

有限元分析在髓腔固位冠修复中的应用进展

曹友辉¹ 包雪梅^{1,2}

1. 内蒙古医科大学口腔医学院 呼和浩特 010059;

2. 内蒙古医科大学附属医院口腔科 呼和浩特 010050

[摘要] 随着粘接材料的更新升级、牙髓根治技术的长足进步及修复制作工艺的飞速发展,对于牙龈距离短、剩余牙体组织少、根管治疗后死髓磨牙的保存呈现了美好前景。保存天然牙、残冠继续行使功能使得髓腔固位冠的修复理念得到临床医生的接受与认可。利用有限元法进行应力分析具有高效、精确、可重复等优点。本文就有限元法在髓腔固位冠修复中的应力研究应用进行综述,探讨髓腔固位冠修复中的注意事项。

[关键词] 有限元分析法; 髓腔固位冠; 陶瓷

[中图分类号] R783.3 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2024051



开放科学(资源服务)
标识码(OSID)

Application progress on finite element analysis in endocrown restoration

Cao Youhui¹, Bao Xuemei^{1,2}

1. School of Stomatology, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010059, China; 2. Dept. of Stomatology, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010050, China

Supported by: Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (2019LH08012)

Correspondence: Bao Xuemei, Email: bxm1979@126.com

[Abstract] The preservation of low occlusal-gingival distance, few residual dental tissues, and dead pulp molar after root canal treatment has good prospects given the updating and upgrading of adhesive materials, the rapid progress of radical pulp technology, and the rapid development of restorative production technology. The preservation of natural teeth and the continuation of residual crown function have made the repairing concept of endocrown accepted and recognized by clinicians. Stress analysis using finite element method has the advantages of being efficient, accurate, and reproducible. This paper reviews the application of finite element method in endocrown repair and discusses precautions in endocrown repair.

[Key words] finite element analysis; endocrown; ceramic

三维有限元分析法(three-dimensional finite element method)是现代一种迅速发展的应用计算机技术的理论力学的分析计算方法,其将连续弹性体分为多组单元,通过分析各单元的力学性能,得到整个连续弹性体的力学性质^[1]。近年,有限元分析法在口腔生物力学领域得到了广泛的应用。

作为一种冠部牙体缺损的修复方式,髓腔固位冠(endocrown)在国内教科书内尚无明确定义,其固位原理为修复体嵌入髓腔内获得宏观机械固位和修复体与牙体组织之间较大的粘接面积获得的微机械固位^[2]。髓腔固位冠主要用于冠部牙体组织缺损较大、临床牙冠短且做过根管治疗的患牙,尤其是牙龈间隙小无法进行传统冠修复的患牙^[3]。髓腔固位冠的应用保留了患者的天然牙,使得天然牙可以继续行使功能,为患者提供了一种有效的修复方式。

本文主要介绍有限元分析法在髓腔固位冠修复中的应力研究中的应用。

[收稿日期] 2023-06-23; **[修回日期]** 2023-10-26

[基金项目] 内蒙古自治区自然科学基金(2019LH08012)

[作者简介] 曹友辉, 医师, 硕士, Email: caoyouhui1023@163.com

[通信作者] 包雪梅, 主任医师, 硕士, Email: bxm1979@126.com

1 不同髓腔固位冠制作材料的有限元应力分析

1.1 冠部修复材料的有限元应力分析

髓腔固位冠的修复材料主要为陶瓷，比如长石质瓷 (feldspathic ceramic, Mark2) 和二硅酸锂陶瓷 (lithium disilicate ceramic, EMAX) 等。增强的可酸蚀陶瓷是髓腔固位冠的首选材料，因为其可以提供足够的机械强度来承受咬合负荷，并与牙齿有适当的粘接强度^[4-5]。

