

口腔半透明氧化锆陶瓷粘接效果的影响因素

姚雪敏 王华 王璐 赵彬

山西医科大学口腔医学院·口腔医院修复科 口腔疾病防治与新材料山西省重点实验室 太原 030001

[摘要] 半透明氧化锆作为新一代的氧化锆全瓷材料,具有良好的力学和光学性能,常应用于前牙美学区修复。要获得良好的远期修复效果,关键在于尽可能提高该材料的粘接强度,因此明确半透明氧化锆陶瓷材料粘接效果的影响因素非常重要。在实际应用中,半透明氧化锆的粘接效果会受到多种因素的影响,本文主要就半透明氧化锆陶瓷的组成与结构、表面处理方法、表面改性方法,粘接性单体与底涂剂等影响因素的研究进展作一综述,为其临床应用提供参考。

[关键词] 半透明氧化锆; 粘接; 表面处理; 粘接性单体

[中图分类号] R783 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2024060



开放科学(资源服务)
标识码(OSID)

Factors influencing the bonding effect of oral translucent zirconia ceramics

Yao Xuemin, Wang Hua, Wang Lu, Zhao Bin

Dept. of Prosthodontics, Shanxi Medical University School and Hospital of Stomatology, Shanxi Province Key Laboratory of Oral Diseases Prevention and New Materials, Taiyuan 030001, China

Supported by: Major Technologies R & D Special Projects of Shanxi Province Key Scientific Research Program (2022XM14); Key Research and Development Program of Shanxi Province (202202130501009)

Correspondence: Zhao Bin, Email: 18636666063@163.com

[Abstract] As a new generation of zirconia all-ceramic materials, translucent zirconia ceramics are often used to restore the anterior tooth aesthetic zone because of their good mechanical and optical properties. To achieve a good long-term repair effect, the key is to improve the bonding strength of the material as much as possible. Therefore, clinicians need to clarify the factors influencing the bonding properties of translucent zirconia ceramic materials. In practical applications, the bonding properties of translucent zirconia are affected by many factors. This paper primarily reviews the progress of research on the composition and structure, surface-treatment methods, surface-modification methods, adhesive monomers, and primer of translucent zirconia ceramics. The results can serve as a reference for clinical application.

[Key words] translucent zirconia; bonding; surface treatment; adhesive monomers

随着材料学的发展与数字化技术的应用,全锆修复体的应用逐渐增多。全锆修复体半透性较低,临床上主要用于后牙修复。为了实现更佳的美学效果,半透明氧化锆应运而生,该材料含有较多的氧化钇及立方相氧化锆成分,半透性显著提高(1 mm厚的半透明氧化锆透射系数可达25),同

时具有良好的抗弯曲强度(500~800 MPa)和断裂韧性(2.2~3.5 MPa·m^{1/2})^[1],因此可直接应用于前牙美学区修复。尤其对于严重变色的四环素牙,以及自身牙体组织半透明度较低的情况,选择半透明氧化锆可兼顾遮色与美观效果,且相较于玻璃陶瓷牙体预备量更少。

目前已有临床研究^[2-3]表明半透明氧化锆可在前牙区获得较为满意的修复效果。Souza等^[2]使用超透氧化锆贴面修复1例年轻女性患者的上前牙间隙,1年后美学效果良好。Zhang等^[3]应用半透明多层色氧化锆对30例患者进行上颌美学区单种植体修复,通过视觉模拟量表及粉白美学评估后表明:

[收稿日期] 2023-11-26; **[修回日期]** 2024-03-25

[基金项目] 山西省医学重点科研项目重大科技攻关专项(2022XM-14); 山西省重点研发计划(202202130501009)

[作者简介] 姚雪敏, 硕士, Email: yxm19982021@163.com

[通信作者] 赵彬, 主任医师, 博士, Email: 18636666063@163.com

其美学效果可与传统饰瓷氧化锆相媲美。

半透明氧化锆不含二氧化硅, 常规粘接时相较玻璃陶瓷更易发生脱粘接, 其粘接问题一直是当前的研究热点, 需要不断探索有效提高半透明氧化锆陶瓷粘接性能的方法, 完善在微创修复方面的应用, 如贴面、嵌体和高嵌体等。影响其粘接的因素包括半透明氧化锆组成、表面处理及粘接材料等, 针对其存在的问题, 研究者们正尝试用多种方法改善其粘接效果^[4]。本文主要对影响半透明氧化锆陶瓷粘接的因素及其研究进展进行综述, 为新一代氧化锆陶瓷的研究及应用提供参考。

