

文章编号:1004-7220(2010)04-0302-06

有限元分析优化设计人工颈椎复合关节系统球窝关节

周江军, 雷伟, 吴子祥, 严亚波, 韩宝君

(第四军医大学西京医院 全军骨科研究所, 西安 710032)

摘要: 目的 对人工颈椎复合关节系统球窝关节进行优化设计。方法 建立人工颈椎复合关节系统的三维模型, 并采用有限元方法对其进行网格划分; 设置球窝零件球柄高度的尺寸的变化范围, 模拟假体系统在体负载情况; 对模型进行优化设计分析, 对不同尺寸特征的复合关节系统进行应力、应变分析, 并评价系统安全系数。结果 系统最大 Von mises 应力出现在该装置前屈位球柄和基底部相接处, 并随球柄高值增大, 最小安全系数呈近似抛物线变化。结论 综合考虑系统的稳定性和活动度需要, 认为当球柄高为 6.0 mm 时, 球窝关节结构最优。

关键词: 人工关节; 有限元分析; 计算机辅助设计; 优化设计; 颈椎复合关节

中图分类号: R318.01 文献标志码: A

Optimal design of ball-socket on artificial cervical joint complexity by finite element analysis

ZHOU Jiang-jun, LEI Wei, WU Zi-xiang, YAN Ya-bo, HAN Bao-jun (Department of Orthopedics, Xijing Hospital, the Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Objective To optimize the design of ball-socket of artificial cervical joint complexity. **Method** A three-dimension model of the artificial cervical joint complexity was constructed by the finite element method. The height range of the ball-socket handle in the model was set. A simulation was manipulated to optimize the height under the physical load. The stress and strain of the joint complexity with different sizes was analyzed and the systematic safety factor was also evaluated. **Results** The simulation showed that the maximum Von mises stress appeared at the joint of handle and bottom in the anteflexion position. As the height of the handle increased, the maximum strain increased, and the graph of minimum safety factor was Parabola curve. **Conclusions** Considering the systematic stability and mobility, when the height of handle is 6 mm, the design of ball-socket is considered to be optimal.

Key words: Artificial joint; Finite element analysis; Computer aided design; Optimal design; Cervical joint complexity

近年来,颈椎非融合技术的出现为脊柱疾患尤其是退行性疾病的外科治疗提供了一种新的选择。目前主要以人工椎间盘系统为主,临床常见的主要包括 Bryan 和 Prestige 人工椎间盘系统。研究认为,人工颈椎间盘置换可以保留手术节段和邻近节段椎间盘的正常活动度,因此有可能降低或避免远期邻

近节段退变加速^[1-3]。

而颈椎人工椎体置换一直停留在融合技术阶段。人工颈椎复合关节系统(Artificial Cervical Joint Complexity, ACJC)是由本研究所自行研制,用于重建颈椎椎体次全切除后颈椎稳定性并保留相邻椎体关节活动度的一种非完全融合装置。早期 ACJC 的设计原理来自于超半球窝关节,由上、下椎间盘,上、

收稿日期:2010-06-07; 修回日期:2010-07-11

作者简介:周江军(1981-),男,主治医师,研究方向:脊柱内固定的生物力学研究。

通讯作者:雷伟,教授,博士研究生导师, Tel: (029)84771011; E-mail: Leiwei@fmmu.edu.cn。

下超高分子量聚乙烯(UHMWPE)衬垫,中间主体共5部分组成,形成一组由2个超半球窝关节组成的人工颈椎复合关节系统^[4-5]。但是人颈椎的生理性活动度并非单纯倾斜角的改变,椎体还有前屈、后伸、左右侧屈等各方向0~2 mm的位移^[6]。

为解决这个问题,本文研发了新一代ACJC系统。材料采用的是医用钴铬钼合金,其设计原理来自于万向球窝滑槽关节,由上、下椎间盘,上、下球窝,上、下固定环,中间椎体及球形滑槽共7部分组成,形成一组由两个万向球窝滑槽关节组成的人工颈椎复合关节系统^[7]。通过初步的离体生物力学测试表明,该装置能够很好地模拟椎体间运动,植入后椎间活动度与对照组相比无显著性差异。但由于该装置球窝为滑槽关节,是应力集中部位,安全系数较低;其球窝柄部长度直接影响到球窝滑槽关节应力集中和安全系数高低的问题,需要改进该系统的设计。故寻找出合适的球窝柄部长度,使该关节最大应力数值最小、最小安全系数最大是本研究需要解决的问题。

