

## 陶瓷类材料的发展和应概述及疲劳的研究

纪元, 王子健, 潘惠惠, 陈曦, 冯丽芳\*

华北理工大学口腔医学院 河北唐山

**【摘要】**应用于口腔修复领域的材料主要是陶瓷类材料, 其发展经过了一个漫长的过程。氧化锆类陶瓷材料, 因其出色的机械性能以及美学性能, 是目前口腔医生应用于临床最多的一种修复体。有学者在氧化锆材料的基础上发现了新型纳米氧化锆, 并声称其具有更加出色的性能。目前已有学者通过研究发现氧化锆陶瓷在长期使用后会材料变脆, 导致其疲劳失效, 但研究大都局限于干燥环境下, 而口腔主要为复杂的湿润环境。本文对口腔陶瓷类材料发展史进行总结概述, 并探讨干湿环境下氧化锆陶瓷的循环疲劳性能的可能研究方向。

**【关键词】**氧化锆; 发展史; 唾液; 循环加载

**【基金项目】**河北省自然科学基金 (H2020209156)

### Development and application of ceramic materials and Research on fatigue

Yuan Ji, Zijian Wang, Huihui Pan, Xi Chen, Lifang Feng\*

School of Stomatology, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei Province

**【Abstract】**The materials used in the field of prosthodontics are mainly ceramic materials, and its development has gone through a long process. Zirconia ceramic materials, due to their excellent mechanical and aesthetic properties, are the most widely used prosthetics in clinic by dentists. Some scholars have found a new type of nano zirconia based on zirconia materials and claimed that it has better properties. At present, scholars have found that zirconia ceramics will make the material brittle and lead to fatigue failure after long-term use, but most of the research is limited to the dry environment, and the oral cavity is mainly a complex humid environment. This paper summarizes the development history of dental ceramics, and discusses the possible research direction of cyclic fatigue properties of zirconia ceramics in dry and wet environment.

**【Keywords】**Zirconia; Development history; Saliva; Cyclic loading

陶瓷材料被口腔医生用作修复材料可以追溯到 200 多年前。氧化锆陶瓷的发展经历了一个漫长的过程, 如今在美观性、强度等方面都有着一定的优势, 然而长期临床使用中发现传统的陶瓷材料也存在着明显劣势。陶瓷材料对疲劳机理的敏感性, 会使其强度日渐下降, 从而缩短在口腔中的使用年限。陶瓷材料内微观结构中最初存在的自然裂纹蔓延会导致陶瓷材料疲劳后机械强度的降低<sup>[1]</sup>, 任何预先确定的材料短缺都会以亚临界的方式启动裂纹的扩展, “亚临界”是指裂纹扩大可能发生在临界应力

强度因子 (即断裂韧性 K<sub>IC</sub>) 以下, 使得陶瓷材料的负荷能力随着时间逐渐降低, 使其早期失效, 例如, 3Y-TZP 陶瓷在应力强度因子低至 K<sub>IC</sub> 的 50% 时会表现出明显的裂纹扩展<sup>[2]</sup>, 对氧化锆类增韧陶瓷, 循环应力的作用会导致裂纹愈发扩大。由于口腔科修复体长期存在于液体化环境和周期性的负荷下, 口腔科陶瓷材料的疲劳行为如果在类似的条件下进行模拟能够更真实的反映陶瓷类修复体进行修复治疗时的情形。随着科技水平的提高, 越来越多的陶瓷材料涌现出来, 其中伴随纳米科技的进展,

