

# 脊柱屈曲型骨折及其练功疗法的 生物力学原理初探

中国科学院力学研究所  
陶祖莱、钱民全、盛家宁  
中医研究院骨伤科研究所  
尚天裕、张长江、丁龙、李宜谋、李金学

## 摘 要

借助于简化的脊柱力学模型,对各类屈曲型骨折的损伤机制,以及练功疗法的力学道理,作了原理性的分析,并用以说明临床观察到的一些病理现象。为进一步定量分析提供了基础。

## 一、引 言

凡暴力使脊柱过度屈曲所致之脊柱骨折,统称为屈曲型骨折这是最常见的一种骨折,约占脊柱损伤的90%。临床观察表明,脊柱屈曲型骨折有以下三个特点:

1. 通常都是椎体骨折,椎间盘无损伤;
2. 椎体骨折大多发生于 $T_{10} \sim T_{12}$ ,  $L_1$ 、 $L_2$ ;
3. 椎体骨折分为单纯性椎体挤压骨折和合并附件(椎弓、关节突、横突、棘突等)骨折两大类。前者又有以下几种形式:

(1) 楔形挤压骨折,约占脊柱屈曲型骨折的70%以上,常发生于 $T_{10} \sim T_{12}$ ,  $L_1$ 、 $L_2$ 。患者多为青、壮年,脊柱活动性较大。

(2) 椎体上缘挤压骨折,多发生于胸腰段,患者骨质较疏松。

(3) 扁平椎体挤压骨折,多发生于腰前凸较大的 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ ,患者骨质较疏松。

(4) 椎体一侧挤压骨折。

(5) 多发椎体挤压骨折。

对于屈曲型骨折,国内、外尚无统一的疗法,至于病理机制,说法也不一致。1958年以来,我国骨科大夫吸取中医治疗脊柱骨折的传统经验,创立中西医结合的、无创伤的练功疗法。从所治疗的千余病例来看,骨折复位满意率达90%,平均疗程约90天,且绝大多数患者功能恢复良好。

这样,提出了两个问题:(1)暴力作用下,脊柱发生屈曲型骨折的力学机制是什么?(2)简单的练功疗法为什么会取得如此显著的效果?对此,本文拟作初步探讨。

## 二、脊柱屈曲骨折的力学分析

关于过载引起的脊柱损伤问题,由于飞行员弹射救生装置设计的需要,自二次大战以来

已进行了一系列研究。四十年代起，德、英、美、苏等国就用尸体椎骨做破坏试验，获得椎体极限过载的数据，为工程设计提供了依据，但不足以说明脊椎损伤机理。六十年代后期，人们试图用黑箱方法来确定脊柱系统的动力学特性。这对于了解脊柱系统的综合功能是有用的，但因此得到的系统响应在多大程度与代表脊柱的力学性能，取决于模型的取法。因而结果不是唯一的。七十年代以来，人们提出了多种连续参数模型、离散参数模型和有限元模型，得到了一些有意义的结果。譬如，为椎体前缘断裂的发生提供了力学说明。然而，任何细致的分析，只有在准确地掌握了材料的力学性质以后，才能得到准确的结果。而目前我们对于脊柱各组元的本构方程，以及它们之间的相互作用，还知之不多。在这种情况下，应用简单的力学模型对脊柱受力情况作原理性分析，无论对临床实践，还是进一步分析研究，都很有用。

### (一) 脊柱受力情况

实验证明，冲击作用下，椎体的极限载荷高于静态相应值。故作为原理性分析，只考虑准静态。

把脊柱看成为前、后纵韧带，椎体和椎间盘构成的组合梁，正常状态下，脊柱具有生理弯曲，但相邻两椎体间距沿椎体断面是均匀的。在定性分析时，可近似看作看梁柱。轴线弯曲的影响用适当的力和力矩来表示。此外，不考虑椎体的附件。这样得图 1 (c、d) 所示的简化模型。

