

提升氧化锆粘接性能的技术和处理方法

徐婷^{1,2,3,4}, 张晓南^{1,2,3,4*}

¹重庆医科大学附属口腔医院修复科, 重庆

²口腔疾病研究重庆市重点实验室, 重庆

³口腔生物医学工程重庆市高校市级重点实验, 重庆

⁴重庆市卫生健康委口腔生物医学工程重点实验室, 重庆

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

在20世纪90年代初, 氧化锆首次被应用于牙科修复领域。由于其优异的机械性能、生物相容性以及更佳的美观性, 氧化锆迅速成为牙科材料中的热门选择。然而, 氧化锆表面呈化学惰性和低表面能导致其与树脂粘接剂的粘接强度有限, 进而影响修复体的长期稳定性。近年来, 随着材料科学和表面改性技术的进步, 针对氧化锆粘接性能的研究逐渐深入, 多种表面处理与化学改性策略被相继提出。本文系统综述了目前用于提高氧化锆与树脂粘接性能的主要方法, 包括物理粗化处理、表面化学改性、功能性单体的应用以及粘接前的清洁策略等, 并对其作用机制、研究进展及临床应用特点进行总结分析, 以期氧化锆修复体的临床粘接提供参考依据。

关键词

氧化锆陶瓷, 粘接性能, 表面处理, 表面清洁

Technology and Treatment Methods to Improve the Bonding Performance of Zirconia

Ting Xu^{1,2,3,4}, Xiaonan Zhang^{1,2,3,4*}

¹Department of Prosthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

²Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases, Chongqing

³Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Engineering of Higher Education, Chongqing

⁴Chongqing Municipal Health Commission Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering, Chongqing

Received: February 11, 2026; accepted: March 4, 2026; published: March 13, 2026

*通讯作者。

文章引用: 徐婷, 张晓南. 提升氧化锆粘接性能的技术和处理方法[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 2293-2304.
DOI: 10.12677/acm.2026.1631024

Abstract

In the early 1990s, zirconia was first used in dental restorations. Zirconia is quickly becoming a popular choice among dental materials due to its excellent mechanical properties, biocompatibility, and improved aesthetics. However, the chemically inert and low surface energy of the zirconia surface results in limited bonding strength with resin adhesives, which in turn affects the long-term stability of the restoration. In recent years, with the advancement of material science and surface modification technology, research on the bonding properties of zirconia has gradually deepened, and a variety of surface treatment and chemical modification strategies have been proposed. This article systematically reviews the main methods currently used to improve the bonding performance of zirconia and resin, including physical roughening treatment, surface chemical modification, application of functional monomers, and cleaning strategies before bonding. The mechanism of action, research progress, and clinical application characteristics are summarized and analyzed, with a view to providing a reference for the clinical bonding of zirconia restorations.

Keywords

Zirconia Ceramics, Bonding Performance, Surface Treatment, Surface Cleaning

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人们对口腔修复美学美观要求的提高, 以及头颈部核磁共振检查运用[1]的增多, 金属烤瓷修复体(Porcelain-fused-to-metal, PFM)逐渐被淘汰, 全瓷修复体步入历史舞台[2]。其中, 氧化锆陶瓷因其优异的机械性能、生物相容性及良好的美学表现, 成为目前应用最广泛的全瓷修复材料之一。

氧化锆陶瓷是一种耐高温、耐磨损、耐腐蚀的无机非金属材料, 化学性能稳定、无细胞毒性[3], 能在口腔内能稳定存在, 不释放有害杂质, 不降解, 能再现自然牙的形态、颜色和光泽。氧化锆具有单斜相(m)、四方相(t)和立方相(c) 3种晶相结构, 并会随温度发生相变。通过掺杂稳定剂(如氧化钇), 可使部分四方相在室温下保持稳定, 从而形成氧化钇稳定氧化锆(yttria stabilized tetragonal zirconia polycrystals, Y-TZP) [4]。当裂纹扩展至四方相氧化锆晶体时, 相变吸收能量, 会阻止主裂纹的扩展, 这就是氧化锆马氏相变增韧的原理, 决定了氧化锆陶瓷具有较高的强度和韧性[4] [5]。常用的 3 mol%氧化钇稳定氧化锆(3Y-TZP)以高强度著称, 而通过提高氧化钇含量可获得 4Y-TZP、5Y-TZP 以及 6Y-TZP, 其透光性显著提升, 更适用于前牙美学修复[6] [7]。当氧化钇含量为 3~8 mol%时, 具有四方相和立方相, 氧化锆称为部分稳定氧化锆(partially stabilized zirconia, PSZ) [8]。凭借优异的机械性能、生物相容性[9], 和良好的美观性, 氧化锆陶瓷已被广泛应用于口腔固定修复中[10], 包括全冠、冠桥、桩核、种植修复基台、嵌体、粘接桥及贴面等多种形式[6]。然而, 氧化锆高晶相含量和低玻璃相比例使其表面对酸、碱及有机溶剂均表现出极高的化学稳定性[11], 致其与树脂粘接剂之间的结合力较弱[12]。这一问题在以粘接固位为主的部分冠、贴面及嵌体修复中, 脱粘问题时有发生, 严重影响修复体的长期临床效果。针对氧化锆粘接性能不足的问题, 近年来研究者从多个角度提出了不同的策略, 包括通过物理方法增加表面粗糙度、通过化学手段改变表面性质、引入功能性单体实现稳定化学键合, 以及针对临床试戴污染进行有效清洁处理等。

本文将围绕上述策略, 对近年来提升氧化锆与树脂粘接性能的研究进展进行综述, 比较不同处理方法的作用机制、优势与局限, 以期为其临床合理选择粘接方案提供参考依据。

2. 增加表面粗糙度的物理方法

2.1. Al₂O₃ 喷砂处理

喷砂是将一定颗粒大小的 Al₂O₃ 以一定的压力高速撞击氧化锆陶瓷的粘接面, 是目前临床应用最为广泛的表面处理方法之一。该方法可通过多种机制提高氧化锆与树脂之间的粘接强度。Al₂O₃ 颗粒剪切作用使晶粒边界裸露, 粗糙度明显增加, 使得实际粘接面积提高。这一粗糙表面还能提供树脂微突嵌合的微孔, 能够为树脂粘接剂提供更多的机械嵌合作用, 提高粘接强度[13]。喷砂还能提高表面能, 增加表面湿润性。除此, 喷砂处理降低了氧化锆陶瓷表面的氧原子与重量比, 增加了锆原子与重量比, 获得更多的化学键, 从而提高了其与含磷酸酯类功能性单体的树脂粘接剂间的粘接耐久性, 促进化学粘接[14]。另外, 在临床工作中, 试戴时血液、唾液可能污染陶瓷表面进而影响粘接强度, 而喷砂可以有效清洁试戴时造成的污染[15]。

