

文章编号: 1004-7220(2023)06-1205-06

# 球扩式介入主动脉瓣膜支架的抗迁移力学行为

申祥, 孙鹏, 鲁凯凯, 王磊, 王炎, 许越, 刘强

(江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:**目的 研究球扩式主动脉瓣膜支架植入后的抗迁移力学行为。方法 建立球扩式瓣膜支架介入主动脉瓣膜后的抗迁移力学模型,采用数值模拟方法研究不同瓣环椭圆率、摩擦因数、瓣膜支架材料及自体瓣叶钙化情况对瓣膜支架抗迁移力的影响规律。结果 当主动脉瓣环椭圆率为0.2、0.3、0.4、0.5时,对应的最大抗迁移力分别为12.37、10.94、8.50、4.75 N;当摩擦因数为0.1、0.2、0.3时,瓣膜支架的最大抗迁移力分别为8.98、11.00、13.10 N;L605钴铬合金制成的瓣膜支架的锚定性要优于316L不锈钢制成瓣膜支架的锚定性,其对应的最大抗迁移力分别为13.10、9.82 N;当自体瓣叶发生钙化时,最大抗迁移力为13.1 N,而未钙化时最大抗迁移力仅为5.51 N,相比而言降低了57.9%。结论 随着主动脉瓣瓣环椭圆率不断增大,瓣膜支架的锚定性逐渐降低;随着瓣膜支架与组织间的摩擦因数不断增大,最大抗迁移力也不断增大;L605钴铬合金制成的瓣膜支架比316L不锈钢制成瓣膜支架的锚定性能优异;瓣膜发生钙化情况下瓣膜支架的锚定性要优于未发生钙化时的锚定性。研究结果为抗迁移瓣膜支架的结构设计和临床选择提供重要的科学依据。

**关键词:** 球扩式瓣膜支架;力学性能;抗迁移;锚定性;数值模拟

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.023

## Anti-Migration Mechanical Behavior of Balloon-Expanded Interventional Aortic Valve Stent

SHEN Xiang, SUN Peng, LU Kaikai, WANG Lei, WANG Yan, XU Yue, LIU Qiang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

**Abstract:** **Objective** To study the anti-migration mechanical behavior of balloon-expanded aortic valve stent after implantation. **Methods** The mechanical model of anti-migration of balloon-expanded valve stent after interventional treatment of aortic valve was established. The effects of different valve ring ellipticity, friction coefficient, valve stent material and calcification of autogenous valve leaflet on anti-migration of valve stent were studied by numerical simulation method. **Results** When the ellipticity of aortic valve ring was 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5, the corresponding maximum anti-migration force was 12.37, 10.94, 8.50 and 4.75 N, respectively. When the friction coefficient was 0.1, 0.2 and 0.3, the maximum anti-migration force of valve stent was 8.98, 11.00 and 13.10 N, respectively. The anchoring performance of valve stent made of L605 cobalt-chromium alloy was better than that made of 316L stainless steel, and its corresponding maximum anti-migration force was 13.10, 9.82 N, respectively. When the autogenous valve was calcified, the maximum anti-migration force was 13.1 N. When the autogenous valve was not calcified, the maximum anti-migration force was only 5.51 N, decreased by 57.9%. **Conclusions** With the increase in ellipticity of aortic valve ring, the anchoring of valve stent decreases

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-04

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20130525), 中国博士后基金项目(2011M500858)

通信作者: 申祥, 副教授, E-mail: sx@ujs.edu.cn

gradually. As the friction coefficient between the valve stent and the tissue increases, the maximum anti-migration force also increases. The anchoring performance of valve stent made of L605 cobalt-chromium alloy is superior to that made of 316L stainless steel. The anchoring of valve stent with calcification is better than that without calcification. The results in this study provide an important scientific basis for structural design and clinical selection of anti-migration valve stent.

