

构建强直性脊柱炎后凸畸形的三维有限元模型

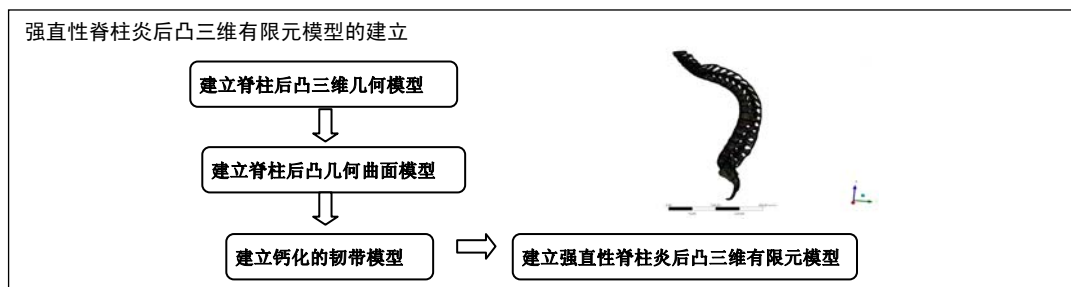
李 辉, 马俊毅, 马 原, 朱 旭(新疆医科大学第六附属医院脊柱外科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002)

引用本文: 李辉, 马俊毅, 马原, 朱旭. 构建强直性脊柱炎后凸畸形的三维有限元模型[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(7):1069-1073.

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.2017.07.016

ORCID: 0000-0001-7422-1154(李辉)

文章快速阅读:



李辉, 男, 1984年生, 山西省临汾市人, 汉族, 新疆医科大学在读硕士, 主要从事脊柱外科的研究。

通讯作者: 马原, 硕士, 副教授, 新疆医科大学第六附属医院脊柱外科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002

中图分类号:R318

文献标识码:B

文章编号:2095-4344

(2017)07-01069-05

稿件接受: 2016-11-15

文题释义:

有限元模型的建模方法: 由节点和元素构成的有限元模型与机械结构系统的几何外型基本是一致的。有限元模型的建立可分为直接法和间接法(也称实体模型 Solid Modeling), 直接法为直接根据机械结构的几何外型建立节点和元素, 因此直接法只适应于简单的机械结构系统。反之, 间接法适应于节点及元素数目较多的复杂几何外型机械结构系统。该方法通过点、线、面、体积, 先建立有限元模型, 再进行实体网格划分, 以完成有限元模型的建立

强直性脊柱炎: 是一种主要侵犯脊柱, 并累及骶髂关节和周围关节的慢性进行性炎性疾病。本病又名 Marie-strümpell 病、Von Bechterew 病、类风湿性脊柱炎、类风湿中心型等, 现称强直性脊柱炎。由于本病也可侵犯外周关节, 并在临床、放射线和病理表现方面与类风湿关节炎相似, 故长时间以来一直被看成是类风湿关节炎的一种变异型, 称为类风湿性脊柱炎。鉴于强直性脊柱炎患者不具有 IgM 类风湿因子(血清阴性), 以及它在临床和病理表现方面与类风湿关节炎有明显不同, 所以 1963 年美国风湿病学会(ARA)终于决定将两病分开, 以“强直性脊柱炎”代替“类风湿性脊柱炎”。

摘要

背景: 完整的三维有限元模型不仅可以建立逼真的立体模型, 进行术前规划, 并且还可以在模型上进行模拟截骨, 分析生物力学, 以期达到指导临床手术的作用。

目的: 建立强直性脊柱炎后凸三维有限元模型, 为后续的一系列研究提供有效的数字化平台。

方法: 选取 1 例 30 岁强直性脊柱炎后凸病例 C₁ 至骶尾骨的 CT 断层图像, 将 CT 数据输入 Mimics 17.0 医学三维重建软件中, 建立脊柱后凸三维几何模型。再将几何模型导入 Geomagic Studio 2013 软件中, 对三维几何模型进行后续优化图像处理, 生成修复后的脊柱后凸几何曲面模型。使用 Unigraphics NX 8.5 导入建立的脊柱后凸曲面模型, 建立钙化的韧带模型, 切除部分无用的骶骨模型, 最后导入 ANSYS 15.0 有限元分析软件中, 设置材料参数, 生成完整的强直性脊柱炎后凸三维有限元模型。