近些年，随着计算机辅助设计和计算机辅助制造 (computer aided design and computer aided manufacturing, CAD/CAM) 技术的广泛应用和不断提升，一系列新型复合瓷材料已被研制出来，比如树脂纳米瓷 (resin nanoceramic, RNC)、聚合物渗透硅酸陶瓷 (polymer-infiltrated silicate ceramic) 等^[2]。二硅酸锂增强的CAD/CAM陶瓷材料 (IPS e.max CAD) 是最常见的修复材料之一，用于单冠和髓腔固位冠，长期的临床成功率较高^[6]。林捷等^[7]利用有限元方法分析4种不同修复材料和4种胎面空间厚度 (1、2、3、4 mm) 对髓腔固位冠修复根管治疗后下颌第一磨牙应力分布的影响，结果发现：随着髓腔固位冠弹性模量的增加，修复体应力逐渐上升，牙体应力逐渐下降。这一研究结果与高琳等^[8]的研究结果一致，修复体材料杨氏模量越高，剩余牙体组织应力越集中。He等^[9]通过研究不同类型的修复材料和树脂粘接剂对根管治疗后牙本质冠修复体区、粘接层和剩余牙体组织应力分布，结果发现：弹性模量越高的陶瓷材料IPS e.max CAD对粘接层和剩余釉质组织的保护作用越明显。Meng等^[10]采用有限元方法分析了3种CAD/CAM口腔修复材料在5种载荷作用下冠厚度为1 mm时的应力分布，结果发现：当载荷大小相同时，Lava Ultimate (LU) 所制作的髓腔固位冠向牙齿组织传递的应力比Mark2和EMAX都要大。各项研究表明：IPS e.max CAD相较于其他材料，可以减小牙体组织应力，从而保护剩余牙体组织，即使修复体出现破损或脱落，也可为二次修复提供可能。Tribst等^[11]利用有限元分析的方法评估“剩余牙体组织量”和“修复材料类型”对髓腔固位冠修复的生物力学行为的影响，结果发现：二硅酸锂微晶玻璃陶瓷比白榴石增强微晶玻璃陶瓷 (leucite-reinforced glass-ceramic) 具有更大的应力集中；由于白榴石表现出更好的生物力

学行为，其可能成为一种很有前途的二硅酸锂制作髓腔固位冠的替代品。

髓腔固位冠采用牙体弹性模量相接近的材料可以更好地保护剩余牙体组织和修复体。Ural等^[12]利用体外和有限元分析研究不同的预备设计和修复材料对髓腔固位冠修复的生物力学影响，结果发现：弹性模量较低的材料在牙本质上的应力分布较为均匀，但弹性模量较高的材料对牙本质组织的应力传递也较小。

Zheng等^[13]通过三维有限元分析、Weibull分析和体外分析评价CAD/CAM材料对磨牙髓腔固位冠生物力学行为的影响，结果发现：髓腔固位冠采用复合树脂时，应力分布更均匀，抗折能力更强。Zheng等^[14]利用有限元分析法评估边缘设计和材料类型对恢复根管治疗后的牙体组织进行髓腔固位冠修复的生物力学影响，结果发现：与牙本质弹性模量值更接近的复合树脂Grandio blocs (GR) 和VisCalor bulk (VC) 具有更均匀的应力分布，是一种很有前途的髓腔固位冠的修复材料。研究表明：复合树脂为髓腔固位冠提供了更均匀的应力分布，可减少应力集中，保护修复体和牙体组织，但是对于复合树脂应用于髓腔固位冠的研究相对较少，仍需大量研究证实复合树脂应用于髓腔固位冠的可靠性。

随着材料学的不断发展，有些学者开始研究髓腔固位冠不使用单一材料来修复牙体缺损，将修复体分为两部分，即修复体咬合面部分与髓腔固位部分采用不同材料。

Shams等^[15]通过有限元和体外分析，比较不同载荷类型 (轴向载荷和斜向载荷) 下，使用聚醚醚酮 (polyetheretherketone, PEEK) 贴面覆盖IPS e.max CAD的新型髓腔固位冠系统修复的上颌第一前磨牙的生物力学行为，结果发现：无论施加的载荷类型有什么不同，新型髓腔固位冠系统改善了严重破坏的上颌第一前磨牙修复后的牙齿-修复复合体内的生物力学行为。Köseoğlu等^[16]研究不同厚度的PEEK基底 (1、1.5、2 mm) 和间接复合树脂贴面 (2、1.5、1 mm) 材料对上颌前磨牙髓腔固位冠应力分布的影响，结果发现：不同厚度的间接复合树脂和PEEK材料对釉质和牙本质中的等效应力值及其分布没有影响；但是，在PEEK底层结构为2 mm，间接贴面复合树脂厚度为1 mm的试验组中，修复材料的等效应力值最低 (表1)。

