

食道三维重建及其运输能力影响因素的研究

刘泉¹, 钱善华^{1,2}, 黄建锋³, 倪自丰¹, 俞经虎¹

1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学附属医院肿瘤放疗科, 江苏 无锡 214062

【摘要】为深入研究食道两端压力差、流体食物的物化参数及食道蠕动波幅值等参数对流体食物在食道内运输的影响,本研究基于食道的CT图像,构建食道的三维模型及其COMSOL仿真模型,通过流变仪研究不同配比非牛顿流体的粘度与剪切率变化关系获取COMSOL的仿真参数。结果表明,流体速度在食道壁蠕动波相对稳定阶段受食道两端压力差的影响极小,在食道壁收缩和恢复初始状态阶段影响较大,且食道运输流量随食道两端压力差线性增加;食道流体运输流量分别与蠕动收缩波幅和流体粘度呈正相关和负相关。为提升食道运输效率,可在低压力差区域增大蠕动波幅,高压差区域降低流体食物的粘度。本研究为功能食物开发及其食道运输特性研究提供理论参考。

【关键词】食道;三维重建;流体食物;压力差;非牛顿流体

【中图分类号】R314;Q811

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)04-0485-06

Three-dimensional reconstruction of the esophagus and investigation on factors affecting the peristaltic transport

LIU Quan¹, QIAN Shanhua^{1,2}, HUANG Jianfeng³, NI Zifeng¹, YU Jinghu¹

1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China; 3. Department of Radiation Oncology, Affiliated Hospital of Jiangnan University, Wuxi 214062, China

Abstract: A three-dimensional model of the esophagus and its COMSOL simulation model are constructed based on the CT image of the esophagus for investigating the effects of the pressure differences between two ends of the esophagus, the physical and chemical parameters of fluid food and the amplitude of esophageal peristalsis on the transport of fluid food in the esophagus. The relationship between the viscosities of the different ratios of non-Newtonian fluids and shear rates are studied by rheometer, thereby obtaining the simulation parameters of COMSOL. The results show that the pressure difference between the two ends of the esophagus has trivial effects on the fluid velocity during the relatively stable phase of the peristaltic wave of the esophageal wall, but it has great effects on the fluid velocity during the contraction and recovery phases of the esophageal wall. The esophageal transport flow increases linearly with the pressure difference between the two ends of the esophagus. The esophageal fluid transport flow has a positive correlation with the amplitude of peristaltic contraction and a negative correlation with fluid viscosity. To improve the esophageal transport efficiency, the peristaltic amplitude should be increased in the area with low pressure difference, and the viscosity of fluid food should be reduced in the area with high pressure difference. The study provides theoretical reference for the development of functional food and the studies on esophageal transport characteristics.

Keywords: esophagus; three-dimensional reconstruction; fluid food; pressure difference; non-Newtonian fluid

前言

【收稿日期】2019-11-22

【基金项目】国家自然科学基金(51775244);中国博士后科学基金(2018T110439);江苏省自然科学基金(BK20161134)

【作者简介】刘泉,硕士研究生,研究方向:仿生机械设计, E-mail: 2865064104@qq.com

【通信作者】钱善华,博士,副教授,研究方向:仿生机械设计及摩擦学, E-mail: qianjnw@126.com

吞咽困难是消化道疾病和神经肌肉疾病的常见并发症,会致使患者不能安全有效地开展食物在食道内蠕动输送,易造成窒息、咳嗽和营养不良等症状。针对患者的吞咽困难程度,通过改善食物的材质特性,施以相对安全的食物,是解决吞咽困难患者饮食的重要辅助手段。鉴于人体吞咽系统结构的复杂性,尤其是食道壁环状肌肉层的蠕动收缩,难以获取吞咽时食物流动等相关数据,阻碍食物材质对吞咽过程影响的研究