**Key words:** balloon-expandable valve stent; mechanical property; anti-migration; anchoring; numerical simulation

随着世界人口老龄化的到来,以心脏主动脉瓣膜狭窄为典型代表的心脏瓣膜病已成为严重危害全世界人类健康问题的主要疾病之一。相较于传统的外科开胸手术,基于介入瓣膜支架的经导管主动脉瓣膜置换术(transcatheter aortic valve replacement, TAVR)无需开胸、心脏停搏、体外循环等,具有微创和高效的特点,尤其适用于高龄、心肺功能差、有开胸病史等手术禁忌证患者<sup>[1-2]</sup>。TAVR是将球扩式人工心脏瓣膜输送到病变部位,然后用球囊扩张开,扩张开的人工瓣膜被锚定在主动脉瓣环处代替病变瓣膜进行工作。由此可见,瓣膜支架在植入后的锚定性(即抗迁移力学行为)是TAVR的关键步骤,它不仅会影响手术的成功率,而且会影响人工瓣膜植入后的服役寿命<sup>[3]</sup>。因此,深入研究球扩式介入心脏主动脉瓣膜支架的抗迁移力学行为具有重要的科学意义。

由于瓣膜支架力学行为的研究是解决其结构设计问题的基础,故主动脉瓣膜支架抗迁移力学行为一直是该领域的研究热点<sup>[4]</sup>。体外动物实验是研究者早期经常使用的方法。McGee等<sup>[5]</sup>采用体外动物实验方法测量瓣膜支架植入猪主动脉瓣样本后的抗迁移力。目前,随着有限元法在支架扩张性<sup>[6]</sup>、疲劳性<sup>[7]</sup>、柔顺性<sup>[8-9]</sup>、血流动力学<sup>[10]</sup>、瓣周漏<sup>[11]</sup>等领域中的广泛应用,有关支架抗迁移力学行为的有限元研究也多见报道。Yaakobovich等<sup>[12]</sup>采用有限元方法研究瓣中瓣介入过程中自体瓣叶撕裂对瓣膜支架锚定性的影响; Bianchi等<sup>[13]</sup>分析手术过程中瓣膜支架植入深度和球囊扩张体积对瓣膜支架锚定性的影响。瓣膜支架发生迁移的原因是支架的径向力小于血液的轴向冲击力,尤其是在心脏收缩期时血液的快速射出。因此, Gideon等<sup>[14]</sup>设计不同结构参数的瓣膜支架,利用支架植入后径向力变化机制来抵消瓣膜支架的迁移力。有研究

认为,瓣膜关闭时两侧的压力梯度太大,强大的压力差导致瓣膜支架的迁移行为。为了解决瓣膜支架的迁移行为, Kumar等<sup>[15]</sup>设计了一种在支架两端带有钩子结构的新型瓣膜支架,并对该支架的压握力学性能进行有限元分析。

虽然目前已有学者利用数值模拟方法对瓣膜支架的锚定性进行相关初步探索,但仍缺乏有关瓣膜环椭圆率、摩擦因数、瓣膜支架材料、瓣叶钙化对球扩式瓣膜支架抗迁移行为影响的研究。本文研究球扩式主动脉瓣膜支架植入后的抗迁移力学行为,建立球扩式瓣膜支架在主动脉瓣中的抗迁移力学模型,模拟瓣膜支架往心室端迁移的过程,分析瓣膜环椭圆率、摩擦因数、瓣膜支架材料、钙化对瓣膜支架抗迁移行为的影响,为研制具有抗迁移性能的介入人工心脏瓣膜支架提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 几何模型

几何结构模型采用Pro/E建立,主要包括如下几个部分:① 主动脉根部模型。主动脉根部模型主要包括三叶式自体瓣叶、主动脉窦、升主动脉等[见图1(a)]。研究摩擦因数、支架材料、自体瓣叶钙化情况对支架抗迁移性能的影响时,本文统一采用相同的圆形瓣环。分析主动脉瓣环的椭圆率对支架抗迁移性能的影响时,本文采用不同椭圆率的瓣环,椭圆率计算公式为:椭圆率 =  $1 - (\text{短径}/\text{长径})$ ;② 支架、球囊模型。瓣膜支架周向有12个网状单元体,轴向为对称结构。支架总长度为20 mm,厚度为0.5 mm。球囊采用面结构,长度为27 mm。