表 1 髓腔固位冠修复材料有限元应力分析研究

Tab 1 Finite element stress analysis study of endocrown repair material

作者	年份/年	研究类型	牙位	材料	结论
林捷等	2021	实验性	下颌第一磨牙	Lava Ultimate (3M公司, 美国)、Vita Enamic (VE; Vita公司, 德国)、IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent公司, 列支敦士登)、Cercon (Dentsply公司, 美国)	随着髓腔固位冠弹性模量的增加, 修复体应力逐渐上升, 牙体应力逐渐下降
高琳等	2022	实验性	下颌第二磨牙	IPS e.max CAD、IPS Empress and Zirconia	修复体材料杨氏模量越高, 剩余牙体组织应力越集中
He等	2021	实验性	下颌磨牙	Vita Enamic (VITA公司, 德国)、IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent公司, 列支敦士登)、Grandio Blocs (VOCO公司, 德国)	弹性模量越高的陶瓷材料IPS e.max CAD对黏固层和剩余釉质组织的保护作用越明显
Meng等	2021	实验性	下颌磨牙	feldspathic、lithium disilicate、Lava Ultimate	当载荷大小相同时, Lava Ultimate所制作的髓腔固位冠向牙齿组织传递的应力比feldspathic和lithium disilicate大
Tribst等	2018	实验性	上颌磨牙	IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent公司, 列支敦士登)、IPS Empress CAD (Ivoclar Vivadent公司, 列支敦士登)	由于白榴石表现出更好的生物力学行为, 可能成为一种很有前途的二硅酸锂制作髓腔固位冠的替代品
Ural等	2021	实验性	下颌第一磨牙	GC Cerasmart (GC Corp公司, 日本)、Lava Ultimate (3M ESPE公司, 美国)、Vita Enamic (Vita Zahnfabrik公司, 德国)	弹性模量较低的材料在牙本质上的应力分布较为均匀, 但弹性模量较高的材料对牙本质组织的应力传递也较小
Zheng等	2021	实验性	下颌第一磨牙	Vita Suprinity (VS; Vita Zahnfabrik公司, 德国)、IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent AG公司, 列支敦士登)、Vita Enamic (VITA Zahnfabrik公司, 德国)、Lava Ultimate (3M ESPE公司, 美国)、Grandio blocs (VOCO公司, 德国)	髓腔固位冠采用复合树脂时, 应力分布更均匀, 抗折能力更强。用GR制作的髓腔固位冠具有最好的整体应力分布, 满足大面积咬合区域的力学要求
Zheng等	2022	实验性	下颌第一磨牙	In-Ceram Zirconia (Vita Zahnfabrik公司, 德国)、Vita Suprinity (Vita Zahnfabrik公司, 德国)、IPS Empress (Ivoclar Vivadent AG公司, 列支敦士登)、Grandio blocs (VOCO公司, 德国)、VisCalor bulk (VOCO公司, 德国)、CupraPeek Light (CP; Whitepeaks公司, 德国)	复合树脂GR和VC具有更均匀的应力分布, 是一种很有前途的髓腔固位冠的修复材料

1.2 垫底材料的有限元应力分析

髓腔固位冠是否需要垫底以及垫底材料的选择尚无定论。目前, 根管治疗后髓腔固位冠的垫底材料主要有流动树脂和玻璃离子。姜又升等^[17]发现: 垫底材料选取与牙本质弹性模量相接近的复合树脂类材料, 同时进行适宜厚度的粘接垫底, 可以更好地缓解髓腔固位冠修复后牙颈部和粘接层的应力集中, 进而保护牙体组织和粘接层。

垫底材料的厚度可以影响到髓腔固位冠向髓腔内延伸的深度, 垫底材料越厚, 则髓腔固位冠延伸越短, 可减少固位力, 但可以保护颈部牙本质。冯娟等^[18]利用三维有限元法模拟下颌第一磨牙嵌体冠和不同的玻璃离子的厚度 (0、1、2、5 mm), 观察剩余牙体组织应力分布情况, 结果发现: 垫底材料可以起到缓冲作用, 垫底材料较薄的时候, 剩余牙体和嵌体冠相对更稳定。Cheng等^[19]利用三维有限元法分析不同垫底材料及厚度 (0、1、2、3 mm) 的修复体和牙体组织的应力分

