

· 综述 ·

经导管主动脉瓣中瓣植入术的并发症及其处理进展

张文博 谢进生

(首都医科大学附属北京安贞医院, 北京 100029)

【摘要】经导管主动脉瓣中瓣植入术是生物瓣毁损后最理想的二次和多次干预手段之一,尤其适合于高危或不耐受手术患者。随着此类术式在国内外临床应用和报道的不断增加,新技术同样带来了新问题,如冠状动脉阻塞和术后跨瓣压差增高等,因此对其发生机制及处理最新进展加以综述就变得十分必要。

【关键词】经导管主动脉瓣植入术;经导管主动脉瓣中瓣植入术;并发症处理

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2021.01.001

Complications and Management of Valve-in-valve Transcatheter Aortic Valve Implantation

ZHANG Wenbo, XIE Jinsheng

(Beijing Anzhen Hospital, Capital Medical University, Beijing 100029, China)

【Abstract】Valve-in-valve transcatheter aortic valve implantation is one of the most ideal secondary and multiple interventions after bioprosthetic prostheses structural valve deterioration, especially for patients with high risk or intolerance of surgery. With the increasing number of such cases and reports at home and abroad, there are also brought new problems with new technology, such as the high risk of coronary obstruction, significant postoperative residual gradients, etc. Therefore, it's necessary to review the latest progress in the pathogenesis and treatment of these diseases.

【Key words】Transcatheter aortic valve implantation; Valve-in-valve transcatheter aortic valve implantation; Complication management

1 前言

经导管主动脉瓣中瓣植入术 (valve-in-valve transcatheter aortic valve implantation, ViV TAVI) 是指在已毁损的经外科置换或经皮植入的原人工生物瓣膜中再次经皮植入一个全新瓣膜的技术。近 20 年来,生物瓣膜因具有减少血栓形成,降低其他抗凝并发症发生率的优点,在瓣膜植入术中的使用比例逐渐增高^[1]。国内外越来越多相对年轻的患者倾向于选择外科植入生物瓣膜,以期追求更高的生活质量,但由于生物瓣膜耐久性差的固有缺陷,相比高龄患者,这些患者存在因瓣膜毁损而需二次或多次干预的风险^[2]。既往再次干预的金标准治疗是外科主动脉瓣置换术,随着技术的发展,再次瓣膜置换手术死亡比例已明显下降,但由于手术复杂,目前手术早期死亡比例为 4.5%~8.0%^[3]。尤其是对高风险和不能耐受手术的患者,情形更不容乐观。基于经导管主动脉瓣植入术 (transcatheter aortic valve implantation, TAVI) 技术原理

的 ViV TAVI 手术是针对这种情况的理想替代治疗方法。该技术自德国 Wenaweser 等^[4]于 2007 年首次报道以来,在全球已实施超过 5 500 例,许多研究证实了该技术的安全性和有效性^[5-9],目前它已成为一种替代外科主动脉瓣置换术用于治疗严重瓣膜结构毁损的颇具吸引力的方法^[2]。然而,尽管该技术具有良好的治疗前景,其临床使用的过程中也出现了许多问题,如相比传统 TAVI 有更高的冠状动脉阻塞 (coronary obstruction, CO) 发生率和更高的术后跨瓣压差等。这些并发症的发生直接影响了患者的预后,因此,如何更好地处理 ViV TAVI 的主要并发症是目前国内外研究者关注的热点。目前国内仅见 ViV TAVI 的个案和动物实验报道,与此同时,ViV TAVI 的其他并发症,如卒中、大出血、急性肾损伤和瓣周漏等的发生率与传统 TAVI 相比,在统计学上无明显差异^[5,10-12]。基于以上原因,现对 ViV TAVI 技术的主要并发症及处理进展加以综述,以期更精准地了解这项新技术。

