

低温老化对第三代氧化锆影响的研究进展

纪雄 卢积岑 于皓

福建医科大学口腔医学院·附属口腔医院口腔修复科,福建省口腔疾病研究重点实验室,福建医科大学口腔生物力学及美学研究中心,福州 350002

通信作者:于皓,Email:haoyu-cn@hotmail.com

【摘要】 氧化锆因其良好的力学性能和生物相容性,被广泛应用于口腔修复治疗中。然而,第一代和第二代氧化锆半透性较差,前牙区美学修复效果不够理想。此外,前两代氧化锆易受低温老化影响,力学性能下降。第三代氧化锆在前两代基础上改变了氧化锆的晶相组成,提高立方相的含量,显著增加了材料的半透性。但是,低温老化对第三代氧化锆性能的影响,尚缺乏系统研究。因此,本文系统阐述低温老化对第三代氧化锆力学性能、物理性能和光学性能的影响,以期对氧化锆材料的应用及发展提供帮助。

【关键词】 氧化锆; 低温老化; 相变; 半透性; 弯曲强度

基金项目:福建省中青年骨干教师教育科研项目(JAT190229)

引用著录格式:纪雄,卢积岑,于皓.低温老化对第三代氧化锆影响的研究进展[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2022,16(6):388-392.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2022.06.009

Research progress on low-temperature degradation of the third-generation zirconia

Ji Xiong, Lu Zhicen, Yu Hao

Department of Prosthodontics, School and Hospital of Stomatology, Fujian Medical University & Fujian Key Laboratory of Oral Diseases & Research Center of Dental Esthetics and Biomechanics, Fujian Medical University, Fuzhou 350002, China

Corresponding author: Yu Hao, Email: haoyu-cn@hotmail.com

【Abstract】 Zirconia has been introduced into dental practice for its excellent mechanical properties and biocompatibility. However, the translucency of the first and second generations of zirconia is not sufficient for esthetic restorations. The first and second generations of zirconia are also susceptible to low-temperature degradation, which results in the compromised mechanical properties. By increasing the content of cubic phase, different crystal structure of the third-generation zirconia obtained, and the translucency is remarkably increased. Nevertheless, whether the performances of third-generation zirconia would be affected by low-temperature degradation remains unclear. This review comprehensively

summarized the mechanical, physical and optical properties of the third-generation zirconia after low-temperature degradation, to provide theoretical basis for the development and clinical application of zirconia restorations.

【Key words】 Zirconia; Low-temperature degradation; Phase transformation; Translucency; Flexural strength

Fund program: Research Fund of Department of Education, Fujian Province (JAT190229)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2022.06.009

氧化锆虽然具有良好的力学性能,但透光性较差,限制了其在前牙区美学修复中的发展。因此,高度透明的第三代氧化锆在临床的应用中日益广泛。氧化锆在不同的温度下存在三种晶相结构,在低于1 170 °C为单斜相(*m*),在1 170 ~ 2 370 °C转化为四方相(*t*),在高于2 370 °C转变为立方相(*c*)^[1]。氧化锆在低温条件(<400 °C)下会自发形成四方相至单斜相的转变,即低温老化(low-temperature degradation, LTD)^[2],导致弯曲强度和硬度等力学性能下降^[3-4],且造成其表面粗糙度增加^[5],降低了半透性^[6],影响临床表现的稳定性^[7]。氧化锆晶粒由Zr⁴⁺和周围的氧空位稳定^[8]。在低温潮湿的环境中,水分子与氧化锆发生反应生成OH⁻,OH⁻沿晶界扩散至晶体内部并占据氧空位,形成质子缺陷,当氧空位下降到临界值,四方相氧化锆失去稳定转变为单斜相,完成*t*→*m*相变^[9]。第三代氧化锆通过提升氧化钇(yttrium oxide, Y₂O₃)的含量,增加氧化锆中立方晶相的占比^[10],四方相含量减少,理论上低温老化对第三代氧化锆的影响相对减弱。且Y₂O₃含量的提升,导致氧化锆晶粒为保持电荷平衡而产生氧空位,弥补低温老化的消耗,使四方相氧化锆更加稳定,不易产生*t*→*m*相变^[11]。但是,第三代氧化锆的临床表现是否与理论推断一致,尚缺乏系统研究。因此,本文将综述低温老化对第三代氧化锆影响的研究进展。