以及功能食物的开发^[1-4]。目前,国内外学者针对食道中流体流速、蠕动效应和压力等问题开展一系列卓有成效的研究,如国外学者初步推导出周期时间段内平均流量、压力差、壁面摩擦力等变量与管壁条件、流体粘度等其他相关量的关系,评估流体在整个食道上蠕动特性,但这些研究的应用范围具有局限性,仅对水或物理特性类似的饮品适用^[5-7]。在高质量食物迅速发展的当下,吞咽困难患者和食道运输能力衰弱老年人的功能食物开发,食物材质对食道蠕动运输过程影响的研究以及功能食物的开发是当前的研究热点^[8-9]。因此,深入了解食道蠕动运输流体的流动行为,揭示体内食道蠕动工况下流体食物运输关键因素的研究显得尤为重要。当前,虽然韩敬虎^[10]采用COMSOL软件建立食物的运输模型,在给定的粘度函数研究流体食物的运输特性,但没有系统地研究流体食物的物化参数(如粘度、密度等)、食道蠕动压力幅值、食道两端压力差等参数对其运输特性的影响。此外,鉴于难以获得直观的食道三维结构,无法准确对食道开展深入的仿真研究^[11-12]。因此,本研究基于食道的CT图像,构建食道的三维模型及其COMSOL仿真模型,通过流变仪测试不同配比非牛顿流体的粘度与剪切率变化关系,以获取COMSOL的仿真参数,深入开展非牛顿流体在食道内的流动状态仿真研究,揭示体内食道蠕动工况下流体食物运输的关键因素,为功能食物开发和食道运输特性研究提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 食道的三维模型

基于江南大学附属医院提供的正常人食道CT图片,其CT扫描为下颚到颈部末端和颈部末端到胃底这两部分,再通过ImageJ软件构建两段食道三维模型(图1)。首先,对CT图像进行阈值切割,得到轮廓明显的截面图,选取食道轮廓,删除选中区域以外的像素,留下食道轮廓和其内的像素,最终获得食道轮廓。在ImageJ中设置比例尺,读取33张CT图像中食道内径轮廓的截面面积,获取的食道内径截面平均面积约为329.12 mm²。对每张CT图像进行食道轮廓提取处理,再进行模糊、锐化、提取边界显示食道壁厚处理,并将其按顺序堆叠成食道的三维模型(图2)。可以看出天然食道是由颈段食道和胸腹段食道组成,是一条结构复杂的弯曲软体管道,但为了COMSOL建模的准确性和收敛性,需在此基础上对天然食道进行合理的简化。

