

· 口腔医学研究 ·

低温等离子体表面处理对氧化锆陶瓷-树脂短期粘接强度的影响

崔雅楠, 严雨欣, 王莉莉, 严佳, 章非敏*, 刘梅*

南京医科大学口腔疾病研究江苏省重点实验室, 南京医科大学附属口腔医院修复科, 江苏 南京 210029

[摘要] 目的: 研究不同等离子体处理对牙科氧化锆陶瓷表面短期粘接强度的影响。方法: 制作氧化锆陶瓷试件, 喷砂后随机分为5组, 进行不同表面处理。A组: 喷砂组; B组: 喷砂+氧气(oxygen, O₂)等离子体组; C组: 喷砂+氩气(argon, Ar)等离子体组; D组: 喷砂+氮气(nitrogen, N₂)等离子体组; E组: 喷砂+底涂剂Z-Prime Plus组。以扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、能量色散谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)、原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)和水接触角测试仪表征各处理组的氧化锆陶瓷表面形貌、碳氧元素含量、粗糙度和表面亲水性。制备复合树脂柱, 以树脂水门汀将其粘固于处理后的氧化锆陶瓷表面, 将粘接试件水浴24 h后, 测试剪切粘接强度(shear bond strength, SBS), 并分析破坏模式。结果: SEM显示不同等离子体处理陶瓷后表面形貌无明显变化, EDS显示碳元素减少, 氧元素增加, 碳/氧比值减小。水接触角测试表明等离子体改性后表面亲水性相比于A组明显增加。SBS结果表明, 与A、B、D组相比, C组陶瓷短期SBS明显提高($P < 0.05$), 与E组相比差异无统计学意义。结论: Ar等离子体表面处理可显著提高牙科氧化锆陶瓷-树脂的短期粘接强度。

[关键词] 氧化锆; 低温等离子体处理; 剪切粘接强度

[中图分类号] R783.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2020)06-897-06

doi: 10.7655/NYDXBNS20200624

The short-term effects of nonthermal plasma treatments on zirconia ceramic-resin bond strength

CUI Yanan, YAN Yuxin, WANG Lili, YAN Jia, ZHANG Feimin*, LIU Mei*

Jiangsu Key Laboratory of Oral Diseases, Department of Prosthodontics, the Affiliated Stomatological Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

[Abstract] **Objective:** This study aims to evaluate the short-term effects of different plasmas treatments on short-term bond strength of zirconia ceramic surface. **Methods:** Many pieces of zirconia ceramic slices were sandblasted and randomly divided into 5 groups based on different treatments. Group A, sandblast group; Group B, sandblast + oxygen (O₂) plasma group; Group C, sandblast + argon (Ar) plasma group; Group D: sandblast + nitrogen (N₂) plasma group; Group E: sandblast+Z-Prime plus group. The zirconia surface topography, contents of carbon and oxygen elements, roughness values, hydrophilicity were determined by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrum (EDS), atomic force microscope (AFM) and water contact angle assay, respectively. And then composite resin columns were prepared and cemented on the pre-treated zirconia blocks with composite resin cement. Initial shear bond strengths(SBS) between zirconia and resin were measured after 24 h water storage. Failure modes were also analyzed. **Results:** There was no obvious difference in zirconia topography among testing groups. EDS showed that contents of carbon decreased and contents of oxygen increased after zirconia treated by different plasmas. Water contact angle test found that surface energy in groups treated with plasma was significantly improved comparing with group A. SBS test suggested that SBS in group C was similar as group E ($P > 0.05$), and SBS in both of them were significantly increased compared with other groups ($P < 0.05$). **Conclusion:** The short-term bonding strength of zirconia can be significantly increased after treated by Ar plasma.