### 1.2 有限元模型

**1.2.1 材料属性** 为研究瓣膜支架材料对其迁移行为的影响,选取目前在医疗器械领域广泛使用的L605钴铬合金和316L不锈钢两种材料,弹性模量

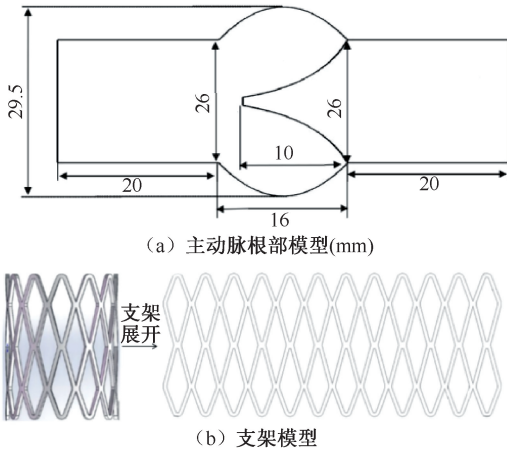


图1 模型参数

Fig. 1 Model parameters (a) Aortic root model, (b) Stent model

分别为 243、201 GPa,泊松比均为 0.3,密度分别为 8.30、7.86 mg/mm<sup>3</sup>。自体瓣叶和钙化斑块是非常复杂的非线性不可压缩材料,由各种纤维组织和蛋白质组成,为了降低分析难度,本文将其视为各向同性超弹性材料,采用 3 阶 Ogden 模型,其应变能函数为:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} C_1^{-\alpha_i} - C_2^{-\alpha_i} - C_3^{-\alpha_i} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (1)$$

式中: $N$  为模型阶数; $\mu_i$  和  $\alpha_i$  为材料常数。具体材料参数见表 1。

表 1 瓣叶超弹性本构模型参数<sup>[16]</sup>

Tab. 1 Parameters for hyperelastic constitutive model of the valve

参数	数值	参数	数值
$\rho / (\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	0.001 1	$a_1$	1.99
$\mu_1 / \text{MPa}$	-47.9	$a_2$	3.99
$\mu_2 / \text{MPa}$	33.4	$a_3$	-2
$\mu_3 / \text{MPa}$	14.6		

注: $\rho$  为密度; $\mu_i$  和  $\alpha_i$  为材料常数。

设置主动脉根部为各向同性线弹性材料,弹性模量为 2 MPa,泊松比为 0.45,密度为 1.04 kg/m<sup>3</sup>[11]。球囊采用膜单元,弹性模量为 400 GPa,泊松比为 0.3,密度为 1.07 mg/mm<sup>3</sup>。

**1.2.2 单元类型** 本文采用 ABAQUS/Explicit 显示求解器,模拟瓣膜支架植入后的迁移行为,支架和自体瓣叶采用八节点线性减缩积分单元 (C3D8R) 进行网格划分,主动脉根部采用沙漏控制增强型八节点线性减缩积分单元 (C3D8RH) 进行网

格划分,斑块模型采用 10 节点修正 2 次四面体单元 (C3D10M)。球囊采用 4 节点四边形减缩积分膜单元 (M3D4R),瓣膜支架、主动脉根部、瓣叶、斑块的有限元模型如图 2 所示。

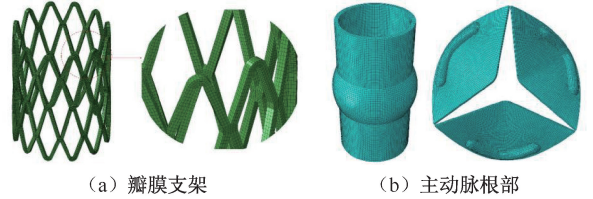


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model (a) Valve stent, (b) Aortic root

### 1.3 加载与约束

**1.3.1 植入过程** ① 首先,限制主动脉根部模型两端的轴向与周向位移,防止在瓣膜支架植入过程中发生轴向滑移与周向的旋转;而对于扩张用的球囊,因为球囊在扩张过程中长度会缩短,故只限制其中任意一个端面的轴向位移,既不影响径向扩张,也不影响轴向的伸缩[见图 3(a)]。在瓣膜支架中间选取一个端面设置其轴向与周向的位移,既不影响其径向扩张,也不影响其在轴向的长度变化;② 给自体瓣叶底面施加 359 Pa 面压力载荷,将其撑开,以供瓣膜支架径向扩张[见图 3(b)];

