

文章编号: 1004-7220(2022)01-0098-07

心室内隧道的补片形状设计及有限元分析

李 晓^{1,2}, 王俊杰^{1,2}, 柳思聪^{1,2}, 刘 宁^{1,2}, 杨印龙^{1,2}, 杨 尧³, 范祥明³, 乔爱科^{1,2}

(1. 北京工业大学 环境与生命学部, 北京 100124; 2. 智能化生理测量与临床转化北京市国际科研合作基地, 北京 100124; 3. 首都医科大学附属北京安贞医院 小儿心脏中心外科, 北京 100029)

摘要:目的 探究心室内隧道(intraventricular tunnel, IVT)构建术的补片形状对右心室双出口矫治术力学性能的影响。**方法** 基于理想化 IVT 模型,设计二维 IVT 补片。根据转弯部分菱形补片长短轴不同,建立长短轴比分别为 1:0.625、1:0.3、1:0.2、1:0.15、1:0.125、1:0.1 共计 6 组补片模型,利用有限元分析方法对补片缝合、保持、撑起为三维 IVT 模型的过程进行数值模拟。**结果** 6 组补片模型的缝合缘最大应力主要集中在转弯部分菱形锐角边缝合处;随着补片长短轴比增大,IVT 缝合缘最大应力先减少后增大,体积呈现增大的趋势,隧道两端压差呈现先减小后增大的趋势。菱形长短轴比为 1:0.15 补片的表面应力分布均匀,且缝合缘上最大应力最小,同时对右心室体积侵占较小,隧道两端的压差较小。**结论** IVT 补片形状对 IVT 缝合缘应力、右心室体积及隧道压差有影响,而且不是单调变化。菱形长短轴比为 1:0.15 的补片缝合效果在所建模型中相对较好。

关键词: 右心室双出口; 心室内隧道; 补片; 数值模拟

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.01.015

Structure Design and Finite Element Analysis on Patch in Intraventricular Tunnel

LI Xiao^{1,2}, WANG Junjie^{1,2}, LIU Sicong^{1,2}, LIU Ning^{1,2}, YANG Yinlong^{1,2}, YANG Yao³, FAN Xiangming³, QIAO Aike^{1,2}

(1. Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Intelligent Physiological Measurement and Clinical Translation, Beijing International Base for Scientific and Technological Cooperation, Beijing 100024, China; 3. Pediatric Heart Center, Beijing Anzhen Hospital, Capital Medical University, Beijing 100029, China)

Abstract: Objective To explore the influence of patch shape for intraventricular tunnel (IVT) construction on biomechanical performance of the double outlet right ventricle after correction. **Methods** Based on the idealized IVT model, a two-dimensional IVT patch was designed. Six groups of patch models with the rhombic long-to-short axis ratio of 1:0.625, 1:0.3, 1:0.2, 1:0.15, 1:0.125, 1:0.1 were established according to the difference between the long and short axis of the rhombus patch in the turning part, and finite element analysis method was used to numerically simulate the process of stitching, holding and propping up the patch into a three-dimensional (3D) IVT model. **Results** The maximum stresses on suture line of 6 patch models were mainly concentrated at acute-angle corners of the rhombus. As rhombic long-to-short axis ratio of the patch increased, the maximum

收稿日期: 2020-12-20; 修回日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772015), 北京市医院管理局临床技术创新项目 2018 年度“扬帆”计划(XMLX201845)

通信作者: 乔爱科, 教授, E-mail: qak@bjut.edu.cn

stress of the IVT suture line first decreased and then increased, and the volume showed an increasing trend. The pressure difference between two ends of the tunnel first decreased and then increased. The patch with the long-to-short axis ratio of 1:0.15 had a uniform surface stress distribution, and the maximum stress on the suture line was the smallest. Meanwhile the right ventricular volume was less encroached on, and the pressure difference at both ends of the tunnel was small. **Conclusions** The IVT shape can influence stresses of suture line, the right ventricle volume and the pressure difference of IVT with non-monotonic variations. The suture effect of the patch with the long-to-short axis ratio of 1:0.15 is relatively better among the constructed models.

