

文章编号:1004-7220(2011)06-0521-06

全脊柱终板抗压强度分布规律的生物力学研究

李光灿¹, 李康华², 郑连杰¹, 李靖年¹, 李正维¹, 刘晓凯³, 李志刚⁴

(1. 大连医科大学附属第二医院 骨科, 大连 116023; 2. 中南大学湘雅医院 骨科, 长沙 410008;

3. 朝阳市中心医院 骨科, 朝阳 122000; 4. 大连大学附属中山医院 骨科, 大连 116001)

摘要: **目的** 通过测量全脊柱不同椎体上下终板不同位点的抗压强度, 研究全脊柱终板抗压强度的分布规律。**方法** 选用5具成年男性新鲜脊柱标本(C3~S1), 共225个终板。对终板平面49个测试点用平底压头进行压缩加载试验, 获得最大破坏载荷。**结果** (1) 全脊柱终板抗压强度呈颈腰椎较强、胸椎较弱趋势($P < 0.01$)。抗压强度自C3~7逐渐减小, 在T1水平增大, 然后再次逐渐减小, 至T7降至最低, 自T8开始增强, 至L4达到强度最大值, L5复又降低后, S1再次增大。(2) 除C5和T1外, 下终板抗压强度大于上终板($P < 0.01$)。(3) 除C5/6, T12/L1和L5/S1间隙外, 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。(4) 中央至外周抗压强度逐渐增大($P < 0.05$)。(5) 处于不同角度组的压力点, 其抗压强度存在差异($P < 0.01$)。(6) 全脊柱终板不同节段前后强度分布不同($P < 0.01$)。C3/4后侧终板强度大于前部, C5~7前后部大体持平, 至T1再次后部大于前部, 经过T2~5过渡段后, 自T6~L3出现前部抗压强度大于后部, L4再次相对均衡, 至L5/S1出现后部抗压强度大于前部。**结论** 全脊柱不同节段终板和终板不同部位的强度分布与脊柱生理弯曲关系密切。抗压强度下终板高于上终板, 外周大于中央, 椎间隙相邻面上一椎体下终板大于下一椎体上终板。

关键词: 脊柱; 终板; 抗压强度; 破坏荷载; 力学测试; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Biomechanical study of compressive strength distribution on the whole spine endplates

LI Guang-can¹, LI Kang-hua², ZHENG Lian-jie¹, LI Jing-nian¹, LI Zheng-wei¹, LIU Xiao-kai³, LI Zhi-gang⁴ (1. Department of Orthopaedic Surgery, the Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116023, China; 2. Department of Orthopaedic Surgery, Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410008, China; 3. Department of Orthopaedic Surgery, Central Hospital of Chaoyang, Chaoyang 122000, China; 4. Department of Orthopaedic Surgery, Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, China)

Abstract: **Objective** To study distributions of the compressive strength on the whole spine endplates by measuring the compressive strength at different locations of the whole spine endplates. **Methods** Indentation tests were performed at 49 locations in 225 bony endplates of intact human vertebrae (C3-S1) from 5 fresh male specimens to record the failure loads. **Results** (1) For the whole spine endplates, failure loads of the cervical and lumbar spine were found to be higher than those of the thoracic spine ($P < 0.01$). The failure load was first decreased from C3 to C7 before increasing to T1, and then dropping through T7 and rising again from T8, reaching the maximum at L4, and dropping at L5 before increasing again at S1. (2) The failure load at inferior cervical endplates was significantly higher than that at superior endplates except at C5 and T1 ($P < 0.05$). (3) Within the intervertebral space, the cranial endplates had a higher yield stress than the caudal endplates except at C5/6, T12/L1 and L5/S1. (4) Failure loads were generally increased from the central to peripheral zones ($P < 0.05$). (5) For dif-

收稿日期:2011-02-10; 修回日期:2011-06-28

通讯作者:李康华, Tel: (0731) 84328888; E-mail: lkh8738@sina.com。

ferent angular points, failure load distributions were found among the endplates ($P < 0.01$). (6) Distributions of the compressive strength on the endplates varied significantly within the whole spine ($P < 0.01$). It was found that at C3/4, the failure load at posterior was higher than that at anterior, but at C5/6, the failure load at posterior and anterior was balanced. At T1, the failure load was found to be higher at posterior again, until passing through T2-5, and at T6-L3, the failure load at anterior was higher than that at posterior, and balanced between the anterior and posterior again at L4. At L5-S1, the failure load at posterior was higher than that at anterior. Conclusions The strength distributions on the endplates varied significantly at different locations within the whole spine, which was closely correlated with the physiological curve of the spine. The failure load at inferior endplates was higher than that at superior endplates and it was increased from central to peripheral zones. Within the intervertebral space, the compressive strength at cranial endplates was higher than that at caudal endplates.