1 半透明氧化锆陶瓷的组成、结构及其对粘接的影响

相较于传统氧化锆, 半透明氧化锆的分子结构发生了变化, 通过减小晶粒尺寸、增加氧化钇含量(超过4%)、降低具有不同折射率的氧化铝含量以及添加0.2%氧化镧等方式来提高具有各向同性的立方相含量^[5-6], 以此实现了极佳的美学性能。2015年, Tosoh公司通过添加5%氧化钇和减小晶粒尺寸2种方法增加立方相含量, 制造出Zpex Smile。研究^[5]表明: 由于应力转变, 弯曲强度和断裂强度减少至传统氧化锆的1/2至2/3。Kwon等^[7]比较了3%和5%氧化钇稳定的四方相氧化锆陶瓷(3% and 5% yttria stabilized tetragonal zirconia polycrystal, 分别简称3Y-TZP和5Y-TZP), 以及二硅酸锂玻璃陶瓷的粘接强度, 结果并无明显差异。应用于传统氧化锆的粘接方案也能用于半透明氧化锆, 并且喷砂和含磷酸盐单体的底漆或树脂水门汀联合应用能实现较长时间的粘接^[8]。

氧化锆烧结次数在一定程度上会影响其粘接强度。Oğuz等^[9]和高士军等^[10]的研究均显示: 与2次烧结相比, 第5和10次烧结增加了3Y-TZP和含10-甲基丙烯酰氧癸二氢磷酸酯(10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, 10-MDP)树脂水门汀之间的粘接强度。Grangeiro等^[11]研究则表明: 烧结次数显著影响了超透氧化锆(partially stabilized zirconia, 5Y-PSZ)和树脂水门汀间的微剪切强度, 烧结次数过多(5和10次)对5Y-PSZ与树脂水门汀间的粘接是不利的, 而烧结次数为1~3次可以提高5Y-PSZ与树脂水门汀的粘接强度。目前关于烧结次数影响半透明氧化锆的粘接效果的研究仍较少, 具体机制尚待进一步研究。

2 半透明氧化锆陶瓷表面处理方法及其对粘接的影响

2.1 氧化铝喷砂

氧化铝喷砂是氧化锆临床应用中常用的传统的表面处理方式, 通过喷溅 Al_2O_3 颗粒来增加陶瓷表面的粗糙度, 提高机械固位力。研究^[12]表明: $50\ \mu m\ Al_2O_3$ 在0.10~0.25 MPa下与含磷酸盐单体的树脂水门汀联合使用是目前临床推荐的方案。多数条件下喷砂可以有效提高传统氧化锆与半透明氧化锆的粗糙度和粘接强度, 喷砂效果受喷砂颗粒大小、喷砂压强、喷砂时间等因素的影响。对于传统氧化锆, 较大颗粒、长时间、高压强喷砂能提高粘接效果; 而对于高透及超透氧化锆, 高压喷砂不利于粘接^[13]。研究^[14]表明: 喷砂粒径和时间的增加会使高透及超透氧化锆的粘接强度增加, 而喷砂压强的增加并不会使其粘接强度增加。采用 $50\ \mu m\ 0.2\ MPa\ Al_2O_3$ 颗粒距瓷块10 cm喷砂20 s, 对高透氧化锆的粘接有轻微的强化作用, 而对超透氧化锆有弱化作用^[15]。另有研究^[16-17]也得出同样的结论, 使用 $50\ \mu m\ Al_2O_3$ 颗粒会对5Y-TZP的机械强度产生负面影响, 在未来的研究中应考虑使用较小的粒径喷砂。

