

肠道内表面形貌对其摩擦性能影响的研究

王 泽^{1*}, 周 明², 苏冬梅¹, 李秀莲¹, 窦 琳¹, 叶 霞¹, 蒋琴仙¹

(1. 江苏理工学院 材料工程学院, 江苏 常州 213001;

2. 清华大学 国家重点摩擦实验室, 北京 100084)

摘要: 为了调查肠道内表面形貌对其摩擦性能的影响, 本文以家兔小肠为研究对象, 表征了其内表面形貌, 测试了肠黏液的润滑性; 在排除肠道正压力条件下, 测试环向应变、载荷、滑动速度与摩擦系数的变化关系. 实验结果表明: 小肠内表面存在着皱襞、绒毛、微绒毛; 肠黏液可将摩擦系数降低到 10^{-2} 数量级; 环向应变 10% 是摩擦系数变化的临界值, 小于 10% 摩擦系数不受载荷和滑动速度的影响, 大于 10% 摩擦系数随载荷和滑动速度增大而增大. 通过分析环向应变、内表面形貌、肠黏液、载荷、滑动速度与摩擦系数之间的关系, 得出摩擦系数变化的机理: 当环向应变小于 10%, 润滑形式为液体润滑; 当径向应变大于 10%, 皱襞被拉伸褶皱消失, 润滑形式转化为混合润滑. 小肠摩擦性能的研究对胶囊内窥镜、肠道机器人外观设计提供了实验数据, 对推进微创、无创诊疗有着重大意义.

关键词: 小肠; 摩擦性能; 环向应变; 皱襞; 边界润滑

中图分类号: TH117.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2014)02-0193-05

Experimental Study Concerning the Effects of Profile Morphology of Intestine on the Frictional Characteristics

WANG Ze^{1*}, ZHOU Ming², SU Dong - mei¹, LI Xiu - lian¹, DOU Lin¹, YE Xia¹, JIANG Qin - xian¹

(1. School of Material Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China

2. The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This work is supposed to determine how intestine morphology influence the intestine friction. Rabbit duodenum was acted as the research object. We characterized inner structure of small intestine, tested the mucus lubricity and measured the change relationships between radial strain, load, sliding velocity and friction coefficient in condition of removing the normal pressure. The results show that inner surface of small intestine mainly included plicas, villi and microvilli. The mucus can reduce the friction coefficient to 10^{-2} magnitude. Hoop strain 10% was the critical point of friction coefficient shifting. That is to say, when hoop strain was less than 10%, load and sliding velocity had no influence on the friction coefficient, but while hoop strain was more than 10%, the friction coefficient increased as load and sliding velocity increased. At last, we analyzed the relationships between the friction coefficient and radial strain, inner morphology, mucus, load and sliding velocity, thus friction mechanism was concluded. When the hoop strain was less than 10%, plicas were bended to form wrinkles which were capable to store mucus, the lubrication regime was liquid

Received 21 January 2013, revised 22 April 2013, accepted 24 May 2013, available online 28 November 2013.

* Corresponding author. E - mail: wangzexj@163.com, Tel: +86 - 51986953280.

The project was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program, 2011CB013004), the National Natural Science Foundation (11102075), the Natural Science Foundation in Jiangsu province (BK2012585), the Natural Science Research in Colleges and Universities in Jiangsu Province (13KJD430002), the Basis and Applied Basic Research Project of Jiangsu Institute of Technology (KYY12019) and Dr. Start - up Fund (KYY12010).

中国国家基础研究项目 973 项目(2011CB013004)、国家自然科学基金(11102075)、江苏省自然科学基金(BK2012585)、江苏省高校自然科学研究(13KJD430002)、江苏理工学院基础及应用基础基金项目(KYY12019)和博士启动基金(KYY12010)资助.

lubrication. When the hoop strain was more than 10%, the plicas were stretched and the wrinkles disappeared, the lubrication regime then was mixed lubrication. The study of its friction characteristics provides experimental data for the appearance design of capsule endoscopy and intestinal robot; besides, it is significant to promote minimally invasive and noninvasive surgery.

