

食管支架滑移性能测试装置的设计与应用

陶 慧 林 婧 王 璐
东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘 要:食管支架置入后常因吞咽动作导致滑移失效,但目前尚无针对食管支架滑移性能的体外评价方法,这导致医疗器械研发工程师及外科医生难以预判食管支架的临床使用效能。针对这一问题,自主研制了食管支架滑移性能测试装置。该装置由仿真食管环境系统、模拟吞咽蠕动系统和软件及控制系统等组成,能在仿真天然食管环境的基础上模拟吞咽蠕动刺激,评估食管支架的抗滑移性。通过对 2 种自制的食管支架试样进行测试,验证了测试装置的功能性和可重复性。再结合食管支架的径向支撑力和摩擦力测试结果,进一步证实了该装置测试结果可靠,操作简便高效。测试装置可为食管支架的研发和临床筛选提供重要的理论与数据支撑。

关键词:滑移性能测试装置;食管支架;仿生食管;仿真食管环境;吞咽蠕动;滑移距离;径向支撑力;摩擦力
中图分类号:TS 107.8 文献标志码:A 文章编号:1004-7093(2025)05-0001-08

Design and application of migration performance test device for esophageal stents

Tao Hui, Lin Jing, Wang Lu

College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: Esophageal stents after being placed often fail due to migration caused by swallowing. However, at present, there is no *in vitro* evaluation method for esophageal stents migration performance, which makes it difficult for medical device R&D engineers and surgeons to predict the clinical performance of esophageal stents. To solve this problem, a migration performance test device for esophageal stents was independently developed. The device consisted of the simulated esophageal environment system, simulated swallowing peristaltic system, and software and control system. It could simulate swallowing peristaltic stimulation on the basis of simulated natural esophageal environment to evaluate the anti-migration performance of esophageal stents. By testing two self-made esophageal stent samples, the functionality and repeatability of the testing device were verified. In combination with the radial support force and friction force test results of the esophageal stents, it was further confirmed that the test results of this device were reliable and the operation was

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2232024G-01)

收稿日期:2025-02-11

作者简介:陶慧,女,1997年生,在读博士研究生,主要研究方向为生物医用纺织材料,taohui2021@126.com

通信作者:林婧,高级实验师,主要研究方向为生物医用纺织材料的测试技术,jlin@dhu.edu.cn

simple and efficient. The test device can provide important theoretical and data support for the research and clinical screening of esophageal stents.

Keywords: migration performance test device; esophageal stent; bionic esophagus; simulated esophageal environment; swallowing peristaltic; migration displacement; radial support force; friction force

据报道,全球每年新增食管癌患者超 60 万人^[1]。在我国,约 70%的食管癌患者确诊时病情已处于晚期阶段^[2]。这些患者身体状况较差,无法耐受切除手术或化疗,故临床上常采用食管支架置入术以缓解吞咽困难并维持营养摄入。该术式可作为姑息性治疗手段,为后续治疗创造条件。然而,5%~40%的患者在食管支架置入后,会因吞咽蠕动作用而导致食管支架向下滑移,并引发并发症^[3]。此类情况需二次手术取出支架,这给患者带来了痛苦与负担。因此,置入前对食管支架进行滑移性能测试以预测其体内表现,非常重要。

目前,食管支架体外性能测试研究主要聚焦径向支撑性能和疲劳性能^[4-10]。这些性能测试虽能在一定程度上反映食管支架的滑移性能,但无法充分预测其置入后的实际滑移情况。有研究者将食管支架置入硅胶管或离体动物食管中,通过测试其拔出摩擦力来预估食管支架的体内抗滑移效果^[11-13]。然而,该方法一方面由于未模拟食管的吞咽蠕动,动态吞咽过程中食管支架与食管组织界面的相互作用(如吞咽蠕动导致食管支架不同位置处的差异变形及轴向弯曲等)难以准确表征;另一方面由于硅胶管或离体动物食管与天然食管差异显著(硅胶管由各向同性材料制成,其力学性能与天然食管相差甚远;离体动物食管因活性丧失而力学性能改变显著^[14],且个体尺寸、形态及力学性能差异较大),临床滑移风险预测效率不足。还有研究者将食管支架置入离体动物食管后,通过血压计包裹进行收缩舒张以模拟吞咽过程,测试食管支架的滑移距离^[15]。但血压计的收缩舒张与体内食管吞咽蠕动差异较大(血压计仅沿径向对食管支架施加压力,而吞咽蠕动波沿着食管轴向传递;血压计收缩舒张时食管支架整体变形一致,而实际吞咽时食管支架处于部分压缩、部分扩张的状态),因此采用血压计包裹的方式难以真实反映吞咽蠕动情况下支架的滑移情况。现有研究中,较为可靠的食管支架滑移性能测试方法为原位