一、第三代氧化锆的晶相结构

Zhang等^[12]根据氧化锆的晶相组成和氧化铝添加剂含量的不同,将氧化锆分为三代,第一代和第二代为氧化铝含量不同的*x* = 3% Y₂O₃稳定的四方相氧化锆(*x* = 3% yttrium-stabilized tetragonal zirconia polycrystal, 3Y-TZP),而第三代氧化锆包括*x* = 4% Y₂O₃稳定的四方相氧化锆(4Y-TZP)和*x* = 5% Y₂O₃稳定的四方相氧化锆(5Y-TZP)。第三代氧化锆

表1 三代氧化锆的晶相与性能^[12-13]

晶相/性能	第一代	第二代	第三代	第三代
主晶相	3Y-TZP	3Y-TZP	4Y-TZP	5Y-TZP
晶相结构(立方相含量)	< 15% <i>c</i>	< 15% <i>c</i>	> 25% <i>c</i>	> 70% <i>c</i>
弯曲强度(MPa)	1000~1500	900~1300	600~1000	400~900
断裂韧性(MPa·m ^{1/2})	3.5~4.5	3.5~4.5	2.5~3.5	2.2~2.7
弹性模量(GPa)	200~210	200~210	200~210	200~210
半透性(1 mm TP值)	基本不透光	15~20	~30	~35

注:3Y-TZP为 $x=3\%$ Y₂O₃稳定的四方相氧化锆;4Y-TZP为 $x=4\%$ Y₂O₃稳定的四方相氧化锆;5Y-TZP为 $x=5\%$ Y₂O₃稳定的四方相氧化锆;*c*为立方相。

与前两代氧化锆主要区别在于晶相组成的不同(表1)^[12-13],前两代氧化锆的主要晶相为四方相,立方相含量低于15%(*w*),而4Y-TZP立方相含量大于25%(*w*),部分产品大于50%(*w*),5Y-TZP立方相含量大于70%(*w*)^[13]。立方相氧化锆光学各向同性,立方相含量的提升降低了光在晶界处的色散^[14],进而显著提升了第三代氧化锆的半透性,但同时也削弱了其强度。因此,第三代氧化锆临床上主要应用于前牙的单冠及固定桥修复,其中5Y-TZP比4Y-TZP具有更佳的半透性,有专家指出其可用于前牙贴面修复^[13]。同时,由于立方相稳定,即使在低温潮湿的环境下也不易发生晶相转变^[15],导致第三代氧化锆在低温老化实验中产生较少的 $t \rightarrow m$ 相变。在134℃条件下进行1h高压灭菌锅老化,理论上相当于体内老化3~4年^[16]。即使在134℃下低温老化200h后,第三代氧化锆中单斜相含量也远小于前两代氧化锆,而且在相同老化时间内 $t \rightarrow m$ 相变的速度也更慢^[17]。总的说来,低温老化对第三代氧化锆晶相组成仅产生较小的影响。

二、低温老化对第三代氧化锆性能的影响

1. 力学性能:低温老化对第三代氧化锆力学性能影响的研究主要包括弯曲强度、断裂韧性、硬度及疲劳性能等方面。弯曲强度是评估材料抵抗弯曲力的能力,也是氧化锆临床性能的重要指标^[18]。低温老化对第三代氧化锆弯曲强度的影响存在争议,有学者研究发现第三代氧化锆老化后的弯曲强度未产生明显变化^[17,19-21]。Flinn等^[17]对4种Y-TZP进行200h的低温老化实验,结果显示第三代氧化锆的弯曲强度没有发生显著变化,而前两代氧化锆的弯曲强度则发生显著下降,低温老化诱导微裂纹的形成可能是导致其弯曲强度下降的主要原因^[22]。但由于低温老化实验中,氧化锆的加工方式各异,不同的加工方式中观察到不同的结果。Jerman等^[23]研究发现,第三代氧化锆在不同的烧结方式下,低温老化后其弯曲强度的变化也不同。低温老化后,快速烧结组的弯曲强度从990MPa下降到671MPa,而常规烧结组弯曲强度没有发生明显变化,提示烧结的持续时间可能影响低温老化后第三代氧化锆弯曲强度的变化。不仅第三代氧化锆的烧结方式可能改变低温老化对弯曲强度的影响,着色处理也可能产生同样的影响。Lümkemann等^[24]研究发现,经过预着色处理的4Y-TZP低温老化160h后,其弯曲强度发生显著下降,相反,未经过预着色处理的4Y-TZP的弯曲强度没有明显变化。低温老化对第三代氧化锆弯曲强度的影响是否还受其