取笛卡尔坐标系，Z 轴即脊柱（简化为直梁柱）轴线，原点位于骶骨端，人体质心（质量为  $m$ ）坐标为  $(d_1, d_2, h)$ ；头颅质心坐标为  $(d_0, 0, H)$ ，质量为  $m_0$ 。当人从高处坠落时，脊柱受力情况如图 1 (a、b) 所示。

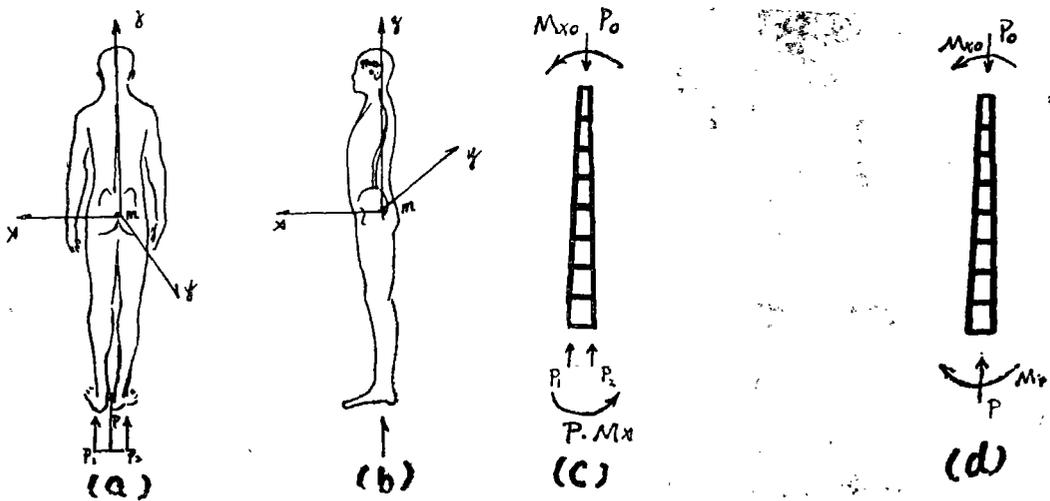


图 1 a、b、c、d

$$\left. \begin{aligned} P &= nmg \\ P_0 &= -nm_0g \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$n$  为过载（严格地说头颅和躯干的过载不相等）， $g$  为重力加速度。除受压外，还有力矩作用：

$$\left. \begin{aligned} M_y &= P d_1 = n m g d_1 \\ M_{y_0} &= P_0 d_0 = -n m_0 g d_0 \\ M_x &= P d_2 = n m g d_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

脊柱长细比远大于，轴向受压时很容易失稳而屈曲。通常人体质心和头颅质心，总位于脊柱轴线前方，故 $M_y$ 、 $M_{y_0}$ 总是使头颅前俯，胸腰段后弓，而在 $T_{10}$ — $L_2$ 这一段挠最大（该段无肋骨和骨盆支撑，刚度较小）。据〔2〕报导， $T_{10}$ — $T_{12}$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 的抗压强度约为颈椎椎体的 $\frac{1}{2}$ 左右，和 $T_1$ — $T_9$ 、 $L_3$ — $L_5$ 大致相当。所以，骨折大多发生在 $T_{10}$ — $T_{12}$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 。

脊柱弯曲如何造成椎体损伤呢？需分析椎体受力情况。

### (二) 椎体受力分析

椎体与椎间盘相间。椎间盘由髓核和纤维环构成，髓核是不压缩流体，充满于纤维环中央和各层纤维环的间隙内。纤维环约有10—12层〔3〕，都是密封的。端板与椎体紧密结合。图2是椎间盘简化模型。

当脊柱单纯受压时，椎间盘中央的流体的压力为 $p_0$ ，各层纤维环之间流体压力为 $p_i$ （ $i=1, 2, \dots, 11$ ）。受压时流体体积不变，各层间的压差 $\Delta p_i = p_{i-1} - p_i$ 由纤维张力 $T_i$ 平衡。这样，椎体（把它看作一个短圆柱）端面上应力分布如图3所示。有：

