

论著·基础研究 doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2016.06.005

经椎间孔腰椎椎间融合术后椎体应变分布特点研究*

刘玉武¹,程志军¹,曾志华^{2△},赵卫东³

(1. 浙江省江山市人民医院骨科,浙江江山 324100;2. 重庆医科大学中医药学院针灸推拿教研室,重庆 401331;
3. 南方医科大学解剖教研室,广州 510515)

[摘要] **目的** 分析经椎间孔腰椎椎间融合术(TLIF)双侧椎弓根螺钉内固定后的节段稳定性和椎体应变分布特点。**方法** 选用 10 份小牛脊柱(L_{3~6})标本进行生物力学测试,于 L₄ 椎体两侧粘贴电阻应变片。在屈伸、侧弯、旋转方向对本体施加 5.0 Nm 的纯力矩,记录完整模型和 TLIF 手术固定模型前屈及侧弯运动下的应变数据,同时记录固定节段三维运动数值。**结果** 固定状态较完整状态显著减少了固定节段的活动范围($P<0.01$)。在完整状态和固定状态下,侧弯运动时的椎体前柱皮质应变分布显著高于前屈状态($P<0.01$);在前屈和侧弯运动中,椎弓根螺钉固定后应变较完整状态显著减少 43.20%和 47.20%($P<0.05$)。在固定状态下,椎体右侧应变分布在前屈运动中高于椎体左侧应变分布($P<0.05$)。**结论** 椎弓根螺钉固定可以实现 TLIF 模型的即刻稳定性,椎体前柱皮质应变分布受内固定影响发生明显改变。

[关键词] 腰椎;经椎间孔腰椎椎间融合术;三维运动;应变分布;生物力学

[中图分类号] R681.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2016)06-0734-03

Study on strain distribution characteristics of vertebral body in transforaminal lumbar interbody fusion*

Liu Yuwu¹, Cheng Zhijun¹, Zeng Zhihua^{2△}, Zhao Weidong³

(1. Department of Orthopedics, Jiangshan Municipal People's Hospital, Jiangshan, Zhejiang 324100, China; 2. Teaching and Research Section of Acupuncture and Massage, College of Traditional Chinese Medicine, Chongqing Medical University, Chongqing 401331, China; 3. Teaching and Research Section of Anatomy, Southern Medical University, Guangzhou, Guangdong 510515, China)

[Abstract] **Objective** To analyze the stability and vertebral body strain distribution after bilateral pedicle screw internal fixation in transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF). **Methods** Ten calf lumbar specimens (L_{3~6}) were selected for conducting the biomechanical testing. Two resistance strain gauges were fixed on lateral sides of L₄ vertebral body. The pure torque of 5 Nm in the directions of flexion, lateral bending and rotation motion was exerted on the samples. The strain data of the intact model and TLIF operative fixation model were recorded under anterior flexion and lateral bending motion. Meanwhile the 3-dimensional motion numerical values of fixation segment were recorded. **Results** Compared with the intact status, the fixation status significantly decreased the range of motion (ROM) of the fixation segment ($P<0.01$). In the intact status and fixation status, the anterior column cortical strain distribution in the lateral bending was significantly higher than that in the anterior flexion ($P<0.01$). In the anterior flexion and lateral bending, the strain of vertebral body after pedicle screw fixation was significantly decreased by 43.20% and 47.20% compared with the intact status ($P<0.05$). Under the fixation status, the strain distribution on the right side of vertebral body in the anterior flexion motion was significantly higher than that of the left side ($P<0.05$). **Conclusion** The pedicle screw fixation can realize the immediate stability of TLIF model. The cortex bone strain distribution of the vertebral anterior column is obviously affected by internal fixation and significantly changed.

[Key words] lumbar vertebrae; transforaminal lumbar interbody fusion; 3D motion; strain distribution; biomechanics

经椎间孔腰椎椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)是治疗脊柱退行性疾病的常用手段之一。特别是微创 TLIF(MI-TLIF)正被越来越多的脊柱外科医生所接受。临床研究证实,这种手术方式可以减少术中出血、术后腰痛程度、住院时间、止痛药的使用及缩短患者重返工作岗位的时间^[1-3]。有文献报道 TLIF 手术可以实现良好的椎间融合^[4-5],其需要通过后路固定重建术后即刻稳定性。已有采用不同的内固定方式比较术后即刻稳定性的研究证实后路双侧椎弓根螺钉固定为最稳定的重建方式^[6]。固定后节段的载荷传递主要由后路方向椎弓根螺钉和椎间融合器两部分分担。目前的研究主要针对固定节段即刻稳定性而较少关注固定前