动物试验法^[16-17]。但猪等试验动物的食管直径(25~40 mm)与人体食管直径(15~25 mm)存在差异,这会显著影响支架-管壁接触应力的分布^[18-19]。此外,动物食管黏膜与肌肉的分布和人体食管的差异也较大,这可能造成滑移距离评估出现误差。而且,试验伦理争议日益突出,原位动物试验法的推广和应用严重受限。因此,亟需开发一种有效、便捷、可靠的食管支架滑移性能体外测试装置及方法。

本研究设计了一种食管支架滑移性能测试装置。其通过仿真食管支架服役环境和吞咽蠕动刺激,体外评价食管支架的抗滑移性,旨在为食管支架的抗滑移结构设计提供理论及试验支撑,助力食管支架的研发和临床筛选。

1 设计原理

放置在食管内的食管支架因会对食管壁产生一定的压力,故而能固定于食管中。吞咽时,食管的环行肌层和纵行肌层会规律性地收缩、舒张并挤压食管支架,将食管支架和食物共同推向胃部。因此,体外测试食管支架滑移性能时,需先仿真食管支架所处生理环境,再模拟食管持续性吞咽蠕动刺激。

天然食管的温度为 36.5~37.2 °C,内含少量黏液^[20]。静息状态下,食管松弛、柔软,无收缩表现。吞咽时,食管沿径向收缩舒张,但轴向无明显变化。故仿真食管测试应满足:(1)环境温度合适,黏液适量;(2)食管整体松弛、柔软;(3)食管径向弹性较好、轴向无明显伸长。

研究表明,吞咽时食管会产生特征性的蠕动波。其波形可描述为一个无限周期的正弦波沿着食管壁轴向传播,且波形关于食管轴向对称^[21]。其形态模型见图 1,食管吞咽蠕动的径向变形量(h)可用式(1)表示:

$$h(x,t) = a(x) + b \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \right] \quad (1)$$