Key words: double outlet right ventricle (DORV); intraventricular tunnel (IVT); patch; numerical simulation

右心室双出口 (double outlet right ventricle, DORV) 是一种复杂的紫绀型先天性心脏病,主要表现为主动脉和肺动脉完全或大部分起源于右心室,室间隔缺损 (ventricular septal defect, VSD) 是左心室唯一的出口^[1-3]。临床上, DORV 矫治术需要建立 VSD 至主动脉瓣口的心室内隧道 (intraventricular tunnel, IVT), 恢复正常的血液循环^[4-7]。

经过 DORV 矫治术后, 有些患者术后会出现一系列并发症, 严重时会导致死亡, 需要进行二次手术, 但二次手术存在较大风险^[8]。导致术后二次手术的因素如下: ① 由于缝合缘应力过大撕裂心脏内壁肌肉, 造成残余瘘的发生^[9]; ② 由于左心室流出道狭窄^[10-11]、补片发生扭曲有关^[12]、左心室流出道梗阻^[11]、左心室压力升高、心排出量降低, 造成低心排量综合征现象; ③ 因 IVT 占用右心室容积过大, 导致右心室压力过高、射血降低, 从而引起慢性右心室功能不全。

IVT 补片形状与 DORV 矫正后术的生物力学表现有关。血液流动阻力与 IVT 的几何结构具有强相关性。左心室流出道梗阻造成血流压差较大时, 需要进行二次手术^[13]。对于复杂的心室结构进行双心室修复时, 可采用多个补片修复, 减少阻塞发生^[14]。为了减少患者 DORV 矫正后术的二次手术率, 就需要对 IVT 的补片形状进行合理的设计^[15-16]。本课题组在前期研究中设计了具有弯曲曲面的心内隧道补片模块, 既能维持所设计的固定形状, 整体结构又带有平滑的过渡, 以期达到相对更小的压差、体积及缝合缘应力, 减少术后并发症的几率^[17-18]。

为了深入研究补片形状对 IVT 缝合缘应力、体积及 IVT 两端压差 (Δp) 的影响, 本文对 IVT 补片模型进行更细致的结构设计和数值模拟。从生物力

学角度出发, 研究补片几何形状对右心室流出道缝合缘应力、血液流场、流出道梗阻的影响, 为制定更合理的个性化 IVT 补片手术方案提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 构建几何模型

根据文献^[19]建立简化的心肌参数化模型。对理想 IVT 的流体模型进行多因素分析, 结果表明, 主动脉瓣口与 VSD 瓣口的半径比以及转弯半径对 Δp 影响较大, 当主动脉瓣口与 VSD 的半径比不大于 0.75 且转弯半径为 6 mm 时, 可以有效地降低 Δp ^[19]。按照以上要求建立心肌参数化模型^[见图 1(a)], 并据此建立理想化的 IVT 模型^[见图 1(b)]。主动脉瓣口半径为 9 mm, 按照半径比小于 0.75 得到 VSD 半径为 12.5 mm。

基于理想化的 IVT 模型, 设计模块化二维 IVT 补片, 包括主动脉瓣口缝合体、VSD 缝合体、连接体以及转弯部分^[17], 其补片的周长与缝合缘长度相等。由于隧道转弯半径对 Δp 影响较大, 故将转弯部分的补片裁剪为多个菱形。其公式分别为:

$$\sin \gamma = (d_{A0}/2 + d_1)/l \quad (1)$$

$$\gamma = \arcsin[(d_{A0}/2 + d_1)/l] \quad (2)$$

$$\cos \theta = r/l \quad (3)$$

$$\theta = \arccos(r/l) \quad (4)$$

$$\beta = \pi - \gamma - \theta \quad (5)$$

$$l = [(d_{A0}/2 + d_1)^2 + (d_{VSD}/2 + d_2 - r)^2 - 2(d_{A0}/2 + d_1) \cdot (d_{VSD}/2 + d_2 - r) \cdot \cos \alpha]^{1/2} \quad (6)$$

