

基于概率可靠度的全瓷桥连接体高度与宽度的参数优化设计

姚加成¹ 刘长亮¹ 张磊^{2*}

德嘉口腔医院 河北 廊坊市香河县 065499 ;

解放军总医院第八医学中心口腔科 北京 海淀 100039

摘要:目的:应用ANSYS Workbench中的优化设计模块与结构可靠性理论进行全瓷桥结构优化设计与疲劳寿命预测的概率可靠度分析,为今后将基于有限元方法的可靠性分析用于口腔修复体的参数优化打下基础。方法:本文利用逆向工程技术,结合3DSS彩色结构光扫描系统、Geomagic Studio、UG NX和ANSYS软件建立下颌全瓷桥可靠性分析模型。并利用UG NX 6.0软件与ANSYS Workbench双向无缝链接传递功能,和Design Exploration这个优化设计平台,研究连续变化的全瓷桥连接体的高度和宽度变化对全瓷桥最大主应力、主形变分布的影响。结果:磨牙侧连接体在全瓷桥防止形变设计中有着较为重要的作用。磨牙侧连接体的面积一般较前磨牙侧大,所以使其成为整个部件中主要抗形变的构件。其中磨牙侧连接体牙合、龈向高度其敏感度所占比例较高。结论:在防止全瓷桥形变设计中,在磨牙侧连接体面积一定时,要尽量保证磨牙侧连接体牙合、龈向高度。

关键词:全瓷桥,可靠性理论,有限元分析,应力-强度干涉理论,优化设计

在口腔修复领域,牙科生物陶瓷已经广泛应用于全瓷修复体的制作。生物陶瓷具有良好的生物相容性,抗腐蚀性,透光性,且相对于传统烤瓷熔附金属修复体更为美观。因此口腔修复医生和患者对于瓷修复体的需求也越来越多。

但是在临床上,全瓷修复体在反复的咀嚼力以及最大咬合力作用下,常常表现出不令人满意的效果。而且口腔修复体在口内行使功能时发生的破坏往往是多因素共同作用的结果,且具有不确定性和随机性,是一个概率事件。结构可靠性理论^[1]是一种基于概率统计以及数值计算的分析方法,它广泛应用于工程与机械领域。它能够将在结构中失效相关的因素视为随机变量,在确定其概率分布范围后,能对给定条件下,结构完成预定功能的概率进行计算。因而本课题旨在应用ANSYS Workbench中的优化设计模块与结构可靠性理论进行全瓷桥结构优化设计与疲劳寿命预测的概率可靠度分析,为今后将基于有限元方法的可靠性分析用于口腔修复体的参数优化打下基础。

本文研究连续变化的全瓷桥连接体的高度和宽度变化对全瓷桥最大主应力、主形变分布的影响。

1 实验器材与软件环境

商用台式机;SDSS-STDC-II型三维照相测量仪(标

准彩色型,上海数造机电科技有限公司);Geomagic Studio 8.0(Raindrop公司,美国);UG NX 6.0软件CAD软件(SIEMENS公司,德国);ANSYS 12.0(ANSYS公司,美国)

2 实验方法

2.1 三维点云数据的获取

将下颌第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙的点云模型。在Geomagic Studio软件中进行模型实体化,划分网格处理,最终获得其三个牙的片体模型,以*.IGS格式保存。

2.2 参数化三维实体模型的建立

将片体模型数据导入UG NX 6.0软件,利用缝合命令将所有片体缝合成封闭实体,并对模型进行曲面优化,从而分别获得下颌第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙三维实体模型。本实验获取的下颌第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙形态参数^[3]见表1。

表1 下颌第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙形态参数表 (mm)

	全长	冠长	根长	冠宽	颈宽	冠厚	颈厚
第二前磨牙	20.5	7.8	12.7	7.0	4.9	8.2	6.9
第一磨牙	20.6	7.9	12.7	11.3	8.9	10.6	8.6
第二磨牙	20.4	7.9	12.5	11.2	8.7	10.4	8.8

全瓷桥模型组根据口腔修复学[84]的全瓷桥基牙制备要求,在UG NX 6.0 CAD软件中进行牙体预备和全瓷桥制作。将以下参数设置为连续变化的随机变量:桥体

通讯作者:张磊,男,1982.12 汉北京海淀 副主任医师 博士研究生 研究方向:义齿可靠度分析及优化设计

长度, 连接体截面积, 连接体的牙合、龈高度及颊舌宽度, 连接体牙合、龈端外展隙曲率, 基牙的牙槽骨高度, 固位体厚度。

2.3 材料参数

根据文献报道^[4, 5, 6], 各种材料参数见下表2。

表2 实验模型中的材料参数

材料	弹性模量(MPa)	泊松比
牙本质	1.86×10^4	0.31
牙骨质	1.38×10^4	0.30
皮质骨	1.45×10^4	0.30
松质骨	2.15×10^4	0.30
牙周膜	7.03×10^1	0.45
树脂水门汀	8×10^3	0.33
Empress-2	12.46×10^4	0.26
In-Ceram Alumina	30.07×10^4	0.26
Zirconia-TZP	21.98×10^4	0.30

