

激光及涂层表面处理对氧化锆陶瓷粘接强度的影响

杜桥 牛光良

北京中西医结合医院口腔科, 北京 100039

[摘要] 目的 探讨Er: YAG激光、Nd: YAG激光及硅锆涂层处理氧化锆陶瓷表面对其粘接强度的影响。方法 用粉末压片机制作直径为18 mm、厚度为1.5 mm的氧化锆预烧结圆形瓷片, 按照伪随机数字表法随机分为5组, 分别接受不处理烧结(空白对照组)、烧结后氧化铝颗粒喷砂(喷砂组)、烧结后Er: YAG激光照射(Er: YAG激光组)、烧结后Nd: YAG激光照射(Nd: YAG激光组)、硅锆涂层后烧结(硅锆涂层组)表面处理, 用树脂粘接剂粘接氧化锆陶瓷与复合树脂柱, 用万能测试机进行剪切强度测试, 体式显微镜下观察并记录断裂破坏模式, 粗糙度测量仪测量瓷片表面粗糙度, 扫描电子显微镜下观察表面微观形貌, 能谱仪分析表面元素组成。结果 剪切粘接强度测试结果表明, 硅锆涂层组的剪切粘接强度高于其余各组, 差异有统计学意义($P<0.05$); 喷砂组与Er: YAG激光组的粘接强度差异无统计学意义($P>0.05$), 但均高于Nd: YAG激光组, 差异有统计学意义($P<0.05$)。粗糙度测量结果表明, 硅锆涂层组的表面粗糙度高于其余各组, 差异有统计学意义($P<0.05$); 喷砂组、Er: YAG激光组和Nd: YAG激光组的表面粗糙度差异无统计学意义($P>0.05$), 但均高于空白对照组($P<0.05$)。扫描电子显微镜下观察可见, 喷砂组表面可见无规则深浅不同的划痕, Er: YAG激光组表面可见激光作用形成的较大凹坑, 较大凹坑中可见散在较小的孔洞, 氧化锆晶体结构消失, 取而代之的是局部熔融形成的相对平整表面, 表面可见大量裂纹。Nd: YAG激光组表面可见激光作用区形成凹坑, 凹坑表面可见大量裂纹形成。硅锆涂层组表面可见较为复杂的多孔结构, 可见大量“小岛样”结构, “小岛样”结构表面及其周围沟壑内可见大量氧化锆晶粒, 晶粒间存在大量微小孔隙。空白对照组、Er: YAG激光组及Nd: YAG激光组表面仅有Zr、O、Y元素, 喷砂组表面可见Al元素存在, 硅锆涂层组可见较高比例的Si元素。结论 Er: YAG激光及Nd: YAG激光处理氧化锆陶瓷表面可使其粗糙度增加, 提高与树脂粘接剂间的粘接强度。硅锆涂层处理能增加氧化锆表面粗糙度和粘接强度, 且效果优于喷砂及激光处理。

[关键词] 氧化锆; 表面处理; 粘接强度; 激光; 涂层

[中图分类号] R783.2 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2024.2023369



本文链接 开放科学标识码

Effect of laser and coating surface treatment on the bond strength of zirconia ceramics

Du Qiao, Niu Guangliang

Dept. of Stomatology, Beijing Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Beijing 100039, China

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFC1104300); Scientific Research and Cultivation Program of Beijing Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine (zxykt202303)

Correspondence: Niu Guangliang, E-mail: Newgl@sina.com

[Abstract] **Objective** This study aims to investigate bond strength between zirconia and resin cement through surface treatments with Er: YAG laser, Nd: YAG laser, and Si-Zr coating. **Methods** Seventy-five round pre-sintered zirconia discs with a diameter of 18 mm and a thickness of 1.5 mm were prepared by a powder compactor. Fifty discs were randomly divided into five groups of 10 discs each and were subjected to five surface treatments: no treatment (control group), sandblasting with alumina particles (sandblasting group), Er: YAG laser treatment (Er: YAG laser group), Nd: YAG laser treatment (Nd: YAG laser group), and Si-Zr coating treatment (Si-Zr coating group). The discs were then bonded to composite resin columns with resin

