

文章编号:1004-7220(2022)01-0085-06

新型弧形带终板环颈椎钛网生物力学测试

罗 灿¹, 欧 军^{1*}, 卢政好¹, 高晓文¹, 吴志良¹, 张美超^{2*}

(1.南华大学附属南华医院 脊柱外科, 湖南 衡阳 421000; 2.南方医科大学 广东省医学生物力学重点实验室, 广州 510515)

摘要:目的 建立山羊颈椎不稳定模型,测试新型弧形带终板环颈椎钛网的生物力学稳定性。方法 测量成年山羊颈椎的解剖学数据,选择适合山羊颈椎的新型弧形带终板环颈椎钛网。将保留关节囊、韧带及椎间盘的24只山羊颈椎骨性标本随机分成4组。A组(正常组, $n=6$)无特殊处理,B组切除C4部分椎体及上下椎间盘(模型组, $n=6$);在B组基础上,C组安装新型弧形颈椎钛网并予钢板螺钉辅助固定(实验组, $n=6$),D组安装传统直型钛网并予钢板螺钉辅助固定(对照组, $n=6$)。测量4组标本在2.0 N·m载荷下前屈、左右侧弯、左右旋转、后伸时活动范围(range of motion, ROM),测试其三维运动稳定性。测量C、D两组在200 N压缩力下的位移,计算其刚度,测试其术后整体标本的抗沉降能力。结果 A组各方向ROM均小于B组,A组各方向ROM均大于C组,C组前屈ROM小于D组($P<0.05$);C组刚度较D组高($P<0.05$);C组压缩位移较D组少($P<0.05$)。结论 新型弧形钛网较直型钛网更加符合颈椎生理曲度,在颈椎最频繁的前屈活动上稳定性较传统钛网好,且短期应力下压缩位移较直型钛网少,术后抗沉降较直型钛网好,值得进一步实验及临床推广。

关键词:弧形钛网;直型钛网;内固定;颈椎

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.01.013

Biomechanical Test on Novel Arc Cervical Titanium Mesh with Endplate Ring

LUO Can¹, OU Jun^{1*}, LU Zhenghao¹, GAO Xiaowen¹, WU Zhiliang¹, ZHANG Meichao^{2*}

(1. Department of Spine Surgery, Affiliated Nanhua Hospital, University of South China, Hengyang 421000, Hunan, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China)

Abstract: Objective To establish the instability model of goat cervical vertebrae, and test biomechanical stability of the novel arc cervical titanium mesh with endplate ring. **Methods** The anatomical data from cervical vertebrae of adult goats were measured, so as to select a new type of arch cervical titanium mesh with endplate ring which was suitable for goat cervical vertebrae. A total of 24 goats with preserved articular capsule, ligaments and intervertebral disc were randomly divided into 4 groups. Group A ($n=6$, normal group) didn't receive any special treatment, while Group B ($n=6$, model group) received partial resection of C4 vertebrae as well as upper and lower intervertebral disc. On the basis of models in Group B, Group C ($n=6$, experimental group) was installed

收稿日期:2021-03-14; 修回日期:2021-04-28

基金项目:衡阳市科技局课题(2013KS43)

通信作者:欧军,副教授,主任医师,E-mail:oujun2010vip@163.com;张美超,副教授,E-mail:zmc@fimmu.com

*为共同通信作者

with the novel arch cervical titanium mesh and fixed by plate and screw, and Group D ($n=6$, control group) was installed with traditional straight titanium mesh and fixed by plate and screw. The ranges of motion (ROMs) for 4 groups of specimens during flexion, extension, left/right lateral bending, left/right rotation under 2.0 N·m load were measured, and their three-dimensional (3D) motion stability was tested. The displacement of Group C and Group D under 200 N compression force was measured, the stiffness was calculated, and the anti settlement ability of the whole specimen was tested. **Results** The ROMs of Group A in all directions were smaller than those of Group B, the ROMs of Group A were larger than those of Group C, and the ROMs of Group C during flexion were smaller than those of Group D ($P<0.05$). The stiffness of Group C was higher than that of Group D ($P<0.05$). The compression displacement of Group C was smaller than that of Group D ($P<0.05$). **Conclusions** Compared with the straight titanium mesh, the novel arc titanium mesh is more consistent with the physiological curvature of cervical vertebrae, and has better stability than the traditional titanium mesh during the most frequent flexion activities of cervical vertebrae. Moreover, compression displacement of the novel arc titanium mesh under short-term stress is smaller than that of the straight titanium mesh, and its postoperative anti-settlement is better than that of the straight titanium mesh, which is worthy of further experiment and clinical promotion.

