

基础研究

下颈椎全椎板切除后不同内固定技术螺钉的应力分布

段 扬¹, 靳安民¹, 张 辉¹, 张 力¹, 闵少雄¹, 胡孔和²

(1 南方医科大学珠江医院骨科中心 510282 广州市; 2 汕头大学粤北人民医院骨科 512026 广东省韶关市)

【摘要】目的:探讨下颈椎全椎板切除后不同内固定技术螺钉的应力分布规律。**方法:**采集 1 例成年健康男性志愿者下颈椎(C3~C7)的 CT 数据集,应用 Mimics 10.01、Geomagic studio 10.0、HyperMesh 10.0、Abaqus 6.9.1 等软件建立下颈椎(C3~C7)完整模型、三节段全椎板切除后模型、全椎板切除后椎弓根螺钉内固定(pedicle screw fixation, PSF)技术重建模型和经关节突螺钉内固定(transarticular screw fixation, TSF)技术重建模型。模拟施加 75N 头颅预载荷和 1.0Nm 运动附加力,使模型产生前屈、后伸、侧屈和旋转运动,分析两种内固定技术的螺钉应力分布情况。**结果:**所建完整下颈椎有限元模型与实体模型具有较好的几何相似性,共有 61464 个单元,16588 个节点;加载后在各种工况下节间运动范围与文献实体测量结果吻合,表明完整模型有效。在此模型上建立了下颈椎三节段全椎板切除、PSF 和 TSF 内固定重建的有限元模型。在各种工况下,PSF 重建模型在钛棒与螺钉接合部易发生应力集中,应力峰值低于 160MPa;TSF 重建模型螺钉中部易发生应力集中,应力峰值高于 2800MPa。**结论:**应用 CT 扫描数据建立的下颈椎三维有限元模型能模拟正常状态、全椎板切除及不同内固定技术重建,相比 PSF 重建技术,TSF 有较高的断钉风险。

【关键词】下颈椎;全椎板切除术;有限元模型;内固定;应力分布

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2010.11.03

中图分类号:R687.3, R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2010)-11-0889-06

Screw stress distribution of different fixation techniques following cervical laminectomy in lower cervical spine/DUAN Yang, JIN Anmin, ZHANG Hui, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2010, 20(11): 889~894

【Abstract】Objective: To investigate the screw stress distribution of different fixation techniques following cervical laminectomy in lower cervical spine. **Method:** CT scans were performed on a healthy adult male volunteer. Mimics 10.01, Geomagic studio 10.0, HyperMesh 10.0 and Abaqus 6.9.1 softwares were used to establish the intact model (C3-C7). The model was subjected to three-level laminectomy and then reconstructed by different fixation protocols: pedicle screw fixation (PSF) and transarticular screw fixation (TSF). The skull load of 75N and torsion preload of 1.0Nm was added on the models, which simulate flexion, extension, lateral bending and rotation. The stress distribution were analyzed while the skull was under flexion, extension, lateral bending and rotation conditions. **Result:** The intact finite element model showed good geometric similarity, which consisted of 61464 elements and 16588 nodes. Compared with the published data, the intact model was validated. Based on the intact model, the models following laminectomy and then reconstructed either by PSF or TSF were established. Under simulated physiological movements, the screw inserted by PSF had higher stress bearing at the connection between screw and rod with the maximal stress levels of less than 160MPa, while screws inserted by TSF had higher stress bearing at the middle part with the maximal stress levels of over 2800MPa. **Conclusion:** Based on the CT scans, finite element model of lower cervical spine can simulate the conditions of natural state, after laminectomy and after reconstruction breakage under different fixation techniques. Compared with PSF techniques, TSF has a higher risk of screw.