[收稿日期] 2023-11-03; **[修回日期]** 2023-12-19

[基金项目] 国家重点研发计划(2017YFC1104300); 北京中西医结合医院科研培育计划(zxykt202303)

[作者简介] 杜桥, 主治医师, 硕士, E-mail: duqiao8897@126.com

[通信作者] 牛光良, 主任医师, 博士, E-mail: Newgl@sina.com

cement. The shear bond strength of each group was tested with a universal tester. Roughness tester, scanning electron microscope (SEM), and energy dispersive spectroscopy were used to analyze surface performance. **Results** The bond strength of the Si-Zr coating group was higher than that of the remaining groups ($P<0.05$). The difference in bond strength between the sandblasting group and the Er: YAG laser group was not statistically significant ($P>0.05$), but both of them had higher bond strength than the Nd: YAG laser group ($P<0.05$). The Si-Zr coating group had the highest surface roughness ($P<0.05$). The surface roughness of the sandblasting, Er: YAG laser, and Nd: YAG laser groups was higher than that of the control group ($P<0.05$), but the difference among the three groups was not statistically significant ($P>0.05$). SEM observations showed irregular scratches on the surface of the sandblasting group and large pits with holes on the surface of the Er: YAG and Nd: YAG laser groups. In the Er: YAG laser group, the crystal structure was replaced by a smooth surface with a large amount of microcracks due to partial melting. Complex porous structures that comprised “island-like” structures and mass pores among the grains were observed on the surface of the Si-Zr coating. Only Zr, O, and Y were detected on the surfaces of the control, Er: YAG laser, and Nd: YAG laser groups. Al was found on the surface of the sandblasted group, and a higher proportion of Si was detected on the surface of the Si-Zr coating group. **Conclusion** Er: YAG laser and Nd: YAG laser treatment on the zirconia ceramic surface could increase roughness and improve the bond strength to resin cement. Si-Zr coating treatment is an effective alternative for increasing the roughness and bond strength of zirconia surface and is superior to sandblasting and laser treatments.

[Key words] zirconia; surface treatment; bond strength; laser; coating

氧化锆陶瓷是被最广泛应用于口腔修复的全瓷材料之一，然而其表面具有化学惰性，较难与口腔粘接材料形成稳定的粘接力。学者^[1-3]就此做了大量的相关研究，该研究主要着眼于氧化锆陶瓷材料的表面处理。喷砂处理已被证实具有一定效果而在临床上广泛使用，但高速喷射的氧化锆颗粒可对氧化锆表面造成一定的影响，从而可能降低其远期的机械性能。口腔激光处理可一定程度上改善氧化锆材料的粘接性能，然而处理效果尚存在一定的争议。硅锆涂层被证明可显著提高氧化锆表面与树脂粘接剂间的粘接强度。本研究拟对比4种不同的氧化锆材料表面处理方法对其粘接性能的影响，以期为氧化锆材料的口腔临床应用提供一定的理论基础。

1 材料和方法

1.1 实验材料与设备

氧化锆粉末（第一稀元素化学工业株式会社，日本），纳米氧化硅粉（平均粒径15 nm，南京爱普瑞纳米材料有限公司），柠檬酸铵（国药集团化学试剂有限公司），复合树脂（Z250，3M公司，美国），自粘接双固化树脂水门汀（SAC，Kuraray公司，日本），氢氟酸凝胶（9.5%，Bisco公司，美国），电子天平（Ohaus公司，美国），粉末压片机（JZP40，上海精胜科学仪器有限公司），氧化锆结晶炉（西诺德公司，德国），高真空离子溅射

