

文章编号: 1004-7220(2021)01-0158-06

抗反流胆道支架研究现状及进展

王越¹, 宋晓菲¹, 徐新生²

(1.天津大学机械工程学院,机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津 300350; 2.天津市南开医院肝胆胰外科,天津 300100)

摘要:胆道支架是治疗恶性胆道梗阻的有效手段,而常规胆道支架术后普遍存在肠胆反流,从而引发胆道逆行感染、支架堵塞等并发症,严重降低了患者生存质量。目前,抗反流胆道支架被认为是兼顾引流与抑制肠胆反流功能的具有前景的姑息性治疗手段。对抗反流胆道支架的研究现状进行综述,重点对抗反流瓣膜的功能设计与评估、瓣膜与本体支架连接设计、抗反流胆道支架生物力学问题等方面进行概述总结,并对抗反流胆道支架的当前研究进展与趋势进行总结与分析。

关键词:胆道支架; 肠胆反流; 抗反流; 生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.025

Research Progress of Anti-Reflux Biliary Stent

WANG Yue¹, SONG Xiaofei¹, XU Xinsheng²

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Department of Hepatopancreatobiliary Surgery, Tianjin Nankai Hospital, Tianjin 300100, China)

Abstract: Biliary stent is an effective method for treating malignant biliary obstruction. However, duodenobiliary reflux is commonly found after conventional biliary stent, which causes complications such as biliary retrograde infection and stent blockage, and seriously reduces the quality of patients' life. At present, anti-reflux biliary stent is considered as a promising palliative treatment method taking drainage and preventing duodenobiliary reflux into account. In this paper, research status of anti-reflux biliary stent was reviewed, and key problems such as design and evaluation of anti-reflux valve, valve and stent connection design, biomechanical analysis of anti-reflux biliary stent were mainly summarized. The current research progress and trend of anti-reflux biliary stent were summarized and analyzed.

Key words: biliary stent; duodenobiliary reflux; anti-reflux; biomechanics

肝胆系统疾病是外科消化系统第三大常见疾病,具有发病率及死亡率高、并发症多等特点^[1-2]。临床常见的肝胆系统疾病如胆囊癌、胰腺癌、壶腹肿瘤等常伴随远端恶性胆道梗阻发生,致使胆汁引流不畅,继而造成梗阻性黄疸等并发症。胃肠内窥

镜下植入胆道支架已成为治疗恶性胆道梗阻较为成熟的姑息性疗法^[3]。然而胆道支架经 Oddi 括约肌植入胆道后会造成功能失效,术后普遍存在肠胆反流问题,进而引发胆道逆行感染、胆道炎、腹绞痛等并发症。临床研究表明,自膨胀金

收稿日期:2020-03-05; 修回日期:2020-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51875404),天津市自然科学基金项目(18JCYBJC19700)

通信作者:宋晓菲,副教授,E-mail: xiaofeison@tju.edu.cn

属胆道支架术后胆道炎发生率高达 22%, 严重影响了患者的生存质量, 而且肠胆反流也是导致支架二次堵塞的重要原因^[4-6]。为缓解肠胆反流, 临床常采用胆管空肠吻合术, 该方法将胆管与小肠上段空肠相吻合, 以使胆汁顺利流入肠道, 虽然距离较长的空肠可在一定程度上缓解肠道食糜反流入胆道, 但术后仍存在不同程度的肠胆反流及其并发症, 肠胆反流问题始终没有得到有效解决^[7-8]。

因此, 如何设计一种既能实现胆汁通畅引流、又能有效抑制肠胆反流的胆道支架是肝胆外科医生与生物制造领域学者一直努力的方向。本文针对抗反流胆道支架的研究现状及进展进行综述, 着重介绍抗反流瓣膜的结构设计与评估、瓣膜与本体支架的连接设计、支架生物力学分析等内容。

