

脊柱交界区终板抗压强度分布规律的生物力学研究

李光灿¹, 郑连杰¹, 李靖年¹, 李正维¹, 刘晓凯², 李志刚³

(1 大连医科大学附属第二医院骨科 116023 大连市; 2 朝阳市中心医院骨科 122000 朝阳市;

3 大连大学附属中山医院骨科 116001 大连市)

【摘要】目的:探讨脊柱交界区终板不同位点抗压强度及其分布规律。**方法:**选用 5 具成年男性新鲜脊柱标本的颈胸段、胸腰段及腰骶段,共 65 个椎体 125 个终板,采用环形取点的方式,对每个终板平面的 49 个测试点用直径 1.5mm 的平底压头进行连续压缩加载试验,获得最大压缩力,所得数据进行统计分析。**结果:**以椎体为单位,颈胸段终板从 C4 开始抗压强度逐渐下降,至 C7 达到最低点,C7~T1 明显升高。胸腰段各椎体终板的抗压强度呈依次上升趋势,腰骶段 L3、L4 终板抗压强度继续上升,L5 出现降低,S1 节段再次升高。颈胸段与胸腰段抗压强度均小于腰骶段($P<0.01$)。上下终板抗压强度变化趋势相似。各段椎体抗压强度下终板强于上终板($P<0.01$)。椎间隙相邻面上一椎体下终板的抗压强度大于下一椎体上终板($P<0.05$)。由内至外,抗压强度逐渐增大($P<0.05$)。颈胸段和腰骶段的后部终板抗压强度大于前部,而胸腰段为前部大于后部($P<0.05$)。**结论:**不同节段终板的抗压强度分布规律不同,临床安放椎间置入物时需注意置入物的大小及放置位置。

【关键词】 脊柱;交界区;终板;抗压强度;生物力学

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2011.05.09

中图分类号:R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2011)-05-0395-05

Stress distribution of endplate at cervicothoracic, thoracolumbar and lumbosacral junction: a biomechanical study/LI Guangcan, ZHENG Lianjie, LI Jingnian, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2011, 21(5): 395~399

【Abstract】 Objective: To investigate the stress distribution of endplate at cervicothoracic, thoracolumbar and lumbosacral junction. **Method:** A total of 65 vertebral bodies (125 endplates) from 5 intact human vertebrae (C4-T1, T11-L2, L3-S1) was used for test, 49 test points at each endplate were indented by using a 1.5mm-diameter plane indenter, a continuous load was added in all specimen and, the results were processed by statistical analyses. **Result:** The failure load distributions of endplates varied significantly among the three sites. At cervicothoracic junction, the failure load decreased from C4 to C7, and increased from T1. At thoracolumbar junction, the failure load increased from T11 to L2, which continued to L3 and L4, but ceased in L5, and then increased again from S1. The yield load in endplates of cervicothoracic and thoracolumbar junction was lower than that in lumbosacral junction ($P<0.05$). The failure load of inferior endplates was significantly higher than that of superior endplates ($P<0.01$). As for intervertebral space, the cranial endplates had a higher yield stress than caudal endplates ($P<0.05$). The failure load increased from central to peripheral zones. At cervicothoracic and lumbosacral junction, the failure load of posterior endplates was higher than anterior regions, but on the contrary for endplates of thoracolumbar junction ($P<0.05$). **Conclusion:** The stress distributions of the endplates vary significantly among three junctions. It is cautious to consider their size and location when placing instrument.

【Key words】 Spine; Junction; Endplate; Compressive stress; Biomechanics

【Author's address】 The Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian, 116023, China

椎间盘或椎体切除后常需内置物支撑。但置入物沉陷进而导致椎间隙变窄、生理屈度异常甚

至手术失败是临床常见并发症。终板的负载能力是影响内置物沉陷的重要因素,但脊柱终板负重情况的相关报道较少。笔者研究了脊柱颈胸段、胸腰段和腰骶段等不同节段终板的抗压强度及其分布规律,以期为临床应用提供实验依据。

