

# 输尿管结石对管壁及尿液影响的有限元分析

吴绍山, 谈宜傲, 陶陶, 周林玉

**摘要** 目的 探讨输尿管结石对管壁及尿液生物力学特性的影响。方法 基于 ANSYS Workbench 15.0 通过建立输尿管、尿液及结石相互作用的有限元模型, 并引入流体控制方程、动力学方程和运动方程等来描述一个生物蠕动周期内输尿管结石对尿液的流动特性、管壁的生物力学特性的影响。结果 输尿管一个蠕动周期内尿液流动特性随着结石尺寸的不同而不断变化, 而尿液流的质量流率和压力梯度峰值监测随着结石尺寸增大呈现增加的趋势。输尿管蠕动过程中尿液的流速很小, 最大值仅为 0.04 m/s, 尿液的压力变化对输尿管影响较小。结论 在一个蠕动周期内输尿管中尿液生物力学参数随着结石尺寸不同而不断变化, 较大尺寸的结石易于产生更高的流速和压力梯度, 且在一个蠕动周期结束时会有尿液回流产生, 回流质量流率随着结石尺寸增加而增大。然而, 蠕动过程中输尿管管壁的最大应力、应变数值没有明显变化。

**关键词** 输尿管蠕动; 结石; 有限元; 回流

中图分类号 R 693+.4

文献标志码 A 文章编号 1000-1492(2018)09-1374-05

doi: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2018.09.011

目前关于输尿管中结石对管壁、尿液的生物力学特性的相关作用研究已有所开展<sup>[1]</sup>, 但同时考虑尿液的流动、管壁的蠕动及不同尺寸的结石之间的相互作用的研究较少。该研究通过建立三者之间的有限元模型, 并引入相应的流动控制方程、动力学方程和运动方程分别描述尿液的流动特性、管壁的生物力学特性和蠕动运动的方法, 对输尿管蠕动过程中结石、尿液和管壁的相互作用及变化规律进行研究。

## 1 物性参数及边界条件的确定

**1.1 尿液及输尿管物性参数的确定** 尿液的假设为各项同性牛顿流体, 其密度  $\rho = 1\ 050\ \text{kg/m}^3$  和黏

度  $\mu = 1.3\ \text{cP}$ <sup>[2]</sup>。流体控制方程连续性方程和动量方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \tag{2}$$

其中  $\mathbf{u}$  是流体速度,  $p$  流体压力,  $\rho$  是流体密度,  $\mu$  是动力黏度。

输尿管管壁被认为是弹性、各向同性材料, 弹性模量为 10 kPa<sup>[3]</sup>, 泊松比为 0.33<sup>[4]</sup>。管壁生物动力学方程其可表达为:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_j} = \rho^s \frac{\partial^2 d_i^s}{\partial t^2} \tag{3}$$

其中  $\sigma_{ij}^s$  是柯西应力张量,  $d_i^s$  固体位移,  $\rho^s$  固体密度。Boyersky et al<sup>[5]</sup> 认为成人的输尿管典型几何尺寸为: 半径  $R$  为 2 ~ 8 mm, 长度  $L$  为 120 ~ 350 mm。该研究采用的输尿管几何参数为: 半径  $R = 4\ \text{mm}$ , 长度  $L = 300\ \text{mm}$ , 管壁厚 1 mm<sup>[5]</sup>。由于结石形状的复杂性, 本文计算将其简化为圆球形, 距离输尿管进口 30 mm, 尺寸数据如表 1。简化的输尿管与尿液模型见图 1。

表 1 结石尺寸数据

编号	结石截面/输尿管截面比 (%)	半径 (mm)
S0	0	0
S1	6	1.00
S2	15	1.55
S3	35	2.35

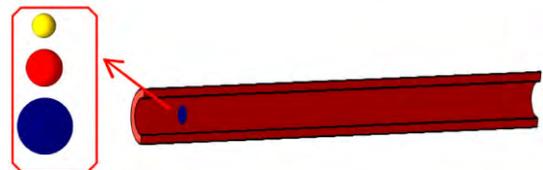


图 1 输尿管与不同尺寸的结石模型

**1.2 边界条件确定** 输尿管进出口压差为 0.3 Pa; 输尿管蠕动可以定义为<sup>[6]</sup>:

$$z(r, t) = R - a\{1 - \cos^2[\pi(r - ct)/\lambda]\} \tag{4}$$

2018-05-16 接收

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 81702540)

