

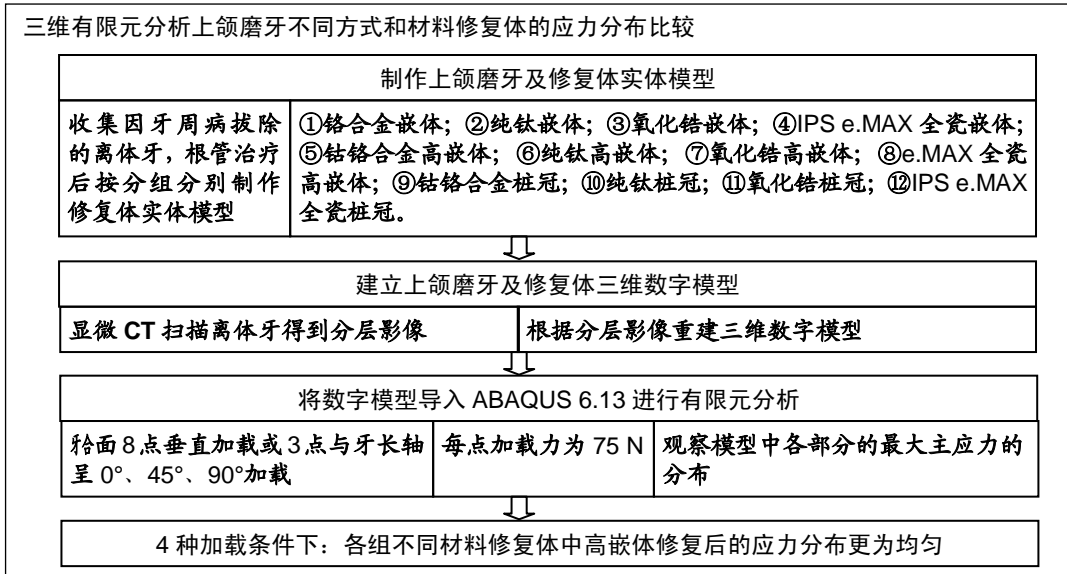
三维有限元分析不同材料不同方法修复离体牙缺损模型的应力分布

冯广智¹, 付宏宇², 马鹏华³ (¹北京市海淀区医院口腔科, 北京市 100080; ²北京大学第一医院口腔科, 北京市 100034; ³北京中日友好医院口腔医学中心, 北京市 100029)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.1557

ORCID: 0000-0001-5125-2169(冯广智)

文章快速阅读:



冯广智, 男, 1979 年生, 河北省抚宁人, 汉族, 2016 年首都医科大学毕业, 硕士, 主治医师, 主要从事生物力学与三维有限元分析研究。

通讯作者: 马鹏华, 主治医师, 北京中日友好医院口腔医学中心, 北京市 100029

文献标识码:A

稿件接受: 2018-10-24



文题释义:

观察应力分布的意义: 从材料力学理论可知, 在材料受到外力作用时, 其各部分均承受大小不同的应力, 并产生相应的形变, 如果形变超过材料极限, 就发生材料屈服, 针对材料而言, 意味着应力越集中的部位, 出现折裂的可能性越大, 因此观察各部位应力值的大小, 是用来判断材料部位出现破坏或磨损的可能性的有效方法。

高嵌体: 是一种由嵌体发展而来的修复方式, 与嵌体的主要区别在于高嵌体覆盖了所有的牙尖, 相比起嵌体减少了由于嵌体和残余牙体组织之间受力不均容易劈裂的可能性, 而且相比起桩冠修复的牙体预备量来说显著减少, 尽可能保留了牙体组织, 符合当前微创修复的理念, 近些年新修复材料的出现, 特别是全瓷材料和高强度粘接剂的应用更加促进了高嵌体修复的发展。

摘要

背景: 如何最大限度地保留根管治疗后的牙体组织, 并能够保证修复后的强度是目前的研究热点。

目的: 使用有限元法分析不同方式修复离体牙缺损模型的应力分布情况。

方法: 收集北京市海淀区医院口腔科因慢性牙周炎无法保留而拔除的上颌第一磨牙 12 颗, 根管治疗后制备离体牙缺损模型, 以钴铬合金、纯钛金属、二氧化锆、E.max 全瓷为修复材料, 每种材料分别进行嵌体、高嵌体、桩核冠 3 种修复方式。通过 Micro CT 扫描上颌第一磨牙修复模型, 使用图像处理软件 Mimics 17.0 及 Geomegic Studio 2013 重建牙体及修复体三维数字模型, 采用有限元分析软件进行力学模拟, 力加载方式设为: 8 点 90°加载、3 点 90°加载、3 点 90°加载、3 点 0°加载。

结果与结论: 在各载荷条件下, 桩核组修复体边缘、预备体肩台、剩余牙本质颈部及桩核中部出现应力集中区; 在各载荷条件下, 嵌体组釉质的加载点出现应力集中区, 并有将应力沿牙釉质传到至颈部的趋势, 嵌体和预备体相对的龈壁和底面及二者移行处也出现应力集中区; 在各载荷条件下, 高嵌体组高嵌体与牙釉质接触处出现应力集中, 预备体龈壁和底面及二者移行处, 以及相对应的高嵌体髓腔内部分也出现应力集中的情况, 但应力分布更为均匀; 结果表明在上颌磨牙大面积缺损的修复方式中, 高嵌体具有适用性和优势性。

关键词:

口腔材料; 高嵌体; 上颌磨牙; 三维有限元; 离体牙缺损模型; 慢性牙周炎; 上颌磨牙大面积缺损

主题词:

