

不同调磨方式对牙科氧化锆修复体弯曲强度与疲劳寿命的影响

李晨曦, 林瑶, 徐强, 方圆, 段颖莹, 王景坤

(唐山市妇幼保健院口腔科 河北 唐山 063000)

[摘要]目的: 探讨不同调磨方式对牙科氧化锆修复体弯曲强度与疲劳寿命的影响。**方法:** 将氧化锆瓷按相应的收缩比例切割并烧结, 分别制作规格为 $20\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的试件52个(A组, 不调磨)和 $20\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ 的试件157个(B组48个、C组56个、D组53个), B、C、D三组均用粒度为 $105\text{ }\mu\text{m}$ 金刚砂车针在喷水状态下均匀调磨, 调磨时转速分别控制在 $150\text{ }000\text{ r/min}$ 、 $200\text{ }000\text{ r/min}$ 和 $250\text{ }000\text{ r/min}$ 。观察四组试件表面形貌, 对比分析弯曲强度及疲劳寿命。**结果:** 不加载时, B、C、D三组弯曲强度的Weibull模数(m)和特征断裂强度(σ_0)均高于A组($P < 0.05$); 加载次数为 10^6 次、 10^7 次时, B、C、D三组的 m 和 σ_0 均低于A组($P < 0.05$); 随着加载次数的增多, A组 m 和 σ_0 并无明显变化($P > 0.05$); B、C、D三组加载次数为 10^6 次、 10^7 次时的 m 和 σ_0 均低于不加载($P < 0.05$); B、C、D三组加载次数为 10^6 次、 10^7 次时的 m 和 σ_0 比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。B、C、D三组的裂纹扩展速率曲线参数 A 大于A组, n 小于A组($P < 0.05$); B、C、D三组的裂纹扩展速率曲线参数 A 和 n 比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。A组试件经不同次数循环加载后, 表面无明显变化。B组、C组、D组表面均出现一些相互平行且深浅不一的划痕, 且随着加载次数的增多, 片状剥脱和微小裂纹越明显。**结论:** 氧化锆修复体调磨可能在一定程度上降低其弯曲强度和疲劳寿命, 临床应减少对其进行过度调改。

[关键词] 氧化锆修复体; 调磨方式; 弯曲强度; 疲劳寿命

[中图分类号] R783.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-6455(2025)07-0159-04

Effect of Different Grinding Modes on Flexural Strength and Fatigue Life of Dental Zirconia Restorations

LI Chenxi, LIN Yao, XU Qiang, FANG Yuan, DUAN Yingying, WANG Jingkun

(Department of Stomatology, Maternal and Child Health Hospital, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: Objective Exploring the effects of different grinding modes on the flexural strength and fatigue life of dental zirconia restorations. **Methods** The zirconia porcelain was cut and sintered according to the corresponding shrinkage ratio, and 52 specimens with specifications of $20\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (Group A, without grinding adjustment) and 157 specimens with specifications of $20\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ (48 specimens in Group B, 56 specimens in Group C, and 53 specimens in Group D) were produced, and all the three groups of B, C, and D were uniformly ground with $105\text{ }\mu\text{m}$ emery needles under water spraying, and the rotational speeds of the grinding were controlled at $150\text{ }000\text{ r/min}$, $200\text{ }000\text{ r/min}$, and $250\text{ }000\text{ r/min}$. The surface morphology of four groups was observed to compare and analyse the bending strength and fatigue life. **Results** The Weibull modulus (m) and characteristic fracture strength (σ_0) of the bending strength of Groups B, C, and D were higher than those of Group A when they were not loaded ($P < 0.05$). When the number of loading times was 10^6 and 10^7 , m and σ_0 of Groups B, C, and D were lower than those of Group A ($P < 0.05$). With the increase of loading times, m and σ_0 in Group A did not change significantly ($P > 0.05$). m and σ_0 in Groups B, C, and D were lower than those without loading when the loading times were 10^6 and 10^7 ($P < 0.05$); and the difference between m and σ_0 in Groups B, C, and D was not statistically significant when comparing the loading times with those with loading times of 10^6 and 10^7 ($P > 0.05$). The parameter A of the crack extension rate curve of groups B, C and D was larger than that of group A, and n was smaller than that of group A ($P < 0.05$). the difference between the parameter A and n of the crack extension rate curve of groups B, C and D was not statistically significant when compared with those of groups B, C and D ($P > 0.05$). There is no obvious change on the surface of the specimens in group A after different times of cyclic loading, while some scratches with different depths appear on the surfaces of groups B, C and D. With the increase in the number

