DOI:10.16016/j.1000-5404.1990.01.003

人体胆囊运动模型及胆汁流场分布的究研

谢 刚 吴贵华 陈 培 姚茹国 王其源 许新复 韩本立 （西南医院 放射科）

曾宪俊 杨瑞芳 吴云鹏（重庆大学生物中心）

提 要 本文从流体力学理论出发，采用CT、X线造影和B超等技术，获得了人体椭圆类胆囊边界收缩运动的数学模型。并应用有限元方法在国际上首次计算出人体椭圆型轴对称胆囊胆汁的瞬态流场，获得了轴对称牛顿胆汁流动的流场分布。从而首次实现了人体胆囊胆汁流场计算的活体研究。从理论上论证了涡流是胆囊结石形成的力学机制，并得到下述结论：（1）收缩胆囊的轴线附近存在着一般快速的胆汁出流；（2）流场中心截面附近存在着两个旋向相反的涡流区，其中靠近轴线逆时针方向旋涡区强度较高；（3）胆汁流场的衰减规律与胆囊收缩规律大致相同；（4）胆囊结石的形成与涡流有关。

关键词 胆囊造影术；胆囊；胆结石；胆管；胆汁

胆结石的成因极为复杂，国内外学者长期致力于胆石成分、代谢障碍及感染等对病理成石胆汁的形成和生化结构的影响等诸方面的研究，获得了大量成果，但均未圆满解释胆石形成的机制。近年来，有人开始从生物流变学角度研究胆囊结石形成的流体力学机制[1]。但迄今为止，在国内外尚未见关于胆囊内胆汁流场分析计算的报道，然而，要充分论证胆囊结石形成的流体力学机制，就必须进行流场分析。过去仅有人猜测在胆囊内可能存在涡流[2]。本文的目的，旨在通过流场计算，找出胆囊内旋涡流动的理论根据，进而从理论上论证胆囊结石形成的流体力学机制。

1 活体胆囊胆汁的流场计算

1.1 胆囊的形态学分类

为使研究结果更具代表性，首先对我院428例口服胆囊造影片进行统计分类，结果见表1，发现胆囊从形态学角度可分为椭圆形、梨形、长条形及不规则形4类。基于计算方便等因素的考虑，我们选择椭圆形胆囊做为首先研究的对象。椭圆类胆囊占总数的9.8%，其结石发生率为24%。

表1 不同类型胆囊统计情况

	有结石	无结石	合 计
梨 形	78	120	198
椭 圆 形	10	32	42
不规则形	68	68	136
长 条 形	30	22	52
总 计	186	242	428

1.2 基本方程组

我们假设：

① 胆囊为轴对称，胆汁流动为轴对称流动；

② 胆汁流动为小雷诺数流动，忽略非线性的迁移惯性力项；

③ 胆汁为不可压缩牛顿流体；

④ 胆汁的出口截面上压力相等，等于出口处的生理压力；

⑤ 胆囊边界上各点作向心均匀收缩。

以上假设在胆汁流场分布的初步计算中是必不可少的，虽有一定的近似性，但并不影响定性结果。

在推导有限元计算的算法过程中应用了下述基本关系：

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

a．运输定理

依照对流体质点系统之欧拉描述法，有：

$$\frac{df}{dt} = \frac{\alpha f}{\alpha t} + \frac{\alpha f}{\alpha xi} \cdot \frac{\alpha xi}{\alpha t} = \frac{\alpha f}{\alpha t} + u \cdot \nabla f \qquad (1)$$

式中$\frac{df}{dt}$为某给定量f之“物质导数”，物质导数可看作是当观察者附着于运动的流体质点时所见到的量f的改变率，u则为质点运动的速度。

b．以虚功原理为基础建立的粘流运动方程：

$$\int_{\Omega} \dot{\delta\varepsilon}^{T} \sigma d\Omega - \int_{\Omega} \delta u^{T} b d\Omega - \int_{\delta\Omega} \delta u^{T} t dT = 0 \qquad (2)$$