嵌入法; 磨牙; 有限元分析; 牙应力分析; 组织工程

中图分类号: R459.9; R318.01

基金资助:

北京市海淀区医院院级青年科研项目(KYQ2015008), 项目负责人: 冯广智

Feng Guangzhi, Master, Attending physician, Department of Stomatology, Beijing Haidian Hospital, Beijing 100080, China

Corresponding author: Ma Penghua, Attending physician, Dental Medical Center, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China

Different materials and different methods for repairing an isolated tooth defect model: a three-dimensional finite element analysis of stress distribution

Feng Guangzhi¹, Fu Hongyu², Ma Penghua³ (¹Department of Stomatology, Beijing Haidian Hospital, Beijing 100080, China; ²Department of Stomatology, Peking University First Hospital, Beijing 100034, China; ³Dental Medical Center, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China)

Abstract

BACKGROUND: Current concerns are on how to maximize the reservation of tooth tissues after root canal treatment and to ensure the strength of the tooth after repair.

OBJECTIVE: To analyze the stress distribution of an isolated tooth defect model after repair with different methods

METHODS: We collected 12 maxillary first molars which had been extracted for chronic periodontitis at the Department of Stomatology, Beijing Haidian Hospital in China. After root canal treatment, the isolated tooth defect model was prepared and repaired with different materials (cobalt-chromium alloy, pure titanium metal, zirconium dioxide, E.max all-ceramic) and using different repair methods (inlay, onlay, post-core crown). First, the model repaired by the corresponding materials and repair methods was scanned by Micro CT. The image processing software Mimics 17.0 and Geomegic Studio 2013 were then used to reconstruct the three-dimensional digital models of the tooth and restoration, and a simplified three-dimensional model of the alveolar bone was created. Finally, the above model data was imported into the finite element analysis software for mechanical simulation (the force was loaded at an angle of 90° at 8, 3, 3 points and at an angle of 0° at 0 point, respectively).

RESULTS AND CONCLUSION: Under different loading conditions, in the post-core crown group, the stress was concentrated in the edge of restoration, the shoulder of the preparation, the neck of the residual dentin, and the middle part of post-core crown in the post-core crown group. In the inlay group, the stress was concentrated in the load point of the enamel, and was transferred along the tooth enamel to the tooth neck; the stress concentration area also included the gingival wall and undersurface and transition site corresponding to the inlays and preparations. In the onlay group, the stress concentration occurred at the contact between the onlay and the enamel, at the gingival wall and undersurface of the preparation, and at the transition site. The stress was also concentrated and distributed evenly in the corresponding pulp cavity of the onlay. To conclude, the onlays have applicability and superiority in the repair of large-area defects of the maxillary molars.

Subject headings: Inlays; Molar; Finite Element Analysis; Dental Stress Analysis; Tissue Engineering

Funding: the Youth Research Project of Beijing Haidian Hospital, No. KYQ2015008 (to FGZ)

0 引言 Introduction

嵌体是一种嵌入牙体内部,修复牙体缺损形态及功能的修复体^[1]。但是嵌体的应用部位在牙体内部,只能对受损的牙体组织进行修复,对外部牙体和没有受损的牙体组织不能起到一定的保护作用。相对于修复体来说,利用嵌体进行牙体修护时并不能为其提供足够的修复空间。高嵌体在进行牙体修复时,可对整个牙齿殆面进行覆盖,对殆面咬合力的恢复有很好效果,且其保护效果更佳^[2-4],目前被广泛地应用于临床治疗。殆力过大、牙根受力不均均是牙根出现纵裂的主要原因^[5]。牙齿发生折裂的概率会在进行根管治疗后有所增加。有研究认为牙齿在进行根管治疗后失去10%的水分,因此比较容易发生折裂。但也有研究表明,根管治疗后的牙齿在微硬度、拉伸强度和弹性模量不存在短时间内发生较大变化的情况,对牙齿的抗折裂性能不会产生较大的影响。有研究认为患牙失去较多的牙体组织,牙齿较易发生折裂^[6-8]。因此作者认为当失去的牙体组织较多时,以及在治疗过程中其物理机械性能发生改变,都会对牙齿强度产生影响,导致牙齿强度降低。

进行完根管治疗后的患牙,需进行适当的修复,以确保其可将治疗效果长期保存。嵌体对于牙体缺损的修复有较为明显的效果,但存在牙体制备要求高且安装操作复杂的状况^[9-10]。由于牙体缺损形式不一,存在很多复杂的状况,又存在很多因素影响修复设计,因此目前如何将根管治疗后的患牙通过适当且合理的修复恢复其功能和美观,同时又能较大程度地保存牙体的抗力,成为研究的重要课题。实验对高嵌体、嵌体及桩核冠3种修复方式进行有限

元研究,通过应力分布对高嵌体应用的可行性进行比较。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 三维有限元分析。

1.2 时间及地点 实验于2015年1月至2016年12月在北京市海淀医院完成。

1.3 材料

实验标本选择: 实验标本来源于北京市海淀医院口腔科因慢性牙周炎无法保留而拔除的上颌第一磨牙,经患者知情并签署同意书后纳入研究。选择解剖形态基本完好的离体牙共12颗,清除多余软硬组织,用体积分数3% H_2O_2 、体积分数75%乙醇和生理盐水分别依次浸泡24 h,待其干燥后使用游标卡尺进行测量:离体牙长19.5-20.2 mm,冠部7.1-7.6 mm,根部12.3-12.7 mm,冠近远中宽度9.7-10.2 mm,冠颊舌宽度11.0-11.6 mm。12颗离体牙间测量指标比较无显著性意义($P > 0.05$),临床外形尺寸无差异,具有可比性。