作者单位: 中国科学技术大学附属第一医院(安徽省立医院)泌尿外科, 合肥 230001

作者简介: 吴绍山, 男, 副主任医师, 责任作者, E-mail: slyyws@126.com

其中,输尿管内径  $R = 4 \text{ mm}$ ,蠕动波波幅  $a = 1.5 \text{ mm}$ ,波长  $\lambda = 120 \text{ mm}$ ,波速  $C = 20 \text{ mm/s}$ , $r$  表示径向位置, $t$  表示蠕动周期内任一时刻,蠕动周期  $T = 6 \text{ s}$ 。

## 2 结果

2.1 不同尺寸的球形结石对输尿管蠕动过程中的影响 基于 ANSYS Workbench 对输尿管蠕动过程中不同尺寸的球形结石进行了仿真分析。图 2 和图 3 分别显示的是  $T/4$  (收缩阶段) 和  $3T/4$  (扩张阶段) 有无结石及不同尺寸的结石对尿液流速的影响。通过对比可知,在  $T/4$  收缩阶段,相比于输尿管无结石(图 2-S0)而言,随着结石尺寸逐渐增大(图 2-S1 代表小尺寸,图 2-S2 代表中等尺寸,图 2-S3 代表大尺寸),紧邻结石后方的流体速度呈减小的趋势。在  $3T/4$  扩张阶段,相比于输尿管无结石(图 3-

S0) 而言,伴随结石尺寸逐渐增大(图 3-S1 代表小尺寸,图 3-S2 代表中等尺寸,图 3-S3 代表大尺寸),紧邻结石后方的流体速度呈增大的趋势。

为了定量地说明回流现象,图 4 显示进口质量流率随着蠕动周期及球形结石尺寸的变化趋势。随着结石尺寸的增大,入口质量流率是逐渐减小的。在时刻为  $T$  时,出现回流现象,回流质量流率是随着结石尺寸的增大而增大的。

图 5 显示在  $T/4$  时刻,压力梯度沿着输尿管轴线方向的变化。选择  $T/4$  是因为这个时刻是收缩阶段,更能说明结石尺寸对尿液和输尿管的影响。从图 6 可知,在  $T/4$  (收缩阶段),在阻塞比为 35% 时,壁面剪切应力比阻塞比为 15% 和 6% 高。说明结石尺寸的增加,在与结石相对应位置的输尿管壁面上的剪切应力也是明显增大的。剪切应力的增大,必然导致对输尿管壁的侵蚀加剧。