2.2 激光

激光是近年来提出的一种氧化锆陶瓷表面处理的方式, 其原理是利用激光能量放电使陶瓷表层产生微爆炸, 增加氧化锆表面粗糙度, 有利于与树脂水门汀间形成机械嵌合。几种短脉冲激光, 如Nd: YAG激光、Er: YAG激光、Er, Cr: YSGG激光和 CO_2 激光均可用于氧化锆表面处理^[18]; 但Er: YAG和 CO_2 激光可能引起表面微裂开^[19], 从而降低其弯曲强度。飞秒激光可以快速产生高强度的超短脉冲且对被辐照材料的热传递很低, 即通过“冷加工”来发挥作用^[20], 在不改变表面性能的同时使陶瓷表面产生规律的凹槽, 增加表面粗糙度, 且凹槽深度、宽度甚至形状可以直接由计算机控制, 过程简单可控, 表面没有杂质产生, 也不会使氧化锆晶相改变。Tzanakakis等^[21]应用Yb: KGW飞秒激光处理超透氧化锆, 观察到氧化锆表面粗糙度增加, 且粘接强度优于喷砂处理和Er: YAG激光, 由此认为飞秒激光在理论上可以满足临床对于陶瓷与树脂粘接强度的要求。

通过改变飞秒激光的参数(如激光功率、扫

描速度、脉冲个数等), 可得到不同的微/纳米结构形貌。Abu Ruja等^[22]利用飞秒激光在氧化锆表面制备了点阵及沟槽2种微结构, 结果表明: 飞秒激光与喷砂处理均不同程度地提高了氧化锆表面粗糙度, 且激光处理后的微结构使表面性能参数更加可控。在固定其他参数不变的情况下, 通过调整扫描次数, 可得到不同深度的沟槽, 且扫描次数越多, 沟槽深度越深, 陶瓷与树脂的接触面积越大, 机械嵌合作用越强, 抗剪切强度也越高^[22]。

3 半透明氧化锆陶瓷表面改性方法及其对粘接的影响

3.1 二硅酸锂玻璃涂层

二硅酸锂玻璃涂层是在氧化锆组织面使用玻璃陶瓷涂层来实现表面粗化, 增加材料表面硅元素含量^[23], 以改善氧化锆的粘接性能, 其粘接强度的增加主要依靠微机械固位和化学结合^[24]。由于二硅酸锂玻璃陶瓷的热膨胀系数接近氧化锆, 烧结后2种材料可获得渗透式紧密结合, 即低熔点玻璃陶瓷附着在氧化锆上。有学者^[25]应用X射线衍射法对涂层后的氧化锆进行分析并未发现氧化锆晶相改变。对于硅基陶瓷, 氢氟酸 (hydrofluoric acid, HF) 酸蚀和硅烷偶联剂的联合使用被认为是当前粘接前处理的金标准^[26]。这类附有涂层的氧化锆陶瓷 (即硅化氧化锆) 经HF酸蚀后, 更易与树脂水门汀形成微机械固位, 而有研究^[27]表明微机械固位比硅烷化产生的化学键更有利于氧化锆与树脂水门汀的粘接。

近年来, 已有商品化的氧化锆表面处理剂如爱迪特的Biomimic LiSi Connect, 将其在距氧化锆表面10 cm喷涂2次后烧结形成可酸蚀的二硅酸锂陶瓷涂层, 能提高氧化锆粘接性能。Jin等^[28]在研究HF对覆有玻璃陶瓷涂层的超透氧化锆粘接性能影响时, 使用Biomimic LiSi Connect对氧化锆进行表面处理, 结果表明: 处理后抗剪切强度更高, 且电子显微镜下测得涂层厚度为 (17.0 ± 0.7) μm , 并未影响修复体就位。Thammajaruk等^[29]在比较二硅酸锂玻璃涂层和氧化铝喷砂处理对氧化锆粘接强度的研究中, 涂层组表现出更高的粘接强度。这些研究表明二硅酸锂玻璃涂层能显著改善氧化锆的表面性能和粘接强度, 但目前关于涂层的负载方式及厚度尚没有明确标准, 还需进一步确定二硅酸锂玻璃陶瓷涂层的临床最佳厚度, 以期应

用于临床氧化锆陶瓷材料的粘接提供参考。

3.2 低温等离子体 (cold atmospheric plasma, CAP)

