

文章编号:1004-7220(2019)04-0365-07

# 全瓷冠粘接界面缺陷对修复体应力的影响

汪饶饶<sup>1</sup>, 徐远志<sup>1</sup>, 杨启祥<sup>1</sup>, 刘勇岗<sup>2</sup>, 张东升<sup>2</sup>

(1. 同济大学附属第十人民医院 口腔科, 上海 200072; 2. 上海大学 力学系, 上海 200444)

**摘要:**目的 探究当单层全瓷冠修复体与胶层之间存在由于口腔水环境下造成的脱粘以及粘结缺陷时对修复体内部应力分布的影响。方法 以二硅酸锂 CAD/CAM 单层冠为研究对象,进行三维有限元实体建模。利用有限元软件 ABAQUS 定义瓷冠内表面与胶层上表面的 7 个脱粘状态(状态 1~7),以及 2 种界面缺陷的情形(情况 I、II)。对所建 9 个模型底部进行完全约束,并在咬合面分别用直径 5 mm 半球形解析刚体施加 600 N 竖向载荷以对其进行应力计算。结果 在竖向咬合力作用下,瓷冠内部和胶层上表面应力集中主要出现在脱胶边界处以及缺陷的周边。瓷冠内部的第一主应力没有超过其极限抗拉强度,但胶层中的最大拉应力超过粘结剂的极限抗拉强度,即胶层会发生内聚破坏。结论 瓷冠内壁的粘结完整在维持瓷冠内部整体应力处于较低水平方面有重要作用,粘结界面处缺陷的存在对瓷冠承载力的影响比单纯脱粘面积的增加对瓷冠承载力造成的影响更加显著。为保障全瓷冠修复体的承载能力,在口腔修复临床实践中更应该注意避免引入粘结缺陷。

**关键词:**二硅酸锂;界面;脱粘;缺陷;有限元分析

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2019.04.005

## Influence of Defects at Bonding Interface on Stress Distributions in Monolithic Ceramic Crown

WANG Raorao<sup>1</sup>, XU Yuanzhi<sup>1</sup>, YANG Qixiang<sup>1</sup>, LIU Yonggang<sup>1</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>2</sup>

(1. Department of Stomatology, the Tenth People's Hospital of Tongji University, Shanghai 200072, China;

2. Department of Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract: Objective** To explore the effects of the interfacial debonding caused by water environment in the mouth and the interfacial defects between the crown and cement on stress distributions in all-ceramic crowns. **Methods** The three-dimensional solid model of lithium disilicate CAD/CAM crowns for the first mandibular molar was established. Seven debonding states between inferior surface of the crown and top surface of the cement (Stage 1-7) as well as two interfacial defects (Case I and II) were defined in finite element software ABAQUS. The bottom of nine models was completely constrained. For stress calculation, the 600 N vertical load was applied at occlusal surface via an analytical rigid hemisphere with the diameter of 5 mm. **Results** Under occlusal vertical load, the stress on interior of the crown and top surface of the cement was mainly distributed at the boundary of the debonding areas and margin of the defects. The first principle stress on interior of the crown did not exceed its ultimate tensile strength, but the maximum tensile stress of the cement exceeded its ultimate tensile strength, leading to cohesive failure in the cement. **Conclusions** The axial wall played a critical role in maintaining the principal tensile stress of the crown at a lower level. The defects at bonding interface between the crown and cement had a more significantly impact on load capacity of the crown than the increase in debonding areas. In order to im-

收稿日期:2018-06-18; 修回日期:2018-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目(11672347,11727804,51732008)

通信作者:张东升,教授,E-mail: donzhang@staff.shu.edu.cn

prove load bearing capacities of all-ceramic crowns, attention should be paid to avoid defects in clinical prosthodontic practices.