1.2 COMSOL 模型及分析

鉴于人体结构的复杂性,难以测量相关数据,而生

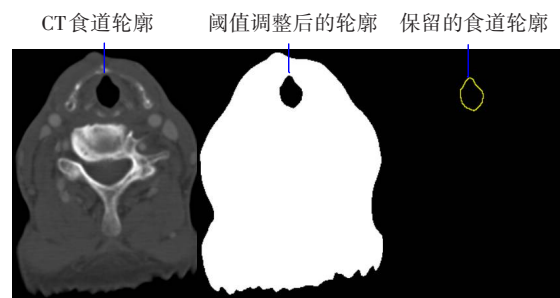


图1 CT图像处理过程

Fig.1 CT image processing

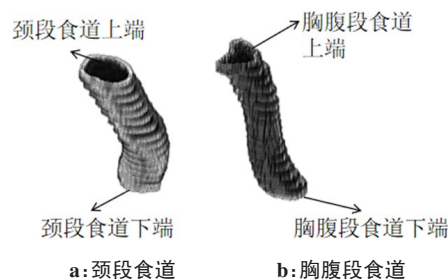


图2 天然食道的三维模型

Fig.2 Three-dimensional models of natural esophagus

物仿真方法能够较好地开展天然生物材料变形特性的模拟^[13]。通常情况下,食道运输食物的过程可以看成是有限长管道对非牛顿流体的蠕动输送^[14],而流体在管道内运输被示为典型的流固耦合模型^[15],而COMSOL仿真中的流固耦合模块能较好地模拟食道运输过程。根据正常食道的三维结构及图1所算出的食道平均截面面积,获得正常食道的内径和壁厚分别约为20和2 mm^[16],成人食道长约20~25 cm^[17],三维重建的食道颈段食道和胸腹段食道分别约为10和11 cm,在食道运输影响因素(压力差、蠕动波幅、流体食物粘度)研究过程中避免加入食道长度因素,因此两段的模拟食道长度均取10 cm。同时,食管的组织结构食管壁分黏膜、黏膜下层、肌层和外膜这4层,其主要厚度是由环行内层和纵行外层的肌层组成。为有效地模拟肌肉的蠕动收缩,赋予食道壁肌肉的材料属性,密度1 090 kg/m³,杨氏模量2×10⁹ Pa,泊松比0.3。

整个食道的蠕动可以看成食道管壁沿着管道做周期性正弦波运动,而食道壁上的任一质点,可以看成在食道轴向上以行波的形式运动^[18-19]。为了模拟食道的蠕动运输,采用f1c2hs平滑函数提高模型的收敛性和计算准确性,用高斯分布函数模拟食道的蠕动波形,在食道外壁设置位移解析式为:

$$-a \cdot \text{f1c2hs}(t_{\text{off}}/m - t, 1) \cdot \text{f1c2hs}(t - t_{\text{on}}/m, 1) \cdot \exp(-(z - (z_0 + v_0 \cdot t \cdot m)/\text{width})^2/2) \quad (1)$$

其中, a 为环状肌肉蠕动波幅度的指定位移; t 为时间; z 为 z 轴方向的坐标。参数设置见表1^[19-20]。

表1 食物输送的运动参数
Tab.1 Motion parameters during food transport in the esophagus

名称	数值	备注
t_{on}	0.3[s]	食道环状肌肉开始收缩时间
t_{off}	1.2[s]	食道环状肌肉收缩结束时间
v_0	0.03[m/s]	食道蠕动波移动速度
width	0.01[m]	高斯分布函数宽度
m	0.02[s]	位移达到最大时间
T	1.5[s]	一次蠕动波循环时间

为了探究压力差对食物运输的影响,在食道的出入口设置不同的压力差。由于食道内平均压力为 30 mmHg,而胃内平均压力为 20 mmHg(1 mmHg=133 Pa),大气压为 101 325 Pa,则食道与大气压的压力差(即食道颈段的压力差)和食道与胃内的压力差(即胸腹段的压力差)分别为 97 340 和 1 330 Pa。选择食道上端为入口,入口处压力设置为 P ,出口压力设置为 0。探讨流体食物材质对食道运输的影响,流体属性选择非牛顿流体 Carreau 模型,其粘度 η 和密度 ρ 根据玉米糊流体所测试结果确定。通过修改解析式参数 a 探讨蠕动波幅对食道运输的影响。

1.3 流变性能

吞咽困难患者和老年人多以流体食物为主,如玉米糊、芝麻糊粥等非牛顿流体,而非牛顿流体粘度会对食道吞咽运输产生影响^[21],且 COMSOL 仿真时管道内部流体属性与非牛顿流体的密度、粘度系数及其参数密切相关。为了获取准确的相关数据,本研究选择某品牌的玉米粉配制非牛顿流体,按水和玉米粉的质量比分别 2.0:1.0、2.5:1.0、3.0:1.0、3.5:1.0、4.0:1.0 配制成玉米糊,对应的玉米粉质量分数分别为 0.330、0.286、0.250、0.222、0.200 wt%;此外,将不同配比的玉米糊倒入 10 mL 量筒内测试其体积,根据体积与质量获得其密度分别为 1 071、1 060、1 046、1 025、1 010 kg/m³。为研究不同质量分数玉米糊的流变性能,探索其剪切率与粘度的变化关系,采用 DHR-2 多功能流变仪对不同质量分数玉米糊进行流变性能测试,测试温度为 37 ℃,模拟人体食道内温度;剪切率为 0.01~1 000 s⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 玉米糊的流变性能

