

19

# 肝内胆管力学特性的实验研究

103-106

Mechanical Property of the Bile Duct Inside the Liver

蒋稼欢      杨瑞芳      王公瑞  
Jiang Jiahuan      Yan Ruifang      Wang Gongrui

(重庆大学生物工程研究中心)

Q66

**摘要** 根据 Strahler 分级法确定了肝内胆管的形态级别。在此基础上,剥离了6例狗的肝内三级胆管,对其进行单向拉伸试验,计算分析发现,表征胆管力学特性的  $d\sigma/d\varepsilon$ 、 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的值均随胆管分级数的不同而逐级变化。

**关键词** 肝内胆管; 应力; 应变; 生物力学; 特性

中国图书资料分类法分类号 Q66

**ABSTRACT** The bile duct tree gradation inside the liver (BDIL) is defined on the basis of the Strahler's method. The specimens extracted from the BDIL of canine body are tested and the testing data are analyzed by using the pseudo-elastic theory. It's found that the values of  $d\sigma/d\varepsilon$ ,  $\alpha_1$ , and  $\alpha_2$  showing the mechanical properties of the BDIL all change with one grade after another.

**KEY WORDS** intrahepatic bile ducts; stress; strain; biomechanics; characteristics

迄今为止,国内外学者对生物软组织的力学研究,其范围已覆盖了生命系统的大部分器官组织,如血管、肺气管、神经等等<sup>[1,2]</sup>。肝外胆管的力学特性也已有文献可查<sup>[3]</sup>,但对肝内胆管的力学特性研究很少见诸于报道。本文对肝内胆管在单向拉伸作用下的力学特性的研究,有助于人们廓清一些日益积深的疑问:肝内胆管与肝外胆管的力学特性是否相同?肝内胆汁流动规律受制于胆管怎样的力学行为?另一方面,随着肝胆临床医学对于生物流变学依赖性的增强,也要求人们去深入了解肝内胆管的流变力学特性。

## 1 胆管树的形态与分级

要有效地对肝内胆管进行力学研究,一个应明确的首要前提是肝内胆管形态的分级规律。对胆管树的分级方法很多,其中之一是由 Strahler 提出的分级方法。Strahler 分级法是用于分析非对称分枝系统中分枝变化规律的一种有效方法,在对血管树时行生物力学

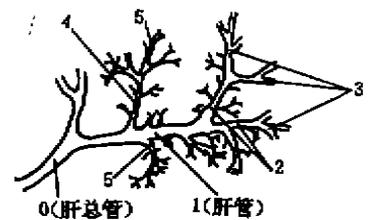


图1 胆管树的形态与分级(1~5级)

\* 收文日期 1992-02-17  
国家自然科学基金资助项目

研究时,已被广为采用。这种方法是根据分枝的平均直径大小来确定级别的。通常,把具有最小直径的分枝定为第一级,但为了方便起见,本文从最大直径的分枝开始定级。对于肝内胆管,我们将进入肝内的肝管(左或右)定为肝胆管系统分枝的第一级;而它的母管(即胆总管)可视为第零级;由第一级分叉所形成的两个相同直径的分枝胆管则作为第二级;假如上述两个分枝直径不等,则其中较大直径的分枝胆管的级别与其母管相同,……往后依次类推。这种分级方法如图1所示。

## 2 试样及实验方法

6例成年健康杂种家犬(体重15~25 kg),用3%戊巴比妥纳(30 mL/kg 体重)麻醉,取下肝胆系统,选择较大肝叶(其余肝叶中之一叶及肝外胆道系统用于作组织切片,进行组织学研究),用生理盐水浸泡,在解剖显微镜下,尽快剥离出胆管。由于受到各种因素特别是胆管长度的限制,在胆管树上,我们只取到第一、第二、第三这三级胆管作为实验用材料。剥离时,须沿着胆管及其分叉方向,尽量轻轻用力,并始终注意生理盐水的浸润。在获得了如上三级材料后,在每级胆管的二端各切1个横断面切片,置显微镜下(放大20倍)用目镜测微尺,测出它们的内径和壁厚。每一胆管切面沿其周长各测6个点,取其均数,作为胆管内径( $d_0$ )和壁厚( $\delta_0$ )。所取胆管试样暂时保存在生理盐水中,并尽快进入试验,待用时,置于4℃的冰箱中,但从剥离到实验结束的时间控制在24小时之内。

本实验是在重庆大学生物工程中心研制的生物软组织实验台上进行的。该装置采用步进电机驱动拉伸螺旋杆,拉伸作用时所产生的力和位移分别经过力传感器和位移传感器送入记录仪。两传感器具有较高精度。整个实验装置框图如图2所示。