基金项目: 2023年度河北省医学科学研究课题计划(编号: 20231762)

通信作者: 王景坤, 主治医师; 研究方向为口腔材料学。E-mail: zhiqi21579@163.com

第一作者: 李晨曦, 主治医师; 研究方向为口腔材料学。E-mail: caigal8@163.com

of loading times, the flake peeling and tiny cracks are more obvious. **Conclusion** Zirconia restorations tuned for grinding may reduce their flexural strength and fatigue life to some extent, and excessive tuning should be minimised in the clinic.

Key words: zirconia restorations; grinding modulation; flexural strength; fatigue life

在众多的口腔材料中, 钇稳定型氧化锆具有极高的机械强度和极佳的生物相容性, 受到口腔医生的广泛关注^[1-2]。氧化锆是以多晶结构存在, 主要是单斜相、四方相和立方相, 加入钇稳定剂后, 在自然状态下以四方相稳定状态存在, 但修复体长期暴露于口腔环境中, 受到咀嚼力量、温度以及pH值变化的影响, 会从四方相转变为单斜相, 从而出现机械强度的降低, 但这属于客观因素影响且是一个长期的过程^[3-4]。调磨后材料内部会产生什么样的变化、是否会对修复体使用寿命产生影响、如何调磨可以降低这种影响, 经查阅文献, 尚未见相关报道。在实际临床工作中, 为了使氧化锆修复体具有更好的适合性, 咬合调整必不可少, 调磨过程是否会对材料的性能产生影响是医生和患者共同关注的问题, 因此, 需要进一步研究来证实。本研究通过控制不同转速、不同压力对氧化锆修复体进行调磨, 同时进行三点弯曲实验, 应用Weibull分析评价材料的疲劳性能, 分析调磨方式对氧化锆修复体疲劳性能的影响机制。为临床正确的调磨、延长氧化锆修复体的使用寿命提供可靠的实验依据。

1 材料和方法

1.1 试件制备及分组: 将氧化锆瓷按相应的收缩比例切割并烧结, 分别制作规格为20 mm×4 mm×2 mm的试件52个(A组, 不调磨)和20 mm×4 mm×2.4 mm的试件157个(B组48个、C组56个、D组53个), B、C、D三组试件在高2.0 mm处用耐久性标记笔标记, 并将其固定在夹具上, 用粒度为105 μm金钢砂车针, 在喷水状态下均匀调磨至标记线完全消失(模拟临床调磨), 调磨过程中车针和试件始终保持平行接触, 三组调磨时转速分别控制在150 000 r/min、200 000 r/min和250 000 r/min, 此过程均由同一医师在相同条件下制备完成。

1.2 疲劳加载: 将每个实验组试件1、2、3组分别用疲劳试验机加载0次、10⁶次、10⁷次。所有待加载试件用氰基丙

烯酸粘固于钢制模具后, 将模具固定于Instron 5848微动循环试验机加载台上, 用直径为4 mm的碳化钨小球进行加载; 加载头对准试件中心位置, 调整至预载10 N, 消除不良接触后, 设置为正弦波加载, 加载力50~250 N, 加载频率2 Hz, 机器自动记录波形及数据。所有试验均在25℃, 相对湿度为40% RH环境下进行。按照文献^[5]中的方法对试样的疲劳次数进行Weibull分析, 计算疲劳次数的Weibull模数(m*)和特征断裂次数(Nf, 0), 并以此计算各组试样的裂纹扩展速率曲线参数A和n。