CAP是一种新型的物质状态, 可激活和控制各种生物化学过程^[30]。作为一种新兴的材料表面改性方法, 其反应温度低, 效能高, 且不改变材料的主体性能。用于产生等离子体的常见气体源是氩气、氢气、氧气或氮气等。

CAP通过改变表面官能团形成反应位点来改善半透明氧化锆陶瓷与树脂的结合强度, 且不影响材料表面形貌, 只改变其润湿性和表面化学组成。已有研究^[31-32]发现: 由氧、氩或各种比例的混合物产生的CAP处理高透氧化锆表面, 对高透氧化锆的表面粗糙度没有明显影响, 但有效增强了高透氧化锆与树脂水门汀间的粘接强度, 并且在使用10-MDP后粘接强度进一步提高。此外, CAP应用于半透明氧化锆表面时, 能有效去除有机残留物, 促进表面化学重组, 降低细菌的生存能力^[33]。CAP作为一项新技术, 仍需要对设备进行改进。对于不同的等离子体源, 还没有一套标准化的技术数据^[34]。未来需要更可控的治疗策略, 更大规模的临床试验, 以及长期生物安全性的确认以完善其临床应用。

4 粘接性单体及其底涂剂对半透明氧化锆陶瓷粘接的影响

理想的化学粘接可最大程度地避免修复体表面的破坏, 操作简单易重复, 对机械嵌合力也会起到协同作用, 甚至代替其成为主要作用, 从而达到完美的修复效果, 如不同的活性功能性单体和树脂水门汀的应用。

4.1 粘接性单体及底涂剂

底涂剂, 又称氧化锆处理剂, 因其使用方便且增强粘接效果较为理想而层出不穷。底涂剂对氧化锆的作用类似于硅烷偶联剂, 可增强玻璃基陶瓷与树脂间的粘接强度。大多数氧化锆底涂剂中的成分末端包含磷酸基, 为酸性功能单体, 主要有磷酸酯类单体 (如10-MDP)、羧酸酯类单体 [如4-甲基丙烯酰氧乙基偏苯三酸酐 (4-methacryloxyethyl trimellitic anhydride, 4-META)] 及锆酸酯等, 可在氧化锆表面形成化学键, 并使氧化锆表面湿润, 有效提高树脂粘接剂的渗透性和机械嵌合力, 从而减少树脂水门汀与氧化锆陶瓷之间微渗漏的情况。目前临床应用最广泛的是10-

MDP, 该材料可以实现与传统氧化锆修复体稳定且长期的粘接^[8]。10-MDP最初是Kuraray公司的专利, 由于其适应性较强, 后作为填料加入底涂剂、粘接剂及自粘接树脂水门汀等产品中。研究^[8]表明: MDP所在组分不同, 对于即刻粘接强度的影响不大, 在临床操作中可任选其一应用。10-MDP分子通过一端的磷酸基团与氧化锆形成粘接, 另一端的乙烯基团与树脂基质中的不饱和碳键聚合, 这2个活性基团中间是含10个碳的长链丙烯酸酯基团, 可与树脂单体生成加聚反应, 实现氧化锆与树脂间的化学结合^[35]。有学者^[36]比较了含10-MDP的树脂水门汀 (Panavia F 2.0) 与喷砂后的传统氧化锆和半透明氧化锆间的粘接强度, 结果发现剪切强度无明显差异。此外10-MDP是一种黏稠样物质, 流动性差, 因此需要通过搭配适当的溶剂使用。极性溶液如乙醇、丙酮或乙醇与丙酮的混合液作为溶剂时, 10-MDP均能够获得良好的分散, 明显提高了氧化锆陶瓷与树脂的粘接强度^[37]。此外, 10-MDP的含量也会影响粘接强度, 质量分数为4.0%时氧化锆可获得最大的粘接强度, 无论是否进行热循环, 其与氧化锆之间的粘接强度都显著高于含商业底漆组^[38]。

4-META在改善非贵金属和金属氧化物的粘接方面非常有效。4-META易与水分子反应而生成含双键的酸性4-MET单体, 双键可与金属氧化物或釉质的羟磷灰石形成化学键, 从而提升粘接强度^[39]。Shimoe等^[40]用X射线光电子能谱分析 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 和能量色散X射线光谱 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 法研究氧化锆表面和功能单体 (4-META、10-MDP) 之间的结合, 结果显示: 4-META能与氧化锆表面形成化学粘接, 同时碳原子比分析表明4-META吸收峰较10-MDP小。Khanlar等^[41]用4-META对高透氧化锆进行表面预处理, 结果发现与10-MDP相比, 粘接性能无明显差异。