**Key words:** lithium disilicate; interface; debonding; defects; finite element analysis

全瓷冠修复体集美观和生物相容性于一体,在当代口腔修复临床实践中扮演着重要的角色。然而,陶瓷固有的脆性使其在咬合力作用下极易发生脆性断裂。为了更好地满足临床需求并延长修复体的使用寿命,过去数十年间口腔修复致力于减少陶瓷修复体的加工缺陷,并克服其脆断失效的缺点。CAD/CAM技术的出现使得修复体在制造过程减少了孔洞等的缺陷,并且加工过程更为便捷,极大减少了修复体的加工缺陷<sup>[1]</sup>。新型陶瓷例如二氧化锆、二硅酸锂的出现能够大幅提高修复体的抗折强度<sup>[2]</sup>,满足正常咬合力的需求,克服了陶瓷脆断的缺点,在口腔修复中得到广泛应用。

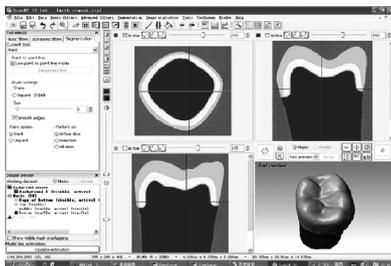
在口腔临床实践中,CAD/CAM二硅酸锂单层冠具有良好的半透明性<sup>[3]</sup>,避免了传统双层全瓷冠饰面瓷容易损坏的缺点,同时兼顾陶瓷的抗折强度,受到广大牙疾患者的青睐。然而,其耐久性会很大程度地受到粘结界面质量及烧制或粘结过程中引入缺陷的影响<sup>[4]</sup>。Pagniano等<sup>[5]</sup>研究表明,超过90%玻璃陶瓷冠的失效起源于粘结界面而非咬合面。全瓷冠处在口腔水环境中,粘结界面很容易在水环境作用下产生老化脱粘问题。Hernandez等<sup>[6]</sup>研究发现,瓷冠与粘结剂的粘结界面比牙本质与粘结剂的粘结界面更容易受到疲劳载荷和老化作用的影响。Lu等<sup>[7]</sup>研究了水化作用下全瓷冠的承载能力,发现水化作用后全瓷冠会从肩台处脱粘,随着外加载荷增大,脱粘区域会随之扩展直至发生断

裂。此外,界面缺陷的存在亦被认为是导致修复体失效的重要因素,例如陶瓷烧制过程会引入气孔、夹杂物、微裂隙等<sup>[4]</sup>。Jian等<sup>[4]</sup>利用X射线观察二硅酸锂双层冠内部的缺陷,结果发现其内部分布有直径50~300 μm及440~1 180 μm的气孔缺陷。而粘结过程中瓷冠表面的酸蚀处理及喷砂处理可能引入微裂隙缺陷,对瓷冠修复体的抗折强度及耐久性有明显的削弱作用<sup>[8]</sup>。本文以二硅酸锂CAD/CAM单层冠为研究对象,利用数值模拟方法研究当二硅酸锂内表面与粘结剂的粘结界面出现脱粘及存在界面缺陷时瓷冠内部的应力分布变化规律。

## 1 材料与方法

将右下第1磨牙标准牙模型的CT图像<sup>[9]</sup>导入三维建模软件Simpware 6.0中,逆向重建二硅酸锂全瓷冠三维实体模型[见图1(a)],再导入有限元软件ABAQUS中进行网格划分[见图1(b)],并对其赋予相应的材料属性(见表1)。修复体模型的主要几何尺寸如图1(c)所示。特别地,粘结剂厚度设定为100 μm。

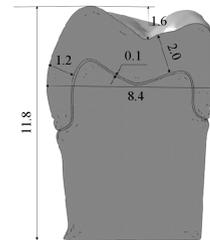
根据Lu等<sup>[7]</sup>对全瓷冠在水环境作用下瓷冠与粘结剂界面脱粘演化趋势的研究结论,定义瓷冠与粘结剂界面脱粘的7个状态(状态1~7),其对应的脱粘区域占总面积百分比分别为0%、29%、38%、59%、75%、87%、100%[见图2(a)~(g)]。脱粘从肩台处开始(状态1),逐步扩展直至完全脱粘(状