喷砂参数(如颗粒大小, 喷砂压力、喷砂时间等)对氧化锆陶瓷的表面特性和粘接性能均具有显著影响。随着喷砂压力和时间增加, 表面材料丧失量和粗糙度同步上升, 但过度喷砂会造成边缘损伤和临床适配性下降。颗粒大小同样影响喷砂效果, 颗粒过小不足以形成有效粗糙度, 而颗粒过大则易导致表层材料脱落。综合考虑临床适用性及粗糙度, 采用 0.2 MPa 喷砂压力、110 μm Al₂O₃ 颗粒、持续约 20 秒对 3Y-TZP 进行喷砂最为适合[16]。Malin Janson [17]等比较了 3Y-TZP 使用 50 μm、110 μm 喷砂后与不同的树脂材料的粘接强度, 结果显示 110 μm 颗粒可获得更好的粘接效果, 支持上述参数选择的合理性。研究认为, 不同的氧化锆类型, 如高透氧化锆和普通氧化锆之间氧化钇含量的差异会影响其机械性能和光学性能, 而其粘接性能差异并不显著, 常规喷砂的处理工艺亦可以应用于高透氧化锆的口腔修复体[18]。基于现有研究, 使用 0.2 MPa、持续 10 秒的处理参数用于普通氧化锆和高透氧化锆可以兼顾粘接强度与结构安全性[19]。

尽管适度喷砂可有效增强粘接性能, 但其对氧化锆修复体断裂强度的影响仍存在争议。部分研究认为喷砂使表层少量基质材料被移除, 可见明显的微小断裂裂纹, 晶界消失[20], 因此认为喷砂可能影响氧化锆修复体的强度。但丁茜等[21]认为喷砂导致了氧化锆试件的单斜相百分数明显升高, 因相变增韧原理, 表面喷砂能够提高其断裂强度。Masanao Inokoshi 等[22]认为 Al₂O₃ 喷砂后氧化锆表面形成的微裂纹导致强度降低, 而表面压应力累积导致强度增加, 最终氧化锆的强度由这两者之间的平衡决定。同时, 氧化锆陶瓷的成分和微观结构也会影响喷砂后的强度, 4Y-PSZ 和 5Y-PSZ 的双轴弯曲强度在喷砂后增高, 6Y-PSZ 双轴弯曲强度却不会因喷砂而增高。为保证修复体的强度, 建议喷砂压力为 0.2 MPa, 喷砂速度为 10 s/cm², 喷砂距离为 10 mm, 喷砂角度为 90°, 3Y-TZP 采用 110 μm 砂、4Y-PSZ 采用 90 μm 砂和 5Y-PSZ 采用 25 μm 砂[23]。

2.2. 超短脉冲激光表面图案化

超短脉冲激光(ultrashort-pulse laser, USP laser)是指脉冲宽度在皮秒及以下量级的激光, 典型为飞秒。飞秒激光在飞秒范围内发射超短脉冲, 向氧化锆表面传递极低热量, 只在蚀刻处产生非常小的热影响, 是高精密度的“冷”加工[13]。超短脉冲激光可控地在氧化锆表面雕刻规则微图案, 没有任何可见的微裂纹形成, 可以避免热应力和机械应力, 可在不诱发 t-m 相变的前提下提高粗糙度、增加湿润性, 增强氧化锆与树脂的粘接强度[24]-[26]。Verónica García-Sanz 等[27]研究了飞秒激光功率、沟槽间距对氧化锆表面粗糙度和剪切粘接强度的影响, 当功率 200~300 mW、沟距 60 μm 时, 粘接强度达到峰值, 较喷砂提

升约 40%，继续升高功率至 300 mW 时粘接强度并未随之提高，故作者推荐使用 200 mW~60 μm 的参数。波长对比实验表明，飞秒激光的有效性与波长密切相关，比较 385 nm、800 nm 与 870 nm 波长，385 nm 下的粘接强度明显低于 800 与 870 nm [28]。Okutan, Y 等[29]研究了飞秒激光几何图案对氧化锆粗糙度和力学性能的影响，在相同功率下，方形或圆形扫描图案可使双轴弯曲强度下降，而螺旋图案可在粗糙度增加 3 倍的同时保持弯曲强度不变。超短脉冲激光处理后的氧化锆表面可获得良好的疏水性能，与水可以形成 Cassie 接触，能获得对抗唾液老化、增加粘结耐久性的作用[30]。USP 表面图案化可在不影响氧化锆机械性能的情况下，实现精确控制的微米 - 纳米级形貌，显著增强氧化锆 - 树脂粘接强度。但具体的参数尚未达到共识，未来需建立波长、能量密度、扫描策略等标准化参数，以推动其临床应用。

2.3. 选择性渗透蚀刻

选择性渗透蚀刻(Selective Infiltration Etching, SIE)通过热处理和酸蚀形成多孔的三维结构，增加表面积和提高微机械嵌合来提高氧化锆和树脂的粘接强度，可形成持久和高强度的粘接[31][32]。方法是在氧化锆表层涂薄一层低熔玻璃，然后经过特定的烧结程序。具体烧结程序为：加热到 750 $^{\circ}\text{C}$ 后冷却到 650 $^{\circ}\text{C}$ 再次加热到 750 $^{\circ}\text{C}$ ，分别维持 2 min、1 min、1 min，最后将其冷却到室温。因热诱导成熟原理，被烧结后的氧化锆晶界表面的晶体会重新排列，高黏度的熔融玻璃通过毛细作用力渗入晶界。然后选择性渗透蚀刻，用体积分数 5% 的氢氟酸酸蚀 15 min，水冲洗 5 min，确保熔融玻璃完全去净，表面形成晶粒间多孔的三位结构[33]。该方法不仅适用于普通氧化锆，也能提高高透氧化锆与树脂的粘接强度[18][34]。选择性渗透蚀刻结合含 10-甲基丙烯酰氧癸二氢磷酸(10-Methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, 10-MDP)的粘接剂，可使氧化锆修复体形成持久牢固的粘接，与摩擦化学二氧化硅涂层、喷砂处理显著提高了微拉伸粘接强度[35]。

2.4. 熔融溅射技术

Aboushelib [36]在 2012 年首次将熔融溅射技术(fusion sputtering, FS)运用于氧化锆，在未烧结的氧化锆表面喷射含微小氧化锆颗粒的水气，然后烧结，在处理表面形成了保持性氧化锆珠，形成适合树脂粘接剂机械固位的倒凹结构，提高了其与树脂的粘接性能，并防止了界面失效。Ali 等[37]比较了熔融溅射技术和喷砂后的氧化锆与含甲基丙烯酰氧癸基二氢磷酸酯(Methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, MDP)的树脂的粘接强度，熔融溅射技术表面处理提高了氧化锆和树脂粘接剂的微剪切粘接强度，高于喷砂处理。熔融溅射技术处理后的氧化锆表面除了有良好的粘接性能，且比喷砂处理更能抵抗老化后的微渗漏，具备更好的耐久性[31]。目前关于熔融溅射技术的文献比较有限，尚需进一步研究。

