



[DOI]10.3969/j.issn.1001-9057.2023.05.003

<http://www.lcnkz.com/CN/10.3969/j.issn.1001-9057.2023.05.003>

· 综述与讲座 ·

# 经导管主动脉瓣植入术后瓣环破裂 相关研究进展

陈俊 朱齐丰 范嘉祺 刘先宝 王建安

**【摘要】** 主动脉瓣环破裂作为经导管主动脉瓣植入术(TAVI)相关并发症之一较为少见,但常导致灾难性临床结局。随着心脏介入医生治疗经验的积累,人工瓣膜锚定区域钙化、二叶式主动脉瓣畸形、球囊扩张式瓣膜、瓣中瓣手术等术中瓣环破裂相关危险因素得到不断重视。同时基于弹簧圈、血管塞、组织胶等开展的经血管腔内介入治疗术中瓣环破裂的成功经验也得到不断报道。此外,医工结合的术前个性化评估、人工瓣膜设计改良及植入策略优化可用于预防术中瓣环破裂发生。

**【关键词】** 经导管主动脉瓣植入术; 主动脉瓣环破裂; 经血管腔内介入治疗

**【中图分类号】** R541 **【文献标识码】** A

经导管主动脉瓣植入术(TAVI)作为重度主动脉瓣狭窄的一线治疗手段之一,具有创伤小、术后恢复快等优点。自2002年第1例手术以来,TAVI历经了20年的快速发展<sup>[1]</sup>。伴随一系列随机对照试验的证据积累,TAVI已被证实其治疗重度主动脉瓣狭窄的疗效及安全性不劣于或优于外科主动脉瓣置换术<sup>[2-9]</sup>,得到相关瓣膜病管理指南推荐,且适应证也逐步拓宽<sup>[10]</sup>。而伴随着TAVI适应证进一步向年轻、低危患者人群拓展的同时,如何避免或减少TAVI相关并发症的发生是一个亟待解决的问题。其中,TAVI相关瓣环破裂较为少见,而一旦发生,其结果往往是灾难性的。因此,本文就TAVI相关瓣环破裂研究进展作一综述,内容包括TAVI相关瓣环破裂的定义、分类、相关危险因素、诊断及治疗方法,旨在加深临床工作者对TAVI相关瓣环破裂的认识。

## 一、瓣环破裂的定义及分类

瓣环破裂即为瓣环结构损伤破裂。从解剖学角度来看,主动脉瓣环即为主动脉根部和左心室的连接处;从外科手术视角来看,主动脉瓣环是主动脉瓣叶插入主动脉血管壁所形成的纤维结构;而TAVI领域的瓣环通常是指基于术前影像分析所确定的“虚拟瓣环”,由3个主动脉瓣叶最低点(二叶式主动脉瓣则为2个)组成瓣环平面,其形状及大小会伴随心动周期不断变

化。而真实世界中TAVI相关瓣环破裂则将这一解剖概念进一步拓展,涵盖了TAVI术中主动脉根部和左室流出道出现的相关损伤。从TAVI术中角度出发,发生在“人工瓣膜锚定区域(DLZ)”的破裂或许能更加精确刻画瓣环破裂这一概念<sup>[11]</sup>。TAVI相关瓣环破裂可据其发生部位,分为以下4类:瓣环内破裂、瓣环上破裂(包括瓦氏窦壁损伤、冠状动脉窦损伤及窦管交界损伤)、瓣环下破裂(包括心肌游离壁损伤、二尖瓣前叶损伤及室间隔损伤)和复合型破裂(包括瓣环内及瓣环上受累、瓣环内及瓣环下受累和瓣环内、瓣环上及瓣环下均受累)<sup>[11]</sup>。据既往注册研究披露的数据结果,TAVI相关瓣环破裂的发生率接近1%,是术中转外科手术治疗的重要原因之一,其相关临床预后较差,早期死亡率高达100%<sup>[12-17]</sup>。而较为轻微的瓣环撕裂可通过新植入的人工瓣膜锚定封堵,通常并无明显的临床表现,仅表现为术中相应部位的造影剂轻微渗出<sup>[18]</sup>。因此,真实世界中瓣环破裂的发生率可能较既往报道结果更高。