1 抗反流胆道支架的本体结构

抗反流胆道支架结构通常包含本体支架和抗反流瓣膜两个部分, 即在传统胆道支架的十二指肠端附加抗反流瓣膜, 旨在实现胆汁通畅引流的同时抑制肠胆反流发生。其中, 本体支架结构主要为传统塑料胆道支架和金属胆道支架。塑料支架材料以聚四氟乙烯为主, 一般采用无侧孔支架结构, 以防止肠腔内容物绕过瓣膜通过侧孔反流入胆道^[9-11]; 金属支架材料以镍钛记忆合金为主, 主要为编织网状结构。金属支架依其有无覆膜, 又可进一步分为裸支架和覆膜支架, 覆膜支架可防止肿瘤向支架内生, 但在一定程度上增加了支架移动的风险。临床上, 金属支架因具有更大的膨胀直径而使其通畅期一般长于塑料支架, 但也因此使其发生肠胆反流和胆道逆行感染的风险变得更高。

2 抗反流胆道支架的瓣膜结构

2.1 漏斗形瓣膜

漏斗形抗反流瓣膜金属胆道支架如图 1 所示, 该类支架一般为两层金属编织支架之间夹一层膨化聚四氟乙烯膜, 将该薄膜延长出支架尾端 7~10 mm 作为漏斗形瓣膜, 并在支架尾端伸出 4 条约 5 mm 长金属丝以保持瓣膜形状。该瓣膜可实现胆汁通畅引流, 且当十二指肠逆压升高时瓣膜被压缩, 可阻止肠胆反流发生。有研究者将漏斗形瓣膜抗反流金属胆道支架作为二次介入治疗手段, 以替

换堵塞的普通金属支架和塑料支架; 结果表明, 抗反流支架的通畅率及通畅期均高于之前堵塞的金属支架和塑料支架^[12-13]。Hamada 等^[14]通过临床试验初步证明, 将带有两端扩口抗移动设计的漏斗形瓣膜抗反流金属胆道支架用于远端恶性胆道梗阻治疗具有可行性。然而, 也有研究表明, 与普通覆膜金属支架相比, 将漏斗形瓣膜抗反流金属支架作为一次介入治疗方案并不会明显延长支架通畅期, 且该类型支架不能完全抑制由肠胆反流所造成的支架功能失效^[15-17]。

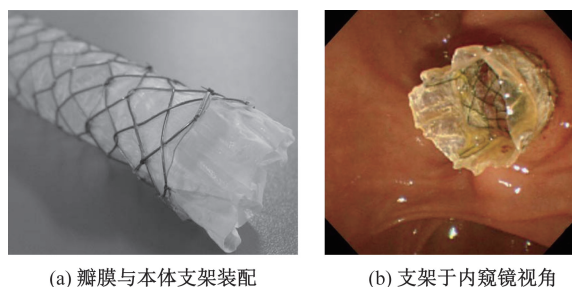


图 1 漏斗形瓣膜抗反流支架^[13-14]

Fig.1 Funnel-shaped valve anti-reflux stent^[13-14]

(a) Assembly of valve and body stent, (b) Endoscopic view of stent

2.2 风向袋瓣膜

风向袋抗反流瓣膜金属胆道支架如图 2 所示, 该类支架一般将覆膜自膨胀金属支架的延长覆膜部分作为风向袋瓣膜, 或将膨化聚四氟乙烯风向袋瓣膜绑定固结于塑料支架尾端, 瓣膜长度为 20~40 mm。该瓣膜允许胆汁顺流时沿着瓣膜流出, 当肠腔逆压升高时瓣膜被压缩, 可阻止肠道内容物反流入胆道。有学者研制的风向袋瓣膜塑料和金属抗反流胆道支架在体外平台试验与体内临床试验中均表现出优良的抗反流性能, 并对延长支架通畅

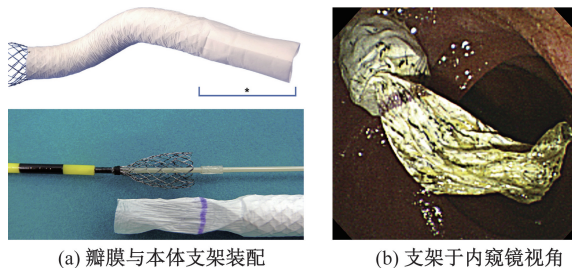


图 2 风向袋瓣膜抗反流支架^[18]

Fig.2 Windsock valve anti-reflux stent^[18] (a) Assembly of valve and body stent, (b) Endoscopic view of stent