设备与软件: 个人计算机(CPU英特尔i7处理器,16 G内存,硬盘2 T);显微CT(德国西门子公司);有限元分析软件ABAQUS 6.13(法国达索公司);图像处理软件Mimics17.0(比利时Materialise公司);三维模型重建软件Geomegic Studio 2013(美国Geomegic公司);分析软件SPSS 19.0(美国IBM公司)。

1.4 实验方法

1.4.1 实验分组 按照研究设计分别设计以钴铬合金、纯钛金属、二氧化锆、E.max全瓷为修复材料,每种材料分

别进行嵌体、高嵌体、桩核冠3种修复方式, 见表1。

表 1 离体牙修复模型分组情况

Table 1 Grouping of isolated tooth restoration models

分组编号	修复方式	修复材料	分组编号	修复方式	修复材料
1	嵌体	钴铬合金	7	高嵌体	二氧化锆
2	嵌体	纯钛金属	8	高嵌体	E.max全瓷
3	嵌体	二氧化锆	9	桩核冠	钴铬合金
4	嵌体	E.max全瓷	10	桩核冠	纯钛金属
5	高嵌体	钴铬合金	11	桩核冠	二氧化锆
6	高嵌体	纯钛金属	12	桩核冠	E.max全瓷

1.4.2 离体牙修复模型的制备 使用牙科高速手机将离体牙按照近中、殆面及远中缺损制备模型, 然后进行开髓、低速手机揭髓顶, 按照标准根管治疗流程, 进行开髓、拔髓, 使用手用根管锉进行根管扩大及根管预备, 主尖锉为30#, 螺旋充填器将根充糊剂充分导入, 使用牙胶尖进行根管充填, 使用玻璃离子暂封。

桩核冠组2周后待根充糊剂完全凝固后进行桩核预备, 使用聚醚硅橡胶印模材采取印模, 送义齿加工厂进行桩核的制作; 待铸造桩核制作完成后, 桩核就位黏固, 然后进行标准全冠修复体的牙体预备, 为保证各组模型数据的可比性, 统一按照标准修复体预备要求进行预备: 聚合度约为6°, 全冠肩台宽度为1 mm。使用硅橡胶采取印模, 送义齿加工厂进行全冠的制作。

高嵌体组均匀降低殆面所有牙尖高度2 mm, 嵌体组保持原牙尖高度, 两组修复体预备均按照牙冠颊舌向1/2, 峡部宽度为牙尖间距1/3, 殆面洞深4 mm, 各组预备体点线角圆钝而清晰, 并对其进行充分的抛光, 使用硅橡胶采取印模, 送义齿加工厂进行全高嵌体及嵌体的制作。

待各组修复体制作完成后, 经过调整就位, 但不进行粘接, 完成缺损修复模型的制作。

1.4.3 离体牙的预处理 使用轻质黏土包埋离体牙修复模型, 固定在扫描模具中, 使用显微CT进行离体牙分层扫描, 设定层间距19 μm, 共获得1 253-1 312张分层扫描影像, 以医学数字图像和通讯标准(digital imaging and communications in medicine, DICOM)格式导出影像图像存盘, 见图1。

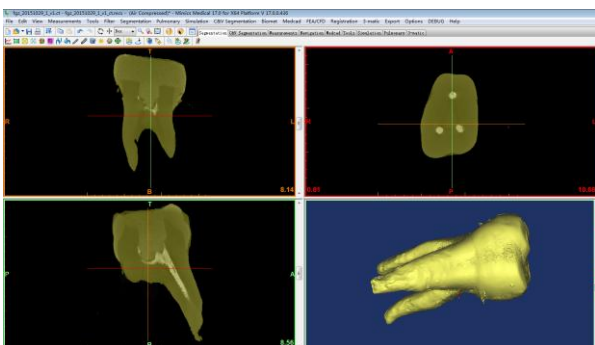
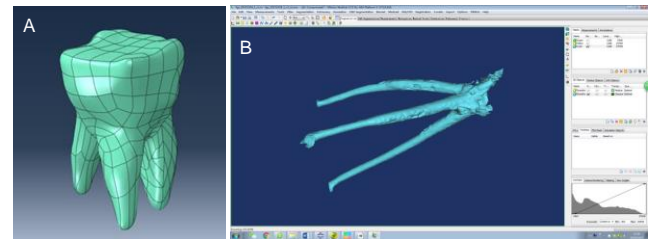


图 1 通过 Mimics 进行图像分割
Figure 1 Image segmentation through the Mimics

1.4.4 离体牙修复研究模型 将CT扫描后得到的分层图像文件导入Mimics 17.0图像处理软件中, 分别设定适当的阈值来提取牙釉质、牙本质、根充牙胶、各修复体, 得到表面网格数据^[11], 以STL格式导入Geomagic 2013中, 建立点云模型, 以网格医生功能进行修复, 移除偏离点并简化网格数据, 采用填充功能修补结构, 探测曲率并形成轮廓线, 构造曲面片并对曲面片进行调整, 构造格栅并进行拟合曲面, 得到拟合好的IGS格式三维模型, 导入ABAQUS 6.13软件后进行有限元分析, 见图2。