布, 结果发现: 当垫底厚度为1 mm时, 前磨牙的总应力相对较小, 但是不同种类的垫底材料对修复体和牙体组织的应力无明显影响, 建议使用弹性模量较小且与牙体组织接近的材料。同样, 张英等^[20]利用三维有限元分析法, 研究下颌第一磨牙不同垫底厚度 (1、3、5 mm) 对修复体和剩余牙体组织的影响, 结果发现: 当垫底材料的厚度增加时, 剩余牙体组织应力更加容易集中。

垫底材料可以选用与牙体组织弹性模量相近且具有弹性的材料, 比如复合树脂类材料。为减小牙体颈部应力同时要保证修复效果, 可用树脂做1 mm厚度的垫底。垫底厚度为1 mm时, 对剩余牙体及粘接层的保护效果最佳, 较薄的垫底厚度有利于髓腔固位冠和牙体的长期稳定^[18]。

1.3 粘接剂的有限元应力分析

粘接固位是髓腔固位冠的重要固位方式, 对修复成功与否起着至关重要的作用。临床上, 修复体粘接剂主要使用有聚羧酸水门汀、玻璃离子

水门汀和树脂类水门汀等，而陶瓷髓腔固位冠常用的粘接剂为树脂粘接剂^[21]。He等^[9]发现：弹性模量越大的粘接剂，粘接层内部应力峰值越大。粘接剂的粘接效果也与牙体缺损大小有关，髓室壁缺损较多，粘接面积则会相应减少，从而影响修复结果。李建宾等^[22]利用三维有限元法研究髓腔固位冠修复不同形态髓腔壁缺损下颌第一前磨牙的牙体组织与修复体所受应力，结果发现：髓腔壁的缺损使粘接层应力明显增加。对于粘接剂的选择仍需大量的研究来证实何种粘接剂更适合髓腔固位冠修复，以确保修复效果长期稳定。

2 髓腔固位冠设计形式的有限元应力分析

髓腔固位冠的设计取决于牙齿的病变程度、垂直咬合高度和临床牙冠长度，因此在选择和设计髓腔固位冠时，考虑的因素较多，做出合理的设计形式尤为重要。

2.1 殆面厚度的有限元应力分析

吴帆等^[23]采用有限元法分析髓腔固位冠修复后的修复体和牙体组织应力分布，结果表明：当邻面高度减小时，修复体以及剩余牙体组织的等效应力峰值均不断增大。为保护牙体组织，在牙体预备过程中应尽量保存牙体组织，同时也减少了修复体的应力。预备设计影响长期成功的可能性，即使剩余颊侧壁的存在可以增加断裂强度，但大多数情况下会导致修复失败^[12]。

髓腔固位冠的咬合面越厚，则需要磨除的牙体组织就越多，虽然修复体的抗力会不断增加，但是剩余牙体组织的抗力在不断减少。既要保护剩余牙体组织，又要防止修复体折裂，髓腔固位冠咬合面的厚度设计尤为重要。林捷等^[7]发现：相同材料下，当冠的厚度增加时，髓腔固位冠的应力呈现下降趋势。设计合适的殆面厚度对于修复的成功尤为重要。Zhang等^[24]研究修复体在髓腔延伸深度（1、2、3 mm）和咬合面厚度（1、2、3 mm）对磨牙髓腔固位冠应力分布的影响，结果发现：与其他类型的有限元分析模型相比，无论加载方向如何，在修复体和牙体组织的应力分布综合分析，咬合面厚度为2 mm、牙髓室延伸深度为2 mm的髓腔固位冠组模型比其他组更加适合EMAX髓腔固位冠修复牙体缺损。修复体殆面厚度为2 mm时，可缓解剩余牙体组织的应力集中^[8]。

为确保髓腔固位冠具有足够的抗力形，应确

保咬合面厚度足够，防止修复体受到过大的殆力导致破裂，最终引起修复失败。修复体殆面应根据不同的材料以及牙体缺损程度，选择合适的厚度。有研究^[25]表明：4 mm的二硅酸锂修复体抗折力与2 mm的氧化锆修复体抗折力结果类似。