镀膜仪（Q150R ES，Quorum公司，英国），Er: YAG激光（Syneron公司，以色列），Nd: YAG激光（HSM-III，四川航天世都制导有限公司），万能试验机（Instron公司，美国），粗糙度测量仪（SJ400，Mitutoyo公司，日本），场发射扫描电子显微镜（JEOL公司，日本），体式显微镜（昆山高品精密仪器有限公司）。

1.2 氧化锆陶瓷片的制作

用电子天平称取1.2 g氧化锆粉末，填入直径为18 mm的金属磨具中，将其置入全自动粉末压片机工作台，调整压力为4 000 kg，压强为170 MPa，加压时间为300 s，制得氧化锆干压片。将干压片置入氧化锆结晶炉烧盘中，调节升温速度为8 °C/min，至900 °C保持2 h，获得氧化锆预烧陶瓷片，在1 000目水砂纸上打磨成直径18 mm、厚度1.5 mm统一标准瓷片。按以上方法制作氧化锆预烧陶瓷片共75片。

1.3 氧化锆瓷片表面处理

将其中50片瓷片按照伪随机数字表法随机分为5组，分别为空白对照组、喷砂组、Er: YAG激光组、Nd: YAG激光组、硅锆涂层组，每组各10片。空白对照组瓷片表面不处理。喷砂组瓷片烧结后表面用粒径为110 μm氧化铝颗粒进行表面喷砂，喷砂压力2.5 Bar，距离瓷片距离10 mm，喷砂头垂直喷射，持续10 s，无水乙醇中超声清洗10 min。Er: YAG激光组瓷片烧结后在高真空离子溅射镀膜仪内表面镀碳膜，调整Er: YAG激光能量

参数 200 mJ, 频率 10 Hz, 保持激光导光头距瓷片 1 mm, 呈游走型垂直照射 20 s, 处理后置入无水乙醇中超声清洗 10 min。Nd: YAG 激光组瓷片表面镀膜后, 调整 Nd: YAG 激光能量参数 100 mJ, 频率 20 Hz, 保持激光导光头距瓷片 1 mm, 呈游走型垂直照射 20 s, 处理后置入无水乙醇中超声清洗 10 min, Er:YAG 激光与 Nd:YAG 激光功率均为 2 W。硅锆涂层组瓷片进行硅锆浆料涂层后烧结, 涂层浆料中氧化硅和氧化锆摩尔比为 1:1。完全烧结的程序为升温速度 12 °C/min, 保持温度 1 450 °C, 保持时间 2 h, 烧结完成后用氢氟酸蚀 60 s, 蒸馏水冲洗后干燥备用。

1.4 粘接树脂柱的制作

用充填器将复合树脂填入内径为 4 mm 的圆柱形模具中, 双面均光照固化 40 s, 制作成直径 4 mm、高度 4 mm 的复合树脂柱。将复合树脂柱其中一面用 800 目水砂纸打磨后, 置入无水乙醇中进行超声荡洗 5 min, 取出后干燥备用。

1.5 粘接试件的制作

将打有圆孔直径为 3 mm 的限定面积胶带贴于各组瓷片粘接面上, 统一粘接面为直径 3 mm 的圆形, 粘接面涂抹硅烷偶联剂, 自然挥发, 在调拌纸上按照说明书调和树脂水门汀, 涂布于粘接面圆孔中, 将树脂柱就位于圆孔, 树脂柱中心轴与圆孔圆心一致, 用 1 kg 重物垂直加压树脂柱, 小心去除边缘溢出树脂水门汀, 粘接界面四周各光照固化 40 s, 共 160 s。

1.6 剪切粘接强度测试

用自凝甲基丙烯酸甲酯树脂注入专用模具内对粘接试件进行包埋, 确保自凝树脂柱与瓷片粘接面垂直, 包埋后试件如图 1 所示, 取出所有包埋好的粘接试件并将其置入 37 °C 蒸馏水中水浴 24 h。启动万能试验机, 将粘接试件放入专用夹具中, 紧固固定螺丝, 剪切加载示意图及实物图见图 2。调节加载速度为 0.5 mm/min, 直至复合树脂柱脱落, 记录剪切力载荷 (N), 计算剪切粘接强度 (MPa)。