Key words: small intestine, friction characteristic, hoop strain, plicas, boundary lubrication

近年来,肠癌发病率增加,死亡率居癌症死因第三位.当前,肠道疾病诊疗主要工具是内窥镜,内窥镜进入人体后,与肠道表面直接接触产生摩擦,病人承受巨大痛苦,甚至咽部擦伤、食管贲门粘膜撕裂、胃肠道穿孔等并发症.因此,研究肠道与内窥镜之间的摩擦对肠道疾病的诊治,定性分析具有重要的意义,为无损诊疗设备的研制和优化提供实验数据和理论指导.

现在主要有韩国、中国、荷兰、意大利开展了肠道与胶囊内窥镜之间摩擦的研究,2004年N-K Baek等^[1]研究了胶囊内窥镜形状对肠道摩擦阻力影响,明确了胶囊内窥镜的形状、直径、长度、重量、速度、肠道黏性与摩擦阻力的关系.2005年,Xiaona Wang等^[2-3]研究了胶囊尺寸和运动速度对摩擦阻力的影响.实验结果与韩国N-K Baek等的研究结果吻合,建立了摩擦阻力和直径、长度、速度之间的关系表达式.2006年J-S Kim等^[4]研究了重量、接触面积、速度对摩擦阻力的影响,重量增大,摩擦系数减小;运动速度增大,摩擦阻力增加,而摩擦阻力基本不受接触面积大小的影响.2007年J-S Kim等^[5]在肠道的黏弹性和摩擦性实验研究基础上,建立了预测胶囊式内窥镜的运动摩擦阻力分析模型,此模型考虑了胶囊的几何外形和肠道的黏弹性.Y-T Kim等^[6]设计了带有多个管状足的机器人样机,机器人在小肠上滑动时,它们之间有黏滑行为,管结构与肠道表面微结构产生互锁,提高了机器人运动的摩擦力.2010年,Sung-Hoon Lee等^[7]设计了一种机器人末端执行器,在末端执行器端面织构了平行光栅、盒形、金字塔形、瓶形四种图案,与无图案的末端执行器结构相比较,平行光栅图案产生的摩擦力最大.Elisa Buselli等^[8]利用软刻蚀技术织构了高分子圆柱阵列,将织构的圆柱阵列薄膜包覆在机器人的末端执行器上,摩擦力可提高41.7%,并不损伤黏膜.

综上所述,国内外研究均是假设内窥镜与肠道之间产生粘弹性变形条件下进行的,均没有考虑内窥镜微型化后,摩擦仅由内窥镜和肠道表面性质决定.现对离体开放式摩擦实验进行改进,在不切开肠

道和不破坏表面形貌、微结构的条件下,测定其内表面摩擦系数.现设计了四个实验:测试黏液润滑性、表征内表面形貌、测定摩擦系数与载荷和环向应变的关系、测定摩擦系数与滑动速度和环向应变的关系.

1 实验部分

1.1 黏液润滑性测试

解剖成年活体家兔取小肠,剪开肠衣,钝塑料片轻轻刮取肠黏液,离心处理取上清液,分别测量PDMS薄膜干摩擦、去离子水润滑、肠黏液润滑的摩擦系数.摩擦设备为UMT-2多功能摩擦磨损试验机,摩擦对偶件为 $\phi 4$ mm PMMA塑料球.

1.2 内表面形貌表征

- (1)解剖活体家兔取小肠,剪开肠衣用生理盐水冲洗表面黏液,在2.5%戊二醛固定2 h;
- (2)用0.1% MPBS清洗3次,每次15 min,然后乙醇系列脱水;
- (3)进行醋酸戊酯置换,CO₂临界点干燥处理;
- (4)喷金处理,SEM观察其表面形貌.