2.4 模型假设条件

参考弹性力学的基本假设, 本实验将有限元模型设为连续、均匀、各向同性的线弹性材料, 且符合小变形条件。

2.5 界面设定与约束、载荷条件

将参数化全瓷桥三维模型组(包括全瓷桥、粘结剂层、基牙层、牙周膜层、牙槽骨层、牙槽骨)界面设置为粘合(Bonded), 使各个模型之间不会发生相对位移; 牙槽骨底部为固定约束边界。施加载荷位于桥体中央窝区域, 方向为垂直加载, 大小为600N。

2.6 单元划分

将建立好的全瓷桥模型组数据无缝传递导入到有限元分析软件ANSYS Workbench, 然后利用分析模块对模型进行自动网格划分, 采用Solid45实体单元依次对各区域自动生成网格, 获得三维有限元模型, 进行FEA求解。将全瓷桥部件的等效力(Maximum Total Deformation, MTD)和最大主应力(Maximum Principal Stress, MPS)的分布作为准确性检验的依据。

2.7 设计变量(Design Variable)的设定

通过UG NX 6.0实体建模工具中进行对于前磨牙侧连接体高度、宽度, 磨牙侧连接体高度、宽度的参数化设置(如彩图2-1、2-2)。

本实验中设定磨牙侧连接体高度 H_1 、宽度 W_1 , 前磨牙侧连接体高度 H_2 、宽度 W_2 为DV。 H_1 变化范围为0.7-7.0mm, W_1 变化范围为0.54-5.4mm; H_2 变化范围为0.59-5.9mm, W_2 变化范围为0.45-4.5mm。

2.8 设计变量的拉丁方分组(Latin Hypercube

Sampling, LHS)

将Design Modeler中设定的各参数导入Response Surface模块中进行拉丁方抽样分组, 第二前磨牙、第二磨牙侧连接体高度、宽度共四参数需要取25组抽样点进行响应曲线及响应面的重建。LHS抽样分组法是一种高效的蒙特卡罗(Monte Carlo)抽样方法。一般而言, 在达到同样精度结果的前提下, ANSYS Workbench中采用的LHS抽样技术比Monte Carlo抽样法可以减少20%至40%的计算循环。

2.9 目标函数(OBJ)的设定

将在UG NX 6.0建立的全瓷桥有限元模型组导入ANSYS Workbench的Design Modeler模块中计算得到的静力分析结果导入Design Exploration中的Response Surface模块中, 并设定全瓷桥MTD和MPS为OBJ, 对连续变化的各参数下的不同设计下新形成的有限元模型进行力学评估。同时进行各设计变量目标函数的敏感度进行分析。在单DV对于OBJ的响应曲线中, 通过曲线上各点的曲线斜率来判定设计变量的合理取值范围。当曲线上点的斜率在-1和1之间时, 提示目标函数对设计变量的变化幅度最小, 开始趋于平缓(图2-1)。因而此区间可近似看做各设计变量的优化区间。

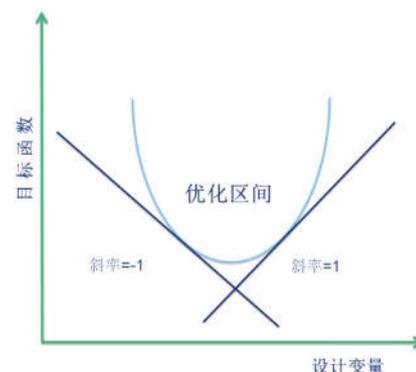


图1 曲线的优化区间: 斜率在-1到1之间的区域

3 结果与讨论

在Response Surface模块中的Design Experiment中将设计变量 H_1 、 W_1 、 H_2 、 W_2 进行拉丁方抽样分组, 分组结果如表3, 4。

表3 H_1 、 W_1 的LHS分组结果及MPS和MTD值

Group	H_1 (mm)	W_1 (mm)	MPS (MPa)	MTD (mm)
1	3.85	2.97	842.4	0.0239
2	0.7	2.97	4340.7	0.0763
3	7	2.97	271.4	0.0166
4	3.85	0.54	3472.9	0.0524
5	3.85	5.4	270.6	0.0166
6	0.7	0.54	20156.1	0.2461
7	7	0.54	295.5	0.0167