他因素的影响需要更深入的研究。

疲劳失效是由环境中低于陶瓷材料断裂强度的载荷间歇性施加于材料上,造成材料中的裂纹延伸和扩展,导致材料断裂的失效模式^[25]。与晶相结构的改变相类似,低温老化后第三代氧化锆的抗疲劳性能没有显著变化^[26-27]。Pereira等^[26]通过对第二、三代氧化锆分组处理(20h低温老化处理组和空白对照组)后测试其抗疲劳性能,发现低温老化增加了第二代氧化锆的抗疲劳强度和疲劳次数,而对第三代氧化锆没有影响。第二代氧化锆在经过400MPa,120000次循环后,空白对照组中10%的试件发生断裂,低温老化组未发生断裂。相同条件下,第三代氧化锆不论是否老化,试件全部断裂。氧化锆试件的断裂模式的显示,第二、三代氧化锆均在拉应力集中侧的表面出现缺陷,在压应力集中侧的裂纹扩展。循环载荷导致微观的裂纹扩展,低温老化中水分子吸附在产生应力点的表面,形成Zr-OH和(或)Y-OH,加速四方晶相的失稳,发生 $t \rightarrow m$ 相变^[27-28]。第三代氧化锆虽然提高了性质稳定的立方相含量,但其抗疲劳性能仍然欠佳,如何改善其低温老化后的抗疲劳性能有待进一步研究。

断裂韧性反映的是材料阻止裂纹扩展的能力^[29]。如前文所述,立方相含量的差异是第三代氧化锆与前两代氧化锆的重要差别之一,相对高的立方相含量使其更不易发生相变^[30]。Kengtanyakich等^[19]对比了低温老化8h后不同立方相含量氧化锆的断裂韧性,结果显示立方相含量更高的5Y-TZP的断裂韧性没有发生显著变化,而立方相含量相对较低的3Y-TZP的断裂韧性显著下降,有证据表明当氧化锆立方相质量分数超过30%的时候,氧化锆更加稳定,断裂韧性不易受到低温老化的影响。

表面硬度是一种衡量材料抗压痕或划痕能力的指标,常用于评估材料的耐磨性^[31]。低温老化对第三代氧化锆的表面硬度没有显著影响^[20,32]。De Araújo等^[32]利用高压灭菌锅和水热反应器对第三代氧化锆进行低温老化实验,结果显示其表面硬度均未发生明显改变。但是,黎日照等^[4]认为,全锆冠在长期受力的部位更容易发生低温老化效应,影响其表面硬度。

就力学性能而言,第三代氧化锆较前两代氧化锆表现出更好的抗低温老化的能力,低温老化后其疲劳性能、断裂韧性和硬度没有发生显著变化,而对于弯曲强度的影响则需要进一步研究。但是,第三代氧化锆的力学性能在低温老化前

后均较前两代氧化锆差,目前仅能满足临床中前牙单冠,贴面以及部分固定桥的修复需求。如何在保证其抗低温老化性能的前提下,提升力学性能还有待进一步研究。

2. 物理性能:微观形貌的变化可以更直观地反映低温老化对氧化锆的影响。低温老化后,氧化锆剖面有一层明显的 $t \rightarrow m$ 相变转化层(transformation layer),转化层的深度与老化后的单斜相含量正相关。相比于前两代氧化锆,第三代氧化锆在低温老化200 h后单斜相含量更低,且转化层的深度更浅^[17]。低温老化不仅导致氧化锆表面转化层的产生,而且老化后 $t \rightarrow m$ 相变的区域内,氧化锆晶粒发生膨胀,氧化锆沿晶界产生微裂纹,单斜相晶粒脱落,导致氧化锆表面出现凹陷,但在第三代氧化锆中 $t \rightarrow m$ 相变区域内发生的体积膨胀较小,表面凹陷也较浅^[20,33]。