2 ViV TAVI 技术面临的主要挑战及最新对策

ViV TAVI 是一种基于 TAVI 的技术,因此其并发症的种类也与 TAVI 相似^[13]。但因为 ViV TAVI 的干预对象是毁损的人工生物瓣膜而不是 TAVI 的生物瓣膜,因此二者的部分并发症在发生率上有差异。有研究^[6,14]分析了瓣中瓣国际数据库(VIVID)记录的 1 168 例和胸外科医师协会(STS)/美国心脏病学会(ACC)经导管瓣膜治疗(TVT)注册研究中记录的 1 150 例接受 ViV TAVI 治疗的患者,结果显示 ViV TAVI 相比传统 TAVI,具有更高的 CO 发生率和更高的术后跨瓣压差,而这两个并发症均与高死亡率密切相关^[9-10]。此外有研究^[15-17]报道,ViV TAVI(约 7.6%)相比传统 TAVI 更易形成瓣膜血栓(约 2.8%),而瓣膜血栓可能在生物瓣膜毁损的过程中扮演重要角色。TAVI 的其他常见并发症如卒中、大出血、急性肾损伤和瓣周漏等的发生率与 ViV TAVI 相比在统计学上无明显差异^[5,10-12],在此不再赘述。

2.1 CO

ViV TAVI 期间一旦发生 CO 则死亡率接近 50%,尽管其发生率为 2.3%,但仍高于传统 TAVI 发生率的 4~6 倍以上^[6]。Ribeiro 等^[12]对 VIVID 注册研究的数据进行分析后发现,72%的阻塞为单纯左侧 CO,左、右侧同时阻塞约 20%,单纯右侧 CO 相对少见(8%)。CO 通常在 ViV TAVI 术后急性发作(58%),其他依次发生于 TAVI 术后 24 h 内、24 h 以上、初次球囊瓣膜成形术后及球囊扩张后,表现为部分阻塞(57%)和完全阻塞(43%),最常见的临床表现是严重持续性低血压(发生率约 58%)。

CO 常见的发生机制是新植入的生物瓣展开后,导致自身瓣叶或原生物瓣叶向冠状动脉开口挤压移位^[12]。另一种较少见的情况是,当在之前的外科生物瓣膜中经导管植入瓣膜时,会在升主动脉的起始部形成一个覆盖的圆柱体^[18],此时生物瓣的高度超过了窦管交界处,并和主动脉壁紧贴在一起,从而产生 CO 并发症。冠状动脉高度是 TAVI 技术引起 CO 的主要危险因素之一,在常规 TAVI 中指冠状动脉开口到主动脉瓣环的距离^[11],而 ViV TAVI 的冠状动脉高度是指从外科缝合环或原生物瓣膜的基底平面开始至冠状动脉开口的距离,这意味着相比初次实施 TAVI,再次实施的 ViV TAVI 需面对更低的冠状动脉高度,因此更容易发生 CO^[19]。虚拟经导管瓣膜到冠状动脉开口的距离可对 CO 的发生风险进行预测,瓣膜到冠状动脉开口的距离每减少 1 mm,CO 的风险比增加 0.22(截止值为 4 mm, $P=0.000 1$)^[12]。TAVI 术后一旦发生 CO 必须及时处理,但此时实施经皮冠脉介入术具有一定的挑战性,一项大型研究^[20]报告的手术成功率为

82%,但成功实施经皮冠脉介入术后仍会有 22% 的死亡率(未成功的案例死亡率为 100%),因此,避免 CO 的发生是提升术后生存率的关键。

目前有许多技术用来降低 CO 发生的风险,有学者认为,在 CO 高危的患者中预置冠状动脉支架或导丝可能是最好的预防措施^[21],但这种“烟囱”技术的长期通畅性并不明确:生物瓣可能引起支架机械变形,进而使冠状动脉的介入变得非常困难,出现这种情况的患者远期一旦发生冠状动脉病变,将只能借助外科搭桥手术来避免致命事件^[22]。瓣叶切割手术(BASILICA 手术)是一种前景良好的替代技术,不论是传统 TAVI 还是 ViV TAVI,均可利用此方法来降低 CO 的发生率^[23]。这种手术首先对可能威胁到冠状动脉开口的原瓣叶交界进行预处理,将其沿中线进行导管电切,使之向两侧分开后再行 TAVI。处理过的瓣叶会在新生物瓣的植入过程中远离中线向两侧运动,此操作可确保冠状动脉开口的通畅,进而降低 CO 风险。BASILICA IDE 前瞻性试验共纳入 30 例具有 CO 高风险的高危或极高危手术患者,术后均未发生 CO,手术的成功率为 93%,死亡率为 3.3%(1 例患者在术后第 17 天死于多器官功能衰竭),另有 1 例患者因卒中致残,这说明该技术有望降低此类患者在实施 ViV TAVI 后发生 CO 的风险。

