

文章编号:1000-582x(2001)02-0009-03

## 猪十二指肠和空肠生物力学性能特性

吴江红<sup>1</sup>,程西云<sup>1</sup>,韦云隆<sup>1</sup>,朱永清<sup>1</sup>,周银生<sup>2</sup>,徐世荣<sup>3</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044;

2. 浙江大学机械系,杭州 310027; 3. 重庆大学生物工程学院,重庆 400044)

**摘要:**研究了猪十二指肠和空肠的生物力学性能,结果表明:其应力-应变关系为指数函数关系。从材料常数  $C$  和  $\alpha$  比较来看,十二指肠和空肠的指数系数  $\alpha$  值较接近,这说明十二指肠和空肠应力应变趋势是一致的。在一定应变下,十二指肠的增量弹性模量大于空肠的增量弹性模量。这说明,空肠更容易发生变形。本试验研究为研制体内运行的医用微型机器人提供基础数据。

**关键词:**生物力学;小肠;医用机器人

**中图分类号:** Q 819

**文献标识码:** A

目前,肠道内窥镜系统及医用微机器人研究,是国际研究的热门课题。特别是能潜入人体动手术或释放药物的微机器人的研制,更具有相当的挑战性<sup>[1]</sup>。由于人体器官自身具有的排它性,对潜入式微机器人和微型化的医疗用品开发与研制,就一定要考虑其适应人体生理机能、对人体肠道器官无损伤的要求。无损仿小肠微机器人研究尚属国内外未攻克领域。

小肠是人体消化系统器官中最长的一段,也是人体执行消化和吸收功能的最主要部位,小肠组织主要由两层平滑肌构成。研究无损仿微机器人,在人体管壁中运动时利用粘液形成的流体动压润滑膜,来防止机器人与肠道管壁直接接触而损伤肠道组织<sup>[2]</sup>,虽然肠壁会发生相应的变形,这种变形的程度可以小到被人体接受的程度,因此,试验研究肠道的生物力学性能,建立其动态变形模型,是一项必不可缺非常重要的研究<sup>[3]</sup>。

冯元帧等人研究过输尿管于滑肌组织和豚鼠带状结肠的力学性能<sup>[4]</sup>。提出软组织应力-应变关系方程

$$T = \alpha EC \lambda \exp[\alpha(E^2 - E^* \cdot)^2] \quad (1)$$

其中,  $C$  和  $\alpha$  为材料常数。

丹麦 J. H. Dtorkholm 和 H. Gregersenh 在 1995 年至 1998 年研究了荷兰猪小肠的生物力学性能<sup>[5,6]</sup>以

及荷兰猪十二指肠零应力状态下的应变分布<sup>[7]</sup>。但关于小肠的生物力学性能国内外研究还较少。

选用四川杂种猪作试验标本,这是因为:第一、某些动物(如猪和狗)的小肠和人的小肠具有相似性,第二、四川杂种猪标本在国内范围内更易取得,第三、为了方便下一步试验取样工作。作者详细研究了四川杂种猪小肠的生物力学性能,得到了猪小肠应力-应变关系,这不仅可以为建立肠道生理系统模型提供试验基础,同时也可为研制体内运行的医用微型机器人提供基础数据。

### 1 材料和方法

试验在重庆大学生物工程研究院进行。试验用仪器为美国产的 INSTRON 1011 材料试验机,其最大量程为 5 kN。

四川杂种活猪重 100 kg,解剖后立即取其小肠,从小肠上分别截下十二指肠段 100 mm 和小肠空肠段(近十二指肠)100 mm 放入生理盐水中,制成两组标本:组 I(十二指肠)和组 II(空肠)。先取十二指肠段沿其轴向剪开,紧接着沿垂直轴向方向(周向)切成 5 毫米宽的 5 个长方形状的标本属组 I。同样方法,从空肠段沿周向截取 5 个 5 毫米宽的长方形状的标本属

· 收稿日期:2000-09-17

基金项目:国家自然科学基金(基金号:59805017);国家“863”计划(批准号:863-512-9805-08)和重庆大学生物工程学院开放基金资助项目

作者简介:吴江红(1967-),女,重庆人,博士,总参重庆通信学院讲师。研究方向:医用微机器人仿真系统。

组 II。量出所有标本宽度及厚度。

使用 INSTRON 1011 材料试验机夹持标本时,注意到使标本的有效初始长度尽量地长。重复加载 5 次对标本进 1 预调后,用测微尺量出有效尺寸,然后开始拉伸,得到沿周向拉伸的应变—应力曲线。标本离体后整个试验在时 3 小内完成。