1.3 弯曲强度测试: 将所有试件用丙酮浸泡2 h, 脱离模具, 无水乙醇清洗后烘干箱干燥, 之后分别放置于AKG-10 KNG万能试验机上进行三点弯曲强度测试。加载面位于循环加载张力侧, 加载位置为试件中心, 加载头直径4 mm, 跨距设置为16 mm, 加载速度0.5 mm/min, 直至试件断裂, 记录数据。利用公式计算三点弯曲强度: $[\sigma = 3Pl/2wb^2]$, 式中σ为弯曲强度(MPa), P为断裂负荷(N), l为跨距(mm); w为试件宽度(mm); b为试件厚度(mm)。按照ISO6872-2015^[6]中的方法对四组试件的三点弯曲强度进行Weibull分析, 并计算弯曲强度的Weibull模数(m)和特征断裂强度(σ₀)。

1.4 表面形貌观察: 将所有试件充分超声荡洗, 干燥, 用导电双面胶固定在S-4800型场发射扫描电子显微镜(Hitachi, 日本)工作台上, 进行真空喷金处理, 放入扫描电镜中, 设置5.0 KV加速电压, 拍照并观察其表面形貌。

1.5 统计学分析: 采用SPSS 20.0软件进行分析, 计量资料采用($\bar{x} \pm s$)表示, 多组间比较采用重复测量方差分析, 组间两两比较采用独立t检验; 计数资料采用构成比、率表示, 组间比较采用χ²检验。以P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 各组试件弯曲强度比较: 不加载时, B、C、D三组的m和σ₀均高于A组(P<0.05); 加载次数为10⁶次、10⁷次

表1 各组试件不同加载次数弯曲强度比较

(个, $\bar{x} \pm s$)

组别	m			σ ₀		
	0次	10 ⁶ 次	10 ⁷ 次	0次	10 ⁶ 次	10 ⁷ 次
A组 (n=52)	9.86±1.02	9.79±0.98	9.75±1.10	986.25±53.32	980.53±55.14	981.48±60.22
B组 (n=48)	11.45±1.23 ^b	7.82±0.84 ^{ab}	7.79±0.96 ^{ab}	1030.26±98.54 ^b	810.23±75.59 ^{ab}	805.56±81.16 ^{ab}
C组 (n=56)	11.59±1.16 ^b	7.85±0.91 ^{ab}	7.81±0.88 ^{ab}	1021.38±88.42 ^b	822.29±87.04 ^{ab}	813.36±83.49 ^{ab}
D组 (n=53)	11.61±1.21 ^b	7.90±0.85 ^{ab}	7.85±0.90 ^{ab}	1046.69±92.26 ^b	817.78±85.67 ^{ab}	810.49±79.95 ^{ab}
F值	28.111	60.376	52.579	4.724	58.572	64.937
P值	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001

注: ^a表示与同组循环加载次数0次比较, P<0.05; ^b表示与A组比较, P<0.05。

时, B、C、D三组的 m 和 σ_0 均低于A组($P < 0.05$); 随着加载次数的增多, A组 m 和 σ_0 并无明显变化($P > 0.05$); B、C、D三组加载次数为 10^6 次、 10^7 次时的 m 和 σ_0 均低于不加载($P < 0.05$); B、C、D三组加载次数为 10^6 次、 10^7 次时的 m 和 σ_0 比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表1。

2.2 各组试件的疲劳寿命比较: B、C、D三组的裂纹扩展速率曲线参数A大于A组, n 小于A组(均 $P < 0.05$); B、C、D三组的裂纹扩展速率曲线参数A和 n 比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表2。

表2 各组试件的疲劳寿命比较 (个, $\bar{x} \pm s$)

组别	A	n
A组 (n=52)	3.60×10^{-26}	33.04 ± 0.36
B组 (n=48)	4.74×10^{-19a}	17.71 ± 0.21^a
C组 (n=56)	4.73×10^{-19a}	17.69 ± 0.19^a
D组 (n=53)	4.72×10^{-19a}	17.71 ± 0.20^a
F值	45 207.632	49 254.188
P值	<0.001	<0.001