(a) 全瓷冠模型三维立体重建



(b) 整体网格模型



(c) 模型尺寸

图1 全瓷冠三维实体模型

Fig.1 Three-dimensional (3D) solid model of the all-ceramic crown (a) 3D reconstruction of the all ceramic crown, (b) The whole meshed model, (c) Dimensions of the model

表1 材料属性<sup>[7,11-12]</sup>及模型单元数和节点数

Tab.1 Material properties and numbers of elements and nodes in the models

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	网格 单元数	网格 结点数
二硅酸锂瓷冠	96.0	0.23	226 562	84 964
粘结剂	6.5	0.27	1	172 363
牙本质基体	12.9	0.30	244 023	84 856

态7)。此外,根据 Jian 等<sup>[4]</sup>对瓷冠内部气孔缺陷的观察结论,定义2种界面缺陷的分布形式(情况I、II),缺陷近似呈均匀分布,直径分别为130、500  $\mu\text{m}$ ,分布密度分别为2.85、1.10个/ $\text{mm}^2$ [见图2(h)~(i)]。本文中考虑粘结界面的粘结缺陷<sup>[4]</sup>,一方面是由于烧制过程中引入气孔,粘结剂不能完全填充造成缺陷;另一方面是粘结过程中表面酸蚀或喷砂之后,在粘结剂与瓷冠间引入微间隙,造成粘结状况不良。其中,情况I是对实际缺陷情况的一种理想模拟,而情况II是对实际缺陷情况的一种极限状态模拟。在图2中,用黑色区域表示瓷冠内表面与粘结剂上表面分离的区域,黑色区域中瓷冠与粘结剂设为摩擦系数为0.1的接触关系;灰色区域表示瓷冠下表面与粘结剂上表面的良好粘结区域,灰色区域中瓷冠与粘结剂设为绑定关系。而粘结剂下表面与牙本质基体之间粘结良好,也设定为绑定关系。

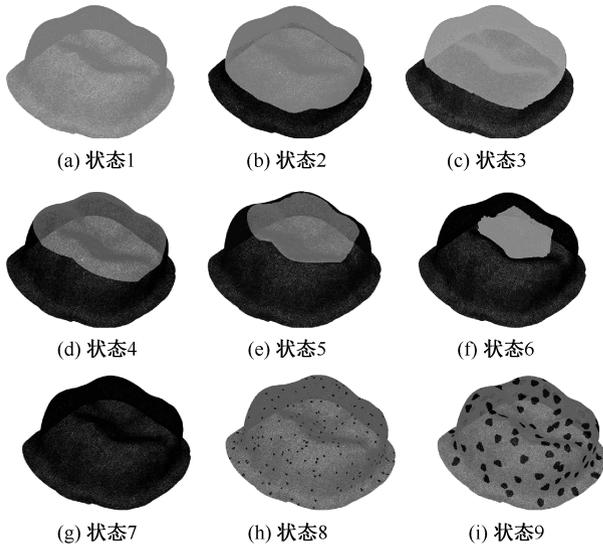


图2 瓷冠与胶层界面脱粘区域状态及界面缺陷分布情况

Fig.2 Debonding states and interfacial defects between the crown and cement (a) Stage 1, (b) Stage 2, (c) Stage 3, (d) Stage 4, (e) Stage 5, (f) Stage 6, (g) Stage 7, (h) Case I, (i) Case II

在 ABAQUS 中,分别在上述9种状态有限元模型的咬合面用直径为5 mm 半球状解析刚体施加600 N 竖向载荷,设定半球面与咬合面为光滑接触关系。然后在模型底部对位移分量进行全约束(见图3),并进行模拟计算。所有材料属性假定为各向同性、均一以及线弹性<sup>[10]</sup>。



图3 模型的载荷施加及边界条件设定

Fig.3 Occlusal loading condition and boundary conditions of the finite element model

