

学校编码: 10384

分类号_____密级 公开

学号: 24520141153531

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

前路两种融合器治疗胸腰椎爆裂骨折术后 早期的有限元分析

Anterior two fusion cage for treatment of thoracolumbar
burst fracture with Finite Element analysis of the early
postoperative

丁罗兵

指导教师姓名: 丁真奇 教授

专 业 名 称: 外科学(骨外)

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 5 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

缩略词表

英文缩写	英文全称	中文名称
Mimics	Materialises Interactive Medical Image Control stysem	医学影响交互式控制系统
ANSYS		有限元分析软件
STL	Standard Template Library	标准模板库
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine	数字医学成像和通信标准
IGES	The Initial Graphics Exchange Specification	初始图形交换规范
CT	Computerized Tomography	计算机断层扫描

摘要

目的: (1) 建立正常脊柱胸腰椎 (T12-L2)、伤椎次全切除圆形融合器重建及伤椎后 1/3 切除矩形闸门式融合器重建三种三维有限元模型。(2) 对比既往胸腰椎三维有限元及体外生物力学研究验证本实验有限元模型的有效性。(3) 使用三维有限元分析方法对比分析前路传统次全切除圆形融合器重建及伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建治疗胸腰椎爆裂骨折术后早期的稳定性、终板界面应力及内植物应力分布情况。

方法: (1) 选取健康成年男性志愿者 1 名, 通过体检排除脊柱相关疾病。使用螺旋 CT 扫描胸腰椎 T12-L2 节段, 获得 DICOM 格式文件; 通过 Mimics 17.0 及逆向工程软件 Geomagic Studio13.0 进行三维重建, 获得 IGES 文件; 导入 ANSYS 软件进一步完善椎间盘、韧带等结构, 建立正常 T12-L2 节段有限元模型。(2) 在正常胸腰椎有限元模型基础上, 模拟行胸腰椎前路减压内固定术, 分别建立伤椎次全切除圆形融合器重建三维有限元模型及伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建三维有限元模型。(3) 在 ANSYS 软件中, 约束 L2 椎体下表面及下关节突; 对 T12 上方施加 500N 预载荷, 其中 T12 椎体上表面为 400N, 上关节突为 100N; 运动附加力矩为 7.5N/m, 使其产生前屈、背伸、左右侧弯、左右旋转及轴向压缩运动, 验证三维有限元模型的有效性, 并比较分析各工况下两种术后模型稳定性、邻近终板应力及内植物应力情况。

结果: (1) 建立的人体正常脊柱胸腰段 (T12-L2) 三维有限元模型, 模型活动度与既往研究相似, 说明本研究三维有限元模型建立方法准确可靠, 模型可用于进一步分析研究。(2) 伤椎次全切除圆形融合器重建三维有限元模型与伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建三维有限元模型比较, 两种模型稳定性相当, 两种融合器重建后均可维持脊柱稳定性; 伤椎次全切除圆形融合器重建三维有限元模型各工况下内植物及终板面应力峰值均高于伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建三维有限元模型。

结论: (1) 本研究采用 Mimics、Geomagic Studio、ANSYS 等软件可快速建立人体脊柱胸腰段 (T12-L2) 三维有限元模型。有效性验证说明该模型可以用于生物力学进一步模拟分析; (2) 伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建对维持脊柱稳定

性与伤椎次全切除圆形融合器效果相当；(3) 使用新型矩形融合器重建后，椎体邻近终板面及内植物应力峰值均下降，是一种较好的融合装置。

关键词：前路 胸腰椎 爆裂骨折 融合器 有限元分析

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Objective: (1) To establish three kinds of three-dimensional finite element models of normal spinal thoracic and lumbar vertebrae (T12-L2), subtotal corpectomy cylinder mesh cage reconstruction, and posterior 1/3 corpectomy rectangle cage reconstruction. (2) The validity of the finite element model was verified by comparing the past three dimensional finite element analysis and in vitro biomechanical study. (3) Comparative analysis using three-dimensional finite element method, the traditional anterior subtotal corpectomy cylinder mesh cage reconstruction and posterior 1/3 corpectomy rectangle cage reconstruction for the treatment of thoracolumbar burst fracture early postoperative stability, endplate interfacial stress and stress distribution in plants.