第三代氧化锆常作为全氧化锆修复体,运用于临床治疗中,低温老化对其表面粗糙度的影响将直接关系到修复的远期效果。低温老化诱导四方相转变为单斜相,伴随氧化锆晶粒体积膨胀,当这些晶粒膨胀并相互挤压时,氧化锆的表面变得粗糙,进而导致对颌牙的磨损率增加,影响修复效果^[3]。对于第三代氧化锆而言,低温老化并不会对其表面粗糙度产生显著影响^[20,33-34]。Alfrisy等^[20]对比了低温老化对四种不同成分的氧化锆表面粗糙度的影响,结果显示四种氧化锆的表面粗糙度均不受低温老化的影响,但研究认为这也许是受到氧化锆表面处理方式的影响,低温老化前,较高的初始粗糙度会掩盖老化的影响。因此,Hatanaka等^[35]在测量第三代氧化锆表面粗糙度之前进行了不同的表面处理(研磨、研磨后抛光和研磨后上釉等),结果显示研磨显著提升了第三代氧化锆低温老化前的粗糙度,但经过20 h老化处理后,除研磨后抛光组的粗糙度没有显著变化外,其余组别的粗糙度均显著下降。

弹性模量反映了材料在不发生永久形变的情况下承受应力的能力^[20],是临床评判氧化锆性能的重要标准。了解低温老化中单斜相各向异性的弹性应力之间的应变关系,对模拟和探索 $t \rightarrow m$ 相变的机制具有重要意义^[36]。低温老化对第三代氧化锆弹性模量的影响与对前两代氧化锆相似。Alfrisy等^[20]对不同代别氧化锆进行低温老化15 h实验后发现,弹性模量均发生显著下降。但Guicciardi等^[37]研究发现,低温老化后氧化锆弹性模量的变化可能和晶粒尺寸(grain size)相关,老化后晶粒尺寸为700 nm的氧化锆的弹性模量发生了显著变化,而晶粒尺寸为200 nm的氧化锆没有发生变化。低温老化后氧化锆弹性模量的变化不受分代的影响,但是否与晶粒尺寸等其他因素相关,仍需进一步研究。

在物理性能方面,低温老化对第三代氧化锆无论是在微观形貌、表面粗糙度或者弹性模量方面都未形成较大的影响。需要注意的是,氧化锆标本的制备方案似乎会影响表面粗糙度的改变,所以,氧化锆样本制备的标准化在未来相关研究中尤为重要^[38]。

3. 光学性能:半透性作为氧化锆光学性能的重要组成部分之一,其影响因素众多,包括氧化锆的成分、厚度、立方相

的含量及表面粗糙度等^[14,39-41]。其中,第三代氧化锆通过提升立方相的含量,其半透性得到显著提升。材料的半透性通常使用半透明参数(translucency parameter, TP)和对比度(contrast, CR)来评估^[42]。现有证据表明,第三代氧化锆的TP和CR等光学参数不受低温老化的影响,半透性未发生变化^[33-34,43-45]。Kou等^[34]研究了两种第三代氧化锆低温老化10 h后半透性的改变,结果显示两种第三代氧化锆的半透性均未发生变化。这与前两代氧化锆低温老化后的表现不同,前两代氧化锆受低温老化的影响,诱导其产生 $t \rightarrow m$ 相变,导致表面粗糙度显著提升,增加光的散射和反射,减少光的透射量,从而半透性下降^[45]。低温老化后第三代氧化锆产生的 $t \rightarrow m$ 相变比前两代少,粗糙度也没有发生明显变化,因此其半透性受低温老化的影响显著低于前两代氧化锆。

作为光学的另外一个重要性能,颜色是影响氧化锆修复后美观效果的重要因素之一。 ΔE 常作为评判材料颜色的重要指标,代表物体之间的颜色差异, ΔE 值越高,颜色差异越大。基于Khashayar等^[46]文章中 $\Delta E = 1$ 的可感知阈值和 $\Delta E = 3.7$ 的可接受阈值,低温老化对第三代氧化锆颜色的改变在临床可接受范围内^[43]。Alghazzawi等^[45]对比了7种不同品牌的氧化锆,在延长低温老化时间后光学性能的变化,在0~100 h的低温老化实验中,只有第三代氧化锆的颜色改变低于临床可接受阈值,具有最佳的颜色稳定性。

