

累及弓上分支动脉主动脉病变腔内治疗的研究进展

吴浩哲, 赵 渝*

重庆医科大学附属第一医院血管外科, 重庆

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月9日; 发布日期: 2026年4月16日

摘 要

胸主动脉疾病致死率高, TEVAR已成为切实可行的治疗方案, 而弓上分支动脉重建是累及主动脉弓病变TEVAR治疗的关键, 其远期通畅率直接影响患者预后。本文旨在检索近期以来关于主动脉弓上分支血管重建的高质量文献, 试图梳理TEVAR弓上分支重建的开窗支架、分支支架、平行支架等主流技术的研究进展, 分析各技术临床效果, 探讨主动脉弓解剖、支架操作、术后管理及患者基础疾病等影响远期通畅率的关键因素, 提出全流程优化策略, 为临床术式选择及术后管理提供循证参考, 并对未来研究方向进行展望。

关键词

胸主动脉腔内修复术, 弓上动脉分支, 远期通畅率

Research Progress on Endovascular Therapy for Aortic Lesions Involving Supra-Aortic Branch Arteries

Haozhe Wu, Yu Zhao*

Department of Vascular Surgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 15, 2026; accepted: April 9, 2026; published: April 16, 2026

Abstract

Thoracic aortic diseases are associated with high mortality, and thoracic endovascular aortic repair

*通讯作者。

文章引用: 吴浩哲, 赵渝. 累及弓上分支动脉主动脉病变腔内治疗的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 3340-3347. DOI: 10.12677/acm.2026.1641596

(TEVAR) has become the first-line treatment. Revascularization of supra-aortic branch arteries is critical in TEVAR for lesions involving the aortic arch, and long-term branch patency directly determines patient prognosis. This article reviews mainstream techniques for supra-aortic branch reconstruction in TEVAR, including fenestrated, branched, and parallel stent-graft technologies, and analyzes their clinical outcomes. It also discusses key factors affecting long-term patency, such as aortic arch anatomy, stent manipulation, perioperative management, and underlying comorbidities. Furthermore, comprehensive optimization strategies are proposed to provide evidence-based references for clinical procedure selection and postoperative management, with future research directions discussed.

Keywords

Thoracic Endovascular Aortic Repair, Supra-Aortic Branch Arteries, Long-Term Patency Rate

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

胸主动脉夹层、主动脉瘤等胸主动脉疾病起病急、致死率高,过去胸主动脉疾病治疗主要以传统开胸手术为主,手术创伤大,需结合体外循环、主动脉阻断等技术,围术期并发症发生率及死亡率较高[1][2]。胸主动脉腔内修复术(Thoracic Endovascular Aortic Repair, TEVAR)创伤小,围术期及远期并发症发生率低,已逐步取代传统开胸手术成为不累及 Z0 区主动脉病变的首选治疗方案。主动脉弓部作为头颈部及上肢血供的重要枢纽,分支动脉包含无名动脉(Brachiocephalic Artery)、左颈总动脉(Left Common Carotid Artery)、左锁骨下动脉(Left Subclavian Artery)等关键弓上分支动脉。而累及主动脉弓的主动脉病变,由于影响重要的弓上分支,有着更高的治疗难度及更差的预后[3]-[5]。而在 TEVAR 手术中为获得足够的近端锚定区,必须进行精准的分支血管重建,否则易引发头颈部缺血、脑梗死等严重并发症,甚至危及生命。

主动脉弓部处于高流速、高搏动的血流环境,且解剖成角大、分支开口位置变异率高、血管壁钙化发生率高,使得弓上分支动脉重建后的远期通畅性成为 TEVAR 治疗的难点与研究焦点。近年来,开窗技术、分支支架技术、平行支架技术等弓上分支重建技术不断发展,为复杂弓部病变的 TEVAR 治疗提供了更多选择,但不同技术的操作难度、解剖适配性及远期通畅率存在显著差异。同时,主动脉弓部解剖特征、支架选择、术后管理等多种因素均会影响分支动脉的长期通畅性。本文系统梳理 TEVAR 弓上分支动脉腔内治疗重建方式研究现状,分析不同重建技术的临床效果及影响通畅率的关键因素,探讨提升远期通畅性的优化策略,为临床 TEVAR 手术中弓上分支动脉重建的术式选择及术后管理提供循证参考。

2. TEVAR 弓上分支动脉重建的主要技术类型

弓上分支动脉重建技术的核心是在保证 TEVAR 主体支架锚定效果的前提下,维持弓上分支动脉的有效血供,不同技术的支架设计、操作方式及与血管壁的贴合度存在本质差异,直接导致远期通畅率的不同。目前临床主流的重建技术包括开窗技术、分支支架技术、平行支架技术,且各技术衍生出定制化、成品化及术中改制等不同类型,适用于不同临床场景。