Key words: arc titanium mesh; straight titanium mesh; internal fixation; cervical vertebrae

颈椎创伤、退行性病变、肿瘤将导致颈椎不稳定,常需内固定手术^[1]。颈椎前路椎体次全切除伴钛网植入手术是目前主流术式,能够安全有效地解决颈椎疾病。同时,由于能够对脊髓前方压迫直接减压,并维持颈椎局部稳定性,该术式在国内外被广泛应用^[2-4]。但其同样拥有诸多并发症,例如生理弧度改变、神经根出口狭窄,其中钛网沉降是常见的并发症^[5]。本课题组研制一种新型颈椎弧形带终板环的钛网,钛网弧度更符合人体颈椎生理弧度,且带有抗沉降终板环,理论上能降低沉降率,更具三维稳定性^[6]。本文通过对比新型弧形钛网与传统直型钛网,进一步了解新型钛网的三维稳定性及抗沉降性能,分析其临床应用的可行性。

1 实验方法

1.1 山羊颈椎相关数据测量

山羊来源广泛,且成年山羊与成年人颈椎在尺寸大小、解剖及材料特性等方面相似,常被作为脊柱生物力学的研究标本^[7]。本文以山羊颈椎为实验标本,先选择适合山羊颈椎的新型弧形钛网。取24只贵州成年白山羊(体重、年龄无统计学差异,雌雄不计),为方便设计合适实验的钛网,通过拍摄正侧位片,在侧位片上做出C3下终板的切线,分别于C3椎体前后缘相交于A、C两点,做C5上终板的切线,分别于C5椎体前后缘相交于B、D两点,然后量取AB、CD、AC、BD的长度,AB与AC之间的夹角

(角A)、AB与BD之间的夹角(角B)。在正位片上测量C4椎体最狭窄处EF的长度。测量方法如图1所示。

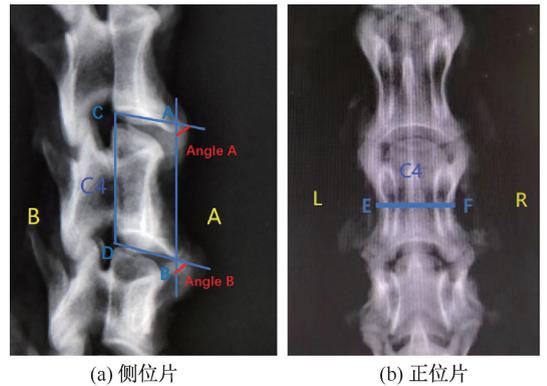


图1 山羊颈椎测量方法

Fig.1 Measurement of goat cervical vertebrae (a) Side view, (b) Positive view

通过对山羊颈椎标本的测量,由角A、角B确定钛网的上端水平切角及整体弧度,由EF及AC、BD确定钛网的直径,AB决定其前缘高度,CD决定后缘高度。具体计算方法如下:

上端水平切角 = $90^\circ - \text{角B}$

钛网整体弧度 = 角A - 角B

外圆直径依据EF及AC、BD所测量的最小值确定,前缘高度由AB测量数据中最小值加上钛网高度决定,后缘高度由CD测量数据中最小值加上钛网高度决定,具体结果见表1。

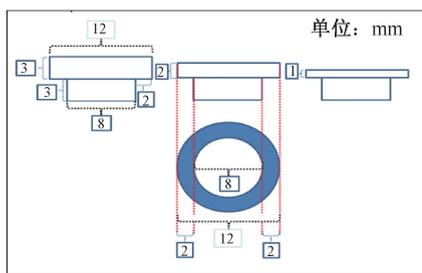
表1 山羊颈椎测量结果($n=24$)