1.7 破坏模式观察

在体式显微镜下观察各组粘接试件破坏模式。破坏模式分为 3 种。1) 界面破坏: 粘接破坏仅发生于氧化锆瓷片与树脂水门汀之间; 2) 内聚破坏: 粘接破坏仅发生于树脂水门汀内部; 3) 混合破坏: 粘接破坏不仅发生于氧化锆瓷片与树脂水门汀之间, 同时发生于树脂水门汀内部。



图 1 包埋后试件

Fig 1 Test specimens imbedded

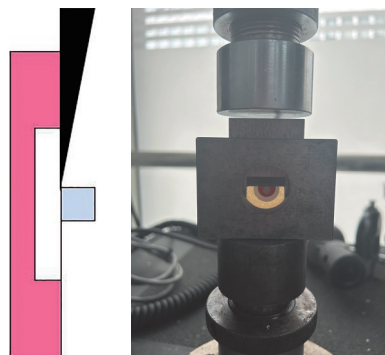


图 2 剪切加载示意图 (左) 及实物图 (右)

Fig 2 Schematic diagram (left) and picture (right) of shear bond strength testing

1.8 表面粗糙度测量

将余留 20 片瓷片随机分为 5 组, 每组 5 个瓷片。分组及瓷片表面处理方法同前述 1.3 中的方法。用粗糙度测量仪测量表面粗糙度 (Ra), 每片瓷片选取 5 个位点进行测量, 取平均值作为该瓷片的粗糙度。

1.9 场发射扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察

随机选取 1.8 中的瓷片, 每组 1 片, 表面喷金后在场发射 SEM 下观察表面微观形貌, 用配套的能谱仪分析表面元素组成。

1.10 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析。Shapiro-Wilk 检验验证各组剪切粘接强度与表面粗糙度数据是否符合正态分布, Levene 检验验证方差是否齐性。采用单因素方差分析对各组剪切粘接强度与表面粗糙度进行统计学分析, LSD 法进行组间多重比较。采用行×列表资料的 χ^2 检验对各组破坏模式进行统计分析。检验水准均为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 剪切粘接强度测试结果

空白对照组、喷砂组、Er: YAG 激光组、Nd:

YAG 激光组、硅锆涂层组的剪切粘接强度分别为 (9.28±1.33)、(22.45±2.33)、(20.83±1.97)、(15.87±1.47)、(39.69±3.23) MPa。统计分析表明, 5 组间的差异有统计学意义 ($F=80.293, P=0.000$)。进一步两两比较, 硅锆涂层组的剪切粘接强度高于其余各组, 差异有统计学意义 ($P<0.05$); 喷砂组、Er: YAG 激光组、Nd: YAG 激光组的剪切粘接强度高于空白对照组, 差异有统计学意义 ($P<0.05$); 喷砂组与 Er: YAG 激光组的粘接强度差异无统计学意义 ($P>0.05$), 但均高于 Nd: YAG 激光组, 差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

2.2 粘接破坏模式结果

各组粘接破坏模式结果见表 1, 统计分析表明, 5 组的粘接破坏模式差异有统计学意义 ($\chi^2=52.648, P=0.000$)。空白对照组、Er: YAG 激光组及 Nd: YAG 激光组破坏模式均为界面破坏, 喷砂组以界面破坏为主, 硅锆涂层组以混合破坏为主。