结果与结论: 成功建立了完整强直性脊柱炎后凸三维有限元模型, 包括 10 节点四面体单元 398 370 个, 668 538 个节点。为下一步的生物力学分析提供了可靠的数字化平台。

关键词:

骨科植入物; 脊柱植入物; 强直性脊柱炎; 后凸畸形; 生物力学; 有限元分析; 国家自然科学基金

主题词:

脊柱炎, 强直性; 脊柱后凸; 生物力学; 有限元分析; 组织工程

基金资助:

国家自然科学基金(81360280)

Establishment of a three-dimensional finite element model of ankylosing spondylitis kyphosis

Li Hui, Ma Jun-yi, Ma Yuan, Zhu Xu (Department of Spine Surgery, Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract

BACKGROUND: The full three-dimensional finite element model can not only establish a realistic three-dimensional model, but also can simulate the osteotomy on the model. Analysis of biomechanics guides the clinical operation.

OBJECTIVE: To establish a three-dimensional finite element model of ankylosing spondylitis kyphosis and

Li Hui, Studying for master's degree, Department of Spine Surgery, Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Corresponding author: Ma Yuan, Master, Associate professor, Department of Spine Surgery, Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

provide an effective digital platform for further studies.

METHODS: A 30-year-old male patient with ankylosing spondylitis kyphosis participated voluntarily in the current study. CT images obtained from CT transverse scanning from C1 to the sacrococcyx were imported into Mimics 17.0 software to establish a three-dimensional geometric model of the posterior spine. The geometric model was then imported into Studio Geomagic 2013 software. For the subsequent optimization of image processing, the posterior spine convex geometry was established on the three-dimensional geometric model. We used Unigraphics NX 8.5 to establish the spinal kyphosis surface model, then added modeling of calcification of the ligaments, partial resection of useless sacral bone, and finally, imported the model into ANSYS 15.0 finite element analysis software, then added the ligaments and set the parameters of the material, generating a complete three-dimensional finite element model of ankylosing spondylitis.

RESULTS AND CONCLUSION: A three-dimensional finite element model of complete ankylosing spondylitis was successfully established. Using the ten-node approach, we generated 398 370 tetrahedral elements, and 668 538 nodes. This will provide a reliable digital platform for the next step of biomechanical analysis.

Subject headings: Spondylitis; Ankylosing; Kyphosis; Biomechanics; Finite Element Analysis; Tissue Engineering

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 81360280

Cite this article: Li H, Ma JY, Ma Y, Zhu X. Establishment of a three-dimensional finite element model of ankylosing spondylitis kyphosis. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2017;21(7):1069-1073.

0 引言 Introduction

强直性脊柱后凸是强直性脊柱炎的严重并发症, 它不仅在外观上造成人体严重后凸畸形、还伴有活动受限、人体平视障碍, 同时会产生严重的脏器受压^[1]。强直性脊柱炎后凸畸形往往需要手术矫正治疗^[2-3], 国内的一些学者对于手术方式的选择, 有很多尝试^[4-7], 同时手术方式的选择往往存在很大争议, 也是困扰脊柱外科医生的一大难题。随着现代医学成像技术的发展, 人们通过计算机X射线断层扫描(CT)、核磁共振成像(MRI)可以得到人体的二维图像, 但是无法得到立体的三维视觉, 而从20世纪70年代起, 有限元法的出现填补了人体三维建模以及分析生物力学领域的空白, 并且在医学领域最先应用的是脊柱外科。完整的三维有限元模型不仅可以建立逼真的立体模型, 进行术前规划, 并且还可以在模型上进行模拟截骨, 分析生物力学, 以期达到指导临床手术的作用。