后椎体表面应变分布的变化情况。随着对后路坚强固定导致的应力遮挡效应的日益关注,椎间融合手术对于腰椎的应力传导和分布的影响值得进一步的研究。本研究通过比较完整状态和内固定后状态下的稳定性和椎体前柱载荷分布,研究 TLIF 模型固定前后椎体应变的改变情况。

1 材料与方法

1.1 材料 实验选用新鲜小牛 L_{3~6} 腰椎标本 10 份, X 线排除椎体骨折及肿瘤病变,密封后放置于 -20℃ 的低温冰箱保存,实验前将标本置于室温下解冻 10 h 左右,然后进行标本处理,予小心剔除椎体周围肌肉,保留周围韧带组织。两端椎体各拧入 4 枚螺丝钉作包埋固定加强使用。调配牙托石膏粉包

* 基金项目:重庆市卫生局科技计划项目(2011-2-146)。 作者简介:刘玉武(1973-),主治医师,硕士研究生,主要从事骨科生物力学研究。 △ 通讯作者, Tel:13626702305; E-mail:zhihua332211@163.com。

埋端椎 L₃、L₆。L_{4~5} 作为手术固定节段。单轴式电阻应变片(华欧电阻有限公司)用于评价椎体前柱的应变大小。在 L₄ 和 L₅ 椎体上通过克氏针连接,各放置 4 个红外线标志,应用 Optotrak 三维运动测量系统采集标志点的运动,以计算 L_{4~5} 节段的运动角度范围。实验过程中使用生理盐水喷洒标本表面以保持湿润。实验选用椎弓根螺钉为万向椎弓根钉棒系统,棒直径为 5.50 mm(通用上海医疗器材有限公司),采用双侧固定的方式固定 L_{4~5} 节段。

1.2 方法 采用新型脊柱试验机对标本分别施加大小为 5 Nm 的前屈/后伸、左/右侧弯和左/右轴向旋转的纯力偶矩,记录 L_{4~5} 节段的三维运动数值。测试状态包括完整状态、TLIF 模型固定状态(L_{4~5} 双侧小关节突切除加椎间盘摘除和右侧椎间融合器置入及双侧万向椎弓根钉固定 L_{4~5} 节段)。在 L₄ 椎体中部左、右两侧各粘贴 2 片电阻式应变片。电阻应变片粘贴方法参照如下方法进行:首先彻底去除粘贴部位软组织并用纱布将局部打磨平整,之后依次采用乙醇、丙酮和 2-丙醇脱脂,接下来氰基丙烯酸酯粘合剂将电阻应变片粘贴在靶点位置,待粘合剂完全干燥之后再于电阻应变片表面涂抹聚氨酯防水涂料。应变片位置低于 L₄ 椎弓根螺钉置钉平面 2 mm,其纵轴平行于椎体纵轴(图 1),分别标记为:左前、左侧、右前、右侧。电阻应变片采集前屈和左右侧弯运动状态下的电阻应变数据。每次测试加载/卸载重复 3 次,在第 3 次循环时进行运动学测量,以减少标本粘弹性影响^[7]。

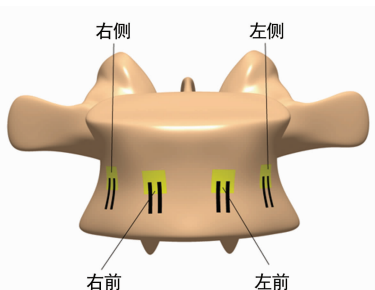
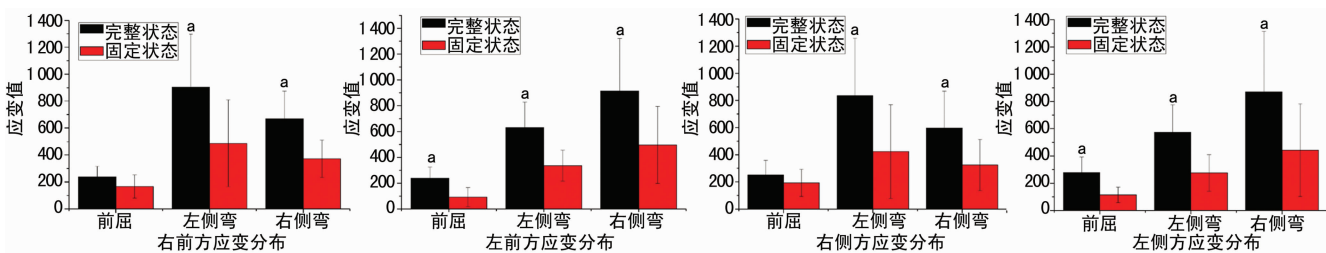


图 1 电阻应变片位点示意图

1.3 统计学处理 采用 SPSS13.0 统计软件进行统计分析。运动范围(ROM)大小及应变值用 $\bar{x} \pm s$ 表示,完整状态和固定状态的 ROM、应变值比较采用配对 *t* 检验。电阻应变值大于