## 2 结果

由于陶瓷材料为脆性材料,其破坏的主要因素以拉应力为主,故有限元计算结果以第1主应力表征。由于瓷冠咬合面与半球型触头接触区域的第一主应力极值为450 MPa,考虑到口腔咬合实际情况远远低于模拟所用解析刚体的弹性模量,故咬合面的最大接触应力应该远小于450 MPa。而二硅酸锂的极限抗拉强度高达400 MPa<sup>[13]</sup>,故本文不考虑咬合面的应力分布。根据计算结果,状态1~7瓷冠内表面的第1主应力分布如图4(a)~(g)所示。在界面粘结良好的状态下,高应力区只出现在咬合面正下方,一旦肩台处出现脱粘,则瓷冠边缘处的应力会明显增大。随着脱胶区域向咬合区域扩展,内壁的应力会明显增大,并且最大应力也随之增加。状态5~6的应力分布最为危险,处于完全脱粘状态7的应力分布相比状态5~6反而较安全。情况I、II瓷冠内表面的第1主应力分布如图4(h)~(i)所示。高应力区主要出现在瓷冠咬合区的下表面。并且,在情况II中,缺陷边界有明显的应力集中。在600 N 竖向载荷作用下,各状态瓷冠下表面应力都没有超过二硅酸锂的极限抗拉强度(400 MPa)<sup>[13]</sup>。

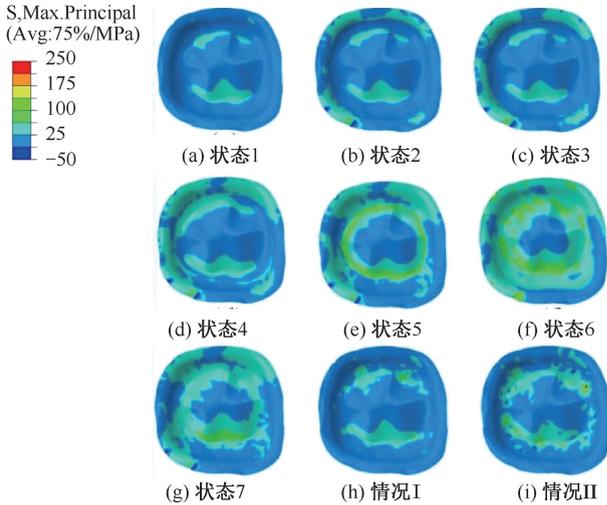


图4 不同脱胶状态及粘结缺陷存在情形下瓷冠下表面的第1主应力分布

Fig.4 Distributions of the first principle stress at lower surface of the crown under different debonding states and interfacial defects (a) Stage 1, (b) Stage 2, (c) Stage 3, (d) Stage 4, (e) Stage 5, (f) Stage 6, (g) Stage 7, (e) Case I, (i) Case II

此外,对于粘结剂,在单调载荷短暂作用下可以忽略其黏塑性作用,计算结果仍以第1主应力表征。由于粘结剂下表面的应力处于安全状态,本文只分析粘结剂上表面的第1主应力(见图5)。不论是脱粘还是缺陷的存在,高应力区都只出现在脱粘和缺陷的边界区域,相对于瓷冠的应力分布比较集中。并且,除状态1外,状态2~7以及情况I、II中的最大拉应力都超过了粘结剂的极限抗拉强度(127 MPa)<sup>[14]</sup>,表明胶层会发生内聚破坏。

### 3 讨论

根据瓷冠内表面的应力分布可以发现,瓷冠内壁的粘结完整,在维持瓷冠整体应力水平处于较低状态方面有重要作用。随着脱胶区域的不断扩展,脱胶区域的应力也在逐渐增大。为比较不同脱胶状态及粘结缺陷存在情形下瓷冠内表面的整体应力水平,并且考虑到引起瓷冠破坏的应力为拉应力而非压应力,可以通过计算瓷冠内表面的平均主拉应力 $\bar{\sigma}$ (简称为平均应力)来反映整体的应力水平:

$$\sigma_i = \begin{cases} \sigma_i, & \sigma_i > 0 \\ 0, & \sigma_i \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