研究采集强直性脊柱炎后凸志愿者CT断层图像, 应用计算机辅助工程软件(Mimics 17.0、Geomagic Studio 2013、Ansys workbench 15.0)建立了结构完整的强直性脊柱炎后凸三维有限元模型, 为进一步的脊柱后凸生物力学分析提供了可靠的模型基础。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 有限元模型的建立。

1.2 时间及地点 2015年10月至2016年5月在新疆医科大学第六附属医院完成。

1.3 对象 于新疆医科大学第六附属医院脊柱外科选取1例强直性脊柱炎后凸志愿者, 30岁, 身高172 cm, 体质量75 kg, 拍摄脊柱全长正侧位片和磁共振扫描, 排除脊柱及脊髓其他异常, 结合病史确诊为强直性脊柱炎后凸畸形。

1.4 主要仪器和软件

1.4.1 硬件条件 Dell Precision T7600 台式工作站: TOSHIBA/Aquilion ONE 320排动态容积CT。

1.4.2 软件条件 Mimics 17.0用于CT数据重建, 生成医学模型的三角面片结构, 输出数据在PC机上进行数据的转

换处理。Geomagic Studio 2013读入Mimics 17.0输出的数据, 对模型数据进行封装、错误检查及优化, 并重建Nurbs曲面模型。NX 8.5调整各部件之间的位置关系, 分割模型, 装配内固定模型, 进行手术模拟操作。Ansys workbench 15.0用于材料赋值, 施加载荷, 接触关系设定, 网格划分, 完成三维有限元模型的建立及分析。

1.5 方法

1.5.1 CT数据的获取 通过TOSHIBA/Aquilion ONE 320排动态容积CT行薄层扫描, 共获取间隔1 mm, 重建厚度0.5 mm, 平面分辨率512×512, 每像素0.873 mm的二维断层图像2 434张, 保存为DICOM格式的文件。

1.5.2 CT断层图像的三维重建 应用Materialise公司的Mimics17医学专业三维重建软件中的Import Image命令导入以 DICOM 格式保存的 CT影像, 手动设置冠状位与矢状位。图像(图1)中可见不同组织有不同的灰度值, 但各结构之间的灰度突变不明显, 故需增强CT图像并调整CT断层图像的阈值参数。先调整图像的阈值(Thresholds)为Min: 1 250, Max: 8 525(图2)建立各个椎体的Mask层, 利用Edit Masks中的Erase命令擦去无关的影像数据, 从而获得所需的各个椎体图像, 运用Calculate 3D 命令初步建立各个椎体的三维模型(图3)。把初步建立好的各个椎体模型导出stl格式保存。