续表:

Group	H ₁ (mm)	W ₁ (mm)	MPS (MPa)	MTD (mm)
8	0.7	5.4	296.5	0.0167
9	7	5.4	268.0	0.0166

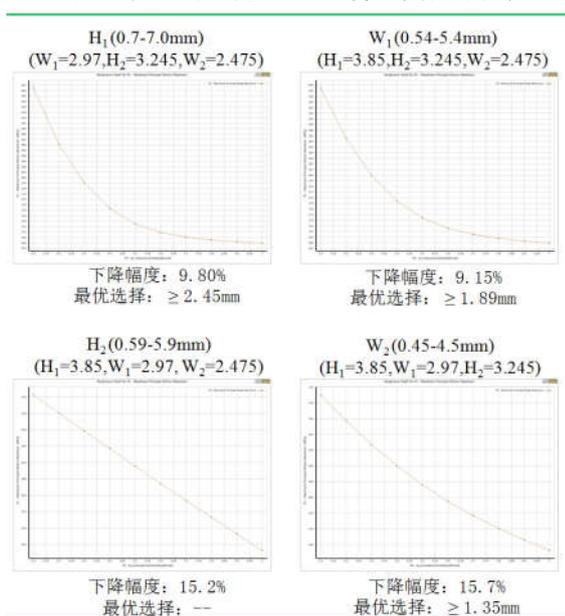
表4 H₂、W₂的LHS分组及MPS和MTD值

Group	H ₁ (mm)	W ₁ (mm)	MPS (MPa)	MTD (mm)
1	3.245	2.475	1437.5	0.0284
2	0.59	2.475	3234.9	0.0460
3	5.9	2.475	281.3	0.0166
4	3.245	0.45	4628.2	0.0863
5	3.245	4.5	286.3	0.0166
6	0.59	0.45	12557.5	0.1573
7	5.9	0.45	312.6	0.0167
8	0.59	4.5	310.7	0.0167
9	5.9	4.5	263.2	0.0166

设计变量H₁、W₁对全瓷桥MTD影响的响应面云图如彩图6所示,设计变量H₁、W₁对全瓷桥MPS影响的响应面云图如彩图7所示;设计变量H₂、W₂对全瓷桥MTD影响的响应面云图如彩图8所示,设计变量H₂、W₂对全瓷桥MPS影响的响应面云图如彩图9所示。

在各DV的取值范围内,单DV对全瓷桥MPS及MTD峰值的响应曲线的变化趋势基本相同,因而各设计变量分别取中间值,另一个设计变量对全瓷桥MTD和MPS的响应曲线如下表5、6所示。

表5 单DV对全瓷桥MPS峰值的响应曲线

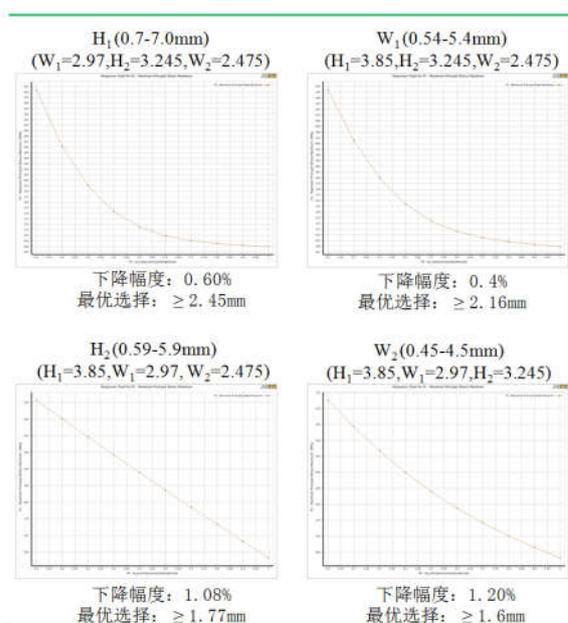


在本研究中,通过对单DV响应曲线的观察,随着H₂、W₂的增加,全瓷桥最大主应力峰值分别下降了15.2%和15.7%。下降幅度远大于H₁、W₁增加时的变化。提示

H₂、W₂比H₁、W₁更易影响全瓷桥最大主应力的大小。

通过单DV对最大主应力响应曲线的切斜率分析,结果表明:当H₁ ≥ 2.45mm时,全瓷桥最大主应力变化趋势较小;W₁ ≥ 1.89mm时,全瓷桥最大主应力变化趋势较小;W₂ ≥ 1.35mm时,全瓷桥最大主应力变化趋势较小。