Methods: (1) Select 1 healthy adult male volunteers, through the examination to exclude spine related diseases. Access the DICOM format file by using of the spiral CT scanning of thoracolumbar segment T12-L2; three-dimensional reconstruction by Mimics 17 and the reverse engineering software Geomagic Studio13.0, obtained the IGES file into ANSYS software; further improve the intervertebral disc and ligaments, The finite element model of normal T12-L1 segment is established (model A). (2) Based on the finite element model of normal thoracic lumbar, thoracic and lumbar vertebrae simulation for anterior decompression and internal fixation, respectively establish subtotal corpectomy cylinder mesh cage reconstruction of three-dimensional finite element model and posterior 1/3 corpectomy rectangle cage reconstruction of three-dimensional finite element model. (3) In ANSYS software, Constrained L2 vertebral inferior surface and inferior articular process, 500N preload was applied above T12, the upper surface of T12 vertebral body was 400N, and the upper articular process was 100N; Additional moment of motion is 7.5N/m, to simulate the movement of flexion, extension, left and right lateral bending, left and right rotation and axial compression, validity of the three dimensional finite element model was verified, and The stability of two models, the stress near the endplate and the stress in the plant were compared.

Results: (1) This experiment successfully established normal human thoracolumbar spine (T12-L2) three-dimensional finite element model, and previous research activities similar to that model, a three-dimensional finite element model

established in this study method is accurate and reliable, the model can be used to further study. (2) Comparison of three dimensional finite element model of the subtotal corpectomy cylinder mesh cage reconstruction and the three-dimensional finite element model of the posterior 1/3 corpectomy rectangle cage reconstruction, The stability of the two models is similar, and the stability of the spinal column can be maintained after the reconstruction of the two kinds of fusion devices; Under different conditions, the peak value of the inner plant and the adjacent endplate surface of the three dimensional finite element model of the subtotal corpectomy cylinder mesh cage reconstruction was higher than Three dimensional finite element model of the posterior 1/3 corpectomy rectangle cage reconstruction.

Conclusion: (1) In this study, we use Mimics, Geomagic Studio, ANSYS and other software to quickly establish the three-dimensional finite element model of human thoracolumbar spine (T12-L2). The validity verification shows that the model can be used for further simulation analysis of Biomechanics. (2) To maintain the stability of the spine, the posterior 1/3 corpectomy rectangle cage reconstruction with the same effect as subtotal corpectomy cylinder mesh cage reconstruction. (3) After using a new rectangular fusion device to reconstructive, the peak value of the stress of the adjacent vertebral endplate and the inner plant decreased, which is a better fusion device.

Keywords: Anterior approach, Thoracolumbar spine, Burst fracture, Fusion cage, Finite element analysis

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
目录.....	V
前言.....	1
实验材料与实验方法.....	4
一、实验材料.....	4
1. 实验对象.....	4
2. 实验设备.....	4
二、实验方法.....	4
1. 正常胸腰椎 T12-L2 节段三维有限元模型的构建.....	4
2. 次全切除圆形融合器重建与伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建三 维有限元模型的构建.....	5
3. 边界条件与载荷加载.....	6
4. 观察指标.....	6
实验结果.....	17
讨论.....	58
结论.....	63
文献综述.....	68
致谢.....	80

CONTENT

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Contents	V
Introduction	1
Materials and methods	4
一、 Materials	4
1.Experimetal objects	4
2. Experimetal equipment	4
二、 Methods	4
1. Construction of three dimensional finite element model of normal thoracolumbar T12-L2 segment	4
2. Construction of 3D FEM of rectangle cage reconstruction and cylinder mesh cage reconstruction	5
3. Boundary conditions and loading	6
4. Observation index	6
Experimental result	17
Discussion	58
Conclusion	63
Reviewed	68
Thanks	80