第一作者简介:男(1970-),副教授,博士,研究方向:脊柱外科

电话:(0411)84671291-3051 E-mail:doclige@sohu.com

通讯作者:郑连杰 E-mail:zhenglianjie@yahoo.cn

1 材料与方法

1.1 标本制备

5 具成年男性新鲜脊柱标本: 颈胸段 (C4~T1)、胸腰段 (T11~L2) 及腰骶段 (L3~S1), 共 65 个椎体 125 个终板。年龄 22~28 岁, 平均 25.5 岁。经 X 线摄片确定椎体完好, 无骨质疏松及退行性变。剔除周围软组织及附件, 分离各节段, 去除椎间盘及软骨终板, 显露骨性终板, 所有终板均完好。标本置于 -20℃ 冰箱冷冻保存, 实验前于室温下解冻 30min。

1.2 实验方法

1.2.1 测试点确定 采用直角平面坐标环形取点, 在每个终板表面建立坐标系 (图 1), 以椎体正中矢状径中心作为原点 O, 正中矢状线作为 Y 轴, 通过原点 O 作 Y 轴垂直线 X 轴, X 轴作为 0° 线, 每 30° 建立一条角度坐标线, 依次作出 30°、60°……330° 线, 用微米游标卡尺测量出每条线上原点 O 到椎体边缘的距离, 均分 5 等份, 取各坐标线上 20%、40%、60%、80% 各点, 包括原点 O 在内共 49 个点作为测试点, 以油性笔于终板表面作标记 (图 1)。压缩加载实验时若测试点之间距离太小造成相邻测试点终板破坏, 则予以删除。

1.2.2 生物力学测试 以自制夹具固定标本, 在电子万能实验机 (型号 CSS-2205, 最大负荷 50kN, 精确度 0.1N) 上用直径 1.5mm 的平底压头, 以 12mm/min 的速度垂直于终板平面在每个测试点进行连续压缩加载至破坏, 记录压缩力-位移曲线, 在最大破坏载荷下降 5% 后停止加载, 于实验机上读取最大压缩力数值。定义角度坐标线 30°~150° 为终板前部, 0°~180° 线为中部, 210°~330° 线为后部。

1.3 统计学分析

所得数据用均数±标准差 ($\bar{x}\pm s$) 表示, 采用 SPSS 13.0 统计软件, 采用单因素方差分析, 两样本间比较用 *t* 检验, 显著性水平设双侧 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 脊柱交界区最大抗压强度分布规律

脊柱各交界区终板的最大抗压强度分布不同 (表 1)。以椎体为单位, 颈胸段从 C4 开始抗压强度逐渐下降, 至 C7 达到最低点, 但 C7~T1 椎板抗压强度明显升高。胸腰段各椎体终板的抗压强度呈依次上升趋势, 而腰骶段延续了胸腰段的上升

趋势, 但在 L5 出现降低, 与 C7~T1 节段变化类似, 在 S1 节段再次表现为抗压强度明显升高。颈胸段和胸腰段总体抗压强度无明显差别 ($P>0.05$), 但颈胸段与胸腰段抗压强度均小于腰骶段 ($P<0.01$)。除 C5~C6、T11~T12 和 L4~L5 以外, 其他各相邻椎体间上下终板抗压强度均存在显著性差异 ($P<0.05$) (表 1, 图 2)。上终板抗压强度自 C4~C7 逐渐下降达最低, 但 C7~T1 明显升高; T11~S1 呈逐渐上升趋势, 下终板与上终板类似, 但 L5 出现降低。各椎体抗压强度下终板高于上终板 ($P<0.01$), 组间比较除 C5、T1 外, 其他各椎体下终板抗压强度大于上终板 ($P<0.05$, 表 1)。

2.2 椎间隙相邻面终板强度分布规律

比较终板所有压力点, 脊柱各交界区椎间隙相邻面上一椎体下终板的抗压强度大于下一椎体上终板 ($P<0.05$, 表 1)。除 C5/6、T12/L1 与 L5/S1 间隙外, 其他各间隙和总体均存在显著性差异。

2.3 脊柱交界区终板中央至外周强度分布规律

随着压力点逐渐外移, 抗压强度逐渐增大。除原点与 20% 压力点无显著性差异外, 其他各组间均存在显著性差异。从 20% 压力点开始向周边移动, 终板强度逐渐增大 ($P<0.05$, 图 3)。脊柱各交界区终板处于不同角度的压力点, 其抗压强度亦存在差异 (图 4)。胸腰段前部 30°~150° 角度线抗压强度较高, 而腰骶段在椎体后部 210°~330° 角度抗压强度较高 ($P<0.01$)。