[Key words] zirconia; nonthermal plasma treatment; shear bond strength

[J Nanjing Med Univ, 2020, 40(06): 897-902]

[基金项目] 国家重点研发计划纳米科技重点专项(2016YFA0201704); 国家自然科学基金青年基金81701025; 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(2018-87)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: fmzhang@njmu.edu.cn; liumei2017@njmu.edu.cn

氧化锆陶瓷由于具有良好的机械强度、生物相容性和美学性能,被广泛应用于固定义齿的修复。然而,氧化锆陶瓷虽结构稳定,但表面呈化学惰性,表面能低,不含有玻璃相,氢氟酸酸蚀不能产生良好效果,与树脂粘接剂缺少化学结合^[1-3]。因此提高牙科氧化锆陶瓷的粘接强度一直是研究热点。现阶段,用于提高氧化锆陶瓷-树脂粘接性能的表面处理方法有很多种:喷砂、酸处理、硅溶胶沉积、低温等离子体处理等。其中,低温等离子体处理技术工艺简单,对材料表面理化性质的影响小,不会产生有害污染物,绿色环保,可以清洁材料表面等,广泛应用于材料的表面活化。低温等离子体处理技术对通入气体施加足够能量使之活化成等离子体状态,这些活化组分具有高能性,处理样品表面,从而实现表面清洁、改性、活化等目的。整个体系处于低温状态。Ito等^[4]研究发现低温通入氦气等离子体方法处理氧化锆可以显著提高氧化锆-树脂剪切强度;Canullo等^[5]通入氩气(argon, Ar)等离子体处理不同时间,发现处理后均可提高氧化锆-树脂剪切强度;Valverde等^[6]研究表明通入Ar等离子体处理后陶瓷表面微拉伸强度明显提高。瑞士Aladag等^[7]研究发现,氧化锆陶瓷表面经空气磨损后形成凹沟结构,再用含甲基丙烯酰氧癸二氢磷酸酯(methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, MDP)的氧化锆底涂剂处理可明显增加粘接强度。虽然,目前国内外不少研究涉及等离子体处理对陶瓷表面粘接强度的影响^[5-8],但尚未有研究系统比较3种不同的等离子体处理对牙科氧化锆陶瓷粘接强度的影响。因此,本研究拟通过系统比较不同低温等离子体处理对喷砂后的牙科氧化锆陶瓷-树脂粘接强度的影响,并与临床常用的瓷底涂剂Z-Prime Plus进行比较,来综合评价其粘接效果。

1 材料和方法

1.1 材料

可切削氧化锆瓷块(VITA公司,德国),瓷底涂剂Z-Prime Plus(Bisco公司,美国),瓷粘接剂Choice 2 Translucent(Bisco公司,美国),光固化复合树脂Light-core(Bisco公司,美国),树脂水门汀Choice 2 Translucent Al(Bisco公司,美国),光固化灯Elipar™ DeepCure-S(3M公司,美国),低速切割机(Buehler公司,美国),HP-2400生产型大气辉光放电等离子体处理机(南京苏曼等离子体科技有限公司),电子万能材料试验机(Instron公司,美国),扫描电子显微镜

(scanning electron microscope, SEM)及能量色散谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)(日立高新技术公司,日本),水接触角测试仪(南京苏曼等离子体科技有限公司),原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)(Bruker公司,德国)。

1.2 方法

1.2.1 氧化锆陶瓷试件制作、分组及表面处理

利用高精度切割机将氧化锆瓷块胚体切割成19 mm×15 mm×2 mm的陶瓷片,按照厂家提供的烧结程序在技工室完成烧结,每个陶瓷片确定粘接面,在0.3 MPa的压强下距粘接面10 mm处以110 μm的氧化铝颗粒均匀喷砂20 s,用无水乙醇超声清洗20 min,无油空气吹干,随机分为5组,每组17个。A组:喷砂组;B组:喷砂+氧气(oxygen, O₂)等离子体处理组;C组:喷砂+Ar等离子体处理;D组:喷砂+氮气(nitrogen, N₂)等离子体处理组;E组:喷砂+Z-Prime Plus处理组。

