

文章编号: 1004-7220(2021)02-0324-06

食管支架疲劳性能的研究进展

王彬¹, 倪晓宇¹, 潘长网²

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南微医学科技股份有限公司, 南京 210061)

摘要:植入病体的食管支架受其结构特征和服役环境的影响,易产生疲劳破坏,从而引发严重的并发症。目前对食管支架疲劳性能的研究内容涉及载荷谱、应力-应变关系、支架疲劳裂纹和疲劳寿命预测等方面;研究方法有理论分析、数值模拟和实验研究3种。对测定食管支架疲劳性能的各种分析方法及局限性进行详细地阐述和总结,并对食管支架后期的研究进行展望。

关键词:食管支架; 疲劳寿命; 蠕动波; 数值模拟; 体外试验

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.02.024

Research Progress in Fatigue Properties of Esophageal Stent

WANG Bin¹, NI Xiaoyu¹, PAN Changwang²(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Nanwei Medical Technology Co., Ltd, Nanjing 210061, China)

Abstract: Due to the effect of structural characteristics and service environment of esophageal stent, fatigue damage of esophageal stent is developed easily, which may lead to serious complications. At present, the researches on fatigue performance of esophageal stent involve load spectrum, stress-strain relationship, fatigue crack and fatigue life prediction, and there are three main research method: theoretical analysis, numerical simulation and experimental research. In this paper, various analysis methods and limitations for measuring fatigue performance of esophageal stent are elaborated and summarized in detail, and the future research of esophageal stent is prospected.

Key words: esophageal stent; fatigue life; peristalsis wave; numerical simulation; *in vitro* experiment

食管支架作为体内长期植入物,必然会受到食管腔道生理环境的持续作用。例如,吞咽过程、食管蠕动等对支架产生周期性和非周期性载荷的作用,会引起支架疲劳断裂,从而可能引起病人出血、溃疡、穿孔等严重的并发症。目前,国内外每年约有4万多例并发症的报道^[1]。因此,对食管支架疲劳性能的研究至关重要。同时,在临床应用上,外科医生、生产商以及卫生机构都需要了解食管支架在体内的疲劳性能。

虽然镍钛合金丝疲劳断裂的原因有多种,如应力集中、非均质材料、氢致裂纹扩展腐蚀等,但编织型食管支架的疲劳断裂可能起始于编织波峰丝材的超塑性变形和微裂纹,也可能因胃酸反流使支架工作的局部区域酸性很强,从而产生腐蚀疲劳^[2-3]。有学者对镍钛合金材料在不同浓度NaCl溶液中进行体外加速腐蚀疲劳实验,结果表明,镍钛合金具有良好的耐腐蚀性^[4-5]。然而,酸性腐蚀环境中的支架疲劳试验鲜有文献报道。目前食管支架疲劳

收稿日期:2020-05-08; 修回日期:2020-06-21

基金项目:江苏省六大人才高峰项目(GDZB-040),国家自然科学基金项目(51005124)

通信作者:倪晓宇,教授,E-mail: xiaoyuni@njfu.edu.cn

性能方面的研究主要集中在载荷谱的简化与表述、支架应力/应变、疲劳裂纹、疲劳寿命预测 4 个方面。本文从理论分析、数值模拟和实验研究三方面对食管支架疲劳性能的研究进行综述,分析目前的不足,并对未来研究方向进行展望,以期对食管支架或其他消化道支架疲劳性能的后续研究提供参考。

1 理论分析

造成疲劳破坏的载荷形式有多种,如力、应力、应变或位移等,而疲劳破坏过程大致经历 4 个时期,即疲劳成核期、微观裂纹增长期、宏观裂纹扩展期、断裂期。目前用于疲劳性能分析与评估的理论有疲劳累积损伤法、Goodman 法、疲劳裂纹扩展法等,故对食管支架疲劳性能理论方面的研究同样基于原有的疲劳理论而展开。