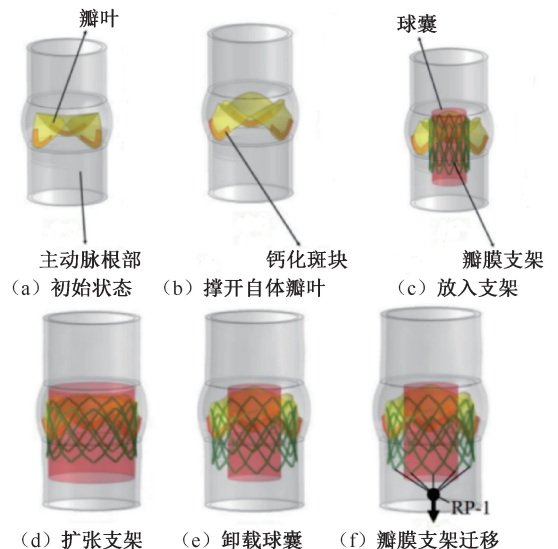


图 3 人工瓣膜支架植入及迁移过程

Fig. 3 Process of prosthetic valve stent implantation

(a) Initial state, (b) Unfolding the autogenous leaflet, (c) Implanting stent, (d) Expanding stent, (e) Unloading balloon, (f) Valve stent migration

③ 放入支架[见图 3(c)]; ④ 给球囊施加位移载荷,将其沿着径向扩张,从而将瓣膜支架扩张至指定直径[见图 3(d)]; ⑤ 给球囊施加反方向的位移载荷,模拟其卸载过程[见图 3(e)]。

**1.3.2 抗迁移过程** ① 首先,在靠近心室端建立 1 个参考点 RP-1[见图 3(f)]; ② 通过 ABAQUS 的耦合功能,将支架上的节点与参考点之间建立运动耦合。同时,限制参考点的径向、周向位移,只放开其轴向位移,防止在迁移过程中发生滑移,影响结果的真实性; ③ 创建 1 个新的分析步,并设置历程输出变量 CFN,选择输出区域为支架外表面与主动脉壁的相互作用; ④ 给参考点 RP-1 施加轴向 32.5 mm 位移载荷,模拟瓣膜支架往心室端的迁移过程。

## 1.4 研究方案

**1.4.1 研究方案 1** 为研究瓣环椭圆率对支架抗迁移力学行为的影响,分别建立 4 种瓣环椭圆率  $e=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  的瓣环模型(见图 4)。其中,  $e=0.2$  瓣环短轴为 23.2 mm,长轴为 29 mm;  $e=0.3$  瓣环短轴为 20.3 mm,长轴为 29 mm;  $e=0.4$  瓣环短轴为 17.4 mm,长轴为 29 mm;  $e=0.5$  瓣环短轴为 14.5 mm,长轴为 29 mm。

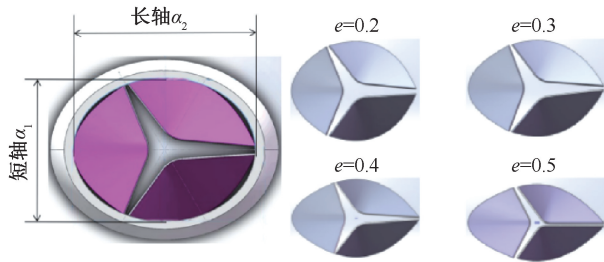


图 4 椭圆瓣环模型及不同椭圆瓣环对应的椭圆瓣叶三维模型  
Fig. 4 Elliptical annulus model and three-dimensional model of elliptic valve leaflets corresponding to different elliptic annulus

注:  $e$  为椭圆率。

**1.4.2 研究方案 2** 为研究钙化对抗迁移力的影响,分别建立无钙化模型和有钙化模型。

**1.4.3 研究方案 3** 为研究摩擦因数对抗迁移力的影响,分别建立摩擦因数  $\mu=0.1, 0.2, 0.3$  的力学模型。

**1.4.4 研究方案 4** 为研究支架材料对抗迁移力的影响,分别建立支架材料为 L605 钴铬合金和

316L 不锈钢的力学模型。

## 2 研究结果

### 2.1 瓣环椭圆率对抗迁移行为的影响

由瓣环椭圆率不同时瓣膜支架在迁移过程中的力与位移关系变化曲线可以看出,瓣膜支架完全迁移大致分为两个阶段:第 1 个阶段是位移为 12.5 mm 左右时的线性增长阶段,此时支架与钙化斑块、主动脉窦等相互作用,故抗迁移力较大;第 2 个阶段是位移为 12.5~14.0 mm 之间的缓冲阶段,此时瓣膜支架已经完全脱离主动脉窦,进入心室端[见图 5(a)]。