作者简介: 纪元, 医师, 硕士。

\*通讯作者: 冯丽芳, 讲师, 博士。

新型纳米氧化锆陶瓷中脱颖而出。本文概述了现今流行的口腔陶瓷修复材料的发展及临床应用,并对现阶段陶瓷循环疲劳实验的研究方法进行了综述。

### 1 陶瓷类修复材料的发展

在 1886 年 Land 创造出了首个长石质全瓷冠以后,学者们渐渐将研究目标集中在这种新型材料上。自 20 世纪 60 年代以来,就有研究员陆续将白榴石和氧化铝两种材料加入到长石质陶瓷中,使全瓷材料的物理以及机械特性得到提高<sup>[3-5]</sup>。到了 1990 年,口腔修复领域迎来了一种新型陶瓷类修复体—氧化锆瓷,由于它优良的挠曲强度以及断裂韧性<sup>[6]</sup>,迅速被口腔科医生应用到临床的各种方面,包括桩核冠、正畸托槽、种植基台及种植体、固定桥支架等<sup>[7]</sup>。陶瓷材料现在在临床口腔修复领域的地位日益上升,是得益于其优秀的物理耐磨性和生物相容特性以及突出的美观及光学特性<sup>[8]</sup>。虽然氧化铝陶瓷最近在晶粒直径、材料纯净度和制作技术等方面做出了很大的进步,临床治疗后的跟进访问显示的效果也比较理想,然而其脆性大导致修复体断裂的困扰始终未得到良好解决<sup>[9]</sup>。先前的全瓷材料在口腔修复治疗过程中经常因脆性大而受到各种制约,氧化锆因其应力引发相变增加韧性的机制被称作韧性陶瓷,其强度高,生物相容性好,是比氧化铝更加优秀的新型全瓷材料<sup>[10-12]</sup>。新型长寿纳米氧化锆陶瓷的问世,克服了传统牙科陶瓷的韧性差、耐疲劳性差等弊端,具有更高的抗折强度、断裂韧性、耐疲劳等优势,从而拓展陶瓷材料在临床医学领域的应用。

### 2 陶瓷类修复材料的分类及应用

从氧化锆全瓷材料应用于口腔临床到目前已有二十多年,经过这些年的研究改进与发展,国内外推出了种类众多的氧化锆修复材料,给临床医师的正确选择造成困惑。对氧化锆修复材料进行归类分代,有利于氧化锆的基础研究,有利于口腔医师更好地理解氧化锆陶瓷的性能,同时可以更好地指导临床应用。

#### 2.1 根据陶瓷材料包含的不同相分类

全瓷材料通常由两个或两个以上的相组成。根据玻璃相和晶相的不同,陶瓷材料可分为三种类型:①玻璃相长石质瓷;②同时含有玻璃相和晶相的微

晶玻璃陶瓷;③无玻璃相多晶陶瓷。

#### (1) 长石质瓷

长石质瓷是由高温烧制的天然长石、高岭、石英三种成分组成,属于非晶玻璃<sup>[13,14]</sup>。长石质瓷因其光学特性与牙釉质和牙本质极其相近,是最先使用于口腔科修复的陶瓷材料。可是因其机械特性表现较弱,挠曲强度一般仅在 60~70MPa<sup>[15]</sup>,因此常用作烤瓷熔附金属全冠、烤瓷熔附金属修复体或贴面。

#### (2) 玻璃陶瓷

玻璃陶瓷又被学者叫作微晶玻璃,是一种通过高温融化、成型、热处理后形成的玻璃与晶相联合的混合材料。相较于非晶玻璃,将晶体填料加入玻璃相中一定程度上改变了玻璃基陶瓷的机械特性以及光学性质,如增长了热膨胀系数和韧性,使材料的色泽、乳光特性以及透明程度变化<sup>[16,17]</sup>。

#### (3) 多晶陶瓷

多晶陶瓷是一类将晶体直接烧制的,没有玻璃相、气相的密实陶瓷材料,具有优秀的强度以及硬度,运用 CAD/CAM 机器实施加工。由于这种材料不具有玻璃相,往往透明度非常低,应该用饰面瓷进行修饰<sup>[18,19]</sup>,氧化铝和氧化锆就是这种陶瓷的代表。