3. 改变性质的涂层与处理技术

3.1. 大气压冷等离子体表面处理

大气压冷等离子体(non-thermal atmospheric pressure plasma, NTAPP)在开放空气环境下，通过高频高压电离工作使气体分子电离，产生大量高能带电粒子，可在氧化锆表面引发自由基，打破材料表面化学键，实现对氧化锆的清洁和化学改性，改善氧化锆的粘接性能[38]。现已有体积较小的等离子体射流装置，采用握笔式射流装置，操作简便，有较好的临床应用前景[38]。

能用于大气压冷等离子体处理的气体有 He、Ar、O₂、N₂、或 CF₄ 等，其中 Ar 因便宜、易得是目前最常用的气体。詹凌璐[39]等的研究将 N₂ 和 Ar 作为发生气体进行大气压冷等离子体处理，对氧化锆表面性能和粘接强度的影响相似，均高于喷砂处理，且几乎不会改变氧化锆表面形貌和粗糙度。张研楠[40]等探讨了不同时间的低温等离子体处理对氧化锆粘接强度的影响，实验设置的低温等离子体功率值(90 W)，

气体流速较(4 L/min), 氩气低温等离子体分别处理 60、90、120 秒; 90 秒氩气低温等离子体处理氧化锆效果最佳, 表面元素及接触角变化幅度最大, 并获得最大剪切强度值。有不少研究者探讨了低温等离子体与其他处理方法联用, 与喷砂[41]、激光[42]联用或先对未经处理的氧化锆进行等离子体处理, 然后涂布底漆[43]均可获得更高的粘接强度。

大气压冷等离子处理能显著提高氧化锆的粘接性能, 但粘接耐久性目前尚有争议。Negreiros [44]等的实验表明, 无论即刻还是水储存一年后, 均有较高的粘接强度。章青青[45]比较了 N_2 、Ar、 O_2 大气压冷等离子体处理后即刻和冷热循环 10,000 次后的粘接, 三组低温等离子体均可在不改变氧化锆陶瓷表面形貌的情况下, 获得与树脂较好的粘接强度和粘接耐久性。但 Fronza [46]认为, 等离子体处理后氧化锆的即刻粘接强度有所提高, 但这种优势在老化后消失, 其推动因为氧化锆表面碳元素减少, 氧元素增多, 碳氧比下降提高了表面亲水性, 这种亲水性的提高似乎导致了界面劣化, 而导致耐久性不足。蒙凡豪[47]等研究了 Ar 大气压冷等离子体表面处理的耐久性, 处理 60 秒和 120 秒的即刻粘接强度与喷砂处理后均无差异, 但冷热循环后的粘接强度均低于喷砂处理, 支持上述结论。不同的结论或许是因为实验使用氧化锆或者粘接树脂不同, 如何提高大气压冷等离子体处理的耐久性尚需更多的研究。

3.2. 硅涂层

3.2.1. 摩擦化学硅涂层

摩擦化学硅涂层(tribochemical silica coating, TSC)的原理是使用经 SiO_2 修饰的氧化铝颗粒(30 μm)对氧化锆表面喷砂, 这样不仅增加粗糙度, 有利于微机械固位, SiO_2 还会嵌合到氧化锆表面, 且与氧化锆形成化学键合, 为氧化锆表面提供了硅烷反应的基础。摩擦化学法硅涂层后以硅烷处理, 能改善氧化锆的粘接性能和耐久性[48], 与应用氧化铝喷砂 + MDP 相比, 可提供更高的水解稳定性[49]。该方法不仅可用于普通氧化锆, 亦可用于半透明氧化锆[50], 能改善氧化锆粘接性能同时不引起相变[51]。摩擦化学硅涂层不仅对氧化锆机械性能无潜在负面影响, 甚至能提高其断裂强度。Beatriz Togoro Ferreira [52]等比较了氧化锆烧结前后进行摩擦化学硅涂层对其断裂强度的影响, 发现烧结前的处理无对断裂强度无影响, 但无法改善粘接性能, 而烧结后进行摩擦化学硅涂层能显著提高氧化锆的断裂强度和粘接强度。

摩擦化学硅涂层后不仅可以硅烷化, 也可以与含 MDP 的底涂剂或粘接树脂联用。Amanda 等[53]评估了摩擦化学硅涂层与硅烷基底涂剂或含 MDP 的底涂剂联用对树脂与氧化锆粘接强度耐久性的影响, 结果二氧化硅涂层与含 MDP 的底涂剂结合可使氧化锆获得更佳的耐久性和粘接强度。Nagaoka [54]认为, 单独的硅烷偶联剂对于粘接经摩擦化学硅涂层预处理的氧化锆的效果不如使用同时含 10-MDP 和硅烷的底漆, 原因可能是摩擦化学硅涂层后, 氧化锆表面沉积了一层不均匀的二氧化硅层, 部分氧化锆表面未被二氧化硅覆盖, 10-MDP 可与这部分氧化锆发生反应。甚至有实验[55]表明, 摩擦化学硅涂层 + 含 10-MDP 和硅烷的底漆后再使用日本可乐丽公司的含 MDP 的 Panavia V5 粘接, 能获得与玻璃陶瓷相似的剪切粘接强度。

3.2.2. 玻璃陶瓷涂层

在氧化锆内表面涂抹或喷涂含低熔融玻璃陶瓷的溶液或瓷粉, 然后经过一定的烧结程序, 在粘接表面形成一层致密的薄层, 再经过氢氟酸酸蚀和硅烷化, 可使氧化锆和树脂形成持久且可靠的粘接。可通过多种方式在氧化锆表面融附玻璃陶瓷, 如上釉技术[56]、二硅酸锂玻璃陶瓷涂层[57]、DCMhotbond 玻璃陶瓷涂层[58]等。熔附的玻璃陶瓷与氧化锆有范德华、静电力和化学键, 使得这一薄层与氧化锆的具有极佳的粘附力[59]。在涂层上氢氟酸酸蚀溶解玻璃相使得粗糙度和湿润性增加, 再辅以硅烷偶联剂(如 3-MPS), 利用硅烷偶联剂一端的硅氧烷基团与硅形成化学键, 而另一端的有机基团与树脂粘接剂中的树脂

单体共聚, 使得氧化锆和树脂形成强有力的粘接, 粘接效果不仅优于传统的喷砂[57]、摩擦化学硅涂层[56], 甚至其剪切粘接强度和耐久性可与玻璃陶瓷媲美[60]。周瑜[61]比较了在超透氧化锆表面进行上釉、二硅酸锂涂层和喷砂处理对美观和粘接性能的影响, 结果二硅酸锂涂层处理的粘接强度最高且对色差的影响最小, 若前牙使用超透氧化锆行美学修复, 建议使用二硅酸锂涂层进行粘接前处理。