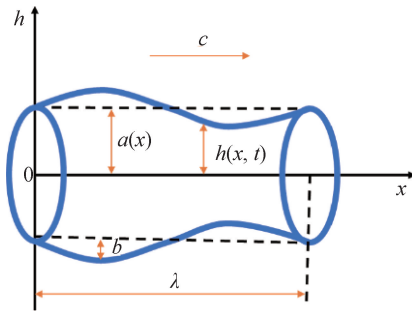


图 1 食管蠕动波形态模型

Fig. 1 Morphological model of esophageal peristaltic wave

式中: x 为食管轴向的位置变量; $a(x)$ 为食管轴向 x 处管腔的截面半径; b 为蠕动波的振幅; λ 为蠕动

波的波长; c 为蠕动波的行进速度; t 为蠕动波的行进时间。

基于上述理论,本研究自主研发了食管支架滑移性能测试装置,通过模拟天然食管的生理环境,以及利用机械设计生成吞咽蠕动波,实现对食管支架施加持续性力学刺激。

2 食管支架滑移性能测试装置的设计

食管支架滑移性能测试装置^[22]的设计如图 2 所示,其包括 3 个模块——仿真食管环境系统、模拟吞咽蠕动系统、软件及控制系统。

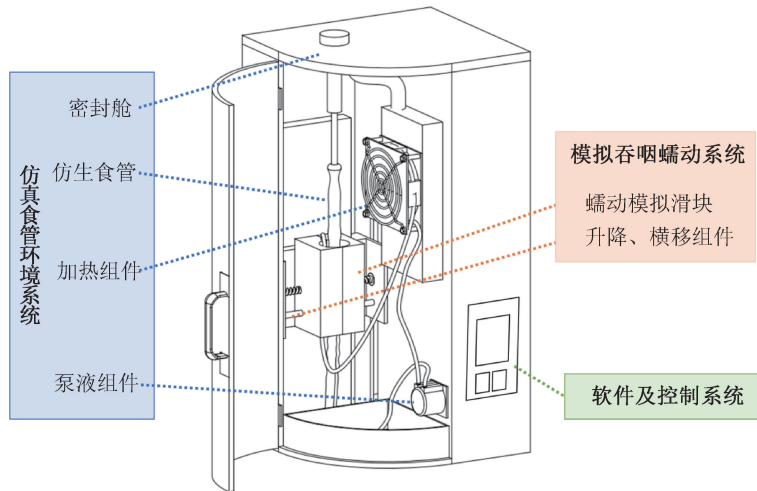


图 2 食管支架滑移性能测试装置示意

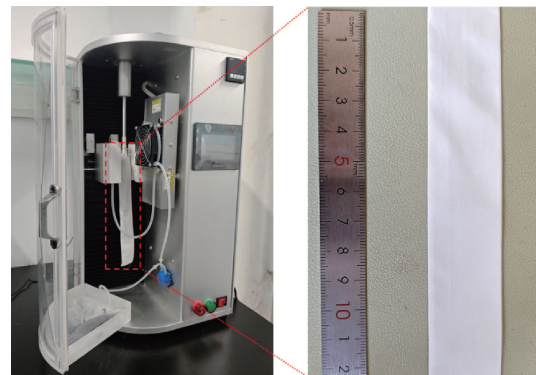
Fig. 2 Schematic diagram of migration performance test device for esophageal stents

2.1 仿真食管环境系统

天然食管的恒温与黏液环境是影响食管支架体内行为的重要因素。目前,食管支架多采用镍钛合金材料制备,具有温度响应形状记忆性和超弹性,在马氏体相变温度上下力学性能差异显著^[23]。因此,测试时模拟体温条件有助于还原食管支架的体内力学表现。此外,黏液的存在会改变食管支架与食管壁的摩擦因数,这对食管支架滑移性能测试亦非常重要。基于此,本装置通过设计加热组件将机器温度控制在 37 ℃,并辅以密封舱减少散热、维持温度稳定,同时通过泵液组件向测试部位输送黏液,以仿真食管腔内润滑环境。

食管支架服役的特点是适应天然食管独特的力学各向异性^[24]。吞咽时,天然食管仅沿径向收缩,轴向无伸长。为满足这一力学需求,本研究分别以

无弹性的棉纱和弹性优异的氨纶长丝为经纱和纬纱,采用机织工艺一体化制备各向异性仿生食管。所得仿生食管如图 3 所示,测试时,其上端固定于密封舱内,下端自由垂落,整体呈松弛、柔软状态。



a) 仿生食管测试照片

b) 仿生食管

图 3 仿生食管实物照片

Fig. 3 Photos of bionic esophagus

2.2 模拟吞咽蠕动系统

临床数据显示:人体吞咽时,蠕动波的波长约 60 mm,行进速度 20~40 mm/s,振幅 6 mm;食管管腔半径 5~10 mm^[25]。将上述数据代入式(1),并简化设定 $a(x)$ 为固定值 10 mm,同时选取初始时刻 $t=0$,得:

$$h(x,0) = 10 + 6\sin\left(\frac{2\pi}{60}x\right) \quad (2)$$

根据式(2)加工蠕动模拟滑块内侧面,并设定滑块以食管蠕动波行进速度沿食管支架轴向运动,以模拟吞咽蠕动对食管支架的力学刺激。

鉴于吞咽蠕动刺激具有间断、多次、单向的特点,蠕动模拟滑块被设计成对称的两部分,且两部分滑块在升降组件和横移组件的控制下,既可合并得到 1 个完整的蠕动波形并向下滑动,实现对食管支架的力学刺激,又可分开为两部分并回到初始位置,不对食管支架造成反向刺激。其运动过程如图 4 所示:初始位置,蠕动模拟滑块分开为两部分;开始吞咽时,横移组件控制两部分滑块夹紧,实现对仿生食管(含食管支架)的环状压缩;随着吞咽的进行,吞咽蠕动波沿食管轴向传递,滑块下行到极限位置,完成对仿生食管(含食管支架)的蠕动刺激;最后,滑块松开并上行回复到初始位置,完成 1 次完整的吞咽蠕动模拟。根据临床数据设置滑块下行速度、运行次数及运行间隔时间等试验参数,模拟不同速度和频次的吞咽蠕动。

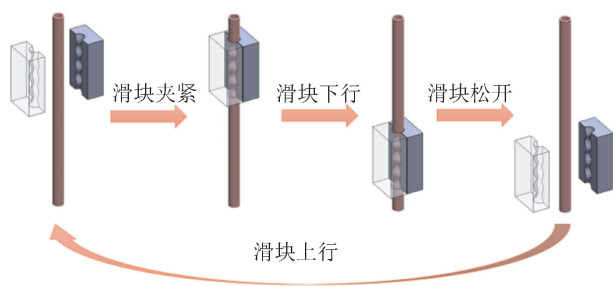


图 4 完整吞咽蠕动过程的模拟

Fig. 4 Simulation of complete swallowing peristalsis process

2.3 软件及控制系统

控制系统主要由升降组件、横移组件和泵液组件等组成。各组件协同工作,以精确模拟食管吞咽蠕动。升降组件由直线电动机和连接杆构成,驱动蠕动模拟滑块沿着仿生食管轴向往复运动;横移组件由驱动电动机和双向滑移丝杆构成,控制蠕动模