Tab.1 Measurement results of goat cervical vertebrae

测量参数	数值	测量参数	数值
AB/cm	3.34±0.17	EF/cm	2.21±0.09
CD/cm	3.15±0.15	角 A/(°)	82.44±3.84
AC/cm	1.34±0.08	角 B/(°)	75.16±2.81
BD/cm	1.46±0.08		

1.2 新型弧形钛网结构

新型弧形钛网由钛网及两侧的终板环构成,均采用钛合金材质通过铸造形成,钛网与终板环通过卡压固定,可自由组合不同长度钛网及终板环。钛网中间中空,内圆直径 10 mm,外圆直径 12 mm,钛网壁厚 1 mm。钛网壁采用镂空结构,规律分布边长为 2 mm 的菱形小孔,有利于钛网中的植骨块与椎体充分接触,利于融合。通过数据测量,制作钛网前缘高度 30 mm,后缘高度 28 mm,上端水平切角为 14.9°,钛网整体弧度为 7°,符合山羊 C4 椎体正常生理曲度。两侧终板环外缘直径为 12 mm,高度有 3 种不同规格(1、2、3 mm)。内侧缘直径为 8 mm,长度为 3 mm,整体厚度为 2 mm。终板环既可与钛网牢固结合,也可以适应不同高度的椎体(见图 2)。



(a) 设计图



(b) 实物图

图2 新型颈椎弧形带终板环钛网模型及设计图

Fig.2 Model and design of the novel arch cervical titanium mesh with endplate ring

(a) Design drawing, (b) Pictures

1.3 标本制作

采集 24 具新鲜成年山羊颈椎标本,截取 C1~7 部位颈椎,逐个剔除肌肉,充分暴露标本骨性标志,保留椎间盘、韧带、关节等。用环锯将标本两端截平,取 C2~6 椎体,选取 C2 及 C6 椎体偏外侧,沿标本长轴,上下各拧入 1.5 cm 螺钉 2 枚,螺钉尾端保留 0.5 cm。配置自凝牙托粉(上海新世纪齿科材料有限公司)至黏稠状,将标本 C6 端垂直放入,保持标本生理弧度,待牙托粉固定后,将包埋好的模型从容器中取出,同理包埋 C2 端,保持两端包埋块平行。生理盐水纱布包裹标本,放入-20 °C 冰柜中保存。测试前 12 h 标本于室温下自然解冻,测量正常标本数据(A 组)。咬骨钳咬除 C4 椎体前缘骨头,刮勺去除 C3~4 及 C4~5 椎间盘,测试失稳模型三维运动范围(B 组)。C、D 两组完成失稳模型建立后,C 组使用新型弧形钛网,依据山羊颈椎椎体高度,选择不同终板环;D 组使用传统直型钛网,根据山羊颈椎高度,裁剪合适长度钛网。C、D 两组钛网内填满骨头,植入钛网,钢板螺钉固定,测量三维运动及抗沉降数据。手术均由前路手术经验丰富医师执行(见图 3)。

1.4 测量数据

1.4.1 三维运动实验 将模型固定于由南方医科大学生物力学实验室改进的脊柱三维运动实验加载装置中^[8]。对标本施加 2.0 N·m 载荷,实验前进行预加载,每个测量的椎体由 3 个荧光标记点对椎体所在平面进行标记(3 点确定 1 个平面),确保所有标记点均被三维激光扫描仪(3D Digital 公司,美国)定位。使用步态分析系统(6Eagle, Motion Analysis 公司,美国)进行采集脊柱在中立位、加载位及卸载位时的图像,由计算机图像处理和分析系统测量节段间角度位移的运动范围(range of motion, ROM),即 C3、C4、C5 节段标本前屈、后伸、左侧弯曲、右侧弯曲、左侧旋转、右侧旋转 ROM。