图 3 为不同质量分数玉米糊的粘度随剪切率的变化关系以及不同质量分数玉米糊的拟合曲线。可以看出,玉米糊粘度随着剪切速率增加经历了先急

剧后平缓减小的变化过程;同时粘度与玉米糊的质量分数呈正相关,较大质量分数的玉米糊产生较高的粘度。COMSOL 中非牛顿流体 Carreau 模型粘度与剪切率的关系方程为:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \tag{2}$$

其中, μ_{∞} 为无限大剪切速率粘度; μ_0 为零剪切速率粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; λ 为弛豫时间; n 为幂指数。在 Oringin 中设置相应拟合方程(2),不同质量分数所获得的参数零剪切速率粘度分别为 366、316、266、162 和 137 Pa·s。

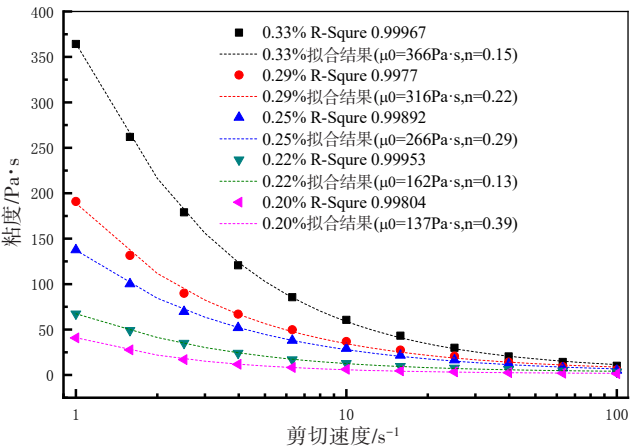


图3 玉米糊粘度随剪切率变化的实验结果和拟合结果
Fig.3 Experimental results and fitting results of the viscosity of corn paste varying with shear rate

2.2 食道运输过程的影响因素

从食道输运食物的过程来看,其流动性能将通过流速、压力和流量总和等参数描述^[22];为了准确对比压力差对食道蠕动运输的影响,COMSOL 仿真模型中的累积流量定义为食道运输流量 Q ,然后将对压力差、蠕动波幅值和粘度等参数进行研究。

2.2.1 压力差对食道运输过程的影响 先模拟成年人颈段食道的运输状况,分别设置模型出入口压力差为 97 340 Pa(模拟颈段食道压力差)和 1 330 Pa(模拟胸腹段食道压力差),蠕动波幅 8 mm,玉米糊非牛顿流体粘度参数 366 Pa·s,图 4 为两种压力差下食道内流体流动和应力图,图 4a 是压力差为 97 340 Pa 时食道内流体流动和应力图,发现流体在食道运输中经历了食道壁收缩、蠕动波相对稳定和食道壁恢复的阶段。当时间为 0.30 s 时,管壁处于收缩阶段,管壁收缩处的流速最小,管壁收缩处下部分区域流体流速最大,为 0.18 m/s;当时间为 0.68 s 时,管壁蠕动波处于稳定向下移动阶段,此时流体流速分布均匀;当时间为 1.24 s 时,管壁处于恢复阶段,管壁收缩处上

部分区域流体流速最大,与密斯拉等^[20]计算结果类似。图4b是压力差为1 330 Pa时食道内流体流动和应力图。对比压力差为97 340 Pa时的流体流动状态,当时间为0.30 s时,靠近管壁收缩处上部分区域流体流速最大;当时间为0.68 s时,流体流速分布均匀,与

压力差为97 340 Pa时的流速分布差异极小;当时间为1.24 s时,靠近管壁收缩处下部分的区域流体流速最大。因此在食道壁蠕动波相对稳定阶段,流体速度受食道两端压力差的影响较小;在食道壁收缩和恢复阶段,流体速度受食道两端压力差的影响较大。