## 二、瓣环破裂的相关危险因素

1. DLZ钙化:Barbanti等<sup>[12]</sup>对比分析TAVI术中有/无瓣环破裂的两组患者术前CT影像,发现中重度左室流出道/瓣环下钙化与主动脉根部破裂风险增加具有相关性。Okuno等<sup>[19]</sup>开展的单中心回顾性研究表明合并中重度左室流出道钙化患者瓣环破裂的发生率较其他患者更高;此外,该团队发现选用老一代瓣膜产品时,左心室流出道(LVOT)中重度钙化患者瓣环破

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC2008100)

作者单位:310069 杭州,浙江大学医学院附属第二医院心血管内科

通讯作者:王建安,E-mail:wangjianan111@zju.edu.cn

裂风险比 LVOT 无中重度钙化患者更高,而选用新一代瓣膜产品时则未观察到上述现象。Okuno 等<sup>[19]</sup>关于新一代人工瓣膜应对 LVOT 中重度钙化方面更加优异的发现也得到了 Farhan 等<sup>[20]</sup>的研究证实。

而 Sá 等<sup>[21]</sup>开展的 Meta 分析进一步探究了 LVOT 钙化对 TAVI 术后相关临床结局的影响,其结果表明 LVOT 钙化增加了围术期和术后 1 年死亡、卒中、心肌梗死、瓣周漏及瓣环破裂风险。此外, Watanabe 等<sup>[22]</sup>通过定量计算患者 CT 影像主动脉根部钙化指数(即钙化容积/体表面积),观察主动脉根部钙化对 TAVI 术后临床结局的影响,结果显示主动脉根部钙化指数阈值设定为 517.4 可较好地预测瓣环破裂发生风险。而 Guimarães 等<sup>[23]</sup>则通过将主动脉根部钙化容积除以瓣环横截面积计算钙化容积指数(iCS)从而定量探究主动脉根部钙化严重程度对 SAPIEN3 球囊扩张式瓣膜相关表现的影响,其结果表明 iCS 更高的患者瓣环破裂事件发生比例更高,但差异无统计学意义。

2. 二叶式主动脉瓣:同西方国家患者人群相比,我国重度主动脉瓣狭窄患者人群中先天性二叶式主动脉瓣(BAV)畸形的比例更高<sup>[24]</sup>。Montalto 等<sup>[25]</sup>对二叶式和三叶式主动脉瓣(TAV)患者 TAVI 术后临床结局进行了系统性回顾分析和 Meta 分析,结果表明 BAV 患者瓣环破裂发生率显著高于 TAV 患者。而对于 BAV 患者人群而言,选择合适的经导管人工瓣膜类型十分重要。Mangieri 等<sup>[26]</sup>在 BAV 患者人群中比较 Evolut R/PRO 自膨胀式瓣膜及 SAPIEN 3 球囊扩张式瓣膜的安全性和有效性,结果表明两类瓣膜在 BAV 患者人群治疗中均可行,且与 Evolut R/PRO 自膨胀式瓣膜相比,SAPIEN 3 球囊扩张式瓣膜术后 1 年随访时中重度瓣周漏的发生率更低,但瓣环破裂的发生率更高,该研究结论与后续 Meta 分析研究结果一致<sup>[27]</sup>。

3. 球囊扩张式瓣膜:Okuno 等<sup>[19]</sup>在研究中揭示, LVOT 中重度钙化患者 TAVI 术中瓣环破裂风险更高;同时也表明了相对其他人工瓣膜类型而言, LVOT 中重度钙化患者选用球囊扩张式瓣膜具有更高的瓣环破裂风险。而 Sá 等<sup>[21]</sup>的 Meta 分析研究结果同样提示对于重度主动脉瓣狭窄合并 LVOT 钙化患者而言,自膨胀式瓣膜或许是更优选择。此外, Mangieri 等<sup>[26]</sup>的研究则补充说明在 BAV 患者人群中,球囊扩张式瓣膜的瓣环破裂事件发生率比自膨胀式瓣膜更高,但差异无统计学意义。而 Barbanti 等<sup>[12]</sup>的研究结果还提示球囊扩张式瓣膜尺寸选择相对过大(Oversize  $\geq 20\%$ )与主动脉根部破裂具有一定相关性。