### 2 试验结果和分析

两组共 10 个标本的初始尺寸列于表 1,其中标本 1、标本 2、标本 3、标本 4 和标本 5 属于组 I;标本 6、标本 7、标本 8、标本 9 和标本 10 属于组 II。

表 1 标本长度、宽度、厚度测量结果

标本号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
宽度(mm)	5.0	5.5	5	5	5	5	6.5	5.5	5.5	5
厚度(mm)	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.9	1.5	1.6	1.5	1.6
长度(mm)	27	34	31.5	38	30	27	31	30	31	30

设标本拉伸前后的断面面积为  $s_0, s_1$ , 长度为  $L_0, L$ , 拉力为  $P$ , 并假设肠壁材料为不可压缩材料, 变形前后体积相等。

由于一维应变能  $\rho_0 W^{(1)}$  为一组 Lagarang 应变  $\lambda$  的函数, 求其对应变  $\lambda$  的导数, 可得一维 Lagarang 应力  $T$  为<sup>[4]</sup>:

$$T = \partial \rho_0 W^{(1)} / \partial \lambda \tag{2}$$

因为  $\rho_0 W^{(1)} = \frac{1}{2} C \exp[\alpha(E^2 - E^{*2})]$  (3)

$$E = (\lambda^2 - 1) / 2$$

其中,  $E$  为张应变,  $C, \alpha$  为材料常数,  $E^{*2}$  为参考应变。

所以, Lagarang 应力  $T$  为:

$$T = \alpha EC \exp[\alpha(E^2 - E^{*2})] \tag{4}$$

上式为生物软组织应力 - 应变一般关系式<sup>[5]</sup>。采用牛顿高斯最小二乘法拟合试验数据, 求得猪十二指肠和空肠的材料常数  $C$  和  $\alpha$ , 其结果列于表 2。图 1 画出了猪小肠的应力 - 应变测试结果及拟合曲线。图中的方块实心点和三角实心点分别为组 I 和组 II 的试验测试数据点。实线为用式(4)拟合所得到的曲线。从图 1 可以看出, 式(4)和实验结果有良好的拟合性。不同应变下, 各组增量弹性模量见表 3。

表 2 猪十二指肠和空肠材料常数

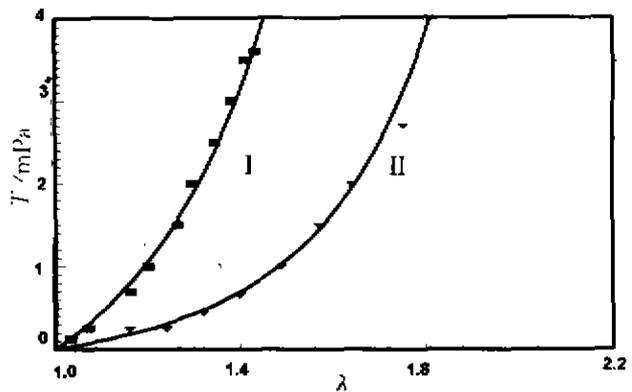
	组 I (十二指肠)	组 II (空肠)
标本数	5	5
$C \pm s$ (MPa)	$3.014 83 \pm 1.667 81$	$0.664 83 \pm 0.118 53$
$\alpha \pm s$	$1.304 67 \pm 0.709 54$	$1.406 57 \pm 0.333 47$

表 3 不同应变下, 十二指肠和空肠增量弹性模量(单位 MPa) 比较

应变	组 I (十二指肠)	组 II (空肠)
1.24	$4.882 1 \pm 0.504 6$	$1.485 3 \pm 0.009 7$
1.32	$6.563 3 \pm 1.042 2$	$1.873 0 \pm 0.015 9$
1.40	$9.325 4 \pm 2.330 6$	$2.357 2 \pm 0.357 2$
1.48	$9.545 7 \pm 0.808 3$	$3.333 4 \pm 0.833 5$
1.56	$8.481 5 \pm 1.753 1$	$5.277 8 \pm 0.277 8$
1.64	$9.333 3 \pm 0.888 9$	$6.431 7 \pm 0.876 1$