2.1. 开窗技术(Fenestrated Thoracic Endovascular Aortic Repair, fTEVAR)

开窗技术是指在 TEVAR 主体支架上根据弓上分支血管的解剖位置开设窗孔, 通过窗孔实现分支血管的血供重建。开窗技术可以分为体外开窗以及原位开窗(*In-Situ Fenestration*, ISF)。

体外开窗又可分为定制开窗支架和医生改良开窗支架(Physician-Modified Endografts, PMEG)。定制开窗支架是指依据术前测量的弓上动脉量化参数, 在对应主动脉弓分支血管的靶区位置, 事先定制带有弓上分支开窗的主体支架。这种方案根据患者弓上分支的个体化解剖特征设计开窗的位置及大小, 解剖匹配度较高, 是目前弓上分支重建较为可靠的技术。在 Hauck [6]等开展的多中心回顾性队列研究中, 对 34 例采用开窗支架行 TEVAR 的患者进行中长期随访, 围手术期患者技术成功率达 97.1%, 围手术期死亡率为 0%, 主要卒中发生率 2.9%, 主要、次要并发症发生率分别为 5.9%、0%。患者平均随访时长 40.3 ± 42.6 个月, 晚期总死亡率 32.4%, 其中主动脉相关死亡率仅 2.9%, 技术成功稳定性为 82.4%, 无分支闭塞、支架移位发生。开窗支架展现出较优的围手术期安全性和中长期随访稳定性, 可见开窗支架是主动脉弓病变微创治疗的重要选择。Tsilimparis [7]的一项单中心回顾性分析也展现了开窗支架的可靠性, 随访中 Cook 开窗支架的技术成功率达 95%, 30 天死亡率为 9%, 主要卒中发生率 7%, 暂时性脊髓缺血 7%。笔者认为定制开窗支架优异的术后通畅性源于窗孔与分支开口的精准匹配, 这有效减少了支架内血流紊乱及支架移位风险, 在非急诊病例中可以发挥出极佳的效果。

医生改良开窗支架(PMEGs)是指在手术台上, 根据事先测量的主动脉弓上分支动脉量化参数, 在对应分支血管开口处, 利用锐性穿刺或热能消融方式对支架覆膜表面进行开窗处理, 完成体外开窗后, 再将主体移植回撤并装载至原输送系统中, 以备后续植入。该方法既能满足应对复杂多变的弓上分支血管解剖的难题, 又避免了定制开窗支架的术前定制时间。在 Canaud [8]等开展的单中心回顾性研究中, 对于 100 例采用双开窗医师改良型覆膜支架患者进行围术期评估及中期随访, 术式技术成功率达 97%, 围手术期(30 天)死亡率为 2%, 轻度卒中发生率 4%且均实现完全恢复, 内漏发生率较低(1A 型、1B 型各 1 例, 左锁骨下动脉源性 2 型 2 例); 在平均 24 ± 7.2 个月的中期随访中, 所有患者均未发生主动脉破裂、截瘫等严重不良事件, 弓上血管通畅率 100%, 证实该术式中期安全性与有效性良好。Reyes Valdivia [9]等发现, 此方案展现出较高的技术成功率, 达 98.3%; 围手术期安全性良好, 30 天死亡率仅 2.9%, 卒中发生率为 2.1%。但术中操作需耗费较多操作时间, 而对于合并动脉瘤破裂或血流动力学不稳定的急重症患者, 临床通常无充足时间开展此类血管腔内操作[10]; 且该方案的长期耐久性与临床获益仍需更长时间的随访研究及多中心大样本数据进一步验证。

原位开窗技术是在 TEVAR 主体支架于目标靶区释放后, 术中在分支动脉开口对应位置采用破膜工具破膜, 以球囊扩张穿刺破膜点并植入分支支架完成重建。2004 年, McWilliams 报道了首例体内原位针刺开窗保留左锁骨下动脉的案例后, 原位开窗技术得到了长足发展[11]。在 Evans [12]等开展的单中心回顾性分析中, 探讨了激光原位开窗技术(LISF)联合 TEVAR 在弓上血管血运重建中的应用价值, 随访了 24 例接受激光原位开窗的患者, 其中择期手术 13 例、急诊手术 11 例, 研究结果显示, 激光原位开窗技术成功率达 100%, 围手术期主要并发症发生率为 21%, 含卒中 3 例、30 天死亡率 2 例, 总体并发症发生率 58%; 随访期间, 32% (7 例)患者因病情需要接受再次干预。该研究表明原位开窗技术操作灵活性高, 特别适用于急诊病例, 但其术后并发症发生率较高, 笔者认为这是因为术中破膜致支架覆膜边缘不规整, 远期易出现分支开口狭窄、血栓形成等问题所致, 但考虑到原位开窗作为急诊手术的方案选择, 其临床应用仍有其独到价值。