三、小结

综上所述,不论是在微观结构还是宏观性能方面,低温老化对第三代氧化锆均未产生显著影响。其中低温老化对弯曲强度的影响还不够明确,主要归因于氧化锆样本制备方案尚未统一,制备方案的标准化将对未来相关研究提供有效帮助。由于第三代氧化锆广泛应用于临床的时间较短,且对于低温老化的临床研究往往需要年限较长,因此本课题组目前还未能找到相关临床研究的报道,所以尚未能加入相关临床研究结果。值得注意的是,虽然第三代氧化锆较前两代而言,拥有更好地抵抗低温老化的能力,在临床使用过程中具有更持久的稳定性,且半透性更高,更为美观,但力学性能相对较差,限制了其临床应用范围,如何提升第三代氧化锆的力学性能对未来氧化锆材料的发展具有重要意义。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Kelly JR, Denry I. Stabilized zirconia as a structural ceramic: An overview [J]. Dent Mater, 2008, 24(3): 289-298. DOI: 10.1016/j.dental.2007.05.005.
- [2] Lugh V, Sergio V. Low temperature degradation - aging - of zirconia: A critical review of the relevant aspects in dentistry [J]. Dent Mater, 2010, 26(8): 807-820. DOI: 10.1016/j.dental.2010.04.006.
- [3] Lucas TJ, Lawson NC, Janowski GM, et al. Effect of grain size on the monoclinic transformation, hardness, roughness, and modulus of aged partially stabilized zirconia [J]. Dent Mater, 2015, 31(12): 1487-1492. DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.014.