期具有明显效果^[11,18]。吕尚东等^[19]的病例回顾分析表明,风向袋瓣膜塑料抗反流支架在通畅期、存活率、胆道炎发生率等方面具有较好的远期疗效。然而,临床研究表明,在普通塑料胆道支架上附加一个风向袋瓣膜容易使其发生扭曲变形,阻塞胆汁流动并造成支架堵塞;与普通塑料支架相比,通畅期明显降低^[10,20]。

2.3 S形瓣膜

该类瓣膜一般由硅胶制成,固定于金属支架内部,瓣膜长度略小于支架总长(见图3)。胆汁顺流时,瓣膜在胆汁流动和胆道压力作用下打开,可实现胆汁通畅引流;十二指肠逆压升高时,瓣膜被压紧关闭,阻止肠胆反流发生。Lee等^[21]研制的S形瓣膜抗反流金属胆道支架对延长通畅期具有一定效果,但因该瓣膜可能没有完全阻止肠胆反流的发生,使得临床试验中因胆泥淤积而造成的支架失效率相对较高。Cho等^[22]针对胰腺假性囊肿和坏死物包裹等急性胰腺炎并发症,基于内镜超声引导引流技术,采用S形瓣膜抗反流金属支架抑制由食物反流造成的感染性并发症,在临床试验中取得了良好的治疗效果。

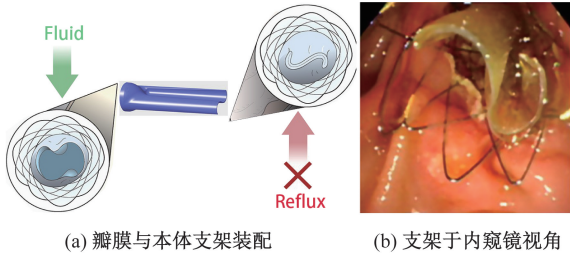


图3 S形瓣膜抗反流支架^[21-22]

Fig.3 S-shaped valve anti-reflux stent^[21-22]

(a) Assembly of valve and body stent, (b) Endoscopic view of stent

2.4 其他瓣膜

其他抗反流瓣膜结构如图4所示。瓣膜均固定于金属支架尾端内部,或绑定固结于塑料支架尾端。乳头形和鸭嘴形瓣膜在胆汁顺流时被打开,当肠腔逆压升高时被压缩关闭;半球形和酒杯形瓣膜结构在发生肠胆反流时,可对反流物形成阻碍。Hu等^[4,23]研制的半球形与乳头形瓣膜抗反流金属胆道支架在临床试验中均对延长支架通畅期具有一定效果,但因研究中缺少严格的对照组与对比性,使

抗反流支架治疗效果缺少足够的说服力。Yuan等^[9]所设计的鸭嘴形瓣膜塑料抗反流胆道支架对于延长支架通畅期具有明显效果,但对于提高病人存活率无明显效果。Kim等^[24]研制的酒杯状瓣膜抗反流金属支架在临床试验中出现了严重的堵塞。齐静等^[25]病例分析表明,单猪尾塑料抗反流胆道支架与普通塑料支架相比,其反流率和梗阻率更低。

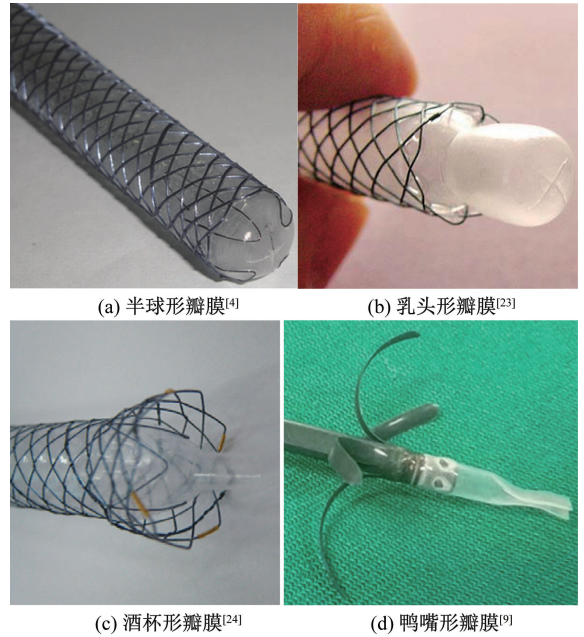


图4 不同抗反流瓣膜设计

Fig.4 Different anti-reflux valve design (a) Hemispheric valve^[4], (b) Nipple-shaped valve^[22], (c) Wine-glass-shaped valve^[24], (d) Duckbilled valve^[9]