拟滑块沿着仿生食管径向夹紧或松开。两部分组件配合运动,实现对吞咽蠕动刺激的模拟。泵液组件由储液盒、输液管和液泵组成。液泵通过输液管将储液盒中的模拟唾液传输至仿生食管处,模拟吞咽过程中的润滑效果。

上述组件集成的控制系统由软件系统统一控制。人机交互界面为触控显示屏,操作人员可通过界面实时调节升降组件和横移组件的运行速度,速度调节范围为 1~60 mm/s,以模拟不同的吞咽速度。此外,软件系统还提供了吞咽模拟次数的预设功能,可根据试验需求设置 1~1 000 次的模拟循环,确保试验的可重复性。

3 食管支架滑移性能测试装置的功能验证

为全面验证食管支架滑移性能测试装置的功能,本研究将从 3 个方面展开:首先,对关键测试件——仿生食管进行仿真性验证,确认其力学性能是否与天然食管相符;其次,使用该测试装置展开试验,验证装置是否满足滑移性能测试的功能需求与可重复性要求;最后,测试食管支架的径向支撑性和摩擦性,验证该装置测试结果的可靠性。

3.1 仿生食管的仿真性验证

3.1.1 试验材料

以 26.6 tex×2 的棉纱为经纱、7.56 tex 的氨纶长丝为纬纱,采用机织工艺一体化制备经密为 150 根/(10 cm)、纬密为 305 根/(10 cm)的管状平纹织物,用作各向异性仿生食管。该食管周向半径为 10 mm,与天然食管平均半径一致。将仿生食管沿轴向裁开,剪出 10 mm(周向长度)×50 mm(轴向长度)的矩形试样,用于轴向力学性能测试;另裁剪 1 根轴向长度为 20 mm 的管状试样,用于周向力学性能测试。

3.1.2 试验方法

使用 YG(B) 026G-500 型医用纺织品强力仪(大荣纺织仪器有限公司)测试仿生食管的轴向、周向力学性能。轴向拉伸时,夹头垂直轴向夹持试样上下端,控制拉伸隔距为 30 mm,拉伸速度为 100 mm/min,夹头上行拉伸直至试样断裂;周向拉伸时,先将 2 个半圆柱形销子(直径 20 mm)放入管状试样中,然后用夹头分别固定销子,夹头以

100 mm/min 的速度上行拉伸直至试样断裂。每组试样测试 3 次,结果取平均值并计算标准方差。

3.1.3 结果与讨论

仿生食管的周向、轴向力学性能测试结果如图 5 所示,可以看出:周向力学性能方面,仿生食管断裂应力为 (8.19 ± 0.21) MPa, 断裂应变为 $(279.22 \pm 16.64)\%$;轴向力学性能方面,仿生食管断裂应力为 (19.03 ± 1.41) MPa, 断裂应变仅为 $(27.90 \pm 6.81)\%$ 。以上数据表明,仿生食管展现出符合设计需求的力学各向异性,即周向强度低、弹性高,轴向

强度高、形变较小,这与天然食管的力学各向异性特征一致。仿生食管的轴向/周向断裂应力比 (2.32) 与猪食管黏膜的轴向/周向断裂应力比 $(2.34)^{[26]}$ 极为接近,这进一步验证了仿生食管的仿真性。仿生食管的力学各向异性特征源自独特的纱线排列(图 6)。当仿生食管受周向拉伸作用时,沿周向排列的纬纱承受主要拉力,纬纱氨纶长丝凭借其优异的弹性为仿生食管提供极高的应变;当仿生食管受轴向拉伸作用时,沿轴向排列的经纱承受主要拉力,棉纱在提供较大应力的同时形变较小。