### 2.2 根据陶瓷材料微观结构差异分类

随着工艺水平的不断提高,氧化锆陶瓷材料也可根据晶相组成、添加剂含量不同以及氧化锆材料的组成及微观结构差异分为四代:①传统氧化锆、白色氧化锆;②高强氧化锆;③高透氧化锆;④超透氧化锆。近年来纳米科技的兴起与推广,人们开始研究将纳米科技应用到口腔领域的可能性,并成功研制出了新型纳米氧化锆陶瓷。

(1) 第一代传统氧化锆陶瓷 3Y-TZP (传统氧化锆、白色氧化锆)

近 20 年来,四方氧化锆以其优异的力学性能逐渐成为牙科修复领域的主流陶瓷材料,尤其是随着计算机辅助设计制造技术在牙科修复领域的推广和应用,四方氧化锆数字化补偿氧化锆的烧结收缩,更精确地控制修复体的大小,使全瓷修复技术在临床上得到迅速发展和广泛应用,特别是在制作多元全瓷长牙桥方面。这类氧化锆全陶瓷修复材料,是修复者接触到的第一种氧化锆。因为它的白垩色外

观, 这种氧化锆陶瓷被称为“白色氧化锆”。

白色氧化锆常用作全冠或全瓷桥修复的基底材料, 联合烧结外层饰面瓷取得较好的美学成效, 可用于前后牙单冠、固定桥的修复。如今, 白色氧化锆已渐渐从市场消失。

#### (2) 第二代氧化锆陶瓷 3Y-TZP (高强氧化锆)

因为第二代氧化锆的晶相构成与第一代氧化锆相近, 主相依然为四方相(3Y-TZP), 维持了 3Y-TZP 氧化锆陶瓷的高强度和韧性。相较于第三代和第四代氧化锆, 第二代氧化锆材料具有最佳的强度, 所以第二代氧化锆也被称为“高强氧化锆”。

第二代氧化锆全瓷体可用于后牙的全氧化锆冠桥、前牙的全瓷基冠, 前后牙的三联冠或四联冠。

#### (3) 第三代氧化锆陶瓷 4Y-TZP (高透氧化锆)

在第一代和第二代氧化锆强度已满足临床要求, 进而提升氧化锆陶瓷的透明度已变成临床迫切需要。更多的氧化钇作为稳定剂出现在第三代氧化锆中, 提高了最终烧结氧化锆中立方氧化锆晶粒的量; 此外, 随着四方相氧化锆含量的减少, 应力诱导相变的增韧机制减弱, 材料的强度和韧性显著降低。与第一代和第二代氧化锆全陶瓷材料比较, 第三代氧化锆又被叫作“高透氧化锆”。

第三代氧化锆全瓷体具有良好的光学性能, 能够用于修复前牙单冠、桥面贴面和前牙, 对一些微创修复材料如贴面、嵌体、高嵌体等的应用还需要临床评价, 这些材料的普遍应用还需进一步的钻研。

#### (4) 第四代氧化锆陶瓷 5Y-TZP (超透氧化锆)

氧化锆陶瓷如果再适当提高稳定剂氧化钇的含量(5 mol%), 立方相氧化锆晶体成为氧化锆材料的主晶相, 因此半透性非常好, 故将其称之为“超透氧化锆”。

第四代氧化锆全陶瓷材料的半透性与二硅酸锂玻璃陶瓷相近, 外观良好, 但强度高于微晶玻璃。主要在前牙单冠和贴面修复中使用。

### 3 氧化锆陶瓷的疲劳实验方法

通过长时间的临床观察反馈得到的结果来看, 氧化锆陶瓷类修复体在口腔内通过反复的咀嚼后, 表现出来的长远效果并不能令人满意, 随着使用时间的延长, 往往会出现瓷崩裂或瓷剥脱现象, 从而造成修复失败<sup>[20]</sup>。Sailer 等<sup>[21]</sup>经由钻研, 发觉氧化锆全瓷冠在口腔行使功能达  $35.1 \pm 13.8$  个月, 失败