综上所述,当前针对抗反流胆道支架的治疗效果仍存在一定的争议。为探究抗反流胆道支架的失效原因,Kwon等^[26]基于体外平台试验分析胆汁流动状态与十二指肠pH环境对漏斗形、风向袋、酒杯形瓣膜的失效影响。结果表明,酒杯形瓣膜受胆汁流动影响发生形态变化;所有类型瓣膜受pH环境影响发生形态变化,并致使胆汁顺流阻力增加,由此说明十二指肠pH环境对瓣膜形态和抗反流支架失效影响更大。

抗反流瓣膜的结构设计对于支架的治疗效果具有重要影响,若其设计不合理,则容易出现胆汁引流不畅^[10]、抗反流效果不佳^[16]、食物嵌塞^[24]等问题。瓣膜的引流与抗反流性能似乎是一对矛盾体,目前临床研究中常见的抗反流瓣膜设计难以很

好地兼顾二者性能,诸如风向袋瓣膜^[10,18,27]、乳头形瓣膜^[23]、球形瓣膜^[4]、鸭嘴形瓣膜^[9]等设计具有可靠的抗反流性能,但仍存在胆汁引流不畅、瓣膜扭曲变形、食物嵌塞堵塞等风险;漏斗形瓣膜^[15,17]、S形瓣膜^[21]引流效果良好,却有可能无法有效阻止肠胆反流的发生。以经验观之,闭合式、长尺寸的瓣膜结构对于抑制肠胆反流、延长支架通畅期似乎更有效,但这类瓣膜结构容易造成胆汁引流不畅^[17]。如何设计一个更有效的抗反流瓣膜,对于肝胆外科医生与生物制造领域学者来说仍具有较大挑战。

3 瓣膜与本体支架连接设计

目前抗反流胆道支架主要设计方式是在传统自膨胀金属支架或塑料支架的十二指肠端附加抗反流瓣膜,如将风向袋瓣膜、鸭嘴形瓣膜绑定固结于塑料支架尾端或将覆膜金属支架的延长覆膜部分作为风向袋瓣膜^[9-11,18],将半球形、S形、酒杯形、乳头形瓣膜固定于金属支架尾端内部^[4,21,23-24]。由于支架增加了瓣膜结构,会给抗反流支架的输送和释放带来不同程度的影响。在抗反流胆道支架的诸多临床研究中,支架植入技术成功率基本为100%。采用标准手术程序即可满足抗反流支架的植入需求,瓣膜的附加并没有明显增加支架的植入程序难度^[4,9,21,24]。但不同瓣膜设计仍会给支架植入带来不同程度的技术难度增加,如风向袋瓣膜要考虑瓣膜的顺利展开及其扭曲变形风险;漏斗形瓣膜的附加致使输送系统直径增加,且瓣膜部分在输送过程中易发生扭曲变形^[10-11,14,18]。对自膨胀金属抗反流支架来说,支架十二指肠端附加瓣膜可能导致支架在该位置未能完全膨胀。同时,升高的胆汁流动压强作用在瓣膜上,可能会导致支架移动^[17]。因此,应该针对瓣膜与支架的连接展开优化设计研究,避免瓣膜的附加对支架的输送和释放造成不利影响;还应不断改善抗反流支架输送技术,以降低手术操作时间和相关并发症发生率^[22]。

4 支架生物力学分析

目前针对抗反流胆道支架的设计和生物力学性能评估主要依赖于医生的经验性设计、临床试验以及少部分体外平台试验,临床试验虽然效果直

观,但其试验周期长、成本高,所获得的成果信息有限,且在试验期间样本数量和质量等因素可控性相对较差,容易使研究缺乏严格的对比和对照,难以实现不同支架结构治疗效果的对比性分析和优化设计研究,因此针对抗反流胆道支架生物力学性能的定量化、细致化研究成果十分稀少。