2.2 固位设计的有限元应力分析

Dartora等^[26]利用三维有限元法分析各组髓腔固位冠向髓腔内部延伸深度（1、3、5 mm）的应力分布情况及离体牙实验，结果表明：髓室延伸深度越深，可获得更好的固位力和机械性能。康婷等^[27]利用有限元法分析不同修复方式修复上颌第一前磨牙应力，结果发现：当髓腔固位冠采用同种材料不同深度的修复设计时，4 mm深度的髓腔固位冠修复应力较小。此外，Zhu等^[28]采用有限元分析法研究了基牙中心固位体形状和外展角对牙本质层和黏固层应力分布的影响，建议在选择髓腔固位冠修复经根管治疗的磨牙时，中心固位体的形状应根据牙髓室的解剖形状来设计；从力学的角度来看，牙齿预备的外展角度不会影响下颌磨牙的髓腔固位冠的修复效果。但是Tribst等^[29]构建上颌磨牙模型分析不同的髓腔固位冠髓腔部分制备角度（直角、6°、12°和18°）和不同的垫底材料对陶瓷髓腔固位冠生物力学行为的影响，建议髓腔固位冠髓室内部分轴壁应制备成6°或12°，可以起到平衡修复体粘接界面中应力的作用。修复体深度越深，修复体抗力形和固位形增加的同时牙体颈部应力也会随之增加，为确保修复体和牙体组织不被破坏，可将修复体固位深度设计成为4 mm，形状可根据髓室解剖形态设计，避免出现倒凹。上颌短冠磨牙采用CAD/CAM技术制作的氧化锆髓腔固位冠修复时，髓腔预备深度为3和4 mm均能满足临床抗折强度的要求，但不宜超过4 mm^[30]。

Gong等^[31]参考桩核冠技术，利用有限元法分析一种固位部分向根管内延伸2 mm的改进的髓腔固位冠（modified endocrown, MED）设计，经过有限元应力分析发现改进的髓腔固位冠修复下颌磨牙是一种有效的修复方法，但需根据牙体预备方法和牙体结构的缺陷选择合适的修复材料。Gulec等^[32]通过有限元和Weibull分析来评估2种不同的髓腔固位冠设计和可用于CAD/CAM系统的不同材料对缺失腭尖的上颌第一前磨牙的应力分布和失败概率的影响，结果发现：相较于常规的髓腔固位冠，改良的根内延伸式髓腔固位冠可以更好地保护剩余的牙齿结构。Aldesoki等^[33]评价不同设计

的二硅酸锂髓腔固位冠修复上颌前磨牙的生物力学行为表明:与延伸入根管内5 mm的髓腔固位冠相比,延伸入根管内3 mm的修复体上产生的等效应力降低了15%。目前,延伸进根内的髓腔固位冠的研究较少,仍需大量研究来证实其有效性。

2.3 修复体边缘设计的有限元应力分析

髓腔固位冠边缘可根据临床实际情况设计成对接式、凹槽式、包绕轴面式^[3]。Zhang等^[24]发现:曲面对接线和平面对接线的应力分布相似。王慧媛等^[34]建立2种不同边缘设计(对接边缘和90°边缘)的下颌第一磨牙髓腔固位冠模型,分析修复后的生物力学影响,结果发现:对接式边缘在保护釉质和改善修复体应力方面更加具有优势。这与郭靖等^[35]的研究结果一致,平面对接式边缘、直角肩台、凹面形边缘以及135°肩台,在牙颈部应力依次增大。Zheng等^[14]则发现:当斜面边缘为20°时,牙本质应力降低,更加适合髓腔固位冠。相较于其他对接形式,平面对接式边缘既可以保留更多牙体组织,又减少牙颈部应力,当牙体组织缺损少时可以考虑选用(图1)。