4. TAVI 瓣中瓣手术:Landes 等<sup>[28]</sup>回顾性分析了 21 298 例 TAVI 患者瓣中瓣手术的发生率、原因及相应

临床结局,结果显示其发生率约为 1.0%;主要原因为首个瓣膜异位引起主动脉瓣残余反流;二叶式主动脉瓣、中重度主动脉瓣反流、心房颤动、非经股动脉入路、老一代瓣膜产品及自膨胀瓣膜为 TAVI 瓣中瓣手术的相关危险因素;匹配对比 TAVI 瓣中瓣手术和 TAVI 单瓣手术相关临床结局,结果显示 TAVI 瓣中瓣手术患者瓣环破裂风险更高。

### 三、瓣环破裂的诊断方法

瓣环破裂的相关临床表现出现时间取决于损伤位置和累及范围。部分患者可能于术中就出现相应临床症状,也有部分患者可能于术后数小时甚至更久后才出现相关临床表现。此外,还有部分损伤较轻的患者可无相关临床表现。瓣环破裂可通过超声心动图和(或)血管造影识别,其中经食道超声心动图结合血管造影对可疑的瓣环破裂早期诊断十分重要。主动脉根部血管造影在识别瓣环上破裂方面具有重要价值;相对地,对于瓣环下破裂同时未合并明显瓣周漏或主动脉瓣反流的患者而言,主动脉根部血管造影的诊断价值则大打折扣。此外,心脏 CT 结合超声心动图复查在瓣环破裂患者的随访观察中具有较高的应用价值。

### 四、瓣环破裂经血管腔内介入治疗方法

尽管目前 TAVI 适应证已逐步拓展至外科手术低危、年轻患者人群,但仍有部分接受 TAVI 治疗的患者为外科手术高危或禁忌人群,当这一部分患者术中发生瓣环破裂时,传统外科开胸干预恐怕难以实行。因此,随着近年心脏介入医生对瓣环破裂相关认知不断加深及介入器械技术的不断成熟,经血管腔内治疗 TAVI 相关瓣环破裂的经验也有报道。

国内学者报道了 1 例 TAVI 术中球囊扩张引发瓣环破裂后介入治疗成功的案例<sup>[29]</sup>。该患者 TAVI 术中行球囊预扩张后出现血流动力学不稳定等表现,术者回顾球囊预扩张前后血管造影图像,发现瓦氏窦下方存在造影剂外渗,随即通过继续植入人工瓣膜实现治疗主动脉瓣狭窄的同时成功阻止瓣环破裂位点出血。此前报道的瓣环破裂多为瓣膜释放或球囊后扩张引起,而该例球囊预扩张引发瓣环破裂相关处理尚属首例,该案例的成功经验说明对于瓣膜植入前出现的轻微瓣环破裂,继续行人工瓣膜植入合理有效。这为 TAVI 术中瓣环破裂处理方案作了新补充。

Chakravarty 等<sup>[30]</sup>于 2018 年率先报道了 2 例经导管介入弹簧圈栓塞修补瓣环破裂的成功经验。其中,第 1 例患者 TAVI 术中植入自膨胀式瓣膜后因存在明显瓣周漏行球囊后扩张,随即出现大量心包积液,术中