【Key words】 Lower cervical spine; Laminectomy; Finite element model; Fixation; Stress distribution

【Author's address】 Department of Orthopaedics, Zhujiang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou, 510282, China

第一作者简介:男(1982-),医学博士,研究方向:脊柱外科和数字化骨科

电话:(020)61643250 E-mail:duanyang2008@tom.com

通讯作者:靳安民 E-mail:jam2008@163.com

颈椎双侧全椎板切除术广泛应用于严重颈椎管狭窄症、多节段颈椎病、颈椎管内肿瘤的外科治疗等方面。由于多节段全椎板切除对颈椎后部结构破坏广泛,术后易引起颈椎不稳和后凸畸形,大多需辅以后路内固定技术重建稳定性^[1-3]。目前临床上主要采用椎弓根螺钉固定 (pedicle screw fixation, PSF) 或经关节突螺钉固定(transarticular screw fixation, TSF) 技术。相关研究表明 PSF 和 TSF 有相似的瞬时生物力学稳定性^[2,4-6],但对固定螺钉的应力分布规律尚不清楚。本研究利用正常人颈椎的 CT 扫描数据,建立三节段全椎板切除后两种内固定技术重建的有限元模型,通过有限元分析软件分析内固定的应力特征,比较 PSF 和 TSF 的生物力学特性,为临床应用及内固定系统改进提供相关实验依据和理论指导。

1 材料和方法

1.1 数据及软件

选择 1 例成年健康男性志愿者为研究对象,无颈椎病史,拍摄颈椎正侧位、斜位、过伸过屈位 X 线片及 CT 扫描排除颈椎病变。在南方医科大学珠江医院影像科 CT 室完成平卧中立位 CT 数据的采集,扫描条件:120kV,125mA,层厚 0.625mm,扫描范围:C3~C7。以标准 Dicom 格式存贮。所用软件:Mimics 10.01(Materialise Company, Belgium);Geomagic studio 10.0 (Raindrop Company, USA);HyperMesh 10.0 (Altair Company, USA);Abaqus 6.9.1 (SIMULIA Company, USA)。

1.2 三维有限元模型的建立

将扫描获得的图像(Dicom 格式)导入 Mimics 10.01 中。通过阈值分割骨组织及软组织,进行布尔运算及三维自动/手动交互切割,分别将 C3/4、C4/5、C5/6、C6/7 纤维环和髓核及韧带结构分离出来,建立 C3~C7 功能节段的几何实体模型。将其导入 Geomagic studio 10.0、HyperMesh 10.0 软件,利用上述软件完成模型的处理、分割、面/体网格划分等部分前处理工作,生成三维有限元原始模型。最后导入有限元分析软件(Abaqus 6.9.1)进行单元设置、材料属性定义和有限元分析。

颈椎椎体、后部结构、椎间盘纤维环、髓核均模拟为四面体单元。椎体皮质骨、软骨终板模拟为壳单元。韧带使用非线性单轴连接单元模拟其只受拉、不受压的特性。C3~C7 的 8 对小关节定义为面-面接触。由于滑膜和滑液的存在关节面间的摩擦非常小,模型中关节的面-面接触都定义为无摩擦特性。骨性结构和椎间盘均模拟为各向同性的弹性材料,骨、椎间盘、韧带的材料特性依据文献^[7-9]确定(表 1、2)。

表 1 有限元模型中骨与椎间盘的材料属性

	弹性模量(MPa)	泊松比
椎体皮质骨	12000.0	0.29
椎体松质骨	100.0	0.29
终板	500.0	0.40
后部结构	3500.0	0.29
椎间盘纤维环	3.4	0.40
椎间盘髓核	1.0	0.49
内固定系统	145000.0	0.30

表 2 有限元模型中主要韧带力学特性

变形 (mm)	力(N)									
	前纵韧带		后纵韧带		棘韧带		黄韧带		关节囊韧带	
	C3~C5	C5~C7	C3~C5	C5~C7	C3~C5	C5~C7	C3~C5	C5~C7	C3~C5	C5~C7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	28	20	25	20	7	8	—	—	—	—
2	52	40	44	40	12.5	14	38	30	55	75
3	72	58	62	60	18	20	—	—	—	—
4	89	78	78	78	22.5	25	60	68	130	145
5	102	98	89	92	26	29	—	—	—	—
6	115	112	—	—	30	32.5	80	102	180	204
7	—	120	—	—	32.5	35	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	108	130	210	250
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	145	230	265