Key words: Spine; Endplate; Compressive strength; Failure loads; Mechanical testing; Biomechanics

椎间盘或椎体切除后常需要使用内置物进行结构性支撑。尽管近年来内置物有了长足的发展,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仍是临床常见难题。终板的负载能力是影响内植物沉陷的一个重要方面。终板平面的解剖学差异决定了其力学性能的区域性差异。了解和利用终板抗压强度的分布规律,将有利于降低内置物的沉陷几率。目前针对全脊柱终板的抗压强度分布研究尚未见报告。本实验旨在分析人体全脊柱不同节段终板的抗压强度及其分布规律,以期为椎间置入物的放置、椎间融合器的改进以及临床手术相关操作提供实验依据。

1 材料与方 法

1.1 标本制备

5具成年男性(年龄22~28岁,平均25.5岁)。新鲜脊柱标本(C3~S1),共115个椎体、225个终板(S1为上终板)。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。标本置于 -20°C 冰箱冷冻保存,实验前于室温下解冻。

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(见图1、2),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 正轴作为 0° 线,每 30° 建立一条角度坐标线,依次作出 30° 、 60° 、 \dots 、 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;压缩加载实验时若测试点之间距离太小可能造成相邻测试点终板破坏,则该点予以删除。

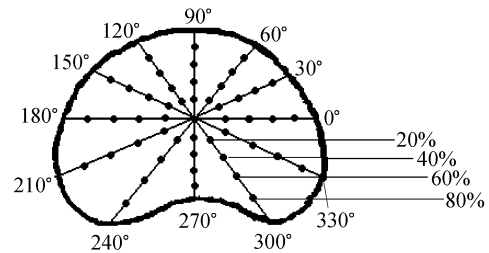


图1 测试点示意图

Fig.1 Sketch map of the indentation tests



图2 实际测试点

Fig.2 The actual test pattern

1.2.2 生物力学测试 以自制夹具固定标本,保持受压椎体水平。对椎体凹面不作特殊位置调整。在电子万能试验机(型号CSS-2205,最大负荷50 kN,

精确度 0.1 N) 上用直径 1.5 mm 的平底压头, 以 12 mm/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(未予预加载), 记录压力-位移曲线, 于实验机上读取最大压力数值。所有力学实验均在大连理工大学力学系材料实验室完成。

1.3 统计学分析

应用 SPSS 13.0 统计软件, 利用单因素方差分析和独立样本 t 检验进行统计分析, 结果采用 $(\bar{x} \pm s)$ 表示, 显著性水平设为双侧 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 全脊柱终板最大抗压强度分布规律

比较单个椎体上下面所有压力点的均值, 可见全脊柱终板抗压强度呈颈腰椎较强、胸椎较弱趋势。自 C3 ~ 7 逐渐减小, 在 T1 水平增大, 然后再次逐渐减小, T5 ~ 6 稍增大, 至 T7 降至最低, 自 T8 开始增强, 经过 T9 ~ 12 相对稳定后, L1 节段以下依次增大, 至 L4 达到强度最大值, L5 复又降低后, S1 再次增大。各相邻椎体间采用单因素方差分析 N-K 两两比较, 除 C5/6、T2 ~ 4 和 T8 ~ 12 椎体以外, 其他相邻椎体间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。总体采用单因素方差分析 ($P < 0.01$), 总体存在显著性差异 (见图 3、表 1)。