迟发性冠状动脉阻塞(delayed coronary obstruction, DCO)是一种罕见的不良事件,指的是患者在 TAVI 术后病情稳定离开手术室后突发的 CO。ViV TAVI 术后 DCO 的发生率是标准 TAVI 的近 5 倍(0.89% : 0.18%)^[22],约 63%发生于术后 7 d 内(其中 24 h 内发生率为 47%),37%发生于 60 d 以后,且早期(≤ 7 d) DCO 的死亡率高于晚期(63% : 29%)^[24]。有趣的是,目前尚无 7~60 d 发生 DCO 的报道^[24]。早期 DCO 的可能机制主要为 TAVI 瓣膜的持续扩张导致了自体瓣膜或生物瓣膜的瓣叶堵塞冠状动脉开口,晚期 DCO 的机制包括自体或生物瓣的内皮化以及发生在 TAVI 瓣膜或主动脉窦部的血栓栓塞^[5,24-25]。由于该并发症较为罕见,截至目前,尚未见有关预防和处理的报道。

2.2 术后跨瓣压差增高

在 STS/ACC TVT 和 VIVID 注册研究中,有超过 30% 的 ViV TAVI 导致了术后的跨主动脉瓣压差显著增加(≥ 20 mm Hg)(1 mm Hg=0.133 3 kPa)^[13,26],而在 TAVI 术后 1 年时的平均跨瓣压差为(8.90 \pm 3.73) mm Hg^[27]。在 TVT 注册研究中,ViV TAVI 与出院至 30 d 之间的血流动力学恶化(连续超声心动图显示平均跨主动脉瓣压差 > 10 mm Hg)相关^[7]。

由于术后跨瓣压差增加是 ViV TAVI 固有的结构性问题,因此术前评估至关重要,评估内容包括患者是

否存在生物瓣-患者不匹配现象、瓣膜类型及尺寸的选择和瓣膜的植入深度等。生物瓣-患者不匹配现象指生物瓣膜植入术后的有效瓣膜面积小于正常人瓣膜的情况,ViV TAVI 术前存在严重的不匹配是术后跨瓣压差增加(≥ 20 mm Hg)的预测指标,且与 30 d 死亡率(4.3% : 10.3%, $P=0.01$)和 1 年死亡率(11.9% : 18.6%, $P<0.001$)的增加相关^[7,26],此外人工瓣膜-患者不匹配现象的严重程度也与 ViV TAVI 术后重度瓣膜毁损的发生率呈正相关^[28]。与自膨式瓣膜相比,球扩式瓣膜 ViV 术后跨瓣压差更高,尤其是在术前存在严重人工瓣膜-患者不匹配现象的情况下,这种相关性更明显^[1-14]。ViV 瓣膜的最佳植入深度目前尚无定论,在体外测试中,较高的展开位置能获得更大的有效孔径,从而降低术后跨瓣压差,但此时瓣膜栓塞的发生率则会随之增加^[29-30]。Dvir 等^[13]建议 Medtronic Evolut SE 瓣膜的最佳植入深度为 3 mm, Edward Sapiens III 球扩式瓣膜的植入最好是 80% 在主动脉内,20% 在心室内。而 Sathananthan 等^[31]认为不论植入深度如何,Allegra 瓣膜在所有内径 ≥ 21 mm 的外科生物瓣膜中均具有较低的术后跨瓣压差(<20 mm Hg)。在 ViV TAVI 瓣膜尺寸的选择上,大多数人倾向于选择相对较大的型号,但最近的研究表明较大的内径并不意味着能获得更大的有效瓣口面积,而且经导管输送瓣膜易出现扩张不良,进而会加速瓣膜的毁损^[32]。