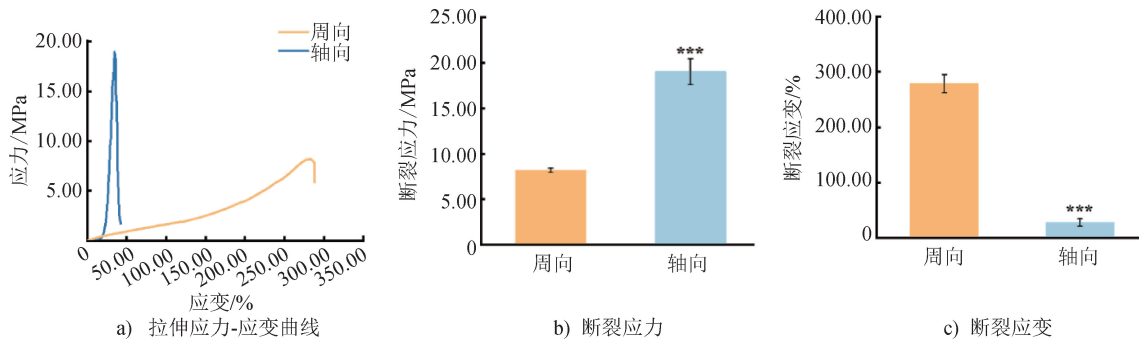


图 5 仿生食管周向、轴向力学性能测试结果

Fig. 5 Circumferential and axial mechanical property test results of bionic esophagus

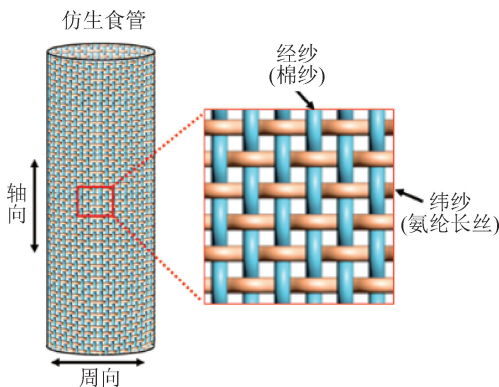


图 6 仿生食管纱线排列示意

Fig. 6 Schematic diagram of threads arrangement of bionic esophagus

从临床应用的角度考虑,食管支架的置入效果在很大程度上依赖于食管的周向弹性特性。本研究中,仿生食管的周向断裂应变为 $(279.22 \pm 16.64)\%$,与天然食管的周向断裂应变 $(287.5\%)^{[22]}$ 高度接近,表明食管支架在仿生食管中的放置效果可与其在天然食管中的状况相当。此外,仿生食管的周向断裂应力为 (8.19 ± 0.21) MPa,显著高于天然食管的周向断裂应力 $(3.14 \text{ MPa})^{[22]}$,这可确保食管支架的置入不会破坏仿生食管的组织结构,也进一步表明了仿生食管作

为试验平台的可靠性。

综上,本研究自主研制的仿生食管仿真度高,在模拟天然食管力学性能方面表现出色,可为食管支架滑移性能的体外测试提供理想的试验平台。

3.2 食管支架滑移性能测试装置功能性与可重复性验证

3.2.1 试验材料

将直径为 0.20 mm 的镍钛丝(广东富江医学科技有限公司)喂入小口径纬编机(实验室自制),调节机器上三角高度,得到 2 种纵密的管状针织物。接着,固定管状针织物的两端并将其置于马弗炉[纳博热(上海)工业炉有限公司]内,550 °C 下加热 15 min,然后迅速水冷,得到 2 种食管支架——试样 A 和试样 B,用于后续滑移性能测试。2 种食管支架的具体参数如表 1 所示,自制食管支架的形貌如图 7 所示(食管支架试样套于圆柱形模具表面拍摄),其宏观形貌及线圈形态与商用食管支架(Ultra flex[®],波士顿科学公司)无明显差异。

3.2.2 试验方法

根据式(2)定制蠕动模拟滑块并安装在食管支架滑移性能测试装置上。使用输送装置分别将自制

表 1 2 种食管支架的具体参数

Tab.1 Specific parameters of two types of esophageal stents

试样名称	横密/ [纵行·(10 cm) ⁻¹]	纵密/ [横列·(10 cm) ⁻¹]
试样 A	25.48	39.00±0.45
试样 B	25.48	45.00±0.55

的食管支架置入仿生食管内部,并在食管支架初始位置做好标记。打开加热组件和泵液组件,关闭密

封舱,待舱内温度稳定在 37 ℃,人工唾液充分润湿仿生食管内表面后,在软件中输入滑块下行速度(20 mm/s)和蠕动次数(150),开始测试。试验结束后,标记食管支架所处位置。2 次标记位置的间距即为模拟吞咽蠕动后食管支架的滑移距离(mm)。滑移距离越小,则食管支架在吞咽蠕动刺激下的滑移量越少,抗滑移性能越好。每种试样测 3 次,结果取平均值并计算标准方差。