1.3 摩擦系数测定

- (1)首先,解剖成年活体家兔取小肠,切取宽度为2 mm的圆环,放置于电子显微镜下测量其直径;然后,截取长度均为30 mm的五段肠管,内表面朝外分别套在直径为 $\phi 10$ mm、 $\phi 11$ mm、 $\phi 12$ mm、 $\phi 13$ mm、 $\phi 14$ mm的半圆柱形塑料夹具上,如图1所示.每个摩擦系数测5个点,然后求平均值;
- (2)将滑动速度设为10 r/min,载荷依次设为0.50、0.55、0.60、0.65、0.70和0.75 N,测量摩擦系数与载荷和环向应变的关系;
- (3)将载荷设为0.5 N,滑动速度依次设为10、15、20、25和30 r/min,测量摩擦系数与滑动速度和环向应变的关系.

2 结果与讨论

2.1 试验结果

图2是小肠内表面放大不同倍数的SEM照片.由图2(a)可看出小肠内壁有突起的环形皱襞,皱襞



Fig. 1 Half - cylindrical plastic clamps

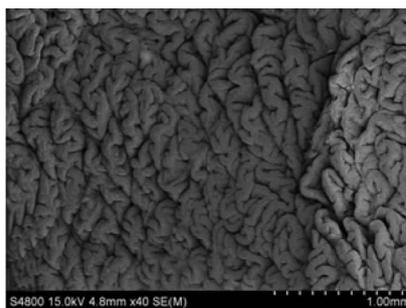
图 1 半圆柱形塑料夹具

弯曲形成了很多褶皱. 由图 2(b)可看出皱襞表面分布着指状绒毛,长度大约在 100 ~ 250 μm ,宽度大约在 80 ~ 200 μm ,图 2(c)可看出单个绒毛的表面分

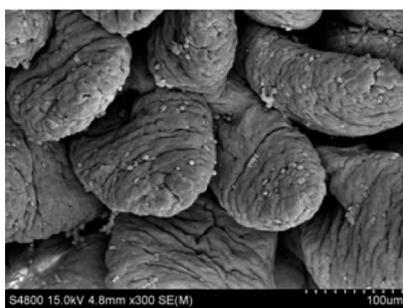
布着更小的柱状微绒毛,单根微绒毛直径大约在 100 nm,高度大约在 500 nm. 因此,小肠内表面是多尺度多层次的分形结构,主要分为 3 层结构:环形皱襞、绒毛和微绒毛.

通过对 PDMS 塑料薄膜的干摩擦、去离子水和肠黏液润滑摩擦试验,结果如表 1 所示,干摩擦条件下的摩擦系数在 10^0 数量级,用去离子水润滑摩擦系数降低到 10^{-1} 数量级. 用肠黏液润滑摩擦系数降低到 10^{-2} 数量级. 说明肠黏液产生的摩擦系数最小,比水的润滑性和减阻性好.

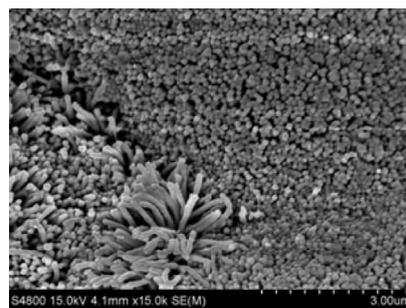
小肠内径测量结果如图 3 所示,约为 $\phi 10 \text{ mm}$. 图 4 所示为滑动速度一定时,对于不同环向应变摩擦系数随载荷增大的变化规律,直径分别膨胀到 $\phi 10 \text{ mm}$ 、 $\phi 11 \text{ mm}$ 、 $\phi 12 \text{ mm}$ 、 $\phi 13 \text{ mm}$ 和 $\phi 14 \text{ mm}$ 时,摩擦系数随载荷增加的变化规律. 其中, $\phi 10 \text{ mm}$ 、