在内径 <21 mm 的毁损的外科生物瓣膜中实施 ViV TAVI 术后会产生严重跨瓣压差^[13],目前一般采用再次外科手术干预,且优先扩大瓣环以植入更大的人工瓣膜。然而,生物瓣扩裂(bioprosthetic valve fracture, BVF)技术或许可使小尺寸生物瓣膜 ViV TAVI 成为可能。BVF 的过程是:在 ViV TAVI 之前或之后使用高压且无顺应性的球囊穿过瓣环,在心室快速起搏时进行扩张,从而提供更大的空间来放置较大尺寸的 ViV 瓣膜或辅助 ViV 瓣膜充分展开。目前绝大多数外科生物瓣膜不论是否带支架都可使用这种技术,为实施 ViV TAVI 提供了条件^[33]。在一项队列研究中,有 20 例患者(其中包括 6 例使用 19 mm 瓣膜的患者)使用了 BVF 技术,术后均未发生死亡、主动脉根部破裂、CO 或需永久植入起搏器^[34],其中有 15 例患者平均跨瓣压差从 20.5 mm Hg 降至 6.7 mm Hg,有效瓣口面积从 1.0 cm² 增加至 1.8 cm²。关于 BVF 实施的时机仍是一个需讨论的问题,两种策略都有着潜在的优势和问题:ViV TAVI 之前实施该操作可能允许术者选择更大尺寸的瓣膜,但可能导致原生物瓣叶的撕裂,进而影响血流动力学或导致主动脉瓣关闭不全,此外也有碎块脱落导致栓塞的风险;而 ViV TAVI 之后

实施 BVF,虽可相对安全地帮助 ViV TAVI 瓣膜充分扩张,但却有造成瓣膜结构急性损伤或加速瓣膜毁损的风险^[33-34]。此外,该技术有可能造成瓣环破裂或室间隔穿孔,因此需更大的注册研究数据来确认其安全性。尽管目前尚无因使用这种技术造成瓣环破裂的报道,但对于瓣环和左室流出道严重钙化的患者,仍建议避免使用 BVF。如果 BVF 仍无法令人满意地降低跨瓣压差,且该患者能耐受手术,则应考虑进行再手术以彻底清除瓣环,并使用主动脉根部扩大术来放置适当大小的瓣膜^[35]。

2.3 瓣膜血栓的形成

瓣膜血栓在多排 CT 下早期表现为瓣叶运动不良,约 12% 的生物瓣植入术后可观察到此现象^[36]。Jose 等^[15]的研究发现,TAVI 后瓣膜血栓的发生率为 2.17%,而 ViV TAVI 后瓣膜血栓的发生率为 11.63%,他们在该研究中认为,ViV TAVI 是瓣膜血栓形成的危险因素之一,Vahidkhah 等^[16]使用具有三维流场的计算机模型证实了这一点:毁损的生物瓣的几何结构可能形成新的窦,从而增加血液淤滞,潜在地导致瓣膜血栓的形成。同时他们发现,在沿着固定 TAVI 瓣膜与瓣环的边界上,可观察到血液滞留时间延长,且 TAVI 支架完全在瓣环内而不是部分在瓣环内时,血液滞留时间更长。因此放置在环内的 ViV TAVI 瓣膜较放置在环上的人工瓣膜更容易引起瓣膜血栓。瓣膜血栓可造成一过性脑供血不足以及其与脑卒中总和比例的上升,也可能导致较高的术后跨瓣压差并加速瓣膜毁损^[15],此外可能也与 TAVI 术后 DCO 的发生相关^[24]。目前 ViV TAVI 与常规预防生物瓣膜血栓的策略相同:建议出血风险较低的患者使用维生素 K 拮抗剂至少 3 个月,使国际标准化比值达到 2.5 (2017 ACC/AHA II b 类推荐, B-NR 级证据)。对于更加容易形成瓣膜血栓的 ViV TAVI,是否应特别调整术后的抗凝策略有待进一步研究验证。

3 小结与展望

虽然 ViV TAVI 作为一项新的技术具有良好的治疗前景,但其本身仍存在一些挑战。在 ViV TAVI 的主要并发症中,最具有威胁性同时也最值得关注的是相较于初次 TAVI,CO 的发生率更高,术后跨瓣压差更明显,瓣膜血栓的形成更常见。使用相应的补救措施如 BASILICA 或 BVF 技术,可分别降低 CO 的发生率和术后跨瓣压差。ViV TAVI 患者中瓣膜血栓的形成机制、后果和治疗目前需进一步研究。综上所述,随着该领域相关技术的不断发展和并发症的妥善处理,ViV TAVI 将成为 TAVI 和外科主动脉瓣置换术生物瓣毁损后的首选治疗方案。