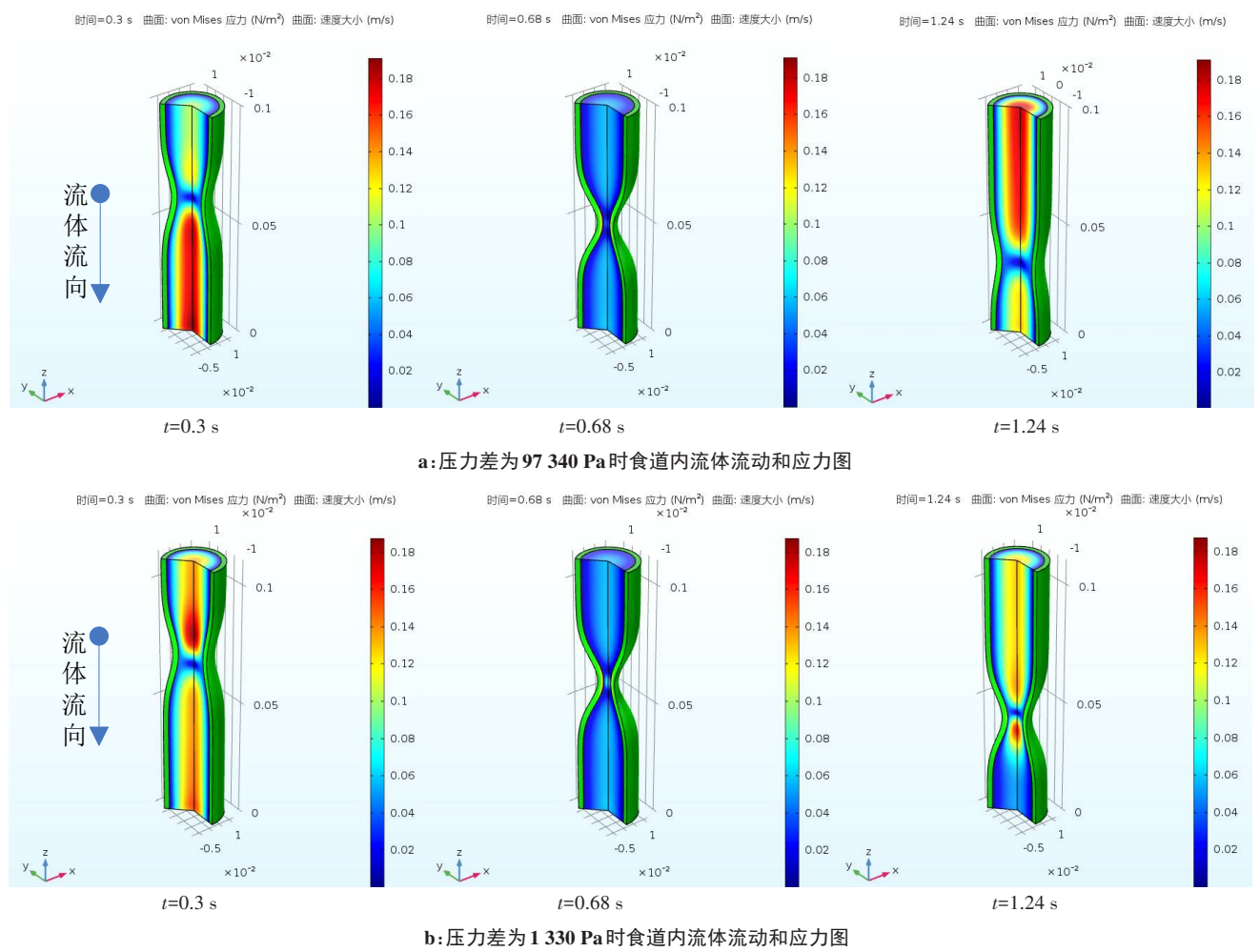


图4 不同压力差下食道内流体流动和应力图
Fig.4 Fluid flow and stress map in the esophagus under different pressure differences

为进一步探讨压力差与食道运输流量的关系,同种条件下设置压力差为3 990、9 310、18 620、58 630 Pa,食道运输流量随食道两端压力差 P 的变化关系如图5所示,食道两端压力差与食道运输流量呈线性正相关,图中 Q 表示食道运输流量。当压力差为97 340和1 330 Pa时,食道运输流量分别为 $(1.27\times10^{-5})\text{ m}^3$ 和 $(6.43\times10^{-6})\text{ m}^3$,前者运输量近似为后者的2倍。