(a) Plicae, 40 times



(b) Villi, 300 times



(c) Villi, 15 000 times

Fig. 2 SEM micrographs of duodenum inner structures

图 2 十二指肠内表面结构

表 1 平均摩擦系数

Table 1 The average friction coefficient

Sliding speed / rev · min ⁻¹	Dry friction	Lubricate with water	Lubricate with mucus
5	1.651	0.422 9	0.057 28
20	1.883	0.271 2	0.042 46
30	1.988	0.194 4	0.039 70
50	2.088	0.104 7	0.037 73
100	3.365	0.0584 82	0.037 37

$\phi 11 \text{ mm}$ 对应的两条摩擦系数曲线上波动较小,基本保持不变,而 $\phi 12 \text{ mm}$ 、 $\phi 13 \text{ mm}$ 和 $\phi 14 \text{ mm}$ 对应的 3 条摩擦系数曲线剧烈波动并升高,并且明显高于 $\phi 10 \text{ mm}$ 和 $\phi 11 \text{ mm}$ 对应的两条摩擦系数曲线.

图 5 所示为载荷一定时,对于不同应变摩擦系数随滑动速度增大的变化规律, $\phi 12 \text{ mm}$ 、 $\phi 13 \text{ mm}$ 和 $\phi 14 \text{ mm}$ 对应的 3 条摩擦系数曲线,随着滑动速度增加而升高,并明显高于 $\phi 10 \text{ mm}$ 和 $\phi 11 \text{ mm}$ 两条

摩擦系数曲线.

综上所述,当直径小于 $\phi 11 \text{ mm}$ 即环向应变小于 10% 时,随载荷和滑动速度增大,摩擦系数变化范围在 0.035 ~ 0.085,和肠黏液摩擦系数 10^{-2} 数量