计算机辅助优化设计^[8]给本研究提供了一个较好的解决方法。优化设计研究的主要内容是在保证模型约束条件的前提下,尽可能达到质量轻、体积小、形状合理及力学方面满足刚度、强度要求等目标条件。使用优化设计技术,结合该装置的临床需要,应用有限元分析方法,在球窝柄部长度允许范围内,实现安全系数最大作为目标,最终达到ACJC的球窝滑槽关节安全系数最大。

本研究中所采用的有限元分析软件Simulation是美国Solidworks公司旗下对静力、流体力学等很多方面进行模拟分析的一款软件,他基于所模拟材料材质的相关属性,在给定约束条件下对所分析物件的结构进行分析,模拟测试其结构合理性。

1 材料与方法

人工颈椎复合关节系统球窝滑槽关节的优化问题可以简化为:该系统由上、下椎间盘,上、下球窝关节,上、下固定环,中间椎体共7部分组成(见图1);球窝结构为上下关节的主体部分,尺寸特征如图2所示。在本实验中,将该装置定义为前屈、中立、后伸3种情况进行运算,前屈位即将上椎间盘、球窝及下椎间盘、球窝分别向前屈约7°,后伸位即将上椎

间盘、球窝及下椎间盘、球窝分别向后伸约7°。此时,球窝的球柄结构刚好与固定环以面接触,增加碰撞面积,减少磨损。并把球柄高度尺寸作为控制参数,参数名称为“球柄高”;当该参数为最小值时,上、下椎间盘结构在旋转过程中会与椎体边缘相碰撞,这是本装置不允许的。根据计算得出该临界尺寸为6.0 mm,其最大值不限;并满足系统的应力最小安全系数大于5。

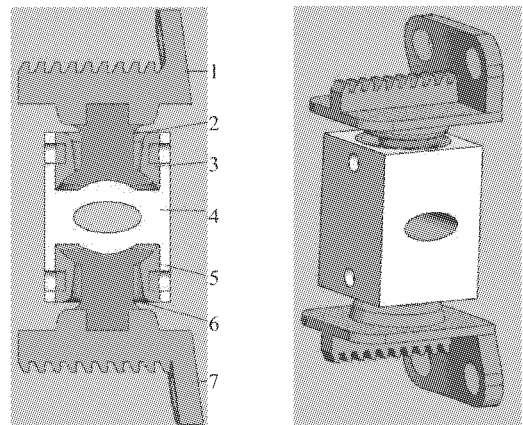


图1 ACJC系统剖面图及简化装配图(1上椎间盘,2上球窝,3上固定环,4椎体,5下固定环,6下球窝,7下椎间盘)

Fig.1 Sectional view and assemble view of ACJC (1sup-intervertebral-disc,2 sup-ball-socket,3 sup-mounting-ring,4 centra,5 infer-mounting-ring,6 infer-ball-socket,7 infer-intervertebral-disc)

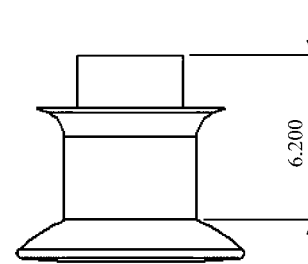


图2 球窝结构中球柄尺寸详图(球柄高6.2 mm)

Fig.2 View of the height of the handle (height of handle is 6.2 mm)

以中间椎体部分的中心为参考圆点,将上、下椎间盘,上、下球窝,上、下固定环与椎体进行装配,建立ACJC系统的三维模型。待装配完毕后,应用Solidworks进行精确干涉计算,确保装配体各个部件间“无缝”接触,利于后续的有限元分析计算^[5,8]。三维模型建立完毕后,直接使用Simulation进行有限元分析并优化设计。主要过程如下:

(1) 在 Solidworks 中建立 ACJC 系统的参数化模型。

(2) 在 Simulation 中定义医用钴铬钼材料属性,划分网格,固定下椎间盘,施加外部力载荷(见图3),进行静力分析。

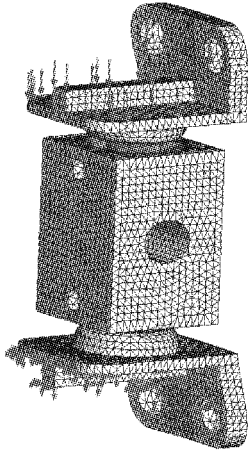


图3 ACJC 系统简化结构网格化模型 (红色箭头为载荷,绿色箭头为固定夹具)

Fig.3 Meshed model of ACJC (Red arrow is load, green arrow is fixation)

(3) 在 Simulation 中设计优化目标、定义设计变量、给定约束条件,进行优化计算。ACJC 系统零部件的网格化参数见表1。于上椎间盘施加生理负载150 N静力^[11],以下球窝柄纵轴为负载

表1 ACJC 系统网格化参数(球柄高6.2 mm)

Tab.1 Parameter of meshed modle(height of handle is 6.2 mm)

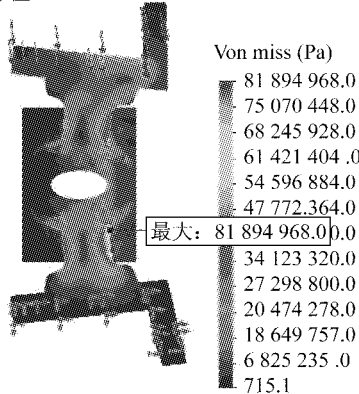
网格类型:	实体网格
所用网格器:	标准网格
自动过渡:	关闭
材料:	医用钴铬钼合金
光滑表面:	打开
雅可比检查:	4 Points
单元大小/mm:	0.732 03
公差/mm:	0.036 601
品质:	高
单元数:	65 868
节点数:	101 735
完成网格的时间(时;分;秒):	00:00:18
计算机名:	ZhJJ

力方向,施加面为锁定孔及上椎板面,夹具固定下方椎间盘,优化目标设定为最小安全系数值最大,设计变量为球柄高度,下界为6.0 mm,上界为9.0 mm,约束条件为节点应力。经过10次迭代计算,得到优化设计方案。其中,安全系数 = 屈服强度_{Limit}/Von mises 应力_{max}。

2 结果

计算结果表明:在生理载荷下,当该装置处于前屈位时应力集中点较多,最大应力值最大,最小安全系数最小;且前屈位时最大应力和最小安全系数均出现于下球窝关节的球柄与基底部连接处(见图4~

模型名称: 复合关节
控制名称: 控制1
图解类型: 静态 节点应力 应力1
变形比例: 1
整体值: 715.1 Pa ~ 81.895 MPa



模型名称: 复合关节
控制名称: 控制1
图解类型: 安全系数 安全系数1
准则: 最大 Von mises 应力 max
安全系数分布: 最小安全系数=7
整体值: 6.728 13~100

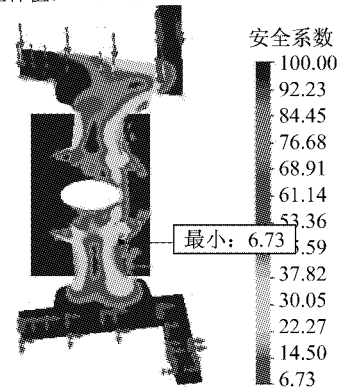


图4 前屈位及最大应力处最小安全系数位置 (红色箭头为施加载荷及方向,绿色箭头为固定夹具)

Fig.4 Location of minimum safety factor and maximum von mises in anteflexion position (Red arrow is load, green arrow is fixation)

6)。ACJC 系统最大应力、最小安全系数随着尺寸的改变,呈近似抛物线形改变;球柄高度值为 6.0

mm 时,最大 Von mises 应力越小,即球柄高度越低,最大 Von mises 应力越小(见图 7)。

模型名称: 复合关节
 控制名称: 控制 1
 图解类型: 静态节 应力 应力 1
 变形比例: 1
 整体值: 396.946 Pa 到 33.9371 MPa

