基础骨生物力学(二)

动物骨生物力学指标的选择及计算方法

崔 伟 刘成林

选择灵敏可靠的骨生物力学指标,是研究各种对抗骨丢失措施效果的重要组成部分。本文仅就动物骨生物力学,特别是大鼠骨生物力学测定指标的选择及计算方法作一介绍。

1 三点弯曲力学试验

该力学试验适用于长骨(皮质骨)力学性能的测定。

1.1 骨结构力学指标的选择和计算方法

三点弯曲力学试验中骨结构力学指标主要有最大载荷、最大挠度、弹性载荷、弹性挠度及能量吸收(载荷-变形曲线下的面积)。前4项指标可直接从载荷一变形曲线上获得或从仪器上直接给出。能量吸收可从仪器计算机上给出。有时由于仪器等级的限制,不能给出载荷一变形曲线(指载荷一最大或断裂变形曲线)下的面积,此时可人工计算载荷一弹性变形曲线下的面积,其方法是将该图形做成直角三角形,计算该三角形面积即可。上述骨结构力学指标主要反映骨结构力学特性的变化,其变化主要受骨尺寸的大小和骨几何形状的影响。当骨的几何形状和尺寸大小发生变化时,上述指标将发生变化,例如在单纯给予氟化物对抗OVX大鼠骨丢失过程中,由于该制剂使骨的几何形状,特别是骨尺寸发生变化,使得该药物对骨结构力学特性无明显影响,但使骨材料力学特性降低,导致骨质量降低[1]。根据骨结构力学特性的变化可帮助判断骨几何形状或尺寸的变化。

1.2 骨材料力学指标的选择和计算方法

选择任何一项骨材料力学特性指标的前提,是首先要计算骨截面惯性矩。该项指标的计算方法较多,这是因为骨横截面的形状并不规则。目前比较一致的观点是将骨(指股骨)横截面看作为椭圆形[2,3],如图1所示。骨截面惯性矩(J)的计算公式为 $J=\pi(BH^3-bh^3)/64$。式中 B:骨横截面外层长轴,H:骨横截面外层短轴。b:骨横截面内层长轴,h:骨横截面内层短轴。根据每个骨样品的 J,可选择并计算如下指标。

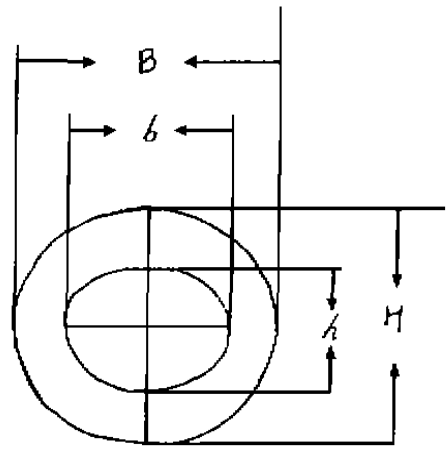

图1 长骨椭圆形横截面

1)骨应力

计算公式为:应力$=\dfrac{FLH}{8J}$

式中 F:骨所受载荷值,L:为跨矩,H:为受力方向外径;J:骨截面惯性矩

2)骨应变

计算公式为:应变$=\dfrac{12dH/2}{L^2}$

式中 d:骨变形挠度。

3)骨弹性模量(又称内在硬度)

计算公式为:弹性模量$=\dfrac{FL^3}{48Jd}$

F:为弹性载荷值

4)骨刚性系数(又称外在硬度)

作者单位:100094,航天医学工程研究所

计算公式为：刚性系数$=\frac{FL^3}{48d}$

式中 F 为弹性载荷值

2 四点弯曲力学试验

2.1 骨结构力学指标的选择与计算同三点弯曲力学指标。

2.2 骨材料力学指标的选择与计算

同三点弯曲力学试验一样，首先计算骨截面惯性矩。方法同三点弯曲力学试验。

1)骨应力

计算公式为：应力$=\frac{FHA/2}{2J}$

公式中 A 为同侧支点中心到同侧压缩头中心点的距离，如图2所示。

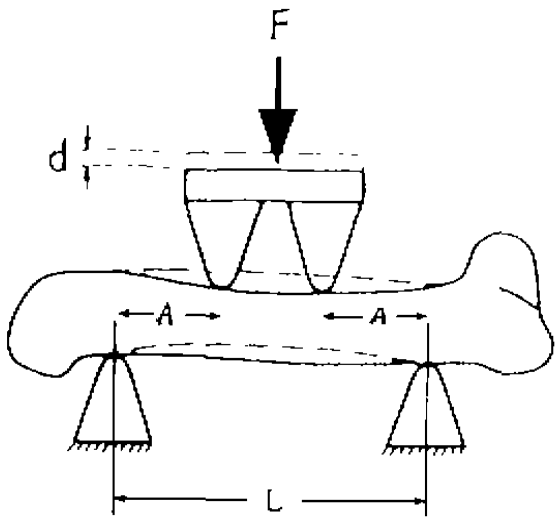

图2 四点弯曲力学试验

2)骨应变

计算公式为：应变$=\frac{6Hd/2}{A(3L-4A)}$

3)弹性模量

计算公式为：弹性模量$=\frac{FA^2}{12dJ}(3L-4A)$

应该指出的是，三点弯曲材料力学应变的计算公式仅适用于弹性应变的计算。由于在三点弯曲力学试验中有剪切应力诱导的骨变形存在，该变形占骨整个变形值的10～15%[4]。因此计算的结果值要大于实际弯曲引起的变形值，而计算的弹性模量值要低于实际值，在实际应用中应注意此误差的存在。由于四点弯曲力学试验能克服三点弯曲力学试验的不足之处，使剪切应力为零，因此四点弯曲力学试验中的应变可适用于弹性应变和屈服点后应变的计算。要清楚的是，这些计算出的数据均是间接计算出来的，与仪器直接给出的数据相比，精确度差(有一定误差存在)，这点也应注意到。