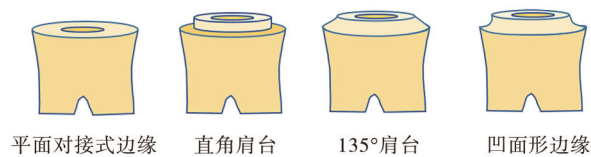


图1 髓腔固位冠边缘形式

Fig 1 Marginal form of endocrown

有研究^[4]发现:颈部箍设计可以提供更好的抗折性能,并使髓腔固位冠修复的牙齿出现更少的失败。有学者利用三维有限元法分析牙本质肩领和修复材料的影响,对比全冠和髓腔固位冠修复,结果发现:维持最高的牙本质肩领有利于所有结构的力学影响。有学者采用有限元法研究不同轴壁厚度和高度的髓腔固位冠修复下颌第一磨牙时剩余牙体组织及修复体的应力大小及分布情况,结果发现:髓腔固位冠设计成不同的形式,在承受不同方向的力时,具有不同的效果,平面对接式能够更好地承受垂直向力,而包绕式髓腔固位冠更有利于承受侧向力。在一定程度上,颈部箍效应可以保护剩余牙体组织。在进行边缘预备时,应根据剩余牙体组织量选择适宜的边缘形式。

3 小结

作为一种快捷、高效的应力分析方法,有限

元分析法为髓腔固位冠生物力学的研究提供了有效的途径,同时也为临床髓腔固位冠的选材和设计提供了生物力学的依据。有限元分析仅能验证短期力学效果,而且尚不能完全模拟口腔内生物学行为,对于髓腔固位冠的长期可靠性还需临床实验证明。在临床研究和体外实验研究中都证实了IPS e.max CAD作为髓腔固位冠修复材料的可靠性。复合树脂髓腔固位的应力分布更加均匀,但还需临床试验证实其长期可靠性。在设计上,还应结合临床牙体缺损程度以及所选择的修复材料,设计合理的髓腔固位冠。为增加髓腔固位冠的抗力形,骀面厚度可根据材料选择设计为2~4 mm,固位体深度可设计为4 mm。边缘可采用平面对接式边缘,为增加固位也可采用直角肩台。目前,在髓腔固位冠设计方面有限元分析研究较少,还需更多研究来为设计提供可靠依据。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

4 参考文献

- [1] 吴倩,张彬,李楠,等.三维有限元分析在口腔医学领域的应用及研究进展[J].世界最新医学信息文摘,2019,19(20):95-96,99.
Wu Q, Zhang B, Li N, et al. The application and research progress of three-dimensional finite element analysis in the field of stomatology[J]. World Latest Med Inf, 2019, 19(20): 95-96, 99.
- [2] 陈智,陈瑞甜.髓腔固位冠[J].口腔医学研究,2018,34(1):1-5.
Chen Z, Chen RT. Endocrown[J]. J Oral Sci Res, 2018, 34(1): 1-5.
- [3] 陈惠,岑蓉,张成飞.髓腔固位冠的应用现状[J].口腔颌面修复学杂志,2022,23(5):321-326.
Chen H, Cen R, Zhang CF. Endocrown: the state of the art[J]. Chin J Prosthodont, 2022, 23(5): 321-326.
- [4] Pedrollo Lise D, van Ende A, De Munck J, et al. Biomechanical behavior of endodontically treated premolars using different preparation designs and CAD/CAM materials[J]. J Dent, 2017, 59: 54-61.
- [5] Zoidis P, Bakiri E, Polyzois G. Using modified polyetheretherketone (PEEK) as an alternative material for endocrown restorations: a short-term clinical report[J]. J Prosthet Dent, 2017, 117(3): 335-339.
- [6] Rocca GT, Daher R, Saratti CM, et al. Restoration