4.2 树脂水门汀

树脂水门汀因其良好的粘接效果已成为常用的间接修复体粘接剂, 种类繁多。在患者的美学需求与医生优化临床操作步骤的共同推动下, 树脂水门汀的成分仍在不断研发和改进中, 市售不同品牌树脂水门汀的粘接和固化机制也不尽相同。Garcia等^[42]用4种不同固化方式的树脂水门汀与半透明氧化锆进行粘接, 结果表明: 1年的观察评估后, RelyX Ultimate粘接效果最好且强于即刻粘接

强度, 其原因可能是双固化树脂水门汀达到了充分聚合。自粘接树脂水门汀作为一种新型粘接材料, 在使用前不须对基牙表面进行处理, 还可一定程度耐受基牙表面的潮湿^[43]。Liu等^[44]通过喷砂和粘接剂预处理氧化锆表面, 使用自粘接树脂水门汀与底涂剂处理的牙本质粘接, 结果显示出良好的粘接强度和抗水解性能, 同时证明牙本质表面使用处理剂可以显著增加氧化锆与牙本质的粘接强度。

水门汀中的填料含量、颗粒尺寸及pH值, 一些外部因素, 如修复体厚度、光固化等都可能对树脂水门汀的聚合产生影响, 从而影响树脂与氧化锆或牙齿之间的粘接强度^[43-44]。在使用树脂水门汀前要根据不同厂商的使用说明, 参考与之相关的实验与临床文献, 针对不同的修复体筛选与之相应的固化方式、操作步骤和操作时间, 才能使树脂水门汀发挥最佳的粘接效果。

综上所述, 在影响半透明氧化锆粘接的众多因素中, 组成结构、表面处理及粘接材料的改进都会提高半透明氧化锆的粘接性能, 然而目前的报道多局限于实验室研究, 还需进一步临床研究以改善其粘接效果。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

5 参考文献

- [1] Sulaiman TA, Suliman AA, Abdulmajeed AA, et al. Zirconia restoration types, properties, tooth preparation design, and bonding. A narrative review[J]. J Esthet Restor Dent, 2024, 36(1): 78-84.
 - [2] Souza R, Barbosa F, Araújo G, et al. Ultrathin monolithic zirconia veneers: reality or future? Report of a clinical case and one-year follow-up[J]. Oper Dent, 2018, 43(1): 3-11.
 - [3] Zhang CN, Zhu Y, Zhang YJ, et al. Clinical esthetic comparison between monolithic high-translucency multilayer zirconia and traditional veneered zirconia for single implant restoration in maxillary esthetic areas: prosthetic and patient-centered outcomes[J]. J Dent Sci, 2022, 17(3): 1151-1159.
 - [4] 黎敏, 华成舸, 蒋丽. 提高氧化锆陶瓷粘接性能新技术的研究进展[J]. 国际口腔医学杂志, 2021, 48(4): 485-490.
- Li M, Hua CG, Jiang L. Research progress on new