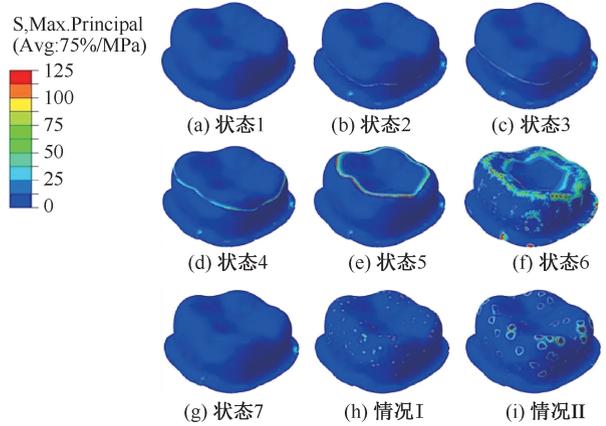


图5 不同脱胶状态及粘结缺陷存在的情形下粘接剂表面第1主应力分布

Fig.5 Distributions of the first principle stress at surface of the cement under different debonding states and interfacial defects (a) Stage 1, (b) Stage 2, (c) Stage 3, (d) Stage 4, (e) Stage 5, (f) Stage 6, (g) Stage 7, (e) Case I, (i) Case II

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2)$$

式中: $i$ 表示瓷冠内表面第 $i$ 个单元; $\sigma_i$ 为瓷冠内表面第 $i$ 个单元中高斯积分点处的第1主应力; $A_i$ 表示瓷冠内表面第 $i$ 个单元所占的面积; $N$ 表示瓷冠下表面所含单元总数。

在本文的有限元模拟中,将粘结剂脱粘和界面缺陷都简化为瓷冠与粘结剂的理想分离状态,只是分布形式有所不同。为比较各状态下整体应力水平的相对大小,统计瓷冠与粘结剂粘结界面的分离百分比,并根据式(1)、(2)得到各状态下瓷冠内表面的平均主拉应力[见图6(a)]。在内壁粘结良好的状态下(状态1),瓷冠内表面的平均主拉应力处于最低水平。而在粘结界面的缺陷存在的情况下,内壁仍旧粘结较良好,平均应力未发生太大变化。随着脱粘面积逐渐扩大(状态2~5),平均应力也在逐渐增加。而在内壁完全脱粘后(状态5),平均应力基本达到最大,为状态1下的2倍。由此可以看出,内壁在维持瓷冠内部整体应力水平处于较低状态方面作用显著。根据疲劳理论可知,平均应力水平越低,越有利于结构的耐久性<sup>[15]</sup>,故内壁的粘结完整性对于瓷冠的耐久性有重要作用。