式中Ω表示流动区域，δΩ表示流动边界，δu为虚速度，$\dot{\delta\varepsilon}$为虚应变率，T表示转置向量或矩阵，b为包括惯性力在内的体积力。

C．胆汁流场分布的有限元计算方程组

从本研究基本假设出发，考虑到胆汁为不可压缩流体，由虚功原理可导出有限元计算基本方程组：

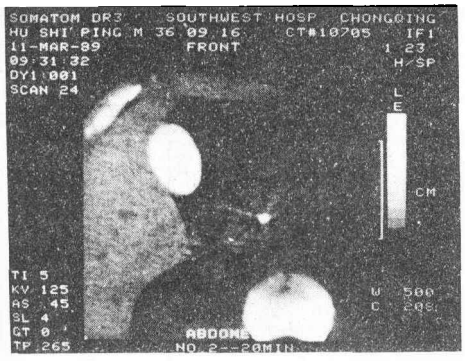
$$\int_{V} \delta\varepsilon^{T} \sigma dv - \int_{V} \delta u^{T} b dv = 0 \qquad (3)$$

式中V表示胆囊内域，δε为虚应变率，T表示转置向量或矩阵，δu为虚速度，b为包括惯性力在内的质量力，σ为应力分量向量。

1.3 边界条件的获得及其数学模型

用有限元法计算流场之关键是获得人体胆囊收缩运动的边界条件。通过B超、造影(ERCP)等手段，选出椭圆型胆囊病人，尔后进行CT扫描，从而确定椭圆形胆囊最大截面的长、短轴随时间的变化规律。

为使胆囊能清晰显影，在做CT扫描前一天口服胆囊造影剂，CT扫描时，首先从胆囊顶部扫到底部，找出胆囊的最大截面，然后让病人吃高脂餐（油煎蛋）并以此为起始时刻（t_0），每隔几分钟固定对该最大截面进行CT扫描，直至胆囊收缩结束（t_∞），从而获得胆囊最大截面在收缩过程中不同时刻的边界影象，测出不同时刻胆囊最大截面长轴A（t）、短轴B（t）的值，建立椭圆形胆囊边界的数学模型。（CT照片见图1 a、b）



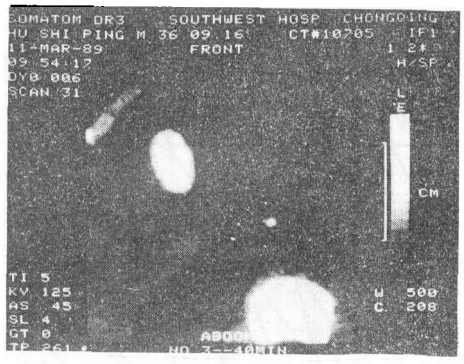


图1a、b 人体胆囊收缩过程中的CT扫描图像（口服胆囊造影剂衬托胆囊、ERCP后）

建立如图2所示的坐标系，把椭圆形胆囊近似为一个轴对称旋转椭球体。其中心轴与Z轴重合。a(t)为长半轴，b(t)为短半轴，c(t)为胆囊开口端（胆囊管）的半径。

根据CT图象，胆囊在收缩过程中a(t)、b(t)随时间的变化规律为指数规律，并且c(t)的变化规律与b(t)相似。

$$\begin{aligned} a(t) &= (a_0 - a_\infty)e^{-kt} + a_\infty \\ b(t) &= (b_0 - b_\infty)e^{-kt} + b_\infty \end{aligned} \qquad (4)$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

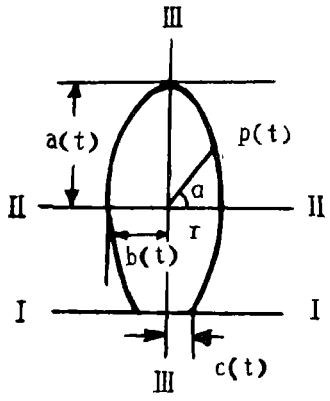


图2　胆囊模型及其流场特征截面(线)