- technology for improving adhesion properties of zirconia ceramics[J]. *Int J Stomatol*, 2021, 48(4): 485-490.
- [5] Alqutaibi AY, Ghulam O, Krsoum M, et al. Revolution of current dental zirconia: a comprehensive review[J]. *Molecules*, 2022, 27(5): 1699.
- [6] Dongre P, Kavar D. Translucent zirconia—a step towards esthetics—a narrative review[J]. *Int J Curr Sci Res Rev*, 2023, 6(3): 2084-2091.
- [7] Kwon SJ, Lawson NC, McLaren EE, et al. Comparison of the mechanical properties of translucent zirconia and lithium disilicate[J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 120(1): 132-137.
- [8] Alammar A, Blatz MB. The resin bond to high-translucent zirconia—a systematic review[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2022, 34(1): 117-135.
- [9] Oğuz Eİ, Özgür ME, Sungur S, et al. Impact of multiple firings and resin cement type on shear bond strength between zirconia and resin cements[J]. *J Adv Prosthodont*, 2020, 12(4): 197-203.
- [10] 高士军, 裴鹏飞, 卢薇, 等. 饰瓷温度烧结对氧化锆陶瓷与树脂黏结剂剪切强度的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2013, 17(51): 8809-8814.
- Gao SJ, Pei PF, Lu W, et al. Decorative porcelain temperature firing affects the shear bond strength between zirconia ceramics and resin binder[J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2013, 17(51): 8809-8814.
- [11] Grangeiro M, Demachkia AM, Rodrigues CS, et al. Effect of multiple firings on the microshear bond strength between a translucent zirconia and a resin cement[J]. *Oper Dent*, 2023, 48(3): 329-336.
- [12] Quigley NP, Loo DSS, Choy C, et al. Clinical efficacy of methods for bonding to zirconia: a systematic review[J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 125(2): 231-240.
- [13] Xiong YH, Zhao P, Jin CX, et al. Effect of airborne-particle abrasion protocols and MDP-based primer on the bond strength of highly translucent zirconia [J]. *J Adhes Dent*, 2021, 23(5): 437-446.
- [14] Zhang XY, Liang W, Jiang F, et al. Effects of air-abrasion pressure on mechanical and bonding properties of translucent zirconia[J]. *Clin Oral Investig*, 2021, 25(4): 1979-1988.
- [15] McLaren EA, Maharishi A, White SN. Influence of yttria content and surface treatment on the strength of translucent zirconia materials[J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 129(4): 638-643.
- [16] Aung SSMP, Takagaki T, Lyann SK, et al. Effects of alumina-blasting pressure on the bonding to super/ultra-translucent zirconia[J]. *Dent Mater*, 2019, 35(5): 730-739.
- [17] AlMutairi R, AlNahedh H, Maawadh A, et al. Effects of different air particle abrasion protocols on the biaxial flexural strength and fractography of high/ultra-translucent zirconia[J]. *Materials*, 2021, 15(1): 244.
- [18] El Gamal A, Medioni E, Rocca JP, et al. Shear bond, wettability and AFM evaluations on CO₂ laser-irradiated CAD/CAM ceramic surfaces[J]. *Lasers Med Sci*, 2017, 32(4): 779-785.
- [19] Tzanakakis EG, Dimitriadi M, Tzoutzas I, et al. Effect of water storage on hardness and interfacial strength of resin composite luting agents bonded to surface-treated monolithic zirconia[J]. *Dent J*, 2021, 9(7): 78.
- [20] Akpınar YZ, Yavuz T, Aslan MA, et al. Effect of different surface shapes formed by femtosecond laser on zirconia-resin cement shear bond strength[J]. *J Adhes Sci Technol*, 2015, 29(3): 149-157.
- [21] Tzanakakis EC, Beketova A, Papadopoulou L, et al. Novel femto laser patterning of high translucent zirconia as an alternative to conventional particle abrasion[J]. *Dent J*, 2021, 9(2): 20.
- [22] Abu Ruja M, de Souza GM, Finer Y. Ultrashort-pulse laser as a surface treatment for bonding between zirconia and resin cement[J]. *Dent Mater*, 2019, 35(11): 1545-1556.
- [23] Amaral R, Ozcan M, Valandro LF, et al. Effect of conditioning methods on the microtensile bond strength of phosphate monomer-based cement on zirconia ceramic in dry and aged conditions[J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2008, 85(1): 1-9.
- [24] Sousa RS, Campos F, Sarmiento HR, et al. Surface roughness and bond strength between Y-TZP and self-adhesive resin cement after air particle abrasion protocols[J]. *Gen Dent*, 2016, 64(5): 50-55.
- [25] Miranda JS, Malta NV, De Carvalho RLA, et al. Which low-fusing porcelain glaze treatment tech-