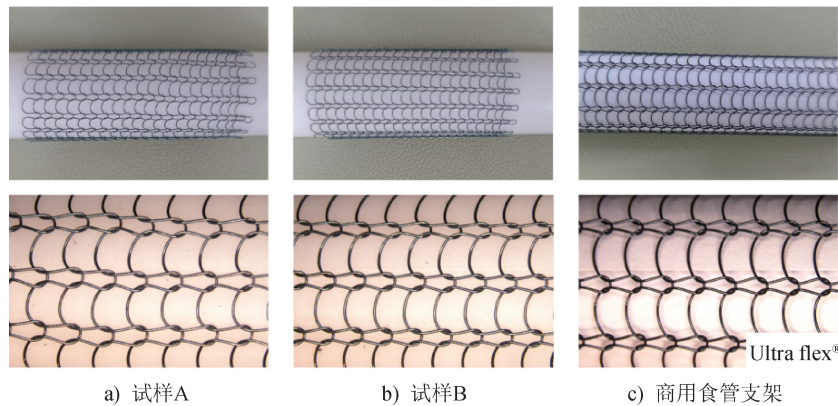


图 7 自制食管支架与商用食管支架的形貌

Fig. 7 Morphology of self-made esophageal stents and commercial esophageal stent

3.2.3 结果与讨论

如图 8 所示,经 150 次(相当于成年人 6 h 内的吞咽次数^[27])吞咽蠕动刺激模拟后,2 种试样均出现了一定程度的滑移,试样 A 的滑移距离为(13.0±1.2) mm,试样 B 的滑移距离为(10.5±0.6) mm。2 种试样的测试结果具有显著性差异($P < 0.01$),其中试样 B 具有更优的抗滑移性能。已有研究和临床数据表明,直型支架普遍具有较高的滑移率^[28-30],这支撑了上述测试结果的合理性,也证实了食管支架滑移性能测试装置具备体外评估支架滑移性能的能力。且经多次测量发现,2 种试样滑移距离的标准偏差都维持在较小范围内,表明本研究的测试装置稳定性强,测试结果具有可重复性。

此外,对比测试前后试样的宏观形貌(图 9)发现,食管支架未出现断裂变形,线圈形态保持完好,表明测试过程未对食管支架造成力学损伤。这主要归因于镍钛合金材料的超弹性特性以及针织线圈的结构稳定性。

3.3 滑移测试结果的可靠性验证

3.3.1 试验材料

试验材料同 3.2.1 节,具体参数见表 1。

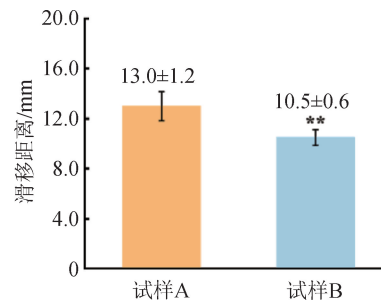


图 8 食管支架滑移性能测试结果

Fig. 8 Test results of migration performance of esophageal stents

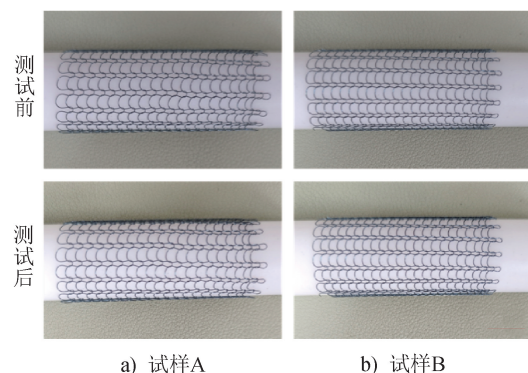


图 9 测试前后食管支架试样形貌对比

Fig. 9 Morphological comparison of esophageal stent samples before and after testing

3.3.2 试验方法

使用局部压缩法测试食管支架的径向支撑性能。测试仪器为 YG061 型径向压缩仪(莱州电子仪器有限公司),压头直径为 20 mm,设置压缩速度为 20 mm/min,记录压缩距离为 10 mm 时的径向支撑力(cN)。

摩擦力使用医用纺织品多功能强力仪进行测试。测试时,食管支架上端用纱线系牢并置入硅胶管中,硅胶管下端垂直固定于下夹头中。向上拉动纱线并拖拽食管支架在硅胶管中滑动,设置拉动速度为 200 mm/min,食管支架的摩擦力(N)取食管支架稳定滑动段力值的平均值。

