

[文章编号] 1000-1182(2008)03-0334-04

# 类洞树脂充填中不同调和比例基底材料的 三维有限元应力分析

周 岚<sup>1</sup>, 杨锦波<sup>1</sup>, 刘 丹<sup>1</sup>, 刘 展<sup>2</sup>, 陈 颖<sup>1</sup>, 高 波<sup>1</sup>  
(1.口腔疾病研究国家重点实验室, 四川大学, 四川 成都 610041;  
2.四川大学 生物力学实验室, 四川 成都 610065)

**[摘要]** 目的 分析树脂充填中采用不同调和比例的基底材料垫底盖髓时, 其对牙体和修复体受力可能造成的影响。方法 测定调和比例分别为1:1、3:4、4:3的玻璃离子Vitrebond及化学固化氢氧化钙Dycal弹性模量及泊松比, 采用Micro-CT扫描离体牙标本, 建立下颌第一磨牙 I 类洞的三维有限元模型, 模拟不同调和比例的基底材料垫底盖髓, 复合树脂充填, 生理性殆力作用下对牙体、修复体进行应力分析。结果 不同调和比例的Vitrebond和Dycal的弹性模量不同。在生理性殆力作用下, Vitrebond或Dycal调和比例不同时, 其对牙体、修复体所受应力的大小及分布影响不大。与Vitrebond垫底相比, Dycal垫底时牙体的峰值应力及高应力区面积均较大。结论 人为改变双组份基底材料的理想调和比例会影响材料部分机械性能, 但其对牙体、充填体、垫底材料的应力分布影响不大。为避免应力集中, 在深龋治疗中应尽量使用弹性模量与牙本质或修复体相接近的基底材料。

**[关键词]** 有限元分析; I类洞; 基底材料

**[中图分类号]** R781.3 **[文献标识码]** A

**Three-dimensional finite analysis of the stress in first mandibular molar with composite class I restoration when various mixing ratios of bases were used** ZHOU Lan<sup>1</sup>, YANG Jin-bo<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>1</sup>, LIU Zhan<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>1</sup>. (1. State Key Laboratory of Oral Diseases, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Laboratory of Biomechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**[Abstract]** **Objective** To analyze the possible damage to the remaining tooth and composite restorations when various mixing ratios of bases were used. **Methods** Testing elastic modulus and poisson's ratio of glass-ionomer Vitrebond and self-cured calcium hydroxide Dycal with mixing ratios of 1:1, 3:4, 4:3. Micro-CT was used to scan the first mandibular molar, and the three-dimensional finite element model of the first permanent mandibular molar with class I cavity was established. Analyzing the stress of tooth structure, composite and base cement under physical load when different mixing ratios of base cement were used. **Results** The elastic modulus of base cement in various mixing ratios was different, which had the statistic significance. The magnitude and location of stress in restored tooth made no differences when the mixing ratios of Vitrebond and Dycal were changed. The peak stress and spreading area in the model with Dycal was more than that with Vitrebond. **Conclusion** Changing the best mixing ratio of base cement can partially influence the mechanistic character, but make no differences on the magnitude and location of stress in restored tooth. During the treatment of deep caries, the base cement of the elastic modulus which is proximal to the dentin and restoration should be chosen to avoid the fracture of tooth or restoration.

**[Key words]** finite element analysis; class I cavity; base cement

深龋在进行充填治疗时, 基底材料的选择除考虑其生物学功能外, 生物力学性能也至关重要。目

前临床常用的基底材料有磷酸锌、玻璃离子、氢氧化钙等, 均为双组份调和而成, 理想的调和比例为1:1, 但实际操作不能严格做到, 调和比例的变化必然影响材料的机械性能<sup>[1]</sup>。有研究<sup>[2]</sup>表明, 当磷酸锌粉液比改变时, 其压缩强度产生相应的变化。随着粉液比的下降, 玻璃离子的压缩强度降低, 同时操作时间和固化时间延长<sup>[3]</sup>。

[收稿日期] 2007-08-17; [修回日期] 2007-11-02

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(30200317)