表 1 各组破坏模式频数分布

Tab 1 Failure modes of every group

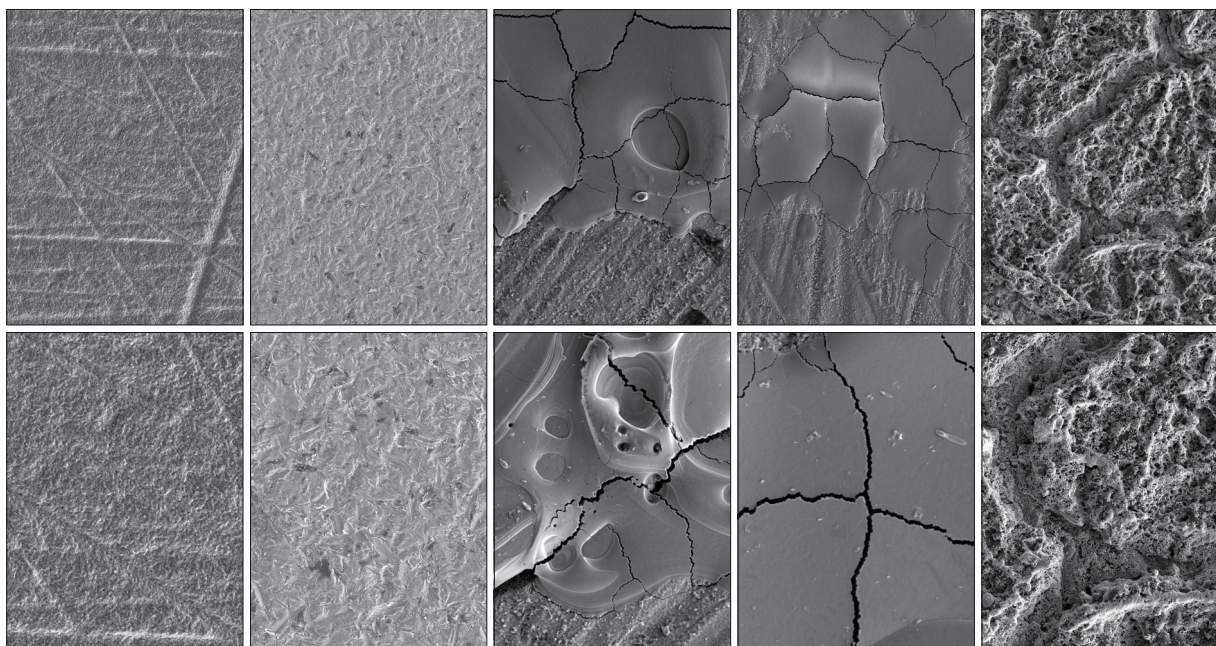
组别	内聚破坏	混合破坏	界面破坏
空白对照组	0	0	10
喷砂组	0	2	8
Er: YAG 激光组	0	0	10
Nd: YAG 激光组	0	0	10
硅锆涂层组	1	6	3

2.3 表面粗糙度测量结果

空白对照组、喷砂组、Er: YAG 激光组、Nd: YAG 激光组、硅锆涂层组的表面粗糙度分别为 (0.33±0.04)、(0.96±0.09)、(0.98±0.12)、(0.72±0.04)、(3.8±0.35) μm 。统计分析表明, 5 组间的差异有统计学意义 ($F=195.936, P=0.000$)。进一步两两比较, 硅锆涂层组的表面粗糙度高于其余各组, 差异有统计学意义 ($P<0.05$); 喷砂组、Er: YAG 激光组和 Nd: YAG 激光组的表面粗糙度差异无统计学意义 ($P>0.05$), 但均高于空白对照组 ($P<0.05$)。