率到达 15.2%。陶瓷材料(包括氧化锆)的疲劳失效是由原本存在于材料中的裂纹或缺陷的缓慢裂纹扩展(SCG)操控的, 当裂纹尖端的应力强度因子(KI)到达临界水平(KIC)时, 陶瓷便会折断。临床上, 口腔修复体的断裂通常是因为口腔复杂环境中缓慢的裂纹扩展机制引起的疲劳所致, 间歇咀嚼应力进而增加了陶瓷修复体原有的裂隙及缺陷。如今, 牙科氧化锆材料的疲劳特性的科研大多集中在以下三个方面, 即经过静态疲劳、动态疲劳和及循环疲劳试验来剖析其疲劳机理, 为临床实践提供理论参考。

#### 3.1 静态疲劳法

静态疲劳是指在连续和恒定的应力作用下的疲劳。静态疲劳的产生主要是由于应力长期腐蚀材料, 使得材料内原本存在的慢速裂纹被不断延展。在应力和时间不变的情况下, 内部裂纹扩展到临界尺寸, 导致材料失效。从微观角度分析, 陶瓷材料的静态疲劳过程即应力腐蚀过程。陶瓷材料的分子结构与大气中的水分子和其他腐蚀成分发生作用, 致使晶体间的共价键断裂, 降低了裂纹尖端的抗力, 因此导致裂纹持续延伸。

#### 3.2 动态疲劳法

动态疲劳定义为恒定速率应力作用下的疲劳。动态疲劳试验则为利用在不同加载速率下所得材料的弯曲强度, 继而推算出应力腐蚀指数, 即可根据该数值有效推测材料疲劳寿命。

测定应力腐蚀指数最简易的办法之一即为动态疲劳测试, Charles<sup>[22]</sup>是第一个提出动态疲劳测试应用于测定应力腐蚀指数  $n$ , Evans<sup>[23]</sup>等人以此为基本通过更深层次研究得出利用应力腐蚀指数推测材料寿命的方法。应力腐蚀指数  $n$  是象征材料亚临界状态下微裂纹延展的特定参数, 反映了在应力及环境腐蚀影响下裂纹延展的特点。应力腐蚀指数越高, 材料的韧性越大, 抗疲劳特性越强。相较于金属而言(2~5), 陶瓷材料通常有更大的  $n$  值(8~120)<sup>[24]</sup>。

#### 3.3 循环疲劳法

传统观点表示, 循环作用不能明显影响陶瓷材料, 裂纹尖端的环境介质腐蚀造成循环载荷下材料的断裂, 这实际上是静态疲劳过程<sup>[25]</sup>。有很多因素可能会导致上述原因, 一般来讲陶瓷中包含巨大能

量的离子键和共价键, 这就是即使外部负荷很大的情况也不出现异位或移动的原因, 基本不会发生形变, 所以目前学者多数觉得陶瓷材料对循环载荷疲劳不敏感。然而, 进入 20 世纪 80 年代中叶后, 陶瓷的循环负荷疲劳特质逐渐被多数研究者所认知。Okazaki<sup>[26]</sup>等研究了氮化硅材料在真空环境中疲劳裂隙的固定传递, 得出了陶瓷疲劳是会因循环载荷而引起的结论。韩高月<sup>[27]</sup>等通过研究发现, 修复体在口腔发挥功能时总是受到不同种类的应力。所以, 可以认为环境侵蚀以及循环负荷联合造成了陶瓷材料的疲劳破裂。