行心包穿刺引流,并行选择性造影,明确瓣环破裂位于左冠窦,术者选用 MReye Embolization Coils 在主动脉根部破裂点外侧进行栓塞治疗,再次造影提示心包积液完全缓解,术后 6 个月 CT 随访提示弹簧圈位置良好;第 2 例患者在植入球囊扩张式瓣膜后出现大量心包积液,术中行紧急心包穿刺引流,选择性造影明确瓣环破裂位点后选用 Penumbra Coils 实现瓣环破裂成功封堵。上述两例瓣环破裂分别发生于自膨胀式瓣膜和球囊扩张式瓣膜 TAVI 术中,反映了经血管腔内弹簧圈栓塞封堵瓣环破裂相关主动脉瓣周空间的可行性和有效性,为 TAVI 相关瓣环破裂治疗补充了宝贵经验。同年,Azarrafy 等<sup>[31]</sup>也报道了 1 例外科手术风险高危患者 TAVI 术中瓣环破裂后利用弹簧圈栓塞成功封堵的经验。除上述通过弹簧圈介入栓塞法治疗瓣环破裂外,Alkhouli 等<sup>[32]</sup>和 Pignatelli 等<sup>[33]</sup>还曾先后报道利用 Amplatzer 血管塞介入治疗瓣环破裂的成功案例。

此外,Piliero 等<sup>[34]</sup>曾报道过利用组织胶成功修补瓣环破裂案例:患者为 96 岁老年男性,SAPIEN XT 瓣膜植入过程发生瓣环破裂,常规心包穿刺引流后,术者以 1:1 比例混合 N-丁基-2-氰基丙烯酸酯(Histoacryl)和碘油,通过 Progreat 微管注射至瓣环穿孔处,最终实现了瓣环破裂的成功封堵。其中,Histoacryl 具有与人体血液接触后迅速硬化的特性,而额外添加碘油不仅可延缓组织胶聚合还能使其在数字减影血管造影(DSA)下显像,为 TAVI 术中瓣环破裂提供了一种新的经血管腔内治疗手段。

## 五、瓣环破裂的预防方法

除中重度左室流出道/瓣环下钙化与瓣环破裂风险增加外,钙化严重程度、位置及范围也是 TAVI 术后瓣周漏的重要影响因素,而非对称性钙化合并更严重的左冠窦钙化则与术后新发起搏器植入相关。此外,TAVI 术中相应主动脉窦钙化物和钙化嵴的移位是冠状动脉窦阻塞的主要原因之一<sup>[35]</sup>。因此,TAVI 术前对主动脉瓣及根部结构进行全面评估并精确识别相应风险十分必要。然而,鉴于 TAVI 相关瓣环破裂发生率较低,尚缺乏大样本量的临床研究来很好地揭示 TAVI 瓣环破裂相关预测因素及发生机制,如何基于相关珍贵病例资料来更好地理解主动脉根部结构与人工假体瓣膜之间的生物力学作用对预防 TAVI 术中瓣环破裂十分重要。Wang 等<sup>[36]</sup>于 2015 年利用“有限元分析”这一工程力学方法,基于 CT 影像模拟了 3 例瓣环破裂高风险患者 TAVI 术中瓣膜金属支架释放过程,较好地还原了瓣环破裂的发生过程,其结果也同临床实际观察到的结果及临床医生的判断和决策相符。因

此,针对解剖结构复杂、瓣环破裂高风险的患者进行“个性化”工程力学分析可为临床医生提供更多信息,从而指导合理的决策制定。

既往研究表明,选用更大尺寸的人工瓣膜可能会增加植入物与原生瓣环的锚定贴合程度,从而减少瓣周漏和瓣膜栓塞风险,但植入过大尺寸的人工瓣膜同样会带来瓣环破裂风险,因此,瓣膜尺寸选择是一个值得商榷的话题<sup>[37-38]</sup>。在实际临床工作中,常遇到瓣环大小临界的患者。对于这种情况,通常存在 3 种瓣膜尺寸选择策略:(1)按照操作者手册选择标准尺寸瓣膜正常植入;(2)选择小一号瓣膜并“过度扩张”;(3)选择标准尺寸瓣膜但不充分扩张。但考虑到不充分扩张瓣膜可能会引起人工瓣膜支架变形,导致瓣叶对合不良,从而引起包括瓣膜长期耐久性降低在内的负临床效应,该策略目前已较少选用。Basman 等<sup>[39]</sup>对比了前两种瓣膜尺寸选择策略对 SAPIEN 3 Ultra 瓣膜相关 TAVI 临床结局的影响,结果表明选用小一号瓣膜并进行“过度扩张”可显著降低院内死亡、主动脉根部损伤、中/重度瓣周漏、永久起搏器植入、卒中或术中转外科的复合终点事件发生率,因此对于瓣环大小临界的患者而言,选用小一号瓣膜并过度扩张或许是一个更加安全的选择。