目前针对人体各类常规型血管与非血管支架生物力学性能的研究成果十分丰富,研究方法以仿真分析为主,辅以实验测试和理论建模研究,其中所涉及的分析方法与研究成果对抗反流胆道支架生物力学性能的定量化、细致化研究具有很高的借鉴价值^[28]。在支架基本生物力学性能分析方面,张宏辉等^[29]采用仿真技术研究支撑体数目、长度和初始直径对镁合金冠脉支架支撑性能的影响规律,并基于Kriging代理模型理论对支架刚度进行仿真优化分析;赵艺文等^[30]针对胸主动脉瘤Z型覆膜支架采用仿真技术研究支架波峰高度、数目、顶端圆弧半径及支架丝径等结构参数对其柔顺性能的影响规律;Moon等^[31]将自膨胀编织型金属裸支架等效成一组独立的开式螺旋弹簧,将编织型聚合物涂层金属支架等效为螺旋弹簧与丝线节点扭转弹簧的组合,将编织型覆膜金属支架等效为螺旋弹簧、扭转弹簧及轴向拉伸弹簧的组合,以上述力学模型为基础建立可预测支架膨胀性能的理论模型,并实验验证该理论模型的有效性。在支架-管腔耦合系统接触力学分析方面,Peirlinck等^[32]建立食管支架参数化仿真模型,并采用医疗影像建模技术针对病人特定的食管解剖结构建立精确的分层异构食管有限元模型;该模型考虑了食管体内应力状态和蠕动收缩等因素,最后对支架在食管模型内的释放过程进行仿真分析,得到两者接触应力状态。为对血管支架术后二次狭窄并发症进行准确的预测评估,He等^[33]将伪弹性损伤机制分别融入血管斑块的各向同性本构模型以及血管中膜和外膜的各向异性本构模型,并对血管中膜添加组织增长模型用以描述其受支架应力刺激而引发的增生行为,最后支架在血管模型内的植入仿真结果比较准确地分析了支架术后二次狭窄的发生机制和影响因素。Girard等^[2]针对人体胆管的组织学观测和力学实验表明,胆管的四层异构微观结构以及各层组织中纤维力学特性和分布方向不同,造成胆管具有各向异性和

黏弹性等力学属性。在胆道系统流变学研究方面, Kuchumov 等^[34-35]针对病理胆汁的实验测试表明其具有非牛顿流体特性,并得到病理胆汁 Casson 和 Carreau 本构模型及参数;同时基于 Casson 模型对胆汁在胆道系统内的流动状态进行仿真分析,得到相应的速度场与压力场状态;基于 Carreau 模型构建病理胆汁在狭窄括约肌管道内的蠕动流动数学模型,得到胆汁流动的速度场与压力场解析解,并基于该理论模型对胆胰反流的发生机制与临界条件进行分析判断。

参考上述研究方法与成果,可对抗反流胆道支架的生物力学性能展开更加细致丰富的研究,如对抗反流胆道支架支撑性、柔顺性、膨胀性等基本力学性能进行量化分析,明确抗反流结构增加对支架整体力学性能的影响;针对胆管及其病理组织建立合适的本构模型,进而对抗反流胆道支架术后所形成的支架-胆管耦合系统的接触力学状态与变形状态进行分析,为支架术后可能存在的并发症(如胆道应力损伤与增生等)提供可靠的风险预估;在支架与瓣膜存在状态下对病理胆汁的流变学状态以及胆汁与支架和瓣膜的相互作用等问题进行理论研究及仿真分析,根据相应的速度场、压力场状态,可对胆结石等术后可能存在的并发症进行风险评估。

5 结论与展望

目前针对抗反流胆道支架的治疗效果仍具有一定争议性,诸多临床研究中的抗反流瓣膜设计难以很好地兼顾引流与抗反流性能,抗反流瓣膜的附加对于支架输送和释放也存在不同程度的影响。一个理想的抗反流胆道支架应具有如下特点:可以很好地兼顾引流与抗反流功能,即在具有可靠抗反流性能的同时可实现胆汁通畅引流;输送与释放操作简单,避免瓣膜的附加给支架手术操作带来不良影响;具有可靠的抗移动性能;具有合适的生物力学性能,避免瓣膜的附加给支架基本力学性能与服役状态带来不良影响;结构简单,制造容易,以便降低胆泥淤积和食物嵌塞等风险。未来可针对上述几方面内容对抗反流胆道支架展开更加细致、丰富的研究。此外,应尝试将可展结构设计理论与4D打印制造技术相结合,探寻适用于抗反流胆道支架