1.2.2 处理方法

将拟行等离子体处理的氧化锆试件置于低温等离子体机的等离子体仓中,分别通入由80%的试验气体和20%空气的混合气体,气压为2 000 Pa,接通电流,工作电流为2.0 A,功率为99%,激发产生低温等离子体,处理120 s。E组的氧化锆试件按说明书要求将瓷底涂剂Z-Prime Plus均匀涂布于氧化锆试件表面,气枪轻轻吹匀,静置3 min,备用。

1.2.3 SEM及EDS检测

将不同处理后的氧化锆陶瓷进行喷金处理,在SEM下观察其处理后的表面形貌并用EDS分析表面碳、氧元素。

1.2.4 AFM测表面粗糙度(roughness of surface, Ra)

AFM检测的扫描频率为1 Hz,探头尖端半径为2~8 nm。每组随机选取3个不同的位置来测量Ra并计算平均值。

1.2.5 亲水性检测

将经过不同表面处理后的氧化锆陶瓷片在超声机器中用无水乙醇清洗20 min,过夜干燥,垂直静滴1滴去离子水,用水接触角度仪进行测试。

1.2.6 剪切粘接强度(shear bond strength, SBS)测试试件的制作

制作直径6 mm、高2 mm的光固化复合树脂圆柱备用。各组预处理后的陶瓷片用无油空气吹干,在陶瓷片粘接面上涂布一薄层粘接剂,风干至表面看不到流动的液体、有均匀光泽为止,光固化10 s。在粘接剂涂层上涂一薄层光固化复合树脂水门汀,

将复合树脂柱于30 N压力下放置于树脂水门汀上,持续加压10 s,沿边缘去除多余树脂水门汀,于每个树脂柱前、后、左、右及顶部5个方向各光照固化20 s。将每组试件放入水浴锅中24 h备用。

1.2.7 SBS检测

将水浴24 h的试件包埋进自凝塑料中,置于万能试验机,调整加载头使剪切刀刃的方向与树脂陶瓷粘接面平行,加载速度为1 mm/min,记录每个树脂圆柱体脱落所需的最大负荷F。根据以下公式计算SBS值: $SBS(MPa)=\frac{\text{最大载荷}(N)}{\text{面积}(mm^2)}$ ^[9]

1.2.8 破坏模式的观察

采用体视显微镜观察加载断裂后的陶瓷粘接面,记录粘接破坏模式,并把破坏模式记录为:粘接破坏(完全暴露陶瓷粘接面);内聚破坏(破坏产生于树脂柱或树脂水门汀内部);混合破坏(部分暴露陶瓷粘接面)^[10-11]。每组选取具有代表性的1块瓷片用SEM观察样本断裂面形貌。

1.3 统计学方法

统计分析软件为SPSS17.0^[12]。各组试件Ra、水接触角及SBS采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)进行统计描述,测量值均数的比较使用单因素方差分析,组间两两比较采用最小显著性差异法(least significant difference, LSD)检验;破坏模式结果用百分比表示。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 SEM和EDS观察结果

表面处理前后氧化锆陶瓷试件表面形貌及化

学元素组成见图1和表1。SEM观察发现氧化铝喷砂后,氧化锆表面呈现明显凹凸不平的沟槽(图1A)。等离子体处理后表面未发现明显的形貌变化(图1B~D)。Z-Prime Plus处理后表面覆盖一层底涂剂膜(图1E),表面较喷砂组平坦。EDS结果(表1)发现与喷砂组相比,3种不同等离子体处理后,氧化锆陶瓷表面碳元素含量下降,氧元素增加,碳/氧比降低。E组中碳元素含量明显增加。