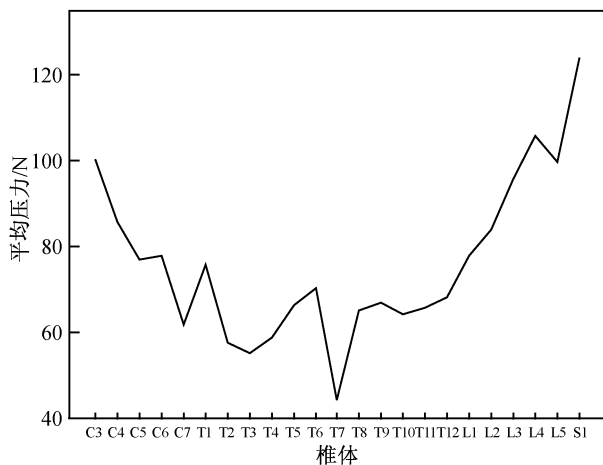


图3 全脊柱各节段抗压强度曲线

Fig.3 Compressive strength curve of the whole spine vertebral endplates

2.2 全脊柱椎体上下终板强度分布规律

比较上下终板所有压力点, 可见全脊柱椎体抗

压强度下终板强于上终板。总体采用独立样本 t 检验, 存在显著性差异 ($P < 0.01$); 每一椎体上下终板间采用独立样本 t 检验, 除 C3、C5 和 T1 外, 其他椎体的下终板强度大于上终板 ($P < 0.05$, 见图 4、表 2)。

表1 全脊柱各椎体终板最大压力均值及比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab.1 Compressive strength of the whole spine vertebral endplates

椎体	压力/N	椎体	压力/N
C3	100.46 ± 41.47	T8	65.21 ± 35.13 *
C4	85.77 ± 40.18 *	T9	67.14 ± 36.87
C5	77.01 ± 38.48 *	T10	64.29 ± 38.16
C6	78.09 ± 39.96	T11	65.79 ± 38.88
C7	61.84 ± 28.94 *	T12	68.35 ± 33.91
T1	75.93 ± 30.42 *	L1	77.88 ± 31.29 *
T2	57.69 ± 26.01 *	L2	84.06 ± 35.22 *
T3	55.32 ± 26.14	L3	95.86 ± 49.64 *
T4	58.95 ± 27.40	L4	105.97 ± 61.53 *
T5	66.50 ± 27.71 *	L5	99.67 ± 43.79 *
T6	70.50 ± 30.00 *	S1	124.14 ± 67.08 *
T7	44.44 ± 26.83 *		

注: * $P < 0.05$ (* 代表与上一行数据比较存在显著性差异)

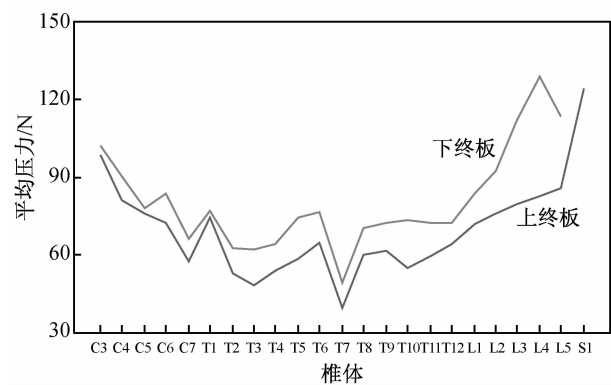


图4 全脊柱不同椎体上下面压力曲线

Fig.4 Compressive strength curve of each endplate of the whole spine

2.3 全脊柱椎间隙相邻面终板强度分布规律

比较上下终板所有压力点, 可见全脊柱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抗压强度。采用独立样本 t 检验, 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 ($P < 0.05$, 见表 3)。

表2 全脊柱椎体上下终板抗压强度均值及比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Compressive strength of each endplate of the whole spine