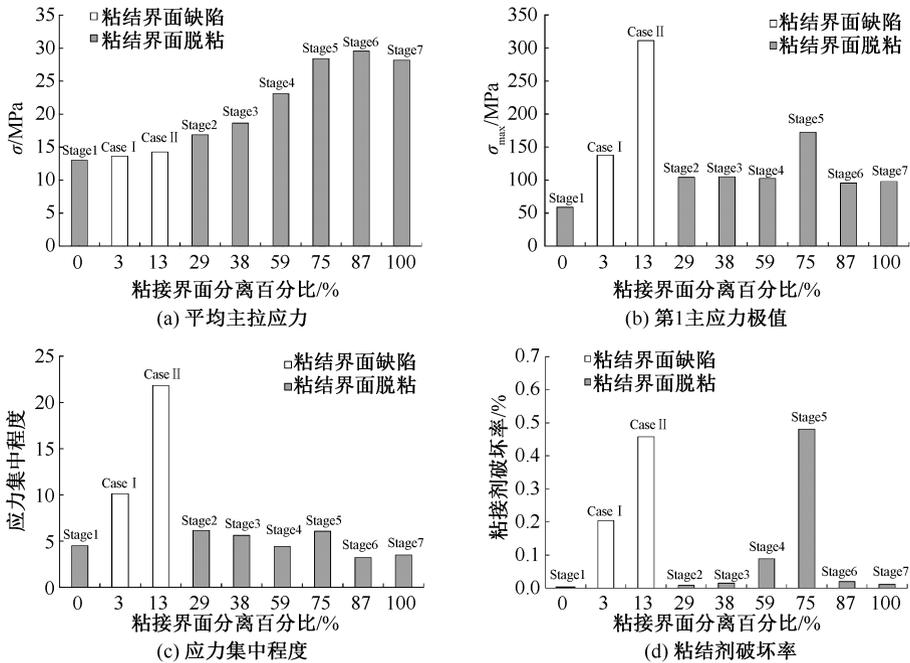


图6 界面脱粘率诱导的各种应力值比较

Fig.6 Comparison of various stresses induced by interfacial debonding rate (a) The average of principal tensile stress, (b) The maximum of the first principal stress, (c) The degree of stress concentration, (d) Damage percentage within the cement layer

为比较各状态下第1主应力极值的相对大小,统计瓷冠与粘结剂粘接界面分离百分比以及对应的瓷冠内表面第1主应力极值[见图6(b)].在瓷冠与粘结剂粘结良好的状态下(状态1),瓷冠内表面的第1主应力极值约为60 MPa。随着脱胶面积逐渐增大,第1主应力极值并没有呈现单调增加的趋势,除状态5增加到175 MPa,状态2、3、4、6、7的应力极值都稳定在100 MPa。该结果说明,单纯的脱粘面积增大并不会对瓷冠内表面的第1主应力极值产生明显影响,即脱粘面积的增大并不会造成瓷冠的承载能力的明显下降。在状态5中应力极值较其他脱粘状态发生突变,并且脱粘边界处于瓷冠咬合区与内壁的过渡区,说明过渡区是瓷冠承受外力的关键区域,亦即在水环境老化作用下,随着脱粘区域不断扩展,瓷冠最有可能在过渡区发生破坏。而在粘接界面存在缺陷的情况下,虽然分离百分比在情况I中只有3%,但第1主应力极值却接近150 MPa。即使对于情况II,其粘接界面分离比达到了13%,也没有达到状态2的50%,但其第1主应力极值却达到320 MPa,是状态2的3倍左右。

该结果说明界面缺陷存在的情况对瓷冠内表面第1主应力极值的影响比界面脱粘对应力极值的影响更加显著。相对于单纯的界面脱粘,界面缺陷对瓷冠承载能力削弱的影响更大。若用 $K_I = \sigma_{\max} / \bar{\sigma}$ 来衡量瓷冠内表面的应力集中程度,由图6(c)可以看出,粘结缺陷造成的应力集中程度大于所有的界面脱粘状态,故应力分布不均是瓷冠承载力下降的一个重要因素。此外,虽然缺陷的分布遍布整个界面,但界面缺陷造成的高应力区只出现在过渡区(见图5),同样说明过渡区是承受竖向咬合力的关键区域。Thompson等<sup>[16]</sup>报道了界面缺陷被认为是引起瓷冠失效的一个主要因素,与本文所得结果一致。Marquis等<sup>[17]</sup>研究认为,树脂粘结剂可能会较好地填充瓷冠表面的孔洞以及微裂隙,起到减少缺陷的作用。Kenneth等<sup>[18]</sup>也报道了相比于玻璃离子粘结剂,用树脂粘结剂粘结的酸蚀玻璃陶瓷冠有更高的存活率。因此,避免界面粘结缺陷对于提高瓷冠的强度及耐久性有关键性作用。根据本文结果,对于粘结剂的选择,即使使用的粘结剂粘结强度很高,如果不能很好地避免界面缺陷的引入,瓷冠