前 言

胸腰椎是脊柱结构中稍向后凸的胸椎与稍向前凸的腰椎之间移行区域，为脊柱生理性弯曲的交汇区，是脊柱生理性应力集中部位，该区域是脊柱损伤的多发部位，占脊柱损伤的60%^[1]。胸腰椎爆裂骨折大多是高能量损伤造成，约占整个胸腰椎损伤的10%至20%^[2,3]，爆裂骨折破坏了前中柱的正常承载功能，骨折块挤压神经，造成神经功能障碍。对于严重胸腰椎爆裂骨折，保守治疗难以获得满意疗效，手术治疗是首先考虑的方式^[4]。其中前路手术是目前治疗胸腰椎爆裂骨折重要方法之一^[5,6]。生物力学研究表明，椎体前中柱是脊柱主要承载区；前路内植物安装在脊柱负重线上，起到了支持带的作用^[7]，植骨融合对于恢复前中柱正常承载也十分重要；前路手术可于术中直视下彻底减压，为术后神经功能的恢复创造良好的条件，并且可直接固定矫正畸形；另外，前路手术不损伤脊柱后部复合体，对于维持脊柱的稳定性也十分有利。

前路手术术中减压，并通过融合器或人工椎体重建伤椎前中柱的承载作用，是胸腰椎爆裂骨折手术治疗的关键，有利于恢复伤椎的即时稳定性^[8]，手术治疗的最终目的是实现伤椎融合，恢复脊柱正常承载，解除周围结构对神经的挤压。传统前路手术采用伤椎次全切除圆形融合器重建伤椎，随着该项技术运用的增多，椎体终板塌陷、伤椎融合不确切等问题逐渐引起临床医生的重视，并成为影响胸腰椎爆裂骨折疗效的重要因素之一^[8]。据既往文献报道，终板塌陷的发生率在19.6%–75%之间^[9]，平均塌陷程度可高达8–10mm^[10]，并可导致术后疼痛^[11]，后凸畸形矫正角度丢失^[12,13]，融合失效^[14]，甚至内固定物断裂^[15]等相关并发症，最终影响胸腰段椎体爆裂骨折手术治疗的疗效。

传统标准的前路手术行椎体次全切时需要去除伤椎的大部分骨质，常常造成较多的出血及更长的手术时间，风险大，创伤大。同时，由于椎体血运破坏大，圆形融合器笼内植骨量有限，远期融合效果不确切。为降低前路手术终板塌陷率，提高融合效果，提高胸腰椎爆裂骨折治愈率，克服传统前路手术以上缺陷，本课题组对传统伤椎次全切除进行改进，提出伤椎有限切除观点，并自主研发设计矩形闸门式融合重建装置（中国发明专利号：201010607719.3）（图1）。使用该融合装置，术中仅需切除伤椎后1/3骨质，融合器放于椎体后部。保留伤椎大部分

结构，并且闸门式的设计可笼内外同时植骨，大大增加植骨量，同时避免碎骨块落入椎管造成进一步神经损害。

既往体外生物力学实验表明，使用该装置进行重建，可实现完整脊柱类似刚度^[16]，临床随访研究也表明，使用伤椎有限切除矩形闸门式融合器重建，伤椎融合率提高，同时也有利于降低伤椎临近节段终板塌陷率。前期研究表明使用该装置行前路减压内固定是治疗胸腰椎爆裂骨折的一种创新性方法。然而，该方法相对于传统前路行伤椎次全切除圆形融合器重建降低塌陷率的原因尚不明确，仍需进一步研究，并且该方法治疗胸腰椎爆裂骨折是否与传统伤椎次全切除圆形融合器重建具有相同的有效性，也需进一步验证。

自1974年，Belytschko^[17]首次使用有限元分析方法分析脊柱生物力学问题，标志着有限元分析方法在骨科生物力学分析中应用的开端^[18]。有限元分析方法的基本原理是将结构复杂的对象离散简化成为有限个数的单元，分析每一个单元的特性并建立其物理量之间的联系，然后依据单元与单元间的联系，将各单元组装成整体以获得一整体方程，再通过多种方程式求解，从而完成对整个问题的分析过程。它通过有限单元、节点、自由度等实验条件控制，用计算机模拟人体体内情况。随着数字骨科的进一步发展，有限元分析法在脊柱生物力学中的应用日渐增多^[19]。随着现代计算机技术的飞跃式发展，有限元分析方法在骨科领域中的应用也越来越精确、广泛^[20]，目前有限元分析法已经成为骨科生物力学中不可缺少的重要研究方法之一。