[作者简介] 周 岚(1982-), 女, 四川人, 硕士

[通讯作者] 杨锦波, Tel: 028-85501439

有限元法能够逼真地建立起组织器官的三维模型,并赋予其仿真的生物力学特性,从而实现了对组织器官内部应力的分析。被引入口腔医学领域后,三维有限元法也被应用于后牙窝洞的预备及充填的研究中<sup>[4-6]</sup>,通过对不同类型的窝洞预备和充填后的应力分析来指导临床医师选择最佳的预备洞形、充填材料及充填方式。

当基底材料调和比例不同时,其可能对树脂充填术后牙体及修复体应力分布的影响尚未见报道。本实验以下颌第一恒磨牙为研究对象,通过建立复合树脂充填第一恒磨牙 I 类洞的三维有限元模型,定量研究采用不同调和比例的基底材料垫底盖髓时,在生理性殆力的作用下牙体组织和修复体应力的分布,分析其可能对牙体组织及修复体造成的损害。

## 1 材料和方法

### 1.1 测定不同调和比例的基底材料弹性模量和泊松比

1.1.1 主要材料与仪器 光固化玻璃离子 Vitre-bond (3M ESPE公司,美国),化学固化氢氧化钙 Dycal (Dentsply公司,瑞士),岛津万能材料试验机 (Auto Raph公司,日本)。

1.1.2 方法 分别将Vitrebond按粉液比1:1、3:4、4:3调和,Dycal按双组份1:1、3:4、4:3调和后注入试样模具,使其固化后,取出打磨成高12 mm、直径5 mm的圆柱体,各组制作5个试样,共30个试样。再将模块放于岛津万能材料试验机测试平台上,以1 mm/min加载速度对试样施力,用电阻应变仪测试记录试样横向和纵向应变,描绘出每个试样的应力-应变曲线图,算出试样的弹性模量和泊松比。

### 1.2 建立下颌第一恒磨牙 I 类洞三维有限元模型

选取1颗牙冠解剖外形较完整的离体下颌第一恒磨牙,牙冠的长、宽、高为正常值<sup>[7]</sup>。使用Micro-CT (Scano-Medical $\mu$ CT80公司,瑞士)进行横断扫描,层厚为20  $\mu$ m,共获得475张断层影像,将所得影像图以医学图像通讯标准格式导出,从其中选取97张断层影像,用MIMICS 9.0读取,并建立下颌第一恒磨牙的三维实体模型,并在殆面中央建立一个洞深4 mm的 I 类洞。将实体模型以stl格式导入有限元分析软件ABAQUS 6.4,进行网格化处理,建立下颌第一恒磨牙 I 类洞的三维有限元模型。

### 1.3 不同粉液比/组份比的基底材料垫底盖髓时的应力分析

假设实验中各材料为连续、均匀、各向同性的线弹性材料,充填后牙体组织、复合树脂与基底材

料之间没有相对滑动,牙髓腔为空腔。牙齿固定于牙槽骨内,各点在x、y、z三个轴的位移等于零<sup>[6]</sup>。

应用有限元分析软件ABAQUS 6.4,在建立好的三维有限元模型上,根据材料力学参数,模拟不同调和比例的基底材料垫底盖髓,复合树脂Z100 (3M ESPE公司,美国)充填,基底材料的厚度设定为1 mm,树脂厚度为3 mm,参照成人下颌第一恒磨牙所受生理性殆力<sup>[7]</sup>,在殆面中央窝处垂直静态加载250 N的力,分析牙体、充填材料、基底材料的应力分布状况,获得最大主应力、最小主应力、最大 Von Mises应力分布的部位及大小。

## 2 结果

### 2.1 不同调和比例的基底材料弹性模量和泊松比

不同调和比例的基底材料弹性模量和泊松比见表1、2。分别对按不同比例调和的3组光固化玻璃离子Vitrebond试样及化学固化氢氧化钙Dycal试样所测得的弹性模量值进行方差分析,结果表明,分别按1:1、3:4、4:3比例调和的光固化玻璃离子Vitrebond和化学固化氢氧化钙Dycal的弹性模量不同或不完全相同,其差异具有统计学意义( $P < 0.01$ )。