的承载力也会受到很大影响。相反,如果使用的粘结剂粘结强度略差,但若能很好地避免粘结缺陷的引入,瓷冠的承载力反而能有比较小的影响。

另外,由粘结剂的应力结果发现,粘结剂上表面的应力超过了粘结剂的极限抗拉强度<sup>[14]</sup>,即粘结剂会发生内聚破坏(见图5)。因此,本文统计了粘结剂在不同状态下的破坏率,即超过极限抗拉强度的区域面积与粘结剂上表面总面积的比率[见图6(d)]。可以看出,粘结剂破坏率的趋势与上述瓷冠第1主应力极值的趋势类似,在情况I、II和状态5中粘结剂的破坏率明显较高。

本文的局限性如下:①根据Duan等<sup>[19]</sup>的研究结论,全瓷冠修复体内部的最大拉应力不仅与竖向的咬合载荷有关,更与水平向的咀嚼载荷有关。在竖向向咬合载荷存在的情况下,水平向载荷的引入会引起最大拉应力进一步增加。因此,本文施加模型边界条件时,仅考虑竖向的咬合载荷,这是对口腔复杂咀嚼环境的一种保守简化。②虽然考虑了在水环境下瓷冠与粘剂老化脱粘的不同状态,但只考虑了水环境造成粘结强度的降低而未考虑其他影响。根据Lu等<sup>[7]</sup>的研究结果,水环境会造成粘结剂的粘结强度和弹性模量降低两方面的影响,但粘结剂弹性模量的降低对瓷冠内部的应力影响很小,故只考虑水环境造成的粘结强度降低。③只考虑瓷冠与粘结剂的界面脱粘与界面缺陷,而未考虑牙本质基质与粘结剂的界面。考虑到实际临床情况,牙本质与粘结剂的粘结界面受到的影响因素很多,例如继发龋、牙小管渗水、年龄增长等不可控因素对牙本质的影响<sup>[20-21]</sup>。本文忽略上述不可控因素,将牙本质基质与粘结剂界面保守地简化为良好粘结状态。而对于瓷冠与粘结剂的界面,一般只会受到肩台处吸水以及瓷冠制造和粘结过程中引入缺陷等人为因素的影响,故研究瓷冠与粘结剂界面更具有实际意义。

## 4 结论

本文研究结果如下:①瓷冠内壁的粘结完整在维持瓷冠内表面整体应力水平处于较低状态和维持瓷冠耐久性方面有重要作用;②瓷冠内表面咬合区与内壁的过渡区是承受外力的关键区域,瓷冠在界面脱粘或者缺陷存在的情况下最有可能在过渡

区发生破坏;③相对于界面脱粘,界面缺陷对瓷冠的承载能力影响更为显著,应力分布不均造成瓷冠承载力下降的一个主要因素。为使全瓷冠修复体的承载能力不受到损失,相比选择粘结强度更好的粘结剂,口腔修复临床实践中应该更加注意尽量避免粘结缺陷的引入。

## 参考文献:

- [1] YU W, GUO K, ZHANG B, *et al.* Fracture resistance of endodontically treated premolars restored with lithium disilicate CAD/CAM crowns or onlays and luted with two luting agents [J]. *Dent Mater J*, 2014, 33(3): 349-354.
- [2] SULAIMAN TA, ABDULMAJEED AA, SHAHRAMIAN K, *et al.* Effect of different treatments on the flexural strength of fully versus partially stabilized monolithic zirconia [J]. *J Prosthet Dent*, 2017, 118(2): 216-220.
- [3] AI-KHALI M, CHAAR MS, ELSAYED A, *et al.* Fracture resistance of ceramic and polymer-based occlusal veneer restorations [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2017, 74(3): 245-250.
- [4] JIAN Y, HE ZH, DAO L, *et al.* Three-dimensional characterization and distribution of fabrication defects in bilayered lithium disilicate glass-ceramic molar crowns [J]. *Dent Mater*, 2017, 33(4): e178-e185.
- [5] PAGNIANO RP, SEGHI RR, ROSENSTIEL SF, *et al.* The effect of a layer of resin luting agent on the biaxial flexure strength of two all-ceramic systems [J]. *J Prosthet Dent*, 2005, 93(5): 459-466.
- [6] HERNADEZ AI, ROONGRUANGPHOL T, KATSUBE N, *et al.* Residual interface tensile strength of ceramic bonded to dentin after cyclic loading and aging [J]. *J Prosthet Dent*, 2008, 99(3): 209-217.
- [7] LU C, WANGR, MAO S, *et al.* Reduction of load-bearing capacity of all-ceramic crowns due to cement aging [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2013, 17(1): 56-65.
- [8] ZOGHEIB LV, BONA AD, KIMPAPA ET, *et al.* Effect of hydrofluoric acid etching duration on the roughness and flexural strength of a lithium disilicate-based glass ceramic [J]. *Braz Dent J*, 2011, 22(1): 45-50.
- [9] 刘斌, 鲁成林, 张修银, 等. 黏接剂厚度对 IPS Empress II 全瓷冠应力的影响分析 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(1): 56-62.
- [10] LIU B, LU CL, ZHANG XY, *et al.* Effects of adhesive thickness on internal stress distribution in full-ceramic crowns [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(1): 56-62.
- [10] 吕越, 徐侃, 王立强, 等. 植体弹性模量变化对牙种植体和骨组织应力分布的影响 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(4):