图注: A 为离体牙完整模型, B 为离体牙根充牙胶模型。

图 2 表面光滑处理后生成的 NURBS 曲面模型

Figure 2 NURBS surface model generated after smooth surface treatment

1.4.5 材料选择与网格划分 在ABAQUS 6.13有限元软件中将三维模型各部分进行几何体自由, 以四面体形式划分网格, 尺寸控制在0.2-0.4 mm, 控制好各个关键部位并满足划分精度的要求, 各部分材料属性^[12-13], 见表2。

表 2 各部分材料属性

Table 2 Properties of each material

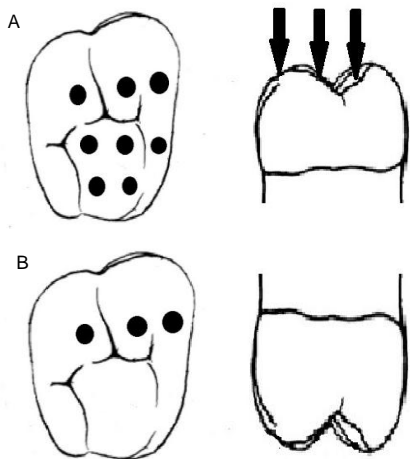
材料名称	弹性模量E(MPa)	泊松比μ
牙釉质	84 100	0.30
牙本质	18 600	0.31
E.max全瓷	70 000	0.19
纯钛金属	110 000	0.35
二氧化锆	200 000	0.33
钴铬合金	220 000	0.30

1.4.6 边界条件设定与力学实验假设

边界条件: 牙齿与牙槽骨固定, 牙槽骨三维数字模型的颊舌侧设定为自由边界, 牙槽骨底部及近远中侧为绝对固定。

实验假设: 在加载条件下牙齿、黏结剂、各修复体始终为一整体, 相互之间不会移动, 并假设实验模型中的所有材料为连续、均质、各向同性的线弹性材料。

1.4.7 有限元分析加载大小及方向 设定上颌第一磨牙最大咬合力为600 N, 日常咀嚼力225 N。设定最大牙尖交错位时与牙长轴方向相同, 殆面加载8个点, 每点加载力75 N, 共600 N; 设定功能位时分别与牙长轴成0°, 45°, 90°作用于3个点, 作用于颊尖舌斜面, 每点75 N(模拟垂直向、斜向、水平向加载)^[14], 见图3。



图注：图中 A 为最大 8 点载荷位置及方向，B 为功能性 3 点载荷位置及方向。

图 3 有限元分析加载大小及方向

Figure 3 Finite element analysis of loading position and direction

1.5 主要观察指标 各组最大主应力；最大主应力是材料内部某一点在不同方向中承受最大拉应力的反应。牙体组织抗拉强度仅为抗压强度的20%^[15]，所以分析牙体组织拉应力的意义更大。

2 结果 Results

2.1 最大应力值结果 对3种不同修复方式及所应用的不同材料分别以不同的加载方式进行加载，测试其最大应力值，见表3，图4。

表 3 上颌第一磨牙不同修复方式及修复材料条件下的模型最大应力值 (MPa)

Table 3 Maximum stress value of the model of the first maxillary molar under different restoration methods and materials

加载方式	修复方式	修复材料			
		E.max全瓷	纯钛金属	二氧化锆	钴铬合金
8点90°加载	嵌体组	94.806	95.625	112.709	117.766
	高嵌体	72.833	74.869	77.724	87.805
	桩冠组	68.776	70.205	74.344	75.817
3点90°加载	嵌体组	55.077	55.130	77.150	77.547
	高嵌体	44.829	45.075	49.470	52.250
	桩冠组	40.751	41.628	47.321	49.625
3点45°加载	嵌体组	92.878	93.972	116.271	118.900
	高嵌体	56.573	61.966	64.547	65.585
	桩冠组	49.833	50.590	55.461	58.304
3点0°加载	嵌体组	67.361	69.718	80.946	82.468
	高嵌体	58.639	57.995	60.505	62.352
	桩冠组	54.979	55.173	58.205	59.645

各组模型选取最大应力值各20个点，使用SPSS 19.0软件进行统计学分析发现剩余牙体组织中，嵌体组与高嵌体组、全冠组最大应力值比较差异有显著性意义($P < 0.05$)，高嵌体组与全冠组最大应力值比较无显著性意义($P > 0.05$)，说明临床效果无差别。