赵海丹<sup>[28]</sup>等研究 Wieland (WL) 及 Aidite(AI) 两种牙科氧化锆陶瓷的循环疲劳性能。当加载前提及次数同样的情况下, WL 陶瓷弯抗弯强度高于 AT 陶瓷, WL 陶瓷在强度特性及抗疲劳上更加出色。王景坤<sup>[29]</sup>等钻研了差异速度打磨对氧化锆循环疲劳特性的影响。将因打磨速度差别分为三组: A 组: 不调磨, B 组:  $1 \times 10^5$  r/min 调磨、C 组:  $2 \times 10^5$  r/min 调磨。进行完调磨处理后, 根据加载次数的差异将各组试件随机分成 1、2、3 三组 ( $A_1A_2A_3$ ;  $B_1B_2B_3$ ;  $C_1C_2C_3$ ), 1 组不加载, 2 组循环加载次数为  $10^5$ , 3 组循环加载次数为  $10^6$ 。将全部未处理试件放置在疲劳试验机操作台上, 调控正弦波, 加载力 40N~230N, 频率为 2Hz。结果显示: 打磨处理并不会减小氧化锆机械性能, 当加载次数越来越多, 强度减退, 然而并不会受到打磨速度的影响。

### 3.4 干湿环境下疲劳法

氧化锆陶瓷在口腔中行使功能时, 是长期处于唾液这个湿润环境中, 因此模拟口腔湿润条件下氧化锆陶瓷的疲劳特性, 对于指导临床实际使用情况更具有意义。口腔是牙齿的外部环境, 成分极其复杂, 所包含的唾液异常重要。唾液是一种无色淡薄的液体, 主要由三对大的唾液腺和很多小的口腔粘液腺分泌。人的唾液中 99% 是水, 有机成分包括唾液淀粉酶、粘多糖、粘蛋白及溶菌酶等, 无机成分有钠、钾、钙、氯和硫氰离子等, 这些成分都有可能对氧化锆陶瓷在口腔中长期行使功能产生影响。

覃小凤<sup>[30]</sup>等对照了在干燥和唾液浸泡条件下, 动态循环载荷对氧化锆/饰面瓷层断裂模数的影响。选取 30 个氧化锆/饰面陶瓷复合圆片样品, 随机分为干燥组和唾液浸泡组, 经过 10000 次循环加载后,

对试件进行双向弯曲试验, 并用光学显微镜观测试件表面损伤和断口形貌。唾液浸泡组, 根据文献人工唾液的主要成分制备包括: 0.78g  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 0.4g KCl; 0.4g NaCl; 0.795g  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 0.005g  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和 1g 尿酸, 用盐酸和氢氧化钠调节 pH=7。实验组浸泡在人工唾液中, 在 37℃ 的恒温箱中存放 15 天。结果表明, 在干燥条件下, 经过 10000 次疲劳载荷循环后, 表面裂纹大多为赫兹锥裂纹, 断裂方式首要为完全断裂。在唾液条件中, 疲劳试验后表面裂纹不仅是一个 hertz 锥形裂纹, 而且是一个圆形裂纹, 断裂方式主要为烤瓷熔附, 干燥环境下试样的抗弯强度比湿润环境下高 70%。

### 4 小结

综上所述, 牙科陶瓷类修复材料在几十年间取得了飞速的进展, 日后也将延续这一势头取得越来越多的进步和突破。新型纳米氧化锆材料的出现, 一定程度上解决了目前常用氧化锆修复材料的缺点, 但其在口腔中长期行使功能后理化功能是否改变, 以及如何采取有效预防措施, 有待于进一步的研究, 所以需要对其进行循环疲劳实验进一步探索。

