

经导管主动脉瓣置换术后患者发生结构性瓣膜退化的研究进展

晏梦云, 赵振刚, 陈 茂

四川大学华西医院心脏内科, 四川 成都 610041

[摘要] 结构性瓣膜退化(SVD)是人工心脏瓣膜的自身组件发生内在不可逆的病理改变,表现为瓣膜纤维化、钙化、磨损、撕裂、松弛以及支架断裂或变形等,最终导致瓣膜狭窄和/或反流。经导管主动脉瓣置换术(TAVR)后出现SVD的发生机制可能与机械应力、免疫反应及钙磷代谢异常有关。TAVR后SVD的危险因素包括患者因素(如年龄、心血管基础疾病及其合并症)、瓣膜因素(如材料、处理方式、类型)和手术因素(如瓣膜损伤、支架扩张不良、支架释放形态不规则)。临床上影像学评估TAVR后SVD时,超声心动图、多排螺旋计算机断层扫描和心脏磁共振成像各有优势,评估目的也有不同。主要应对策略包括药物治疗、再次TAVR、外科主动脉瓣置换术(SAVR)及SURPLUS术。再次TAVR因其微创性成为常用方法,但仍需进一步明确患者适应证和优化手术策略;SAVR适用于年轻、低风险患者;SURPLUS术则结合了SAVR和TAVR的优点,适用于再次TAVR不可行或有禁忌证,同时SAVR风险过高者。本文就SVD在TAVR治疗背景中的最新研究进展进行综述,以期为生物瓣耐久性研究和临床干预SVD提供参考。



[关键词] 主动脉瓣;经导管主动脉瓣置换术;生物瓣;结构性瓣膜退化;综述

[中图分类号] R542 **[文献标志码]** A

Structural valve deterioration after transcatheter aortic valve replacement: a research update

YAN Mengyun, ZHAO Zhengang, CHEN Mao (Department of Cardiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Corresponding authors: CHEN Mao, E-mail: hmaochen@vip.sina.com, ORCID: 0000-0002-0043-1340; ZHAO Zhengang, E-mail: zhaozhengang@foxmail.com, ORCID: 0000-0003-1237-1696

收稿日期(Received):2024-09-01 修改返回日期(Revised):2024-12-21 接受日期(Accepted):2025-01-23

基金项目(Funding):四川省重大科技专项(2022ZDZX0030);四川省干部保健科研项目(川干研ZH2024-103)

第一作者(First author):晏梦云,硕士研究生,主要从事心脏瓣膜病研究;E-mail:ymy18770086706@163.com;ORCID:0009-0000-1279-0685

通信作者(Corresponding author):陈 茂,主任医师,教授,博士生导师,主要从事心脏瓣膜病研究;E-mail:hmaochen@vip.sina.com;ORCID:0000-0002-0043-1340. 赵振刚,副主任医师,副教授,硕士生导师,主要从事心脏瓣膜病研究;E-mail:zhaozhengang@foxmail.com;ORCID:0000-0003-1237-1696

[**Abstract**] Structural valve deterioration (SVD) refers to intrinsic and irreversible pathological changes in the components of prosthetic heart valves, manifesting as fibrosis, calcification, wear and tear, loosening, as well as strut fracture or deformation of the valve framework. These changes ultimately lead to valve stenosis and/or regurgitation. The mechanisms may be related to mechanical stress, immune response and abnormal calcium-phosphorus metabolism. Studies have shown that risk factors for SVD include patient factors (such as age, underlying cardiovascular disease and comorbidities), valve factors (such as material properties, processing techniques, and valve type), and surgical factors (such as valve injury, suboptimal stent expansion, and irregular stent release morphology). Clinical imaging assessment of SVD demonstrates complementary advantages among echocardiography, multi-detector spiral CT and cardiac magnetic resonance imaging, with distinct diagnostic objectives. The primary management strategies for SVD after trans-catheter aortic valve replacement (TAVR) include drug therapy, redo-TAVR, surgical aortic valve replacement (SAVR) and the novel SURPLUS technique. Among them, redo-TAVR has become a common method because of its minimally invasive nature, but it is still necessary to further clarify the patient indications and optimize the surgical strategy. SAVR is reserved for young, low-risk patients; SURPLUS combines the advantages of SAVR and TAVR, making it suitable for cases where redo-TAVR is unfeasible or contraindicated, while the risk of SAVR is excessively high. This article reviews the latest progress of SVD following TAVR treatment to provide reference for research into the durability of bioprosthetic valve and clinical intervention of SVD.