线性 Miner 疲劳累积损伤理论公式为:

$$D = \sum_{i=1}^k D_k = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中: n_i 为每一应力幅作用下用掉的疲劳寿命周次; N_i 为每一应力幅作用下理论疲劳寿命周次; D_k 为每一应力幅作用下疲劳损伤; D 为支架结构所承受的总损伤,当 $D = 1$ 时,表示支架结构完全损伤,疲劳破坏发生。与不同应力水平 σ_i 对应的寿命 N_i 需要根据材料 S-N 曲线确定。

王果^[6]采用简化的弹塑性假设,利用线性Miner疲劳累积损伤理论对编织型食管支架的疲劳寿命进行分析,并研究覆膜对支架疲劳寿命的影响。

美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 推荐用 Goodman 准则来评价支架疲劳寿命^[7]。Goodman 疲劳分析通常把平均应力/应变和平均应力/应变幅值用于材料或结构疲劳安全系数的评估。基于应变修正的 Goodman 疲劳分析法,常常用于镍钛合金支架的疲劳分析^[8-10],即当支架结构的应变状态满足式(2)时,支架即发生疲劳失效:

$$\left(\frac{\varepsilon_\alpha}{\varepsilon_e}\right) + \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_u}\right) \geq 1 \quad (2)$$

式中: ε_α 为应变振幅; ε_e 为非零平均应变的修正材料耐久极限; ε_m 为平均应变; ε_u 为材料极限应变。

裂纹扩展对疲劳的影响也非常大。由于支架

在制造过程中会产生损伤,从而在其表面造成潜在裂纹;或支架在腐蚀环境中可能产生腐蚀坑^[11],故在研究支架疲劳寿命时也需要考虑这些因素。支架疲劳裂纹扩展理论基于裂纹增长率。疲劳裂纹扩展速率是在疲劳载荷作用下裂纹长度随循环载荷周次的变化率,反映裂纹扩展的快慢,其公式为:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

式中: ΔK 为应力强度因子; C 和 m 为描述支架材料疲劳裂纹扩展性能的基本参数。有学者基于断裂力学和裂纹扩展理论,评估支架表面缺陷对支架疲劳寿命的影响,这为定量描述裂纹对支架疲劳造成的影响提供理论基础^[12]。此外,针对食管支架裂纹扩展对疲劳性能的影响,还未见太多报道。

由于食管支架结构(编织结构或激光雕刻)和材料的特殊性(编织后退火处理,消除编织过程中的预应力并将支架定型),在研究其疲劳性能时需要将原有的疲劳分析理论作相应的修正,才能更好地与实际情况符合。因此,前期学者基于疲劳理论分析支架疲劳性能,可以给临床应用提供参考依据,但针对食管支架的疲劳分析理论还需要结合支架结构、材料特点以及支架工作环境进行更为深入的研究。

2 数值模拟

数值模拟是研究食管支架疲劳性能的一个重要方法。基于有限元仿真技术来研究和预测支架的疲劳寿命可以将支架结构、支架服役生理环境的特殊性以及影响疲劳寿命的各种力学因素等作综合考虑^[13]。实现食道支架疲劳性能的数值分析,一般会涉及以下 3 个部分:载荷谱分析、支架应力应变和疲劳寿命预测。

2.1 载荷谱分析

只有在承受扰动应力作用的条件下,支架疲劳才会发生。而支架服役期间所承受的主要的扰动应力来源于食管的蠕动波,即食管蠕动波是促使支架疲劳的载荷。因此,在进行数值分析时,必须对食管蠕动波进行分析和表征。食管蠕动波由食管蠕动收缩形成,与口咽部的 P 波相续接,是一个大的单向正波,波形对称,由静息状态迅速升高,并以同样速度下降至静息状态的水平。由正常人吞咽

时的食管蠕动波形可知,正常食管蠕动波的波形有三角脉动的特点,脉动频率整体相对平稳(见图1)。

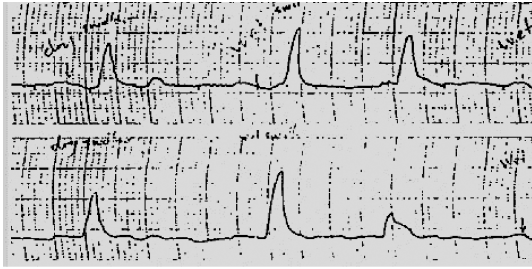


图1 正常人食管吞咽蠕动图^[14]