^a: $P < 0.05$, 与固定状态比较。

图 3 完整状态与固定状态下 L₄ 椎体表面在前屈和侧弯运动中的应变分布

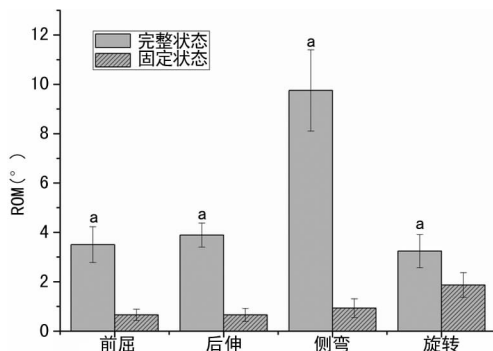
3 讨论

本研究结果提示在 TLIF 手术模型下,后路坚强固定可以显著减少固定节段的三维运动,提高固定节段的稳定性,相对于完整状态而言在前屈、后伸、侧弯和旋转方向上分别减少 81.00%、83.00%、93.00% 和 42.00% 的节段活动度。固定状态的椎体前柱皮质骨应变数值显著低于完整状态的应变数值,前屈和侧弯运动下分别相对完整状态减少 43.20%、47.20%、

50.00 微应变的数据纳入分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 节段活动度 后路坚强固定可以显著减少固定节段的三维运动,提高固定节段的稳定性,相对于完整状态而言在前屈、后伸、侧弯和旋转方向上分别减少 81.00%、83.00%、93.00% 和 42.00% 的节段活动度。固定状态的椎体前柱皮质骨应变数值显著低于完整状态的应变数值,前屈和侧弯运动下分别相对完整状态减少 43.20%、47.20%。在各种运动状态下,固定后状态均较完整状态显著减少了固定节段的 ROM ($P < 0.01$),见图 2。



^a: $P < 0.01$, 与固定状态比较。

图 2 完整状态与固定状态 L_{4~5} 节段的 ROM 比较

2.2 椎体前部应变分布 单轴式电阻应变片在屈曲运动状态下表现为压缩应变,在侧弯状态下一侧为屈曲应变另一侧为牵张应变。纳入分析的数据比例为 97.50%,排除主要原因是第 5 号标本左侧方位点处电阻应变片松动,测量数据异常。在完整状态和固定状态下,每个电阻应变片在侧弯运动时测得的应变值均大于前屈运动 ($P < 0.01$);同时,固定状态下的椎体前柱应变值较完整状态显著减少 ($P < 0.05$)。此外,在完整状态下左右两侧的电阻应变测试点测得的应变分布是一致的。在固定状态下前屈运动时右侧的应变分布显著高于左侧 ($P < 0.05$),左右侧弯运动时左右两侧应变分布仍保持一致 ($P > 0.05$)。所有应变结果取绝对值,在前屈和侧弯运动状态下各个电阻片测得的应变数据,见图 3。

提示在后路坚强固定对椎体载荷分布产生了影响。在 TLIF 手术后固定节段的载荷主要由后路坚强固定和椎间植入物分担。这种改变使载荷更多集中与后部内植物上,带来了潜在的内植物松动折断的风险。在 MI-TLIF 手术中采用的是中空万向椎弓根螺钉系统,其球窝偶联结构的屈服载荷较低,强度较传统的单向椎弓根螺钉低,更易发生结构失效^[8]。同时,有限元分析结果指出,在中空万向椎弓根钉棒结构中,椎弓根钉的

根部是应力集中的地方,容易造成螺钉折断^[9-10]。这与临床上观察到的结果是一致的。Wang 等^[11]曾报道万向椎弓根螺钉在短节段固定胸腰椎骨折的临床研究中出现前柱高度显著丢失及螺钉折断的现象。此外,理论上由于前柱载荷分担减少,椎间融合器所受应力减少,可能影响植骨融合的效果。但是,由于万向椎弓根螺钉屈服载荷低,当轴向载荷过大导致其丧失轴向支撑作用之后,通过椎间融合器承担的轴向载荷将显著增加,这反增加了椎间融合器沉降及椎间高度丢失风险。影像学研究显示,在 TLIF 术后有较高风险,可观察到不同程度的椎间融合器沉降的现象^[12-13]。