- of severely damaged endodontically treated premolars: the influence of the endo-core length on marginal integrity and fatigue resistance of lithium disilicate CAD-CAM ceramic endocrowns[J]. *J Dent*, 2018, 68: 41-50.
- [7] 林捷, 林珍香, 郑志强. 髓腔固位冠不同修复材料和厚度对应力分布的影响[J]. *口腔疾病防治*, 2021, 29(11): 740-745.
- Lin J, Lin ZX, Zheng ZQ. Effects of the different materials and thicknesses on endocrown stress distribution[J]. *J Prev Treat Stomatol Dis*, 2021, 29(11): 740-745.
- [8] 高琳, 韩祥永, 徐晓明. 不同材料及不同固位深度的髓腔固位冠修复下颌第二磨牙的三维有限元分析[J]. *上海口腔医学*, 2022, 31(6): 621-624.
- Gao L, Han XY, Xu XM. Three-dimensional finite element analysis of three-material endocrown in the restoration of dental defects of mandibular second molars[J]. *Shanghai J Stomatol*, 2022, 31(6): 621-624.
- [9] He JH, Zheng ZT, Wu M, et al. Influence of restorative material and cement on the stress distribution of endocrowns: 3D finite element analysis[J]. *BMC Oral Health*, 2021, 21(1): 495.
- [10] Meng QZ, Zhang YJ, Chi DL, et al. Resistance fracture of minimally prepared endocrowns made by three types of restorative materials: a 3D finite element analysis[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2021, 32(11): 137.
- [11] Tribst JPM, Dal Piva AMO, Madruga CFL, et al. Endocrown restorations: influence of dental remnant and restorative material on stress distribution [J]. *Dent Mater*, 2018, 34(10): 1466-1473.
- [12] Ural Ç, Çağlayan E. A 3-dimensional finite element and *in vitro* analysis of endocrown restorations fabricated with different preparation designs and various restorative materials[J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 126(4): 586.e1-586.e9.
- [13] Zheng ZT, He YY, Ruan WH, et al. Biomechanical behavior of endocrown restorations with different CAD-CAM materials: a 3D finite element and *in vitro* analysis[J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 125(6): 890-899.
- [14] Zheng ZT, Sun JL, Jiang LF, et al. Influence of margin design and restorative material on the stress distribution of endocrowns: a 3D finite element analysis[J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22(1): 30.
- [15] Shams A, Elsherbini M, Elsherbiny AA, et al. Rehabilitation of severely-destructed endodontically treated premolar teeth with novel endocrown system: biomechanical behavior assessment through 3D finite element and *in vitro* analyses[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2022, 126: 105031.
- [16] Köseoğlu M, Furuncuoğlu F. Effect of polyetheretherketone and indirect composite resin thickness on stress distribution in maxillary premolar teeth restored with endocrown: a 3D finite element analysis[J]. *J Biotechnol Strateg Health Res*, 2020, 4(3): 298-305.
- [17] 姜又升, 冯琳, 高学军. 垫底材料弹性模量对髓腔固位冠修复后上颌前磨牙应力分布的影响[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2021, 53(4): 764-769.
- Jiang YS, Feng L, Gao XJ. Influence of base materials on stress distribution in endodontically treated maxillary premolars restored with endocrowns[J]. *J Peking Univ (Health Sci)*, 2021, 53(4): 764-769.
- [18] 冯娟, 郭慧慧, 申晋斌, 等. 磨牙髓室底垫底厚度对全瓷嵌体冠应力分布的影响[J]. *牙体牙髓牙周病学杂志*, 2017, 27(1): 16-21.
- Feng J, Guo HH, Shen JB, et al. Effects of cement thickness on the stress distribution of full-ceramic-endocrown restoration: a finite element analysis[J]. *Chin J Conserv Dent*, 2017, 27(1): 16-21.
- [19] Cheng X, Zhang XY, Qian WH. Influence of different base materials and thicknesses on the fracture resistance of endocrown: a three-dimensional finite element analysis[J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22(1): 363.
- [20] 张英, 熊璟, 李永强, 等. 垫底材料厚度对髓腔固位冠修复后牙体组织应力影响的三维有限元分析[J]. *中国美容医学*, 2019, 28(9): 102-106.
- Zhang Y, Xiong J, Li YQ, et al. Three-dimensional-finite-element comparative research of different cement thickness in endodontically treated mandibular molar restored with endocrown restorations [J]. *Chin J Aesthetic Med*, 2019, 28(9): 102-106.
- [21] 黄绮雯, 马晓晴, 唐亮. 髓腔固位冠的临床应用研究进展[J]. *临床医学研究与实践*, 2022, 7(13): 185-189.