2.4 脊柱各交界区终板前后强度分布规律

总体上, 终板前中后部强度不同, 颈胸段和腰骶段的后部终板抗压强度大于前部, 而胸腰段前部大于后部 ($P<0.05$)。不同节段以及相同节段不同部位间抗压强度均有不同 ($P<0.05$, 表 2)。

3 讨论

置入物沉陷是脊柱前路手术的常见并发症, 沉陷的发生与终板的局部强度关系密切^[1]。终板的厚度、骨密度及其分布等因素在一定程度上决定着终板强度, 近年来的研究表明, 终板的厚度在不同椎体以及同一椎体终板的不同区域均存在差异^[2-8]。Pitzen 等^[2]发现成人颈椎终板外周区域的厚度大于中心区域。Panjabi 等^[3]发现颈椎上终板前部较薄后部较厚, 下终板前部较厚后部较薄, 中央区域上终板比下终板薄。Edwards 等^[4]测量了 20 例胸腰椎标本, 发现终板由上至下逐渐增厚, 下腰

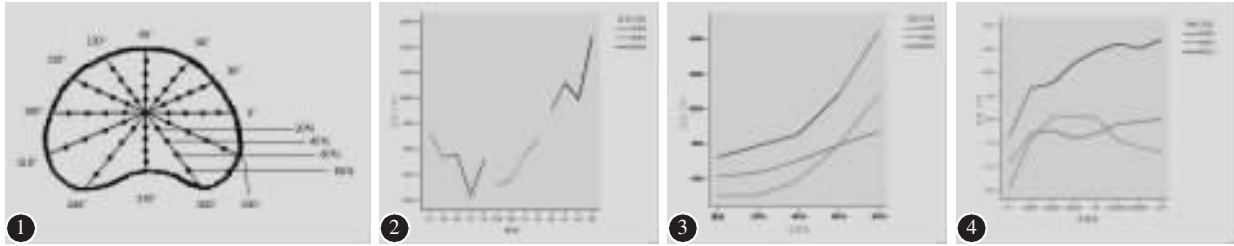


图 1 终板上测试点示意图 图 2 脊柱各交界区抗压强度曲线 图 3 脊柱各交界区终板中央至外周抗压强度曲线 图 4 脊柱各交界区终板不同角度组抗压强度曲线

表 1 脊柱交界区椎体终板最大抗压强度测量结果 ($\bar{x}\pm s, n=5, N$)

椎体	总体	上终板	下终板
C4	85.77±40.18	81.17±41.03	90.33±38.88 ^②
C5	77.01±38.48 ^①	76.07±38.70 ^④	77.93±38.32 ^③
C6	78.09±39.96	72.63±38.71	83.58±40.53 ^②
C7	61.84±28.94 ^①	57.57±26.99 ^{③④}	66.13±30.24 ^{②③}
T1	75.93±30.42 ^①	74.55±30.15 ^{③④}	77.31±30.70 ^③
T11	65.79±38.88	59.37±34.31	72.21±42.06 ^②
T12	68.35±33.91	64.40±32.78 ^④	72.31±34.61 ^②
L1	77.88±31.29 ^①	72.12±29.55 ^③	83.67±31.98 ^{②③}
L2	84.06±35.22 ^①	75.85±25.08 ^④	92.28±41.49 ^{②③}
L3	95.86±49.64 ^①	79.45±30.85 ^④	112.26±58.71 ^{②③}
L4	105.97±61.53 ^①	82.97±28.95 ^④	128.87±75.38 ^{②③}
L5	99.67±43.79	85.87±29.10 ^④	113.48±51.11 ^{②③}
S1	124.14±67.08 ^①	124.14±67.08 ^③	

注:①与上一椎体总体比较 $P<0.05$, ②与同一椎体上终板比较 $P<0.05$, ③与上一椎体同终板比较 $P<0.05$, ④与上一椎体下终板比较 $P<0.05$

表 2 脊柱交界区不同节段椎体终板前后部抗压强度测量结果 ($\bar{x}\pm s, n=5, N$)