其中 a_0、b_0 为开始收缩时长半轴和短半轴的值，a_∞、b_∞ 则分别为胆囊收缩结束后测得的长半轴及短半轴的值。下面表2为一次实验中，不同时刻测得的长轴〔A(t)=2a(t)〕及短轴〔B(t)=2b(t)〕值。

根据表2的数据得到实验胆囊边界的数学模拟：

表2　收缩过程中1个活体椭圆胆囊之长轴、短轴值（CT测量结果）

Δt(min)	0	3.43	6.33	9.70	24.78	36.40	41.77
At(cm)	3.7	3.5	3.3	3.3	3.1	3.1	3.0
Bt(cm)	2.8	2.7	2.5	2.4	2.5	2.3	2.2

$$\begin{cases} a(t) = (0.35e^{-0.08t} + 1.5) \times 0.01 \\ b(t) = (0.3e^{-0.08t} + 1.1) \times 0.01 \\ c(t) = 0.03(0.3e^{-0.08t} + 1.1)/1.4 \end{cases} \quad (5)$$

式中a(t)、b(t)、c(t)的单位是米，t是分。

1·4　流场计算

为进行有限元的计算机计算，必须对现实胆囊进行区域剖分，考虑其对称性，只需对半个椭圆区域进行计算。把这半个椭圆区域分成145个三角形单元（如图3所示，仅画出四分之一的胆囊剖面作为示意图）。然后根据有限元算法，用Fortran77语言编制计算流场程序。

2．结　果

共计算出20个不同时刻的各内部节点处的流速值及各单元内的流场旋度值。仅选择如图1所示的3个特征截面（Ⅰ—Ⅰ，Ⅱ—Ⅱ，Ⅲ—Ⅲ截面）给出计算结果。其中Ⅰ—Ⅰ为胆汁的出口截面，为对整个胆汁流场随时间的衰减过程有更直观的了解，给出Ⅲ—Ⅲ轴线上54节点处的速度随时间的衰减曲线（图4）。

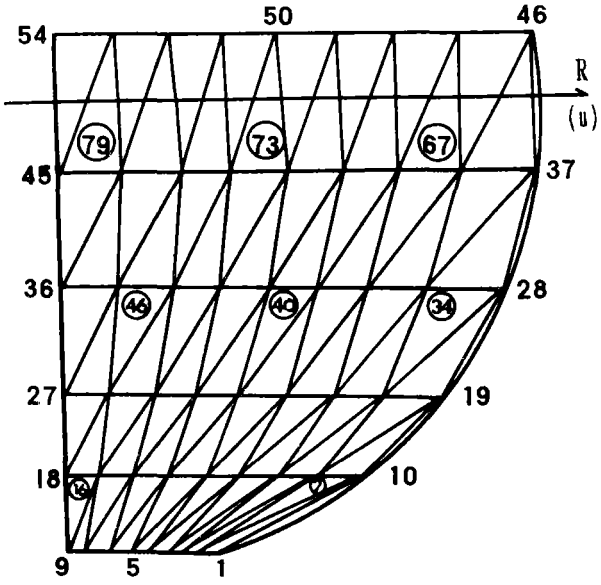


图3　椭圆型轴对称胆囊区域的有限元剖分
Ⅰ—Ⅰ截面、Ⅱ—Ⅱ截面、Ⅲ—Ⅲ截面中心结点（54结点）

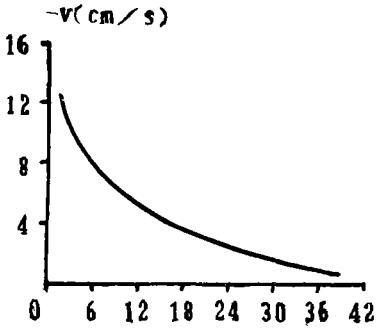


图4　节点54处纵向速度随时间的衰减曲线

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

3 讨　论

3.1 人体椭圆型胆囊内胆汁的流场分析

为使计算结果更具说服力，在不同时间内对不同病人（胆囊类型相同）进行实验研究，发现计算所得的结论是一致的。与实际非常接近，分析计算结果发现：在收缩胆囊的轴线附近存在着一股快速出流，流速分布为中心部分最快，向两侧部分逐步减慢（见图5），在中心截面（Ⅱ—Ⅱ截面）附近这股出流的流速远远高于离轴线较远部分的流速（见图6）；在