处理时尽量控制酸蚀的操作时间, 避免过酸蚀玻璃涂层。对于合适的酸蚀浓度和时间尚未达成一致, 金春晓[59]等认为 5% 氢氟酸蚀刻 5 分钟和使用 9.5% 氢氟酸蚀刻 2 分钟, 可获得最高的剪切粘接强度, 但康健明等[60]推荐 5% 氟化氢酸蚀 90~120 秒。也许不同的涂层厚度、不同的瓷粉需要适配不同的酸蚀方案, 这方面尚需进一步研究。当涂层处于不同的酸蚀程度, 应匹配成分不同的底涂剂。恰酸蚀时, 使用仅含硅烷的处理剂可获得最高粘接强度, 而若涂层已被过度酸蚀, 推荐使用同时含硅烷和 MDP 的处理剂[62]。

在氧化锆表面熔附玻璃陶瓷涂层能改善粘接性能, 且对氧化锆的机械性能无负面影响[63] [64]。但对于是否会影响氧化锆修复体的边缘适配性尚存在担忧。不少研究认为该薄层厚度仅约 10 μm , 不影响修复体的就位[65] [66]。但不同的人操作可能会导致涂层厚度不同, 如何精准控制涂层厚度, 或者修复体制作过程中利用 CAD/CAM 技术预留出涂层厚度的空间, 使其不影响修复体的与牙齿的适合性, 需要更多的探索[64]。

3.3. 10-MDP 功能性单体

磷酸酯单体能够通过简单的接触来增强氧化锆陶瓷与树脂粘接强度, 它的问世标志着氧化锆粘接领域一个里程碑式的技术飞跃[67]。10-甲基丙烯酰氧癸基二氢磷酸酯(10-Methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, 10-MDP)是现有磷酸酯单体中最成熟和最具代表性的一种, 被添加在市场上多种处理剂、通用粘接剂、自粘接树脂中发挥作用[67]。将含有 10-MDP 的底涂剂、粘接剂或自粘接树脂单独使用或联合使用都可有效提高氧化锆和树脂的粘接强度[68] [69], 使用含有 10-MDP 的自粘接树脂无需预先底涂的方案, 可以减少氧化锆粘接的临床步骤[70]。

10-MDP 分子由十个碳原子组成的间隔酯链连接着磷酸基团和乙烯基团, 一端的磷酸基团作为羟基磷灰石或金属氧化物的粘接促进剂, 能够与氧化锆形成稳定的 Zr-OP 化学键合(见图 1), 另一端的乙烯基团有助于与树脂基质中的不饱和碳键发生聚合反应, 这种化学键合显著增强了氧化锆与树脂之间的粘接强度[71]。但 10-MDP 与氧化锆形成的键合长时间会发生水解降解[67] [72], 其水解稳定性不如传统的玻璃陶瓷与硅烷偶联剂形成的硅氧烷键。不建议单独使用含 10-MDP 的产品, 需要与其他物理处理方式联合使用, 可使其粘接在长期老化后依然有可接受的强度[73]。

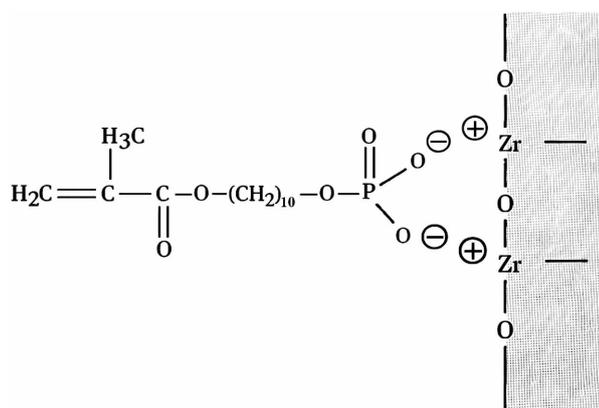


Figure 1. Schematic illustration of the bonding mechanism of 10-MDP to zirconia
图 1. 10-MDP 与氧化锆的化学键合机制示意图

4. 清洁被污染的表面

工作中, 在氧化锆修复体进行粘接前须先试戴以确定就位, 而这可能导致氧化锆粘接面被唾液、血液或含硅酮的指示剂污染。这样的污染会对粘接造成负面影响, 为确保良好的粘接, 必须先对污染的表面进行清洁[74]。用水冲洗、磷酸、酒精、酶等清洁方式无效, 而且含醛或醇的清洁剂还会导致污染面的有机物固定, 并且可能形成细菌和病毒的残留生物膜[75]。

现市场上有一些含不同成分的清洁剂可用于清洁氧化锆粘接表面。通用清洁膏 Ivoclean 是由过饱和氧化锆颗粒、聚乙二醇和氢氧化钠组成[76], Katana Cleaner 的活性成分为 10-MDP 盐[77], 这两种清洁产品对清除血液、唾液污染均有效[78]。Zirclean 是一种由氢氧化钾组成的碱性清洁凝胶, 可破坏氧化锆表面与唾液中有机物之间形成的离子键, 其对唾液污染有效[79], 但对血液污染无效[80]。

喷砂被证明对污染的表面能进行很好的清洁[76][79][81], 有研究将其与清洁剂处理相比, 喷砂处理显示出更高的粘接强度[82][83]。若将喷砂和清洁剂 Ivoclean 联用, 又能获得最佳的粘接效果[83]。

有些处理方式单独使用无效, 但联合使用能获得很好的效果。单独的异丙醇超声荡洗无法有效清洁[76], 等离子体处理的高活性电离氛围主要为化学清洗, 仅有很小部分的机械清洗不足以有效去除大量残留物, 但超声波异丙醇清洗与等离子体处理相结合, 是清洗被唾液污染的氧化锆样品的有效方法[75]。

还有一些尚有争议的处理方法。有研究[80][84]使用次氯酸钠对氧化锆表面进行去污, 没能有效提高氧化锆的粘接。而在 Sukcheep [85]的研究中, 次氯酸钠清洁后氧化锆老化前能有很好的粘接, 但老化后粘接强度明显下降。但有研究[86]表明次氯酸钠清洁可使污染后的氧化锆在短期和长期老化条件下均与未受污染的氧化锆的粘接强度相当。这样的差异可能是由于使用的次氯酸钠浓度不同, 尚需更多的研究。Sukcheep 在污染前后使用 MDP 底涂剂 G-Multi Primer 可去除氧化锆表面的唾液和硅酮显色剂污染物, 该方法可获得很好的粘接, 并且具有很好的耐水性。但 Hajjaj [15]在唾液和硅酮显色剂污染前在氧化锆表面涂抹含 10-MDP 陶瓷底涂剂 Monobond N 并不能维持树脂粘接剂与氧化锆的剪切粘接强度。造成这样的差异也许是因为底漆品牌不同, 底漆中含有的成分和比例有所不同。