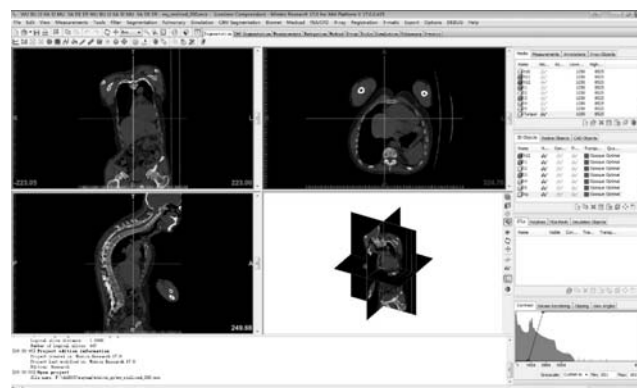


图1 Mimics 导入的 CT 影像

Figure 1 CT images introduced by Mimics

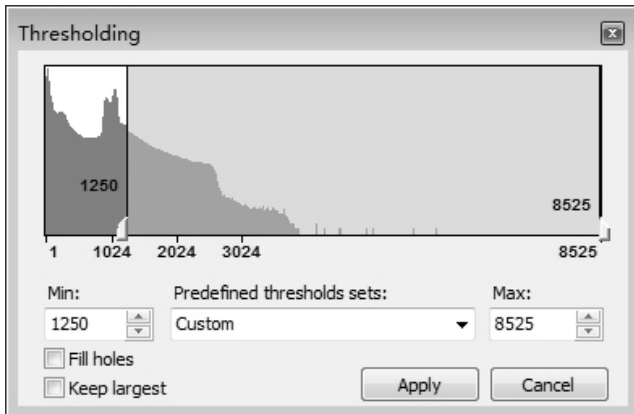


图2 椎体阈值图

Figure 2 Vertebral threshold



图3 初步椎体三维模型
Figure 3 Initial vertebral
three-dimensional model

1.5.3 脊柱模型的曲面重建 将stl格式的模型导入到Geomagic Studio 2013软件中, 检查模型的交错面、细小通道、噪点等, 并修复三角面片的网格结构, 利用平滑功能优化表面, 消除尖锐边, 使模型有利于后期的有限元建模利用曲面重建功能建立各部件的NURBS曲面, 所得脊柱曲面模型以.iges文件格式保存(图4)。



图4 脊柱曲面模型
Figure 4 Spine curved
surface model

1.5.4 UG NX8.5建立脊柱实体模型 导入建立的脊柱曲面模型, 生成脊柱的实体模型, 利用软件的实体功能切除部分无用的骶骨实体模型, 在C₁顶部建立载荷平面, 以方便受力情况的设置, 使用曲线和草图功能, 建立连接椎体之间的钙化韧带模型。完成强直性脊柱炎后凸三维模型的建立。

1.5.5 三维有限元模型的建立 将所建立的强直性脊柱炎后凸三维模型导入有限元软件Ansys workbench 15.0中, 进行有限元网格划分, 并查阅文献添加椎间盘及韧带结构, 由于强直性脊柱炎后凸患者椎间盘, 韧带严重骨化^[8], 故采用同皮质骨相同的材料参数, 最终生成完整的强直性脊柱炎后凸三维有限元模型。

1.5.6 材料性质的设定 见表1。

表1 脊椎、椎间盘及韧带材料参数^[9-11]Table 1 Parameters of spine, intervertebral disc and ligament^[9-11]

结构	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	1 200	0.3
松质骨	500	0.2
椎间盘	1 200	0.3
韧带	1 200	0.3

2 结果 Results

成功建立了强直性脊柱炎后凸三维有限元模型(图5), 包括 7个颈椎, 12个胸椎, 5个腰椎, 骶尾骨, 椎间盘及脊柱韧带。该模型共划分十节点四面体单元398 370个, 668 538个节点。



图5 建立的强直性脊柱炎后凸三维有限元模型
Figure 5 Three-dimensional finite
element model of ankylosing
spondylitis kyphosis

3 讨论 Discussion

强直性脊柱炎后凸是一种复杂的三维空间内的畸形, 包括矢状面上脊柱1个或数个节段后凸, 形成后方弯曲; 矢状面胸椎生理性后凸和腰椎生理性前凸的减少^[12-14]; 由于其具有复杂的三维空间结构, 凭借计算机X射线断层扫描(CT)获得的二维空间结构不能全面的展现给脊柱外科医师, 并且由于标本的缺乏, 无法在人体上进行有效的实验验证, 而动物标本又和人体差距较大, 而有限元法的出现填补了这一领域的空白。

3.1 有限元法在医学领域中的应用 有限元分析法是数值计算中的一种离散化方法, 是矩阵力学和弹性力学等领域中的发展及应用, 而有限元分析法与现代脊柱外科相结合给脊柱外科带来了飞速发展。Belytschko等^[15]首先在1974年将有限元分析法应用于脊柱外科生物力学研究, Aubin等^[16]则首次在脊柱侧凸的研究中使用有限元分析法, 进入21世纪以后, 有限元分析法在脊柱外科领域得到了快速发展, Pitzenh等^[17]和Sadegh等^[18]在2000年将有限元法应用于颈椎研究。由于人体脊柱解剖结构、负荷分布、生物力学等方面的复杂性, 以往的实验难以获得全面的信息。采用有限元法可以用数学形式概括脊柱的结构, 材料性能, 负荷边界条件, 通过改变其中参数观察对于整体的影响, 了解脊柱在生理和病理过程中的力学变化, 并且计算机模拟的条件更接近正常、结果更加可信, 不仅能逼真的模拟椎骨、椎间盘, 还能将周围的韧带, 肌肉加入模型, 而且还能将外在负荷及植入物加入模型, 进行各项生物力学测试。有限元法目前已经成为研究脊柱生物力学变化非常重