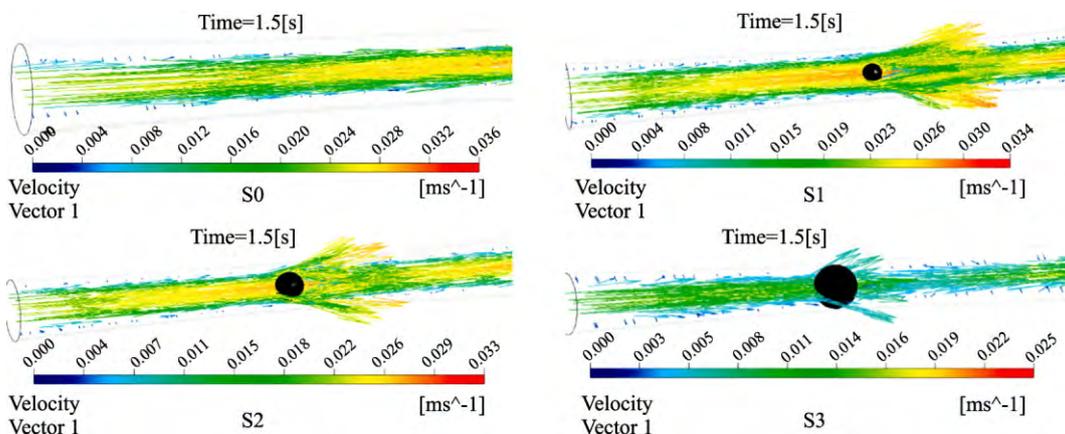


图 2  $T/4$  输尿管内尿液流场矢量图

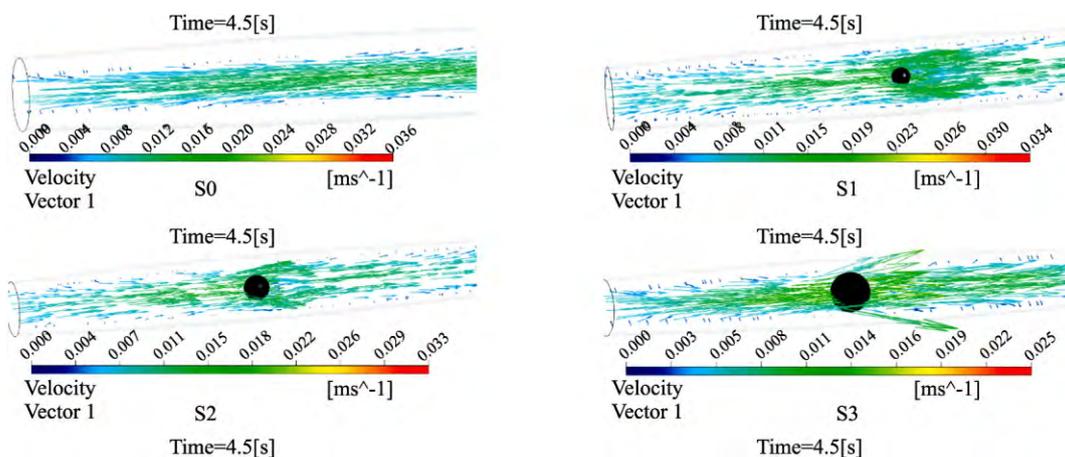


图 3  $3T/4$  输尿管内尿液流场矢量图

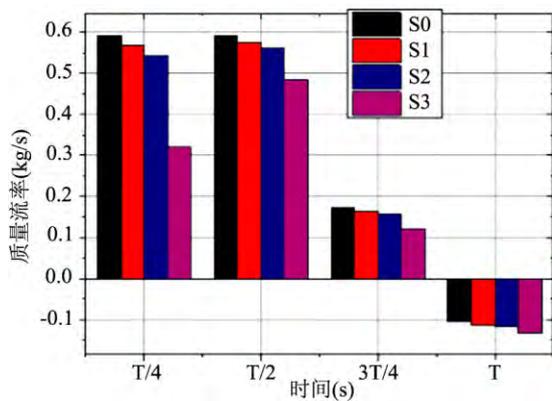


图4 不同尺寸结石随蠕动周期变化入口处质量流率

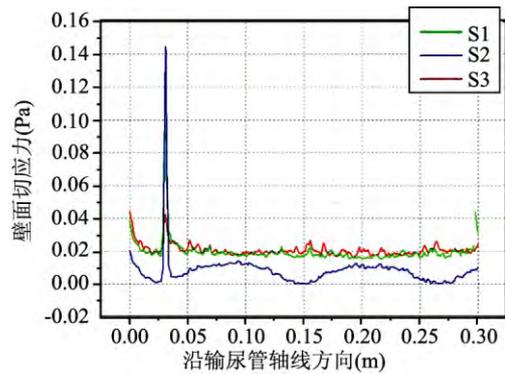


图6 T/4时刻壁面切应力图

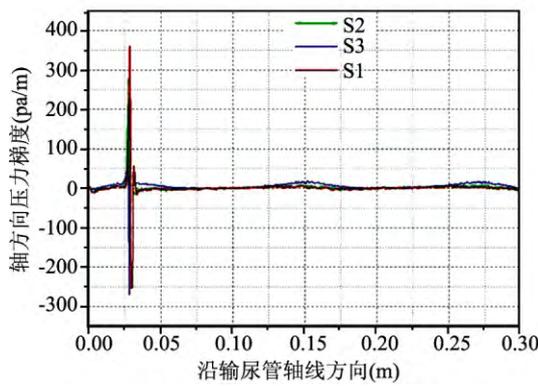


图5 T/4时刻轴线压力梯度图

2.2 输尿管蠕动过程中输尿管壁的生物力学特性变化情况 分析输尿管管壁的应力分布(S0代表无结石,S1代表小尺寸结石,S2代表中等尺寸结石,S3代表大尺寸结石)由图7~10可以看出,随着蠕动波的传播,管壁应力分布是不断变化的。在蠕动波的波峰和波谷位置分别出现最大和最小应力,且环向应力要高于径向上的应力。值得注意的是,蠕动波的传播过程中,结石对输尿管壁在径向和环向方向上的应力值变化影响很小。因为在输尿管蠕动过程中,尿液的受迫运动所产生的流速很小,最大也只有0.04 m/s左右,流体产生的压力对输尿管干扰比较小。