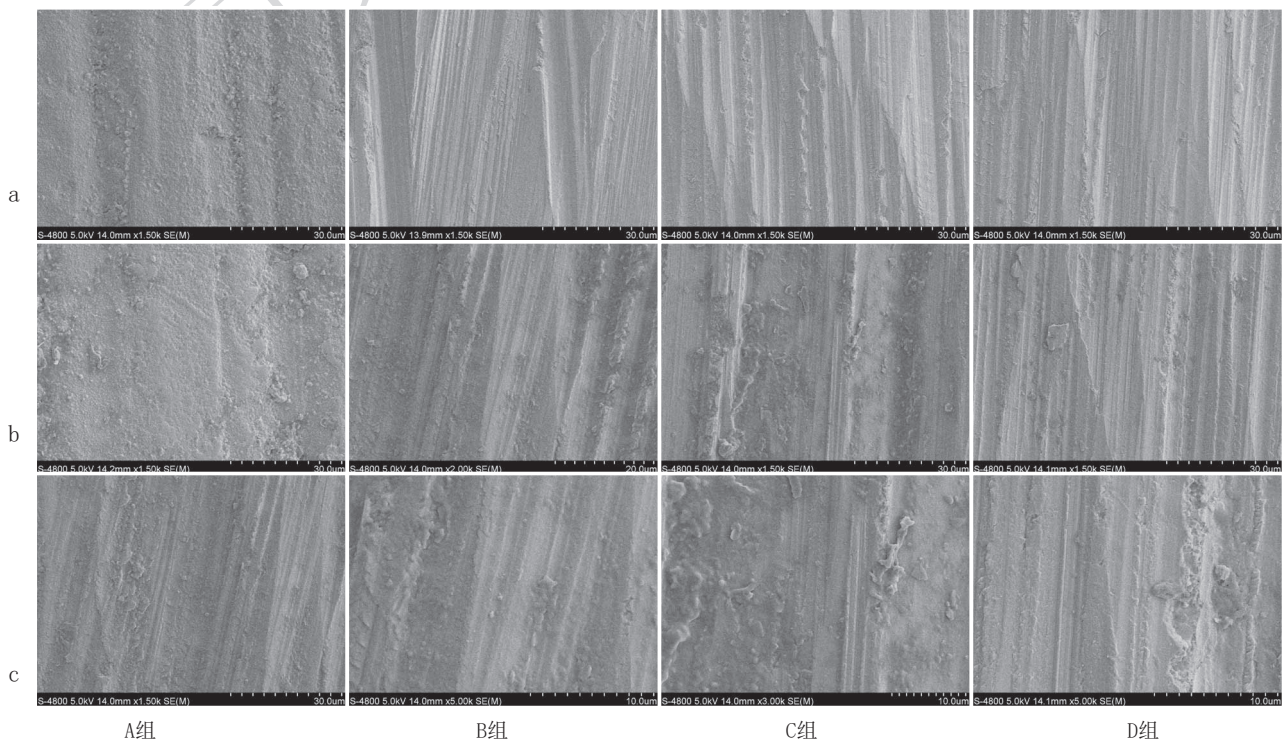
注: ^a表示与A组比较, $P < 0.05$ 。

2.3 各组试件表面形貌比较: A组试件经不同次数循环加载后, 表面无明显变化, 呈现出清晰的晶粒不规则排列分布。B组、C组、D组表面均出现一些相互平行且深浅不一的划痕, 划痕之间有剥脱颗粒附着, 且随着加载次数的增多, 片状剥脱和微小裂纹越明显。见图1。

3 讨论

虽然氧化锆陶瓷材料在牙齿修复中有很多优点, 但也存在一些不足, 其制成的口腔修复体在长期反复咀嚼力的作用下仍存在断裂、失效的风险, 这种现象属于疲劳失效^[7]。在实际的临床工作中, 试戴修复体的时候需要进行调整使其具有更精准的咬合关系, 那么氧化锆修复体在经过调磨之后强度是否会发生改变?在长期反复咀嚼的作用下对其疲劳性能和使用寿命会产生不良影响吗?国内外关于此类研究并不多见, 这也是不少口腔医生和患者普遍关注的热点问题。因此, 关于氧化锆陶不同调磨处理方式的影响尚需探讨和研究。