循环疲劳是陶瓷材料在循环载荷作用下的疲劳损伤及失效, 也是口腔环境中最重要的疲劳修复类型。当周期性外部交变负载影响下, 在材料的外表或裂纹尖端有新的纤细裂纹聚集, 此为局部薄弱的区域, 为裂纹的进而传播和扩散创造了环境。外国学者 Dauskarat<sup>[31]</sup>的实验标志着, 当应力程度同等条件下, 循环负荷下相较于静态载荷下的陶瓷材料裂纹扩展速度大幅度提高, 即使在较低应力水平下循环负荷下的陶瓷裂纹已能够扩展。存在于口腔环境中的修复体也是如此, 它们在行使功能时会遇到不同的应力类型, 这些应力一般具有循环性以及处于特殊的口腔内环境中的特点。所以, 对于牙科修复体循环疲劳特性的钻研拥有深远影响。但由于口腔环境的复杂性<sup>[32]</sup>, 氧化锆陶瓷同样要受到唾液酸碱腐蚀, 冷热应力的影响等, 陶瓷修复体所展现的特殊的疲劳机制和行为, 在循环加载结合口腔特定液态环境外加临床咀嚼时就会出现, 如缓慢裂纹扩展、循环效应、材料低温降解等情况<sup>[33]</sup>。所以, 氧化锆陶瓷修复体的循环疲劳是一个多因素作用下的繁杂进程, 这与牙科陶瓷布满唾液的水环境有关, 有待更进一步的深入研究。

## 参考文献

- [1] AZA A H D, CHEVALIER J, FANTOZZI G, et al. Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses [J]. *Biomaterials*, 2002, 23(3):937-945.
- [2] 王梁, 龚旭, 吴伟, 陈吉俊, 吴冰, 李幼华. 喷砂对牙科氧化锆陶瓷材料弯曲强度和疲劳性能的影响[J]. *温州医科大学学报*, 2017, 47(08):585-589.
- [3] McLean JW, Hughes TH. The reinforcement of dental porcelain with ceramic oxides. *Br Dent J*, 1965, 19(6) : 251-267.
- [4] Della Bona A, Kelly JR. The clinical success of all-ceramic restorations. *J Am Dent Assoc*, 2008, 139 (Suppl) : S8-S13.
- [5] 张飙. 石榴石对牙科玻璃陶瓷强度的影响. *北京口腔医学*, 1999, 7(1) : 44-47.
- [6] Li Cong et al. Interfacial characterization and erosive wear performance of zirconia toughened alumina ceramics particles reinforced high chromium white cast irons composites[J]. *Tribology International*, 2022, 165.
- [7] 周金爱. 二氧化锆全瓷技术在口腔修复中的临床应用[J]. *基层医学论坛*, 2020, 24(08):1102-1103.
- [8] 朱海燕. 口腔修复材料氧化锆陶瓷的研究与应用[J]. *世界最新医学信息文摘*, 2019, 19(A5):106-107.
- [9] Oonishi H. Jr. et al. EFFECTS OF ROUNDNESS AND ROUGHNESS OF ALUMINA CERAMIC HEAD ON WEAR PROPERTIES FOR LONG -TERM CLINICAL USE[J]. *Orthopaedic Proceedings*, 2018, 92-B (SI).
- [10] 马晴, 施丽燕, 黄思雪, 郑章博文, 张爱华, 战德松, 付佳乐. 氧化锆陶瓷在牙体修复领域的研究现状及展望[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(22):3597-3602.
- [11] 李洪超. 美学氧化锆陶瓷的制备与性能研究[D]. *湖北工业大学*, 2020.
- [12] Mclean JW, Odont D. Evolution of dental ceramics in the twenties century[J]. *J Prosthet Dent*, 2001, 85:61-69.
- [13] Kelly JR, Benetti P. Ceramic materials in dentistry: historical evolution and current practice. *Aust Dent J*, 2011, 56 (Suppl 1) : 84-96.
- [14] 杨兆雄. 长石瓷的岩相分析. *硅酸盐通报*, 1980, (3) : 51-55.
- [15] Bitencourt Sandro Basso et al. Effect of handling material on mechanical and optical properties of feldspathic porcelain.[J]. *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et al.]*, 2021, 33(6) : 919-924.
- [16] Santos MJ, Costa MD, Rubo JH, et al. Current all-ceramic systems in dentistry: a review. *Compend Contin Educ Dent*, 2015, 36(1) : 31-37.
- [17] Wang ChunCheng et al. Comparison of optical and crystal properties of three translucent yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals with those of lithium disilicate glass-ceramic material.[J]. *Journal of dental sciences*, 2021, 16(4) : 1247-1254.
- [18] Malgaj Tine et al. The Influence of Nanostructured Alumina Coating on Bonding and Optical Properties of Translucent Zirconia Ceramics: In Vitro Evaluation[J]. *Coatings*, 2021, 11(9) : 1126-1126.
- [19] Juntavee Niwut and Juntavee Apa and Plongniras Preeyarat. Effectiveness of Nanohydroxyapatite on Demineralization of Enamel and Cementum Surrounding Margin of Yttria-Stabilized Zirconia Polycrystalline Ceramic Restoration.[J]. *TheScientificWorldJournal*, 2021, 2021 : 5540738-5540738.
- [20] 王 勋, 张修银. 全瓷修复体修复后可能出现的问题分析. *口腔颌面修复学杂志*, 2008: 9(2): 148- 151
- [21] Sailer I, Feher A, Filser F, et al. Five- year clinical results of zirconia frameworks for posterior fixed partial dentures. *Int J Prosthodont*, 2007, 20: 383- 388
- [22] Charles R. Dynamic fatigue of glass [J]. *Journal of Applied Physics*, 1958, 29(12):1657-1662.
- [23] Evans A, Wiederhorn S. Crack propagation and failure prediction in silicon nitride at elevated temperature [J]. *Journal of Materials Science*, 1974, 9(2):270-278.
- [24] Qiao G, Hongjie W, Zhihao J. Comparison between fatigue behavior of some ceramics: a new concept of intrinsic stress-corrosion exponent  $n_0$  [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(5):499-508.
- [25] MAI Y W, ATKINS A G. Crack propagation in ceramic materials under cyclic loading conditions[J]. *Meta*