[**Key words**] Aortic valve; Transcatheter aortic valve replacement; Bioprosthetic valve; Structural valve deterioration; Review

[J Zhejiang Univ (Med Sci), 2025, 54(2): 183-190.]

[**缩略语**] 经导管主动脉瓣置换术(transcatheter aortic valve replacement, TAVR); 生物瓣衰败(bioprosthetic valve failure, BVF); 生物瓣功能障碍(bioprosthetic valve dysfunction, BVD); 瓣膜学术研究联盟(Valve Academic Research Consortium, VARC); 结构性瓣膜退化(structural valve deterioration, SVD); 人工瓣膜-患者不匹配(prosthesis-patient mismatch, PPM); 外科主动脉瓣置换术(surgical aortic valve replacement, SAVR); 欧洲经皮心血管介入学会(European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions, EAPCI); 欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology, ESC); 欧洲心胸外科协会(European Association for Cardio-Thoracic Surgery, EACTS); 经导管心脏瓣膜(transcatheter heart valve, THV); 多排螺旋计算机断层扫描(multi-detector spiral computer tomography, MDCT); 磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)

经过二十余年的发展, TAVR已成为外科开胸手术禁忌证和手术高风险的主动脉瓣狭窄患者的标准治疗方法, 其适应证正逐渐拓展至年龄相对较轻、预期寿命更长的患者^[1]。目前, 商业化使用的经导管人工主动脉瓣膜均为生物瓣, 瓣叶

由牛心包或猪心包制成, 会随时间推移及各种因素影响而出现 BVF^[2]。BVD 则是发生 BVF 之前更早出现的瓣膜退化表现。根据 VARC-3 的定义, BVD 可以分为四种类型: 非结构性瓣膜退化、SVD、感染性心内膜炎和瓣膜血栓形成^[3]。非结

构性瓣膜退化是指人工心脏瓣膜(机械瓣或生物瓣)植入后出现的功能障碍,但瓣膜本身无结构性损坏,包括PPM和瓣周漏,随访期间血流动力学参数通常稳定。SVD则是生物瓣膜的自身组件发生内在不可逆的病理改变,随访期间血流动力学瓣膜功能会逐渐恶化。感染性心内膜炎和瓣膜血栓形成可能是可逆的,也可能对瓣叶造成永久性损害^[4]。上述不同类型的BVD最终均可能导致BVF^[5-6],见图1。

在临床实践中,SVD是导致BVF的主要原因。SVD是指人工生物瓣因材料本身的内在退化或永久性结构改变而引起的瓣膜功能障碍,包括瓣膜纤维化、钙化、磨损、撕裂、松弛以及支架断裂或变形等,最终导致瓣膜狭窄和/或反流。本文通过阐述SVD的定义,探讨TAVR后患者SVD的发生情况、危险因素以及应对策略,以期生物瓣耐久性的研究提供参考,为改善SVD患者临床结局提供思路。