5. 讨论

临床口腔修复体的成功依赖长期的粘接稳定性, 但在口腔的环境中, 水解、界面应力及相变诱导等会削弱修复体的粘接强度。因此各种处理方法和技术的长期稳定性尤为重要。 Al_2O_3 喷砂处理是临床最常用方法, 但单独喷砂后经长期水老化, 粘接强度会明显下降。而喷砂结合使用含 MDP 的粘接剂或处理剂后, MDP 的磷酸酯基团与锆形成稳定的化学键合, 耐水解性大幅提升, Al_2O_3 喷砂联合使用含 MDP 的树脂粘接系统目前是证据最为充分、临床运用最为广泛的处理方案。摩擦化学硅涂层在喷砂同时沉积 SiO_2 层, 有研究认为该法与含硅烷的处理剂联用粘接耐久性优于应用氧化铝喷砂 + MDP。超短脉冲激光处理后的氧化锆表面与水可以形成 Cassie 接触, 可获得良好的疏水性能, 能对抗唾液老化, 增加粘结耐久性, 老化后表面形貌稳定, 无明显退化。熔融溅射技术在氧化锆表面形成致密纳米涂层, 因薄膜阻挡水分子渗透, 溅射涂层组水老化后粘接强度无明显下降。选择性渗透蚀刻(SIE)利用低熔点玻璃渗透后选择性溶解, 提供强大机械互锁, 经人工老化, 粘接强度无显著下降。玻璃陶瓷涂层通过喷涂或涂抹再烧结形成可氢氟酸蚀刻的表面, 模拟传统玻璃陶瓷粘接, 其剪切粘接强度和耐久性可与玻璃陶瓷媲美。大气压冷等离子体处理能显著提高氧化锆的粘接性能, 但粘接耐久性目前尚有争议。不同的研究结论不同, 或许是因为实验使用氧化锆或者粘接树脂不同, 如何提高大气压冷等离子体处理的耐久性尚需更多的研究。

迄今, 氧化锆与树脂的粘接结果已能达到临床可接受的强度。为达到最好的效果, 需不同的处理方式联用。首先若粘接面被污染, 清洁是必不可少的步骤, 然后需要一些物理和化学处理, 以达到机械嵌

合和化学连接的结合。不同的粘接方案有着各自的优缺点, 其适用性受到氧化锆类型、修复体设计和临床操作条件等多种因素的影响。 Al_2O_3 喷砂联合使用含 MDP 的树脂粘接系统技术敏感性低、成本低, 但有着影响机械性能的担忧, 尤其是运用于高透氧化锆和薄壁修复体时, 需要严格控制参数。超短脉冲激光表面图案化、等离子体处理都需要比较昂贵的设备。各种涂层又有着可能会影响修复体就位的担忧。前牙美学修复时会用到美观性更好的高透氧化锆, 以上方案对高透氧化锆通透性、色差、机械强度的影响尚需要更多的研究。所以对于氧化锆的粘接问题, 依然还有一些问题需要解决。

参考文献

- [1] 朱镇, 孙琪, 杨军星, 等. 不同材料固定局部义齿患者行头颈部 MRI 检查的成像效果和安全性比较[J]. 吉林大学学报(医学版), 2017, 43(6): 1220-1225.
- [2] Alsahli, A., Baig, M.R., Baskaradoss, J.K., Alsanea, S. and Al Mousawi, A. (2025) Factors Influencing the Selection of Materials and Luting Agents for Single-Crown Restorations. *Dentistry Journal*, **13**, Article No. 207. <https://doi.org/10.3390/dj13050207>
- [3] Bannunah, A.M. (2023) Biomedical Applications of Zirconia-Based Nanomaterials: Challenges and Future Perspectives. *Molecules*, **28**, Article No. 5428. <https://doi.org/10.3390/molecules28145428>
- [4] Huang, B., Chen, M., Wang, J. and Zhang, X. (2024) Advances in Zirconia-Based Dental Materials: Properties, Classification, Applications, and Future Prospects. *Journal of Dentistry*, **147**, Article ID: 105111. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105111>
- [5] 万乾炳. 口腔氧化锆修复材料分代之我见[J]. 国际口腔医学杂志, 2021, 48(2): 125-128.
- [6] Cesar, P.F., Miranda, R.B.d.P., Santos, K.F., Scherrer, S.S. and Zhang, Y. (2024) Recent Advances in Dental Zirconia: 15 Years of Material and Processing Evolution. *Dental Materials*, **40**, 824-836. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.026>
- [7] Bapat, R.A., Yang, H.J., Chaubal, T.V., Dharmadhikari, S., Abdulla, A.M., Arora, S., et al. (2022) Review on Synthesis, Properties and Multifarious Therapeutic Applications of Nanostructured Zirconia in Dentistry. *RSC Advances*, **12**, 12773-12793. <https://doi.org/10.1039/d2ra00006g>
- [8] Kongkiatkamon, S., Rokaya, D., Kengtanyakich, S. and Peampring, C. (2023) Current Classification of Zirconia in Dentistry: An Updated Review. *PeerJ*, **11**, e15669. <https://doi.org/10.7717/peerj.15669>
- [9] Wang, L., Chang, H., Liao, Y., Chen, W., Huang, Y. and Chen, Y. (2025) Zirconia Minimizes Myeloid Innate Immunity as Dental Implants: An *in Silico* and *in Vivo* Study. *Clinical Oral Implants Research*, **36**, 1626-1639. <https://doi.org/10.1111/clr.70037>
- [10] Gautam, C., Joyner, J., Gautam, A., Rao, J. and Vajtai, R. (2016) Zirconia Based Dental Ceramics: Structure, Mechanical Properties, Biocompatibility and Applications. *Dalton Transactions*, **45**, 19194-19215. <https://doi.org/10.1039/c6dt03484e>
- [11] D'Alessandro, C., Jovic, U., Mazzitelli, C., Maravic, T., Graham, L., Barausse, C., et al. (2024) Is Zirconia Surface Etching a Viable Alternative to Airborne Particle Abrasion? A Systematic Review and Meta-Analysis of *in Vitro* Studies. *Journal of Dentistry*, **151**, Article ID: 105394. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105394>
- [12] Scaminaci Russo, D., Cinelli, F., Sarti, C. and Giachetti, L. (2019) Adhesion to Zirconia: A Systematic Review of Current Conditioning Methods and Bonding Materials. *Dentistry Journal*, **7**, Article No. 74. <https://doi.org/10.3390/dj7030074>
- [13] 黄凌霞, 王焕平, 白雪倩, 等. 不同表面处理对氧化锆陶瓷与牙本质粘接强度的影响[J]. 口腔医学, 2021, 41(3): 210-215.
- [14] 孟翔峰, 谢志刚, 陈渊华, 等. 喷砂处理对二氧化锆陶瓷表面性状及树脂粘接的影响[J]. 中华口腔医学杂志, 2011, 46(6): 370-374.
- [15] Hajjaj, M.S. and Alzahrani, S.J. (2022) Effect of Different Cleaning Methods on Shear Bond Strength of Resin Cement to Contaminated Zirconia. *Materials*, **15**, Article No. 5068. <https://doi.org/10.3390/ma15145068>
- [16] 李新, 苏乃川, 廖运茂, 等. 不同条件的表面喷砂对牙科氧化锆材料表面丧失的影响[J]. 口腔医学, 2017, 37(1): 28-32.
- [17] Janson, M., Bassier, V., Liebermann, A., et al. (2025) Composite Repair on Zirconia: Influence of Different Sandblasting Pretreatments and Various Universal Adhesives on Shear Bond Strength. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **27**, 53-64.
- [18] Falahchai, M., Neshandar Asli, H., Faghani, M. and Hendi, A. (2024) Effect of Different Surface Treatments on Shear