表6 单DV对全瓷桥MTD峰值的响应曲线



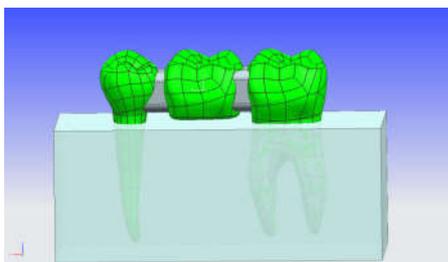
随着H₂、W₂的增加,全瓷桥主形变峰值分别下降了1.08%和1.20%。下降幅度仍大于H₁、W₁增加时的变化。提示H₂、W₂比H₁、W₁更易影响全瓷桥主形变的大小。

通过单DV对主形变响应曲线的切斜率分析,结果表明:当H₁ ≥ 2.45mm时,全瓷桥主形变变化趋势较小;W₁ ≥ 2.16mm时,全瓷桥主形变变化趋势较小;当H₂ ≥ 1.77mm时,全瓷桥主形变变化趋势较小;W₂ ≥ 1.6mm时,全瓷桥主形变变化趋势较小。

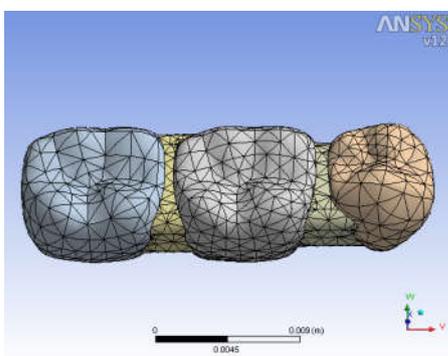
各变量在取最大值时,其对OBJ影响的敏感度的观察结果如图10、11所示。通过最大主应力对H₁、W₁、H₂、W₂四DV敏感度分析显示:四变量的敏感度分别占百分比为12%, 3%, 23%, 62%,结果表明前磨牙的连接体设计在全瓷桥抗力结构设计中有很重要的作用。可能是由于前磨牙侧连接体面积较磨牙侧面积小,所以容易形成应力的集中点,增大其尺寸就能够显著降低整个全瓷桥的所受最大主应力。其中前磨牙侧连接体的颊舌向宽度所占比例最高,说明在全瓷桥连接体设计时,在前磨牙侧连接体面积一定时,首先要保证前磨牙侧连接体的颊舌向宽度,这样可以很大程度的提高全瓷桥的抗力。

通过主形变对H₁、W₁、H₂、W₂四DV敏感度分析显示:四变量的敏感度分别占百分比为50%, 29%, 11%,

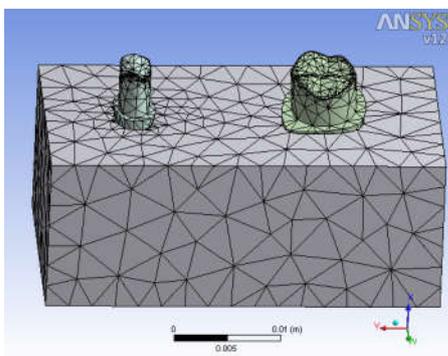
10%，结果表明磨牙侧连接体在全瓷桥防止形变设计中有着较为重要的作用。磨牙侧连接体的面积一般较前磨牙侧大，所以使其成为整个部件中主要抗形变的构件。其中磨牙侧连接体牙合、龈向高度其敏感度所占比例较高，提示，在防止全瓷桥形变设计中，在磨牙侧连接体面积一定时，要尽量保证磨牙侧连接体牙合、龈向高度。



