有效优化种植体-基台界面的载荷分布、降低修复体失效风险,为RCCs种植单冠的长期稳定性提供关键支撑。

5.3 水老化的影响

水分子会引发树脂基质与填料颗粒间硅氧烷键的水解降解,在裂纹扩展过程中造成界面黏性失效而脱落。另外,填料-基质界面的水解降解会显著增强材料对亚临界裂纹扩展的敏感性,进而降低修复体生存率。聚甲基丙烯酸酯类树脂基质的吸水行为与其分子结构密切相关。聚合物链间的孔隙缺陷及网络中亲水性基团/化学键的存在,为水分浸入提供了通道,水分子渗入后会迅速引发材料溶胀与塑化,导致机械性能整体下降。树脂基质的吸水程度受双重因素调控。一方面,聚

合物网络中基团的亲水性及溶胀形变能力起决定性作用,不同单体因亲水性差异及形成致密网络能力的不同,表现出不同的吸水特性;另一方面,填料含量显著影响吸水率,无机颗粒占比越高,可吸水的聚合物总量越少,如高填料RCCs材料的吸水率比低填料材料低40%~50%^[45]。值得注意的是,Lava Ultimate虽具有较高的填料含量,但其吸水率却远超其他测试材料,这可能与其独特的树脂基质化学结构有关。Rosentritt等^[8]研究表明,高填料材料Grandio Blocs因具备高填料占比、均匀粒径分布及优化的树脂基质,在动态载荷下的疲劳性能显著优于低填料Brilliant Crios,其微观结构可有效抵御水环境下的水解与机械劣化。

6 总结

RCCs作为种植冠修复体,相较于其他陶瓷材料,具有与牙本质相似的物理性能,能减缓咬合力冲击,减少植体周围骨吸收的风险。通过使用解剖学形态的基台、树脂水门汀粘接以及表面处理,可降低RCCs冠折裂风险,提高修复成功率。RCCs作为种植冠修复体时,种植基台和冠修复体设计及其临床效果评估还有待进一步研究。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

7 参考文献

- [1] Rosentritt M, Hahnel S, Engelhardt F, et al. *In vitro* performance and fracture resistance of CAD/CAM-fabricated implant supported molar crowns[J]. Clin Oral Invest, 2017, 21(4): 1213-1219.
- [2] Capa N, Say EC, Celebi C, et al. Microtensile bond strengths of adhesively bonded polymer-based CAD/CAM materials to dentin[J]. Dent Mater J, 2019, 38(1): 75-85.
- [3] 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.
- [4] Elfadaly LS, Khairallah LS, Al Agroudy MA. Peri-implant biomechanical responses to standard, short-wide, and double mini implants replacing missing molar supporting hybrid ceramic or full-metal crowns under axial and off-axial loading: an *in vitro* study[J]. Int J Implant Dent, 2017, 3(1): 31.
- [5] AlHelal AA. Biomechanical behavior of all-ceramic endocrowns fabricated using CAD/CAM: a systematic review[J]. J Prosthodont Res, 2024, 68(1): 50-62.
- [6] 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.
- [7] Lubauer J, Belli R, Schünemann FH, et al. Inner marginal strength of CAD/CAM materials is not affected by machining protocol[J]. Biomater Investig Dent, 2021, 8(1): 119-128.
- [8] Rosentritt M, Krifka S, Preis V, et al. Dynamic fatigue of composite CAD/CAM materials[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2019, 98: 311-316.
- [9] D'Souza K, Aras M. Three-dimensional finite element analysis of the stress distribution pattern in a mandibular first molar tooth restored with five different restorative materials[J]. J Indian Prosthodont Soc, 2017, 17(1): 53.
- [10] Gracis S, Thompson VP, Ferencz JL, et al. A new classification system for all-ceramic and ceramic-like restorative materials[J]. Int J Prosthodont, 2015, 28(3): 227-235.
- [11] Ivoclar Vivadent. IPS e.max CAD[EB/OL]. [2021-04-14]. https://www.ivoclar.com/en_li/products/digital-processes/ips-e.max-cad.
- [12] 喻璐璐, 顾卫平. 三种椅旁CAD/CAM全瓷高嵌体的抗压强度[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(26): 4128-4132.
- [12] Yu LL, Gu WP. Compressive strength of three all-ceramic chairside CAD/CAM onlays[J]. Chin J Tiss Eng Res, 2018, 22(26): 4128-4132.
- [13] Li Z, Zhu JX, Xu YX, et al. Biomechanical behaviors of molars restored with endocrowns composed of different materials[J]. Materials, 2025, 18(2): 250.
- [14] Švančárková A, Galusková D, Nowicka AE, et al. Effect of corrosive media on the chemical and mechanical resistance of IPS e.max® CAD based Li₂Si₂O₅ glass-ceramics[J]. Materials (Basel), 2022, 15(1): 365.
- [15] Ruse ND, Sadoun MJ. Resin-composite blocks for dental CAD/CAM applications[J]. J Dent Res,