要的工具。

3.2 建模特点 研究基于逆向工程原理,采用TOSHIBA/Aquilion ONE 320排动态容积CT行薄层扫描,获取强直性脊柱炎后凸志愿者CT间隔1 mm,重建厚度0.5 mm扫描数据,利用Mimics 17.0软件,生成医学模型的三维结构,将模型导入到Geomagic Studio 2013进行进一步修改,使用Unigraphics NX 8.5进行模型的分割装配,实现模拟手术操作,ANSYS 15.0 软件建立最终有限元模型。

本次建模所采用的仪器是国内最先进的320排螺旋CT,重建厚度仅0.5 mm,辐射量与64排区别不大^[19],320排只是减少了扫描时间,缩短扫描时间间隔。正是基于320排CT的强大优势,使得建立的三维模型与人体几无差异,而所建立的强直性脊柱炎三维有限元模型外观逼真,和人体极为相似,其次所采用的三维建模软件Mimics 17.0是国际上主流的建模软件,它能输入各种扫描的数据(CT、MRI),建立3D模型进行编辑,然后输出通用的CAD(计算机辅助设计),建立逼真的3D实体模型,后续还可导入ANSYS软件中进行有限元分析,对后凸模型进行不同的约束和加载用以模拟人体的不同状态,得出人体在不同状态下的生物力学,ANSYS 15.0是一款强大的三维有限元分析软件,其功能强大,操作简便,已成为国际上最流行的有限元分析软件。

3.3 研究的不足之处 由于强直性脊柱炎后凸结构三维十分复杂,并且其韧带及椎间盘严重骨化,使得其材料属性的设定产生影响,因为缺乏国内外强直性脊柱炎后凸的实验数据,模型的材料参数均选自相似的数据,因韧带、椎间盘骨化严重,故采用与椎体相同的参数,致使模型的力学相似性难免受到一定的影响。

3.4 研究的应用前景 人体脊柱解剖结构十分复杂,而强直性脊柱炎后凸畸形是在正常结构上的变异,无论是其二维还是三维结构,都与正常结构有着很大的差异,这也就导致了脊柱外科医师对手术的难度增加,而本研究利用医学建模软件Mimics17.0建立的后凸三维模型,与实体相比,其几何相似度高,并且还可以输出通用的CAD(计算机辅助设计),建立后凸3D实体模型。

强直性脊柱炎后凸畸形多采取手术矫正,截骨方式有很多种,如PSO、VCR/VCD术式^[20-22],传统的截骨设计多采用剪纸法^[23],拍摄患者术前站立位正侧位片,按照1:1拓展成纸样,分别测量颈,胸,胸腰和腰椎的Cobb角,找出截骨矫形最有效的位置,将纸张剪切,模拟矫形,测量颌眉角,确定最终截骨角度^[24-26],这是最直观,最传统的截骨设计方法,但是只能模拟矢状面,对于复杂的三维空间结构不能行之有效,而且也无法分析截骨以后的生物力学,而本研究建立的3D模型,其与实体相似程度高,并能更直观,更准确的反映病情,还可在实体模型上进行三维模拟截骨,测量,分析并制定手术方案,为截骨手术的精准化,个体化的实施提供依据,