2.2.2 蠕动波幅值对食道运输过程的影响 食道收缩能力对食道运输能力有较大的影响,设置正常成年人食道收缩波幅约为8 mm,食道异常的蠕动收缩波幅分别为7、6和5 mm。在COMSOL的食道仿真模型中,在指定位移中根据环状肌肉收缩能力设置不同的

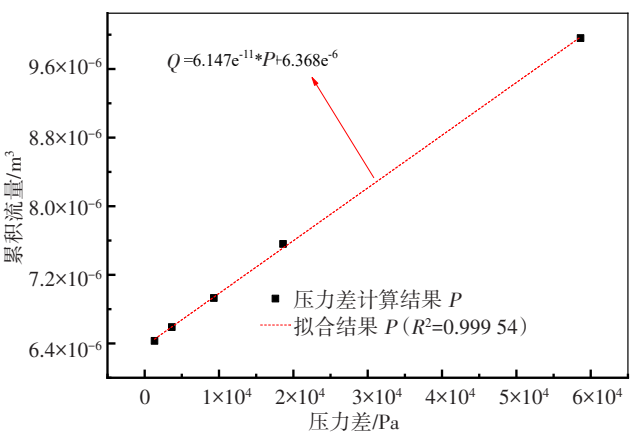


图5 运输流量随压力差的变化关系
Fig.5 Variation of transport flow with pressure difference

位移参数,模拟食道的蠕动收缩波幅。图6为两种压力差和不同食道蠕动波幅下累积流量随时间的变化关系。当压力差为97 340 Pa时,累积流量随蠕动幅度的减少呈正相关,但差异较小;当压力差为1 330 Pa时,累积流量也随蠕动幅度减小而减小,但不同食道蠕动波幅下流量变化趋势的差异较为显著,蠕动波幅8 mm的食道运输量近似为蠕动波幅5 mm的两倍。因此,蠕动波幅对食道运输流量影响与压力差有关,即在食道低压力差的区域影响较为显著,而压力差97 340 Pa时食道蠕动波幅的增大对食道运输流量的影响较小。

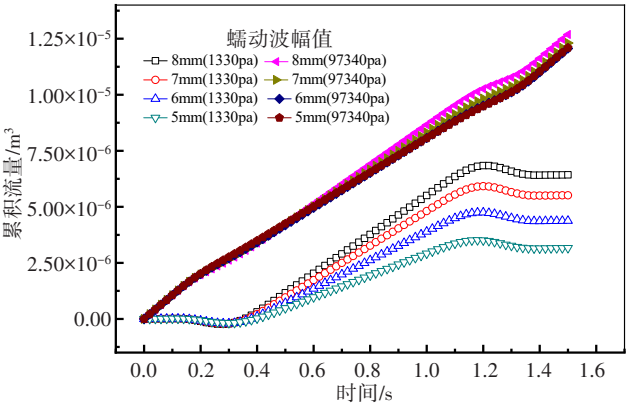


图6 不同压力差和不同波幅下累积流量随时间的变化
Fig.6 Time-dependent variations of accumulate flow under different pressure differences and different amplitudes

2.2.3 食物粘度对食道运输过程的影响 图7为两种压力差和不同粘度流体食物的流量随时间变化关系。可以看出,在食道压力差较大的区域,累积流量随着流体粘度的增加呈负相关,且不同流体粘度下累积流量变化趋势的差异较大。当压力差为1 330 Pa时,流体粘度的降低对运输流量的影响极低。因此,在食道低压的区域,流体粘度变化对食道运输流量的影响较小,而在食道压力差较大区域,减少食物粘度能有效提升食道的运输效率,这对老年人或吞咽障碍的功能食品开发具有一定的参考价值。