2.2 应力分布图 8点或3点载荷模式等4种条件下，可见应力集中区域位于载荷处，见图5。

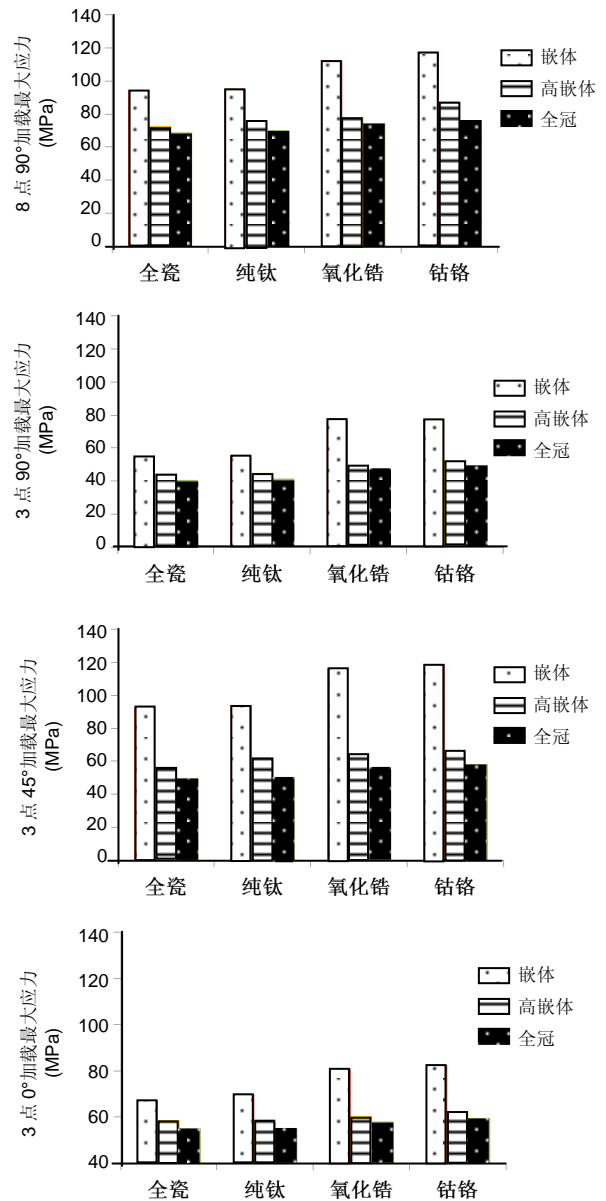
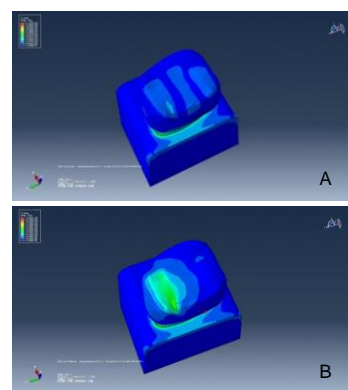


图 4 各组牙本质最大应力值

Figure 4 Maximum stress value of the dentin in each group

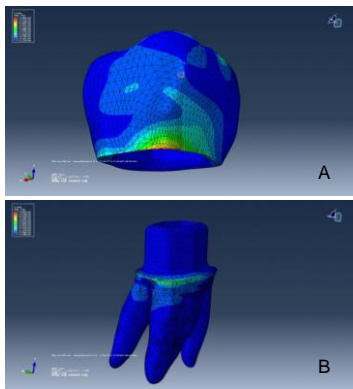


图注：图中 A 为 8 点载荷，B 为 3 点载荷。

图 5 上颌第一磨牙载荷后的应力云图

Figure 5 Stress cloud diagram of the first maxillary molar under load

在各载荷条件下，桩冠组可见修复体边缘、预备体肩台、剩余牙本质颈部及桩核中部出现应力集中区，见图6，7。



图注: 图中 A 为全冠应力云图, B 为牙本质应力云图。

图 6 上颌第一磨牙桩冠组载荷后的应力云图

Figure 6 Stress cloud diagram of the first maxillary molar in the post-core crown group under load

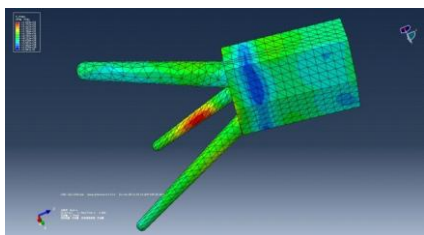
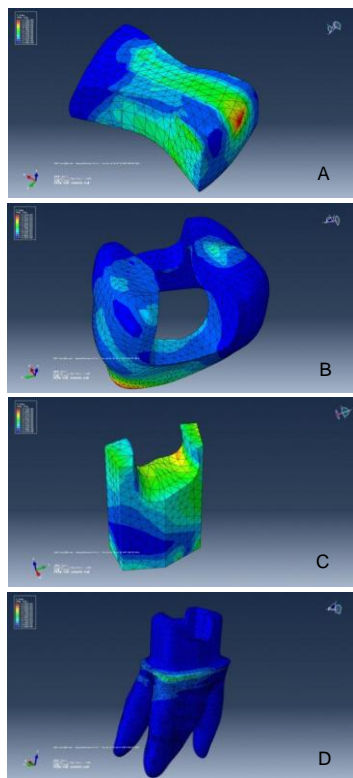


图 7 桩冠组载荷后的桩核应力云图

Figure 7 Stress cloud diagram of the post and core in the post-core crown group under load

在各载荷条件下, 嵌体组牙釉质的加载点出现应力集中区, 并有将应力沿牙釉质传到至颈部的趋势, 嵌体和预备体相对的龈壁和底面及二者移行处也出现应力集中区, 见图8。



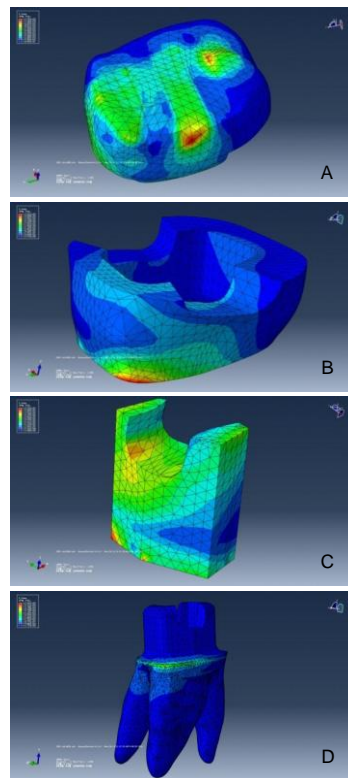
图注: 图中 A 为嵌体应力云图, B 为牙釉质应力云图, C 为垫底层应力云图, D 为牙本质应力云图。

图 8 上颌第一磨牙嵌体组载荷后的应力云图

Figure 8 Stress cloud diagram of the first maxillary molar in the inlay group under load