椎体	压力/N	
	上终板	下终板
C3	98.63 ± 44.83	102.43 ± 37.52
C4	81.17 ± 41.03	90.33 ± 38.88 *
C5	76.07 ± 38.70	77.93 ± 38.32
C6	72.63 ± 38.71	83.58 ± 40.53 *
C7	57.57 ± 26.99	66.13 ± 30.24 *
T1	74.55 ± 30.15	77.31 ± 30.70
T2	52.79 ± 24.46	62.56 ± 26.63 *
T3	48.34 ± 22.23	62.30 ± 27.88 *
T4	53.95 ± 24.69	63.97 ± 29.07 *
T5	58.35 ± 23.28	74.64 ± 29.39 *
T6	64.61 ± 25.54	76.39 ± 32.89 *
T7	39.63 ± 22.63	49.25 ± 29.73 *
T8	59.86 ± 32.02	70.56 ± 37.29 *
T9	61.78 ± 30.53	72.50 ± 41.64 *
T10	55.16 ± 29.41	73.41 ± 43.43 *
T11	59.37 ± 34.31	72.21 ± 42.06 *
T12	64.40 ± 32.78	72.31 ± 34.61 *
L1	72.12 ± 29.55	83.67 ± 31.98 *
L2	75.85 ± 25.08	92.28 ± 41.49 *
L3	79.45 ± 30.85	112.26 ± 58.71 *
L4	82.97 ± 28.95	128.87 ± 75.38 *
L5	85.87 ± 29.10	113.48 ± 51.11 *
总体	66.82 ± 33.56	80.76 ± 44.45 *

注: * $P < 0.05$

2.4 全脊柱终板中央至外周强度分布规律

全脊柱终板的抗压强度随着压力点逐渐外移而逐渐增大。对原点、20%、40%、60%和80%各组所有压力点最大压力均值进行比较,相邻压力点组间比较采用单因素方差分析 S-N-K 两两比较,发现除 0 点与 20% 压力点无显著性差异外,其他各组均存在显著性差异。从 20% 压力点开始越向周围斜率越大,提示越靠外周,终板强度增大越明显(见图 5、表 4)。

2.5 全脊柱终板平面不同角度组强度分布规律

全脊柱终板处于不同角度组的压力点,其抗压强度亦存在差异。采用单因素方差分析($P <$

表3 全脊柱椎间隙上、下终板抗压强度均值及比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.3 Compressive strength of the cranial and caudal endplates for the intervertebral space

椎间隙	压力/N	
	上一椎体下终板	下一椎体上终板
C3/4 间隙	102.43 ± 37.52	81.17 ± 41.03 *
C4/5 间隙	90.33 ± 38.88	76.07 ± 38.70 *
C5/6 间隙	77.93 ± 38.32	72.63 ± 38.71
C6/7 间隙	83.58 ± 40.53	57.57 ± 26.99 *
C7/T1 间隙	66.13 ± 30.24	74.55 ± 30.15 *
T1/2 间隙	77.31 ± 30.70	52.79 ± 24.46 *
T2/3 间隙	62.56 ± 26.63	48.34 ± 22.23 *
T3/4 间隙	62.30 ± 27.88	53.95 ± 24.69 *
T4/5 间隙	63.97 ± 29.07	58.35 ± 23.28 *
T5/6 间隙	74.64 ± 29.39	64.61 ± 25.54 *
T6/7 间隙	76.39 ± 32.89	39.63 ± 22.63 *
T7/8 间隙	49.25 ± 29.73	59.86 ± 32.02 *
T8/9 间隙	70.56 ± 37.29	61.78 ± 30.53 *
T9/10 间隙	72.50 ± 41.64	55.16 ± 29.41 *
T10/11 间隙	73.41 ± 43.43	59.37 ± 34.31 *
T11/12 间隙	72.20 ± 42.06	64.40 ± 32.78 *
T12/L1 间隙	72.31 ± 34.61	72.12 ± 29.55
L1/2 间隙	83.67 ± 31.98	75.85 ± 25.08 *
L2/3 间隙	92.28 ± 41.49	79.45 ± 30.85 *
L3/4 间隙	112.26 ± 58.71	82.97 ± 28.95 *
L4/5 间隙	128.87 ± 75.38	85.87 ± 29.10 *
L5/S1 间隙	113.48 ± 51.11	124.14 ± 67.08
总体	80.76 ± 44.45	68.02 ± 36.63 *