的设计方法,摆脱设计的经验依赖性;结合仿真技术等数字化设计方法,探寻瓣膜与支架结构一体化、引流与抗反流功能一体化的设计方案;结合支架载药技术与放射性治疗技术等,使支架在对梗阻具有姑息性治疗效果的同时,对肿瘤也具有一定的杀伤抑制作用,进而有希望从根本上延长病人存活期。

参考文献:

- [1] 王良辉, 蒋小松, 刘恒全, 等. 胆道内支架材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2013, 27(5): 96-98.
- [2] GIRARD E, CHAGNON G, GREMEN E, *et al.* Biomechanical behaviour of human bile duct wall and impact of cadaveric preservation processes [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2019, 98: 291-300.
- [3] MOY BT, BIRK JW. An update to hepatobiliary stents [J]. J Clin Transl Hepatol, 2015, 3(1): 67-77.
- [4] HU B, WANG TT, SHI ZM, *et al.* A novel antireflux metal stent for the palliation of biliary malignancies: A pilot feasibility study [J]. Gastrointest Endosc, 2011, 73(1): 143-148.
- [5] BERKEL AM, MARLE J, GROEN AK, *et al.* Mechanisms of biliary stent clogging: Confocal laser scanning and scanning electron microscopy [J]. Endoscopy, 2005, 37(8): 729-734.
- [6] MISRA SP, DWIVEDI M. Reflux of duodenal contents and cholangitis in patients undergoing self-expanding metal stent placement [J]. Gastrointest Endosc, 2009, 70(2): 317-321.
- [7] 薛波. 胆肠吻合在肝胆管结石治疗中的合理应用 [J]. 系统医学, 2019, 4(9): 106-107.
- [8] 武志恒. 胆肠吻合术后反复胆道逆行感染的相关危险因素分析 [J]. 中国现代普通外科进展, 2018, 21(6): 453-453.
- [9] YUAN XL, WEI B, YE LS, *et al.* New antireflux plastic stent for patients with distal malignant biliary obstruction [J]. World J Gastroenterol, 2019, 25(19): 2373-2382.
- [10] LEONG QW, SHEN ML, AU KW, *et al.* A prospective, randomized study of the patency period of the plastic antireflux biliary stent: An interim analysis [J]. Gastrointest Endosc, 2016, 83(2): 387-393.
- [11] DUA KS, REDDY ND, RAO VG, *et al.* Impact of reducing duodenobiliary reflux on biliary stent patency: An *in vitro* evaluation and a prospective randomized clinical trial that used a biliary stent with an antireflux valve [J]. Gastrointest Endosc, 2007, 65(6): 819-828.
- [12] MINAGA K, TAKENAKA M, OKAMOTO A, *et al.* Revisionary antireflux metal stent placement for stent