每种试样测试 3 次,结果取平均值并计算标准方差。

3.3.3 结果与讨论

研究表明,食管支架的滑移失效主要归因于食管支架与食管组织之间的力学失配,其中食管支架的径向支撑力及其与管壁之间的摩擦力是影响其滑移行为的关键因素^[31-33]。因此,本研究选取径向支撑力和摩擦力作为关键力学性能参数,验证滑移测试结果的可靠性。

测试结果如图 10 所示,可以看出:试样 A 的径向支撑力 $[(119.02 \pm 2.14) \text{ cN}]$ 和试样 B 的径向支撑力 $[(147.00 \pm 2.13) \text{ cN}]$ 具有显著性差异($P < 0.001$),试样 A 的摩擦力 $[(8.07 \pm 0.25) \text{ N}]$ 显著小于试样 B 的摩擦力 $[(11.81 \pm 1.03) \text{ N}]$ 。这是因为 2 种试样虽横密相同,但试样 B 的纵密较大,故试样 B 具有更多的支撑单元,压缩时它们可提供更大的径向支撑力。且食管支架的摩擦力与径向支撑力呈正相关^[34],故试样 B 与管壁的摩擦力也更大。此外,有研究^[29]表明,食管支架的径向支撑力和摩擦力越大,置入后食管支架滑移率越低,故可推断试样 A 较试样 B 易发生滑移,这与 3.2 节所呈现的结果一致,也证实了本研究设计的食管支架滑移性能测试装置的测试结果可靠。该装置可用于食管支架滑移性能的体外评估。

4 结束语

本研究自主研制了食管支架滑移性能测试装置。该装置通过仿真食管环境并模拟吞咽蠕动刺

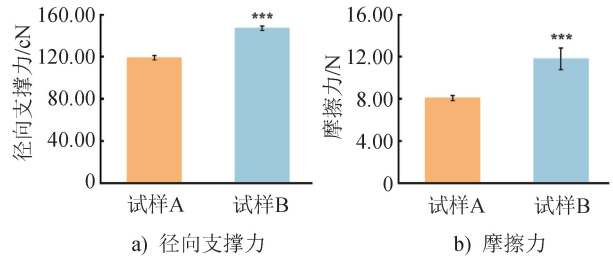


图 10 食管支架径向支撑力和摩擦力测试结果
Fig. 10 Test results of radial support force and friction force of esophageal stents

激,体外评估食管支架置入后的滑移状况。首先,通过测试仿生食管力学性能验证了仿生食管的仿真性;其次,使用该装置测试了 2 种食管支架试样的滑移距离,发现密度较大的食管支架滑移距离更小,抗滑移性能更优;最后,对食管支架的径向支撑力和摩擦力进行测试,发现密度较大的食管支架径向支撑力和摩擦力更大,这进一步证实了密度较大的食管支架抗滑移性能更优,也验证了该装置测试结果的可靠性。此外,该装置操作简便,可为食管支架的研发和临床筛选提供有力支撑。

然而,作为食管支架滑移测试装置的初步验证,本研究还存在以下局限:(1)仅对 2 种自制支架试样进行了验证性测试,未来需扩大样本类型覆盖范围及增加样本数量,增强结论的普适性;(2)测试体系未与现行主流方法(如硅胶管滑移力测试、动物模型植入试验等)建立直接数据对比,装置的创新性论证有待后续强化;(3)当前仿生食管主要模拟的是健康生理状态下的食管,未涉及食管狭窄、肿瘤压迫等病理解剖特征,且蠕动波形存在简化假设的情形,后续可通过采集临床患者的食管数据(如尺寸、病理状况等)及吞咽蠕动波监测数据(如波形、频率等),对仿生食管及蠕动模拟滑块进行个性化定制,提升测试结果与临床的相关性;(4)装置中食管吞咽环境的模拟也有待后续做进一步探究。