1.3 三维有限元模型的验证

模型的边界状态和载荷状况设定如下:(1)边界约束最下位的 C7 椎体下表面,使下表面各节点完全固定,最上位的 C3 不受任何约束,并接受载荷矢量。(2)根据文献^[10],对模型施加 75N 的预载荷,运动附加力为 1.0Nm,使模型产生前屈、后伸、侧屈和旋转运动。测量和计算模型在各种模拟状态下的节间运动范围(角度),与以往的研究结果进行对比,验证模型的有效性。

1.4 全椎板切除模型和内固定模型的制备

在有限元分析软件 Abaqus 6.9.1 中,模拟全椎板切除术式切除 C4~C6 椎板和 C3~C7 之间的黄韧带和棘韧带,建立下颈椎三节段全椎板切除模型。将颈椎后路钉棒系统各部件模型导入 HyperMesh 10.0,参照 PSF 和 TSF 两种手术固定方式,对内固定系统的每一部件进行可视化调整,完成二者在同一坐标系下空间位置装配,建立两种下颈椎全椎板切除后重建手术的三维模拟。TSF 技术以上位节段侧块中心点内侧 1mm 为进钉点,进钉角度在矢状面上尾倾 35°~40°,在冠状面上外倾 15°~20°,螺钉向前下方固定关节突关节复合体^[4];PSF 技术按常规椎弓根钉置入法进行。

在骨骼与螺钉之间执行布尔运算,以模拟螺钉内置物拧入骨骼后的钉道。根据内固定方式分为 TSF 组、PSF 组。再次将其导入 Geomagic stu-

dio 10.0 逆向工程软件中进行修整与优化,完成手术工况的实体建模。最后导入有限元分析软件(Abaqus 6.9.1)进行单元设置、内固定材料属性定义和有限元分析。

1.5 模型加载与有限元运算

对模型施加 75N 的预载荷,运动附加力 1.0Nm,使模型产生前屈、后伸、侧屈和旋转运动。所有模型采用有限元分析软件 Abaqus 进行有限元运算和内固定的应力分析,用应力分布云图显示应力分布情况。

2 结果

通过 CT 扫描、图像数字化处理、利用 Mimics 10.0、Geomagic studio 10.0、HyperMesh 10.0、Abaqus 6.9.1 有限元分析软件,成功建立了正常人 C3~C7 三维有限元模型。根据下颈椎的解剖特点模拟了椎体的皮质骨、松质骨、纤维环、髓核、终板、小关节、椎弓根、椎板、横突、棘突、前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘韧带和关节囊韧带等三维结构。整个模型共有 61464 个单元,16588 个节点。下颈椎(C3~C7)的三维重建模型、实体模型和有限元模型见图 1。

完整模型在模拟状态下的节间运动范围(角度)与 Moroney 等^[11]和 Panjabi 等^[12]实体测量结果吻合(表 3)。可以认为本模型符合正常人体参数,可用于下一步实验研究。

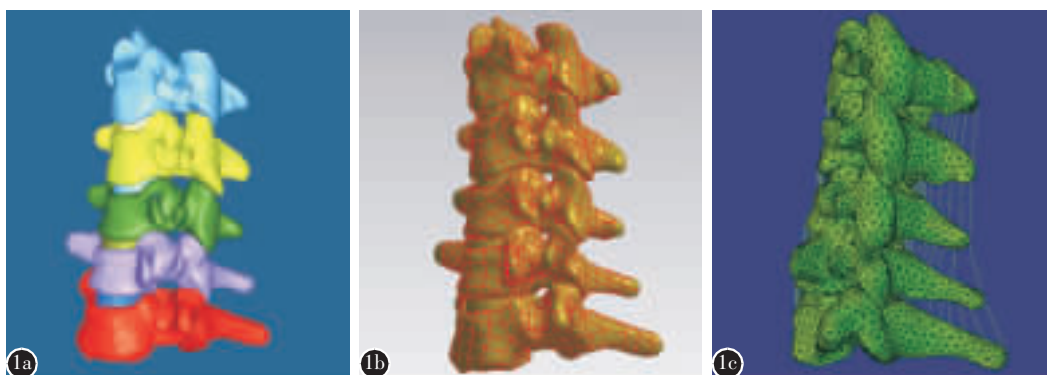


图 1 下颈椎(C3~C7)的三维重建模型(a)、实体模型(b)和有限元模型(c)