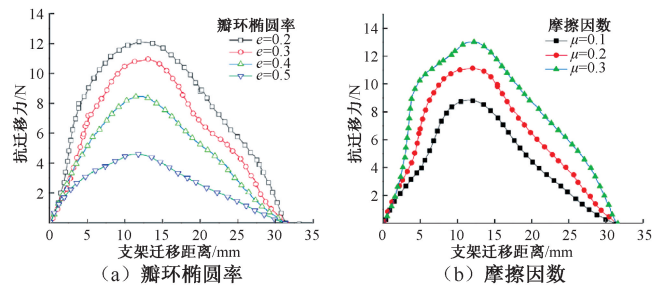


图 5 瓣环椭圆率及摩擦因数对抗迁移力的影响

Fig. 5 Effects of valve ring ellipticity and friction coefficient on anti-migration force

(a) Valve ring ellipticity, (b) Friction coefficient

因为没有钙化斑块和自体瓣叶的阻碍作用,抗迁移力变化比较平缓。第 3 个阶段是位移为 14.0~32.5 mm 完全迁移而进入心室端的阶段。此时,主要的阻碍来自靠近心室端的血管壁,随着瓣膜支架逐渐脱离,抗迁移力逐渐降低直至为 0。当  $e=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  时,对应的最大抗迁移力分别为 12.37、10.94、8.50、4.75 N。该结果表明,随着瓣环椭圆率的增大,瓣膜支架最大抗迁移力呈现减小的趋势,即瓣膜支架的锚定性随着瓣环椭圆率的增大而降低。

### 2.2 不同摩擦因数对抗迁移行为的影响

支架外表面具有不同摩擦因数时,由其在迁移过程中力与位移关系变化的曲线可以看出,以位移为 12.5 mm 为转折点,抗迁移力开始逐渐减小直至为 0。在前期,随着瓣膜支架的外表面摩擦因数不断增大,抗迁移力也不断增大。当  $\mu=0.1, 0.2, 0.3$  时,瓣膜支架的最大抗迁移力分别为 8.98、11.00、13.10 N[见图 5(b)]。因此,虽然增大摩擦因数可

能会降低瓣膜支架的力学性能,但是适当的增大可以增加瓣膜支架外表面与主动脉根部血管壁之间的摩擦力,尤其是与钙化组织之间的摩擦力,可以相应提高其锚定性。

### 2.3 支架材料对支架抗迁移行为的影响

当瓣膜支架由不同材料制成时,由其在迁移过程中力与位移关系的变化曲线可以看出,L605 钴铬合金制成的瓣膜支架要比 316L 不锈钢制成瓣膜支架的锚定性优异许多。L605 钴铬合金和 316L 不锈钢支架的最大抗迁移力分别为 13.10、9.82 N,相比而言 L605 钴铬合金支架最大抗迁移力比 316L 不锈钢支架提高了 25% [见图 6(a)]。因此,近年来,在微型医疗器械领域,L605 钴铬合金由于具有更加优异的综合力学性能而不断取代 316L 不锈钢。

### 2.4 钙化对瓣膜支架抗迁移行为的影响

在主动脉瓣膜钙化和未发生钙化情况下,从瓣膜支架迁移过程中力与位移关系的变化曲线可以看出,钙化虽然是危害病人生命健康安全的重要因素,但是却能够增加瓣膜支架的锚定性。当自体瓣叶发生钙化时,最大抗迁移力为 13.1 N,而未钙化时最大抗迁移力仅为 5.51 N,相比而言降低了 57.9% [见图 6(b)]。

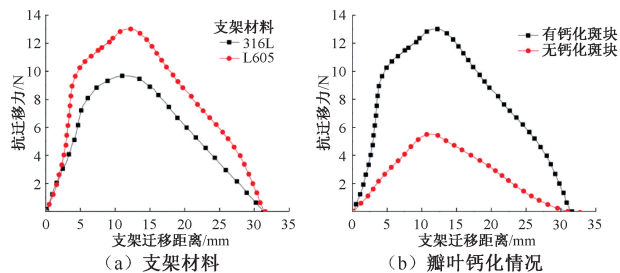


图 6 瓣膜支架材料及瓣叶钙化情况对抗迁移力的影响

Fig. 6 Effects of valve stent material and valve leaf calcification on anti-migration