模型名称: 复合关节
 控制名称: 控制 1
 图解类型: 安全系数 安全系数 1
 准则: 最大 Von mises 应力
 安全系数分布: 最小安全系数=16
 整体值: 15.9922 到 100

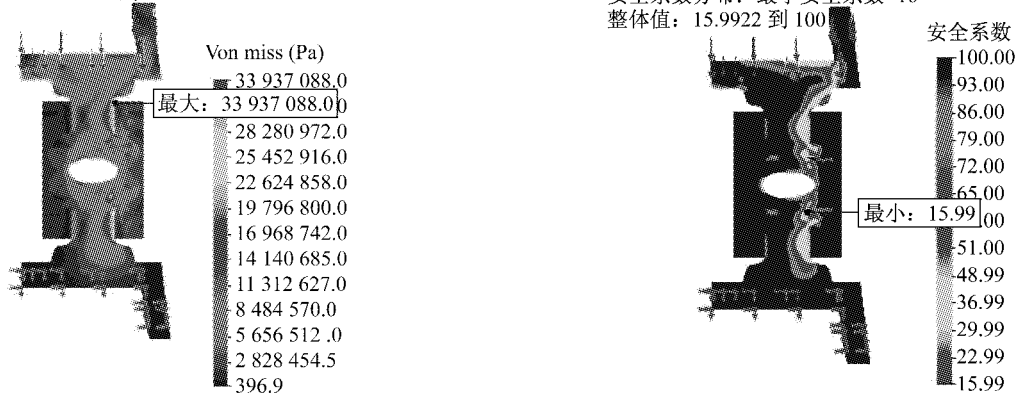


图 5 直立位最大应力处及最小安全系数位置

Fig.5 Location of minimum safety factor and maximum von mises in erect position

模型名称: 复合关节
 控制名称: 算例 1
 图解类型: 静态节 应力 应力 1
 变形比例: 1
 整体值: 40.51157 MPa~ 43.1557 MPa

模型名称: 复合关节
 控制名称: 控制 1
 图解类型: 安全系数 安全系数 1
 准则: 最大 Von mises 应力
 安全系数分布: 最小安全系数=13
 整体值: 12.77 到 100

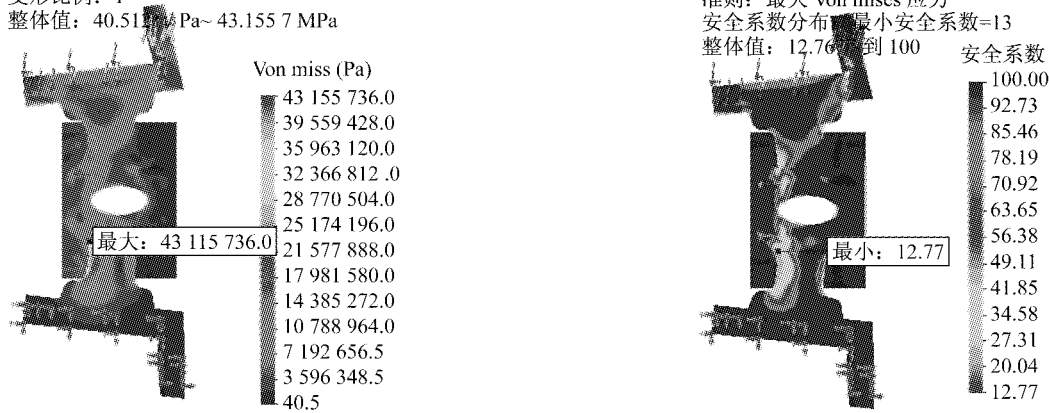


图 6 后伸位最大应力处及最小安全系数位置

Fig.6 Location of minimum safety factor and maximum von mises in hypokinesia position