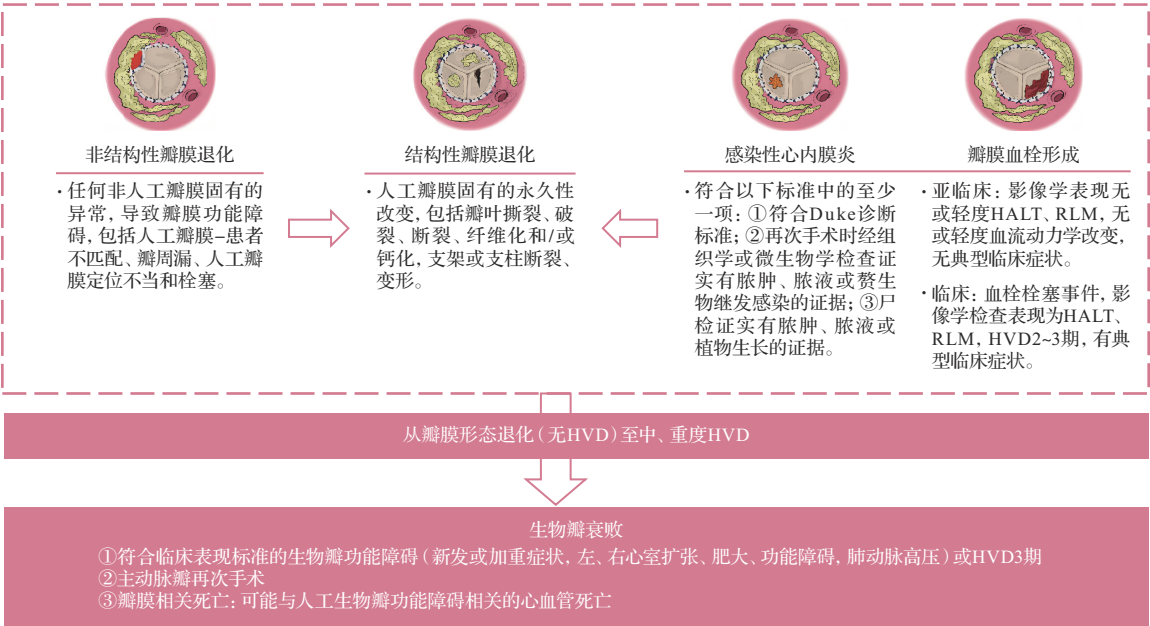
1 结构性瓣膜退化的定义及经导管主动脉瓣置换术后相关结构性瓣膜退化

SVD是由于瓣膜本身不可逆转的变性导致的功能障碍,主要表现为瓣膜逐渐出现的退行性改变,如血管翳生长、纤维化和钙化、结缔组织分

层以及出现破裂和穿孔^[7],这种退化过程可能由钙的被动积累引发,也可能与宿主的免疫反应有关,表现为长期移植排斥反应、动脉粥样硬化和原生主动脉瓣钙化的过程^[8]。

既往美国胸外科医师协会将主动脉瓣的SVD界定为需行主动脉瓣再干预(如再次手术、经导管瓣中瓣植入)或发生瓣膜相关死亡,这一标准已广泛应用于多数SAVR耐久性研究^[9-11]。然而,这一定义可能低估了SVD的真实发生率,实际上,很多患者出现疑似SVD症状后由于年龄大或风险过高而未接受再次诊疗,未被及时诊断为SVD。此外,老年患者普遍存在多种合并症,确切死因难以界定,也可能使SVD所致死亡被低估。出于上述原因,EAPCI/ESC/EACTS和VARC-3根据患者随访期间超声心动图评估的瓣膜结构和血流动力学变化提出了新的标准化定义^[3, 12]。

值得注意的是,EAPCI/ESC/EACTS与VARC-3对SVD标准化定义的主要区别是,前者认为当主动脉瓣置换术后超声心动图显示高跨瓣压差或随访期间压差增加时即诊断SVD,而后者要求同时满足上述两个条件。EAPCI/ESC/EACTS定义有助于检测结构性SVD和BVF的风险因素,如严重的PPM和高跨瓣压差。但该定义可能将部分PPM误判为SVD,这一现象在PPM发生率较高的



HVD:血流动力学瓣膜功能恶化;HALT:低衰减瓣叶增厚;RLM:瓣叶运动减弱。

图1 生物瓣功能障碍类型及其发展为生物瓣衰败示意图
Figure 1 Schematic representation of the classification of bioprosthetic valve dysfunction and its progression to bioprosthetic valve failure

治疗组中尤为明显,进而可能造成对SVD或BVF发生率的错误评估。VARC-3定义则通过更严格的标准,降低误诊风险,提供了更准确的SVD诊断,有助于识别和比较不同治疗组的瓣膜耐久性。但该定义中要求检测多种指标,如通过超声心动图测量有效瓣口面积,而部分医院并不常规测量有效瓣口面积,因而可能无法收集VARC-3定义中推荐的所有检查指标数据。

SVD作为影响生物瓣长期耐久性的主要因素,通常在患者行TAVR后8年开始出现,术后10年以上的患者SVD的发生率会明显增加^[13]。目前仍然缺乏关于TAVR用瓣膜(以下简称TAVR瓣膜)长期耐久性的研究,尤其是10年及以上耐久性的研究数据。现有临床证据中,比较受关注的是北欧主动脉瓣干预研究(NOTION)^[14],10年随访数据表明,与SAVR比较,TAVR后患者发生重度SVD风险较低,且总血流动力学性能更佳,在超声心动图上表现为更大的有效瓣口面积和更低的跨瓣压差。此外,一项汇集了来自CoreValve临床试验和SURTAV临床试验结果的研究显示,TAVR患者术后5年SVD发生率较SAVR患者低^[15]。上述临床研究提示,TAVR瓣膜在SVD方面的表现不仅不劣于SAVR用瓣膜(以下简称SAVR瓣膜),甚至展现出更优的耐久性。