- Bond Strength of Zirconia with Various Yttria Contents. *BMC Oral Health*, **24**, Article No. 1520. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05348-6>
- [19] Li, X., Liang, S., Li, J., Tang, W., Yu, M., Ahmed, M.H., *et al.* (2025) Influence of Surface Treatments on Highly Translucent Zirconia: Mechanical, Optical Properties and Bonding Performance. *Journal of Dentistry*, **154**, Article ID: 105580. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105580>
- [20] 李斯文, 李施施, 王艳红, 等. 不同表面处理方法对氧化锆陶瓷微观结构和粘接强度影响的研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2017, 35(1): 43-50.
- [21] 丁茜, 李文锦, 孙丰博, 等. 表面处理对氧化钇和氧化镁稳定的氧化锆种植体晶相及断裂强度的影响[J]. 北京大学学报(医学版), 2023, 55(4): 721-728.
- [22] Inokoshi, M., Shimizubata, M., Nozaki, K., Takagaki, T., Yoshihara, K., Minakuchi, S., *et al.* (2021) Impact of Sandblasting on the Flexural Strength of Highly Translucent Zirconia. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **115**, Article ID: 104268. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104268>
- [23] Kim, H. and Ahn, B. (2021) Effect of Al₂O₃ Sandblasting Particle Size on the Surface Topography and Residual Compressive Stresses of Three Different Dental Zirconia Grades. *Materials*, **14**, Article No. 610. <https://doi.org/10.3390/ma14030610>
- [24] Sahoo, N., Carvalho, O., Özcan, M., Silva, F., Souza, J.C.M., Lasagni, A., *et al.* (2023) Ultrashort Pulse Laser Patterning of Zirconia (3Y-TZP) for Enhanced Adhesion to Resin-Matrix Cements Used in Dentistry: An Integrative Review. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **143**, Article ID: 105943. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105943>
- [25] Abu Ruja, M., De Souza, G.M. and Finer, Y. (2019) Ultrashort-Pulse Laser as a Surface Treatment for Bonding between Zirconia and Resin Cement. *Dental Materials*, **35**, 1545-1556. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.07.009>
- [26] Okutan, Y., Kandemir, B., Gundogdu, Y., Kilic, H.S. and Yucel, M.T. (2020) Combined Application of Femtosecond Laser and Air-Abrasion Protocols to Monolithic Zirconia at Different Sintering Stages: Effects on Surface Roughness and Resin Bond Strength. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **109**, 596-605. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34741>
- [27] García-Sanz, V., Paredes-Gallardo, V., Bellot-Arcís, C., Martínez-León, L., Torres-Mendieta, R., Montero, J., *et al.* (2018) Femtosecond Laser Settings for Optimal Bracket Bonding to Zirconia. *Lasers in Medical Science*, **34**, 297-304. <https://doi.org/10.1007/s10103-018-2589-3>
- [28] Shalaby, L., Saifeldin, H., Samad, F.A., Mohamed, T. and El Demery, Y. (2025) Exploring the Effect of Femtosecond Laser Surface Treatment on the Bond Strength of Zirconia to Metal Brackets: An *In Vitro* Study. *BMC Oral Health*, **25**, Article No. 1636. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06996-y>
- [29] Okutan, Y., Gundogdu, Y., Donmez, M.B., Seker, H. and Kilic, H.S. (2024) Effect of Femtosecond Laser Induced Surface Patterns on the Flexural Strength of Monolithic Zirconia. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **112**, e35432. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35432>
- [30] 李健, 季凌飞, 王思聪, 等. 牙科氧化锆(Y-TZP)陶瓷疏水性表面皮秒激光制备研究[J]. 电加工与模具, 2016(2): 40-44.
- [31] Aboushelib, M.N., Ragab, H. and Arnaot, M. (2018) Ultrastructural Analysis and Long-Term Evaluation of Composite-Zirconia Bond Strength. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **20**, 33-39.
- [32] Khan, A.A., Al, K.A., Jamaluddin, S., *et al.* (2017) Recent Trends in Surface Treatment Methods for Bonding Composite Cement to Zirconia: A Review. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **19**, 7-19.
- [33] Aboushelib, M.N., Kleverlaan, C.J. and Feilzer, A.J. (2007) Selective Infiltration-Etching Technique for a Strong and Durable Bond of Resin Cements to Zirconia-Based Materials. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **98**, 379-388. [https://doi.org/10.1016/s0022-3913\(07\)60123-1](https://doi.org/10.1016/s0022-3913(07)60123-1)
- [34] Salem, R., Naggar, G.E., Aboushelib, M., *et al.* (2016) Microtensile Bond Strength of Resin-Bonded High Translucency Zirconia Using Different Surface Treatments. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **18**, 191-196.
- [35] Saker, S. and Hashem, D. (2020) Influence of Surface Modification Protocol and Type of Luting Cement on Bonding of Monolithic Zirconia to Dentin Substrate. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, **21**, 1342-1349. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-2984>
- [36] Aboushelib, M.N. (2012) Fusion Sputtering for Bonding to Zirconia-Based Materials. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **14**, 323-328.
- [37] Ali, N., Safwat, A. and Aboushelib, M. (2019) The Effect of Fusion Sputtering Surface Treatment on Microshear Bond Strength of Zirconia and MDP-Containing Resin Cement. *Dental Materials*, **35**, e107-e112. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.02.013>
- [38] 焦纪兰, 叶心仪, 邓璐, 等. 不同清洁方法对高透氧化锆粘接强度和表面润湿性的影响[J]. 上海口腔医学, 2024,