Fig.1 Esophageal swallowing peristalsis in normal people^[14]

然而,食管不同部位的蠕动波行进速度并不相同,个体之间有差异,峰压及时程在食管各部位也有区别,具体参数见表1。选取食管中部的蠕动波,分析该蠕动波的运动特点,并将蠕动波用理想的三角形波代替,时程2 s,幅值为9.8 kPa^[15]。

表1 食管蠕动参数^[15]

Tab.1 Esophageal peristalsis parameters^[15]

| 参数 | 食管上部 | 食管中部 | 食管下部 |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 蠕动波进行平均速度/(mm·s ⁻¹) | 31.3±5.9 | 20.0~40.0 | 27.1±5.4 |
| 蠕动波时程/s | 5.1±0.68 | 2~4 | 5.5±0.6 |
| 波峰压/kPa | 6.00±1.66 | 9.80 | 6.50±2.19 |
| 波在各段的出现时间/s | 2.1 | 5.1 | 7.9 |

倪晓宇等^[16]将食管的蠕动转化为周期载荷,并采用三维梁单元模拟支架丝线结构,将食管对支架的压缩作用转化为边界条件,完成编织型镍钛合金食管支架疲劳性能分析(见图2)。也有学者把支架受到的蠕动波载荷看成脉动疲劳载荷。例如,Hsiao等^[9]仅给镍钛合金支架施加一定的脉动疲劳载荷,并通过变细杆臂的支柱宽度来研究变截面结构对支架疲劳寿命的影响。食管蠕动产生的蠕动波以及食管肿瘤的大小、生长部位、形状等都存在个体差异,上述对食管蠕动波的处理方式存在很大的局限,与实际情况相差较大,但目前鲜有相关文献对此问题有更深入的研究。

2.2 基于应力或应变的支架疲劳行为数值模拟

不同的支架类型会有不同类型的疲劳行为。球囊扩张支架的疲劳行为由应力控制,应力-应变呈线性关系^[17]。自膨胀式支架的疲劳行为则属于

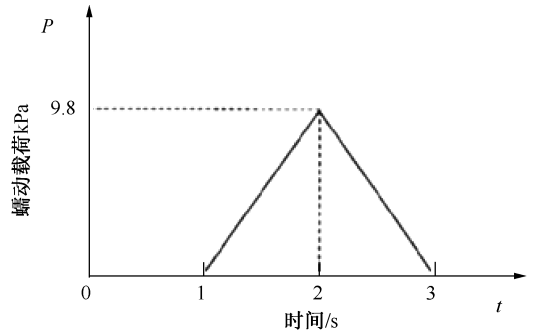


图2 蠕动波^[16]

Fig.2 Peristaltic wave^[16]

应变控制,而应变控制型的疲劳行为因宏观塑性变形具有明显的高应变性,故应力-应变呈非线性关系。

Meoli等^[18]对支架施加循环轴向压缩载荷,发现支架及其介入耦合系统间相互作用会影响支架结构的应变幅值和平均应变,从而影响支架的疲劳寿命。有学者通过数值仿真对球囊扩张金属支架进行研究,发现最大应变以及最大交变应力都发生在支架结构曲率较大的区域^[19-20]。Wu等^[21]也推断,支架在弯曲管腔中的最大应力/应变以及疲劳破坏主要集中在支架的弯曲和重叠位置。上述研究结果都给支架结构疲劳断裂发生区域和位置做出了合理解释。

目前,临床常用的编织型食管支架具有多种不同的端部形状,它们的疲劳寿命会因此而不同。倪晓宇等^[22]对直筒形、喇叭形和杯球形3种不同端部形状的编织型支架在食管内工作状态下的应力状态进行分析,并采用Goodman准则对其疲劳性能进行分析和比较。结果表明,支架的结构形式也会影响支架工作时的应力状态,从而影响支架的疲劳寿命。