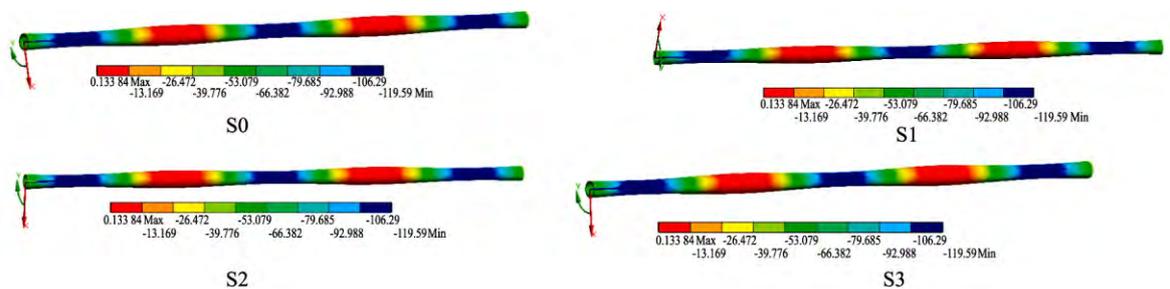


图7 T/4时刻输尿管管壁径向应力分布

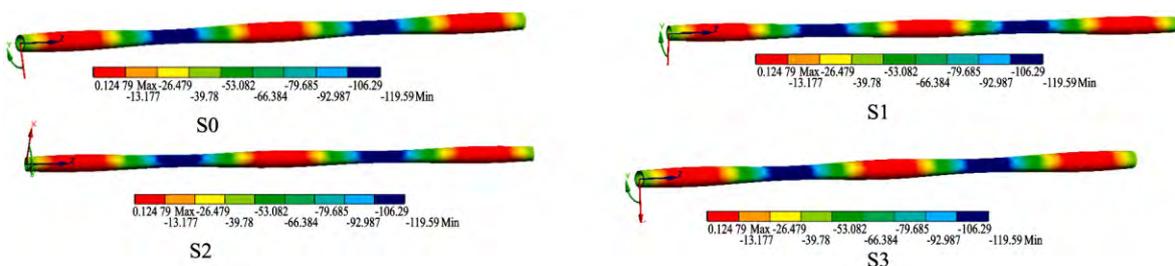


图8 3T/4时刻输尿管管壁径向应力分布

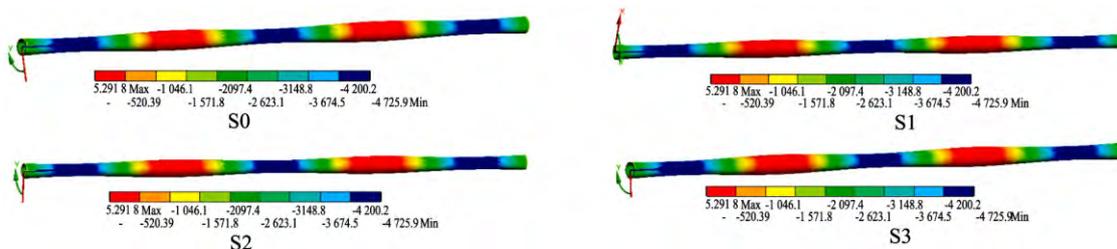


图9 T/4时刻输尿管管壁环向应力分布

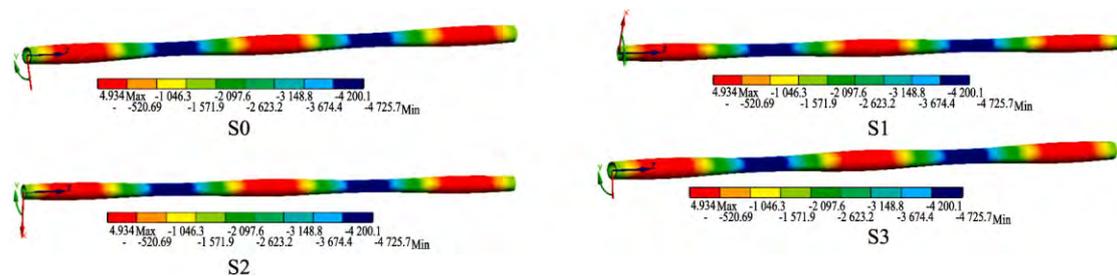


图10 3T/4时刻输尿管管壁环向应力分布

### 3 讨论

输尿管中结石、尿液及管壁在输尿管蠕动过程中的相互作用引起了一些研究人员的兴趣。为了定性及定量去描述三者之间的关系,采用 ANSYS 多物理场耦合的方法进行生物力学分析,可以克服尸体标本试验的取材困难,无法重复利用及标本间的个体差异难以消除等缺点,所以近年来有限元分析被广泛的应用于医学研究中<sup>[7-9]</sup>。利用 ANSYS 强大的多物理场耦合分析功能,通过建立输尿管、尿液及结石相互作用的有限元模型,并引入流体控制方程、动力学方程和运动方程等来描述一个生物蠕动周期内输尿管结石对尿液的流动特性、管壁的生物力学特性的影响。

通过对尿液、结石及输尿管之间的相互作用进行研究,发现输尿管蠕动过程中尿液生物力学参数是不断变化的,结石尺寸越大,在结石位置处易于出现更高的流速和压力梯度,且在一个蠕动周期结束时尿液的回流是顺着结石尺寸的增大而增加的。然而,蠕动过程中输尿管管壁的最大应力、应变数值没有明显变化。