在各载荷条件下, 高嵌体组高嵌体与牙釉质接触处出现应力集中, 预备体龈壁和底面及二者移行处及相对应的

高嵌体髓腔内部分也出现应力集中情况, 但应力分布更为均匀, 见图9。



图注: 图中 A 为高嵌体应力云图, B 为牙釉质应力云图, C 为垫底层应力云图, D 为牙本质应力云图。

图 9 上颌第一磨牙高嵌体组载荷后的应力云图

Figure 9 Stress cloud diagram of the first maxillary molar in the onlay group under load

3 讨论 Discussion

3.1 有限元模型中各应力分析 有限元法是求解连续介质力学问题的一种数值分析方法, 它结合数学、结构力学、材料力学和弹性理论等来求解应力分析的理论结果, 是一种有效的分析工具^[16]。通常材料内部某个点所受到的最大拉应力可由最大主应力表现出来, 而最大拉应力理论认为: 当最大拉应力大于限值时即会出现脆性断裂^[17]。在临床中, 可将牙釉质、牙本质及修复体视为一种脆性组织, 其抗拉强度小于抗压强度。如出现载荷增加导致最大拉应力的应力值增加, 当超过极限值强度时, 受力部位即可出现断裂。实验据此来研究各部分最大拉应力的大小和分布情况对材料的影响。根据材料力学理论, 某个部位承受的应力值越大其被破坏的可能性越大。

3.2 离体牙修复模型垫底材料及粘接材料对实验结果的影响 以往研究证明, 瓷材料和牙体之间的树脂垫底和粘接层充当了一个缓冲层, 吸收了咀嚼力并加强了修复体强度^[18]。早期临床研究发现, 全瓷冠的破坏主要是起源于粘接剂界面的放射状裂纹而非接触表面破坏。Hayashi等^[19]认为是粘接剂的磨损导致修复体失去支撑引发微裂纹, 最终导致全瓷冠发生大块破坏, 说明垫底材料和粘接剂在修复术中扮演非常重要的角色。所以在有限元应力分析研究中, 建立垫底层和粘接剂层是非常有必要的, 在实验中设置了0.1 mm的粘接层进行研究。

3.3 加载方式的选择 牙在咀嚼过程中会受到各种大小

各个方向的力。有文献报道健康人后牙区的最大咬合力平均为580 N^[20]，还有学者报道男性的最大咬合力为522 N，女性441 N^[21]。在此次研究中，模拟牙尖交错殆时的最大咬合力，垂直加载于殆面8个点，每点75 N，共600 N，是比较合理的。据报道，在咀嚼过程中，咀嚼力的大小是最大咀嚼力的37%~40%^[22]。实验中选择了225 N，约为最大咬合力的37%。此外，在一项关于人的咀嚼系统的三维有限元分析实验中，证明了咀嚼力是来自于多个方向的^[23]。故在实验中选择了3个方向与牙长轴呈0°、与牙长轴呈45°、与牙长轴呈90°的力，加载于近远中颊尖的舌斜面 and 近中舌尖的颊斜面。

3.4 应力分布图的分析

桩冠修复体: 修复体的应力集中区出现在殆面加载点处，说明桩冠修复出现问题会最早出现在殆面加载点这个部位，在进行临床牙体预备时应在这个部位增加瓷层厚度。牙颈部的结构薄弱，牙釉质的边缘与牙颈部相连，因此牙釉质的应力集中区出现在牙颈部。从云图来看，牙本质的应力分布较均匀，主要分布在颊侧及近中肩台；粘接剂层是容易出现粘接剂碎裂的情况^[24]，出现的应力集中区就是较易出现碎裂的地方。

嵌体修复体: 嵌体对患牙来说具有一定的保护作用^[25]，但预备体牙本质的龈壁和底面及二者移行处出现的应力集中，以及对应的嵌体表面应力集中，也是修复失败的常见原因之一。嵌体碎裂最常出现在预备体龈壁处，导致修复失败，因此临床治疗时要引起重视。此外载荷点也可见应力集中，并有沿牙釉质将应力传到至颈部的趋势，提示临床操作中应留有足够厚的牙体组织保证修复体寿命。

高嵌体修复体: 与桩冠修复体和嵌体修复体2种修复方式相比，虽然高嵌体髓腔内部分及对应预备体牙本质的龈壁和底面及二者移行处也出现了应力集中区，但应力分布更为均匀，说明利用高嵌体修复可很好地分散应力，使应力分布更均匀，可以更好地保护修复体及剩余牙体组织。

3.5 临床意义 根管治疗后上颌第一磨牙临床保存率与其所选择的修复方式密切相关^[26]。此次研究的有限元分析表明，载荷区域(也就是咬合接触区)容易出现应力集中的情况，这就提醒临床医生在进行修复体预备时，要尽量保证咬合接触区有足够修复体空间，保证修复体厚度和强度。通过云图分析，应力集中区位于点线角处及髓室轴角处较多，因此在临床进行牙体预备时需要注意将点线角圆钝处理，有效提高高嵌体的抗折性能，分散应力^[27-29]，可有效增加修复体的使用时间，降低修复体损坏的风险。从应力分布情况可知，牙釉质是大部分模型高应力集中区^[30]，分析原因认为牙釉质的弹性模量较高^[31]，在牙体组织中承担主要力量，主要用来进行力的传导和分散，因此容易形成应力集中区。同时，等效应力也是判断材料是否出现磨损的可靠依据^[32-34]。牙釉质在牙体组织中占有重要地位，在临床工作中保留足够牙釉质是修复体长久使用的保证。虽