参考文献

[1] SUNG H, FERLAY J, SIEGEL R L, et al. Global cancer

- statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2021, 71 (3): 209-249.
- [2] 廖小勇, 文毅, 邱干, 等. 食管支架置入术在中晚期食管癌治疗中的应用进展 [J]. 现代消化及介入诊疗, 2019, 24(5): 550-553.
- [3] DAS K K, HASAK S, ELHANAFI S, et al. Performance and predictors of migration of partially and fully covered esophageal self-expanding metal stents for malignant dysphagia [J]. Clinical Gastroenterology and Hepatology, 2021, 19(12): 2656-2663.
- [4] 龙志红. 食管支架径向支撑力和疲劳性能测试装置的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [5] 倪晓宇, 眭蓓蓓, 殷红莲, 等. 食管支架疲劳寿命体外测试实验装置的设计与分析 [J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 101-104.
- [6] 倪晓宇, 张嫣红, 眭蓓蓓, 等. 不同端部形状的编织型食管支架应力及疲劳性能的研究 [J]. 机械设计与制造, 2018(12): 128-131.
- [7] 眭蓓蓓. 编织型非血管支架力学性能仿真及测试系统中关键技术的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- [8] 陈刘彬, 冯裕胜, 孙玮玮, 等. 丝素蛋白搭载中药复方覆膜肠道支架的制备与性能研究 [J]. 产业用纺织品, 2024, 42(6): 1-10.
- [9] 王玥, 李金奉, 王璐, 等. 编织型药物洗脱食管覆膜支架及其体外抑制细胞增生性能 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2023, 49(5): 10-18.
- [10] 陈庆明, 刘肖燕, 柳东辰, 等. 覆膜支架的金属支架结构设计对其力学性能的影响 [J/OL]. 东华大学学报 (自然科学版), 1-15 [2025-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1865.n.20241017.1434.002.html>.
- [11] MAETANI I, SHIGOKA H, OMUTA S, et al. What is the preferred shape for an esophageal stent flange? [J]. Digestive Endoscopy, 2012, 24(6): 401-406.
- [12] PROFITILLOTIS T, KOLTSAKIDIS S, TSONGAS K, et al. Innovative design of a 3D printed esophageal stent inspired by nature: mitigating migration challenges in palliative esophageal cancer therapy [J]. Biomimetics, 2024, 9(6): 359.
- [13] 杨新月, 马颜雪, 徐宸, 等. “哑铃”形人工气管支架的设计、制备与性能研究 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(5): 25-32.
- [14] 马国伟, 戎铁华, 龙浩, 等. 离体食管癌手术标本长度收缩规律的研究 [J]. 癌症, 2004, 23(2): 193-195.
- [15] LIN M H, FIROOZI N, TSAI C T, et al. 3D-printed flexible polymer stents for potential applications in inoperable esophageal malignancies [J]. Acta Biomaterialia, 2019, 83: 119-129.
- [16] YUAN T Y, LIU D D, LI Q, et al. 3D printing of melatonin-loaded esophageal stents for treatment of corrosive esophagitis [J]. Applied Materials Today, 2024, 37: 102161.
- [17] JEON E, KIM S H, KIM S, et al. Hydrogel-impregnated robust interlocking nano connector (HiRINC) for noninvasive anti-migration of esophageal stent [J]. Advanced Materials, 2025, 37(20): 2570146.
- [18] PAULI E M, SCHOMISCH S J, FURLAN J P, et al. Biodegradable esophageal stent placement does not prevent high-grade stricture formation after circumferential mucosal resection in a porcine model [J]. Surgical Endoscopy, 2012, 26(12): 3500-3508.
- [19] STANDRING S. Gray's anatomy [M]. 42nd ed. London: Elsevier, 2021: 1083-1092.
- [20] 林承雄. 内镜入路与食管组织间的交互作用行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [21] 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.
- [22] 林婧, 陶慧, 王璐, 等. 一种食道支架滑移测试设备: CN115560973A [P]. 2023-01-03.
- [23] 罗平原. 适用于外周血管支架的 NiTi 合金丝性能研究与长支架制备 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- [24] NGWANGWA H M, MODUNGWA D, PANDELANI T, et al. Estimation of the biaxial tensile behavior of ovine esophageal tissue using artificial neural networks [J]. Biomedical Engineering Online, 2024, 23(1): 100.
- [25] 王彬, 倪晓宇, 潘长网. 食管支架疲劳性能的研究进展 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(2): 324-329.
- [26] YANG W, FUNG T C, CHIAN K S, et al. Directional, regional, and layer variations of mechanical properties of esophageal tissue and its interpretation using a structure-based constitutive model [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2006, 128(3): 409-418.
- [27] LEAR C S C, FLANAGAN J B, MOORREES C F A. The frequency of deglutition in man [J]. Archives of Oral Biology, 1965, 10(1): 83.
- [28] SHARMA P, KOZAREK R. Role of esophageal stents in benign and malignant diseases [J]. American Journal of Gastroenterology, 2010, 105(2): 258-273.

(下转第 15 页)