Snir 等<sup>[40]</sup>针对 SAPIEN 3 球囊扩张式瓣膜提出了一种新的压力调节释放策略。不同于以往通过增加或减少释放球囊灌注容积依赖策略,该策略更关注于球囊扩张式瓣膜释放过程中人工瓣膜-瓣环接合处的张力,以期减少组织损伤。该研究显示瓣环接合处压强  $>3.0$  MPa 的患者术中球囊后扩张需求更低,瓣周漏也得到明显改善;瓣环接合处压强  $>3.5$  MPa 的 3 例瓣环破裂高危患者中有 2 例最终出现瓣环破裂,而剩余 1 例瓣环接合处压强不超过 3.5 MPa 的瓣环破裂高危患者未出现瓣环破裂;为此,Snir 等根据人工瓣膜尺寸制定了不同球囊膨胀压力以确保瓣膜释放期间人工瓣膜-瓣环接合处压强落在 3.0 ~ 3.5 MPa 目标范围内:23 mm 人工瓣膜(6.25 atm)、26 mm 人工瓣膜(5.5 atm)及 29 mm 人工瓣膜(5 atm)。上述方案为今后术者选用 SAPIEN 3 球囊扩张式瓣膜进行 TAVI 治疗提供了简便、易行、安全且有效的临床实践参考;其相关临床应用的实际效果仍有待大规模临床研究进一步验证。

## 六、结语

TAVI 相关瓣环破裂相对罕见,但往往会造成灾难性的临床结局。近年随着相关临床研究的开展,DLZ 钙化、二叶式主动脉瓣畸形、球囊扩张式瓣膜、TAVI 瓣中瓣手术等瓣环破裂相关危险因素引起了临床医生的

不断重视。与此同时,随着介入技术进步和术者经验积累,除传统外科开胸干预外,血管塞、弹簧圈栓塞等经血管腔内介入治疗技术也成功应用于 TAVI 术中瓣环破裂的治疗。此外,医工结合的术前个性化评估、人工瓣膜设计改良及植入策略优化在预防 TAVI 术中瓣环破裂方面具有一定的临床应用价值,TAVI 相关瓣环破裂诊治及预防方法仍有待大规模临床研究进一步验证及探究。