椎体	终板前部	终板后部
C4	78.45±35.61	91.93±44.76 ^①
C5	77.93±40.37	77.20±36.47
C6	79.37±40.13	79.11±40.76
C7	60.41±31.01	65.46±29.24
T1	72.89±29.60	81.82±32.15 ^①
T11	73.62±41.25	60.48±36.76 ^①
T12	75.05±34.94	63.25±32.42 ^①
L1	84.10±30.29	72.85±32.10 ^①
L2	91.45±35.14	79.24±35.87 ^①
L3	103.75±51.34	93.02±52.65 ^①
L4	105.42±54.44	113.93±75.47
L5	96.59±36.82	105.32±48.29 ^①
S1	99.57±28.62	160.23±88.68 ^①

注:①与终板前部比较 $P<0.05$

椎终板最厚。Silva 等^[9]报告,腰椎终板厚约 0.35~1mm,胸椎椎板可薄至 0.12mm,颈椎终板厚约 0.51mm。除了终板厚度存在差异之外,终板下的骨密度也存在差异。Müller-Gerbl 等^[9]发现外周边缘区和后外侧区骨密度最大。上终板的后内侧较高,而下终板的前侧密度较高。Zhao 等^[7]研究了 25 具 T8/9~L4/5 椎体间隙节段,发现在正中矢状面和椎弓根水平,头侧终板比尾侧终板分别约薄 14%和 11%。头侧终板附近的骨小梁密度比尾侧小 6%。Ordway 等^[8]测量了 C3~C7 平均骨小梁密度,也发现终板结构特征区域差异明显,后部大于前部,外周大于中央。平均终板屈服强度和硬度与骨小梁密度相关。终板的解剖学差异实际上是应力造成的形态学结果,从而导致其强度和硬度等材料学性能的差异。

本研究发现颈胸段、胸腰段和腰骶段终板的抗压强度,均随着压力点逐渐外移,抗压强度逐渐

增大。与 Ordway 等^[8]在颈椎、李志刚等^[9]在腰椎、Grant 等^[10]在 L3~S1、Oxland 等^[11]在 L3~L5、Lowe 等^[12]在胸腰椎的研究结果一致。其原因可能与从中央到外周终板逐渐增厚、骨密度与骨小梁密度逐渐增大有关。而在上下终板的抗压强度方面,我们发现除 C5、T1 椎体外,每一椎体的下终板抗压强度均大于上终板;在椎间隙水平,除 C5/6、T12/L1 与 L5/S1 间隙外,上一椎体下终板的抗压强度均大于下一椎体上终板抗压强度。李鉴轶等在颈椎也发现了相似的结果^[13],这也与李志刚等^[9]在腰椎的试验结果一致,可能与下终板较厚、骨小梁密度较大^[7]有关,也可以解释临床上上终板骨折明显多见的原因。本研究结果提示,在设计和安放椎间置入物时,应将内置物的力学支撑部分尽量放置在外周,同时应增大其下部支撑面积,目前临床常用的长方体结构或圆柱结构似乎不利于内置物上下面应力的平衡。

在整体序列上,我们发现脊柱各交界区终板的最大抗压强度分布规律不同。颈胸段从 C4 开始抗压强度逐渐下降,胸腰段和腰骶段终板的抗压强度依次上升。颈胸段抗压强度逐渐降低的原因可能是是尽管脊柱的负重有所增加,但增加的幅度并不明显,而颈椎从上到下椎体逐渐增大,更大的支撑面积降低了单位面积的压强,使得区域结构抗压强度有所降低。而胸腰段和腰骶段出现终板强度增加可能是胸腰椎椎体标本的终板厚度由上至下逐渐增厚^[4]造成。C7 与 L5 节段出现抗压强度降低可能与其与胸廓和骨盆连接紧密,相对固定有关。而 C7-T1 和 L5-S1 节段出现强度再次升高可能与这两个节段正好处于脊柱的前凸与后凸交界部,也是游离椎与固定椎的交界部,终板倾斜度较大,需要承受较大的剪力,局部负荷增大有关。