2 经导管主动脉瓣置换术后结构性瓣膜退化的危险因素

目前,由于TAVR患者长期随访数据有限,且SVD发生率较低,因此关于TAVR后SVD危险因素的研究数据较少。TAVR后SVD的危险因素主要包括患者因素、瓣膜因素以及手术因素。

2.1 患者因素

患者性别对于SVD的影响仍存在争议,有些研究认为男性更容易发生SVD^[16],而另一些研究则认为女性是SVD的危险因素^[17]。大多数研究表明患者手术时的年龄是决定瓣膜耐久性的关键因素^[18]。60岁以上患者术后10年发生SVD的比例通常小于10%,而在小于40岁的患者中,这一比例可以达20%~30%^[19-20],这一差异既与年轻患者血流动力学、代谢等因素相关,也可能与高龄患者较高的失访率有关。还有研究表明,年龄、体表面积、PPM和吸烟是生物瓣SVD的风险因素^[21]。这项研究包括了29项观察性研究,涉及

25 490例患者,平均随访时间为18.5年,其中981例患者发展为SVD,研究结果显示年龄增长是一个保护因素,而较大的体表面积、PPM和吸烟是SVD的危险因素。年龄较小、体表面积大和吸烟者新陈代谢率的增加与较高的心排血量有关,都可能对生物瓣SVD的发病机制产生影响,因此其他可能导致心排血量增高的因素同样值得探讨。此外,不少研究也探讨了高血压、糖尿病和高脂血症等传统的心血管危险因素与心脏瓣膜疾病之间的关系,发现上述因素可能会通过促进炎症反应、加剧氧化应激和诱发血管钙化等机制增加瓣膜退行性变的发病风险^[22-23]。此外,肾功能不全、继发性甲状旁腺功能亢进等影响钙磷代谢的疾病同样会加速SVD的发生^[24]。

2.2 瓣膜因素

在瓣膜材料方面,已有研究发现牛心包瓣膜比猪心包瓣膜在血流动力学性能上表现更佳,前者具有更低的跨瓣压差和最大流速、更大的几何口面积、更低的血流剪切应力及瓣叶应力^[25]。但这一差别能否降低SVD发生率仍不明确^[26]。在瓣膜处理上,戊二醛交联是最常用的瓣膜处理方式,但处理后的瓣膜可能并非完全“免疫惰性”,残存的动物抗原可能会诱发患者体液和细胞免疫反应,导致组织变性^[27]。免疫功能更强可能是年轻患者更快发生SVD的原因之一。同时,戊二醛交联过程中可能会因瓣膜损伤引起钙内流,再与残留磷脂结合,形成一个易于钙化磷晶体沉积的环境,导致瓣膜逐渐钙化^[8]。此外,研究发现生物瓣中的异种糖类抗原可能触发免疫识别反应,介导钙化,加速瓣膜组织钙化进程,导致SVD^[28]。在瓣膜类型方面,自膨式瓣膜与球囊扩张式瓣膜各有优势。自膨式瓣膜由于其环上瓣的设计特点,有效瓣口面积更大,发生PPM的风险较低;而球囊扩张式瓣膜支撑力更强、瓣膜支架的扩张更充分,可更好地克服钙化阻力,降低瓣周漏风险。

2.3 手术因素

在TAVR操作中,与SVD相关的危险因素主要有:①手术时因装载瓣膜、反复回收瓣膜以及术中使用球囊扩张瓣膜等手术操作造成的瓣叶损伤;②THV支架扩张不足或扩张过度;③非圆形或不规则的支架释放形态也可能导致瓣膜血栓形成和加速SVD。TAVR中造成的瓣膜结构损

伤可能通过激活相关通路(主要涉及细胞外基质降解、炎症反应和钙化相关信号通路)增加血浆分子和血液细胞成分的浸润和酶促降解,从而引起瓣膜退化^[29]。与TAVR瓣膜比较,SAVR瓣膜未经过压缩装载的过程,通常不存在扩张不良或异形扩张等情况。然而,SURTAVI随机临床试验的5年随访结果显示,TAVR患者SVD的累积发生率低于SAVR患者^[30]。特别是在瓣环较小的患者中,TAVR组SVD发生风险降低更明显,如瓣环23 mm及以下的患者中TAVR组发生SVD的比例为1.32%,而SAVR组为5.84%。这可能是因为TAVR后患者主动脉瓣的有效瓣口面积更大,从而降低了SVD风险。但是该研究中TAVR组和SAVR组在5年随访期间的重度SVD发生率相近^[30]。