2.2 Ra值

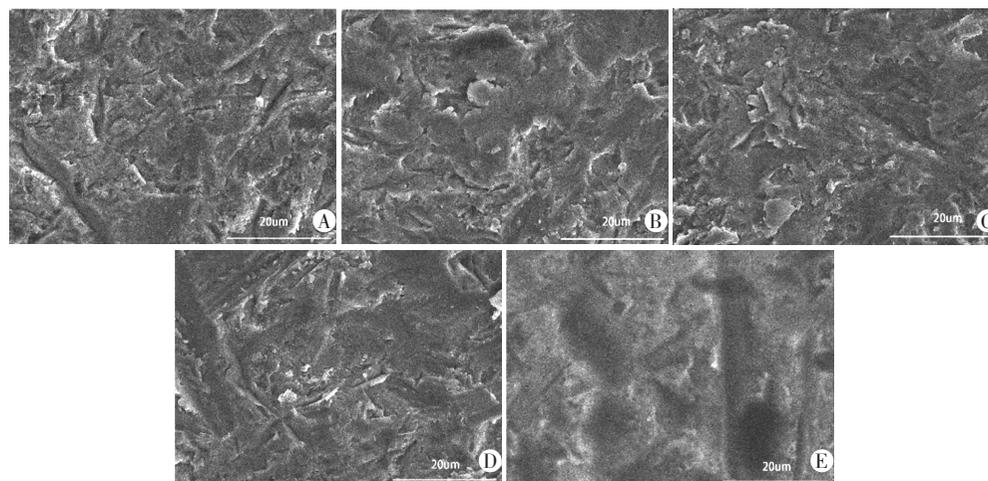
不同处理后陶瓷表面Ra发生的改变见表2。Ra描述一个平面的平均粗糙度值,是最常用的表面形貌参数。Ra值越小说明表面越光滑,Ra值越大说明表面越粗糙。方差分析显示A~E组Ra值差异无统计学意义($F=2.393, P=0.120$)。

2.3 接触角测试

水接触角值的测定可用于比较处理前后表面能的大小。接触角越小,则陶瓷表面能越大。表面处理后陶瓷表面接触角明显改变(图2,表3),单因素方差分析结果显示,5组水接触角值均存在显著性差异($F=5297.127, P < 0.001$)。LSD检验结果显示,B、C、D、E组较对照组均明显减小,且差异有统计学意义(P 均 < 0.001)。其中,Ar等离子体处理后陶瓷表面水接触角最小(图2C),表面能最大。

2.4 SBS检测

SBS的测量结果见图3,方差分析结果显示5组间SBS值不完全相等($F=3.045, P=0.026$)。LSD检测结果表明,C组和E组SBS值相比于A组明显增加,差异有统计学意义(C组 $P=0.008$;E组 $P=0.011$),B组



A: 喷砂组氧化锆表面 B: 喷砂+O₂等离子体组氧化锆表面 C: 喷砂+Ar等离子体组氧化锆表面 D: 喷砂+N₂等离子体组氧化锆表面 E: 喷砂+Z-Prime Plus组氧化锆表面。

图1 各组氧化锆陶瓷表面形貌的SEM图(×2 000)

Figure 1 SEM images of zirconia ceramic surfaces in each group(×2 000)

表1 EDS显示各组氧化锆陶瓷表面元素含量

Table 1 Elements of zirconia ceramic surfaces in each group by EDS ($\bar{x} \pm s$)

| 组别 | 表面处理 | 碳元素(%) | 氧元素(%) | 碳/氧比 |
|---------|-----------------------|--------------|--------------|-------------|
| A组(n=3) | 喷砂 | 8.27 ± 0.94 | 66.47 ± 0.98 | 0.12 ± 0.02 |
| B组(n=3) | 喷砂+O ₂ 等离子 | 2.78 ± 0.53 | 70.69 ± 0.92 | 0.04 ± 0.01 |
| C组(n=3) | 喷砂+Ar等离子 | 4.33 ± 0.95 | 69.59 ± 1.41 | 0.06 ± 0.01 |
| D组(n=3) | 喷砂+N ₂ 等离子 | 4.75 ± 0.62 | 69.65 ± 1.67 | 0.07 ± 0.01 |
| E组(n=3) | 喷砂+Z-Prime Plus | 69.73 ± 0.52 | 24.03 ± 0.92 | 2.91 ± 0.13 |