- occlusion after endoscopic ultrasound-guided hepaticojunostomy [J]. *Endoscopy*, 2019, 52(5): E152-E153.
- [13] HAMADA T, ISAYAMA H, NAKAI Y, *et al.* Novel antireflux covered metal stent for recurrent occlusion of biliary metal stents: A pilot study [J]. *Dig Endosc*, 2014, 26(2): 264-269.
- [14] HAMADA T, ISAYAMA H, NAKAI Y, *et al.* Antireflux metal stent with an antimigration system for distal malignant biliary obstruction: A feasibility pilot study [J]. *Surg Laparosc Endosc Pct Tech*, 2015, 25(3): 212-217.
- [15] MORITA S, ARAI Y, SUGAWARA S, *et al.* Antireflux metal stent for initial treatment of malignant distal biliary obstruction [J]. *Gastroenterol Res Pract*, 2018; 3805173.
- [16] HAMADA T, ISAYAMA H, NAKAI Y, *et al.* Antireflux metal stent as a first-line metal stent for distal malignant biliary obstruction: A pilot study [J]. *Gut Liver*, 2017, 11(1): 142-148.
- [17] HAMADA T, ISAYAMA H, NAKAI Y, *et al.* Antireflux covered metal stent for nonresectable distal malignant biliary obstruction: Multicenter randomized controlled trial [J]. *Dig Endosc*, 2019, 31(5): 566-574.
- [18] LEE YN, MOON JH, CHOI HJ, *et al.* Effectiveness of a newly designed antireflux valve metal stent to reduce duodenobiliary reflux in patients with unresectable distal malignant biliary obstruction: A randomized, controlled pilot study (with videos) [J]. *Gastrointest Endosc*, 2016, 83(2): 404-412.
- [19] 吕尚东, 方哲平, 张法标, 等. 抗反流塑料支架治疗胆道恶性梗阻 22 例分析[J]. *中国内镜杂志*, 2016, 22(12): 16-19.
- [20] VIHervaara H, GRONROOS JM, HURME S, *et al.* Antireflux versus conventional plastic stent in malignant biliary obstruction: A prospective randomized study [J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech*, 2017, 27(1): 53-57.
- [21] LEE KJ, CHUNG MJ, PARK JY, *et al.* Clinical advantages of a metal stent with an S-shaped anti-reflux valve in malignant biliary obstruction [J]. *Dig Endosc*, 2013, 25(3): 308-312.
- [22] CHO IR, CHUNG MJ, JO JH, *et al.* A novel lumen-apposing metal stent with an anti-reflux valve for endoscopic ultrasound-guided drainage of pseudocysts and walled-off necrosis: A pilot study [J]. *PLoS One*, 2019, 14(9): e0221812.
- [23] HU B, WANG TT, WU J, *et al.* Antireflux stents to reduce the risk of cholangitis in patients with malignant biliary strictures: A randomized trial [J]. *Endoscopy*, 2014, 46(2): 120-126.
- [24] KIM DU, KWON CI, KANG DH, *et al.* New antireflux self-expandable metal stent for malignant lower biliary obstruction: *In vitro* and *in vivo* preliminary study [J]. *Dig Endosc*, 2013, 25(1): 60-66.
- [25] 齐静, 郝欣, 李建辉, 等. 单猪尾抗反流可回收塑料支架在恶性胆道梗阻性疾病中的应用[J]. *中国内镜杂志*, 2020, 26(1): 9-14.
- [26] KWON CI, MOON JP, YUN H, *et al.* Evaluation of valve function in antireflux biliary metal stents [J]. *BMC Gastroenterol*, 2018, 18(1): 150.
- [27] HAMADA T, NAKAI Y, ISAYAMA H, *et al.* Against duodenobiliary reflux: Implications from a randomized controlled trial [J]. *Gastrointest Endosc*, 2016, 83(3): 673-674.
- [28] 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.
- [29] 张宏辉, 冯海全, 李治国, 等. 镁合金冠脉支架支撑性能分析及其优化[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(1): 14-20.
- ZHANG HH, FENG HQ, LI ZG, *et al.* Analysis and optimization for support performance of magnesium alloy stent [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(1): 14-20.
- [30] 赵艺文, 闫士举, 司逸, 等. 几何参数对 Z 型覆膜支架柔韧性的影响[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(1): 7-13.
- ZHAO YW, YAN SJ, SI Y, *et al.* Effects of different geometric parameters on flexibility of Z-shaped stent-grafts [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(1): 7-13.
- [31] MOON T, HONG D, CHUN HJ, *et al.* Analytical models for predicting mechanical properties of mesh-type self-expandable metal stents with cover membrane [J]. *Curr Appl Phys*, 2009, 9(1): 92-100.
- [32] PEIRLINCK M, DEBUSSCHERE N, IANNACCONE F, *et al.* An *in silico* biomechanical analysis of the stent-esophagus interaction [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2018, 17(1): 111-131.
- [33] HE R, ZHAO L, SILBERSCHMIDT VV, *et al.* Mechanistic evaluation of long-term in-stent restenosis based on models of tissue damage and growth [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2020, 19(5): 1425-1446.
- [34] KUCHUMOV AG, GILEV V, POPOV V, *et al.* Non-Newtonian flow of pathological bile in the biliary system: Experimental investigation and CFD simulations [J]. *Aust Rheol J*, 2014, 26(1): 81-90.
- [35] KUCHUMOV A. Mathematical modelling of the peristaltic lithogenic bile flow through the duct at papillary stenosis as a tapered finite-length tube [J]. *Russ J Biomech*, 2016, 20(2): 77-96.