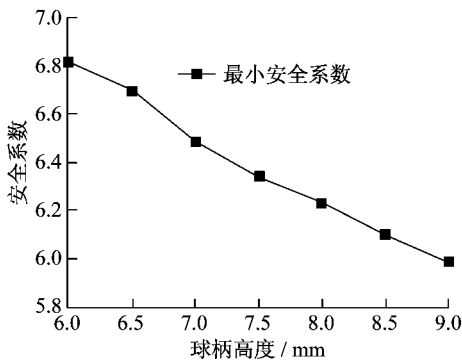


图 7 球柄最小安全系数变化趋势
 Fig.7 Tendency of minimum safety factor

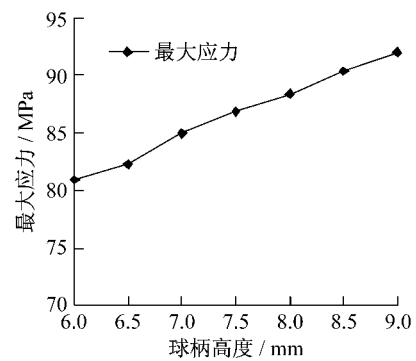


图 8 球柄最大应力变化趋势
 Fig.8 Tendency of maximum Von mises

3 讨论

对于颈椎骨折、退变、感染或肿瘤等疾病,常常需要进行颈椎椎体次全切除,以达到彻底清除病灶和椎管减压的目的^[9]。随之而来的问题就是如何对颈椎进行重建。目前,临床运用融合技术使椎体重建技术越来越成熟,让脊柱的稳定性增强,但是却丧失了活动度。而 Bryan 和 Prestige 人工椎间盘系统为主流的颈椎非融合器械的使用虽然保留了良好的活动度,但是这两套系统仅仅为局部颈椎间盘的球窝旋转结构,没有解决上下椎体的相对位移问题,更无法解决椎体次全切后椎体融合的问题。为尝试解决上述问题,本研究所自行研制了“人工颈椎复合关节系统”,并对假体植入后的人颈椎标本进行了初步的生物力学测试(专利申请号:200610105391.1),并且对此不断改进。

本研究中的 ACJC 系统,是一个改进后的新型产品。该系统适用于两节段椎间盘病变需进行椎体次全切手术的病例,重点解决了上下椎体相对位移的问题,并保留了椎体的稳定性和旋转活动度,中间椎体也可以与次全切后椎体空缺相融合以达到后期的永久稳定。为达到强度要求,采用钴铬钼合金材料,其0.2%屈服强度及弹性模量都符合关节强度和磨损要求。但在初始设计时,由于对于产品的尺寸设计没有太多的依据,为了达到技术要求,需要在不同的尺寸参数中进行详细分析和计算。在本研究中,球窝零件球柄高度特征的取值范围是一组约束集,该尺寸特征取不同的值时,对应着不同的系统特性,即不同的应力、安全系数。该优化设计的目的就是在人体生理载荷下,不影响颈椎活动度实现系统整体结构强度最大的设计。

本实验针对 ACJC 目前存在的术后与骨结合的问题,结合 CAD 系统,应用工业设计软件 Solidworks 和 Simulation^[10],通过有限元分析方法,对 ACJC 系统进行了进一步的优化设计,提出了具体的修改建议。

本系统中的万向球窝滑槽关节是实现上下相邻椎体活动度和相对位移的关键环节,其具体尺寸直接影响到整个装置的稳定性及其发挥的功能。而球柄高度直接影响到球窝关节的应力集中问题,安全系数也直接相关。但球柄高度最小值不能影响到

上、下椎间盘在旋转时与椎体碰撞,故可以根据旋转情况算出最小值。因此,本实验针对球柄高度值进行边界条件确定,是根据 ACJC 系统在人体的实际状态确定的。而生理载荷采用的确定,是依据既往生物力学测试,并结合胡克定律换算得到^[11]。在生理载荷下,最大 Von mises 应力出现在球窝零件的球柄与基底部交界处,且在前屈位时,应力最大。而且随着球柄尺寸的增大,最大 Von mises 应力呈曲线上,逐渐接近材料的压缩屈服强度,应力的安全系数接近6;而工程设计中,按照屈服应力所规定的安全系数,通常取1.5~2.2,动力为5,冲击为12。但是,对于医学内固定材料的安全系数,目前没有一个明确的标准。在本实验中,由于是应用人体,且该假体应用于颈椎,而颈椎是人体最重要也是最易受到损伤的部位之一,所以结合分析结果,将安全系数保守地设置为5.0。所得到的当球柄高度为6.0 mm时,其最低安全系数为6.812,符合实际需求。