实验时,为了得到一个可以重复出现的稳定实验状态,必须对试件进行预处理。把试样固定在实验台的装夹上之后,先拉伸至在体长度,然后进行循环加载和卸载(载荷范围为0~3.0 N,应变率为 $50 \times 10^{-3}$  mm/s)。对于肝内胆管,一般循环3~4次,记录仪上便会出现一个较为理想的、可重复的稳定状态,此时,预处理即可完成。紧接着用同样范围的载荷和应变率对胆管再进行一次加载和卸载试验,在记录仪上得到  $F$ (力)- $\Delta l$ (变形) 曲线。每一拉伸实验结束时,使试样回到位移恰好为零的情形,测量此时试样的长度,以此作为试样的参考长度  $L_0$ (见图4)。当每次实验告一段落时,必须对装置的输出(力和位移)进行标定。

## 3 数据处理与分析方法

设在静载条件下,肝内胆管的初始参考长度为  $L_0$ ,内径为  $d_0$ ,壁厚为  $\delta_0$ ,则肝内胆管的初始横截面积为:

$$A_0 \approx \pi(\delta_0 + d_0) \quad (1)$$

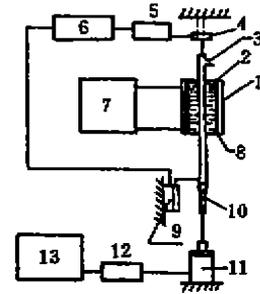


图2 试验装置框图

- 1—保鲜盒,2—试样,3—夹头;  
4—力传感器;5—X—Y记录仪;  
6—电阻应变仪,7—恒温装置;  
8—生理盐水,9—位移传感器;  
10—螺杆传动,11—步进电机;  
12—中间电路,13—控制装置

试样受力后的瞬时长为  $L$ , 载荷为  $F$ , 应力  $\sigma$  和应变  $\epsilon$  按 Lagrange 的定义, 则

$$\epsilon = L/L_0 \quad (2)$$

$$\sigma = F/A_0 \quad (3)$$

本文按照冯元桢<sup>[1]</sup>提出的生物软组织拟弹性理论来处理实验所得数据。从该理论出发, 可以把肝内胆管看作在静态加载和卸载时, 具有不同应力—应变关系的两种弹性体, 对加载过程所得曲线和卸载过程所得的曲线分别处理。在进行预处理后, 肝内胆管的应力—应变关系趋于稳定, 应力—应变关系在规定的循环过程的每一分支都是单值对应的。因此, 肝内胆管的应力—应变关系, 在加载段和卸载段, 可以合写为:

$$\sigma = \begin{cases} f_1(\epsilon) & d\epsilon/dt > 0 \\ f_2(\epsilon) & d\epsilon/dt < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $f_1$  和  $f_2$  是  $\epsilon$  的函数。若  $f_1(\epsilon) = f_2(\epsilon)$ , 则材料是弹性的; 如果  $f_1(\epsilon) \neq f_2(\epsilon)$ , 则材料是粘弹性的。分析函数  $f_1(\epsilon)$  和  $f_2(\epsilon)$  比较方便的方法是在  $\sigma$  的变化范围内, 用  $\sigma$ — $\epsilon$  曲线上的斜率  $d\sigma/d\epsilon$  对  $\sigma$  作图, 并用适当的直线方程来拟合实验曲线。

#### 4 实验结果

在载荷范围  $0 \sim 3.0 \text{ N}$ , 应变率为  $50 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$  的条件下, 循环加载和卸载得到各级胆管的力—变形曲线(取1例实验原始记录曲线)见图3, 各级胆管在试验过程中均出现滞后环这一典型的粘弹性特征。

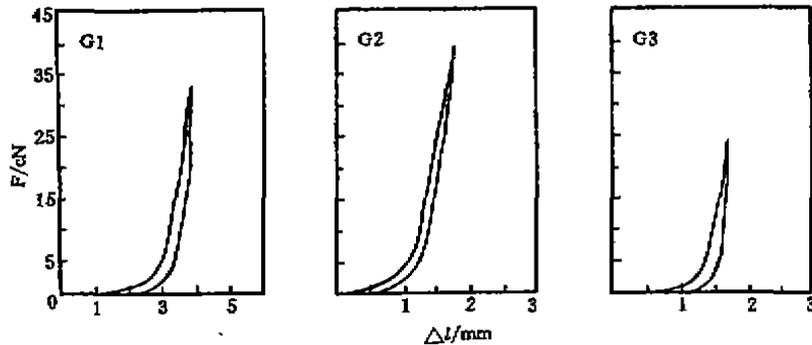


图3 各级胆管的力—变形曲线

当张应力  $\sigma$  在  $0 \sim 15 \text{ MPa}$  范围内设定时, 每级肝内胆管的曲线上, 各  $\sigma$  值所对应点的斜率  $d\sigma/d\epsilon$  即可确定, 以各  $\sigma$  值所对应点斜率  $d\sigma/d\epsilon$  对  $\sigma$  作图, 得到的  $d\sigma/d\epsilon$  关系示于图4。