参考文献

- [1] Barbanti M, Costa G, Zappulla P, et al. Incidence of long-term structural valve dysfunction and bioprosthetic valve failure after transcatheter aortic valve replacement[J]. *J Am Heart Assoc*, 2018, 7(15): e008440.
- [2] Nishimura RA, Otto CM, Bonow RO, 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]. *Circulation*, 2017, 135(25): e1159-e1195.
- [3] Ejiofor JI, Yamine M, Harloff MT, et al. Reoperative surgical aortic valve replacement versus transcatheter valve-in-valve replacement for degenerated bioprosthetic aortic valves[J]. *Ann Thorac Surg*, 2016, 102(5): 1452-1458.
- [4] Wenaweser P, Buellesfeld L, Gerckens U, et al. Percutaneous aortic valve replacement for severe aortic regurgitation in degenerated bioprosthesis: the first valve in valve procedure using the Corevalve Revalving system[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2007, 70(5): 760-764.
- [5] Edelman JJ, Khan JM, Rogers T, et al. Valve-in-valve TAVI: state-of-the-art review[J]. *Innovations (Phila)*, 2019, 14(4): 299-310.
- [6] Tuzcu EM, Kapadia SR, Vemulapalli S, et al. Transcatheter aortic valve replacement of failed surgically implanted bioprostheses[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(4): 370-382.
- [7] Vemulapalli S, Holmes DR, Dai D, et al. Valve hemodynamic deterioration and cardiovascular outcomes in TAVI: a report from the STS/ACC TVT Registry[J]. *Am Heart J*, 2018, 195: 1-13.
- [8] Tam DY, Vo TX, Wijeyesundera HC, et al. Transcatheter valve-in-valve versus redo surgical aortic valve replacement for the treatment of degenerated bioprosthetic aortic valve: a systematic review and meta-analysis[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2018, 92(7): 1404-1411.
- [9] Wai Sang SL, DeBruine N, Beute T, et al. Midterm outcomes for valve-in-valve TAVI in the failed freestyle bioprosthesis[J]. *Ann Thorac Surg*, 2020, May 19. S0003-4975(20)30729-3. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2020.03.116. Online ahead of print.
- [10] Mahmoud AN, Gad MM, Elgendy IY, et al. Outcomes of valve-in-valve transcatheter aortic valve replacement in patients with failed bioprosthetic aortic valves: systematic review and meta-analysis of observational evidence[J]. *EuroIntervention*, 2020, May 19. EIJ-D-19-00928. DOI: 10.4244/EIJ-D-19-00928. Online ahead of print.
- [11] Spaziano M, Mylotte D, Thériault-Lauzier P, et al. Transcatheter aortic valve implantation versus redo surgery for failing surgical aortic bioprostheses: a multicentre propensity score analysis[J]. *EuroIntervention*, 2017, 13(10): 1149-1156.
- [12] Ribeiro HB, Rodés-Cabau J, Blanke P, et al. Incidence, predictors, and clinical outcomes of coronary obstruction following transcatheter aortic valve replacement for degenerative bioprosthetic surgical valves: insights from the VIVID Registry[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(8): 687-695.
- [13] Dvir D, Webb JG, Bleiziffer S, et al. Transcatheter aortic valve implantation in failed bioprosthetic surgical valves[J]. *JAMA*, 2014, 312(2): 162.
- [14] Pibarot P, Simonato M, Barbanti M, et al. Impact of pre-existing prosthesis-patient mismatch on survival following aortic valve-in-valve procedures[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018, 11(2): 133-141.
- [15] Jose J, Sulimov DS, El-Mawardi M, et al. Clinical bioprosthetic heart valve thrombosis after transcatheter aortic valve replacement: incidence, characteristics, and treatment outcomes[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2017, 10(7): 686-697.
- [16] Vahidkhah K, Javani S, Abbasi M, et al. Blood stasis on transcatheter valve leaflets and implications for valve-in-valve leaflet thrombosis[J]. *Ann Thorac Surg*, 2017, 104(3): 751-759.
- [17] Abdel-Wahab M, Simonato M, Latib A, et al. Clinical valve thrombosis after transcatheter aortic valve-in-valve implantation[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2018, 11(11): e006730.
- [18] Bernardi FLM, Dvir D, Rodés-Cabau J, et al. Valve-in-valve challenges: how to avoid coronary obstruction[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2019, 6: 120.