3 经导管主动脉瓣置换术后结构性瓣膜退化的影像学评估

临床常用的超声心动图、MDCT和心脏MRI均可用于SVD评估^[31-32]。超声心动图是一种“功能性”成像方式,在证明瓣膜血流动力学(如跨瓣压差、瓣膜反流)方面更优越。MDCT具有良好的空间分辨率,可更清晰地显示解剖结构细节。心脏MRI可同时提供解剖和功能信息,但获取难度大于超声心动图和MDCT,且在评估SVD方面的应用经验有限,因此心脏MRI在生物瓣功能评估中的价值有待研究。在评估生物瓣耐久性时,影像学检查方法的选择需充分考虑评估目的、重点及不同影像学技术的优缺点。

3.1 超声心动图

经胸超声心动图是评估TAVR后生物瓣形态和功能的主要手段,必要时可行经食管超声心动图检查。所有患者在TAVR后都应行经胸超声心动图检查^[33-34],作为随访期间检查的基线参照,主要评估内容包括主动脉瓣峰值血流速度、平均跨瓣压差、有效瓣口面积,以及中心性反流或瓣周反流情况。对于所有接受了TAVR的患者,建议术后1、6、12个月及此后每年随访时进行经胸超声心动图检查^[35]。值得注意的是,在经胸超声心动图并未显示明显的血流动力学变化情况下,也可能发生与瓣膜血栓形成相关的变化^[36]。

3.2 MDCT

MDCT检查主要包括支架形态(支架扩张程

度和椭圆指数)、瓣叶异常(瓣叶增厚和运动减弱)、钙化情况(瓣膜钙化的程度和分布)。MDCT能够更清晰地显示瓣膜结构改变,如瓣膜血栓形成或血管翳形成,但难以准确评估与SVD相关的瓣膜血流动力学变化,因此在临床实践中并未作为常规检查手段。

4 结构性瓣膜退化应对策略

患者在TAVR后出现SVD,医生需要根据其具体情况制订个体化治疗策略,目前临床上应对措施主要包括药物治疗、再次TAVR、SAVR和SURPLUS术。

4.1 药物治疗

应用药物是基础治疗,目的是缓解症状和延缓病情进展,包括抗凝治疗和心力衰竭治疗。抗凝治疗可预防或治疗血栓形成,降低栓塞事件的风险。心力衰竭治疗可改善患者的症状和生活质量,延缓心室重塑和心脏功能恶化。药物治疗通常不能解决SVD或非结构性瓣膜退化的问题,因此需要结合其他治疗策略。

4.2 再次TAVR

再次TAVR是目前最常用的治疗TAVR瓣膜衰败的方法,具有微创、安全、有效的特点,适用于大多数患者,尤其是高风险或不适合SAVR的患者。再次TAVR即在原来的TAVR瓣膜内部植入一个新的瓣膜,从而恢复主动脉瓣的功能。一项临床研究分析了再次TAVR与自体TAVR的安全性和有效性^[37],结果350 591例患者中,1320对接受再次TAVR和自体TAVR的倾向匹配患者并发症发生情况相似。在30 d和1年的病死率及卒中率方面,再次TAVR患者和自体TAVR患者之间无明显差异。

另一项EXPLANTORREDO-TAVR研究比较了初次TAVR失败后进行手术移除(TAVR-explant)与再次TAVR的中期结果^[38]。396例患者因THV失败接受了再干预,其中181例患者接受了TAVR-explant治疗,215例患者接受了再次TAVR治疗,研究结果显示,与再次TAVR组比较,TAVR-explant组距离首次TAVR到瓣膜再干预的中位时间更短(17.6个月 vs 45.7个月),30 d和1年的病死率更高,但两组卒中和中重度瓣周漏的发生率相近。值得注意的是,TAVR-explant组更多因为PPM而需要再次干预,再次TAVR组

更多因为SVD而需要再次干预。

综上,再次TAVR的安全性和有效性正得到越来越多的证据支持。再次TAVR的优点是可以避免外科开胸和体外循环的创伤和并发症,缩短住院时间和恢复时间,提高患者的存活率和生活质量;缺点是有可能导致PPM、支架压缩或变形、冠状动脉阻塞等问题,并增加未来冠状动脉介入和再次TAVR的难度。仍需要通过样本量更大,随访时间更长的临床研究评估再次TAVR的适应证、手术策略及长期效果。