表2 各组氧化锆陶瓷的Ra

Table 2 Ra of zirconia ceramics in each group

| 组别 | 表面处理 | Ra(μm, $\bar{x} \pm s$) |
|---------|------------------------|--------------------------|
| A组(n=3) | 喷砂 | 38.20 ± 10.05 |
| B组(n=3) | 喷砂+O ₂ 等离子体 | 20.70 ± 6.59 |
| C组(n=3) | 喷砂+Ar等离子体 | 27.63 ± 2.40 |
| D组(n=3) | 喷砂+N ₂ 等离子体 | 28.80 ± 2.42 |
| E组(n=3) | 喷砂+Z-Prime Plus | 25.80 ± 8.69 |

和D组与A组间差异无统计学意义(B组P=0.419;D组P=0.407)。说明Ar等离子体处理可明显提高陶瓷表面的SBS。

2.5 破坏模式观察分析

图4显示,A组以粘接破坏为主,占比为80%。B、C、D组粘接破坏和混合破坏数目接近。D组出现内聚破坏,占比10%。E组以混合破坏模式为主,占比70%,并出现内聚破坏,占比10%。图5显示3种

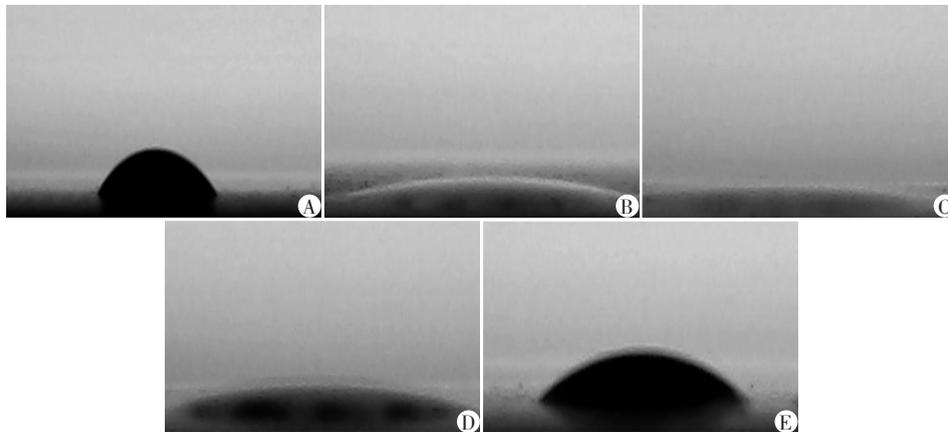


图2 氧化锆陶瓷表面水接触角检测图
A:喷砂组陶瓷表面 B:喷砂+O₂等离子体组陶瓷表面 C:喷砂+Ar等离子体组陶瓷表面 D:喷砂+N₂等离子体组陶瓷表面;E:喷砂+底涂剂Z-Prime Plus组陶瓷表面。

Figure 2 Images of water contact angles on zirconia ceramic surfaces

表3 各处理组的水接触角

Table 3 Water contact angles of each group

| 组别 | 表面处理 | 水接触角(°, $\bar{x} \pm s$) |
|---------|------------------------|---------------------------|
| A组(n=3) | 喷砂 | 52.85 ± 0.08 |
| B组(n=3) | 喷砂+O ₂ 等离子体 | 10.88 ± 0.02° |
| C组(n=3) | 喷砂+Ar等离子体 | 7.30 ± 0.02° |
| D组(n=3) | 喷砂+N ₂ 等离子体 | 12.10 ± 0.02° |
| E组(n=3) | 喷砂+Z-Prime Plus | 29.76 ± 0.87° |

与A组比较,*P<0.001。

断裂模式电镜图。粘接破坏(图5A):完全暴露陶瓷粘接面,没有残余树脂水门汀;混合破坏(图5B):部分暴露陶瓷粘接面,有残余复合树脂或树脂水门汀;内聚破坏(图5C):没有暴露陶瓷粘接面,破坏产生于复合树脂或树脂水门汀内部。