- [19] Ribeiro HB, Nombela-Franco L, Allende R, et al. Coronary obstruction following transcatheter aortic valve implantation for degenerative bioprosthetic surgical valves: a systematic literature review[J]. *Rev Bras Cardiol Invasiva Engl Ed*, 2013, 21(4): 311-318.
- [20] Ribeiro HB, Webb JG, Makkar RR, et al. Predictive factors, management, and clinical outcomes of coronary obstruction following transcatheter aortic valve implantation: insights from a large multicenter registry[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 62(17): 1552-1562.
- [21] Maggio S, Gambaro A, Scarsini R, et al. Preventive left main and right coronary artery stenting to avoid coronary ostia occlusion in high-risk stentless valve-in-valve transcatheter aortic valve implantation[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2017, 25(1): 147-149.
- [22] Edelman JJ, Khan JM, Rogers T, et al. Valve-in-valve TAVI: state-of-the-art review[J]. *Innovations*, 2019, 14(4): 299-310.
- [23] Khan JM, Dvir D, Greenbaum AB, et al. Transcatheter laceration of aortic leaflets to prevent coronary obstruction during transcatheter aortic valve replacement: concept to first-in-human[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018, 11(7): 677-689.
- [24] Jabbar RJ, Tanaka A, Finkelstein A, et al. Delayed coronary obstruction after transcatheter aortic valve replacement[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(14): 1513-1524.
- [25] Yaakovovich H, Plitman Mayo R, Zaretsky U, et al. Numerical models of valve-in-valve implantation: effect of intentional leaflet laceration on the anchorage[J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2020, 19(2): 415-426.
- [26] Herrmann HC, Daneshvar SA, Fonarow GC, et al. Prosthesis-patient mismatch in patients undergoing transcatheter aortic valve replacement: from the STS/ACC TVT Registry[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(22): 2701-2711.
- [27] Deeb GM, Reardon MJ, Chetcuti S, et al. 3-year outcomes in high-risk patients who underwent surgical or transcatheter aortic valve replacement[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 67(22): 2565-2574.
- [28] Flameng W, Herregods MC, Vercalsteren M, et al. Prosthesis-patient mismatch predicts structural valve degeneration in bioprosthetic heart valves[J]. *Circulation*, 2010, 121(19): 2123-2129.
- [29] Azadani AN, Reardon M, Simonato M, et al. Effect of transcatheter aortic valve size and position on valve-in-valve hemodynamics: an in vitro study[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2017, 153(6): 1303-1315. e1.
- [30] Zenses AS, Evin MA, Stanović V, et al. Effect of size and position of self-expanding transcatheter valve on haemodynamics following valve-in-valve procedure in small surgical bioprostheses: an in vitro study[J]. *EuroIntervention*, 2018, 14(3): e282-e289.
- [31] Sathananthan J, Fraser R, Küting M, et al. Impact of implant depth on hydrodynamic function of the ALLEGRA bioprosthesis in valve-in-valve interventions[J]. *EuroIntervention*, 2020, 15(15): e1335-e1342.
- [32] Grubitzsch H, Galloni M, Falk V. Wrinkles, folds and calcifications: reduced durability after transcatheter aortic valve-in-valve replacement[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2017, 153(2): 266-268.
- [33] Allen KB, Chhatrivala AK, Cohen DJ, et al. Bioprosthetic valve fracture to facilitate transcatheter valve-in-valve implantation[J]. *Ann Thorac Surg*, 2017, 104(5): 1501-1508.
- [34] Chhatrivala Adnan K, Allen Keith B, Saxon John T, et al. Bioprosthetic valve fracture improves the hemodynamic results of valve-in-valve transcatheter aortic valve replacement[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2017, 10(7): e005216.
- [35] Feindel CM. Aortic root enlargement in the adult[J]. *Oper Tech Thorac Cardiovasc Surg*, 2006, 11(1): 2-15.
- [36] Chakravarty T, Søndergaard L, Friedman J, et al. Subclinical leaflet thrombosis in surgical and transcatheter bioprosthetic aortic valves: an observational study[J]. *Lancet*, 2017, 389(10087): 2383-2392.

收稿日期: 2020-07-01