在氧化锆修复体的制备过程中, 调磨是一个关键的步骤, 调磨过程可以改善氧化锆修复体的表面粗糙度和适应性, 影响其性能。弯曲强度是评价陶瓷材料力学性能的重要指标之一^[8]。本研究结果显示, 不加载时, B、C、D三组的弯曲强度较A组有所升高。这是因为调磨过程使氧化锆陶瓷从四方相转变为单斜相, 相变过程中为阻止裂纹进一步扩张会产生一定体积的膨胀和剪切应变, 使其强度增强^[9]。 m 和 σ_0 均为材料的特征参数, 分别表示材料的机械性能及疲劳性能, σ_0 越大, 表示材料强度越大, m 越大, 表示强度结果越集中, 均一性越佳, 材料内部裂纹分布范围越小, 结构可靠性越强^[10]。在临床应用中, 修复体由于长期受到咬合力 and 咀嚼负荷的作用, 可能会出现强度降低和疲劳破坏的情况, 从而影响修复体的可靠性和寿命。本研究设置试件的循环加载次数为 10^6 次和 10^7 次, 可模拟修复体使用1年



注: a. 加载次数0次; b. 加载次数 10^6 次; c. 加载次数 10^7 次

图1 各组试件表面形貌

后的情况。结果显示,随着加载次数的增多,A组 m 和 σ_0 并无明显变化,表明A组试件具有良好的结构可靠性和抗疲劳性。不加载时,B、C、D三组的 m 和 σ_0 均高于A组,而加载次数为 10^6 次、 10^7 次时,上述三组的 m 和 σ_0 又较A组降低,提示加载操作导致试件结构可靠性降低,材料体出现了疲劳性,在一定程度上增加脆性断裂风险,形貌观察结果也证实了这一点。分析原因:首先,调磨过程中产生的磨粒和磨屑可能会损伤氧化锆材料的表面,引入微裂纹和缺陷,从而降低其强度;其次,调磨过程中摩擦产生的热量可能会引起材料的热应力,导致晶体结构的改变和材料内部的残余应力,进而影响其力学性能^[11-12]。尽管本研究中B、C、D三组试件经过加载后材料强度有所降低,但仍高于天然牙齿的强度(265 Mpa)。

亚临界裂纹扩展(Subcritical crack growth, SCG)是口腔修复体失效的主要原因之一,在口腔修复体使用过程中,由于受到咀嚼、咬合等力的作用,修复体材料可能会出现微小的裂纹,这些裂纹如果扩展到临界尺寸,就会导致修复体的失效,而SCG就是指这些微小裂纹在达到临界尺寸之前的发展过程^[13-14]。SCG的速度和方向受到多种因素的影响,包括材料的性质、应力状态、温度等,这些因素都会影响修复体的使用寿命和安全性^[15-16]。在本研究中,B、C、D三组的裂纹扩展速率曲线参数 A 小于A组, n 大于A组,说明加载操作会使氧化锆材料发生SCG,从而降低其疲劳寿命。在载荷作用下,氧化锆陶瓷中存在着一些微小的裂纹,这些裂纹在外界应力的作用下会逐渐扩展并最终导致材料的破坏,而氧化锆陶瓷的表面处理和调磨过程会直接影响到裂纹的扩展行为,从而影响到修复体的疲劳寿命^[17]。可见,在口腔修复体的设计和制作过程中,需要考虑到SCG的问题,采取相应的措施来防止裂纹的扩展,例如,选择具有优良抗裂性能的材料,设计合理的结构,控制加工过程中的残余应力等,从而提高修复体的性能和临床效果,对于已经存在的SCG,需要定期进行检查和维护,及时发现并处理可能的问题。

综上所述,氧化锆修复体经不同转速调磨后可能会使其弯曲强度和疲劳寿命有所下降,故从长远角度考虑,临床上应尽量减少对氧化锆修复体的过度调改。

[参考文献]