**3.1 尿液生物力学随着结石尺寸变化规律** 本研究所建立的有限元模型可以模拟在输尿管蠕动过程中尿液随结石尺寸的变化规律,并可获得尿液流的流速、压力、入口质量流量等尿液的生物力学特性参数。为了了解回流现象和结石的关系,监测输尿管

入口处的尿液流的质量流率,通过对有限元模型的计算结果分析,在输尿管蠕动周期结束的 T 时刻出现负值,即表明该时刻会出现尿液回流现象,这个现象与文献<sup>[3]</sup>的研究一致,且入口回流质量流率和结石尺寸呈正比关系。本研究分析表明在结石处,输尿管轴线方向上压力梯度发生急剧的变化,随着结石尺寸的增大,压力梯度变化也呈现增大的趋势,此结果与文献<sup>[7]</sup>的研究结果相一致。在 T/4(收缩阶段)在阻塞比为 35% 时壁面剪切应力比阻塞比为 15% 和 6% 高。说明结石尺寸的增加,在与结石相对应位置的输尿管壁面上的剪切应力也是明显增大的。剪切应力的增大,必然导致对输尿管壁的侵蚀加剧。

### 3.2 结石尺寸对输尿管管壁生物力学特性的影响

在输尿管蠕动过程中,尿液受迫运动产生的流速很小,最大也只有 0.04 m/s 左右,流体产生的压力对输尿管干扰比较小。在整个输尿管蠕动过程中,输尿管管壁的应力、应变最大值变化不明显。

### 3.3 本模型建立的不足之处

本研究所建立的有限元模型引入了一些假设,并对实际输尿管和结石几何形状进行了简化近似处理。这些假设和简化近似处理将在一定程度上影响所建立的有限元模型表征输尿管蠕动过程的准确性。后续的研究将采用更为贴近真实输尿管的几何形状及相关建模技术,进一步提供所建有限元模型的准确性。