2.4 SEM 观察结果

各组 SEM 观察结果见图 3。空白对照组表面可见表面相对平整, 伴有砂纸打磨过程留下的规则痕迹, 氧化锆晶体紧密排列。喷砂组表面可见无规则深浅不同的划痕, 划痕底部可见由于氧化铝冲击造成的锐利切迹。Er: YAG 激光组表面可见激光作用形成的较大凹坑, 较大凹坑中可见散在较小的孔洞, 氧化锆晶体结构消失, 取而代之的是表面氧化锆熔融形成的相对平整表面, 表面可见大量裂纹。Nd: YAG 激光组表面可见激光作用区形成凹坑, 凹坑表面可见大量裂纹形成。硅锆涂层组表面可见较为复杂的多孔结构, 可见大量“小岛样”结构, “小岛样”结构表面及其周围沟壑内可见大量氧化锆晶粒, 晶粒间存在大量微小孔隙。



从左到右依次为空白对照组、喷砂组、Er: YAG 激光组、Nd: YAG 激光组、硅锆涂层组。上: $\times 500$; 下: $\times 1000$ 。

图 3 各组表面微观形貌 SEM

Fig 3 Surface micromorphology of every group SEM

2.5 能谱分析检测结果

空白对照组、Er: YAG激光组及Nd: YAG激光组表面仅有Zr、O、Y元素,喷砂组表面可见Al元素存在,硅锆涂层组可见较高比例的Si元素。

3 讨论

氧化锆陶瓷材料表面的粗化和改性是改善其粘接性能的重要途径^[4],围绕此两个方面国内外学者^[5-7]进行了大量的相关研究。喷砂被证实为粗化氧化锆表面的有效方法,然而氧化铝颗粒的高速冲击可使其表面完整性遭受破坏,引发氧化锆四方晶相发生相变,进而可能影响氧化锆材料远期物理机械性能。因此,提倡轻压力喷砂,以减少对氧化锆表面的损害。

激光在口腔治疗中的应用日益广泛,其中Er: YAG激光和Nd: YAG激光是临床常用的激光类型。激光既有促进粘接的能力,亦可实现修复体的去粘接。氧化锆材料表面进行激光照射时,直接作用于氧化锆表面的激光能量可改变氧化锆表面的形貌进而影响其粘接性能,穿透氧化锆的部分激光可使粘接水门汀发生微爆破进而实现修复体的去粘接。学者^[8-14]针对激光处理氧化锆表面是否能提高其粘接强度做了大量的实验研究,结果表明,激光处理后粘接强度的改变尚存在一定的争议。Arami等^[15]研究认为,Er: YAG激光及Nd: YAG激光均可使氧化锆陶瓷表面形成粗糙表面,其中Er: YAG激光处理后可产生与氧化铝颗粒喷砂处理相类似的粗糙度,Nd: YAG激光处理后可形成大量裂纹的粗化表面。本实验SEM下可观察到空白对照组表面较为平整,伴有少量砂纸打磨的圆钝划痕,氧化锆晶体紧密排列。喷砂组表面由于氧化铝颗粒的冲击,晶体结构消失,形成无规则的深浅不同的划痕,划痕边缘锋利。激光处理组表面可见散在高密度能量作用造成的凹坑,凹坑表面相对平整,其间可见大量微裂纹,晶粒结构消失,系因瞬间高能量致表面温度超过氧化锆熔点,局部熔融冷却后开裂导致。Er: YAG激光组表面的凹坑中可见散在的孔洞,可能因Er: YAG激光高能量冲击造成。Nd: YAG激光处理组能观察到更为平整光滑的表面,且形成裂纹,可能因为Nd: YAG激光能量小于Er: YAG激光所导致。激光处理组仅在激光照射作用区域形成表面形貌变化,凹坑边缘未被激光照射处的形貌与空白对照组无差异。激光处理后造成的表面缺陷是否对氧化锆的机械

性能造成影响,有待进一步研究。硅锆涂层组表面可见不规则的多孔结构,因氧化锆粉末与熔融的氧化硅粉末形成复合结构,经过氢氟酸酸蚀去除氧化硅成分后,暴露出的表面可见不规则的“沟”“嵴”及“小岛”状复合多孔结构,氧化锆晶体间亦可见孔隙形成,该结构有利于树脂粘接剂的渗入形成微机械嵌合。