式中: d_{A0} 为主动脉瓣口直径; d_{VSD} 为 VSD 直径; r 为转弯半径; d_1 为主动脉瓣口至 VSD 的距离, d_2 为 VSD 至主动脉瓣口平面的距离; l 为主动脉瓣口中

心转弯部分圆心的辅助线; α 主动脉瓣口平面与 VSD 平面的夹角; β 为转弯部分的角度, θ 为辅助线 l 与转弯半径的角度; γ 为辅助线 l 与 VSD 平面的角度^[17]。理想化心肌模型的主动脉瓣口平面与 VSD 平面的角度为 90° ,由式(1)~(6)可得其转弯部分的角度为 68° [见图 1(c)]。

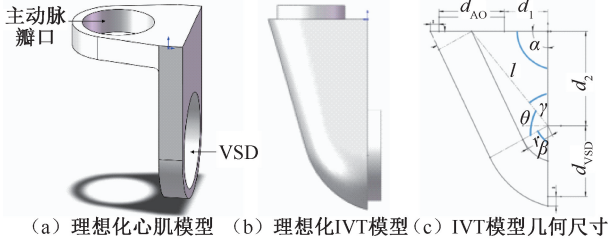


图1 IVT模型建立过程

Fig.1 IVT model building process (a) Idealized myocardial model, (b) Idealized IVT model, (c) Geometric dimensions of the idealized IVT model

考虑到根据菱形补片长短轴不同构成的 IVT 补片对缝合缘应力及 IVT 体积的影响,本文建立长短轴分别为 $1:0.625$ 、 $1:0.3$ 、 $1:0.2$ 、 $1:0.15$ 、 $1:0.125$ 、 $1:0.1$ 共计 6 组补片模型(见图 2),进行血流动力学分析,模拟由二维 IVT 补片经过缝合、保持、撑起构建成为三维 IVT 模型的过程。

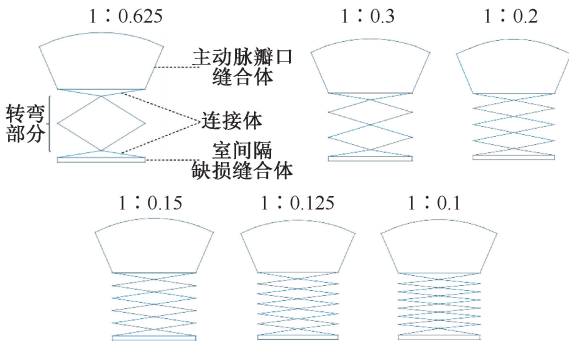


图2 不同转弯部分菱形长短轴比补片模型

Fig.2 Patch models with the different rhombic long-to-short axis ratios in turning part

1.2 网格划分

采用 Altair Hyperworks 中 HyperMesh 14.0 模块对参数化心肌和补片进行网格划分。对网格进行依赖性分析,划分不同数量级的网格进行重复计算。当网格尺寸为 1 mm 时,仿真计算结果的最大应力随着网格数量增加产生小于 5% 的误差。最终

确定心肌的网格数量为 $57\ 231$,补片的网格数量为 $1\ 100\sim 1\ 200$ (见表 1)。

表1 固体力学分析中的网格依赖性分析结果

Tab.1 Results of grid independence test in solid mechanics analysis

网格尺寸/ mm	心肌数量	补片数量	最大应力/MPa	相对误差/%
1.6	16 362	560	3.875	—
1.4	24 548	765	3.629	6.35
1.2	35 799	953	3.368	7.19
1.0	57 231	1 107	3.313	1.63
0.8	99 887	1 325	3.316	0.09

1.3 有限元分析

1.3.1 固体力学分析 为模拟临床 DORV 矫治术的手术过程,观察缝合缘上的应力梯度及 IVT 体积大小,探究所设计的补片在真实生理状况中是否会出现撕裂,造成残余痿及左心室流出道梗阻现象。