3 结论

非牛顿流体的粘度与玉米糊的质量分数呈正相关,但随剪切速率增加而降低。流体在食道运输中经历了食道壁收缩、蠕动波相对稳定和食道壁恢复的阶段,即在食道壁蠕动波相对稳定阶段,流体速度受食道两端压力差的影响极小;而在食道壁收缩和恢复初始状态阶段,流体速度受食道两端压力差的影响较大,且食道运输流量随食道两端压力差线性增加。食道运输流量与蠕动收缩波幅呈正相关,与

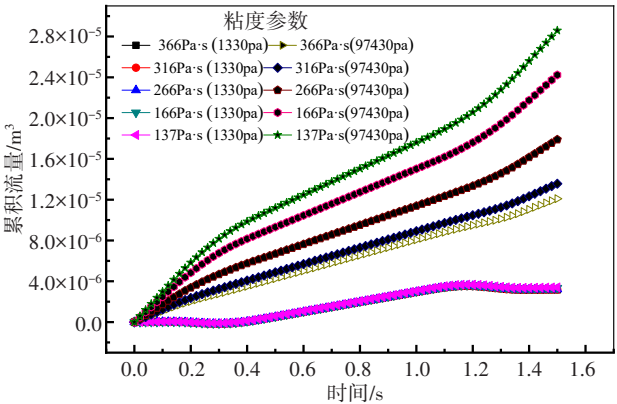


图7 不同压力差和不同粘度下累积流量随时间的变化
Fig.7 Time-dependent variations of accumulate flow under pressure differences different viscosities

流体粘度呈负相关;在低压力差的区域,通过增大蠕动波幅来提升食道运输效率的效果更显著,而在高压力差的区域,改变食物粘度能更好地提升食道运输效率。

【参考文献】

[1] JACK F R, GIBBON F. Electropalatography in the study of tongue movement during eating and swallowing (a novel procedure for measuring texture-related behaviour)[J]. Int J Food Sci Tech, 2010, 30(4): 415-423.

[2] 陈艳秋, 谢华, 陈敏, 等. 膳食质地改变在老年吞咽功能障碍患者中的应用[J]. 中国老年学杂志, 2017, 37(21): 198-200.

CHEN Y Q, XIE H, CHEN M, et al. Application of dietary texture changes in elderly patients with swallowing dysfunction[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2017, 37(21): 198-200.

[3] 吴邦富, 幸红林, 董绪燕, 等. 调节胃肠道功能食物及其功效成分研究进展[J]. 中国食物与营养, 2018, 24(1): 64-68.

WU B F, XING H L, DONG X Y, et al. Research advancemets of regulating gastrointestinal functional foods and functional components [J]. Chinese Food and Nutrition, 2018, 24(1): 64-68.

[4] MIJAILOVICH S M, STOJANOVIC B, KOJIC M, et al. Derivation of a finite-element model of lingual deformation during swallowing from the mechanics of mesoscale myofiber tracts obtained by MRI[J]. J Appl Physiol, 2010, 109(5): 1500-1514.

[5] 王长彬, 陆柳, 柳兆荣. 食管蠕动特性的分析[J]. 医用生物力学, 1996, 11(4): 237-243.

WANG C B, LU L, LIU Z R. An analysis of peristaltic transport in esophagus[J]. Journal of Applied Biomechanics, 1996, 11(4): 237-243.

[6] NICOSIA M A. Theoretical estimation of shear rate during the oral phase of swallowing: effect of partial slip[J]. J Texture Stud, 2013, 44(2): 132-139.

[7] MISRA J C, PANDEY S K. Peristaltic flow of a multilayered power-law fluid through a cylindrical tube[J]. Int J Eng Sci, 2001, 39(4): 387-402.

[8] 陈建设, 吕治宏. 老年饮食障碍与老年食品:食品工业的挑战与机遇[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 310-315.

CHEN J S, LÜ Z H. Eating disorders of elderly: challenges and opportunities of food industry [J]. Food Science, 2015, 36(21): 310-315.

[9] 许爱清, 李宗军, 王远亮, 等. 肠道健康导向的功能食品研究进展[J].