Kettler 等^[14]采用载荷控制的方式,研究了后柱结构切除模型下椎体不同部位的载荷分布的变化情况。研究发现同一位置在不同载荷条件下所测得的应变分布是不同的,其中前屈时应变值最大,侧弯时相对较低。与本研究完整状态比较,前屈运动下的应变分布显著低于侧弯运动下的应变分布,这与 Kettler 等^[14]的研究结果不同,主要原因在于他的研究中椎体后柱的骨性和韧带结构切除模型以便于分析前柱椎体应变分布情况,而本研究中保留了这些后部结构。后柱结构在前屈运动中起到张力带作用,减少了前柱椎体的载荷分担,因此降低了前柱应变分布。同样的道理,在 TLIF 模型建立后采用椎弓根螺钉重建了椎体后部结构的稳定性,在这种情况下仍然是前屈运动下的应变分布显著低于侧弯运动下的应变分布。

在前屈运动中,位于椎体右侧的电阻应变片测得的应变数值显著高于左侧的电阻应变片测得的数值。本研究认为出现这种情况是因为本研究是从右侧斜行置入单枚子弹型椎间融合器,融合器位置偏右,给予椎体右侧前柱较多的支撑。在前屈运动中椎间反作用力主要由椎间融合器为中心提供,右侧更靠近融合器,其承担的应力较大,因此产生的应变也将相应的增加。所以出现了固定状态下应变的偏态分布。为了避免出现此种情况,采用双侧椎间融合器植入应该是可行的办法。

本研究中采用的小牛标本而非人标本进行实验,虽然小牛标本是文献报道的最接近人脊柱标本的替代物^[14],但二者仍存在差异。在本研究中探索轴向压缩载荷下所产生的应变分布变化是本研究的主要目的,因此没有记录旋转状态和后伸运动状态下的应变数据。此外,由于小牛标本前纵韧带和纤维环的阻滞作用,在后伸状态下的应变数据极其杂乱无章,无法纳入分析。

后路椎弓根钉系统固定腰椎减压术后的不稳定节段,可以提供有效的即刻稳定性。后路内固定状态下椎体前柱的应变分布显著减少,提示前柱结构分担的载荷减少,载荷更多的集中于后部内植物上,增大了内植物相关风险,特别是在 MIS-TLIF 术中采用的中空万向椎弓根螺钉系统的强度较低情况下,这种潜在的风险更需要引起重视。

参考文献

[1] Karikari IO, Isaacs RE. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: a review of techniques and outcomes [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35 (26 Suppl): S294-301.

[2] Tian NF, Wu YS, Zhang XL, et al. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: a meta-analysis based on the current evidence [J]. *Eur Spine J*,

2013, 22(8):1741-1749.

- [3] Wu RH, Fraser JF, Hartl R. Minimal access versus open transforaminal lumbar interbody fusion: meta-analysis of fusion rates [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35 (26): 2273-2281.
- [4] Wang L, Wang Y, Li Z, et al. Unilateral versus bilateral pedicle screw fixation of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS-TLIF): a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *BMC Surg*, 2014, 14 (1): 87.
- [5] Lee KH, Yue WM, Yeo W, et al. Clinical and radiological outcomes of open versus minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21 (11): 2265-2270.
- [6] Chin KR, Reis MT, Reyes PM, et al. Stability of transforaminal lumbar interbody fusion in the setting of retained facets and posterior fixation using transfacet or standard pedicle screws [J]. *Spine J*, 2015, 15(5): 1077-1082.
- [7] 崔明星, 詹新立, 肖增明, 等. 人与山羊上胸椎体外三维生物力学的比较 [J]. *广东医学*, 2013, 34(24): 3701-3703.
- [8] Stanford RE, Loeffler AH, Stanford PM, et al. Multiaxial pedicle screw designs: static and dynamic mechanical testing [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(4): 367-375.
- [9] Li C, Zhou Y, Wang H, et al. Treatment of unstable thoracolumbar fractures through short segment pedicle screw fixation techniques using pedicle fixation at the level of the fracture: a finite element analysis [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e99156.
- [10] Ambati DV, Wright EK Jr, Lehman RA Jr, et al. Bilateral pedicle screw fixation provides superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: a finite element study [J]. *Spine J*, 2015, 15(8): 1812-1822.
- [11] Wang HW, Li CQ, Zhou Y, et al. Percutaneous pedicle screw fixation through the pedicle of fractured vertebra in the treatment of type a thoracolumbar fractures using Sextant system: an analysis of 38 cases [J]. *Chin J Traumatol*, 2010, 13(3): 137-145.
- [12] Kim MC, Chung HT, Cho JL, et al. Subsidence of polyetheretherketone cage after minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(2): 87-92.
- [13] Lee JH, Jeon DW, Lee SJ, et al. Fusion rates and subsidence of morselized local bone grafted in titanium cages in posterior lumbar interbody fusion using quantitative three-dimensional computed tomography scans [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35(15): 1460-1465.
- [14] Kettler A, Liakos L, Haegerle B, et al. Are the spines of calf, pig and sheep suitable models for pre-clinical implant tests [J]. *Eur Spine J*, 2007, 16(12): 2186-2192.