(1) 材料属性设置。为了简化计算和提高分析的可行性,将模型中心肌和补片的材料属性设置为线弹性、各向同性^[20]。心肌弹性模量为 1.75 MPa 、密度为 1.09 kg/m^3 ,泊松比为 0.47 ^[21-22]。将补片的材料属性设置为牛心包材料,弹性模量为 5 MPa 、密度为 1.12 kg/m^3 ,泊松比为 0.35 ^[23-24]。测得补片的厚度为 0.3 mm 。

(2) 边界条件及相互作用。将网格模型导入 ABAQUS 软件中进行固体力学计算,以转弯部分菱形补片长短轴比为 $1:0.15$ 构成的补片模型为例展示。将心肌外侧边缘固定,仿真过程如下:① 将补片通过点对点的方式缝合到心肌上,模拟手术过程中的缝合过程;② 将变形后的模型导出(见图 3),以及将①缝合产生的应力提取出来,缝合后补片产生的应力传递给心肌,模拟由于外科手术缝合引起

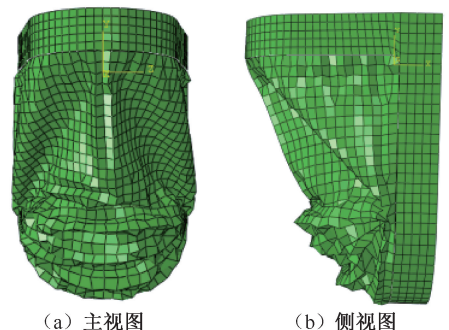


图3 缝合后 IVT 模型

Fig.3 IVT model after suturing (a) Front view, (b) Side view

的残余应力释放,同时将缝合缘上心肌及补片上的缝合点绑定。考虑到左心室与右心室的压差越大,对 IVT 结构力学的影响越大,对 IVT 内表面施加 12 kPa 向外压力(整个收缩期左心室与右心室的最大压差)^[25],模拟血流经过 IVT 将补片撑起的过程。本文主要以缝合缘最大应力及 IVT 体积等性能参数作为评价指标。

1.3.2 流体力学分析 观察 IVT 内的血流动力学变化,如 Δp 和血液流速是否超过正常生理范围,造成左心室流出道梗阻,致使二次手术。

(1) 材料属性设置。为了简化计算,将 IVT 模型中的血流设为黏性和不可压缩的牛顿流体,密度为 $1\ 050\ \text{kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $3.5\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ ^[26]。

(2) 边界条件及相互作用。将固体计算得到的 IVT 模型导出,作为流体模型。根据网格依赖性分析,划分不同数量级的网格进行重复计算。当网格尺寸在 0.1~0.3 之间,仿真计算结果的 Δp 随着网格数量增加产生小于 5% 的数值误差,最终确定 IVT 模型网格的数量为 $(100\sim 113)\times 10^4$ (见表 2)。

表 2 流体力学分析中的网格依赖性分析结果

Tab.2 Results of the grid independence test in the fluid mechanics analysis

网格尺寸/mm	数量	$\Delta p/\text{MPa}$	相对误差/%
0.4~0.5	650 000	9.100	—
0.3~0.4	890 000	8.570	5.82
0.2~0.3	1 000 000	8.360	2.45
0.1~0.2	1 130 000	8.362	0.02

将 IVT 流体模型导入 ANSYS 2019 R1 有限元分析软件中进行流体力学分析。本文以心脏射血时的峰值流量和压强分别作为入口和出口边界条件。入口选取心脏射血时的流量峰值 $3.14\times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}$ ^[19],计算得出相应的入口流速为 $0.64\ \text{m}/\text{s}$,速度方向垂直于 VSD 平面。出口选取心脏射血时的压力峰值 $11.97\ \text{kPa}$ 。

流体的流动状态与雷诺数大小密切相关^[27]。根据 VSD 直径计算得到雷诺数高达 3 840,故将流体模型算例设为湍流计算,设置计算守恒变量的迭代残差为 10^{-4} ,计算步数为 3 000。本文主要以 Δp 及血流速度等性能参数作为评价指标。