- 食品与机械, 2010, 26(5): 158-163.
- XU A Q, LI Z J, WANG Y L, et al. Progress in the researches on gut-health-oriented functional foods[J]. Food and Machinery, 2010, 26(5): 158-163.
- [10] 韩敬虎. 咀嚼吞咽一体化仿生机器人研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- HAN J H. Research on integrated bionic robot for chewing and swallowing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [11] 王洪, 洪浪, 赖珩莉, 等. 食道三维重建, 食道吞钡在心房颤动消融术中的应用[J]. 实用临床医学, 2009, 10(2): 30-31.
- WANG H, HONG L, LAI H L, et al. Application of three-dimensional reconstruction of esophagus and esophageal swallowing in atrial fibrillation ablation[J]. Practical Clinical Medicine, 2009, 10(2): 30-31.
- [12] 贺长斌, 茹小莉, 张进. 螺旋CT在食源性食管异物诊断中的临床价值[J]. 中国医学物理学杂志, 2011, 28(6): 3017-3020.
- HE C B, RU X L, ZHANG J. Spiral CT in the diagnosis of food-borne esophageal foreign body clinical value[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2011, 28(6): 3017-3020.
- [13] 杨晓钧, 王俊涵, 李兵. 含球关节间隙的RSSR机构动力学建模与仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7): 73-79.
- YANG X J, WANG J H, LI B. Dynamics modeling and simulation of RSSR spatial mechanism with spherical clearance joint[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(7): 73-79.
- [14] YANG W, FUNG T C, CHIAN K S, et al. Finite element simulation of food transport through the esophageal body [J]. World J Gastroenterol, 2007, 13(9): 1352-1359.
- [15] CHEN F J, DIRVEN S, XU W L, et al. Review of the swallowing system and process for a biologically mimicking swallowing robot[J]. Mechatronics, 2012, 22(5): 556-567.
- [16] 巩合义, 侯栋梁, 黄伟, 等. 成人正常食管壁厚度的CT测量[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2010, 19(2): 114-115.
- GONG H Y, HOU D L, HUANG W, et al. CT measurement of normal esophageal wall thickness in adults[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2010, 19(2): 114-115.
- [17] 陈飞蛟, 李小宁, XU P. 气驱动仿食道蠕动软驱动器的结构设计与实验研究[J]. 液压与气动, 2015, 25(7): 116-119.
- CHEN F J, LI X N, XU P. Structure design and experimental study for a novel pneumatic-driven soft-bodied actuator mimicking esophageal peristalsis [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 25(7): 116-119.
- [18] TRIPATHI D. A mathematical model for the movement of food bolus of varying viscosities through the esophagus[J]. Acta Astronaut, 2011, 69(7): 429-439.
- [19] SK·潘迪, D·特里帕蒂. Maxwell流体在有限长管道中作不稳定的蠕动传输: 食道吞咽进程分析[J]. 应用数学和力学, 2012, 33(1): 14-23.
- PANDEY S K, TRIPATHI D. Unsteady peristaltic transport of Maxwell fluid through a finite length tube: application to oesophageal swallowing[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 33(1): 14-23.
- [20] JC·密斯拉, S·麦蒂. 流变学流体的蠕动传输: 食道中食物块的运动模型[J]. 应用数学和力学, 2012, 33(3): 303-319.
- MISRA S J, MAITI S. Peristaltic transport of a rheological fluid: model for movement of food bolus through esophagus[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 33(3): 303-319.
- [21] MENG Y, RAO M A, DATTA A K. Computer simulation of the pharyngeal bolus transport of Newtonian and non-Newtonian fluids [J]. Food Bioprod Process, 2005, 83(4): 297-305.
- [22] T·哈亚特, M·贾佛德. 不对称柔性壁管道内幂律流体蠕动传输的精确解[J]. 应用数学和力学, 2010, 31(10): 1172-1180.
- HAYAT T, JAVED M. Exact solution for peristaltic transport of power-law fluid in an asymmetric channel with compliant walls[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(10): 1172-1180.

(编辑: 谭斯允)