本文用以下直线方程分别拟合各级胆管的实验数据:

$$d\sigma/d\epsilon = a\sigma + B_0 \quad (5)$$

式中,  $a$  是斜率;  $B_0$  为截距。方程(5)可写成

$$d\sigma/d\epsilon = a(\sigma + \beta) \quad (6)$$

积分之, 得:  $\sigma + \beta = Ce^{a\epsilon}$  (7)

方程(7)中的积分常数  $C$  可用曲线上任意一点值来确定, 如当  $\epsilon = \epsilon^*$  时,  $\sigma = \sigma^*$ , 则:

$$\sigma = (\sigma^* + \beta)e^{a(\epsilon - \epsilon^*)} - \beta \quad (8)$$

即当  $0 < \sigma \leq 15 \text{ MPa}$  时, 肝内三级胆管存在指数型应力—应变关系, 上述方程(8)即是肝

内胆管的一维本构方程。

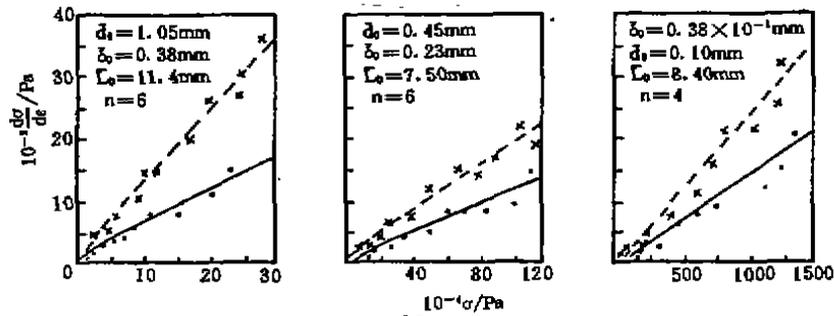


图4 各级胆管的  $d\sigma/d\varepsilon-\sigma$  拟合曲线

——加载; - - - - 卸载; n—样本数

如图4所示,在相同应变率下,卸载曲线拟合的  $d\sigma/d\varepsilon-\sigma$  直线斜率大,因而可以用两条直线去分别表示加载和卸载过程。

$$\text{加载时, } d\varepsilon/dt > 0, d\sigma/d\varepsilon = \alpha_1(\sigma + \beta_1)$$

$$\text{卸载时, } d\varepsilon/dt < 0, d\sigma/d\varepsilon = \alpha_2(\sigma + \beta_2)$$

(9)

计算得出的一维载荷下不同级别的肝内胆管的力学特性常数  $\alpha_1, \beta_1$  和  $\alpha_2, \beta_2$  见表1所示。

表1 狗肝内胆管一维载荷下的力学特性常数 ( $\sigma=0\sim 15\text{MPa}$ )

级 别	加 载		卸 载	
	$\alpha_1$	$\beta_1/\text{kPa}$	$\alpha_2$	$\beta_2/\text{kPa}$
1	5.08	29.8	11.7	4.9
2	1.04	73.1	1.72	93.3
3	0.14	571.4	0.24	702.9

从图4和表1可以看出,对于加载和卸载过程,当张应力  $\sigma < 15\text{MPa}$  时,每级肝内胆管的  $d\sigma/d\varepsilon$  均随着张应力  $\sigma$  的增加而增大,并且对于每一个张应力  $\sigma$ ,随着分枝级数的深入(由1级到3级),肝内胆管的  $d\sigma/d\varepsilon, \alpha_1$  和  $\alpha_2$  值均随之而减小。

## 5 讨 论

实验表明,肝内三级胆管与肝外胆管一样均具有一般生物软组织的粘弹性特征,并且肝内胆管随着级别的不同,其力学特性常数也逐级变化。这种力学性质逐级变化的现象,是否预示着肝内胆管微观组织构筑的变化,是否预示着级别不同的胆管中胆汁流动规律也存在着区别……这一系列的相关问题,有待于人们作进一步的探讨。

## 参 考 文 献

- 1 冯元桢. 生物力学. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1986. 222~273
- 2 吴云鹏, 梁子钧. 生物流变学. 北京: 高等教育出版社, 1988. 394~410
- 3 Jian C Y, Wang G R. Biomechanical Study of the Bile Duct System Outside the Liver. Bio-Med, 1991, (1), 105~113