### 参 考 文 献

- [1] Cribrier A, Eltchaninoff H, Bash A, et al. Percutaneous Transcatheter Implantation of an Aortic Valve Prosthesis for Calcific Aortic Stenosis: First Human Case Description [J]. *Circulation*, 2002, 106(24): 3006-3008.
- [2] Leon MB, Smith CR, Mack M, et al. Transcatheter Aortic-Valve Implantation for Aortic Stenosis in Patients Who Cannot Undergo Surgery [J]. *N Engl J Med*, 2010, 363(17): 1597-1607.
- [3] Smith CR, Leon MB, Mack MJ, et al. Transcatheter versus Surgical Aortic-Valve Replacement in High-Risk Patients [J]. *N Engl J Med*, 2011, 364(23): 2187-2198.
- [4] Adams DH, Popma JJ, Reardon MJ, et al. Transcatheter Aortic-Valve Replacement with a Self-Expanding Prosthesis [J]. *N Engl J Med*, 2014, 370(19): 1790-1798.
- [5] Leon MB, Smith CR, Mack MJ, et al. Transcatheter or Surgical Aortic-Valve Replacement in Intermediate-Risk Patients [J]. *N Engl J Med*, 2016, 374(17): 1609-1620.
- [6] Reardon MJ, Van Mieghem NM, Popma JJ, et al. Surgical or Transcatheter Aortic-Valve Replacement in Intermediate-Risk Patients [J]. *N Engl J Med*, 2017, 376(14): 1321-1331.
- [7] Thourani VH, Kodali S, Makkar RR, et al. Transcatheter Aortic Valve Replacement versus Surgical Valve Replacement in Intermediate-Risk Patients: A Propensity Score Analysis [J]. *Lancet*, 2016, 387(10034): 2218-2225.
- [8] Mack MJ, Leon MB, Thourani VH, et al. Transcatheter Aortic-Valve Replacement with a Balloon-Expandable Valve in Low-Risk Patients [J]. *N Engl J Med*, 2019, 380(18): 1695-1705.
- [9] Popma JJ, Deeb GM, Yakubov SJ, et al. Transcatheter Aortic-Valve Replacement with a Self-Expanding Valve in Low-Risk Patients [J]. *N Engl J Med*, 2019, 380(18): 1706-1715.
- [10] 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.
- [11] Pasic M, Unbehaun A, Buz S, et al. Annular Rupture during Transcatheter Aortic Valve Replacement: Classification, Pathophysiology, Diagnostics, Treatment Approaches, and Prevention [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(1 Pt A): 1-9.
- [12] Barbanti M, Yang T-H, Rodès Cabau J, et al. Anatomical and Procedural Features Associated with Aortic Root Rupture during Balloon-Expandable Transcatheter Aortic Valve Replacement [J]. *Circulation*, 2013, 128(3): 244-253.
- [13] Eggebrecht H, Schmermund A, Kahlert P, et al. Emergent Cardiac Surgery during Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI): A Weighted Meta-Analysis of 9,251 Patients from 46 Studies [J]. *EuroIntervention*, 2013, 8(9): 1072-1080.
- [14] Walther T, Hamm CW, Schuler G, et al. Perioperative Results and Complications in 15,964 Transcatheter Aortic Valve Replacements: Prospective Data From the GARY Registry [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 65(20): 2173-2180.
- [15] Arsalan M, Kim WK, Van Linden A, et al. Predictors and Outcome of Conversion to Cardiac Surgery during Transcatheter Aortic Valve Implantation [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2018, 54(2): 267-272.
- [16] Eggebrecht H, Vaquerizo B, Moris C, et al. Incidence and Outcomes of Emergent Cardiac Surgery during Transfemoral Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI): Insights from the European Registry on Emergent Cardiac Surgery during TAVI (EuRECS-TAVI) [J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(8): 676-684.
- [17] Pineda AM, Harrison JK, Kleiman NS, et al. Incidence and Outcomes of Surgical Bailout During TAVR: Insights From the STS/ACC TVT Registry [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2019, 12(18): 1751-1764.
- [18] Himbert D, Brochet E, Serfaty JM, et al. Contained Aortic Root Rupture after Transcatheter Aortic Valve Implantation [J]. *Eur Heart J*, 2010, 31(24): 2995.
- [19] Okuno T, Asami M, Heg D, et al. Impact of Left Ventricular Outflow Tract Calcification on Procedural Outcomes After Transcatheter Aortic Valve Replacement [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2020, 13(15): 1789-1799.
- [20] Farhan S, Stachel G, Desch S, et al. Impact of Moderate or Severe Left Ventricular Outflow Tract Calcification on Clinical Outcomes of Patients with Severe Aortic Stenosis Undergoing Transcatheter Aortic Valve Implantation with Self-and Balloon-Expandable Valves: A Post Hoc Analysis from the SOLVE-TAVI Trial [J]. *EuroIntervention*, 2022, 18(9): 759-768.
- [21] Sù MP, Van den Eynde J, Malin JH, et al. Impact of Left Ventricle Outflow Tract Calcification on the Outcomes of Transcatheter Aortic Valve Implantation: A Study-Level Meta-Analysis [J]. *J Card Surg*, 2022, 37(5): 1379-1390.