2 结果

提取 IVT 缝合缘上最大应力、IVT 体积、 Δp 及血流速度等性能参数,探究补片结构对 IVT 的影响。

2.1 缝合缘上最大应力

将补片缝合到心肌上后,在不同补片参数条件下,缝合缘会发生变化,所建 6 组补片模型上的最大应力分别为 3.136、3.720、3.759、2.231、3.592、3.244 MPa。随着菱形补片长短轴比例增大,IVT 缝合缘最大应力先减少后增大(见图 4)。可以更直观地看出,长短轴为 1:0.15 构成的补片应力相对较小。6 组补片模型的最大应力集中在菱形锐角边缝合处,这是由于多个菱形锐角边都缝合在该位置,造成应力集中现象,其均未超过牛心包的强度极限 ($13.36\sim 15.56\ \text{MPa}$)^[21]。

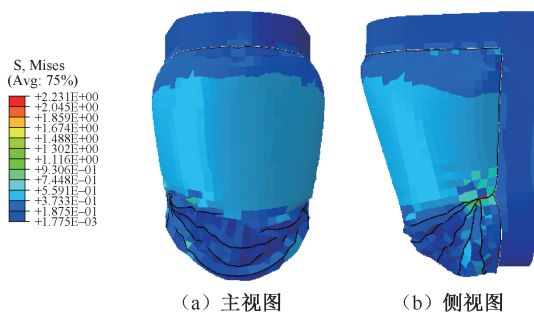


图 4 转弯部分菱形长短轴比为 1:0.15 补片构成 IVT 应力云图

Fig.4 Stress contour of the IVT formed by the patch with rhombic long-to-short axis ratio of 1:0.15 in turning part (a) Front view (b) Side view

2.2 IVT 体积

由二维补片通过缝合、保持、撑起,形成 IVT 空间曲面,所建 6 组补片模型构成的 IVT 体积分别为 6 504.24、6 498.71、6 502.36、6 505.30、6 507.28、6 582.28 mm^3 ,与理想 IVT 模型的体积($7\ 637.652\ \text{mm}^3$)相比,变化率分别为 14.84%、14.91%、14.86%、14.83%、14.8%、13.82%。

2.3 Δp 及血流速度

将固体计算得出的结果模型导出作为流体模型进行流体力学分析,得到 IVT 模型的压力和速度流线图(见图 5)。在上中游部分压力较高,其主要原因是血流进入 IVT 后会对壁面产生一

定的冲击力,而且壁面的压力差较小,分布较均匀,得到所建6组补片模型构成IVT的 Δp 分别为1.111、1.101、1.051、0.818、1.100、1.157 kPa。 Δp 随着长短轴比的增加先减小后

增大,其中菱形补片长短轴为1:0.2补片的 Δp 最小。IVT内的最大流速均在出口附近,最大流速分别为1.670、1.666、1.627、1.566、1.669、1.700 m/s。