- 331-335.
- LV Y, XU K, WANG LQ, *et al.* The influence of implant elastic modulus on stress distributions in implant and peri-implant bone [J], 2017, 32(4): 331-335.
- [11] CARVALHO MA, SOTTO-MAIOR BS, CURY AA DB. Effect of platform connection and abutment material on stress distribution in single anterior implant-supported restorations: A nonlinear 3-dimensional finite element analysis [J]. *J Prosthet Dent*, 2014, 112(5): 1096-1102.
- [12] EMAMI N, Söderholm KJ, BERGLUND LA. Effect of light power density variations on bulk curing properties of dental composites [J]. *J Dent*, 2003, 31(3): 189-196.
- [13] KANG SH, CHANG J, SON HH. Flexural strength and microstructure of two lithium disilicate glass ceramics for CAD/CAM restoration in the dental clinic [J]. *Restor Dent Endod*, 2013, 38(3): 134-140.
- [14] AGUIAR TR, DE OM, ARRAIS CA, *et al.* The effect of photopolymerization on the degree of conversion, polymerization kinetic, biaxial flexure strength, and modulus of self-adhesive resin cements [J]. *J Prosthet Dent*, 2014, 113(2): 128-134.
- [15] SCHIJVE J. *Fatigue of structures and materials*. New York; Springer, 2008.
- [16] THOMPSON JY, ANUSAVICE KJ, NAMAN A, *et al.* Fracture surface characterization of clinically failed all-ceramic crowns [J]. *J Dent Res*, 1994, 73(12): 1824-1832.
- [17] MARQUIS P. The influence of cements on the mechanical performance of dental ceramics [J]. *Bioceram*, 1992, 5(5): 317-324.
- [18] MALAMENT KA, SOCRANSKY SS. Survival of Dicor glass-ceramic dental restorations over 16 years. Part III: Effect of luting agent and tooth or tooth-substitute core structure [J]. *J Prosthet Dent*, 2001, 86(5): 511-519.
- [19] DUAN Y, GRIGGS JA. Effect of elasticity on stress distribution in CAD/CAM dental crowns: Glass ceramic vs. polymer-matrix composite [J]. *J Dent*, 2015, 43(6): 742-749.
- [20] MAY LG, KELLY JR, BOTTINO MA, *et al.* Effects of cement thickness and bonding on the failure loads of CAD/CAM ceramic crowns: Multi-physics FEA modeling and monotonic testing [J]. *Dent Mater*, 2012, 28(8): 99-109.
- [21] 徐远志, 杨启祥, 汪饶饶, 等. 年龄与位置对牙本质力学性质的影响[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(6): 519-523.
- XU YZ, HYANG QX, WANG RR, *et al.* Effects of aging and location on mechanical properties of human dentin [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(6): 519-523.