然从保存牙釉质来看，进行嵌体修复是最理想的修复方式，但对于后牙大面积缺损的修复并不适合^[35]。根据此次课题的有限元分析研究表明，高嵌体和桩冠修复可获得更加均匀的应力分布图。考虑到桩冠修复时牙体预备量较大，剩余的牙釉质很少，对应力分散不利，而且在残余牙釉质与牙颈部连接处容易形成应力集中^[36]，因此作者认为高嵌体是一种更合理的修复方式，具有一定临床意义且具有先进性。

临床上对牙体大面积缺损进行修复时，通常会选择桩核冠修复^[37]。有研究表明，桩核冠修复和高嵌体修复均可选择^[38]。桩冠在修复经过根管治疗后的上颌第一磨牙时，会磨除一定量的牙体组织，剩余的牙体组织越少，牙齿的抗折性能也越低，利用高嵌体修复可尽可能多的保留剩余牙体组织，保护牙根，建议高嵌体修复为更优选择。而相比起各种修复材料，全瓷材料由于弹性模量更接近于牙体组织，故应力分布更为均匀。有学者对临床以嵌体和高嵌体修复的287颗第一磨牙进行了长达7年的跟踪调查，调查结果显示：利用嵌体和全瓷高嵌体对根管治疗后的牙齿进行牙体缺损修复方法可行，但经过高嵌体修复的效果更好，保存时间更长。对大范围缺损根管治疗后的磨牙进行高嵌体修复，临床观察其成功率高达92.5%^[39]。从最大应力分布情况来看，桩冠和高嵌体的应力分布更均匀^[40-41]，是上颌第一磨牙根管治疗后较为理想的2种修复方式。但从保存牙釉质的多少来看，利用根管治疗上颌第一磨牙后的修复，采用高嵌体进行修复可保存更多的剩余牙体组织，对增加修复后牙体的保存率和抗折性能更有利，因此在临床上利用高嵌体进行上颌第一磨牙的修复具有适用性和优势性。

实验证明，高嵌体修复后的最大主应力都出现在殆面加载点处，与牙本质应力峰值出现部位一致，垂直载荷条件下，覆盖所有牙尖的高嵌体易于向根方分散应力。综合分析各组修复后的应力分布图和应力值的大小，高嵌体修复方式可充分利用牙根部结构来承担咬合力，并将受到的等效应力向根方进行分散，因此在临床上具有先进性，值得在临床中推广。

作者贡献: 付宏宇进行实验设计，实验实施、评估、资料收集为冯广智，冯广智成文，马鹏华审核。

经费支持: 该文章接受了“北京市海淀区医院院级青年科研项目(KYQ2015008)”的资助。所有作者声明，经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

写作指南: 该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告及医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

生物统计学声明: 该文统计学方法已经首都医科大学公共卫生学院生物统计学专家审核。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

[1] 冯海兰.口腔修复学[M].北京:北京大学医学出版社,2013.

[2] Harsha MS,Praffulla M,Babu MR,et al.The Effect of Cavity Design on Fracture Resistance and Failure Pattern in Monolithic Zirconia Partial Coverage Restorations-An In vitro Study.J Clin Diagn Res. 2017;11(5):ZC45-ZC48.

[3] Guo L,Wang XJ,Wan R,et al.Clinical application of gold alloy onlay on restoration of molars with severe attrition.Chin J Prosthodont.2016;17(6):332-335.

[4] Haiyue YU,Dandan MA,Lin X,et al.The clinic outcome of CAD/CAM onlay in the restoration of molars with extensive defect after root canal treatment.JPract Stomatol. 2017;33:41-44.

[5] 石晓婷,尹新芹,林志勇,等.不同根管预备方法对根管壁应力分布的影响[J].临床口腔医学杂志,2013, 29(2):92-94.

[6] Dejak B,Mlotkowski A.3D-Finite element analysis of molars restored with endocrowns and posts during masticatory simulation. Dent Mater.2013;29(12):e309.

[7] Frankenberger R,Zeilingerl,Krech M,et al.Stability of endodontically treated teeth with differently invasive restorations: Adhesive vs. non-adhesive cuspal stabilization. Dent Mater.2015; 31(11):1312-1320.

[8] Juloski J,Apicella D,Ferrari M.The effect of ferrule height on stress distribution within a tooth restored with fibre posts and ceramic crown: a finite element analysis.Dent Mater.2014; 30(12):1304-1315.

[9] 陈小文,桑卓,古育娣,等.观察三种嵌体对牙体缺损的修复效果[J].中国处方药,2014,12(7):33-34.

[10] Lee KS,Shin JH,Kim JE,et al.Biomechanical Evaluation of a Tooth Restored with High Performance Polymer PEKK Post-Core System: A 3D Finite Element Analysis.Biomed Res Int.2017; 2017(2):1373127.

[11] 王文亚,傅波,罗华,等.不同桩核冠修复上颌中切牙的三维有限元模型建立及应力分析[J].医用生物力学, 2014,29(1):25-30.

[12] 赵信义.口腔材料学[M].5版.北京:人民卫生出版社,2013:59-61.

[13] 蔡跃,黄英,张慧,等.有限元分析上颌中切牙唇、舌向斜形缺损后纤维桩核冠修复三维模型的应力分布[J].中国组织工程研究, 2017, 21(30):4824-4830.

[14] Nakamura T,Imanishi A,Kashima H,et al.Stress analysis of metal-free polymer crowns using the three-dimensional finite element method.Int J Prosthodont.2001;14(5):401-405.