- Huang QW, Ma XQ, Tang L. Research progress in clinical application of endocrown[J]. Clin Res Pract, 2022, 7(13): 185-189.
- [22] 李建宾, 陈维毅, 姚蔚. 髓腔壁缺损对下颌前磨牙髓腔固位冠修复应力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2018, 49(1): 158-163.
- Li JB, Chen WY, Yao W. Influence of cavity wall defect on stress distribution in the mandibular premolar restored with endocrown[J]. J Taiyuan Univ Technol, 2018, 49(1): 158-163.
- [23] 吴帆, 曹谅, 姜晓南, 等. 下颌第一磨牙邻面不同高度缺损髓腔固位冠的生物力学分析[J]. 口腔医学研究, 2018, 34(1): 65-68.
- Wu F, Cao L, Jiang XN, et al. Biomechanical analysis of endocrown of mandibular first molar with different proximal heights[J]. J Oral Sci Res, 2018, 34(1): 65-68.
- [24] Zhang YJ, Lai HB, Meng QZ, et al. The synergetic effect of pulp chamber extension depth and occlusal thickness on stress distribution of molar endocrowns: a 3-dimensional finite element analysis[J]. J Mater Sci Mater Med, 2022, 33(7): 56.
- [25] 林珍香, 潘在兴, 叶起清, 等. 二硅酸锂陶瓷和氧化锆髓腔固位冠的殆面厚度设计对抗折性能的影响[J]. 华西口腔医学杂志, 2020, 38(6): 647-651.
- Lin ZX, Pan ZX, Ye QQ, et al. Effect of occlusal thickness design on the fracture resistance of endocrowns restored with lithium disilicate ceramic and zirconia[J]. West China J Stomatol, 2020, 38(6): 647-651.
- [26] Dartora NR, de Conto Ferreira MB, Moris ICM, et al. Effect of intracoronal depth of teeth restored with endocrowns on fracture resistance: *in vitro* and 3-dimensional finite element analysis[J]. J Endod, 2018, 44(7): 1179-1185.
- [27] 康婷, 石思琼, 赵威, 等. 上颌第一前磨牙舌尖斜形折裂不同修复设计的有限元分析[J]. 口腔医学研究, 2019, 35(10): 953-956.
- Kang T, Shi SQ, Zhao W, et al. Finite element analysis of different designs for maxillary first premolars with lingual cusp oblique defect[J]. J Oral Sci Res, 2019, 35(10): 953-956.
- [28] Zhu JX, Wang DM, Rong QG, et al. Effect of central retainer shape and abduction angle during preparation of teeth on dentin and cement layer stress distributions in endocrown-restored mandibular molars [J]. Dent Mater J, 2020, 39(3): 464-470.
- [29] Tribst JPM, Giudice RL, dos Santos AFC, et al. Lithium disilicate ceramic endocrown biomechanical response according to different pulp chamber extension angles and filling materials[J]. Materials, 2021, 14(5): 1307.
- [30] 粟猛, 屈直. 不同制备形态对短冠磨牙髓腔固位冠抗折性影响的研究[J]. 口腔医学研究, 2021, 37(2): 118-121.
- Su M, Qu Z. Effect of preparation designs on fracture strengths of endocrown of maxillary short coronal molars[J]. J Oral Sci Res, 2021, 37(2): 118-121.
- [31] Gong QM, Huang L, Luo JP, et al. The practicability of different preparation of mandibular molar restored by modified endocrown with intracanal extension: computational analysis using finite element models[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 226: 107178.
- [32] Gulec L, Ulusoy N. Effect of endocrown restorations with different CAD/CAM materials: 3D finite element and weibull analyses[J]. Biomed Res Int, 2017, 2017: 5638683.
- [33] Aldesoki M, Bourauel C, Morsi T, et al. Biomechanical behavior of endodontically treated premolars restored with different endocrown designs: finite element study[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2022, 133: 105309.
- [34] 王慧媛, 付强, 张春光, 等. 边缘形式对大面积缺损第一磨牙髓腔固位冠应力分布的影响[J]. 口腔医学研究, 2015, 31(11): 1121-1124.
- Wang HY, Fu Q, Zhang CG, et al. Research on the biomechanical effects of restoration method on first molar with significant loss of coronal structure[J]. J Oral Sci Res, 2015, 31(11): 1121-1124.
- [35] 郭靖, 王潇宇, 李学盛, 等. 不同边缘设计的髓腔固位冠修复下颌前磨牙的应力分析[J]. 南方医科大学学报, 2016, 36(2): 200-204.
- Guo J, Wang XY, Li XS, et al. Influence of different designs of marginal preparation on stress distribution in the mandibular premolar restored with endocrown[J]. J South Med Univ, 2016, 36(2): 200-204.