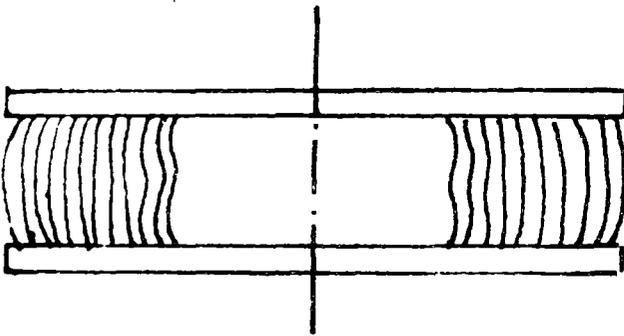


图 2

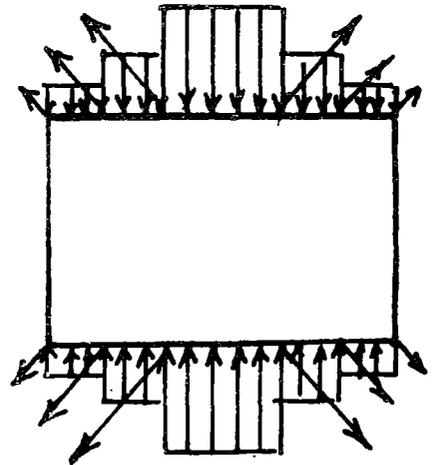


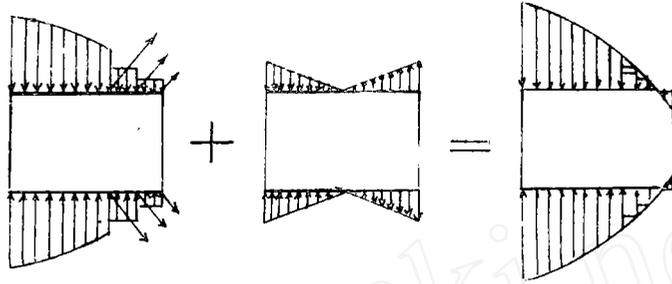
图 3

$$\sigma(r) = p_0 - \sum_{k=1}^i \Delta P_k \cdot p_k \sin \theta_k \quad (3)$$

$\rho_k$ 、 $\theta_k$ 分别为（模型）椎间盘第 $R$ 层纤维环的曲弯半径和它与端极连接处的倾角， $r$ 是径向位置， $i$ 是 $r$ 以内纤维环的层数。显然，应力在端面上的分布是不均匀的，但是对称的。

当脊柱在受压同时受弯矩作用时，椎间盘内髓核被挤向椎体后缘（ $\because M_y < 0$ ）。相应地，这一部分纤维张力增大，而前缘纤维层不受力（纤维只能受张，不能受压）。甚至反张

(即 $\theta_t > \frac{\pi}{2}$ )。此时椎体端面应力分布如图4示。应力分布不均匀且非对称,椎体前缘区域压应力很大。在这种情况下,椎体损伤有三种可能:



1. 椎体失稳,此时 $\sigma_s > \sigma_{max} > \sigma_{cr}$ 。 $\sigma_s$ 是椎体的抗压强度, $\sigma_{cr}$ 是椎体稳定性临界应力, $\sigma_{max} = \{\sigma(r, \phi)\}_{max}$ , $\phi$ 是幅角。青壮年患者大多属于这一类。若椎体强度主要来自外表一薄层骨皮质,作为近似,可视作均质弹性圆柱形壳体。若壳不太薄,则单纯受压时的 $\sigma_{cr}$ 为<sup>[4]</sup>:

$$\sigma_{cr} = \frac{\delta \sqrt{EE_t}}{R\sqrt{3(1-\nu)}} \quad (4)$$

$R$ —圆壳内半径; $\delta$ —壳体厚度, $E$ —杨氏模量, $\nu$ —泊松比, $E_t$ —椎体应力—应变曲线在临界点上的斜率,称为数线模量( $E_t < E$ )。