1.4.2 轴向压缩试验 抗沉降实验通过轴向压缩试验来实现。将 C、D 两组标本固定于 BOSE Electro Force 3510 疲劳试验机(频率 100 Hz,载荷+/-7.5 kN,动态应变+/-25 mm,BOSE 公司,美国)上,施加 1 个逐渐增大的轴向力矩(加载速度 0.02 mm/s),直至标本破坏或压缩力达到 200 N,记录此时的标本压缩位移(D)。颈椎压缩刚度(K)为作用在弹性元件



图3 山羊颈椎模型制作及实验过程

Fig.3 Establishment and experimental process of goat cervical spine model (a) Status after implantation of straight titanium mesh, (b) Status after internal fixation with plate and screw, (c) Three-dimensional motion test, (d) Anti subsidence test

上的力或力矩增量与相应位移或角位移的增量之比,其表达式为: $K=P/D$ (P 为载荷)。

1.5 数据处理

数据均采用 SPSS 23.0 软件进行分析,计量资料以均数±标准差表示,采用方差分析, $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 各组三维 ROM 比较

由表 2 可知,A 组各方向 ROM 均显著小于 B 组($P<0.05$);A 组各方向 ROM 均显著大于 C 组($P<0.05$);C 组在前屈 ROM 上显著小于 D 组($P<0.05$)。

2.2 新型弧形钛网与传统钛网刚度比较

由表 3 可知,在沉降实验中,无一例标本破坏,均为钛网发生沉降。C 组刚度比 D 组高,差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3 新型弧形钛网与传统钛网压缩位移比较

由表 4 可知,C 组压缩位移显著少于 D 组($P<0.05$)。

表 2 2.0 N·m 载荷下各组三维运动范围比较($n=24$)

Tab.2 Comparison of three-dimensional range of motion in each group under 2.0 N·m load 单位:(°)

工况	A 组	B 组	C 组	D 组
前屈	22.12±2.54	43.97±8.99*	8.11±1.07*	13.89±1.17*#
后伸	20.71±3.25	29.29±4.86*	8.01±1.30*	8.13±0.92*
左旋	8.13±3.54	30.63±5.11*	4.66±0.69*	4.83±0.55*
右旋	7.74±4.16	30.56±4.26*	4.41±0.74*	4.45±0.57*
左侧弯	22.48±3.10	31.30±3.06*	8.94±0.37*	8.94±0.76*
右侧弯	21.50±3.10	33.09±4.12*	8.46±1.40*	8.09±1.04*

注:*与 A 组对比, $P<0.05$;#与 C 组对比, $P<0.05$ 。

表 3 新型弧形钛网组与传统钛网组刚度比较($n=12$)

Tab.3 Stiffness comparison between novel arc titanium mesh group and traditional titanium mesh group 单位:N/cm

标本	C 组	D 组
1	157.92	78.74
2	159.64	119.65
3	203.31	120.79
4	144.82	87.23
5	197.85	139.21
6	147.35	141.54
平均刚度	168.48±25.58	114.48±26.27
F		13.014
P		0.005

表 4 新型弧形钛网组与传统钛网组压缩位移比较($n=12$)

Tab.4 Comparison of compression displacements between novel arc titanium mesh group and traditional titanium mesh group 单位:cm

标本	C 组	D 组
1	1.26	2.54
2	1.25	1.67
3	0.98	1.65
4	1.38	1.43
5	1.01	2.29
6	1.35	1.41
平均刚度	1.20±0.17	1.83±0.47
F		9.384
P		0.012

3 讨论

3.1 设计原理及优势

颈椎椎体次全切除术后钛网下沉主要发生在下位椎体上终板,钛网沉降的发生主要受椎体骨质条件及钛网本身因素的影响。由于目前所使用的钛网端面一般较平整,而下位椎体上终板通常在矢状面呈向后上方倾斜,导致钛网与终板接触面不平