(a) Valve stent material, (b) Valve leaf calcification

## 3 讨论

介入人工瓣膜不同于外科使用的人工瓣膜。外科人工瓣膜采用缝合的方式把人工瓣膜固定在主动脉根部<sup>[17]</sup>,故不存在迁移的问题;而介入人工瓣膜是使用微创介入的方式把人工瓣膜系统输送到病变部位,瓣膜支架的可靠锚定为人工瓣膜的正常服役提供了保障,介入人工瓣膜的锚定性是影响

手术成功与否的关键因素。本文对影响瓣膜支架锚定性的几个关键因素进行相关研究。

本文结果表明,随着瓣环椭圆率的增大,瓣膜支架最大抗迁移力呈现减小的趋势,即瓣膜支架的锚定性随着瓣环椭圆率的增大而降低。当椭圆率由 0.2 增加至 0.4 时,抗迁移力降低了 31.28%;椭圆率由 0.2 增加至 0.5 时,抗迁移力降低了 61.6%。该结果说明,瓣环椭圆率对瓣膜支架的锚定性具有十分重要的影响。本文推测,瓣环椭圆率较大时,瓣膜支架的贴壁效果不太理想,也即瓣膜支架外表面与主动脉根部血管壁的接触面积较小,在这种情况下还可能导致瓣周漏等不良反应<sup>[18]</sup>。因此,在对患者进行手术前,应当充分利用核磁共振等技术手段观察患者的瓣环形状,然后根据具体情况选择技术标准更高的瓣膜支架,否则可能会降低瓣膜支架的使用寿命。

当自体瓣叶发生钙化时,最大抗迁移力为 13.1 N;而未钙化时最大抗迁移力仅为 5.51 N,相比而言降低了 57.9%。对比结果可以发现,钙化可以提高瓣膜支架的锚定性,推测原因如下:①复杂的钙化组织增大了接触间的摩擦因数;②钙化组织是不可压缩的超弹性材料,其可以包裹住瓣膜支架的外表面,相当于起到固定作用。因此,合理利用钙化组织也可以提高瓣膜支架的锚定性。

虽然增大摩擦因数可能会降低瓣膜支架的力学性能,但是适当的增大可以增加瓣膜支架外表面与主动脉根部血管壁之间的摩擦力,尤其是与钙化组织之间的摩擦力,从而相应提高其锚定性。本文建议,今后设计瓣膜支架时,可以通过表面工程技术改进瓣膜支架的表面结构设计,从而达到增强抗迁移力的目的。

为了验证本文结果的可靠性,本文与已发表文献的结论进行了对比。Mg 等<sup>[19]</sup>利用猪主动脉样本进行瓣膜支架抗迁移行为的体外实验测试研究。该结果表明,钙化主动脉对瓣膜支架的锚定性具有明显的增强作用,说明钙化斑块虽然影响着患者的生命健康,但是却可以提高瓣膜支架的抗迁移能力,这与本文所得结论具有一致性。Dwyer 等<sup>[20]</sup>研究认为,支架的迁移阻力依赖于支架外表面的摩擦因数,光滑的支架抗迁移力为 2~4 N,带挂钩的支架为 7~12 N。本文研究所得到的迁移力在此范围之

内,尤其是在研究瓣膜支架外表面摩擦因数对抗迁移性能影响时所得结论也高度相似。因此,本文的数值模拟结果可靠。

## 4 结论

本文对瓣膜支架植入后的抗迁移性能(即锚定性)进行研究,主要分析瓣膜椭圆率、瓣膜支架的外表面摩擦因数、支架材料和瓣叶钙化对迁移过程中的迁移力的影响,得到的结论如下:①随着瓣膜椭圆率不断增大,瓣膜支架的锚定性逐渐降低;②随着瓣膜支架与组织间的摩擦因数不断增大,最大抗迁移力也不断增大;③L605 钴铬合金制成的瓣膜支架要比 316 L 不锈钢制成瓣膜支架的锚定性优异;④自体瓣叶钙化虽然影响着患者的生命健康安全,但是钙化情况下瓣膜支架的锚定性要优于未发生钙化时的锚定性。因此,合理利用钙化组织植入瓣膜支架可以提高其锚定性。