- [4] 黎日照,付强,李丽娟,等.低温时效对牙科氧化锆陶瓷表面硬度的影响[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2013,7(2):112-116. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2013.02.006.
- [5] Inokoshi M, Zhang F, De Munck J, et al. Influence of sintering conditions on low-temperature degradation of dental zirconia[J]. Dent Mater, 2014, 30(6):669-678. DOI:10.1016/j.dental.2014.03.005.
- [6] Michael JL, Eva MV, Leslie AR, et al. Low-temperature aging of zirconia ferrules for optical connectors[J]. J Am Ceram Soc, 2001, 84(11):2731-2733. DOI:10.1111/j.1151-2916.2001.tb01085.x.
- [7] Camposilvan E, Leone R, Gremillard L, et al. Aging resistance, mechanical properties and translucency of different yttria-stabilized zirconia ceramics for monolithic dental crown applications[J]. Dent Mater, 2018, 34(6):879-890. DOI:10.1016/j.dental.2018.03.006.
- [8] 吕季喆,李怡,刘晓强,等.口腔修复氧化锆陶瓷低温老化的研究进展[J].中华口腔医学杂志,2022,57(4):418-423. DOI:10.3760/cma.j.cn112144-20211227-00571.
- [9] Xin G, Tilman S. Water incorporation in tetragonal zirconia[J]. J Am Ceram Soc, 2004, 87(4):746-748. DOI:10.1111/j.1551-2916.2004.00746.x.
- [10] Zhang F, Inokoshi M, Batuk M, et al. Strength, toughness and aging stability of highly-translucent Y-TZP ceramics for dental restorations[J]. Dent Mater, 2016, 32(12):e327-e337. DOI:10.1016/j.dental.2016.09.025.
- [11] 张晓旭,朱东彬,梁金生.齿科氧化锆陶瓷水热稳定性研究进展[J].无机材料学报,2020,35(7):759-768. DOI:10.15541/jim20190401.
- [12] Zhang Y, Lawn BR. Novel zirconia materials in dentistry[J]. J Dent Res, 2018, 97(2):140-147. DOI:10.1177/0022034517737483.
- [13] 万乾炳.口腔氧化锆修复材料分代之我见[J].国际口腔医学杂志,2021,48(2):125-128. DOI:10.7518/gjkk.2021023.
- [14] Zhang Y. Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent[J]. Dent Mater, 2014, 30(10):1195-1203. DOI:10.1016/j.dental.2014.08.375.
- [15] Sato T, Shimada M. Transformation of yttria-doped tetragonal ZrO₂ polycrystals by annealing in water[J]. J Am Ceram Soc, 1985, 68(6):356-359. DOI:10.1111/j.1151-2916.1985.tb15239.x.
- [16] Chevalier J, Deville S, Münch E, et al. Critical effect of cubic phase on aging in 3mol% yttria-stabilized zirconia ceramics for hip replacement prosthesis[J]. Biomaterials, 2004, 25(24):5539-5545. DOI:10.1016/j.biomaterials.2004.01.002.
- [17] Flinn BD, Raigrodski AJ, Mancl LA, et al. Influence of aging on flexural strength of translucent zirconia for monolithic restorations[J]. J Prosthet Dent, 2017, 117(2):303-309. DOI:10.1016/j.prosdent.2016.06.010.
- [18] Homaei E, Farhangdoost K, Tsoi JKH, et al. Static and fatigue mechanical behavior of three dental CAD/CAM ceramics[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2016, 59:304-313. DOI:10.1016/j.jmbbm.2016.01.023.
- [19] Kengtanyakich S, Peampring C. An experimental study on hydrothermal degradation of cubic-containing translucent zirconia[J]. J Adv Prosthodont, 2020, 12(5):265-272. DOI:10.4047/jap.2020.12.5.265.
- [20] Alfrisany NM, de Souza GM. Surface and bulk properties of zirconia as a function of composition and aging[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2022, 126:104994. DOI:10.1016/j.jmbbm.2021.104994.
- [21] Muñoz EM, Longhini D, Antonio SG, et al. The effects of mechanical and hydrothermal aging on microstructure and biaxial flexural strength of an anterior and a posterior monolithic zirconia[J]. J Dent, 2017, 63:94-102. DOI:10.1016/j.jdent.2017.05.021.
- [22] Prado PHCO, Monteiro JB, Campos TMB, et al. Degradation kinetics of high-translucency dental zirconias: Mechanical properties and in-depth analysis of phase transformation[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2020, 102:103482. DOI:10.1016/j.jmbbm.2019.103482.
- [23] Jerman E, Wiedenmann F, Eichberger M, et al. Effect of high-speed sintering on the flexural strength of hydrothermal and thermo-mechanically aged zirconia materials[J]. Dent Mater, 2020, 36(9):1144-1150. DOI:10.1016/j.dental.2020.05.013.
- [24] Lümekem N, Stawarczyk B. Impact of hydrothermal aging on the light transmittance and flexural strength of colored yttria-stabilized zirconia materials of different formulations[J]. J Prosthet Dent, 2021, 125(3):518-526. DOI:10.1016/j.prosdent.2020.01.016.
- [25] Wiskott HW, Nicholls JI, Belser UC. Stress fatigue: Basic principles and prosthodontic implications[J]. Int J Prosthodont, 1995, 8(2):105-116.
- [26] Pereira GKR, Guilardi LF, Dapieve KS, et al. Mechanical reliability, fatigue strength and survival analysis of new polycrystalline translucent zirconia ceramics for monolithic restorations[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 85:57-65. DOI:10.1016/j.jmbbm.2018.05.029.
- [27] Prado PHCO, Dapieve KS, Campos TMB, et al. Effect of hydrothermal and mechanical aging on the fatigue performance of high-translucency zirconias[J]. Dent Mater, 2022, 38(6):1060-1071. DOI:10.1016/j.dental.2022.04.021.
- [28] Yoshimura M, Noma T, Kawabata K, et al. Role of H₂O on the degradation process of Y-TZP[J]. J Mater Sci Lett, 1987, 6(4):465-467. DOI:10.1007/BF01756800.
- [29] 马德隆,包亦望,万德田,等.陶瓷薄基板材料裂纹预制与断裂韧性评价[J].无机材料学报,2021,36(7):733-737. DOI:10.15541/jim20200621.
- [30] Peampring C, Kengtanyakich S. Surface roughness and translucency of various translucent zirconia ceramics after hydrothermal aging[J]. Eur J Dent, 2022, 16(4):761-767. DOI:10.1055/s-0041-1736415.
- [31] Mandikos MN, McGivney GP, Davis E, et al. A comparison of