- [22] Watanabe Y, Lefèvre T, Bouvier E, et al. Prognostic Value of Aortic Root Calcification Volume on Clinical Outcomes after Transcatheter Balloon-Expandable Aortic Valve Implantation [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2015, 86(6): 1105-1113.
- [23] Guimarães L, Ferreira-Neto AN, Urena M, et al. Transcatheter Aortic Valve Replacement with the Balloon-Expandable SAPIEN 3 Valve: Impact of Calcium Score on Valve Performance and Clinical Outcomes [J]. *Int J Cardiol*, 2020, 306: 20-24.
- [24] Jilaihawi H, Wu Y, Yang Y, et al. Morphological Characteristics of Severe Aortic Stenosis in China; Imaging Corelab Observations from the First Chinese Transcatheter Aortic Valve Trial [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2015, 85 Suppl 1: 752-761.
- [25] Montalto C, Sticchi A, Crimi G, et al. Outcomes After Transcatheter Aortic Valve Replacement in Bicuspid Versus Tricuspid Anatomy: A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2021, 14(19): 2144-2155.
- [26] Mangieri A, Tchetchè D, Kim WK, et al. Balloon Versus Self-Expandable Valve for the Treatment of Bicuspid Aortic Valve Stenosis: Insights From the BEAT International Collaborative Registry [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2020, 13(7): e008714.
- [27] Zhang Y, Xiong TY, Li YM, et al. Patients With Bicuspid Aortic Stenosis Undergoing Transcatheter Aortic Valve Replacement: A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 794850.
- [28] Landes U, Witberg G, Sathananthan J, et al. Incidence, Causes, and Outcomes Associated With Urgent Implantation of a Supplementary Valve During Transcatheter Aortic Valve Replacement [J]. *JAMA Cardiol*, 2021, 6(8): 936-944.
- [29] Liu JD, Zhang SY, Wu YQ, et al. Valve Implantation for Successful Sealing of a Balloon Predilatation-Induced Annular Rupture during Transcatheter Aortic Valve Replacement [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2022, 100(4): 674-678.
- [30] Chakravarty T, Cox J, Abramowitz Y, et al. Percutaneous Management of Aortic Root Rupture During Transcatheter Aortic Valve Replacement With Coil Embolization [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2018, 11(2): e005590.
- [31] Azarrafy R, Albuquerque FN, Carrillo RG, et al. Coil Embolization to Successfully Treat Annular Rupture during Transcatheter Aortic Valve Replacement [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2018, 92(6): 1205-1208.
- [32] Alkhouli M, Carpenter E, Tarabishy A, et al. Annular Rupture during Transcatheter Aortic Valve Replacement: Novel Treatment with Amplatzer Vascular Plugs [J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(8): 714-715.
- [33] Pignatelli A, Pestrighella V, Contegiacomo G, et al. Percutaneous Treatment of Aortic Root Rupture after Transcatheter Aortic Valve Replacement Procedure [J]. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*, 2020, 21(2): 158-160.
- [34] Piliero N, Thony F, Vanzetto G, et al. Gluing of an Aortic Perforation During Transcatheter Aortic Valve Replacement: An Alternative Treatment for Annular Rupture? [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(15): 2037-2038.
- [35] Milhorini Pio S, Bax J, Delgado V. How Valvular Calcification Can Affect the Outcomes of Transcatheter Aortic Valve Implantation [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2020, 17(8): 773-784.
- [36] Wang Q, Kodali S, Primiano C, et al. Simulations of Transcatheter Aortic Valve Implantation; Implications for Aortic Root Rupture [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2015, 14(1): 29-38.
- [37] Samim M, Stella PR, Agostoni P, et al. A prospective "oversizing" strategy of the Edwards SAPIEN bioprosthesis: results and impact on aortic regurgitation [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2013, 145(2): 398-405.
- [38] Blanke P, Pibarot P, Hahn R, et al. Computed Tomography-Based Oversizing Degrees and Incidence of Paravalvular Regurgitation of a New Generation Transcatheter Heart Valve [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2017, 10(8): 810-820.
- [39] Basman C, Kodra A, Pirelli L, et al. Comparison of Clinical Outcomes between Use of Overexpanding an Undersized versus Nominal-Sized SAPIEN 3 Ultra Transcatheter Heart Valve in Patients with Borderline Annulus Area [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2022, 100(3): 415-421.
- [40] Snir A, Wilson MK, Ju LA, et al. Novel Pressure-Regulated Deployment Strategy for Improving the Safety and Efficacy of Balloon-Expandable Transcatheter Aortic Valves [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2021, 14(22): 2503-2515.

(收稿日期:2023-04-06)

(本文编辑:余晓曼)