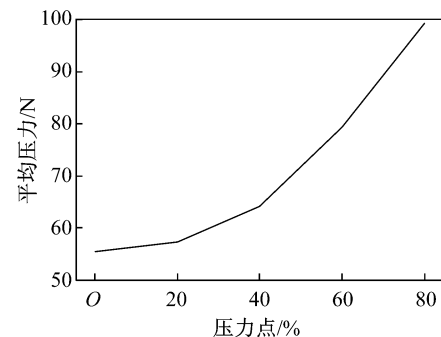
注: * $P < 0.05$ 

图5 全脊柱终板中央至外周抗压强度曲线

Fig.5 Compressive strength curve of the central to peripheral zones for the whole spine endplates

表4 全脊柱终板中央至外周抗压强度均值及比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.4 Compressive strength of the central to peripheral zones for the whole spine endplates

压力点	压力/N
原点	55.49 ± 25.94
20%	57.26 ± 28.55
40%	64.13 ± 30.07 *
60%	79.28 ± 38.79 *
80%	99.35 ± 51.07 *

注: * $P < 0.05$ (*代表与上一行数据比较存在显著性差异)

0.01),存在显著性差异。从全脊柱80%位点角度组压力曲线(见图6)可知,每一脊柱节段在不同角度坐标线上有不同的抗压强度分布规律。颈腰椎后外侧抗压强度相对较大(210°~330°),而胸椎前部较大(60°~120°)。

2.6 全脊柱终板前后强度分布规律

删除原点,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。比较各组除原点外所有压力点。总体上,终板前后部强度不同,采用单因素方差分析,存在显著性差异($P < 0.01$)。不同节段($F = 25.567$)强度分布不同,C3/4后侧终板强度大于前部($P < 0.01$),C5~7前后部大体持平($P > 0.05$),至T1再次后部大于前部($P < 0.05$),经过T2~5过渡段后($P > 0.05$),自T6开始直至L3出现前部抗压强度大于后部($P < 0.05$),L4再次相对均衡($P < 0.05$),至L5、S1出现后部抗压强度大于前部($P < 0.05$,见图7)。

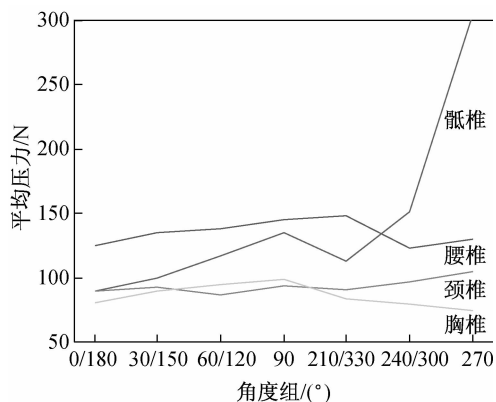


图6 全脊柱80%位点角度组压力曲线

Fig.6 Compressive strength curve of the angular groups for 80% indentation points

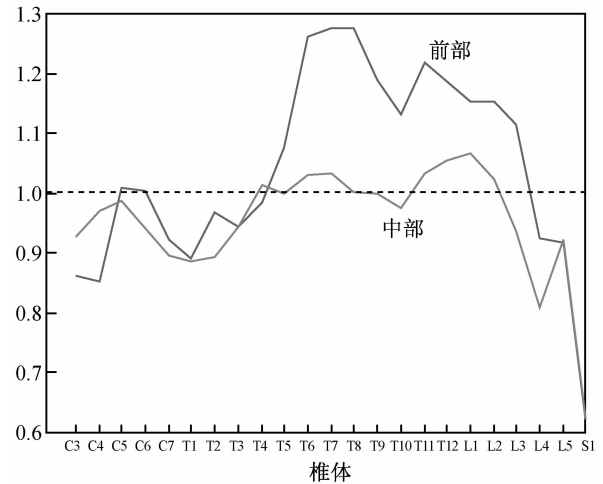


图7 全脊柱终板前中部与后部强度均值比值曲线

Fig.7 Strength ratio curve of the anterior/posterior and middle/posterior endplates for the whole spine

3 讨论

近年来的研究表明,终板的厚度和骨密度及其分布等在不同椎体以及同一椎体终板的不同区域均存在差异^[1~6]。这些差异实际上是应力造成的形态学结果,必将导致其强度和硬度等材料学性能的差异^[5]。而植入物沉陷与终板的局部强度存在密切关系^[7]。