工程力学的有限元分析方法,为骨科临床内固定设计提供了一种计算机模拟的方法,其精确度能够满足临床需要^[11]。该方法的难点在于临床医生如何将内固定设计中需要解决的问题抽象成数学问题,如何确定有限元静力分析中的各种条件约束和载荷等。静力分析的约束和载荷一般是根据物理学知识,结合生物力学测试或者查阅文献确定。但是由于医学类的实验都有其特殊性,相对安全系数要求较高,因此,在将文献中的数值应用到实验中时要十分谨慎和保守。

4 结语

本实验表明,当球窝零件球柄高为6.0 mm时,最大 Von mises 应力的最小达到80.9 MPa,应力的最小安全系数达到最大值6.812,比值大于5,该结果符合预计的技术指标,结构符合设计要求。

参考文献:

- [1] Goffin J, Van Calenbergh F, Van Loon J, et al. Intermediate follow-up after treatment of degenerative disc disease with the Bryan cervical disc prosthesis: Single-level and bi-level[J]. Spine, 2003, 28(24):2673.
- [2] Bryan VE Jr. Cervical motion segment replacement[J]. Eur Spine J, 2002, 11(2):92.

- [3] Wigfield CC, Gill SS, Nelson RJ, *et al.* The new Frenchay artificial cervical joint: results from a two-year pilot study [J]. *Spine*,2002, 27(22):2446.
- [4] 余剑,雷伟,刘兰涛,等. 人工颈椎复合关节系统假体的研制及生物力学评价[J]. *中华骨科杂志*,2007,27:773-778.
- [5] 严亚波,雷伟,吴子祥. 人工颈椎复合关节系统优化设计的研究[J]. *医用生物力学*, 2008,23(5):366-371.
- [6] Reitman Charles A, Mauro Kristin M, Nauyen Lyndon, *et al.* Intervertebral motion between flexion and extension in asymptomatic individuals[J]. *Spine*,29(24):2832-2843.
- [7] 韩宝君,雷伟,吴子祥,等. “人工颈椎复合关节系统”的优化设计及生物力学评价[J]. *第四军医大学学报*,2009,20(19),2013-2016.
- [8] 李立顺,孟祥德,詹隽青,等. 集装箱双面吊辅助支撑装置的有限元分析与优化设计[J]. *现代制造工程*, 2008,9:89-91.
- [9] Carlos G, Farid A, Vinod H. Multilevel cervical fusion and its effect on disc degeneration and osteophyte formation [J]. *Spine*,2006,31:972-978.
- [10] 杨春晖,罗维东. 矿用自卸车龙门梁形状拓扑优化设计及刚度分析[J]. *矿山机械*, 2008,36(21):50-52.
- [11] Virginie Lafage, Nicolas Gangnet, Jacques Se'ne'gas, *et al.* New interspinous implant evaluation using an in vitro biomechanical study combined with a finite-element analysis [J]. *Spine*,2007,32:1706-1713.

· 致读者 ·

关于书写论文作者单位名称的要求

作者在投稿时,首先应列出单位名称的全称,如已归属于综合大学的单位,应先列出大学名称,之后列出医学院名称或医院名称、科室名称;单位的英文名称应根据所在单位统一的英文名称书写;作者在向本刊投稿时,单位科研部门开具文稿推荐信上的公章内容,须与文稿中所书写的单位名称一致;由不同单位共同撰写的一篇文章,各个单位的名称均须分别列出,由第一作者所在单位开具文稿推荐信;如文稿作者为集体作者,应列出本文稿第一整理者(即第一执笔者)的姓名及工作单位;如文稿第一作者在投稿后工作单位有变动,原则上是列出原单位名称,现在的工作单位可在作者简介中予以注释。

本刊编辑部
2010-08-25