汀;内聚破坏(图5C):没有暴露陶瓷粘接面,破坏产生于复合树脂或树脂水门汀内部。

3 讨论

近几年,氧化锆全瓷材料在临床上使用越来越广泛,但全瓷冠脱落断裂的情况常有发生,观察发现断裂面主要发生在瓷与树脂水门汀界面。许多学者研究了通过改变表面处理方法来提高牙科氧化锆陶瓷的表面粘接强度,其中,等离子体表面处理因具有方便快捷、不会大幅度改变底物表面特性、绿色环保等优点而倍受关注^[13-14]。

等离子体表面处理在工业上应用十分广泛^[15]。

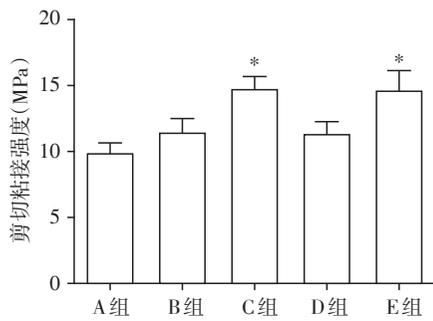


图3 各实验组SBS值
A组:喷砂组;B组:喷砂+O₂等离子体组;C组:喷砂+Ar等离子体组;D组:喷砂+N₂等离子体组;E组:喷砂+Z-Prime Plus组。与A组比较,**P*<0.05(*n*=10)。

Figure 3 Values of SBS in each group

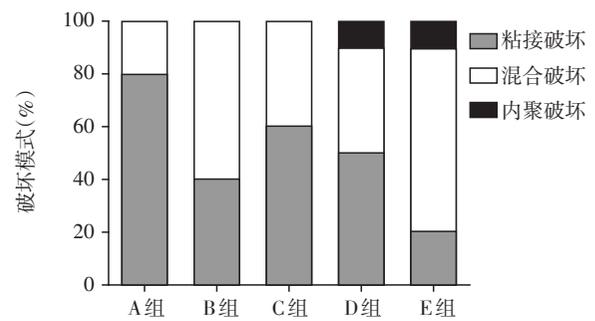


图4 各组试件的破坏模式
A组:喷砂组;B组:喷砂+O₂等离子体组;C组:喷砂+Ar等离子体组;D组:喷砂+N₂等离子体组;E组:喷砂+Z-Prime Plus组。*n*=10。

Figure 4 Failure modes of specimens in each group

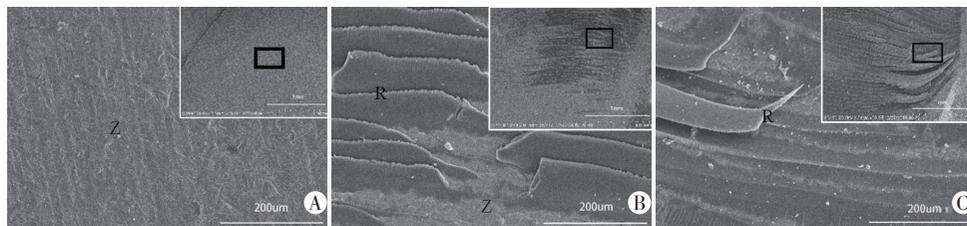


图5 3种不同破坏模式的SEM图(×50,×200)
A:粘接模式;B:混合模式;C:内聚模式。(图中R表示残留的树脂水门汀,Z表示氧化锆表面)。

Figure 5 SEM images of three failure modes(×50,×200)

近几年,相继出现等离子体应用于口腔科氧化锆陶瓷的研究。等离子气体被高能电子活化,引起电子和气体分子的一系列碰撞,最终使气体分子崩解离子化。这些离子和活化的等离子体具有高能性,可改变或促进基底表面的理化反应而不过度改变底物性质。