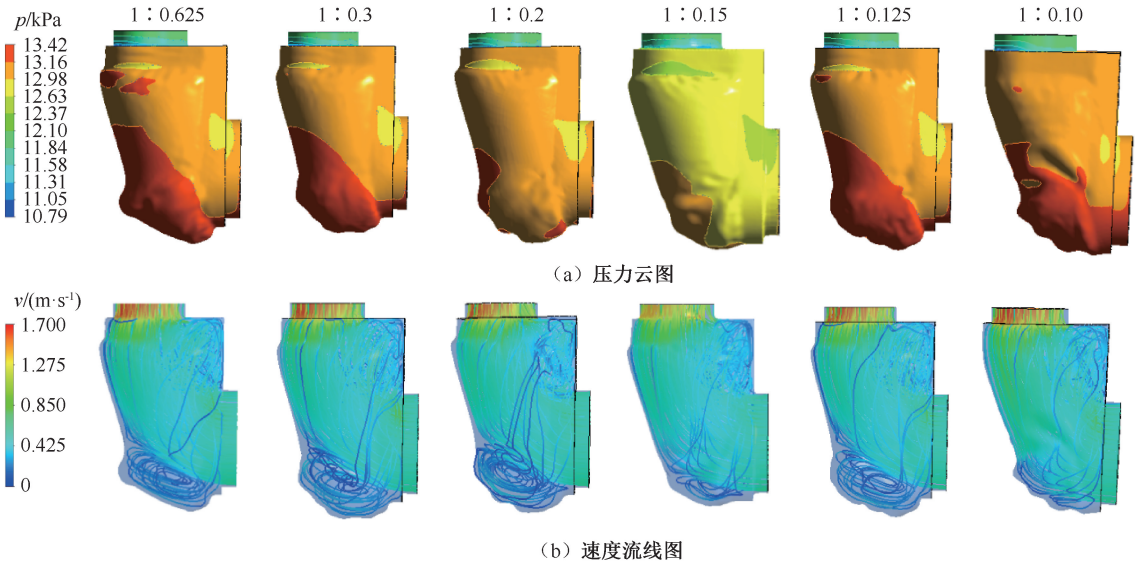


图5 不同转弯部分菱形长短轴比分别补片构成IVT流体分析

Fig.5 Fluid analysis on the IVT composed of the patch with different rhombic long-to-short axis ratios (a) Pressure contour, (b) Velocity streamline

3 讨论

本文共建立了补片尺寸不同的6组IVT模型,模拟临床DORV矫治术的过程,包括模拟补片缝合到心肌上、保持缝合过后以及恢复心脏正常血液循环的过程,得到IVT缝合缘上的最大应力、IVT体积、 Δp 及血流流速等性能参数,并作对比分析。

缝合缘应力是评价是否会出现残余瘘的重要参数之一。过大应力会导致网格变形大,生理上导致补片被撕裂,造成残余瘘。Samaneh等^[28]应用有限元方法对动脉狭窄部位实施补片重建血管流出道的数值模拟,用应力来评价手术过程中某种切口形状的优劣。本文结果表明,6组补片模型缝合缘应力均在牛心包材料的强度极限以内,并至少还有2倍多的裕量;随着菱形补片长短轴比的增大,应力呈现先减小后增大的趋势。补片和心肌承受的压力越小,越有助于保持左心室流出道功能的长期有效。因此,在缝合缘应力的参数性能指标下,1:0.15补片模型的缝合缘应力最小。

IVT体积是指左心室流出道的容积,其容积越大,说明左心室流出道发生梗阻的可能性就越小;但同时右心室容积的侵占过大,会造成右心室流出道梗阻,致使二次手术。本文发现,6组补片模型构建成的三维IVT体积,与理想IVT模型体积相比较,除1:0.1补片外,其余模型体积变化率不大,基本在同一水平上下浮动。

Δp 是衡量左心室流出道是否梗阻的重要指标。Li等^[29-30]研究发现,经过隧道重建后,患者左心室流出道两端的压差降低到2.66 kPa后发生左心室流出道梗阻的概率小,超过2.66 kPa且相差较小的口服药物治疗,相差较大的则需要二次手术。本文结果表明,6组IVT模型的表面应力分布较均匀, Δp 均小于2.66 kPa;且随着长短轴比的增加呈现先减小后增大的趋势,其中1:0.2补片 Δp 最小。6组补片模型构建的IVT内,血流速度虽然超出正常生理范围1.2 m/s,但相差较小;且在IVT内部的流速较均匀,没有流速急剧增加的部分。根据机械能守恒,流速变化所引起的压力势能转换也较小。6组

补片模型中血流对 IVT 壁面的冲击力,菱形长短轴比为1:0.15的 IVT 模型明显要小于其他模型,且受力均匀。同时,菱形长短轴比为1:0.15的 IVT 模型中,VSD 入口处形成的涡流明显小于其他5组模型。