表1 不同粉液比调和的Vitrebond和Dycal的弹性模量值(MPa)

Tab 1 Elastic modulus of Vitrebond and Dycal with various mixing ratios(MPa)

试样 编号	Vitrebond弹性模量			Dycal弹性模量		
	1:1	3:4	4:3	1:1	3:4	4:3
1	3 857	3 569	3 617	285	314	278
2	3 620	3 385	4 146	299	331	293
3	3 593	3 526	3 898	322	345	242
4	3 802	3 248	4 023	330	357	256
5	3 417	3 358	3 960	305	377	284

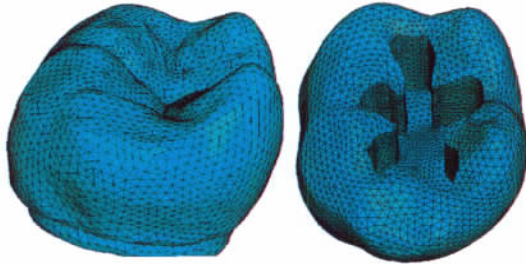
表2 修复材料及牙体组织的弹性模量和泊松比

Tab 2 Elastic modulus and poisson's ratio of tooth and restorative materials

材料	弹性模量(MPa)	泊松比
Vitrebond	1:1	3 658
	3:4	3 417
	4:3	3 929
Dycal	1:1	308
	3:4	345
	4:3	270
复合树脂 <sup>[8]</sup>	20 000	0.24
釉质 <sup>[9]</sup>	84 100	0.30
牙本质 <sup>[9]</sup>	18 600	0.30

### 2.2 建立下颌第一恒磨牙 I 类洞的三维有限元模型

建立了具有良好力学相似性和几何相似性的下颌第一恒磨牙 I 类洞的三维有限元模型，单元类型为四面体C3D4，单元数132 848，节点数27 616(图1)。



左: 网格化图; 右: I 类洞殆面观

图 1 下颌第一恒磨牙三维有限元模型

Fig 1 Three-dimensional element model of first mandibular molar

### 2.3 不同模型牙体的峰值应力

材料的最大主应力和最小主应力是单元体内剪应力等于零的截面即主平面上的最大和最小正应力，是单元体内各截面上正应力的极值。

在本实验中牙体、充填体和基底材料的最大主应力均表现为拉应力(正号表示)，最小主应力表现为压应力(负号表示)，而Von Mises应力是基于Von Mises屈服准则，使材料处于塑性状态时的等效应力值。

由图2、3可见，灰色至蓝色区域，应力逐渐减小，表明改变垫底材料Vitrebond的粉液比或Dycal组份比，对牙体、充填体、垫底材料在生理性殆力作用下的最大主应力、最小主应力和最大Von Mises应力的大小和分布影响很小。牙体的峰值应力值均位于充填体交界处，充填体的最大主应力出现在与垫底材料交界处，其余两应力则在咬合附近；垫底材料最大主应力位于垫底材料内部，最小主应力和最大Von Mises应力则在充填体交界处。同时，由图2、3及表3可见，与Vitrebond垫底相比，Dycal垫底时牙体的峰值应力较大，高应力区面积也较大。

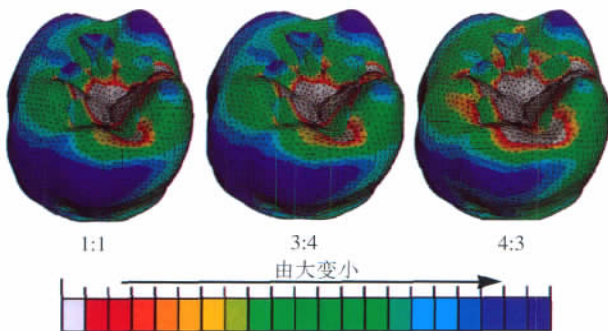


图 2 Vitrebond垫底, 复合树脂充填时的Von Mises应力分布

Fig 2 Von Mises stress distribution due to Vitrebond basing and composites filling