4.3 SAVR

SAVR主要适用于相对年轻、外科风险低、再次TAVR不可行或有禁忌证的患者。通常需要完全切除原来的TAVR瓣膜,并重新置换一个新的瓣膜。研究显示,由于患者年龄、合并症和手术挑战等因素,对于TAVR后进行SAVR的患者,围手术期死亡风险较高^[39]。与围手术期死亡相关的危险因素包括围手术期心功能分级为Ⅲ/Ⅳ级,左心室射血分数降低,非心源性疾病如肾功能衰竭、慢性阻塞性肺疾病、神经系统疾病等^[14, 40]。SAVR的优点是能够减少瓣膜置换术后瓣周漏、冠状动脉堵塞等并发症的发生风险,相比再次TAVR有更好的手术可重复性;缺点是创伤大、风险高、需要体外循环和主动脉阻断,存在出血、感染、心律失常、脑卒中等风险,以及较长的住院时间和恢复时间。

4.4 SURPLUS术

SURPLUS术是治疗TAVR瓣膜衰败的一种新方法^[41],主要适用于再次TAVR不可行或有禁忌证,同时SAVR风险过高的患者。SURPLUS术结合了SAVR和TAVR的优点,其步骤是在体外循环和主动脉阻断下,通过胸骨小切口切开主动脉窦,在直视心脏下手术切除首次TAVR后衰败的瓣叶,保留原支架作为锚定结构,在原支架内部植入一个新的TAVR瓣膜,并缝合主动脉窦。SURPLUS术的优点是可以降低PPM、瓣周漏及冠状动脉阻塞等风险,改善再次术后瓣膜功能和耐久性;缺点是技术要求高,需要专业培训和设备,并且该术式仅限于部分医学中心开展。

5 结 语

TAVR自2002年首次成功实施以来,随着瓣膜置入的患者越来越年轻,瓣膜耐久性问题也逐

渐受到重视,尤其是在预期寿命较长的年轻和低风险患者中,这些患者可能面临长达数十年的瓣膜管理挑战。SVD是影响TAVR瓣膜耐久性的主要因素之一。目前,发生SVD的确切机制尚不清楚,但可能包括机械应力、瓣叶表面异常的血流剪切应力、胶原纤维破坏和组织钙化引起的瓣膜组织破坏或增厚、免疫反应、钙磷代谢异常等。

现有证据表明,尽管TAVR瓣膜和SAVR瓣膜的BVF发生率相似,但TAVR瓣膜发生严重SVD的风险较低^[14],未来仍需要更多长期临床试验数据来验证。此外,不同类型瓣膜各有优势,从框架设计到瓣膜原料、瓣膜处理和瓣膜缝合等都可能影响TAVR瓣膜的耐久性,而且患者因素和术者经验也会对TAVR瓣膜耐久性造成影响。针对瓣膜材料提升开展的研究,如新型瓣膜材料的研发、抗钙化技术的改进以及制造工艺的优化为改善生物瓣的耐久性、提高患者的生活质量带来了希望。

在TAVR适应证向更低风险与更低年龄人群拓展的趋势下,还需要更多能证实TAVR瓣膜长期耐久性的研究,以精准权衡TAVR与SAVR的优劣,进而指导患者个体化治疗。随着TAVR的进步和术者经验的积累,期待更好的解决方案来减少人工生物瓣退化的发生,以延长瓣膜的耐久性,改善患者的存活率和生活质量。

志谢 研究得到四川省重大科技专项(2022ZDZX0030)、四川省干部保健科研项目(川干研ZH2024-103)支持

Acknowledgements This work was supported by the Key Science and Technology Project of Sichuan Province (2022ZDZX0030) and Sichuan Cadre Health Research Project (Chuan Gan Yan ZH2024-103)

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验

Ethical Approval This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献(References)