有研究发现等离子体处理氧化锆 120 s 可明显提高氧化锆陶瓷和树脂的粘接强度^[16]。本研究用不同气体等离子体处理 120 s,保证等离子体处理的有效性。Liu 等^[17]通过比较 O₂ 等离子体、Ar 等离子体、四氟甲烷(carbon tetrafluoride, CF₄)等离子体处理 30 s 及喷砂组处理氧化锆表面,发现 3 组等离子体处理均能通过去除表面有机物污染及促进表面亲水性而提高表面能,其中,Ar 和 CF₄ 由于化学修饰提高氧化锆的表面粘接力,Ar 处理使表面氧元素增加,CF₄ 处理使表面出现氟氧化物,而 O₂ 等离子体处理在氧化锆表面引入羟基基团,增加了瓷表面孔隙,测试结果显示降低了氧化锆的 SBS。本研究以表面喷砂为基本处理方法,比较 O₂、Ar、N₂ 等离子体处理陶瓷后的表面特征,研究等离子体处理对氧化锆表面影响。SEM 显示喷砂组陶瓷表面呈现沟槽结构,喷砂后用等离子体处理陶瓷表面未显著增加刻蚀沟槽,也未明显增加 Ra,说明等离子体对陶瓷表面的粗化影响不明显;EDS 发现等离子体处理后

碳元素减少,氧元素增加。此结果与 Noro 等^[18]实验结果一致,他们发现等离子体处理后,陶瓷表面碳元素污染物减少,使氧化锆表面清洁度增加,O₂ 等离子体处理后引入羟基官能团。不同的是,碳氧元素未大幅度改变,可能由于等离子体机处理的条件和通入气体的比例不同。此实验中水接触角测试可以很好地反映表面能的大小,3 组等离子体处理后水接触角均显著下降(*P* < 0.05),表面能明显提高,表明等离子体处理后氧化锆表面明显活化,Ar 等离子体处理后表面水接触角最小,且和其他各组均有显著性差异,可能由于 Ar 等离子体的表面刻蚀最强。Roy 等^[19]指出,等离子体处理后出现超亲水性现象可能由于高能电子打破陶瓷表面 C-O 基团和 C-OH 基团及大气中的 H₂O,引发电子氧化,从而使陶瓷表面活化。从 SBS 的值来看,Ar 等离子体处理组相比于对照组,粘接强度明显提高,呈现显著性差异;破坏模式观察发现 A 组大部分是粘接破坏,说明单纯喷砂获得的粘接强度较弱。B、C、D 组混合破坏数量增加,与粘接破坏数量相近,其中喷砂+N₂ 等离子体组出现内聚破坏,占比为 10%,说明等离子体处理对氧化锆陶瓷的粘接效果影响显著。Ra 检测及 SEM 结果发现喷砂后用 3 种等离子体处理,Ra 无显著性变化,表面形态未见明显改变,Zens

等^[20]研究发现化学轰击氧化锆表面改变其纳米级粗糙度,而喷砂处理改变了陶瓷表面微米级粗糙度,本研究的粗糙度测试为微米级,变化不显著,仍需进一步研究。

综上所述,不同介质等离子体处理未明显改变喷砂后的氧化锆形貌,但明显增加氧元素,降低碳元素,引入活性基团,从而显著提高陶瓷表面亲水性,也提高陶瓷-树脂粘接强度,其中 Ar 等离子体作用最为显著。等离子体处理尤其是 Ar 等离子体可明显提高氧化锆-树脂粘接强度,也是简单、高效的表面处理方法。

[参考文献]