当椎体在受压同时受弯矩作用时,设弯矩引起的应力为 $\sigma_0$ ,压力引起的应力为 $\sigma_1$ ,则

$$(\sigma_0 + \sigma_1)_{cr} = \frac{\delta \sqrt{EE_t}}{R\sqrt{3(1-\nu)}} \quad (5)$$

可见,弯矩使临界载荷 $P_{cr} = \pi(R^2 - (R - \delta)^2)\sigma_{1,cr}$ 降低了。通常低30%左右。

据此,我们认为暴力所致的单纯楔型骨折,是由前俯力矩( $M_y < 0$ )引起的椎体失稳所致。而一侧挤压骨折,则是 $M_x \neq 0$ 造成的椎体失稳。

2. 椎体局部或整体破坏, $\sigma_{max} > \sigma_s$ 。椎体上缘挤压骨折、椎体扁平挤压骨折属于这一类。后一种情况骨质疏松, $\sigma_s$ 可能小于 $\sigma_{cr}$ 。

3. 椎体不是完全弹性体,在持续或重复性的压力作用下,尽管 $\sigma_{max} < \sigma_{cr}$ , $\sigma_{max} < \sigma_s$ ,由于椎体蠕变,也可能引起椎体挤压骨折。

至于多发椎体挤压骨折,则是由于特殊的受力状况,或患者脊柱构造特异因素造成的。

### 三、练功疗法治疗脊柱屈曲型骨折的力学原理

练功疗法示意如图5示。这七种姿势在骨折部位附近形成的应力场的细节(分布、大小等)各不相同,但有一共同点,即给脊柱一个后仰力矩 $M_y'$ ,它和造成损伤的弯矩方向恰好相反。

练功时,脊柱所受轴向力很小,可以不计。在弯矩 $M_y'$ 作用下,脊柱前缘受拉,后缘受压。若是均质梁柱,则断面上应力分布如图6(a)示。脊柱不是均质的, $M_y'$ 引起的拉应力