表面能谱分析结果显示,空白对照组、Er: YAG激光组及Nd: YAG激光组表面只存在Zr、O、Y元素,表明激光处理不会形成表面污染;喷砂组表面可见Al元素,系氧化铝喷砂颗粒残留导致;硅锆涂层组表面存在大量的Si元素,系存在未被酸蚀去除的氧化硅成分。

表面粗糙度是衡量表面粗化程度的重要指标。本研究粗糙度测量结果表明,Er: YAG激光、Nd: YAG激光组均能使氧化锆表面粗化,且粗化效果与喷砂处理无差异。硅锆涂层处理对氧化锆的粗化效果最佳。

Yassaci等^[16]研究发现,Er: YAG激光处理氧化锆表面后的粘接强度低于喷砂处理。也有研究^[12-14]表明激光处理氧化锆表面后的粘接强度与喷砂处理差异无统计学意义。Cavalcanti等^[17]研究表明,相对低能量激光能减少氧化锆表面损伤。本研究使用Er: YAG激光和Nd: YAG激光对氧化锆表面进行处理,激光功率均为2 W,处理前对表面喷涂碳膜进行表面黑化,增加氧化锆表面能量吸收。

笔者^[18-19]前期研究表明,在氧化锆表面进行硅锆涂层能明显提高其与树脂粘接剂间的粘接强度,氧化硅与氧化锆摩尔比1:1时粘接强度最高,故本实验选择1:1涂层组参与对比研究。

本实验粘接强度测试结果表明,硅锆涂层处理可获得最高的粘接强度,这一结果与SEM观察到的表面形态相一致,硅锆涂层形成的多孔结构能与树脂水门汀形成微机械嵌合力,表面未被酸蚀去除的硅元素能与硅烷偶联剂反应形成化学结合力,从而明显提高氧化锆的粘接性能。硅锆涂层组的破坏模式以混合破坏为主,证实硅锆涂层组具有较高的粘接强度。Er: YAG激光和Nd: YAG激光处理尽管能一定程度上提高氧化锆与树脂水门汀间的粘接强度,但与喷砂处理差异无统计学意义或低于喷砂组,且会对氧化锆表面完整性形成破坏,造成较大的表面缺陷与裂纹,因此本研究结果不支持激光处理作为氧化锆表面处理推荐方法。硅锆涂层作为一种对氧化锆表面无创的处理方法,浆料制备方法简单,原料易于获取,同

时对氧化锆的粘接性能具有较大的改善, 具有良好的临床应用可预见性, 对于依靠粘接固位的氧化锆微创修复体, 该研究结果有望提供一种促进修复体粘接的有效表面处理手段。