综上所述,本研究首次采用流体控制方程、动力

学方程和运动方程分别描述管壁的生物力学特性和蠕动运动的方法,建立了输尿管、尿液及结石的有限元模型,对输尿管蠕动过程中的管壁、尿液和结石的生物力学特性进行研究。输尿管蠕动以波的形式在输尿管中传播,结石的存在对输尿管中的尿液生物力学特性有显著影响,其中结石的尺寸对尿液及入口回流有较大影响。同时,在蠕动波传播过程中输尿管管壁的应力、应变随时间变化,但是蠕动波对输尿管管壁在蠕动过程中的最大应力、应变没有显著影响。

本研究虽然仅仅基于有限元模拟的手段初步研究了输尿管结石对管壁及尿液的生物力学特性影响,但是可以帮助临床医师从实验、临床之外的生物力学视角来理解尿流动力学,了解输尿管结石对管壁及尿液的生物力学特性的影响,为制定输尿管结石治疗方案提供数据支持。

#### 参考文献

[1] Sokolis D P. Identification and characterization of regional variations in the material properties of ureter according to microstructure

- [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2014, 17(15): 1653-70.
- [2] Najafi Z, Gautam P, Schwartz B F, et al. Three-dimensional numerical simulations of peristaltic contractions in obstructed ureter flows [J]. *J Biomech Eng*, 2016, 138(10): 1-7.
- [3] Vahidi B, Fatouree N. A biomechanical simulation of ureteral flow during peristalsis using intraluminal morphometric data [J]. *J Theor Biol*, 2012, 298(4): 42-50.
- [4] Bevan T, Carriveau R, Goneau L, et al. Numerical simulation of peristaltic urine flow in a stented ureter [J]. *Am J Biomed Sci*, 2012, 4(3): 233-48.
- [5] Boyarsky S. *Urodynamics: hydrodynamics of the ureter and renal pelvis* [M]. Academic Press, 1971: 189-98.
- [6] Gómezblanco J C, Martínezreina F J, Cruz D, et al. Fluid structural analysis of urine flow in a stented ureter [J]. *Comput Math Methods Med*, 2016, 2016(5): 1-7.
- [7] 吴稀, 韦代伦, 周容, 等. 两种舌侧托槽垂直向控制性能三维有限元分析 [J]. *安徽医科大学学报*, 2018, 53(2): 312-5.
- [8] 郝宗耀, 刘明, 梁朝朝, 等. 输尿管软镜术前留置双J管的疗效观察 [J]. *安徽医科大学学报*, 2016, 51(3): 460-2.
- [9] 梁煜峰, 李小虎, 余永强, 等. 双能量CT虚拟平扫在泌尿系结石检出的应用价值 [J]. *安徽医科大学学报*, 2015, 50(9): 1363-6.

## Finite element analysis of effect of ureteral stone on the tube wall and urine

Wu Shaoshan, Tan Yi'ao, Tao Tao, et al

(Dept of Urology, The First Affiliated Hospital of USTC, Division of Life Science and Medicine, University of Science and Technology of China, Hefei 230001)

**Abstract Objective** To explore the effect of ureteral calculi on the biomechanical properties of the vessel wall and urine. **Methods** Based on the ANSYS Workbench 15.0, a finite element model for the interaction between ureters, urine, and stones was established, and fluid control equations, dynamic equations, and equations of motion were introduced to describe the effect of ureteral stones on urine flow characteristics and biomechanical properties of the wall in a biological peristaltic cycle. **Results** The urine flow characteristics of a ureter during a peristaltic cycle varied continuously with the size of the stones, and the monitoring of the urine flow mass flow rate and pressure gradient peaks showed an increasing trend with increasing stone size. During ureteral peristalsis the flow velocity of urine was very small, and the maximum was only about 0.04 m/s, and change of urine pressure had a small effect in ureteral wall. **Conclusion** The biomechanical parameters of the urine in the ureter during a peristaltic cycle vary continuously with the size of the stones. Larger stones tend to produce higher flow rates and pressure gradients, and there is a return flow of urine at the end of a peristaltic cycle. The reflux mass flow rate increases as the stone size increases. However, there is no significant change in the maximum stress and strain values of the ureteral wall during peristalsis.

**Key words** ureteral motility; stones; finite element; reflux