表 3 完整模型在各种工况下节间运动范围与文献比较

(°)

	Moroney ^[11] ($\bar{x} \pm s$)			Panjabi ^[12] ($\bar{x} \pm s$)			本研究		
	屈伸	侧弯	轴旋	屈伸	侧弯	轴旋	屈伸	侧弯	轴旋
C3-C4	9.1±3.8	9.4±6.0	3.7±1.4	7.7±5.0	9.0±1.9	5.1±1.2	7.5	6.4	6.1
C4-C5	9.1±3.8	9.4±6.0	3.7±1.4	10.1±4.9	9.3±1.7	6.8±1.3	6.7	5.3	6.4
C5-C6	9.1±3.8	9.4±6.0	3.7±1.4	9.9±4.8	6.5±1.5	5.0±1.0	6.8	5.4	5.7
C6-C7	9.1±3.8	9.4±6.0	3.7±1.4	7.1±4.0	5.4±1.5	2.9±0.8	4.2	6.7	4.2

在已验证的模型上模拟全椎板切除术式切除 C4~C6 椎板和 C3~C7 黄韧带和棘韧带建立的下颈椎三节段全椎板切除模型和 TSF 技术、PSF 技术内固定重建稳定性后的有限元模型见图 2。对模型施加载荷后,TSF 组应力集中于螺钉中部,

PSF 组应力集中于螺钉与钛棒的接合部分,TSF 和 PSF 固定节段的下位节段关节突均存在明显的应增大(图 3)。在各种工况下,TSF 组内固定和 PSF 组内固定的 Von Mises 应力峰值有明显数量级的差异(表 4)。

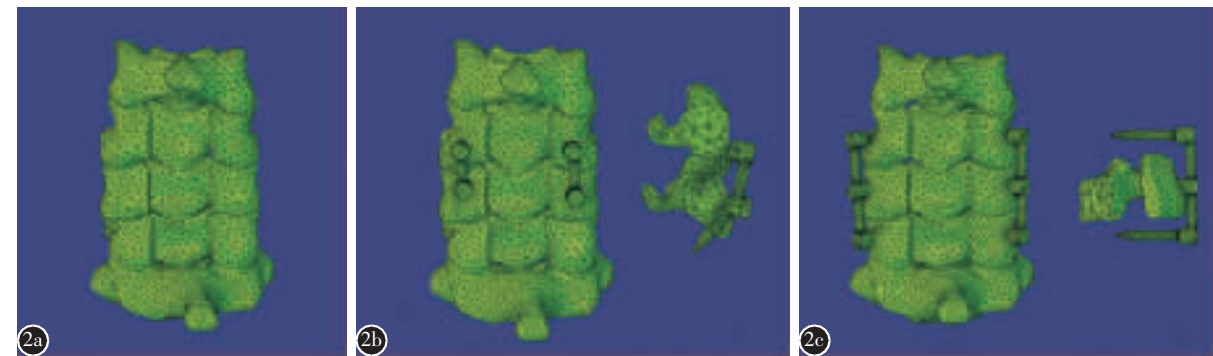


图 2 下颈椎(C4~C6)的三节段全椎板切除有限元模型(a)、TSF 重建有限元模型(b) 和 PSF 重建有限元模型(c)