- the wear resistance and hardness of indirect composite resins [J]. *J Prosthet Dent*, 2001, 85(4):386-395. DOI:10.1067/mpr.2001.114267.
- [32] de Araújo-Júnior ENS, Bergamo ETP, Bastos TMC, et al. Ultra-translucent zirconia processing and aging effect on microstructural, optical, and mechanical properties [J]. *Dent Mater*, 2022, 38(4):587-600. DOI:10.1016/j.dental.2022.02.016.
- [33] Amarante JEV, Soares Pereira MV, de Souza GM, et al. Effect of hydrothermal aging on the properties of zirconia with different levels of translucency [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020, 109:103847. DOI:10.1016/j.jmbbm.2020.103847.
- [34] Kou W, Garbriellsson K, Borhani A, et al. The effects of artificial aging on high translucent zirconia [J]. *Biomater Investig Dent*, 2019, 6(1):54-60. DOI:10.1080/26415275.2019.1684201.
- [35] Hatanaka GR, Polli GS, Adabo GL. The mechanical behavior of high-translucent monolithic zirconia after adjustment and finishing procedures and artificial aging [J]. *J Prosthet Dent*, 2020, 123(2):330-337. DOI:10.1016/j.prosdent.2018.12.013.
- [36] Chan S-K, Fang Y, Grimsditch M, et al. Temperature dependence of the elastic moduli of monoclinic zirconia [J]. *J Am Ceram Soc*, 1991, 74(7):1742-1744. DOI:10.1111/j.1151-2916.1991.tb07177.x.
- [37] Guicciardi S, Shimozone T, Pezzotti G. Ageing effects on the nanoindentation response of sub-micrometric 3Y-TZP ceramics [J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(2):718-722. DOI:10.1007/s10853-006-1177-2.
- [38] Yang H, Xu YL, Hong G, et al. Effects of low-temperature degradation on the surface roughness of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal ceramics: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 125(2):222-230. DOI:10.1016/j.prosdent.2020.01.005.
- [39] Awad D, Stawarczyk B, Liebermann A, et al. Translucency of esthetic dental restorative CAD/CAM materials and composite resins with respect to thickness and surface roughness [J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 113(6):534-540. DOI:10.1016/j.prosdent.2014.12.003.
- [40] Barizon KT, Bergeron C, Vargas MA, et al. Ceramic materials for porcelain veneers: part II. Effect of material, shade, and thickness on translucency [J]. *J Prosthet Dent*, 2014, 112(4):864-870. DOI:10.1016/j.prosdent.2014.05.016.
- [41] Ilie N, Stawarczyk B. Quantification of the amount of blue light passing through monolithic zirconia with respect to thickness and polymerization conditions [J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 113(2):114-121. DOI:10.1016/j.prosdent.2014.08.013.
- [42] Cinar S, Altan B. Effect of veneering and hydrothermal aging on the translucency of newly introduced extra translucent and high translucent zirconia with different thicknesses [J]. *Biomed Res Int*, 2021:7011021. DOI:10.1155/2021/7011021.
- [43] Mešić K, Majnarić I, Mehulić K. Effect of aging on the microstructure and optical properties of translucent ZrO₂ ceramics [J]. *Acta Stomatol Croat*, 2021, 55(2):114-128. DOI:10.15644/asc55/2/1.
- [44] Shen JD, Xie HF, Wu XY, et al. Evaluation of the effect of low-temperature degradation on the translucency and mechanical properties of ultra-transparent 5Y-TZP ceramics [J]. *Ceram Int*, 2020, 46(1):553-559. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.09.002.
- [45] Alghazzawi TF. The effect of extended aging on the optical properties of different zirconia materials [J]. *J Prosthodont Res*, 2017, 61(3):305-314. DOI:10.1016/j.jpor.2016.11.002.
- [46] Khashayar G, Bain PA, Salari S, et al. Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry [J]. *J Dent*, 2014, 42(6):637-644. DOI:10.1016/j.jdent.2013.11.017.

(收稿日期:2022-06-24)

(本文编辑:王嫚)