整,应力集中,使得钛网下端更易刺破上终板,导致塌陷^[9-11]。终板环虽然通过增加接触面积降低了单位面积压力,但仍有局限性^[12]。因此,本课题组提出一种新型弧形钛网,改良了传统钛网的形状,其优势在于通过收集正常成年人颈椎生理弧度,设计出带有弧度的钛网,使新型弧形钛网两端更加贴合终板,避免钛网与终板成角产生剪切力,导致钛网沉降。两端采用终板环,增加接触面积,减小单位面积应力,并且通过设计不同高度终板环,以满足不同人群之间椎体的大小差异。而钛网体本身采用镂空结构,有利于钛网中的植骨块与椎体充分接触,利于融合。

3.2 实验结果分析

对比分析4组标本的三维ROM发现,A组标本在剔除肌肉仅保留关节、椎间盘及韧带后,ROM保持在正常山羊颈椎ROM内。B组作为骨折不稳定组,与A组比较,三维稳定性明显下降,差异有统计学意义。该结果表明失稳模型建立成功,符合实验所需的颈椎失稳状态,使实验具有现实意义。C组与D组为钛网钢板固定组,三维稳定性较A、B两组均有提升,提示新型钛网及传统直型钛网钢板内固定后均可以消除颈椎失稳状态,限制ROM,有利于植骨块的愈合,在愈合过程中维持椎体高度,避免植骨块在爬行替代的愈合过程中发生塌陷,导致颈椎弧度消失。新型钛网组及传统钛网组的对比结果显示,两组在后伸、左右侧弯、左右旋转时差异均无统计学意义,但新型钛网组的前屈ROM小于传统钛网组。在左右侧弯、左右旋转及后伸状态时,颈椎保持生理性的前凸,应力集中于椎体后方,新型钛网组与传统钛网组后方可活动范围及构造相似,在后方应力集中时,两组单位面积所受压强基本保持一致,故两组后伸ROM无明显差异。而颈椎在前屈时,椎体前缘应力集中,新型钛网的弧度设计使得终板环与椎体表面更加贴合,前屈时可活动范围较小,故新型钛网组在前屈活动时更容易受限。结合有限元分析结论,新型钛网在终板面的等效应力呈现前大后小的规律^[6]。马永刚等^[13]研究认为,椎体终板前缘主要是皮质骨,中后缘主要是松质骨。而皮质骨具备高强度、刚度、韧性,且修复能力较强^[14]。正常人体抗压能力前缘大于中后缘,故新型钛网的设计更加符合颈椎生理特点。

C、D组的抗沉降实验结果表明,两组刚度差异有统计学意义。正常成年贵州白山羊体重约为26 kg,200 N压缩力对山羊颈椎可产生较大载荷。依据应力公式,在相同载荷下,面积与应力成反比,而新型弧形钛网的上下终板环扩大了接触面积,分散钛网对终板所产生的应力,故在短期载荷下具有更强抗沉降效果。根据目前实验结果可知,在高强度急性颈椎载荷下,新型钛网更能抗压及沉降。考虑到新型钛网的弧度设计使得终板环与椎体表面更加贴合,可以让应力分布更为均匀,有利于减少椎体表面应力集中引起的骨吸收,从而缓解钛网沉降,但长期的钛网沉降率仍需在活体中进一步实验。

3.3 设计不足及问题

本文通过实验证实了新型弧形钛网具有诸多优势,但目前仍有以下不足需要思考与解决:①与传统直型钛网不同,新型弧形钛网在受到垂直方向的力矩时,会沿钛网长轴及水平方向分别产生1个力矩,水平方向的力矩将会使钛网有向椎体前缘移动的趋势,颈椎的长期活动是否会导致钛网向前滑脱,仍需进一步研究;②本实验仅在山羊尸体标本上进行,未开展活体实验,对于钛网在活体中的融合率及沉降率,仍需进一步实验研究;③本实验可能存在因样本较少而未能观察到的情况;④个体标本之间存在差异性。⑤运动加载装置的不足,例如:如何精准地施加力的大小、试验过程的自动控制等^[15];⑥尽管在实验过程中一直尽量控制变量,但实验仍存在一定误差,对于每个标本终板处理的量不同可能导致钛网与终板存在不同大小间隙,使得压缩位移产生一定偏差。并且,每个颈椎标本的椎间盘弹性不一及椎体骨量不同,均有可能导致位移偏差。