食管支架的应力、应变对支架疲劳性能有决定性的影响,但在上述文献研究中依然存在局限性,而这些局限性由于食管材料属性参数的近似性、食管及其病变组织模型的理想化、食管病变组织的个体差异性等因素的存在而无法避免。

2.3 支架疲劳寿命预估

预测支架的疲劳寿命是支架临床应用前的首要工作。倪晓宇等^[22]通过数值模拟分析编织型食管支架的结构参数对支架疲劳性能的影响,对不同

端部形状支架的疲劳寿命分别进行预测。结果表明,支架的疲劳寿命均能满足临床应用。王果^[7]考虑食管壁、肿瘤、蠕动波等因素对支架疲劳寿命的影响,认为支架覆膜有助于提高支架疲劳寿命。James等^[23]总结几种常用预测和验证金属支架疲劳寿命的方法,最后建议采用有效的应力-寿命或应变-寿命疲劳分析方法作为食管支架疲劳寿命的预测方法。Grujicic等^[24]结合自膨胀镍钛合金支架与流固耦合有限元计算方法,基于疲劳的耐久性分析技术,将计算工程分析工具用于高周疲劳寿命支架研制中,为预测支架的疲劳寿命奠定基础。此外,有关管腔中酸性环境的数值模拟目前鲜有报道,但临床医生根据上消化道酸性环境的特点,发现选用表面耐腐蚀性材料的支架对提高支架疲劳寿命具有意义,并且对胃酸强烈的病人进行抑酸治疗也有助于提高支架的疲劳寿命^[25]。

综上所述,先进的计算方法、疲劳寿命预测方法及现有材料疲劳数据相结合为预测支架的疲劳寿命奠定了基础。然而,现有研究大多是针对影响支架疲劳寿命的单一关键因素而展开,但实际支架的疲劳寿命会受到支架植入前后的几何特征、管腔形状、病变组织、体温和腐蚀等多种因素的影响。因此,当前的研究结果虽具有一定参考价值,但仍有很大的局限性和不确定性。

3 食管支架疲劳实验

食管支架疲劳性能的测试包括体外实验和体内实验。通过实验可更好地了解支架的疲劳性能,同时也可以用于理论计算和数值模拟正确性的验证。因此,众多学者设计相关的实验装置来实现支架的体外疲劳实验。目前,用于食管支架疲劳性能的体外测试方法主要有“大单元”测试法和疲劳加速测试法^[26]。

“大单元”测试法,即将支架的基本单元分离出来,并将单元置于生理盐水中,然后通过闭环电机测试系统,施加一定频率的宽脉压,直到支架出现裂纹。Pelton等^[27]采用“大单元”测试法实现支架的疲劳性能试验。

疲劳加速测试法,是通过改变载荷幅值和频率使支架快速疲劳,并通过时间或周期次数表示支架实际疲劳寿命。倪晓宇等^[28]采用疲劳加速实验测

试食管支架的疲劳性能,虽然测试结果与有限元仿真的趋势一致,但并未考虑支架材料受体液腐蚀、温度等其他因素的影响,故试验结果存在较大的偏差。龙志红^[29]基于LabView开发环境研制出一种疲劳测试装置,该装置采用丝线缠绕的方式实现食管对支架的蠕动载荷的作用(见图3)。该试验装置能够预测支架在模拟人体温度和体液酸碱环境下的疲劳寿命,但因为绳索缠绕的加载方式使得支架与绳索之间存在较大的摩擦,会影响支架的疲劳寿命,故测试结果仍会存在偏差。

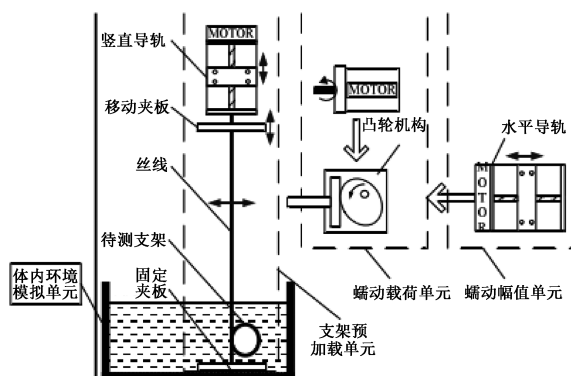


图3 支架疲劳性能检测装置(丝线缠绕式)原理图^[29]