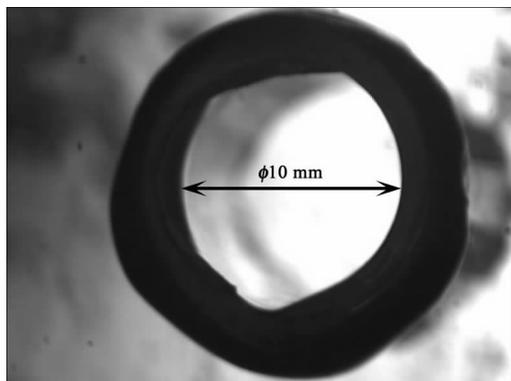


Fig. 3 Small intestine of inner diameter

图 3 小肠内径

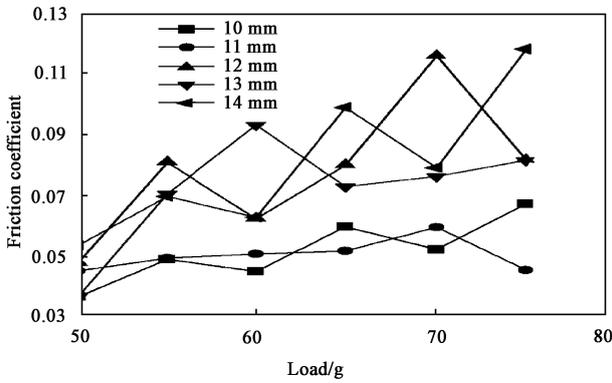


Fig. 4 Friction coefficient vs load at a fixed speed
图4 滑动速度恒定, 摩擦系数随载荷的变化

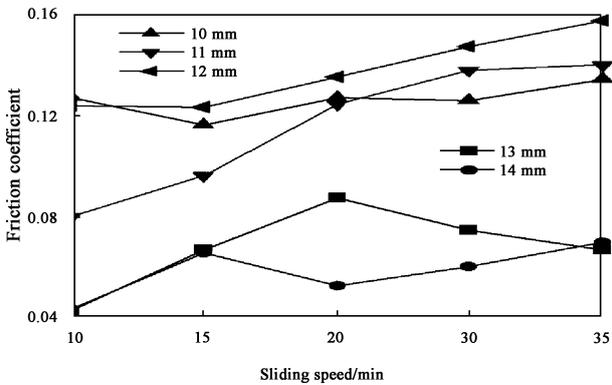


Fig. 5 Friction coefficient vs velocity at a fixed load
图5 载荷恒定, 摩擦系数随滑动速度的变化

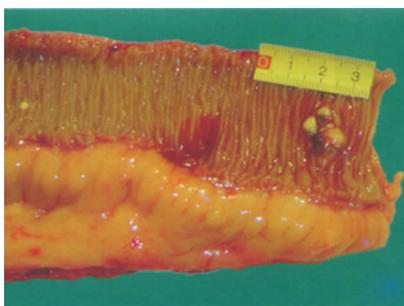
级相同,说明环向应变小于 10% 时,摩擦系数由肠黏液的润滑性决定. 当直径大于 $\phi 11$ mm,即环向应变大于 10% 时,载荷从 0.5 N 增至 0.8 N,摩擦系数变化范围 0.035 ~ 0.12,滑动速度从 10 r/min 增至 30 r/min,摩擦系数变化范围 0.08 ~ 0.15,摩擦系数由 10^{-2} 数量级增大到 10^{-1} 数量级,说明环向应变大于 10% 时,肠黏液、肠道表面形貌、载荷和滑动速度共同作用改变了摩擦系数.

2.2 讨论与分析

图 6 所示为小肠在不同环向应变时的内表面形貌,从图 6(a)小肠离体解剖图可看出其内表面环向分布着皱襞结构,皱襞不是紧密排列有一定间距,形成了许多沟槽;图 6(b)为小肠在体内不蠕动时的形貌照片,可看出皱襞形态和离体解剖看到的相同,均呈环向分布;图 6(c)为小肠蠕动收缩时的形貌,可看出皱襞被挤压形成了纵向褶皱,内腔表面积缩小并逐渐消失.

因此,可建立不同环向应变时小肠内表面形貌的变化模型,如图 7 所示. 当小肠收缩时,肠黏膜受残余压应力和肠肌收缩力同时作用,环形皱襞发生严重弯曲形成了纵向褶皱结构,褶皱被挤压折叠在一起,内表面积减少. 此时,肠黏液将完全漂浮在小肠内表面,形成了很厚的润滑层,如图 7(a)所示. 当小肠中无食糜为零载荷时,黏膜层仅受残余压应力时,环形皱襞弯曲程度降低,褶皱曲率和内表面积均增大,形成了波峰波谷,肠黏液可以存储波谷处形成了多个液池,皱襞与摩擦球之间的润滑膜变薄,如图 7(b)所示. 当小肠舒张时,肠黏膜层同时受残余应力和肠肌拉伸力作用,环向拉伸力大于残余应力,环形皱襞被拉直,纵向褶皱消失,内表面积和皱襞间距均增大,如图 7(c)所示.

根据摩擦试验结果和小肠形貌转化模型,可得出摩擦系数随环向应变变化的摩擦机理:当环向应变小于 10%,可认为肠黏膜仍是受压应力,环形皱襞与摩擦副之间被较厚的肠黏液隔开,润滑性好,润滑形式为液体润滑,载荷和滑动速度的变化对摩擦系数影响不大. 当环向应变大于 10%,环形皱襞被拉直内表面扩张,肠黏液层变薄,润滑形式转化为混合润滑,摩擦系数受载荷和滑动速度影响较大. 当载荷逐渐增加,皱襞挤压变形量增大,摩擦头运动方向产生机械阻力增大,需要耗散的能量增加,摩擦系数