4 结论

根据生物力学实验结果可知,在急性载荷下的抗沉降能力上,新型弧形钛网组较传统直型钛网组更加优秀。并且,新型弧形钛网组同样具有良好的三维稳定性,在颈椎最为频繁的前屈动作中,比传统直型钛网组具有更好的稳定性。从生物力学、解剖学看,新型弧形钛网的优点在理论上非常明显,可以支撑椎体高度及恢复弧度,促进序列的矫正和平衡,具有临床可行性,值得进一步研究推广。

参考文献:

- [1] PATTON G, MORRIS P, KUO Y, *et al.* Accuracy of fluoroscopy versus computer-assisted navigation for the placement of anterior cervical pedicle screws [J]. *Spine*, 2015, 40(7): E404-E410.
- [2] RHMA B, GOFFIN J. Albert Dereymaeker and Joseph Cyriel Mulier's description of anterior cervical discectomy with fusion in 1955 [J]. *J Neurosurg Spine*, 2018, 28(4): 395-400.
- [3] YU C, MU X, WEI J, *et al.* In-depth analysis on influencing factors of adjacent segment degeneration after cervical fusion [J]. *Med Sci Monit*, 2016, 22: 4902-4910.
- [4] 赵改平, 陈楠心, 宋燕美, 等.前路椎体次全切除减压融合术治疗下颈椎的有限元分析[J].*医用生物力学*, 2017, 32(3): 227-234.
ZHAO GP, CHEN NX, SONG YM, *et al.* Finite element analysis on lower cervical spine by anterior cervical corpectomy and fusion surgery [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(3): 227-234.
- [5] TASIQU A, GIANNIS T, BROTIAS AG, *et al.* Anterior cervical spine surgery-associated complications in a retrospective case-control study [J]. *J Spine Surg*, 2017, 3(3): 444-459.
- [6] 高晓文. 新型弧形带终板环钛网的研制及三维有限元分析 [D].衡阳: 南华大学, 2020.
- [7] 黄师, 侯铁胜, 赵鑫, 等.山羊颈椎能成为人类颈椎的良好模型吗? [J].*中国临床解剖学杂志*, 2008, 26(3): 329-331.
- [8] 赵卫东, 李鉴轶, 樊继宏, 等. 脊柱三维运动实验方式的改进[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2004, 22(3): 313-317.
- [9] WU J, LUO D, YE X, *et al.* Anatomy-related risk factors for the subsidence of titanium mesh cage in cervical reconstruction after one-level corpectomy [J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8(5): 7405-7411.
- [10] 叶梓健, 吴强. 颈椎前路钛网下沉原因及对策研究进展[J]. *临床医药文献电子杂志*, 2019, 6(40): 83-84.
- [11] CHOU YC, CHEN DC, HSIEH WA, *et al.* Efficacy of anterior cervical fusion: Comparison of titanium cages, polyetheretherketone (PEEK) cages and autogenous bone grafts [J]. *J Clin Neurosci*, 2008, 15(11): 1240-1245.
- [12] 何磊, 钱宇, 金以军, 等. 终板环在颈椎前路椎体次全切除植骨融合术中防止钛网沉陷的临床价值[J]. *中国骨伤*, 2014, 27(9): 738-744.
- [13] 马永刚, 刘世清, 李亚明, 等. 颈椎前路减压融合术后钛笼下沉临床分析[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2011, 21(1): 21-23.
- [14] 许灿, 李清明, 王成功, 等. 皮质骨的多级结构和初化机制研究进展[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 273-279.
XU C, LI QM, WANG CG, *et al.* Research progress on hierarchical structure of cortical bone and its toughening mechanisms [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 273-279.
- [15] 季伟, 王向阳. 脊柱离体运动加载方法研究进展[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(4): 464-469.
JI W, WANG XY. Advances on loading methods for spinal movement *in vitro* [J]. *J Med Biomech*, 27(4): 464-469.