- nique is better to promote a vitreous surface on Y-TZP ceramic[J]. *Rev Odonto Ciênc*, 2017, 32(4): 174-179.
- [26] Marchack BW, Sato S, Marchack CB, et al. Complete and partial contour zirconia designs for crowns and fixed dental prostheses: a clinical report[J]. *J Prosthet Dent*, 2011, 106(3): 145-152.
- [27] Wandscher VF, Prochnow C, Rippe MP, et al. Retentive strength of Y-TZP crowns: comparison of different silica coating methods on the intaglio surfaces [J]. *Oper Dent*, 2017, 42(5): E121-E133.
- [28] Jin CX, Wang JR, Huang YT, et al. Effects of hydrofluoric acid concentration and etching time on the bond strength to ceramic-coated zirconia[J]. *J Adhes Dent*, 2022, 24(1): 125-136.
- [29] Thammajaruk P, Blatz MB, Buranadham S, et al. Shear bond strength of composite cement to alumina-coated versus tribochemical silica-treated zirconia[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020, 105: 103710.
- [30] Ranjan R, Krishnamraju PV, Shankar T, et al. Non-thermal plasma in dentistry: an update[J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2017, 7(3): 71-75.
- [31] Altuntas M, Colgecen O, Ercan UK, et al. Nonthermal plasma treatment can eliminate sandblasting procedure for zirconia-resin cement bonding[J]. *Int J Prosthodont*, 2022, 35(6): 752-760.
- [32] Ye XY, Liu MY, Li J, et al. Effects of cold atmospheric plasma treatment on resin bonding to high-translucency zirconia ceramics[J]. *Dent Mater J*, 2022, 41(6): 896-904.
- [33] Karthigeyan S, Ravindran AJ, Bhat RTR, et al. Surface modification techniques for zirconia-based bio-ceramics: a review[J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2019, 11(Suppl 2): S131-S134.
- [34] Scaminaci Russo D, Cinelli F, Sarti C, et al. Adhesion to zirconia: a systematic review of current conditioning methods and bonding materials[J]. *Dent J*, 2019, 7(3): 74.
- [35] Abhishek G, Vishwanath SK, Nair A, et al. Comparative evaluation of bond strength of resin cements with and without 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate (MDP) to zirconia and effect of thermocycling on bond strength—an *in vitro* study[J]. *J Clin Exp Dent*, 2022, 14(4): e316-e320.
- [36] Franco-Tabares S, Stenport VF, Hjalmarsson L, et al. Chemical bonding to novel translucent zirconias: a mechanical and molecular investigation[J]. *J Adhes Dent*, 2019, 21(2): 107-116.
- [37] 陈莹. 不同浓度及溶剂对磷酸酯单体MDP与氧化锆间化学亲和力的影响[D]. 南京: 南京医科大学, 2018.
- Chen Y. The effects of concentration and solvent on the chemical affinity of phosphate monomer MDP to dental zirconia[D]. Nanjing: Nanjing Medical University, 2018.
- [38] Yoshida K. Effect of 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate concentrations in primers on bonding resin cements to zirconia[J]. *J Prosthodont*, 2021, 30(4): 356-362.
- [39] Shimizu H, Inokoshi M, Takagaki T, et al. Bonding efficacy of 4-META/MMA-TBB resin to surface-treated highly translucent dental zirconia[J]. *J Adhes Dent*, 2018, 20(5): 453-459.
- [40] Shimoe S, Hirata I, Otaku M, et al. Formation of chemical bonds on zirconia surfaces with acidic functional monomers[J]. *J Oral Sci*, 2018, 60(2): 187-193.
- [41] Khanlar LN, Takagaki T, Inokoshi M, et al. The effect of carboxyl-based monomers on resin bonding to highly translucent zirconia ceramics[J]. *Dent Mater J*, 2020, 39(6): 956-962.
- [42] Garcia IM, Soto-Montero J, Collares FM, et al. Bonding of resin cements to ultra-translucent zirconia after aging for 24 hours and 1 year[J]. *Int J Prosthodont*, 2022, 35(4): 460-468.
- [43] Serichetaphongse P, Chitsutheesiri S, Chengprapakorn W. Comparison of the shear bond strength of composite resins with zirconia and titanium using different resin cements[J]. *J Prosthodont Res*, 2022, 66(1): 109-116.
- [44] Liu JF, Yang CC, Luo JL, et al. Bond strength of self-adhesive resin cements to a high transparency zirconia crown and dentin[J]. *J Dent Sci*, 2022, 17(2): 973-983.