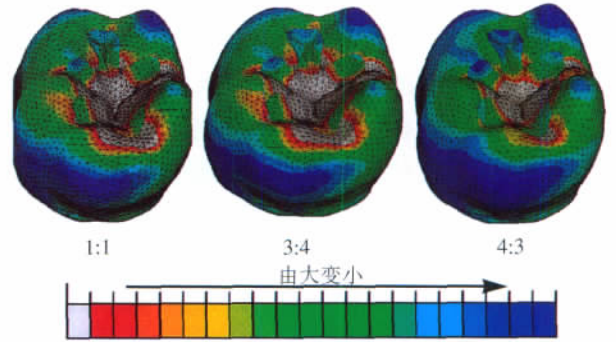


图 3 Dycal垫底, 复合树脂充填时的Von Mises应力分布

Fig 3 Von Mises stress distribution due to Dycal basing and composites filling

表 3 不同模型牙体的峰值应力(MPa)

Tab 3 Peak stress in tooth tissue of different models (MPa)

类型	Vitrebond峰值应力			Dycal峰值应力		
	1:1	3:4	4:3	1:1	3:4	4:3
最大主应力	21.99	22.29	21.68	28.92	28.79	29.05
最小主应力	-50.07	-51.45	-48.85	-114.48	-112.44	-116.25
最大Von Mises应力	36.74	37.85	35.97	108.13	106.17	109.78

### 3 讨论

本实验结果显示，按1:1、3:4、4:3比例调和的光固化玻璃离子Vitrebond的弹性模量之间差异具有统计学意义，并且随着粉液比的增加弹性模量有增加的趋势。其原因可能是固化后玻璃离子的刚性主要是由硅酸铝盐玻璃粉提供，当粉剂的量大于理想值时，调和物中的玻璃粉所占比例增大，凝固反应时生成的络合物将未反应的玻璃粉结合起来，使其刚性增强弹性减弱；而当液剂大于理想值时，高弹性模量的硅酸铝盐玻璃粉所占比例减少，而使材料的刚性减弱，弹性增加。

化学固化的氢氧化钙是双糊剂型，本实验中使用的氢氧化钙商品为Dycal，其催化剂的主要成分为氢氧化钙和赋型载体，基质剂的主要成分为螯合剂、磷酸钙、钨酸钙，将其催化剂和基质剂分别按1:1、3:4、4:3比例调和后测量试样的弹性模量之间差异具有统计学意义，并且随着催化剂所占比例的增加，材料固化后的弹性模量有减小的趋势。这可能是因为基质剂中的磷酸钙和钨酸钙的弹性模量大于催化剂中的赋型载体，并对固化后的氢氧化钙的弹性模量影响较大而造成的。

三维有限元分析常用的建模方法有手工建模法、半自动建模法及自动建模法。手工建模及半自动建模法是通过切片或磨片来得到每个层面的信息

再测绘出外形,因此,包埋料的选择,图像的拍摄、处理,边缘提取等环节都可能产生误差,难以精确地反映牙齿的实际情况,而且建模过程中要破坏标本。本实验采用的是自动建模法,即用CT扫描的方法收集牙齿各个层面的数据而不破坏标本牙,每个断层面的解剖结构清晰可辨,能较真实地代表原物的结构,具有实用、简单、快捷、误差小等优点。

目前常用的医用螺旋CT层厚只能达到300  $\mu\text{m}$ ,图像中釉质、牙本质的灰度值对比不明显,对牙体表面的细微结构几乎不能显示。本实验采用最小层厚为10  $\mu\text{m}$ 的Micro-CT机来扫描离体牙(本实验中设定的层厚为20  $\mu\text{m}$ ),共获得475张CT图片,最大限度地保留了牙齿的结构信息,并在图像处理和实体模型建立过程中一直采用DICOM格式,改善了CT图像的质量,提供了非常精细的组织密度信息,并充分利用了CT数据,避免了在文件格式转换过程中图像信息的偏差,使建立的模型更加接近真实的情况。