- [1] SPEARS J, AL-SAIEGH Y, GOLDBERG D, et al. TAVR: a review of current practices and considerations in low-risk patients[J]. *J Interv Cardiol*, 2020, 2020: 2582938.
- [2] MANGIERI A, MONTALTO C, POLETTI E, et al. Thrombotic versus bleeding risk after transcatheter aortic valve replacement: JACC review topic of the week [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 74(16): 2088-2101.
- [3] GÉNÉREUX P, PIAZZA N, ALU M C, et al. Valve academic research consortium 3: updated endpoint definitions for aortic valve clinical research[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 77(21): 2717-2746.
- [4] NISHIMURA R A, OTTO C M, BONOW R O, et al. 2017 AHA/ACC focused update of the 2014 AHA/ACC guideline for the management of patients with valvular heart disease: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association task force on clinical practice guidelines[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 70(2): 252-289.
- [5] FLAMENG W, HERREGODS M C, VERCALSTEREN M, et al. Prosthesis-patient mismatch predicts structural valve degeneration in bioprosthetic heart valves [J]. *Circulation*, 2010, 121(19): 2123-2129.
- [6] MARRO M, KOSSAR A P, XUE Y, et al. Noncalcific mechanisms of bioprosthetic structural valve degeneration[J/OL]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(3): e018921.
- [7] DVIR D, BOURGUIGNON T, OTTO C M, et al. Standardized definition of structural valve degeneration for surgical and transcatheter bioprosthetic aortic valves [J]. *Circulation*, 2018, 137(4): 388-399.
- [8] KOSTYUNIN A E, YUZHALIN A E, REZVOVA M A, et al. Degeneration of bioprosthetic heart valves: update 2020[J/OL]. *J Am Heart Assoc*, 2020, 9(19): e018506.
- [9] MOHAMMADI S, KALAVROUZOTIS D, VOISINE P, et al. Bioprosthetic valve durability after stentless aortic valve replacement: the effect of implantation technique[J]. *Ann Thorac Surg*, 2014, 97(6): 2011-2018.
- [10] ANSELM I A, FLECHER E, CHABANNE C, et al. Long-term follow-up of bioprosthetic aortic valve replacement in patients aged ≤ 60 years[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2017, 154(5): 1534-1541.e4.
- [11] ALI A, ABU-OMAR Y, PATEL A, et al. Valve failure following homograft aortic valve replacement: does implantation technique have an effect?[J]. *Eur Heart J*, 2008, 29(11): 1454-1462.
- [12] CAPODANNO D, PETRONIO A S, PRENDERGAST B, et al. Standardized definitions of structural deterioration and valve failure in assessing long-term durability of transcatheter and surgical aortic bioprosthetic valves: a consensus statement from the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions (EAPCI) endorsed by the European Society of Cardiology (ESC) and the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS)[J]. *Eur Heart J*, 2017, 38(45): 3382-3390.
- [13] LONG Y X, LIU Z Z. Incidence and predictors of structural valve deterioration after transcatheter aortic valve replacement: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Interv Cardiol*, 2020, 2020: 4075792.
- [14] THYREGOD H, JØRGENSEN T H, IHLEMANN N, et al. Transcatheter or surgical aortic valve implantation: 10-year outcomes of the NOTION trial[J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(13): 1116-1124.
- [15] O'HAIR D, YAKUBOV S J, GRUBB K J, et al. Structural valve deterioration after self-expanding transcatheter or surgical aortic valve implantation in patients at intermediate or high risk[J]. *JAMA Cardiol*, 2023, 8(2): 111-119.
- [16] JAMIESON W R, BURR L H, MIYAGISHIMA R T, et al. Carpentier-Edwards supra-annular aortic porcine bioprosthesis: clinical performance over 20 years[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2005, 130(4): 994-1000.
- [17] NOLLERT G, MIKSCH J, KREUZER E, et al. Risk factors for atherosclerosis and the degeneration of pericardial valves after aortic valve replacement[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2003, 126(4): 965-968.
- [18] JOHNSTON D R, SOLTESZ E G, VAKIL N, et al. Long-term durability of bioprosthetic aortic valves: implications from 12,569 implants[J]. *Ann Thorac Surg*, 2015, 99(4): 1239-1247.
- [19] FORCILLO J, PELLERIN M, PERRAULT L P, et al. Carpentier-Edwards pericardial valve in the aortic position: 25-years experience[J]. *Ann Thorac Surg*, 2013, 96(2): 486-493.
- [20] BANBURY M K, COSGROVE D M 3rd, WHITE J A, et al. Age and valve size effect on the long-term durability of the Carpentier-Edwards aortic pericardial bioprosthesis[J]. *Ann Thorac Surg*, 2001, 72(3): 753-757.
- [21] OCHI A, CHENG K, ZHAO B, et al. Patient risk factors for bioprosthetic aortic valve degeneration: a systematic review and meta-analysis[J]. *Heart Lung Circ*, 2020, 29(5): 668-678.
- [22] BASILE C, FUCILE I, LEMBO M, et al. Arterial hypertension in aortic valve stenosis: a critical update[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(23): 5553.
- [23] CONTE M, PETRAGLIA L, CAMPANA P, et al. The role of inflammation and metabolic risk factors in the pathogenesis of calcific aortic valve stenosis[J]. *Aging Clin Exp Res*, 2021, 33(7): 1765-1770.
- [24] YAN H, SHARMA J, WEBER C J, et al. Elevated parathyroid hormone predicts mortality in dialysis patients undergoing valve surgery[J]. *Surgery*, 2011, 150(6): 1095-1101.
- [25] LI C, TANG D, YAO J, et al. Porcine and bovine aortic valve comparison for surgical optimization: a fluid-structure interaction modeling study[J]. *Int J Cardiol*,