(a) In vitro



(b) Zero - load state



(c) Contraction state

Fig. 6 The plica of small intestine

图6 小肠皱襞

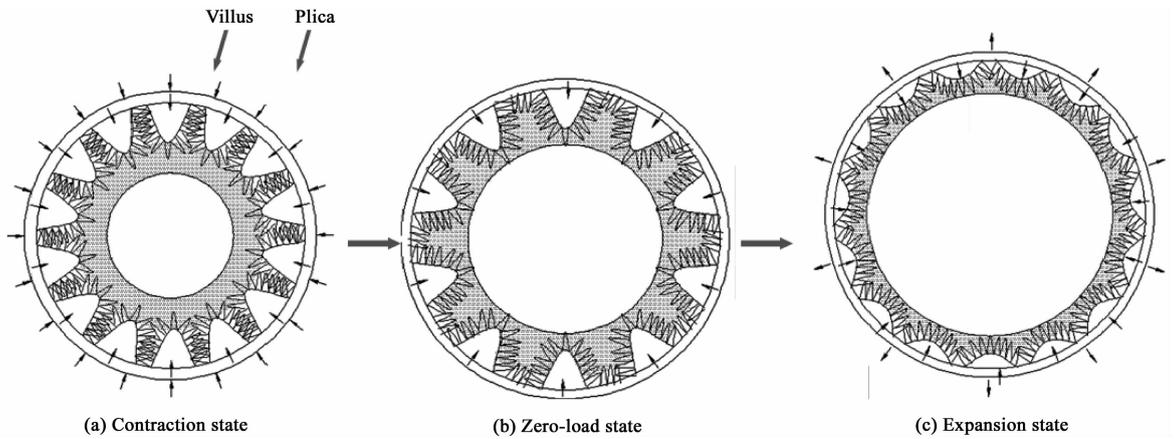


Fig. 7 The model of morphology transformation

图7 形貌转化模型

变大. 由于肠道为黏弹性材料, 具有应力松弛, 当滑动速度增加, 皱襞产生的应力松弛减小, 摩擦阻力和摩擦系数增大, 反之, 滑动速度越小, 应力松弛增大, 摩擦阻力和摩擦系数减小.

3 结论

a. 在排除肠道正压力对摩擦的影响, 当环向应变增大, 摩擦系数也增大, 说明表面形貌以及形貌的变化对其摩擦特性有较大影响.

b. 当径向应变小于10%时, 肠道与摩擦头之间存在较厚的黏液, 润滑形式为液体润滑, 其摩擦特性主要由黏液的润滑性决定, 当大于10%时, 褶皱结构消失, 黏液层变薄, 润滑形式为混合润滑, 摩擦特性主要由其表面形貌和微结构决定.

c. 当大于10%时, 摩擦系数随载荷增大是机械阻力增大造成的, 摩擦系数随速度增大是应力松弛减小造成的.

参考文献:

- [1] N - K Baek, I - H Sung and D - E Kim. Frictional resistance characteristics of a capsule inside the intestine for microendoscope design. Proceedings of the I MECH Part H Journal of Engineering in Medicine, 2004, 218(3):193 - 201.
- [2] Xiaona Wang, Max Q - H Meng, Yawen Chan. Physiological

factors of the small intestine in design of active capsule endoscopy. In : Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in medicine and biology 27th annual conference, 2005.

- [3] Xiaona Wang, Max Q - H Meng. Study of frictional properties of the small intestine for design of active capsule endoscope. In: Proceedings of the 1st IEEE/RAS - EMBS International Conference on biomedical robotics and biomechanics, 2006.
- [4] J - S Kim, I - H Sung, Y - T Kim, et al. Experimental investigation of frictional and viscoelastic properties of intestine for microendoscope application [J]. Tribology Letters, 2006, 22 (2):143 - 149.
- [5] J - S Kim, I - H Sung, Y - T Kim, et al. Analytical model development for the prediction of the frictional resistance of a capsule endoscope inside an intestine. Proceedings of the I MECH Part H Journal of Engineering in Medicine, 2007, 221: 837 - 845.
- [6] Y - T Kim, D - E Kim. Biotribological investigation of multi - tube foot for application in medical micro - robot. In: Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference, 2007.
- [7] Lee, Young - Tae Kim, Sung - Wook Yang, et al. An optimal micropatterned end - effector for enhancing frictional force on large intestinal surface [J]. Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(5):1308 - 1316.
- [8] Elisa Buselli, Virginia Pensabene, Piero Castrataro, et al. Evaluation of friction enhancement through soft polymer micro - patterns in active capsule endoscopy. Measurement Science and Technology, 2010, 21:105802.