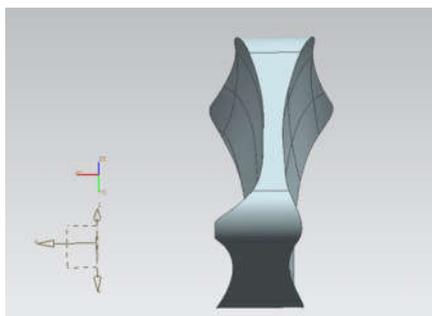
彩图1 下颌三单位全瓷桥模型组实体模型



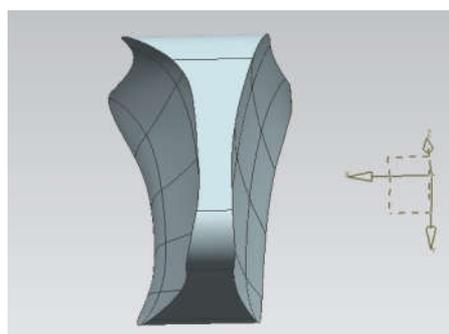
彩图2 第二前磨牙连接体



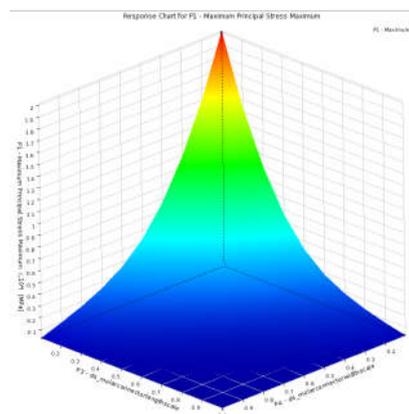
彩图3 第二磨牙连接体



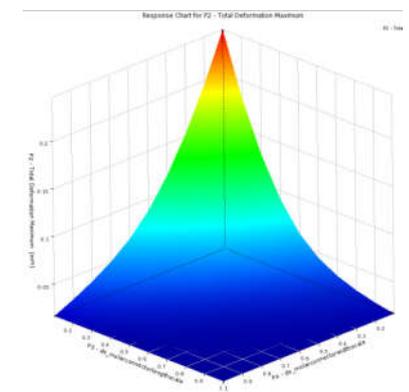
彩图4 第二前磨牙连接体



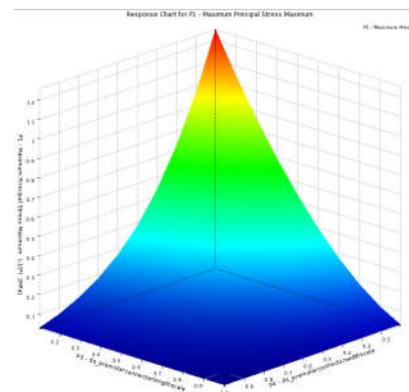
彩图5 第二磨牙连接体



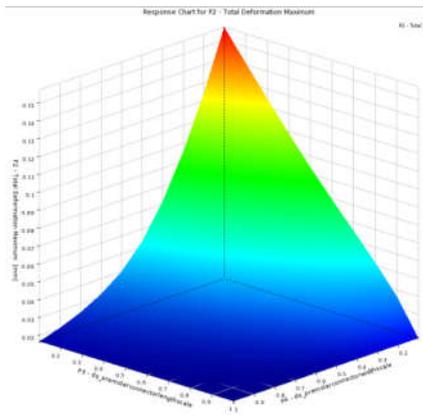
彩图6 H_1, W_1 对全瓷桥MTD响应面图



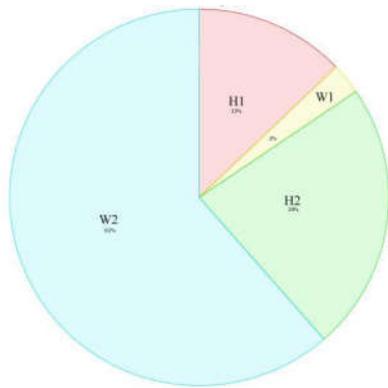
彩图7: H_1, W_1 对全瓷桥MPS响应面图



彩图8 H_2, W_2 对全瓷桥MTD响应面图



彩图9 H₂,W₂对全瓷桥MPS响应面图



彩图10 MPS对H₁,W₁,H₂,W₂敏感度分析



彩图11 MTD对H₁,W₁,H₂,W₂敏感度分析

参考文献:

- [1]陈建军主编. 机械与结构系统的可靠性[M]. 西安电子科技大学, 1994.42-47
- [2]皮昕. 口腔解剖生理学[M]. 人民卫生出版社, 2006.
- [3]何立弘. SHOFU长石质陶瓷疲劳性能研究[D]. 四川大学华西口腔医学院博士学位论文, 2005.66-68
- [4]王慧芸. 我国人牙的测量和统计[J]. 中华口腔医学杂志, 1959, 7(3):147-153.
- [5]Fischer H, Weber M, Marx R. Lifetime prediction of all-ceramic bridges by computational methods [J]. J Dent Res 2003, 82:238-242.
- [6]Studart AR, Fliser F, Kocher P, et al. Mechanical and fracture behavior of veneer-framework composites for all-ceramic dental bridges [J]. Dental Materials, 2007, 23: 115-123.
- [7]贾骏, 段嫒嫒, 周建学, 等. 下颌第一磨牙全瓷冠疲劳寿命预测的三维有限元分析[J]. 口腔医学研究, 2006, 22(3): 225-227.