综上, 硅锆涂层能使氧化锆表面形成多孔结构, 提高其与树脂水门汀间的粘接强度。Er: YAG激光及Nd: YAG激光处理能使氧化锆表面粗糙度增高, 并提高其粘接强度, 但并不优于喷砂处理。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Maciel LC, Amaral M, Queiroz DA, et al. The effect of repeated surface treatment of zirconia on its bond strength to resin cement[J]. J Adv Prosthodont, 2020, 12(5): 291-298.
- [2] Joukhadar C, Osman E, Rayyan M, et al. Comparison between different surface treatment methods on shear bond strength of zirconia (*in vitro* study)[J]. J Clin Exp Dent, 2020, 12(3): e264-e270.
- [3] Moqbel NM, Al-Akhali M, Wille S, et al. Influence of aging and surface treatment on the composite bond strength to translucent 3Y-TZP zirconia[J]. J Adhes Dent, 2022, 24(1): 375-384.
- [4] 杜桥, 牛光良. 氧化锆的表面粗化和改性[J]. 国际口腔医学杂志, 2015, 42(1): 97-101.
Du Q, Niu GL. Surface roughening zirconia and modification[J]. Int J Stomatol, 2015, 42(1): 97-101.
- [5] Su Z, Li M, Zhang L, et al. A novel porous silica-zirconia coating for improving bond performance of dental zirconia[J]. J Zhejiang Univ Sci B, 2021, 22(3): 214-222.
- [6] Uno S, Okada M, Taketa H, et al. Toughening of highly translucent zirconia by monoclinic ZrO₂ and SiO₂ particle coating[J]. Dent Mater J, 2020, 39(2): 295-301.
- [7] Akar T, Dündar A, Kırmalı Ö, et al. Evaluation of the shear bond strength of zirconia to a self-adhesive resin cement after different surface treatment[J]. Dent Med Probl, 2021, 58(4): 463-472.
- [8] da Silva BTF, Trevelin LT, Schroeter AC, et al. Effect of silica coating and laser treatment on the flexural strength, surface characteristics, and bond strength of a dental zirconia[J]. Eur J Oral Sci, 2021, 129(1): e12754.
- [9] Henriques B, Fabris D, Souza JCM, et al. Bond strength enhancement of zirconia-porcelain interfaces via Nd: YAG laser surface structuring[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 81: 161-167.
- [10] Zhang X, Dong H, Wu X, et al. Evaluation of Er: YAG laser energy transmitted through novel dental zirconia ceramics[J]. Dent Mater J, 2023, 42(5): 669-675.
- [11] Asadzadeh N, Ghorbanian F, Ahrary F, et al. Bond strength of resin cement and glass ionomer to Nd: YAG laser-treated zirconia ceramics[J]. J Prosthodont, 2019, 28(4): e881-e885.
- [12] Hatami M, Lotfi-Kamran M, Davari A, et al. Effect of different laser treatments on the shear bond strength of zirconia ceramic to resin cement[J]. Dent Res J (Isfahan), 2021, 18: 56.
- [13] Akhavan Zanjani V, Ahmadi H, Nateghifard A, et al. Effect of different laser surface treatment on microshear bond strength between zirconia ceramic and resin cement [J]. J Invest Clin Dent, 2015, 6(4): 294-300.
- [14] Moretto SG, de Freitas PM, Inca HEC, et al. Influence of Er: YAG laser surface treatment on flexural and bond strengths to glass-infiltrated zirconia-reinforced ceramic [J]. Lasers Med Sci, 2021, 36(7): 1487-1495.
- [15] Arami S, Tabatabae MH, Namdar SF, et al. Effects of different lasers and particle abrasion on surface characteristics of zirconia ceramics[J]. J Dent (Tehran), 2014, 11(2): 233-241.
- [16] Yassaei S, Aghili HA, Davari A, et al. Effect of four methods of surface treatment on shear bond strength of orthodontic brackets to zirconium[J]. J Dent (Tehran), 2015, 12(4): 281-289.
- [17] Cavalcanti AN, Pilecki P, Foxtton RM, et al. Evaluation of the surface roughness and morphologic features of Y-TZP ceramics after different surface treatments[J]. Photomed Laser Surg, 2009, 27(3): 473-479.
- [18] 杜桥, 牛光良. 硅锆浆料涂层对氧化锆陶瓷与树脂水门汀粘接强度的影响[J]. 中华口腔医学杂志, 2022, 57(9): 932-937.
Du Q, Niu GL. Effect of SiO₂-ZrO₂ slurry coating on shear bond strength of zirconia to resin cement[J]. Chin J Stomatol, 2022, 57(9): 932-937.
- [19] 杜桥, 牛光良, 林红, 等. 硅锆浆料涂层对氧化锆陶瓷表面性能的影响[J]. 中华口腔医学杂志, 2015, 50(11): 681-684.
Du Q, Niu GL, Lin H, et al. Effect of SiO₂-ZrO₂ slurry coating on surface performance of zirconia ceramic[J]. Chin J Stomatol, 2015, 50(11): 681-684.

(本文编辑 李彩)