- llurgical and Materials Transactions A, 1975, 6(11):2161-2163.
- [26] OKAZAKI M, MCEVILY A J, TANAKA T. On the mechanism of fatigue crack growth in silicon nitride [J]. Metallurgical Transactions A (Physical Metallurgy and Materials, Science), 1991, 22(6):1425-1434.
- [27] 韩高月. 抛光和上釉对钇稳定型氧化锆循环疲劳性能的影响[D].华北理工大学,2020.DOI:10.27108/d.cnki.ghe lu.2020.000394.
- [28] 赵海丹, 胡宇平, 张春宝, 何惠明. 牙科氧化锆陶瓷材料循环疲劳性能的实验研究[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2013, 23(05):344-348.
- [29] 王景坤. 临床调磨对钇稳定型氧化锆循环疲劳性能的影响[D]. 华北理工大学, 2018.
- [30] 覃小凤,苏晓晖,欧俊,韦赞军.干湿环境下循环载荷对氧化锆-饰面瓷叠层瓷结构抗弯强度的影响[J].口腔颌面修复学杂志,2010,v.11;No.48(06):324-328.
- [31] DAUSKARDT R H, CARTER W C, VEIRS D K, et al. Transient subcritical crack-growth behavior in transformation-toughened ceramics[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1990, 38(11):2327-2336.
- [32] KELLY J R, CESAR P F, SCHERRER S S, et al. A DM guidance-ceramics: Fatigue principles and testing [J]. Dental Materials, 2017, 33(11):1192-1204.
- [33] LOHBAUER U, ROLAND F, PETSCHERT A, et al. Correlation of in vitro fatigue data and in vivo clinical performance of a glassceramic material[J]. Dental Materials Official Publication of the Academy of Dental Materials, 2008, 24(1):39-44.

**收稿日期:** 2022 年 4 月 19 日

**出刊日期:** 2022 年 6 月 24 日

**引用本文:** 纪元, 王子健, 潘惠惠, 陈曦, 冯丽芳, 陶瓷类材料的发展和应概述及疲劳的研究[J]. 国际材料科学通报, 2022, 4(1):1-6  
DOI: 10.12208/j. ijms.20220001

**检索信息:** 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**