Fig.3 Schematic diagram of support fatigue performance testing device (filament winding type)^[29]

Gu等^[30]考虑食管蠕动波的特点,创造性地利用凸轮机构模拟食管蠕动载荷,该结构简单紧凑,响应速度快,但单边载荷模式为该实验装置中最大的不足(见图4)。

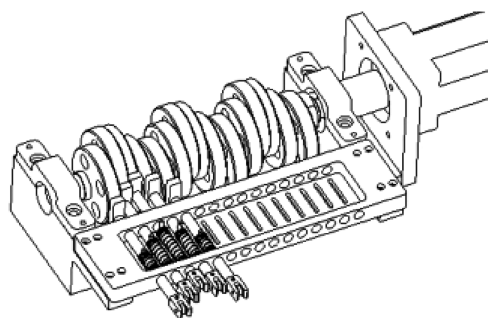


图4 支架疲劳试验装置(凸轮式)原理图^[30]

Fig.4 Schematic diagram of support fatigue test device (cam type)^[30]

为了改变上述实验方案中存在的不足,殷红莲等^[31]提出采用液压环形加载装置,该装置沿支架轴

向往复运动对支架施加环向周期性载荷,从而实现支架受人体内腔道生理蠕动的的作用,完成支架疲劳性能的测试(见图5)。然而,该实验装置也存在缺陷,即液压加载装置出口压力存在不均匀性,且支架疲劳断裂无法实现自动检测。

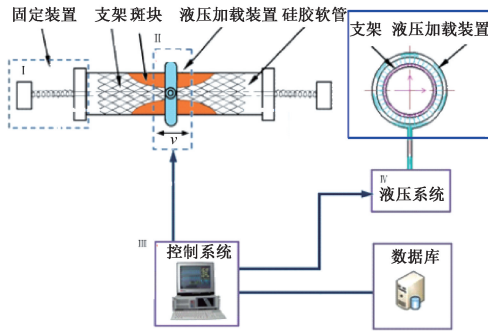


图5 支架疲劳性能测试装置(液压式)原理图^[31]

Fig.5 Schematic diagram of support fatigue performance test device (hydraulic type)^[31]

上述实验装置都充分考虑蠕动波对支架疲劳性能的影响。值得一提的是,目前传统的检测装置无法检测支架疲劳而产生的微裂纹,虽然 Park 等^[32]设计了支架疲劳性能测试装置(波纹管蠕动式),采用电位检测法对支架的疲劳断裂进行检测,与传统检测装置相比,具有精度高的特点,但未能确定支架产生初始裂纹和断裂发生时的精确时间,故需进一步完善(见图6)。此外,支架表面裂纹对疲劳性能影响非常重要,目前 Stankiewicz 等^[13]对超弹性奥氏体材料中镍钛合金的疲劳裂纹扩展特性进行了实验研究,通过实验获得疲劳裂纹扩展速率,并结合修正的 Paris 定律关系描述镍钛合金支架的疲劳裂纹扩展特性。

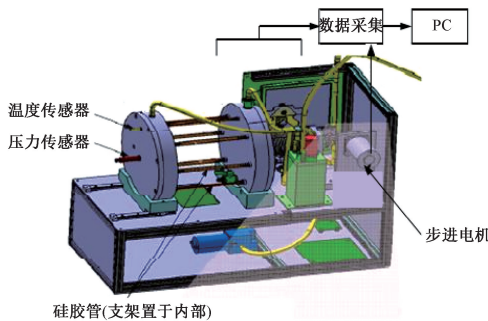


图6 支架疲劳性能测试装置(波纹管蠕动式)原理图^[32]

Fig.6 Schematic diagram of bracket fatigue performance test device (bellows peristaltic type)^[32]