弹性模量和泊松比是材料的重要力学参数,在相同载荷下,弹性模量越高,产生的应力越小,应变越小。泊松比是在比例极限内,试样在单轴拉伸条件下横向应变与轴向应变之比,其差异也会影响材料内部及界面之间的应力分布。垫底材料对充填材料的支持主要取决于弹性模量,所以在选用不同的材料盖髓垫底时,由于材料之间弹性模量存在差异必然会产生不同的应力分布,出现应力集中的情况,而对牙齿充填修复产生影响。理想的基底材料应该与牙本质及充填体的弹性模量接近,在殆力作用下,不会产生高应力集中造成对牙体及充填体的破坏。

虽然在实验中测得的按不同粉液比/组份比调和的光固化玻璃离子和化学固化氢氧化钙的弹性模量不同且其差异具有统计学意义,但是其绝对值的差异较小,且泊松比接近,在有限元分析中,在充填材料、垫底材料厚度一定的情况下,对牙体、修复体和垫底材料应力影响很小。所以,在临床上,在一定范围内改变双组份光固化玻璃离子和化学固化氢氧化钙的调和比例不会影响I类洞充填术后牙齿的应力。

本实验结果也支持了Farah等<sup>[10]</sup>的观点,由于Dycal的弹性模量与牙本质和修复体相差最大,故不

能像刚性材料一样,将力平缓地消散至周围组织而在界面上产生较大的应力集中,引起复合树脂较大的变形,所以在采用Dycal单层垫底时牙体和充填体产生峰值应力较大。此结果也提示在临床操作中应避免在氢氧化钙盖髓后直接充填树脂材料,应再垫一层与牙本质弹性模量相近的垫底材料。在研究的基底材料中,Vitrebond的弹性模量较大,最接近于牙本质和充填体,所以采用Vitrebond单层垫底时,产生的峰值应力较小,应力分布最佳。

### [参考文献]

- [1] Billington RW, Williams JA, Pearson GJ. Variation in powder/liquid ratio of restorative glass ionomer dental cement used in dental practice[J]. Br Dent J, 1990, 169(6):164-167.
- [2] Fleming GJ, Marquis PM, Shortall AC. The influence of clinically induced variability on the distribution of compressive fracture strengths of a hand-mixed zinc phosphate dental cement[J]. Dent Mater, 1999, 15(2):87-97.
- [3] Fleming GJ, Farooq AA, Barralet JE. Influence of powder/liquid mixing ratio on the performance of a restorative glass-ionomer dental cement[J]. Biomater, 2003, 24(23):4173-4179.
- [4] 徐晓,孙哲,陶岚,等.不同设计的II类洞型对修复体应力的影响[J].中华口腔医学杂志,2002,37(6):446-448.  
XU Xiao, SUN Zhe, TAO Lan, et al. Effects of different class II cavity designs on stresses in restoration[J]. Chin J Stomatol, 2002, 37(6):446-448.
- [5] Lin CL, Chang CH, Ko CC, et al. Multifactorial analysis of an MOD restored human premolar using auto-mesh finite element approach[J]. J Oral Rehabil, 2001, 28(6):576-585.
- [6] Ausiello P, Apicella A, Davidson CL, et al. 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar restored with adhesive resin-based composites[J]. J Biomech, 2001, 34(10):1269-1277.
- [7] 皮昕.口腔解剖生理学[M].4版.北京:人民卫生出版社,2001:28, 209.  
PI Xin. Oral anatomy[M]. 4th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2001:28, 209.
- [8] Versluis A, Tantbirojn D, Pintado MR, et al. Residual shrinkage stress distributions in molars after composite restoration[J]. Dent Mater, 2004, 20(6):554-564.
- [9] 陈治清.口腔材料学[M].3版.北京:人民卫生出版社,2003:16.  
CHEN Zhi-qing. Dental materials[M]. 3rd ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2003:16.
- [10] Farah JW, Hood JW, Graig RG, et al. Effects of cement bases on the stresses in amalgam restorations[J]. J Dent Res, 1975, 54(1):10-15.

(本文编辑 汤亚玲)