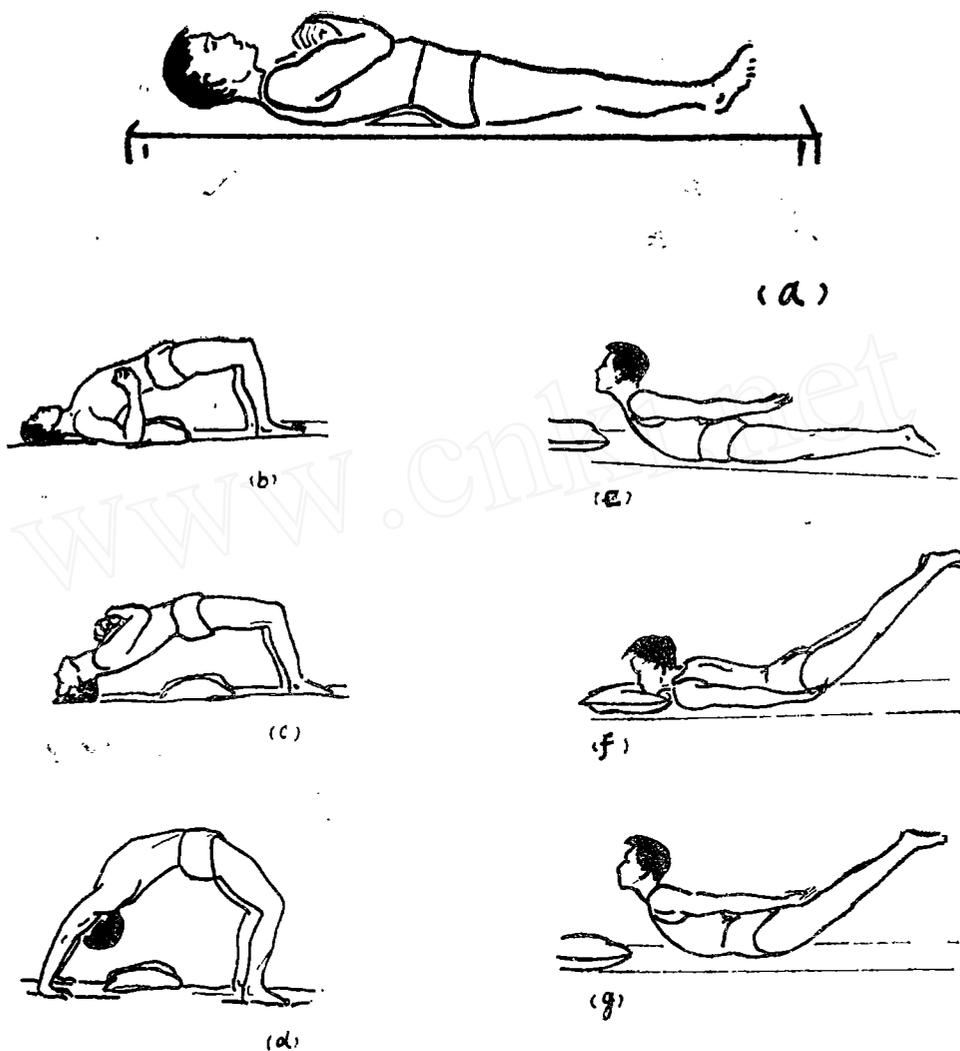
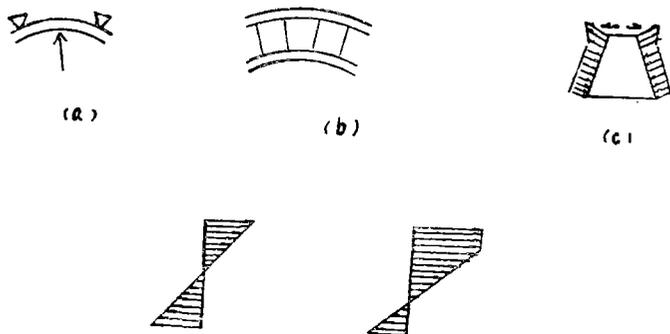


图 5

主要集中于前纵韧带，部分由椎间盘纤维环的前部承受。 $M_y'$  引起的压应力作用于椎体和椎间盘后部，把髓核挤向前部，由前部纤维环各层的拉力平衡。前纵韧带与椎体结合得很紧密，故受损伤的椎体上应力分布如图 6 (c) 示。受损椎体的复位和恢复与这种应力分布有密切关系。



所以,从生物力学观点来看,练功疗法的原理有二:

1. 在练功过程中,受损椎前部经历反复拉伸,发生蠕变。这种蠕变和损伤过程方向相反,促使受伤椎体恢复;

2. 椎体是活组织,具有生命,它的生长和重建(remodeling)和所受应力有密切关系。Hayes等已经从实验和理论计算两方面证明,松质骨的骨小梁是按所受应力排列的。练功所引起的拉应力将促使椎体骨折部位骨小梁结构,按应力线有序地排列起来,从而使因过度挤压而破坏了的有序结构重新有序化,使骨折愈合。

还应指出:(1)治疗初期,垫枕使受损后凸的椎体受到一个向前的横向力作用,有利于复位;(2)练功应循序渐进,使作用受损椎体上的应力逐渐增大。否则将引起不良影响。

上述分析相当粗略,虽然提供了一幅正确的总体图景,但对其细节了解不多,得不到定量的结果。深入的定量分析,有赖于对椎体、椎间盘、韧带等组织物性的认识,和有关肌群的解剖(定量)、作用细节的了解。这些还有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- (1) 朱东明等  
北京生物医学工程学报 2 (1982)
- (2) 杨企文、俞梦孙等  
北京生物医学工程学报 2 (1982)
- (3) Broberg K.B. Von Essen H.O.  
Spine 5(2) 155—167 (1980)
- (4) 铁木辛柯  
弹性稳定性理论 (1962)