本文规律性分析结果能够为抗迁移瓣膜支架的结构设计和临床选择提供重要的科学依据。如何改进瓣膜支架的结构设计,使其具有更好的综合力学性能,是后续研究的方向之一。

## 参考文献:

- [ 1 ] CARABELLO BA. Transcatheter aortic-valve implantation for aortic stenosis in patients who cannot undergo surgery [J]. *Curr Cardiol Rep*, 2011, 13(3): 173-174.
- [ 2 ] DONG M, WANG LZ, TSE G, *et al.* Effectiveness and safety of transcatheter aortic valve replacement in elderly people with severe aortic stenosis with different types of heart failure [J]. *Bmc Cardiovasc Disor*, 2023, 23(1): 1-11.
- [ 3 ] CAO C, ANG SC, VALLELY MP, *et al.* Migration of the transcatheter valve into the left ventricle [J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2012, 1(2): 243-244.
- [ 4 ] CHOI JY, SHIM CY, HONG GR, *et al.* Iliac artery rupture and retroperitoneal migration of a stent graft during transcatheter aortic valve replacement [J]. *Korean Circ J*, 2019, 49(3): 280-281.
- [ 5 ] MCGEE OM, SUN W, MCNAMARA LM. An *in vitro* model quantifying the effect of calcification on the tissue-stent interaction in a stenosed aortic root [J]. *J Biomech*, 2019, 82: 109-115.
- [ 6 ] BROWN JA, LEE JH, SMITH MA, *et al.* Patient-specific immersed finite element-difference model of transcatheter aortic valve replacement [J]. *Ann Biomed End*, 2023, 51(1): 103-116.
- [ 7 ] 李治国, 冯海全, 闫文刚. 颅内动脉支架的疲劳强度[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(5): 442-446.
- LI ZG, FENG HQ, YAN WG. Fatigue strength for intracranial artery stents [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(5): 442-446.
- [ 8 ] FINOTELLO A, ROMAROWSKI RM, GORLA R, *et al.* Performance of high conformability vs. high radial force devices in the virtual treatment of TAVI patients with bicuspid aortic valve [J]. *Med Eng Phys*, 2021, 89: 42-50.
- [ 9 ] 冒鹏志, 沈景凤, 葛书晨. 典型胸主动脉裸支架的力学性能[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 925-932.
- MAO PZ, SHEN JF, GE SC. Mechanical properties of typical thoracic aortic bare stents [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 925-932.
- [ 10 ] 马晓丹, 李芬, 朱雅亭, 等. 模块化内嵌分支支架形态特征对支架内血流动力学的影响[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(1): 124-130.
- MA XD, LI F, ZHU YT, *et al.* Influences of morphological characteristics of modular inner branched stent graft on hemodynamic performance of stent [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 124-130.
- [ 11 ] JIN C, LIU RH, ZHONG SP, *et al.* Effect of stent designs on the paravalvular regurgitation of transcatheter aortic valve implantation [J]. *Int J Comp Meth*, 2019, 16(3): 1842007.
- [ 12 ] YAAKOBVICH H, PLITMAN MAYO RP, ZARETSKY U, *et al.* Numerical models of valve-in-valve implantation: Effect of intentional leaflet laceration on the anchorage [J]. *Biomech Model Mechan*, 2019, 19(2): 415-426.
- [ 13 ] BIANCHI M, MAROM G, GHOSH RP, *et al.* Patient-specific simulation of transcatheter aortic valve replacement: Impact of deployment options on paravalvular leakage [J]. *Biomech Model Mechan*, 2019, 18(2): 435-451.
- [ 14 ] GIDEON V, PRAVEEN K, LAZAR M. Effects of design parameters on the radial force of percutaneous aortic valve stents [J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2009, 11(2): 101-104.
- [ 15 ] KUMAR GP, LEO HL, CUI FS. Design and evaluation of the crimping of a hooked self-expandable caval valve stent for the treatment of tricuspid regurgitation [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2019, 22(5): 533-546.
- [ 16 ] LAVON K, MAROM G, BIANCHI M, *et al.* Biomechanical modeling of transcatheter aortic valve replacement in a stenotic bicuspid aortic valve: Deployments and paravalvular leakage [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2019, 57(10): 2129-2143.