胸腰椎爆裂骨折机制复杂，由于难以建立有意义的动物模型和尸体标本，传统生物力学研究远远不能满足实验需要，有限元分析法是使用计算机模拟体外标本生物力学实验的一种新型方法，是对传统标本生物力学研究的补充和创新。相对于传统的标本生物力学研究，有限元法具有更经济、可重复性强、可操作性大等优势。通过有限元方法模拟前路减压内固定可了解患者术后 Von Mises 应力分布，不仅可明确脊柱应力分布规律，也可判断内植物与骨质之间载荷变化。有限元模拟研究能进一步发现应力集中部位分布规律，以便调整或更换内固定物^[21]，为内固定器械的改进及研发提供依据，也为治疗方案的制定提供一定的理论支持。本实验使用有限元分析方法，对比分析圆形融合器与矩形融合器用于治疗胸腰椎爆裂骨折的生物力学特性，通过了解重建后邻近节段终板及内植物应力情

况，探讨伤椎后 1/3 切除矩形闸门式融合器降低终板塌陷发生率的原因。

厦门大学博硕士论文摘要库

实验材料与实验方法

一、实验材料

1. 研究对象

选取一名健康成年男性志愿者，25岁，身高175cm，体重70kg，该志愿者已知情同意实验的相关事宜，并且签署知情同意书，通过严格的体格检查排除脊柱及其他相关疾病史。利用螺旋CT机对已纳入志愿者的胸腰椎（T12-L2）进行扫描，扫描厚度为0.65mm，共获取三维CT图像147张。扫描得到的图像直接存入CT机，并且刻录成为DVD光盘，以DICOM文件格式保存，从而得到了表示胸腰椎断层截面的图像。

2. 实验设备

德国西门子64排螺旋CT机，扫描条件：电压120Kv，电流250mA（厦门大学附属东南医院提供）

计算机工作站：联想小新300工作站，CPU：（英特尔）Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz，硬盘：700G，内存：12G，显卡：独立，AMD Radeon(TM) R5 M330。

建模软件 Mimics17.0（Materialise 公司，比利时）

Geomagic studio 2013（Raindrop Geomagic 公司，美国）

ANSYS（ANSYS 公司，美国）

分体式锁定板棒及融合器的参数等资料，均由厦门大博医疗器械生产有限公司提供。

二、实验方法

1. 正常胸腰椎 T12-L2 节段三维有限元模型的构建

1.1 根据扫描 CT 数据生成胸腰椎（T12-L2）三维几何模型

将扫描得到的胸腰椎原始数据 DICOM 格式文件导入三维重建 Mimics 软件中，Mimics 能自动生成矢状位和横断位以及冠状位视图，这三个视图可相互关联，通过鼠标可快速定位（图 2）。不同组织灰度值不同，可通过 Mimics 软件中阈值

分割功能选项提取骨组织, 并生成蒙版(图 3)。通过 Mimics 软件工具 Edit Masks 修补与擦除蒙版去除肋骨等其他影像, 最终获得胸腰椎 T12-L2 影像, 并通过软件中 Caculate3D 功能选项, 生成胸腰椎 T12-L2 骨骼组织的三维几何模型。然后通过 Wrap 功能填补模型小的空隙, 用 Smoothing 命令对模型进行初步的平滑处理(图 4), 生成的胸腰椎(T12-L2)三维几何模型并以 STL 格式导出并保存。

1.2. 胸腰椎(T12-L2 节段)三维几何模型的面网格划分

将 Mimics 软件导出的胸腰椎(T12-L2)三维几何模型 STL 格式文件进一步导入 Geomagic studio 中, 对三维几何模型进一步降噪、光滑、简化(图 5), 在 Geomagic studio 精确曲面中, 通过编辑轮廓线、构造曲面片、构造格栅、拟合曲面等操作, 完成对胸腰椎(T12-L2 节段)三维几何模型的面网格划分(图 6)。模型以 IGES 格式文件导出并保存。