- [1] SU N, YUE L, LIAO Y, et al. The effect of various sandblasting conditions on surface changes of dental zirconia and shear bond strength between zirconia core and indirect composite resin[J]. *J Adv Prosthodont*, 2015, 7(3): 214-223
- [2] CHEN C, CHEN Y, LU Z, et al. The effects of water on degradation of the zirconia-resin bond[J]. *J Dent*, 2017, 64: 23-29
- [3] TANIS M C, AKAY C, KARAKIS D. Resin cementation of zirconia ceramics with different bonding agents [J]. *Biotechnol Biotechnol Equip*, 2015, 29(2): 363-367
- [4] ITO Y, OKAWA T, FUKUMOTO T, et al. Influence of atmospheric pressure low-temperature plasma treatment on the shear bond strength between zirconia and resin cement[J]. *J Prosthodont Res*, 2016, 60(4): 289-293
- [5] CANULLO L, MICARELLI C, BETTAZZONI L, et al. Zirconia-composite bonding after plasma of argon treatment [J]. *Int J Prosthodont*, 2014, 27(3): 267-269
- [6] VALVERDE G B, COELHO P G, JANAL M N, et al. Surface characterisation and bonding of Y-TZP following non-thermal plasma treatment[J]. *J Dent*, 2013, 41(1): 51-59
- [7] ALADAG A, ELTER B, COMLEKOGLU E, et al. Effect of different cleaning regimens on the adhesion of resin to saliva-contaminated ceramics[J]. *J Prosthodont*, 2015, 24(2): 136-145
- [8] VECHIATO-FILHO A J, MATOS A O, LANDERS R, et al. Surface analysis and shear bond strength of zirconia on resin cements after non-thermal plasma treatment and/or primer application for metallic alloys[J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2017, 72: 284-292
- [9] SARI F, SECILMIS A, SIMSEK I, et al. Shear bond strength of indirect composite material to monolithic zirconia[J]. *J Adv Prosthodont*, 2016, 8(4): 267-274
- [10] BITENCOURT S B, DOS S D, DA S E, et al. Characterisation of a new plasma-enhanced film to improve shear bond strength between zirconia and veneering ceramic [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2018, 92: 196-205
- [11] 罗新宇, 孟翔峰. 不同核材料与二氧化锆陶瓷树脂粘接耐久性的研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 2017, 35(01): 89-92
- [12] 光寒冰, 谢海峰, 宋鑫, 等. 氧化锆核瓷处理与饰面瓷工艺对瓷/瓷结合强度的影响[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(8): 1161-1166
- [13] KORTSHAGEN U R, SANKARAN R M, PEREIRA R N, et al. Nonthermal plasma synthesis of nanocrystals: fundamental principles, materials, and applications [J]. *Chem Rev*, 2016, 116(18): 11061-11127
- [14] WU C C, WEI C K, HO C C, et al. Enhanced hydrophilicity and biocompatibility of dental zirconia ceramics by oxygen plasma treatment[J]. *Materials (Basel)*, 2015, 8(2): 684-699
- [15] DIMITRAKELLIS P, GOGOLIDES E. Hydrophobic and superhydrophobic surfaces fabricated using atmospheric pressure cold plasma technology: a review [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2018, 254: 1-21
- [16] ELIAS A B, SIMAO R A, PRADO M, et al. Effect of different times of nonthermal argon plasma treatment on the microtensile bond strength of self-adhesive resin cement to yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal ceramic[J]. *J Prosthet Dent*, 2019, 121(3): 485-491
- [17] LIU Y C, HSIEH J P, CHEN Y C, et al. Promoting porcelain-zirconia bonding using different atmospheric pressure gas plasmas[J]. *Dent Mater*, 2018, 34(8): 1188-1198
- [18] NORO A, KANEKO M, MURATA I, et al. Influence of surface topography and surface physicochemistry on wettability of zirconia (tetragonal zirconia polycrystal) [J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2013, 101(2): 355-363
- [19] ROY M, POMPELLA A, KUBACKI J, et al. Photofunctionalization of titanium: an alternative explanation of its chemical-physical mechanism [J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): e157481
- [20] ZENS M A, ICOCHEA A L, COSTA B C, et al. A new approach for Y-TZP surface treatment: evaluations of roughness and bond strength to resin cement [J]. *J Appl Oral Sci*, 2019, 27: e20180449

[收稿日期] 2019-08-14