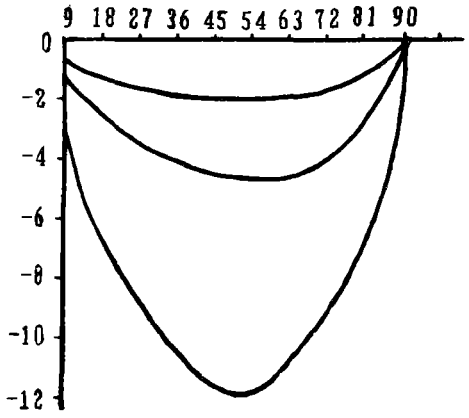


图5　不同时刻Ⅰ—Ⅰ轴线上之纵向速度分布
不同时刻节点54处的纵向速度值

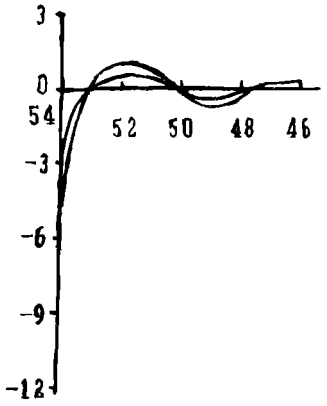


图6　不同时刻Ⅰ—Ⅰ截面上纵向速度分布
t = 2min时Ⅰ—Ⅰ截面上、下侧的旋度值

出口截面上，紧靠这股出流还存在着一片回流区域，其回流最高速度与同一截面上的出流最高速度在量级上是相同的（见图7）。因而，作者认为，无论在中心截面附近还是在出口截面附近，正是由于轴线附近的快速出流与相邻的胆汁液回流区域构成了靠近轴线的正方向（逆时针方向）的涡流区；而回流区域与靠近胆囊壁的出流区域构成了靠近胆囊壁负方向（顺时针方向）的涡流区（图6，7），相比之下，靠近胆囊轴线附近的旋涡区强度高于靠近胆囊壁附近区域的旋涡区强度（图8，9）。胆汁的流动速度衰减曲线和胆囊边界收缩规