1.3. 胸腰椎(T12-L2)三维几何模型构建椎间盘、体网格化、构建韧带并赋予不同组织结构相应的材料属性

将面网格划分后得到的 IGES 格式文件导入到有限元分析 ANSYS 软件中, 生成 T12-L2 三维实体模型(图 7)。根据面网格化结果, 通过 ANSYS 中建模功能, 构建 T12-L1 以及 L1-L2 节段椎间盘(图 8-1、8-2), 椎间盘构建过程中须控制髓核结构处于椎间盘中间稍偏后, 髓核体积约占整个椎间盘体积的 43%。

对模型进行自由体网格划分, 网格划分采用四面体 8 节点 solid185 单元, 获得单元 231086 个及节点 43429 个。体网格划分后, 为保证小关节面在脊柱中的正常作用, 使用接触单元处理相邻小关节, 定义为自由滑动, 摩擦因数为 0.01。根据解剖书籍记载, 明确椎体周围韧带结构的解剖位置及横截面积等数据, 添加相关韧带(前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带、囊韧带以及横韧带), 韧带结构采用 LINK180 单元模拟。最后, 根据既往研究文献记载^[22-25], 赋予不同结构相应材料属性(表 1), 完成正常脊柱三维有限元模型的构建(图 9-1、9-2)。

2. 次全切除圆形融合器重建以及伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建两种三维有限元模型的构建

2.1. 分体式锁定板棒系统、圆形融合器以及矩形融合器模型的构建

在 Ansys 软件中, 利用其建模功能, 根据大博公司提供的内固定物参数, 构

建圆形融合器、矩形融合器及分体式锁定板棒（图 10、11），根据实际情况我们对内固定模型进行适当简化，以便模型能适应有限元分析的要求。

2.2. 两种融合器重建术后模型的构建

在 ANSYS 软件中对正常脊柱模型模拟行 L1 椎体次全切除以及椎体后 1/3 切除，其中次全切除模型椎体采用分体式锁定板棒+圆形融合器重建，椎体后 1/3 切除采用分体式锁定板棒+矩形融合器重建，在 ANSYS 中使用布尔运算功能完成内固定与椎体的结合，螺钉与椎体的关系定义为牢固固定，分体式锁定板棒系统为一体化结构（图 12，13）。

对模型进行自由体网格划分，体网格划分同样采用四面体 8 节点 solid185 单元，其中圆形融合器组获得单元 209858 个及节点 44556，矩形融合器组获得单元 233139 个及节点 48920。定义小关节为滑动接触，添加周围韧带等操作，赋予材料属性，残余椎体赋予伤椎材料属性（表 1）。完成次全切除圆形融合器重建与伤椎后 1/3 切除矩形融合器重建两种前路术后三维有限元模型的构建（图 14、15）。

3. 边界条件与载荷加载

约束 L2 椎体下表面及小关节节点各个方向自由度为 0，于 T12 椎体上表面加载 500N 预载荷（其中椎体占 85%，小关节占 15%^[26]），作用力均匀分布于各节点，为模拟模型行前屈、背伸、左右侧弯、左右旋转及轴向压缩运动，予加载 7.5Nm 运动附加力矩。

4. 观察指标

4.1. 有限元建模方法有效性的验证

获得正常胸腰椎（T12-L2）三维有限元模型在前屈、背伸、左右侧弯工况下活动度，与既往文献报道及体外生物力学实验对比。

4.2. 对比两种融合器重建术后模型

获得模型在前屈、背伸、左右侧弯、左右旋转及轴向压缩运动情形下，两种融合器重建术后模型分体式锁定板棒位移峰值，比较各运动情形下两种融合器重建术后模型脊柱的稳定性；记录模型在前屈、背伸、左右侧弯、左右旋转及轴向压缩运动情形下，两种融合器重建术后三维有限元模型分体式板棒、融合器应力峰值以及 T12 下终板面、L2 上终板面的应力峰值（Von Mises 应力）。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库