研究另外一个重要的应用是有限元分析,近年来有限元分析在医学领域得到突飞猛进的发展,利用Mimics建立的医学模型可以直接输入到ANSYS有限元分析软件中,建立三维有限元模型,并在模型上(T₉-L₃)进行多种方式的模拟截骨,包括不同的截骨部位、截骨宽度、截骨节段数^[27-29],并且分别对不同模拟截骨的模型进行生物力学分析,包括截骨断端前移、后移、旋转的应力测试,多节段内固定加载负荷应力测试,研究不同的截骨部位不同的矫正度,同时对截骨后人体矢状位平衡参数的评估(即术前术后凸角-术后后凸角=预测矫正度=人体生理曲度)^[30]。最终基于大量的实验数据,通过统计学分析最终得出最佳的截骨部位及节段数,实现术前个体手术化技术的精确制定及预测,为脊柱外科医生提前进行术前演练,避免和减少术中出现失误提供了有利的条件。本研究创造性的使医学与信息科学有机结合,充分利用计算机技术的导入,使影像模型化,并可在模型上测试各种状态。

综上所述,研究只是在数字化骨科中的初步探索,而未来还将有许多未知的领域需要做进一步研究,相信在不久的将来,有限元分析法在脊柱外科乃至医学领域将会得到广泛应用。

作者贡献: 设计为第一作者,实施为全体,评估为第一作者和通讯作者。

利益冲突: 所有作者共同认可文章无相关利益冲突。

伦理问题: 试验方案患者知情同意。

文章查重: 文章出版前已经过 CNKI 反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

文章外审: 文章经国内小同行外审专家双盲外审,符合本刊发稿宗旨。

作者声明: 文章第一作者对研究和撰写的论文中出现的不端行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁,可接受核查。

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,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。根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享3.0”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] Braun J, Baraliakos X, Godolias G, et al. Therapy of ankylosing spondylitis-a review. Part I: Conventional medical treatment and surgical therapy. Scand J Rheumatol. 2005;34(2):97-108.
- [2] Zhang H, Zhou Z, Guo C, et al. Treatment of kyphosis in ankylosing spondylitis by osteotomy through the gap of a pathological fracture: a retrospective study. J Orthop Surg Res. 2016;11(1):136.
- [3] 李庆,曾勇,石化洋,等. 手术治疗强直性脊柱炎脊柱后凸伴髋关节强直并重度屈曲挛缩的效果观察[J]. 实用医院临床杂志, 2015, 12(5): 153-155.