- 33(1): 36-39.
- [39] 詹凌璐, 张玉玮, 郑苗, 等. 大气压冷等离子体处理提高氧化锆粘接性能[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2019, 20(1): 3-8.
- [40] 张研楠, 刘敏, 孟凡豪, 等. 不同时间低温等离子体处理对氧化锆粘接强度影响[J]. 实用口腔医学杂志, 2025, 41(2): 222-226.
- [41] Sevilla, P., Gseibat, M., Peláez, J., Suárez, M.J. and López-Suárez, C. (2023) Effect of Surface Treatments with Low-Pressure Plasma on the Adhesion of Zirconia. *Materials*, **16**, Article No. 6055. <https://doi.org/10.3390/ma16176055>
- [42] 刘攀, 李雪, 孟凡豪, 等. Er:YAG 激光和等离子体处理对氧化锆粘接性能的影响[J]. 中国医科大学学报, 2023, 52(1): 34-37.
- [43] Altuntas, M., Colgecen, O., Ercan, U. and Cukur, E. (2022) Nonthermal Plasma Treatment Can Eliminate Sandblasting Procedure for Zirconia-Resin Cement Bonding. *The International Journal of Prosthodontics*, **35**, 752-760. <https://doi.org/10.11607/ijp.7302>
- [44] Negreiros, W., de Souza, V., Noronha, M., Lopes, B. and Giannini, M. (2021) Adhesion of Resin Cement to Zirconia Using Argon Plasma and Primer. *The International Journal of Prosthodontics*, **34**, 796-800. <https://doi.org/10.11607/ijp.7118>
- [45] 章青青, 唐旭炎, 曹颖, 等. 等离子体表面改性对氧化锆陶瓷与树脂粘接耐久性的影响[J]. 安徽医科大学学报, 2022, 57(9): 1409-1413.
- [46] Fronza, B.M., Noronha, M., Price, R.B., et al. (2022) Influence of Adhesion Promoter Primers on Polymerization Kinetics and Long-Term Bond Strength of Composite Cements to Zirconia. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **24**, 259-268.
- [47] 孟凡豪, 文玉珍, 孙玉环, 等. 不同时长低温等离子体处理对氧化锆粘接耐久性的影响[J]. 上海口腔医学, 2025, 34(5): 477-482.
- [48] Rigos, A.E., Sarafidou, K. and Kontonasaki, E. (2023) Zirconia Bond Strength Durability Following Artificial Aging: A Systematic Review and Meta-Analysis of *in Vitro* Studies. *Japanese Dental Science Review*, **59**, 138-159. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2023.04.002>
- [49] Xie, H., Li, Q., Zhang, F., Lu, Y., Tay, F.R., Qian, M., et al. (2016) Comparison of Resin Bonding Improvements to Zirconia between One-Bottle Universal Adhesives and Tribochemical Silica Coating, Which Is Better? *Dental Materials*, **32**, 403-411. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.12.014>
- [50] Prochnow, F., Weber, K.R., Rezende, C., et al. (2025) Air Abrasion vs. Tribochemical Silica Coating: Effect on Translucent Zirconia Bond Strength. *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, **33**, 199-205.
- [51] Chen, B., Yan, Y., Xie, H., et al. (2020) Effects of Tribochemical Silica Coating and Alumina-Particle Air Abrasion on 3Y-TZP and 5Y-TZP: Evaluation of Surface Hardness, Roughness, Bonding, and Phase Transformation. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **22**, 373-382.
- [52] da Silva, B.T.F., Trevelin, L.T., Schroeter, A.C., Willers, A.E., Cesar, P.F. and Matos, A.B. (2021) Effect of Silica Coating and Laser Treatment on the Flexural Strength, Surface Characteristics, and Bond Strength of a Dental Zirconia. *European Journal of Oral Sciences*, **129**, e12754. <https://doi.org/10.1111/eos.12754>
- [53] Dal Piva, A.M.O., Carvalho, R.L.A., Lima, A.L., Bottino, M.A., Melo, R.M. and Valandro, L.F. (2018) Silica Coating Followed by Heat-Treatment of MDP-Primer for Resin Bond Stability to Yttria-Stabilized Zirconia Polycrystals. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **107**, 104-111. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34100>
- [54] Nagaoka, N., Yoshihara, K., Tamada, Y., Yoshida, Y. and Meerbeek, B.V. (2019) Ultrastructure and Bonding Properties of Tribochemical Silica-Coated Zirconia. *Dental Materials Journal*, **38**, 107-113. <https://doi.org/10.4012/dmj.2017-397>
- [55] Roman, T., Cournault, B., Teyagirwa, F., Erkel, A., Levratto, F., Richelme, J., et al. (2024) Shear Bond Strength between Standard or Modified Zirconia Surfaces and Two Resin Cements Incorporating or Not 10-MDP in Their Matrix. *Dental Materials*, **40**, 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.015>
- [56] Everson, P., Addison, O., Palin, W.M. and Burke, F.J.T. (2012) Improved Bonding of Zirconia Substructures to Resin Using a "Glaze-On" Technique. *Journal of Dentistry*, **40**, 347-351. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2011.12.011>
- [57] Thammajarak, P., Buranadham, S., Guazzato, M., et al. (2021) Shear Bond Strength of Composite Cement to Lithium-Disilicate Glass-Coated Zirconia Versus Alumina Air-Abraded Zirconia. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **23**, 267-275.
- [58] Thammajarak, P., Buranadham, S., Guazzato, M. and Wang, Y. (2023) Effect of Glass-Ceramic Coating versus Alumina Air-Abrasion on the Bond Strength and Residual Stress of Zirconia. *Clinical Oral Investigations*, **27**, 7833-7840. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05374-8>
- [59] Jin, C., Wang, J., Huang, Y., et al. (2022) Effects of Hydrofluoric Acid Concentration and Etching Time on the Bond Strength to Ceramic-Coated Zirconia. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **24**, 125-136.