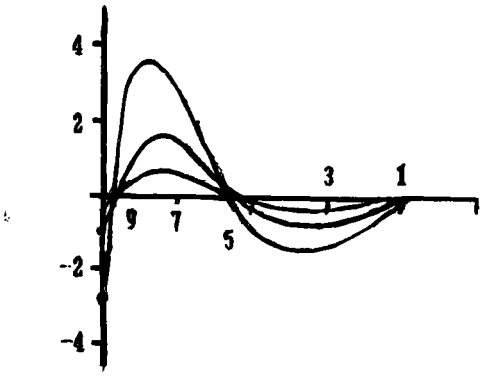


图7　不同时刻Ⅰ—Ⅰ截面上之纵向速度分布
不同刻Ⅰ—Ⅰ截面上之纵向速度

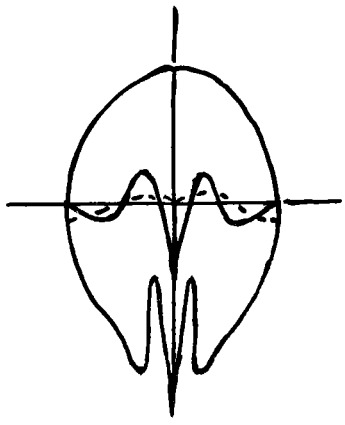


图8　Ⅰ—Ⅰ截面及Ⅱ—Ⅱ截面上之速度分布（示意图）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

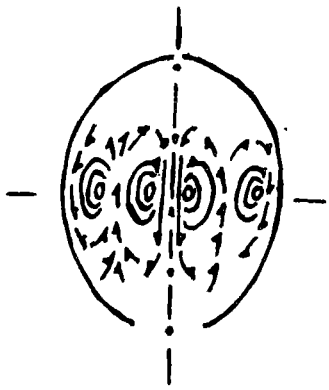


图 9 Ⅱ—Ⅱ截面附近的胆汁涡流（示意图）

律相同，也是按指数曲线衰减（图 4）。并且胆囊内不只存在一个涡流区，这也说明了为什么有的胆囊内不只一个结石的原因。

3.2 胆囊结石的成因及其流体力学机制

胆结石从其构成成分上看大致有两类，一是胆固醇性结石，另一类是胆红素钙性结石。过去的研究表明：胆固醇性结石的病理成石胆汁是由于代谢障碍引起的；而胆红素钙结石的病理成石胆汁是由于感染造成的。然而光有病理成石胆汁还不足以形成胆石。比如我们取出病理成石胆汁放入一固定容器中，经过一段时间的沉淀它最多能形成一些很细微的沉淀物，而不会形成结石，它还必须有一定的力学条件。当代谢障碍时，胆囊内就形成了病理成石胆汁，这些成石胆汁中的胆结石的基本组成体—胆固醇晶体，随着流出的胆汁一起在出口截面附近，碰上由胆囊出口截面流入胆囊的胆汁回流。在回流的作用下，又流回胆囊内。胆汁出流和回流相互作用的结果，使一部分成石胆汁在胆囊内形成涡流。涡流运动的结果，使胆固醇晶体、胆红素、粘蛋白及胆盐等有机会获得能量而结合，从而形成小的胆囊结石。而活体胆囊的收缩运动是阵发性不断进行的只要代谢障碍的因素没有消除，上述过程就会反复延续下去。此间，有些小结石随着一部分胆汁流入胆道而被排出，另一些小结石则会被胆汁回流带回胆囊内。回到胆囊内的小结石及胆汁中的胆固醇结晶等又在旋涡运动的作用下会向旋涡中心聚集。从而使原来聚集在旋涡中的小结石与新的胆固醇晶体及胆红素、粘蛋白、胆盐等形成新的更大的胆结石。另外，由于胆囊形态不同，力学条件各异，因而会有很多的出流与回流，这些回流的强度不同，其相互作用的结果，就会在胆囊内产生强度不同数目不等的涡流。因此小结石之间及结石各组成体之间相结合的能量和机会不等。所以，在有的胆囊内不只存在一个结石，并且结石的大小也不相同。

参 考 文 献

1. 夏穗生，等。论胆囊胆固醇结石形成的流体力学因素。实验外科杂志 1984；2(3)：56
2. 于昌松，等。流体力学因素影响胆囊结石形成的探讨—胆汁射流在胆囊内形成的旋涡运动。武汉医学院学报 1983；12(4)：313～316

（收稿：1989.06.29； 修回：1989.12.28）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

Kinetic Pattern and Bile Flow Analysis in Vivo Gallbladder

Xie Gang, et al. (Department of Radiology, Southwest Hospital. Third Military Medical College)

Zeng Xianjun, et al. (Bioengineering Center, Chongping University)

A mathematical model of the moving boundary of the oval gallbladder is obtained in application of computer tomography, x-ray contrast radiography and ultrasound wave B techniques based on the theory of fluid mechanics. For the first time in this field adopting finite element method to calculate the transient flow field of bile in gallbladder in vivo, succeeding to bring out the distribution of the bile flow field in the gallbladder known as a Newtonian fluid and axisymmetric flow. This is a pioneering step in the research of the flow field of bile in gallbladder. Basing on this thesis the formation of bile stones in the gallbladder is confirmed. The results of this study are: a fast out-flow of bile near the axis of the contracting gallbladder exists; 2 vortex areas exist near the cental cross section of the flow field with different rotational directions, the one near the axis in counterwise flows faster; attenuation law of velocity of the bile flow is similar to the gallbladder contraction; formation of gallstones in the gallbladder is related to the vortex in the flow field.

Key words: cholecystography; gallbladder/PH; cholelithiasis; bile ducts/PH; bile/PH

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n