本文发现,全脊柱各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。这与Ordway等^[6]在颈椎、李志刚等^[8]在腰椎、Grant等^[9]在L3~S1、Oxland等^[10]在L3~5、Lowe等^[11]在胸腰椎的试验结果一致。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^[1,5]有关。

在上、下终板的抗压强度方面,除C5、T1椎体外,每一椎体的下终板抗压强度均大于上终板。而在椎间隙水平,除C5/6、T12/L1与L5/S1间隙外,上一椎体下终板抗压强度均大于下一椎体上终板抗压强度。李鉴铁等^[12]也发现了相似的结果,并与李志刚等^[8]在腰椎的试验结果一致。Panjabi等^[2]发现颈椎中央区域上终板比下终板薄。Zhao等^[13]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%。本文的结果与这些解剖结果吻合,可以用

来解释临床上上终板骨折明显多见的原因。

在全脊柱整体序列方面,各节段终板的最大抗压强度分布规律不同。全脊柱终板的抗压强度呈颈腰椎较强、胸椎较弱趋势。颈段结果与李鉴轶等^[12]的研究结果一致。腰骶段结果与李志刚等^[8]的研究结果一致。颈椎从 C3 ~ 7 抗压强度逐渐降低,原因可能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。上胸段终板强度降低,可能与胸廓保护、脊柱相对稳定,除压应力以外,缺少侧方应力有关。而下胸段和腰椎出现终板强度逐渐增加,可能是胸腰椎体的终板厚度由上至下逐渐增厚^[4]造成。L5 节段出现抗压强度降低,可能是其与骨盆连接紧密、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强度和刚度较大。Grant 等^[9]发现腰椎后外侧强度明显大于中央。李志刚等^[8]也发现腰椎后部强度较大。本文的发现与之不完全一致,即 C3/4 后侧终板强度大于前部,C5 ~ 7 前后部大体持平,至 T1 再次后部大于前部,经过 T2 ~ 5 过渡段后,自 T6 开始直至 L3 出现前部抗压强度大于后部,L4 再次相对均衡,至 L5、S1 出现后部抗压强度大于前部。颈椎的分布与 Müller-Gerbl 等^[6]的发现吻合,他们发现在 C3 ~ 4 的最大矿化密度集中于后外侧和后内侧,C5 ~ 7 逐渐表现为前外侧和前内侧最大。分析终板最外围 80% 点的角度组抗压强度,在颈椎和腰骶椎可见后侧和后外侧最强,但在胸椎可见前部较强。从全脊柱终板前中部与后部均值比值曲线可以看出,T4 以上基本上是后部终板强度大于前部,T4 ~ L3 为前部终板强度大于后部,而 L4 以下再次出现后部终板强度大于前部。整体形态与脊柱的生理弯曲吻合。Smit 等^[14]解释腰椎后外侧区抗压强度较强时认为,这是由于该部位是腰椎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。

但这无法解释终板强度的分布特点。本文认为,无论是终板厚度还是骨小梁密度,甚至解剖结构都是应力作用的结果。除此之外,应力还必将造成结构力学的改变。脊柱生理弯曲导致的不同椎体的应力差别才是造成终板强度变化的主要原因;正是这种应力差别,导致了脊柱各椎体终板以及终板不同部位强度分布的曲线形式。生理弯曲使得颈腰椎后部、胸腰段前部更接近人体的重心,需要承担更大的压力负荷,从而产生更大的强度。由于 C5/6、T12/L1 与 L5/S1 间隙间抗压强度差异不明显,故推测这 3 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,而已有实验证明骨质疏松会对骨的黏弹性等力学性能产生影响^[15];对于老年人,由于存在诸多退变畸形,必将影响其脊柱的应力分布,故本实验结果不能全面反映其终板强度分布规律。不同年龄组的力学差异尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Panjabi MM, Chen NC, Shin EK, *et al.* The cortical shell architecture of human cervical vertebral bodies [J]. *Spine*, 2001, 26(22): 2478-2484.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Wang X, Dumas GA. Evaluation of effects of selected factors on inter-vertebral fusion-A simulation study [J]. *Med Eng Phys*, 2005, 27(3): 197-207.
- [8] 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.

(下转第 554 页)