本研究的局限性如下:①采用参数化模型进行模拟,未考虑复杂的心腔结构;②缝合时采用的整体缝合,未考虑每一针单独缝合后产生的应力;③未考虑不同位置当作起始点缝合时所产生的应力不同;④在流体计算中,未考虑血流进入 IVT 的切入角;⑤未考虑转弯部分补片的其他形状;⑥在根据转弯角度计算菱形补片的个数时,未考虑不能整除的比例。

4 结论

IVT 补片形状对 IVT 缝合缘应力、体积及 Δp 有影响。IVT 不同补片模型的缝合缘最大应力、IVT 体积、 Δp 、血流速度均存在一定差异。在本文设计的6组补片模型中,随着转弯部分菱形补片长短轴比例增大,IVT 缝合缘呈现最大应力先减少后增大、体积增大的趋势, Δp 呈现先减小后增大的趋势。其中,转弯部分菱形长短轴比为1:0.15时,IVT 表面应力分布均匀,缝合缘上最大应力相对较小,对右心室体积侵占较小,并且 Δp 也相对较小,缝合效果较好,可以降低术后并发症和二次手术的发生率。

参考文献:

[1] OLUBUNMI O, PIEKARSKI B, BAIRD C, et al. Mid-term outcomes of repair of double outlet right ventricle [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2019, 6(5): 20-30.

[2] WU QY, LI DH, LI HY, et al. Surgical treatment of double outlet right ventricle complicated by pulmonary hypertension [J]. *Chin Med J*, 2017, 130(4): 409-413.

[3] 张本青, 马凯, 李守军. 先天性心脏病外科治疗中国专家共识(七):右心室双出口[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(8): 851-856.

[4] 李勇. 右心室双出口[J]. *山东医药*, 2004, 44(6): 60-61.

[5] OLIVIER V, DAMIEN B, LUCILE H, et al. Double-outlet right ventricle with noncommitted ventricular septal defect and 2 adequate ventricles: Is anatomical repair advantageous? [J]. *Semin Thorac Cardiovasc*, 2016, 28(1): 77-78.

[6] GUENTHER T, GODOY L, CHEN S, et al. Left ventricle

to right atrial shunt associated with ventricular-atrial malalignment, double outlet right atrium, and subaortic membrane [J]. *Semin Thorac Cardiovasc*, 2019, 32(1): 140-142.

[7] MOHSEN A, KARL R, MICHAEL B, et al. Single-stage repair of double outlet right ventricle with subpulmonic ventricular septal defect (Taussig-Bing anomaly) [J]. *Multimed Man Cardiothorac Surg*, 2018, doi: 10.1510/mmcts.2018.005.

[8] EL-ASMAR JM, DEGHEILI JA, AL-HALABI E, et al. Prenatally diagnosed ventricular inversion, restrictive ventricular septal defect, pulmonary stenosis, hypertensive left ventricle and double outlet right ventricle: Case report and literature review [J]. *Pediatr Cardiol*, 2019, 40(1): 234-236.

[9] 张晓华, 景华, 李德闽, 等. 右心室双出口的外科治疗[J]. *实用医学杂志*, 2005, 21(18): 2045-2046.

[10] OLADUNJOYE O, PIEKARSKI B, BANKA, P, et al. Staged ventricular recruitment in patients with borderline ventricles and large ventricular septal defects [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2018, 156(1): 254-264.

[11] 宋杰, 张达雄. 改良 Nikaidoh 术治疗大动脉转位或右室双出口合并室间隔缺损、肺动脉狭窄的早中期结果[J]. *国际心血管病杂志*, 2018, 45(2): 94-97.

[12] ROCCHINI AP, ROSENTHAL A, CASTANEDA AR, et al. Subaortic obstruction after the use of an intracardiac baffle to tunnel the left ventricle to the aorta [J]. *Circulation*, 1976, 54(6): 957-960.

[13] 陶曙光, 韩剑刚, 杨仕海, 等. 右心室双出口的解剖矫治[J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2013, 29(5): 273-275.