- [4] Debarge R, Demey G, Roussouly P. Sagittal balance analysis after pedicle subtraction osteotomy in ankylosing spondylitis. *Eur Spine J*. 2011;20(5): 619-625.
- [5] Yıldız F, Akgül T, Ekinçi M, et al. Results of closing wedge osteotomy in the treatment of sagittal imbalance due to ankylosing spondylitis. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2016; 50(1):63-68.
- [6] Qian B, Jiang J, Qiu Y, et al. Radiographical predictors for postoperative sagittal imbalance in patients with thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis after lumbar pedicle subtraction osteotomy. *Spine*. 2013; 38(26): E1669-E1675.
- [7] Wang MY, Bordon G. Mini-open pedicle subtraction osteotomy as a treatment for severe adult spinal deformities: case series with initial clinical and radiographic outcomes. *J Neurosurg Spine*. 2016;24(5):769-776.
- [8] Behari S, Tungeria A, Jaiswal AK, et al. The "moustache" sign: Localized intervertebral disc fibrosis and panligamentous ossification in ankylosing spondylitis with kyphosis. *Neurology India*. 2010;58(5): 764.
- [9] Burstein AH, Reilly DT, Martens M. Aging of bone tissue: mechanical properties. *J Bone Joint Surg Am*. 1976;58(1): 82-86.
- [10] Shirazi-adl SA, Shrivastava SC, Ahmed AM. Stress Analysis of the Lumbar Disc-Body Unit in Compression A Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Study. *Spine*. 1984;9(2):120-134.
- [11] Shirazi-Adl A, Ahmed AM, Shrivastava SC. A finite element study of a lumbar motion segment subjected to pure sagittal plane moments. *J Biomech*. 1986;19(4):331-350.
- [12] 钱邦平,胡俊,邱勇,等.强直性脊柱炎胸腰椎后凸畸形患者生存质量与矢状面参数的相关性[J].*中华骨科杂志*, 2014, 34(9): 895-902.
- [13] 刘辉,郑召民,李思贝,等.脊柱-骨盆曲线和谐角在脊柱畸形矢状面评价中的应用[J].*中华骨科杂志*, 2014,34(8):831-838.
- [14] 宋凯,张永刚,郑国权. 强直性脊柱炎后凸畸形矫形前后生活质量与影像学参数分析[J].*中华骨科杂志*, 2012, 32(5):404-408.
- [15] Belytschko T, Kulak RF, Schultz AB, et al. Finite element stress analysis of an intervertebral disc. *Biomech*. 1974;7(3): 277-285.
- [16] Aubin C E, Describes J L, Dansereau J, et al. [Geometrical modeling of the spine and the thorax for the biomechanical analysis of scoliotic deformities using the finite element method][C]//*Annales de chirurgie*. 1994;49(8): 749-761.
- [17] Pitzen T, Pedersen K, Matthis D, et al. [Is the prediction of initial stability of cervical spinal osteo-synthesis possible using a finite element model?]. *Zentralbl Neurochir*. 1999;61(3): 133-137.
- [18] Sadegh AM, Tchako A. Vertebral stress of a cervical spine model under dynamic load. *Technol Health Care*. 2000;8(2): 143-154.
- [19] Pan YN, Li AJ, Chen ZQ, et al. Improved image quality and decreased radiation dose of lower extremity computed tomography angiography using low-tube-voltage and adaptive iterative reconstruction. *J Comput Assist Tomogr*. 2016;40(2): 272-276.
- [20] 吴继彬,郭开今,袁峰,等.经腰椎弓根椎体截骨术治疗强直性脊柱炎后凸畸形[J].*中国矫形外科杂志*, 2015, 23(23): 2128-2132.
- [21] 陈志明,杨滨,马华松,等.双椎体截骨术矫正强直性脊柱炎重度胸腰椎后凸畸形[J].*中国脊柱脊髓杂志*, 2014, 24(4): 326-332.
- [22] 林斌,张毕,许洋,等.脊柱去松质骨化截骨术治疗强直性脊柱炎并脊柱后凸畸形[J].*临床骨科杂志*, 2014, 17(3): 241-244.
- [23] Van Royen B J, De Gast A. Lumbar osteotomy for correction of thoracolumbar kyphotic deformity in ankylosing spondylitis. A structured review of three methods of treatment. *Ann Rheum Dis*. 1999;58(7):399-406.
- [24] 宋凯,张永刚.强直性脊柱炎胸腰段后凸畸形矫形设计概述[J].*解放军医学院学报*, 2015, 36(5): 521-524.
- [25] 钱邦平,邱勇,潘涛,等.经椎弓根不对称截骨重建强直性脊柱炎胸腰椎侧后凸畸形患者双平面平衡[J].*中华骨科杂志*, 2015, 35(4):341-348.
- [26] 宋凯,张永刚,李杰静,等.肺门作为躯干重心对强直性脊柱炎胸腰段后凸畸形矫形的意义[J].*中国骨与关节杂志*, 2014, 3(10): 012.
- [27] 张文生,郑国前,邹国友,等.强直性脊柱炎胸腰椎骨折手术方法的选择[J].*中华创伤骨科杂志*, 2012, 14(9): 778-781.
- [28] 曾岩,仲强,郭昭庆,等.强直性脊柱炎后凸畸形的后路截骨矫形术及疗效分析[J].*中华外科杂志*, 2010, 48(16): 1234-1237.
- [29] 曹参,吴继功.后路脊柱截骨矫形术的临床应用进展[J].*实用骨科杂志*, 2013, 19(1): 44-47.
- [30] 尹刚辉,金大地,陈方尧,等.新的脊柱-骨盆矢状面测量参数:骶骨骨盆角的提出及意义[J].*中国脊柱脊髓杂志*, 2014, 24(8): 704-709.