近年来,有些学者发现终板强度前后不均。李鉴轶等^[12]发现颈椎上终板后侧和下终板后外侧区域比其他区域强度和刚度大。Grant 等^[9]发现腰椎后外侧明显强于中央。李志刚等^[8]也发现腰椎后部强度较大,我们在颈胸段和腰骶段得到了相同的结果。然而虽然颈胸段总体上后部终板强度大于前部,但只在 C4 存在显著性差异,C5~C7 前后强度分布趋于均衡,这与 Müller-Gerbl 等^[6]的研究较符合。Müller-Gerbl 等^[6]发现在 C3 和 C4 的最大骨化密度集中于后外侧和后内侧,C5~C7 逐渐表现为前外侧和前内侧最大。另外我们发现胸腰段与颈胸段和腰骶段强度分布相反,前部抗压强度大于后部。这提示我们在安放内置物时胸腰段应偏前,而腰骶段应偏后放置。Smit 等^[14]解释腰椎后外侧区抗压强度较大,认为这是由于该部位是椎弓根与椎体相连接部位,椎弓根附近的松质骨及终板是多种应力集中的部位,椎体骨小梁的排列较密集所致。但这一理论无法解释胸腰段终板强度分布特点,可能脊柱生理弯曲导致的不同椎体应力差别是造成终板强度变化的原因。生理弯曲使得颈腰椎后部、胸腰段前部更接近人体的重心,需要承担较大的压力负荷,从而产生较大的强度。但 C5/6、T12/L1 与 L5/S1 间隙间抗压强度差异不明显,可能这三个水平是在脊柱生理弯曲基础上的力学拐点。

本实验的不足在于标本取材于年轻人,不能反映老年人和存在病变的患者椎体终板抗压强

度,故不同年龄组和不同畸形的力学差异尚待进一步研究。由于目前临床采用的椎间置入物大多并非解剖设计,本研究结果是否适用于临床尚有待进一步观察。

4 参考文献

- Xiaobo W, Genevieve AD. Evaluation of effects of selected factors on inter-vertebral fusion—a simulation study[J]. *Med Eng & Phys*, 2005, 27: 197-207.
- Pitzen T, Schmitz B, Georg T, et al. Variation of endplate thickness in the cervical spine [J]. *Eur Spine J*, 2004, 13 (3): 235-240.
- Panjabi MM, Chen NC, Shin EK, et al. The cortical shell architecture of human cervical vertebral bodies [J]. *Spine*, 2001, 26 (22): 2478-2484.
- Edwards WT, Zheng Y, Ferrara LA, et al. Structural features and thickness of the vertebral cortex in the thoracolumbar spine [J]. *Spine*, 2001, 26(2): 218-225.
- Silva MJ, Wang C, Keaveny TM, et al. Direct and computed tomography thickness measurements of the human, lumbar vertebral shell and endplate [J]. *Bone*, 1994, 15(4): 409-414.
- Müller-Gerbl M, Weisser S, Linsenmeier U. The distribution of mineral density in the cervical vertebral endplates [J]. *Eur Spine J*, 2008, 17(3): 432-438.
- Zhao FD, Pollintine P, Hole BD, et al. Vertebral fractures usually affect the cranial endplate because it is thinner and supported by less-dense trabecular bone [J]. *Bone*, 2009, 44 (2): 372-379.
- Ordway NR, Lu YM, Zhang X, et al. Correlation of cervical endplate strength with CT measured subchondral bone density [J]. *Eur Spine J*, 2007, 16(12): 2104-2109.
- 李志刚, 郑连杰, 李光灿, 等. 腰骶椎终板生物力学特性的实验研究 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2007, 17(3): 210-213.
- Grant JP, Oxland TR, Dvorak MF. Mapping the structural properties of the lumbosacral vertebral endplates [J]. *Spine*, 2001, 26(8): 889-896.
- Oxland TR, Grant JP, Dvorak MF, et al. Effects of endplate removal on the structural properties of the lower lumbar vertebral bodies [J]. *Spine*, 2003, 28(8): 771-777.
- Lowe TG, Hashim S, Wilson LA, et al. A biomechanical study of regional endplate strength and cage morphology as it relates to structural interbody support [J]. *Spine*, 2004, 29(21): 2389-2394.
- 李鉴轶, 朱青安, 原林, 等. 颈椎终板结构的生物力学研究 [J]. *中华骨科杂志*, 2004, 24(2): 108-112.
- Smit TH, Odgaard A, Schneider E. Structure and function of vertebral trabecular bone [J]. *Spine*, 1997, 22(24): 2823-2828.

(收稿日期: 2010-11-07 修回日期: 2011-02-10)

(英文编审 蒋欣/贾丹彤)

(本文编辑 刘彦)