上述所介绍的是股骨弯曲试验的计算方法。有时需用胫骨进行弯曲力学试验，由于两种骨骼的几何形状有一定差异，因此其骨截面惯性矩的计算公式应为：

$$J=\frac{\pi(de^4-di^4)}{64}$$

式中 de：骨的外径，di：为骨的内径。

在计算 de 和 di 时，应在骨的两个支点处和中心点处分别测定 de 和 di，取平均值[5]。其它力学指标计算方法同三点和四点弯曲力学计算公式。

3 骨压缩力学试验的指标选择和计算方法

该试验主要适用于椎骨，但也可将长骨制备成标准件后进行压缩力学试验。压缩力学试验常选用如下力学指标对骨力学特性进行综合评价。

1)最大压缩载荷：它是对骨小梁的骨质，结构连续性，皮质厚度，横截面积和材料质量的综合反应。可直接从载荷一变形曲线上获得。

2)骨最大应变：可根据骨标本缩短的最大长度与其初始长度的比值获得。

3)骨最大应力：骨横截面单位面积上所承受的载荷值，骨标本横截面积的计算方法如下：根据阿基米德定律计算骨体积，公式如下：

骨体积$=\frac{\text{骨湿重}-\text{浸没在水中的重量}}{\text{水密度}}$

计算出的骨体积与标本高度的比值为面积

4)弹性模量：应力一应变曲线上的最大斜率。

5)骨强度：骨最大截荷值与每mm标本长度内矿盐含量的比值(或与骨盐密度mg/mm³比值)

6)骨最大硬度:载荷—应变曲线的最大斜率与每 mm 标本长度矿盐含量或与骨矿盐密度的比值。

7)能量最大吸收:骨应力—断裂变形曲线下的总面积(mJ/mm^3)。

4 骨扭转力学试验指标的选择及计算方法

这是一项比较敏感的骨生物力学试验,骨组织对不同力学载荷耐受程度大小的顺序依次为压缩载荷>弯曲载荷>扭转载荷。由此可知,骨组织对扭转力学试验是比较敏感的。

1)最大剪切应力

计算公式为:剪切应力$=\frac{Tr}{J'}$

公式中T:扭力矩,r:骨标本外层半径。J':极性截面惯性矩。

应该指出的是,该公式适用于标本横截面为圆形的圆柱体的扭转应力计算。长骨的横截面积并不是标准圆形,因此在计算中r值应取骨外层长轴半径和骨外层短轴半径的平均值。J'值按三点弯曲力学实验中J的计算方法计算,所得数值乘以2即为极性截面惯性矩。或取骨横截面最大和最小部位的J值之和为J'[4,5]。上述骨扭转应力计算公式适用大动物如猴、狗等的计算,对小动物,如大鼠的长骨等管壁相对较薄的骨骼,其应力计算公式应为:

$$剪切应力 = T/2At$$

式中A:标本横截面内,外层面积的平均数,t:骨标本壁的厚度。使用该公式计算的剪切应力值低于实际值的20%左右[4]。

2)剪切模量(内在硬度)

计算公式为:剪切模量$(G)=\frac{TL}{\alpha J'}$

式中L:标本未包埋部分的长度,α:角变形(位移),T/α:为力矩—旋转曲线的斜率。

3)剪切外在硬度

计算公式为:外在硬度$=GJ$

G:剪切模量,J:极性截面惯性矩

骨质成份与骨生物力学特性变化的关系是复杂的,不能单一而论,但总的关系是,骨矿化相的变化主要影响弹性变形区的骨力学特性,而骨有机相的变化则主要影响塑性变形区的骨力学特性[6]。

参 考 文 献

1 SΦgaard CH, Mosekilod L, Schwartz W, et al. Effects of fluoride on rat vertebral body biomechanical competence and bone mass. Bone, 1995, 16: 163.

2 Tuner CH, Akhter MP and Heaney RP. The effect of fluoridated water on bone strength. J. Orthop Res, 1992, 10: 581.

3 王以进、王介麟. 骨科生物力学, 第一版, 北京人民军医出版社, 1989, 第1版, 156.

4 Tuner C H and Burr D B. Basic biomechanical measurements of bone: A tutorial. Bone, 1993, 14: 595.

5 Kasrp M and Grynpas M D. Effect of long-term ovariectomy on bone mechanical properties in young female cynomolgus monkeys. Bone, 1994, 15: 557.

6 Burstein A H, Zika J C, Heiple K G, et al. Contribution of collagen and mineral to the elastic-plastic properties of bone. J Bone Jt Surg, 1977, 57A: 956.

(上接第46页)

5 Goel, N. S., Maitra, C. and Montrpll, E. W., On the volterra and other nonlinear models of interacting populations, Rev Med. Phys, 43, 231-376, 1971

6 Gompertz, B. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 115, 513, 1825.

7 潘子昂、王石麟、李占魁, 医学统计学的基本方法(二), 中国骨质疏松杂志, 1996, 2(2): 90.

8 青义学编著, 生物医学数学模型, 长沙, 湖南科学技术出版社, 1990, 93~94

9 越凯华著, 定性与半定量物理学, 北京, 高等教育出版社, 1992, 2