- [60] Kang, C., Lin, D., Feng, S., Hung, C., Iwaguro, S. and Peng, T. (2022) Innovation Glass-Ceramic Spray Deposition Technology Improving the Adhesive Performance for Zirconium-Based Dental Restorations. *International Journal of Molecular Sciences*, **23**, Article No. 12783. <https://doi.org/10.3390/ijms232112783>
- [61] Chen, Z., Zhou, Y., Li, D., Zhang, M., Zhou, B. and Hao, P. (2024) Does the Internal Surface Treatment Technique for Enhanced Bonding Affect the Color, Transparency, and Surface Roughness of Ultra-Transparent Zirconia? *Clinical Oral Investigations*, **28**, Article No. 473. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05847-4>
- [62] Deng, J., Jin, C., Zhu, L., Liu, L., Huang, Y., Zhao, P., et al. (2023) Effects of Different Primers on the Bond Strength to Properly and Excessively Etched Ceramic-Coated Zirconia. *Operative Dentistry*, **48**, 552-563. <https://doi.org/10.2341/22-122-1>
- [63] Silva, S.E.G.d., Silva, B.C.D.d., Crispim, A.H.T., Dal Piva, A.M.d.O., Kleverlaan, C.J. and Souza, R.O.d.A.e. (2025) Effect of Different Finishing/Polishing Techniques and Glaze Application on the Flexural Strength of Ultratranslucent Zirconia after Hydrothermal Aging. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **164**, Article ID: 106924. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2025.106924>
- [64] 徐小敏, 朱燕萍, 陈春霞, 等. 上釉技术对氧化钇稳定四方相氧化锆多晶陶瓷粘接及力学性能的影响[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(16): 2520-2525.
- [65] Antunes, M.C.F., Miranda, J.S., Carvalho, R.L.A.d., Carvalho, R.F.d., Kimpara, E.T., Assunção E Souza, R.O.d., et al. (2018) Can Low-Fusing Glass Application Affect the Marginal Misfit and Bond Strength of Y-TZP Crowns? *Brazilian Oral Research*, **32**, e34. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2018.vol32.0034>
- [66] 周瑜, 王耀瑶, 陈梓杰, 等. 内表面处理对超氧化锆粘接性能及美学性能影响的研究[J]. 口腔医学研究, 2025, 41(5): 406-412.
- [67] 孙丽君, 孟虹良, 杨路, 等. 磷酸酯单体媒介的氧化锆陶瓷与树脂粘接的耐水性评价[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2019, 39(12): 1844-1848.
- [68] Ramos, R.Q., Mercelis, B., Ahmed, M.H., et al. (2024) Bonding of Composite Cements Containing 10-MDP to Zirconia Ceramics without Dedicated Ceramic Primer. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **26**, 135-145.
- [69] Su, C., Lu, Z.C. and Yu, H. (2023) 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate in Resin-to-Zirconia Bonding Durability: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Chinese Journal of Stomatology*, **58**, 1281-1290.
- [70] Abdou, A., Hussein, N., Kusumasari, C., Abo-Alazm, E.A. and Rizk, A. (2023) Alumina and Glass-Bead Blasting Effect on Bond Strength of Zirconia Using 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate (MDP) Containing Self-Adhesive Resin Cement and Primers. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 19127. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46548-4>
- [71] Chen, Y., Lu, Z., Qian, M., Zhang, H., Chen, C., Xie, H., et al. (2017) Chemical Affinity of 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate to Dental Zirconia: Effects of Molecular Structure and Solvents. *Dental Materials*, **33**, e415-e427. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.09.013>
- [72] Bömicke, W., Schwindling, F.S., Rammelsberg, P. and Rues, S. (2024) Bond Strength of Milled and Printed Zirconia to 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate (10-MDP) Resin Cement as a Function of Ceramic Conditioning, Disinfection and Ageing. *Materials*, **17**, Article No. 2159. <https://doi.org/10.3390/ma17092159>
- [73] Yang, L., Chen, B., Xie, H., et al. (2018) Durability of Resin Bonding to Zirconia Using Products Containing 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **20**, 279-287.
- [74] Cinel Sahin, S. and Celik, E. (2021) The Effect of Different Cleaning Agents and Resin Cement Materials on the Bond Strength of Contaminated Zirconia. *Microscopy Research and Technique*, **85**, 840-847. <https://doi.org/10.1002/jemt.23953>
- [75] Güers, P., Wille, S., Strunskus, T., Polonskyi, O. and Kern, M. (2019) Durability of Resin Bonding to Zirconia Ceramic after Contamination and the Use of Various Cleaning Methods. *Dental Materials*, **35**, 1388-1396. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.07.027>
- [76] Al-Dobaiei, E., Al-Akhali, M., Polonskyi, O., et al. (2020) Influence of Cleaning Methods on Resin Bonding to Contaminated Translucent 3Y-TZP Ceramic. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **22**, 383-391.
- [77] Koko, M., Takagaki, T., Abdou, A., Wada, T., Nikaido, T. and Tagami, J. (2021) Influence of 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate (MDP) Incorporated Experimental Cleaners on the Bonding Performance of Saliva-Contaminated Zirconia Ceramic. *Clinical Oral Investigations*, **26**, 1785-1795. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04153-7>
- [78] Awad, M.M., Alhalabi, F., Alzaharani, K.M., Almutiri, M., Alqanawi, F., Albdiri, L., et al. (2022) 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate (10-Mdp)-Containing Cleaner Improves Bond Strength to Contaminated Monolithic Zirconia: An In-Vitro Study. *Materials*, **15**, Article No. 1023. <https://doi.org/10.3390/ma15031023>
- [79] Musharbash, L., Fnu, K., Ozer, F., Anadioti, E. and Blatz, M.B. (2025) Effectiveness of Cleaning Agents on Bond Strength to Contaminated Zirconia. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, **37**, 2451-2458. <https://doi.org/10.1111/jerd.13512>

- [80] Tian, F., Londono, J., Villalobos, V., Pan, Y., Ho, H.X., Eshera, R., *et al.* (2022) Effectiveness of Different Cleaning Measures on the Bonding of Resin Cement to Saliva-Contaminated or Blood-Contaminated Zirconia. *Journal of Dentistry*, **120**, Article ID: 104084. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104084>
- [81] Feiz, A., Rastghalam, N. and Swift, E.J. (2022) Effect of Different Cleansing Methods on the Artificially Aged Bond Strength of Resin to Contaminated Zirconia: A Systematic Review. *Journal of Prosthodontics*, **31**, e125-e137. <https://doi.org/10.1111/jopr.13580>
- [82] Silva, N.R.D., Araújo, G.M.D., Vila-Nova, T.E, *et al.* (2022) Which Zirconia Surface-Cleaning Strategy Improves Adhesion of Resin Composite Cement after Saliva Contamination? A Systematic Review and Meta-Analysis. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **24**, 175-186.
- [83] Genc, O., Demir, N. and Zcan, M. (2025) Effects of Cleaning Protocols on Resin Bond Strength to Saliva-Contaminated Monolithic Zirconia. *The Journal of Adhesive Dentistry*, **27**, 93-102.
- [84] Sulaiman, T.A., Altak, A., Abdulmajeed, A., Rodgers, B. and Lawson, N. (2021) Cleaning Zirconia Surface Prior to Bonding: A Comparative Study of Different Methods and Solutions. *Journal of Prosthodontics*, **31**, 239-244. <https://doi.org/10.1111/jopr.13389>
- [85] Sukcheep, C., Thammajaruk, P. and Guazzato, M. (2024) Investigating the Impact of Different Cleaning Techniques on Bond Strength between Resin Cement and Zirconia and the Resulting Physical and Chemical Surface Alterations. *Journal of Prosthodontics*. <https://doi.org/10.1111/jopr.13932>
- [86] Thammajaruk, P., Guazzato, M. and Naorungroj, S. (2023) Cleaning Methods of Contaminated Zirconia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Dental Materials*, **39**, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.01.009>