[1]张瑞,蒋青,范丽苑. 前牙美学区个性化氧化锆基台临床应用效果观察[J]. 中国美容医学, 2022,31(1):115-118.
 [2]王玉玮,李丁新,赵飞,等. 氧化锆全瓷冠与纯钛烤瓷全瓷冠修复牙列缺损的美学效果及对咀嚼功能和语言能力的影响研究[J]. 中国美容医学, 2023,32(1):119-123.
 [3]魏萌,朱红,梁琢然,等. 不同热酸蚀液对氧化锆粘接强度和抗折性能的影响[J]. 实用口腔医学杂志, 2022,38(4):445-449.
 [4]赵琛,白月辉,刘阳,等. 基牙抛光方式和时间对CAD/CAM氧化锆全瓷冠适合性的影响[J]. 上海口腔医学, 2023,32(3):236-240.

[5]Dal Piva A M O, Tribst J P M, Venturini A B, et al. Survival probability of zirconia-reinforced lithium silicate ceramic: Effect of surface condition and fatigue test load profile[J]. Dent Mater, 2020,36(6):808-815.
 [6]龚旭,赵信义,张春宝,等. 喷砂对口腔氧化锆陶瓷抗弯强度和亚临界裂纹扩展的影响[J]. 中华口腔医学杂志, 2017,52(7):439-442.
 [7]Leitão C I M B, Fernandes G V O, Azevedo L P P, et al. Clinical performance of monolithic CAD/CAM tooth-supported zirconia restorations: systematic review and meta-analysis[J]. J Prosthodont Res, 2022,66(3):374-384.
 [8]Yılmaz Atalı P, Doğu Kaya B, Manav Özen A, et al. Assessment of micro-hardness, degree of conversion, and flexural strength for single-shade universal resin composites[J]. Polymers (Basel), 2022,14(22):4987.
 [9]Mohan S, Roulet J F, Abdulhameed N, et al. Transferring occlusal anatomy from worn temporary crowns to zirconium oxide crowns[J]. Eur J Prosthodont Restor Dent, 2021,29(2):67-75.
 [10]Cahyanto A, Martins M V S, Bianchi O, et al. Graphene oxide increases PMMA's resistance to fatigue and strength degradation[J]. Dent Mater, 2023,39(9):763-769.
 [11]梅子戩,鲁雨晴,楼雨欣,等. 数字光处理打印牙科氧化锆的微观结构和机械性能研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2021,39(5):576-581.
 [12]周志伟,牛婉琼,任丽娟,等. 晶界偏析 GeO_2 和 TiO_2 共掺杂对3%氧化钇稳定氧化锆陶瓷低温老化的影响[J]. 中国组织工程研究, 2022,26(27):4320-4324.
 [13]Yang B, Li Y, Qin Y, et al. Fatigue crack growth behaviour of precipitate-strengthened CuNi₂Si alloy under different loading modes[J]. Materials (Basel), 2020,13(10):2228.
 [14]Demirel MG, Mohammadi R, Keçeci M. Crack propagation and fatigue performance of partial posterior indirect restorations: an extended finite element method study[J]. J Funct Biomater, 2023,14(9):484.
 [15]Lana T M D S D, Weber K R, Medeiros J A, et al. Fatigue-life and stress distribution of a glass-ceramic under different loading conditions[J]. Braz Dent J, 2023,34(1):80-88.
 [16]Fraga S, Pereira G K R, Guillard LF, et al. Influence of testing environment on static fatigue behavior of a glass and a polycrystalline ceramic[J]. Braz Dent J, 2021,32(3):56-64.
 [17]Jadaan O, Esquivel-Upshaw J, Nemeth N N, et al. Proof testing to improve the reliability and lifetime of ceramic dental prostheses[J]. Dent Mater, 2023,39(2):227-234.

[收稿日期]2023-22-20

本文引用格式: 李晨曦,林瑶,徐强,等. 不同调磨方式对牙科氧化锆修复体弯曲强度与疲劳寿命的影响[J]. 中国美容医学, 2025,34(7):159-162.