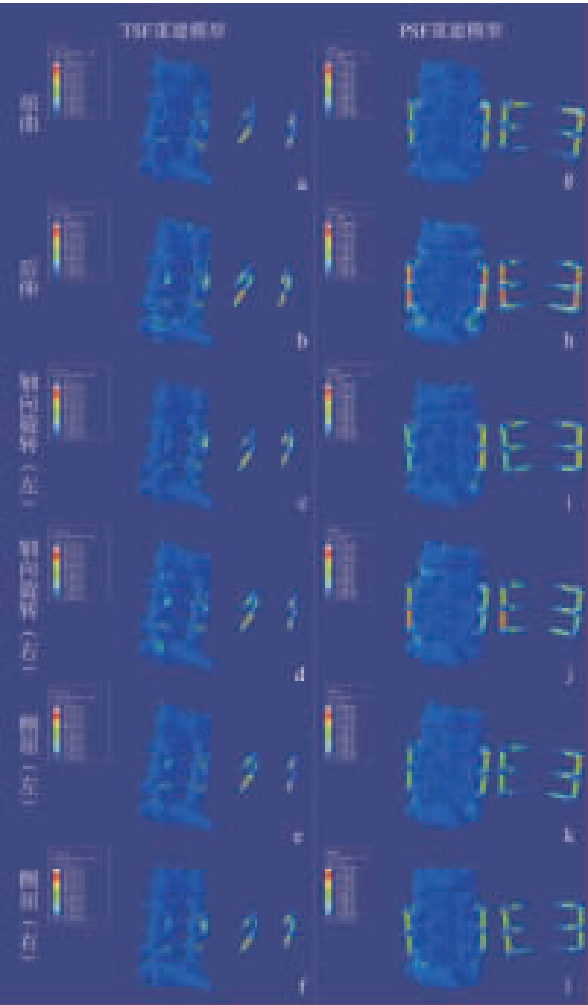


图 3 在屈曲、后伸、左右旋转和左右侧屈工况下,下颈椎三节段全椎板切除后 TSF 重建内固定应力分布情况(a~f) 和 PSF 重建内固定应力分布情况(g~l)

表 4 不同固定方式模型在各种工况下的 Von Mises 应力峰值 (MPa)

	屈曲	后伸	左轴旋	右轴旋	左侧屈	右侧屈
TSF组	2816	2893	2845	2870	2860	2855
PSF组	127.7	105.6	107.1	133.2	154.8	101.2

3 讨论

3.1 完整模型的验证

颈椎三维有限元模型的建立是为了利用该模型所提供的仿真环境进行相关的生物力学分析,为揭示和分析颈椎伤病提供理论依据。但有限元模型在建模的过程中,做了一些必要的简化和假设,为了保证建立的模型符合实际的生物力学信息和保证研究结果的可靠性,有限元模型必须经过验证。模型的有效性验证是有限元模型的建立和其最终应用之间十分重要的环节。采用实验结果与尸体标本的研究结果进行比较验证的方法被认为是验证的“金标准”。力-位移曲线比较和力矩-旋转角度曲线比较是有限元模型有效性验证的常用方法^[9]。本研究对其模型进行节间运动范围(角度)的测定,与其他作者实体测量^[11,12]所得的节间运动范围(角度)进行比较,结果是吻合的,从而验证了完整模型的有效性,客观反映了颈椎的生物力学特性,可用于下一步实验研究。

3.2 损伤模型和重建模型的制备

我们以已验证的下颈椎完整模型为基础,建立了全椎板切除及全椎板切除后内固定重建的三

维有限元模型,探讨内固定手术有限元建模方法。首先,在有限元分析软件 Abaqus 6.9.1 中,使用 Part 板块中的切割功能模拟全椎板切除术式,建立了下颈椎三节段全椎板切除模型。其次,本研究内固定建模方法不同于颈椎实体建模方法,采取的是直接生成的方法^[13]。直接生成法建模的优点是对小型简单模型的生成较方便,使用户对几何形状及每个节点和单元的编号有完全的控制。考虑到内固定形状、结构简单,直接生成方法更加有效和便利。最后,本研究模拟内固定置入技术是将钉棒系统两部件模型导入 HyperMesh 10.0,参照两种不同的手术方式,对内固定系统的每一部件进行可视化调整,使其各部件在同一坐标系下空间位置装配,完成重建模型的制备。该模型较为精确地模拟了全椎板切除后内固定重建手术的结构、材料及力学特性,客观反映了下颈椎解剖结构和生物力学特性。建立的有限元模型合理、可靠,可作为颈椎生物力学研究的工具。