从表 2 可以看出, 十二指肠和空肠的指数系数  $\alpha$  值较接近, 两者的材料常数  $C$  有一定的差异, 这说明, 十二指肠和空肠应力应变趋势是一致的。

从表 3 可见, 在一定应变下, 十二指肠的增量弹性模量大于空肠的增量弹性模量。这说明, 空肠更容易发生变形。



I — 十二指肠; II — 空肠

图 1 猪十二指肠和空肠应力 - 应变关系拟合曲线

### 3 结论

1) 猪十二指肠和空肠的应力 - 应变关系符合冯元顿提出的应力 - 应变方程:

$$T = \alpha EC \exp[\alpha(E^2 - E^{*2})]$$

2) 比较材料  $C$  和  $\alpha$ , 十二指肠的指数系数  $\alpha$  值接近, 两者的材料常数  $C$  有一定的差异, 这说明, 十二指肠和空肠应力应变趋势是一致的。

3) 在一定应变下, 十二指肠的增量弹性模量大于空肠的增量弹性模量, 这说明, 空肠抗变形能力较强。

4) 本文结论和参考文献[5,6]结果比较, 应力与应变关系的指数关系是一致的, 不同在于四川杂种猪小肠的应力取值范围大于荷兰猪。

### 参考文献:

[1] DARIO P, GUGLIEMELLI E, ALLOTTA B, et al. Robotics for medical application[J]. IEEE Robotics & Au-

tomation Magazine, 1996, 3(3): 44-56.

[2] 吴江红, 韦云隆, 张光辉, 等. 肠道微机器人无损驱动原理仿真模型研究[J]. 重庆通信学院学报, 1999, 18(4): 35-39.

[3] 吴江红, 朱永清, 程西云, 等. 狗小肠黏液的流变性能研究[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(2): 10-12.

[4] 冯元桢. 活组织的力学特性[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1983.

[5] DTORKHLOM J H, VILLADSEN MD G E, JENSEN MD S L, et al. Passive Elastic Wall Properties in Isolated Guinea Pig Small Intestine Digestive Diseases and Science[J]. 1995, 40(5): 976-982.

[6] GREGERSEN H, EMERY J L, MCCULLOCH A D. Annals of Biomechanical Engineering, History-dependent Mechanical Behavior of Guinea-pig Small Intestine[J]. 1998, 26: 1-9.

[7] GREGERSEN H, KASSAL G, PALLENCAOA E, et al. Morphometry and Strain Distribution in Guinea-pig Duodenum with Reference to the Zero-stress State[J]. Am J Physiol, 1997, 273: 865-874.

### Biomechanics Behavior of Pig's Small Intestines

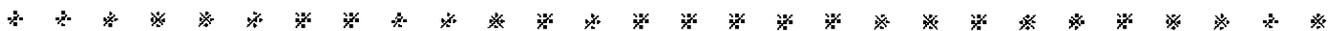
WU Jiang-hong<sup>1</sup>, Cheng Xi-yun<sup>1</sup>, WEI Yun-long<sup>1</sup>,  
ZHU Yong-qing<sup>1</sup>, ZHOU Yin-sheng<sup>2</sup>, XU Shi-rong<sup>3</sup>

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Zhenjiang University, Hangzhou 310027, China; 3. College of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The biomechanics behavior of pig such as duodenum and jejunum are studied and a formulation of the stress-strain relation is presented. The results indicate that the exponential coefficient  $\alpha$  of each is almost the same and the incremental elastic modulus of duodenum is larger than those of jejunum and. That is to say, the jejunum can be more easily deformed and the biomechanics behavior of the duodenum and the jejunum is almost the same. The results are necessary for study on the Noninvasive method to drive a Medical Microrobot.

**Key words:** biomechanics; small-intestines; medical robot

(责任编辑 戚孝义)



(上接 4 页)

### Study on Contact of Loaded Hourglass Worm Gearing

QIN Dong-xing, QIN Da-tong, YANG Hong-cheng

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** With the Contact Finite Element Method, the distribution and contact zone of the hourglass worm gearing are calculated. Under the different loads, load among the teeth pairs and variation of contact zone are investigated. The photo-elastic experiment has been proceeded for verifying the pressure distribution and load sharing. The result by photo-elastic experiment is corresponding to the calculating result with contact FEM.

**Key words:** hourglass worm; contact force; load sharing; photo-elastic experiment

(责任编辑 戚孝义)