- 2014, 93(12): 1232-1234.
- [16] 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.
- [17] Bergamo ETP, Yamaguchi S, Coelho PG, et al. Survival of implant-supported resin-matrix ceramic crowns: in silico and fatigue analyses[J]. Dent Mater, 2021, 37(3): 523-533.
- [18] Schlenz MA, Schmidt A, Rehmann P, et al. Fatigue damage of monolithic posterior computer aided designed/computer aided manufactured crowns[J]. J Prosthodont Res, 2019, 63(3): 368-373.
- [19] Swain MV, Coldea A, Bilkhair A, et al. Interpenetrating network ceramic-resin composite dental restorative materials[J]. Dent Mater, 2016, 32(1): 34-42.
- [20] Nguyen JF, Ruse D, Phan AC, et al. High-temperature-pressure polymerized resin-infiltrated ceramic networks[J]. J Dent Res, 2014, 93(1): 62-67.
- [21] Wendler M, Kaizer MR, Belli R, et al. Sliding contact wear and subsurface damage of CAD/CAM materials against zirconia[J]. Dent Mater, 2020, 36(3): 387-401.
- [22] Flanagan D. Bite force and dental implant treatment: a short review[J]. Med Devices (Auckl), 2017, 10: 141-148.
- [23] 张思佳, 曾剑玉, 李佳, 等. 三种单冠对种植体周围骨应力分布影响的光弹分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2018, 53(1): 30-35.
- Zhang SJ, Zeng JY, Li J, et al. Photoelastic analysis of the influence of prosthetic material on the stress distribution in bone around implant[J]. Chin J Stomatol, 2018, 53(1): 30-35.
- [24] de Oliveira Rigotti RL, Tardelli JDC, Dos Reis AC, et al. Influence of dental implant/mini-implant design on stress distribution in overdentures: a systematic review[J]. Oral Maxillofac Surg, 2024, 28(2): 515-527.
- [25] 李杰森, 林珍香, 吴东, 等. 不同全瓷材料和厚度的种植牙冠应力分布有限元分析[J]. 口腔疾病防治, 2021, 29(3): 166-170.
- Li JS, Lin ZX, Wu D, et al. Finite element analysis of the stress distribution of dental implant crowns with different all-ceramic materials and thicknesses[J]. J Prevent Treat Stomatol Dis, 2021, 29(3): 166-170.
- [26] Kaleli N, Sarac D, Külünk S, et al. Effect of different restorative crown and customized abutment materials on stress distribution in single implants and peripheral bone: a three-dimensional finite element analysis study[J]. J Prosthet Dent, 2018, 119(3): 437-445.
- [27] Martins RG, de Castro TS, Dib LL, et al. Influence of restorative material on the distribution of loads to the bone in hybrid abutment crowns: *in vitro* study[J]. Medicina (Kaunas), 2023, 59(7): 1188.
- [28] Lin J, Cai P, Zhuo Y, et al. Effect of abutment design on fracture resistance of resin-matrix ceramic crowns for dental implant restoration: an *in vitro* study[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 410.
- [29] Taha D, Cesar PF, Sabet A. Influence of different combinations of CAD-CAM crown and customized abutment materials on the force absorption capacity in implant supported restorations—*in vitro* study[J]. Dent Mater, 2022, 38(1): e10-e18.
- [30] Chantler JGM, Evans CDJ, Zitzmann NU, et al. Clinical performance of single implant prostheses restored using titanium base abutments: a systematic review and Meta-analysis[J]. Clin Oral Implants Res, 2023, 34(Suppl 26): 64-85.
- [31] Bjelopavlovic M, Weyhrauch M, Scheller H, et al. Retentive strength of CAD/CAM-fabricated all-ceramic crowns luted on titanium implant abutments using different ceramic materials and luting agents: an *in vitro* study[J]. Materials (Basel), 2022, 15(19): 6968.
- [32] Cosola S, Toti P, Babetto E, et al. *In-vitro* fatigue and fracture performance of three different ferrulized implant connections used in fixed prosthesis[J]. J Dent Sci, 2021, 16(1): 397-403.
- [33] Rohr N, Martin S, Fischer J. Fracture load of zirconia implant supported CAD/CAM resin crowns and mechanical properties of restorative material and cement[J]. J Prosthodont Res, 2021, 65(4): 502-508.
- [34] Chen CF, Trindade FZ, de Jager N, et al. The fracture resistance of a CAD/CAM Resin Nano Ceramic (RNC) and a CAD ceramic at different thicknesses[J]. Dent Mater, 2014, 30(9): 954-962.
- [35] 张皓, 王秀文, 李斯文, 等. 不同表面处理方法对树脂-陶瓷复合材料微观形貌和粘接强度影响研究

- [J]. 中国实用口腔科杂志, 2022, 15(6): 705-710.
- Zhang H, Wang XW, Li SW, et al. Study on the effect of different surface treatments on surface microstructure and bond strength of resin-ceramic hybrid material[J]. *Chin J Pract Stomatol*, 2022, 15(6): 705-710.
- [36] Rohr N, Brunner S, Märtin S, et al. Influence of cement type and ceramic primer on retention of polymer-infiltrated ceramic crowns to a one-piece zirconia implant[J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(1): 138-145.
- [37] Çakmak G, Subaşı MG, Yilmaz B. Effect of thermocycling on the surface properties of resin-matrix CAD-CAM ceramics after different surface treatments[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021, 117: 104401.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Rabel K, Spies BC, Pieralli S, et al. The clinical performance of all-ceramic implant-supported single crowns: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Clin Oral Implant Res*, 2018, 29(S18): 196-223.
- [42] Pjetursson BE, Sailer I, Latyshev A, et al. A systematic review and Meta-analysis evaluating the survival, the failure, and the complication rates of veneered and monolithic all-ceramic implant-supported single crowns[J]. *Clin Oral Implant Res*, 2021, 32(S21): 254-288.
- [43] Gökçimen G, Durkan R, Deste Gökay G, et al. The effect of different abutment and restorative crown materials on stress distribution in single-unit implant-supported restorations: a 3D finite element stress analysis[J]. *J Prosthodont*, 2024, 33(5): 497-505.
- [44] Südbek S, Hoffmann M, Reymus M, et al. Bending moment of implants restored with CAD/CAM polymer-based restoration materials with or without a titanium base before and after artificial aging[J]. *Dent Mater*, 2022, 38(9): e245-e255.
- [45] 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.

(本文编辑 李彩)