3.3 TSF 技术和 PSF 技术临床应用比较

TSF 技术和 PSF 技术作为颈椎后路固定方法,其都可提供相似的生物力学稳定性^[2]。两者的不同在于以下几方面:(1)PSF 技术有更高的血管神经损伤风险。Karaikovic 等^[14]发现在没有计算机导航的帮助下,有 17% 的椎弓根固定失败率,特别是在 C7 以上,椎弓根螺钉固定技术的应用仍存在争议。在置钉的安全性方面,TSF 技术较椎弓根螺钉固定安全^[4]。(2)TSF 技术既可在钉板系统或钉棒系统中作为锚钉应用,也可以单独螺钉固定,所用的螺钉常常较侧块螺钉和椎弓根螺钉少一对。(3)PSF 技术在一定程度上依赖于辨认解剖学上参考点和形态学上的一致性,然而患者个体的局部解剖可能存在变异,先天畸形、肿瘤、创伤及以前的手术均可能改变局部解剖学的特征,从而会不同程度地限制 PSF 技术的应用。此时,TSF 技术可作为颈椎后路稳定性重建的内固定方法。

3.4 TSF 和 PSF 内固定的 Von Mises 应力比较

通过有限元研究判断下颈椎全椎板切除后不同技术重建稳定性时内固定应变变化规律的报道较少。我们的有限元分析结果显示,TSF 和 PSF 技术内固定的 Von Mises 应力分布和应力峰值上存在明显差异,TSF 应力集中于螺钉中部,PSF 应力集中于螺钉与钛棒接合部分。固定部位活动潜能是造成应力分布特征差异的主要原因。TSF 需穿

过关节突间隙,经关节突螺钉需通过制动关节突从而达到制动相邻椎体之间的活动,因此,TSF 应力集中于穿关节突间隙的螺钉中部。PSF 将螺钉置入椎弓根内,椎弓根内无明显的活动潜能,螺钉与椎体成为一个整体。与 TSF 不同,PSF 制动相邻椎体之间的活动潜能需要靠螺钉与接合部分的固定。因此,PSF 应力集中于钛棒与螺钉接合部分。但无论是 TSF 还是 PSF,在固定节段的下位节段有明显的应力增大情况。这一点能很好地解释临床上为何固定节段的下位节段较上位节段容易发生退行性病变。

本研究结果显示,在各种工况下,TSF 组应力峰值较 PSF 高一个数量级。参考钛合金螺钉屈服强度 894~3790 MPa^[15]来说,PSF 内固定系统在各种工况下其应力峰值远低于钛合金屈服强度,故引起螺钉疲劳断裂的可能性相对较低。TSF 内固定系统螺钉中部承受着 10³MPa 级应力,有断钉的风险。因此,我们认为 TSF 技术应采用适合其力学特性的内固定系统,可选择置入含钎合金内固定系统(屈服强度可达 12GPa^[15])或者术后延长颈托保护时间,以降低其断钉的风险。

本研究利用医学图像处理技术和逆向工程手段建立具有精细解剖结构的有限元模型对下颈椎内固定器械的研究提供了一种新思路,从而有助于以后进一步开展更为广泛和深入的研究。但本研究的数据采集是在平卧中立位行 CT 扫描,无头部载荷和颈椎自身重量,颈椎生理前凸减小。今后的研究应尽可能在站立中立位收集数据;本研究获得的 CT 数据为 C3~C7,其仅为人体脊柱的一部分,由于边界条件的定义,致使最下位的 C6/7 活动度有一定的误差(T1 本身活动度低),今后的研究应尽可能增加相邻节段以减少边界条件的影响。另外,本研究对脊柱各部分材料属性和力学特性的定义缺乏细微生理结构的构建(如骨小梁排列),这是国内外尚未解决的问题,需待有限元理论和技术的发展。

4 参考文献

1. Raab P, Juergen K, Gloger H, et al. Spinal deformity after multilevel osteoplastic laminotomy[J]. Int Orthop, 2008, 32(3): 355-359.
2. Ferrara LA, Secor JL, Jin BH, et al. A biomechanical comparison of facet screw fixation and pedicle screw fixation: effects of short-term and long-term repetitive cycling[J]. Spine, 2003,