[15] Toniollo MB,Macedo AP,Pupim D,et al. Finite Element Analysis of Bone Stress in the Posterior Mandible Using Regular and Short Implants, in the Same Context, with Splinted and Nonsplinted Prostheses.Int J Oral Maxillofac Implants. 2017;32(4):199-206.

[16] 刘涛,耿海霞.下颌第一磨牙不同桩核位置数目合金桩核修复后基牙应力的三维有限元分析[J].中国组织工程研究, 2017,21(22): 3501-3506.

[17] 肖丽婷,郑纪伟,林融,等.3种不同方法修复后牙牙体缺损的疗效对比分析[J].中国校医,2014, 28(9):695-696.

[18] 顾新华,蔡盛东,M.Kern.不同粘固剂对 IPS-Empress 2后牙全瓷冠边缘适合性的影响[J].实用口腔医学杂志, 2002,18(5):441-443.

[19] Hayashi M,Tsuchitani Y,MiuraM,et al.6-year clinical evaluation of fired ceramic inlays.Oper Dent.1999;42(6):318-326.

[20] Tortopidis D,Lyons MF,Baxendale RH,et al.The variability of bite force measurement between sessions, in different positions within the dental arch.J Oral Rehabil.1998;25(9):681-686.

[21] Bakke M,Holm B,Jensen BL,et al.Unilateral, isometric bite force in 8-68-year-old women and men related to occlusalfactors. Eur J Oral Sci.1990;98(2):149-158.

[22] Gibbs CH,Mahan PE,Lundeen HC,et al.Occlusal forces during chewing and swallowing as measured by sound transmission. JProsthet Dent.1981;46(4):443.

[23] Koolstra JH, van Eijden TM, Weijs WA, et al. A three-dimensional mathematical model of the human masticatory system predicting maximum possible bite forces. J Biomech.1988;21(7):563-576.

[24] 刘利军,缪羽.三种不同材料的带桩高嵌体修复上颌第一前磨牙的三维有限元分析[J].中华老年口腔医学杂志, 2015,13(3):168-172.

[25] Durand LB,Guimarães JC,Monteiro JS,et al.Effect of ceramic thickness and composite bases on stress distribution of inlays - a finite element analysis.Braz Dent J.2015;26(2):146-151.

[26] 韩梦.四种修复方法对不同程度缺损下颌第一磨牙应力的影响—三维有限元研究[D].郑州:郑州大学,2015.

[27] Tekâş EN,Pala K,Demirci M,et al. Influence of different composite materials and cavity preparation designs on the fracture resistance of mesio-occluso-distal inlay restoration.Dent Mater.J. 2016;35(3): 523-531.

[28] Lin C,Chang YP.Multi-factorial analysis of a cuspal-replacing adhesive premolar restoration: A finite element study.J Dent. 2008;36(3): 194-203.

[29] Guven S,Akdogan M,Oz C,et al.Three-dimensional finite-element analysis of two ceramic inlay restorations with different cavity designs.BiotechnolBiotechnol Eq. 2015;29(3):579-585.

[30] 徐红梅,贾静,朱晓英,等.根管治疗后下颌磨牙采用各种充填材料修复的三维有限元分析[J].口腔颌面修复学杂志, 2014,15(2):75-79.

[31] Su C,Su Y,Li Z,et al.In situ synthesis of bilayered gradient poly(vinyl alcohol)/hydroxyapatite composite hydrogel by directional freezing-thawing and electrophoresis method. Mater SciEng C Mater Biol Appl.2017;77:76-83.

[32] Han SH,Sadr A,Tagami J,et al.Internal adaptation of resin composites at two configurations: Influence of polymerization shrinkage and stress. Dent Mater.2016;32(9):1085-1094.

[33] Fronza BM,Rueggeberg FA,Braga RR,et al.Monomer conversion, microhardness, internal marginal adaptation, and shrinkage stress of bulk-fill resin composites.Dent Mater. 2015;31(12):1542-1551.

[34] Holberg C,Winterhalder P,Wichelhaus A,et al. Fracture risk of lithium-disilicate ceramic inlays: A finite element analysis.Dent Mater.2013;29(12):1244-1250.

[35] 张颜,初晓阳,刘大军,等.三维有限元法分析不同粘接剂层对瓷贴面应力分布的影响[J].口腔颌面修复学杂志,2014,15(2):84-87.

[36] 李欢欢.下颌第一磨牙颊牙合缺损不同修复形式的三维有限元分析 [D].郑州:郑州大学,2016.

[37] 刘利军,缪羽,姚丽英.三种不同材料带桩高嵌体修复上颌第一前磨牙三维有限元分析[J].疾病监测与控制, 2016,10(2):143-144.

[38] Ozyoney G,Hayran O.The efficacy of glass-ceramic onlays in the restoration of morphologically compromised and endodontically treated molars.Int J Prosthodont. 2013;26(3):230-234.

[39] Morimoto S,Rebello de Sampaio FB,Braga MM,et al.Survival Rate of Resin and Ceramic Inlays, Onlays, and Overlays: A Systematic Review and Meta-analysis.J Dent Res. 2016;95(9):985.

[40] 张孝霞,韩丁,朱庆林,等.大面积缺损的下颌第一前磨牙桩核冠与高嵌体修复的三维有限元分析[J].牙体牙髓牙周病学杂志, 2018, 28(5):265-270.

[41] 冯广智,蔡婧.上颌中切牙四种不同材料桩核冠的有限元分析[J].临床医药文献电子杂志,2017, 4(6):1046-1047.