由于食管支架的疲劳加速测试法都是使支架在较短时间内发生疲劳断裂,故均未考虑支架服役环境内的肉芽增生、腐蚀、附着、反流、肿瘤分化程度及临床分期等的影响。

在对食管支架疲劳实验与检测方面,大多研究者都围绕各自设定的应用背景而展开,缺少考虑在生物体腔道病变环境下的多重因素(消化道系统的节律性收缩、肠道的自然生理弯曲、腔道的非圆特征、腔道多层的生物组织以及组织的非零应力状态等)对支架影响的实验。又由于缺乏足够准确的检测手段,目前所采用的疲劳寿命测试方法容易导致实验结果有较大的误差,对于支架结构的疲劳断裂检测技术以及断裂时间的精确测定方法还需深入研究。

4 展望

研究食管支架疲劳性能已经取得了较多的成果,但依然还有很多问题亟待解决:

(1) 目前现有疲劳理论都是根据工业及生产实践经验总结形成,其典型应用对象与应用于食管等非血管支架的诸多特征是不同的。因此,需要通过实验来修正疲劳分析数学模型,从而为食管支架等非血管支架结构建立更为合理的疲劳计算模型或理论。

(2) 在数值模拟过程中,虽然考虑食管蠕动波、支架应力/应变对疲劳的影响,但依然未能模拟出腔道病变环境下诸多因素对支架的影响。因此,综合考虑多种因素的作用,或针对不同腔道中不同因素对不同支架的影响建立系列化、系统化的数据库,为分析临床上可能存在的特殊情况对支架疲劳性能影响提供参考。

(3) 疲劳性能测试的实验设备已开发了很多,但现有的实验装置仍有很大局限性:一是自身所能模拟食管对支架的影响较少,与支架植入食管内的真实情况相差较大;二是对于测试支架较为单一,无法很好应用于不同型号支架的疲劳性能测试;需要进一步研究支架微小裂纹的检测装备以及支架疲劳断裂检测装置或方法。

(4) 由于支架疲劳性能分析的动物实验目前鲜有专题报道,故可通过动物实验获得食管支架疲劳寿命更加客观的数据。同时,为探明食管支架对

人体的实际功效,保证支架的有效性和安全性,临床试验也必不可少。

参考文献:

- [1] 倪晓宇,倪中华,潘长网.基于有限元仿真的食管支架疲劳寿命计算[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(5):918-922.
- [2] 张玉言,吴梦实,张钰哲,等.非均质材料非牛顿弹流润滑特性及疲劳寿命研究[J].机械科学与技术,2019,38(10):1490-1495.
- [3] 刘艳文,施小立,罗丹,等.镍钛合金医疗器械产品疲劳测试断裂原因分析[J].热处理技术与装备,2019,40(4):45-48.
- [4] 王建宇,李佳戈,刘丽,等.镍钛合金颈动脉支架的长期加速腐蚀疲劳测试[J].北京生物工程,2007,26(1):78-80.
- [5] 韩鹏,毛智勇,余伟,等.TC18钛合金电子束焊接接头DFR常规及腐蚀疲劳对比研究(英文)[J].稀有金属材料与工程,2013,42(S2):213-216.
- [6] 王果.食管支架数字化设计与分析系统的研究[D].南京:东南大学,2012.
- [7] THUY MP, MILTON DH, WEI S. Analysis and simulation of PTMA device deployment into the coronary sinus: Impact of stent strut thickness [M]. New York: Springer, 2011.
- [8] 倪晓宇,张嫣红,陆蓓蓓,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.
- [9] HSHAO HM, YIN MT. An intriguing design concept to enhance the pulsatile fatigue life of self-expanding stents [J]. Biomed Microdevices, 2014, 16(1): 133-141.
- [10] 李红霞,张艺浩,王希诚.基于有限元模拟的支架扩张、血流动力学及支架疲劳分析[J].医用生物力学,2012,27(2):178-185.
LI HX, ZHANG YH, WANG XC. Analysis of stent expansion, blood flow and fatigue life based on finite element method [J]. J Med Biomech, 2012, 27(2): 178-185.
- [11] 焦晋峰.基于累积损伤及断裂力学理论的高强螺栓疲劳寿命估算[D].太原:太原理工大学,2005.
- [12] STANKIEWICZ JM, ROBERTSON SW, RITCHIE RO. Fatigue-crack growth properties of thin-walled superelastic austenitic Nitinol tube for endovascular stents [J]. J Biomed Mater Res Part A, 2007, 81A(3):685-691.
- [13] WHITCHER FD. Simulation of *in vivo* loading conditions of nitinol vascular stent structures [J]. Comput Struct, 1997, 64(5-6):1005-1011.
- [14] GREGERSEN H. 胃肠生物力学——胃肠动力学新视角 [M]. 北京:人民卫生出版社,2006.
- [15] 王其彰.食管外科[M].北京:人民卫生出版社,2005.
- [16] 倪晓宇,潘长网,王云霞,等.食管支架变形数值模拟与疲劳寿命的分析研究[J].中国机械工程,2009,20(23):2856-2860.
- [17] MARREY RV, BURGERMEISTER R, GRISHABER RB, et al. Fatigue and life prediction for cobalt-chromium stents: A fracture mechanics analysis [J]. Biomaterials, 2006, 27(9):1988-2000.
- [18] MEOLI A, DORDONI E, PETRINI L, et al. Computational study of axial fatigue for peripheral nitinol stents [J]. J Mater Eng Perform, 2014, 23(7):2606-2613.
- [19] LI JJ, LUO QY, XIE ZY, et al. Fatigue life analysis and experimental verification of coronary stent [J]. Heart Vessels, 2010, 25(4):333-337.
- [20] KAJZER W, KACZMAREK M, MARCINIAK J. Biomechanical analysis of stent-oesophagus system [J]. J Mater Process Technol, 2005, 162(1):196-202.
- [21] WU W, WANG WQ, YANG DZ, et al. Stent expansion in curved vessel and their interactions: A finite element analysis [J]. J Biomech, 2007, 40(11):2580-2585.
- [22] 倪晓宇,赵海霞,殷红莲,等.端部形状对支架-食管耦合系统力学行为的影响[J].医用生物力学,2018,33(2):101-107.
NI XY, ZHAO HX, YAN HL, et al. Influence of end shapes on biomechanical behavior of the stent-esophagus coupling system [J]. J Med Biomech, 2018, 33(2):101-107.
- [23] JAMES BA, SIRE RA. Fatigue-life assessment and validation techniques for metallic vascular implants [J]. Biomaterials, 2010, 31(2):181-186.
- [24] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, ARAKERE A, et al. Fatigue-life computational analysis for the self-expanding endovascular nitinol stents [J]. J Mater Eng Perform, 2012, 21(11):2218-2230.
- [25] 尚占民,高岩,关玉盘,等.食管裂孔疝患者食管蠕动功能的变化[J].中华消化内镜杂志,2002,19(3):159-161.
- [26] 张嫣红,倪晓宇.介入治疗用支架力学性能的研究方法综述[J].医用生物力学,2017,32(5):481-486.
ZHANG YH, NI XY. Review of research methods on mechanical properties of interventional stent [J]. J Med Biomech, 2017, 32(5):481-486.
- [27] PELTON AR, SCHROEDER V, MITCHELL MR, et al. Fatigue and durability of Nitinol stents [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2008, 1(2):153-164.
- [28] 倪晓宇,陆蓓蓓,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.
- [29] 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.
- [30] GU XZ, LIU L, NI ZH, et al. Investigation on the design and experimental application of novel fatigue testing device for esophagus stent [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu; IEEE, 2013.
- [31] 殷红莲.编织型食管支架力学性能液压系统测试装置的研究[D].南京:南京林业大学,2013.
- [32] PARK CH, TIJING LD, PANT HR, et al. Accelerated *in vitro* durability testing of nonvascular nitinol stents based on the electrical potential sensing method [J]. Appl Phys A, 2013, 112(4):919-926.