- 28(12):1226-1234.
3. Takayasu M, Hara M, Yamauchi K, et al. Transarticular screw fixation in the middle and lower cervical spine; technical note [J]. J Neurosurg Spine, 2003, 99(Suppl 1):132-136.
4. DalCanto RA, Lieberman I, Inceoglu S, et al. Biomechanical comparison of transarticular facet screws to lateral mass plates in two-level instrumentations of the cervical spine [J]. Spine, 2005, 30(8):897-902.
5. Jones EL, Heller JG, Silcox DH, et al. Cervical pedicle screws versus lateral mass screws; anatomic feasibility and biomechanical comparison [J]. Spine, 1997, 22(9):977-982.
6. Kotani Y, Cunningham BW, Abumi K, et al. Biomechanical analysis of cervical stabilization systems; an assessment of transpedicular screw fixation in the cervical spine [J]. Spine, 1994, 19(22):2529-2539.
7. Zhang QH, Teo EC, Ng HW. Development and validation of a C0-C7 FE complex for biomechanical study [J]. J Biomech Eng, 2005, 127(10):729-735.
8. Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA, et al. Biomechanics of the cervical spine (Part 2): cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2001, 16(1):1-27.
9. Ng HW, Teo EC, Zhang QH. Biomechanical effects of C2-C7 intersegmental stability due to laminectomy with unilateral and bilateral facetectomy [J]. Spine, 2004, 29(16):1737-1745.
10. Clausen JD, Goel VK, Traynelis VC, et al. Uncinate processes and Luschka joints influence the biomechanics of the cervical spine; quantification using a finite element model of the C5-C6 segment [J]. J Orthop Res, 1997, 15(3):342-347.
11. Moroney SP, Schultz AB, Miller JA, et al. Load-displacement properties of lower cervical spine motion segments [J]. J Biomech, 1988, 21(9):769-779.
12. Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves [J]. Spine, 2001, 26(24):2692-2700.
13. Villarraga ML, Anderson RC, Hart RT, et al. Contact analysis of a posterior cervical spine plate using a three-dimensional canine finite element model [J]. J Biomech Eng, 1999, 121(2):206-214.
14. Karaikovic EE, Yingsakmongkol W, Gaines RW. Accuracy of cervical pedicle screw placement using the funnel technique [J]. Spine, 2001, 26(22):2456-2462.
15. 邹德威, 杨惠林, 金大地, 等. 脊柱功能重建外科学——高级理论和技巧 [M]. 北京: 人民军医出版社, 2008. 65-66.
- (收稿日期: 2010-06-28 修回日期: 2010-07-27)
(英文编审 蒋欣/刘思麒)
(本文编辑 卢庆霞)

消息

欢迎订阅 2011 年《中国脊柱脊髓杂志》

《中国脊柱脊髓杂志》是由卫生部主管, 中国康复医学会与中日友好医院主办, 目前国内唯一以脊柱脊髓为内容的国家级医学核心期刊。及时反映国内外脊柱脊髓领域的科研动态、发展方向、技术水平, 为临床医疗、康复及基础研究工作提供学术交流场所。

读者对象: 从事脊柱外科、骨科、神经科、康复科、肿瘤科、泌尿科、放射科、基础研究及生物医学工程等相关学科的专业人员。

本刊为中国科技信息中心“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”, 中科院中国科学计量评价研究中心“中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊”, 入选北京大学“中文核心期刊要目总览”, 已分别入编 Chinainfo(中国信息)网络资源系统(万方数据)及以中国学术期刊光盘版为基础的中国期刊网(中国知网), 影响因子名列前茅。

月刊, 大 16 开, 正文 88 页, 每月 10 日出版。全册铜版纸彩色印刷。每册定价 16 元, 全年 192 元。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号 82-457。国外读者订阅请与中国国际图书贸易总公司中文报刊科联系(100044, 北京车公庄西路 35 号), 代号: BM6688。

本刊经理部可随时为国内外读者代办邮购(免邮寄费)。地址: 北京市朝阳区樱花园东街中日友好医院内, 邮编: 100029。电话: (010)64284923, 64206649; E-mail: cspine@263.net.cn; http: www.cspine.org.cn。

可为相关厂家、商家提供广告园地。广告经营许可证: 京朝工商广字 0148 号。

欢迎投稿, 欢迎订阅!