[14] VODISKAR J, CLUR SA, HRUDA J, et al. Left atrial isomerism: Biventricular repair [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2010, 37(6): 1259-1263.

[15] MENG H, PANG KJ, LI SJ, et al. Biventricular repair of double outlet right ventricle: Preoperative echocardiography and surgical outcomes [J]. *World J Pediatr Congenit Heart Surg*, 2017, 8(3): 354-360.

[16] DOOST SN, GHISTA D, SU B, et al. Heart blood flow simulation: A perspective review [J]. *Biomed Eng Online*, 2016, 15(1): 101-129.

[17] 乔爱科, 王俊杰, 李晓, 等. 一种具有转弯曲面的心内隧道补片模块[P]. 中国: CN110897758A, 2020-03-24.

[18] BIGLINO G, CAPELLI C, BRUSE J, et al. Computational modelling for congenital heart disease: How far are we from clinical translation? [J]. *Heart*, 2017, 103(2): 98-103.

[19] YANG Y, WANG JJ, QIAO AK, et al. Numerical simulation of the influence of geometric configurations on pressure difference in the intraventricular tunnel [J]. *Front Physiol*, 2020, 11(2): 133.

- [20] HAMMER P, BERRA I, PEDRO J. Surgical repair of congenital aortic regurgitation by aortic root reduction: A finite element study [J]. J Biomech, 2015, 48(14): 3883-3889.
- [21] KATAYAMA S, UMETANI N, SUGIURA S, *et al.* The sinus of Valsalva relieves abnormal stress on aortic valve leaflets by facilitating smooth closure [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2008, 136(6): 1528-1535.
- [22] 刘桂梅, 潘友联, 付文字, 等. 主动脉瓣部分关闭和完全开放的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2018, 33(2): 95-100. LIU GM, PAN YL, FU WY, *et al.* Finite element analysis on partially closed and fully opened aortic valve [J]. J Med Biomech, 2018, 33(2): 95-100.
- [23] 王坚刚, 崩行成, 胡野菜, 等. 不同处理方法的牛心包生物力学特性测试分析[J]. 医用生物力学, 2002, 17(4): 225-230. WANG JG, KUAI XC, HU YR, *et al.* A study on biomechanical properties of bovine pericardium following different chemical treatment [J]. J Med Biomech, 2002, 17(4): 225-230.
- [24] 吴泽斌, 金昌, 王丽珍, 等. 心包纤维取向对压缩性能的影响[J]. 医用生物力学, 2019, 34(1): 21-26. WU ZB, JING C, WANG LZ, *et al.* Effects from fiber orientations of bovine pericardium on its compression performance [J]. J Med Biomech, 2019, 34(1): 21-26.
- [25] CUI H, SCHAFF H, ABEL M, *et al.* Left ventricular ejection hemodynamics before and after relief of outflow tract obstruction in patients with hypertrophic obstructive cardiomyopathy and valvular aortic stenosis [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2019, 159(3): 1-9.
- [26] 侯倩文, 刘桂梅, 刘宁, 等. 主动脉根部扩张情况下窦部直径对瓣膜关闭性能的影响[J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(5): 737-744.
- [27] AKTINS SK, CAO K, RAJAMANNAN NM, *et al.* Bicuspid aortic valve hemodynamics induces abnormal medial remodeling in the convexity of porcine ascending aortas [J]. Biomech Model Mechan, 2014, 13(6): 1209-1225.
- [28] SAMANEH SL, PISKIN S, TIJEN A, *et al.* Computational pre-surgical planning of arterial patch reconstruction: Parametric limits and *in vitro* validation [J]. Ann Biomed Eng, 2018, 46(9): 1292-1308.
- [29] LI S, MA K, HU S, *et al.* Surgical outcomes of 380 patients with double outlet right ventricle who underwent biventricular repair [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2014, 148(3): 817-824.
- [30] LI S, MA K, HU S, *et al.* Biventricular repair for double outlet right ventricle with non-committed ventricular septal defect [J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2015, 48(4): 580-587.