- 2021, 334: 88-95.
- [26] YAP K H, MURPHY R, DEVBHANDARI M, et al. Aortic valve replacement: is porcine or bovine valve better?[J]. **Interact Cardiovasc Thorac Surg**, 2013, 16(3): 361-373.
- [27] HUANG X, ZHENG C, DING K, et al. Dual-crosslinked bioprosthetic heart valves prepared by glutaraldehyde crosslinked pericardium and poly-2-hydroxyethyl methacrylate exhibited improved antithrombogenicity and anticalcification properties[J]. **Acta Biomater**, 2022, 154: 244-258.
- [28] SENAGE T, PAUL A, LE TOURNEAU T, et al. The role of antibody responses against glycans in bioprosthetic heart valve calcification and deterioration[J]. **Nat Med**, 2022, 28(2): 283-294.
- [29] ANARKI K T, ZAHRA Z, JAVID R N, et al. Immune response following transcatheter aortic valve procedure [J]. **Vascul Pharmacol**, 2024, 154: 107283.
- [30] VAN MIEGHEM N M, DEEB G M, SØNDERGAARD L, et al. Self-expanding transcatheter vs surgical aortic valve replacement in intermediate-risk patients: 5-year outcomes of the SURTAVI randomized clinical trial [J]. **JAMA Cardiol**, 2022, 7(10): 1000-1008.
- [31] ELTCHANINOFF H, DURAND E, BARBANTI M, et al. TAVI and valve performance: update on definitions, durability, transcatheter heart valve failure modes and management[J]. **EuroIntervention**, 2018, 14(AB): AB64-AB73.
- [32] LEVY G, PALACIO D. Cardiac gated multidetector computed tomography (MDCT) to determine valvular leaflet thrombosis and leaflet restriction[J]. **J Card Surg**, 2022, 37(12): 4172-4177.
- [33] OTTO C M, NISHIMURA R A, BONOW R O, et al. 2020 ACC/AHA guideline for the management of patients with valvular heart disease: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines [J/OL]. **Circulation**, 2021, 143(5): e72-e227.
- [34] VAHANIAN A, BEYERSDORF F, PRAZ F, et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease[J]. **Eur Heart J**, 2022, 43(7): 561-632.
- [35] SOKALSKIS V, MURARU D, FRACCARO C, et al. Echocardiographic follow-up after transcatheter aortic valve replacement[J]. **Echocardiography**, 2017, 34(2): 267-278.
- [36] FAZZARI F, BAGGIANO A, FUSINI L, et al. Early biological valve failure: structural valve degeneration, thrombosis, or endocarditis?[J]. **J Clin Med**, 2023, 12 (17): 5740.
- [37] MAKAR R R, KAPADIA S, CHAKRAVARTY T, et al. Outcomes of repeat transcatheter aortic valve replacement with balloon-expandable valves: a registry study[J]. **Lancet**, 2023, 402(10412): 1529-1540.
- [38] TANG G, ZAID S, KLEIMAN N S, et al. Explant vs Redo-TAVR after transcatheter valve failure: mid-term outcomes from the EXPLANTORREDO-TAVR international registry[J]. **JACC Cardiovasc Interv**, 2023, 16(8): 927-941.
- [39] HAWKINS R B, DEEB G M, SUKUL D, et al. Redo surgical aortic valve replacement after prior transcatheter versus surgical aortic valve replacement. **JACC Cardiovasc Interv**, 2023, 16(8): 942-953.
- [40] THYREGOD H G, SØNDERGAARD L, IHLEMANN N, et al. The Nordic aortic valve intervention (NOTION) trial comparing transcatheter versus surgical valve implantation: study protocol for a randomised controlled trial[J]. **Trials**, 2013, 14: 11.
- [41] PIRELLI L, BASMAN C L, BRINSTER D R, et al. Surgical resection of prosthetic valve leaflets under direct vision (SURPLUS) for redo TAVR[J]. **JACC Cardiovasc Interv**, 2021, 14(9): 1036-1037.

[本文编辑 沈 敏 沈 洁]