需要指出的是原位开窗破膜边缘易产生毛刺, 远期可诱发局部内膜增生、分支开口狭窄甚至血栓闭塞, 所以应尽量选用激光/射频等平滑破膜方式, 避免针刺粗糙破口。

2.2. 分支支架技术(Branched Stent-Graft)

分支支架技术是指在 TEVAR 主体支架上集成弓上分支血管支架, 直接与弓上分支血管对接实现血供重建, 其优势在于分支支架与主体支架为一体化结构, 血流的连续性好, 无明显的支架间间隙, 大大减少了术后支架内漏及出现血流动力学紊乱的风险。在一项单中心回顾性研究中, Tazaki 等人[13] 5 年的随访研究中显示, 89 例接受 ISG 的主动脉病变患者围手术期 30 天总体死亡率为 4.5%; 围术期卒中发生率为 16%, 5 年生存率为 93%, 5 年主要不良事件无事件生存率为 76%, 5 年卒中累积发生率为 11%。该研究证明了分支支架技术的长期安全性与有效性, 分支支架能有效降低动脉瘤相关死亡风险、实现瘤体进展的有效控制, 但在长期随访中, 并发症的防控仍存在较大改进空间, 其临床应用的安全性及操作策略仍需进一步优化。

分支支架与弓上分支血管的匹配与否直接关系到术后的弓上分支血管通畅率, 若分支支架直径过小, 重建的分支血管管径小, 更易导致术后分支血管闭塞; 反之直径过大则易导致支架与血管壁贴合不良, 增加远期支架移位风险。分支支架对接失败多因弓部成角过大、输送系统到位偏差、分支开口对位不准所致; 分支闭塞常源于直径不匹配、内膜增生或血栓形成。可通过术前精准测量分支直径、选择直径匹配度 10%~20% 的分支支架、术中三维导航确保对位精准、术后规范抗栓治疗等措施减少并发症。此外, 分支支架手术操作技术难度大, 所需学习曲线长, 且术者的操作水平直接影响分支支架的定位准确性, 进而对分支血管通畅率产生关键影响。

2.3. 平行支架技术(Parallel Grafts)

平行支架技术主要包括烟囱技术(Chimney Technique)、潜望镜技术(Periscope Technique)等, 是最早在临床上应用的弓上分支重建的全腔内修复方案。目前主流分支支架技术为烟囱技术, 是利用覆膜支架与 TEVAR 主体覆膜支架并行放置, 在弓上分支开口处构建“并行血流通道”实现血供重建, 其核心优势是操作简便、无需定制支架、可快速开展手术, 是目前急诊手术弓上分支重建的主要技术。

但由于平行支架与主体支架之间不可避免地形成“沟槽”(gutter), 即平行支架与主体支架、主动脉血管壁存在难以消除的间隙, 往往意味着 1A 型或 1B 型内漏, 此类内漏若持续存在, 会导致动脉瘤瘤囊内的体循环动脉压升高, 进而增加动脉瘤破裂的风险[14]; 且主体支架的径向支撑力可能导致平行支架受压, 使得该技术的远期通畅率显著低于开窗技术和分支支架技术。一项单中心临床研究中 Voskresensky 等人[15]报道了于佛罗里达大学医院的开展主动脉弓烟囱支架置入术的 27 例患者, 该方案总体技术成功率为 89%, 手术相关不良事件包括 1 例术中死亡、2 例术后影像学检查证实存在持续性 1A 型内漏; 患者 30 天死亡率较低, 为 4%。7 例患者(26%)发生严重并发症; 9 例患者(33%)在随访期间接受了再次干预, 鉴于该术式术后再次干预率偏高, 研究者强调, 对接受平行支架移植术的患者, 需进行严格、细致的长期随访。Liu [16]等一项 META 分析中对比烟囱技术与开窗技术重建弓上分支的疗效, 结果显示开窗技术成功率更高(98.0% vs 95.8%), I 型内漏、30 天死亡率及主动脉相关死亡率均显著更低。笔者分析其死亡率及并发症发生率较高的主要原因包括: ① 沟槽间隙导致的 I 型内漏, 血流在间隙内形成涡流, 长期可导致瘤腔压力升高、瘤体增大甚至破裂; 同时涡流刺激分支开口内膜增生, 升高分支狭窄与闭塞风险。处理策略包括术中使用时球囊扩张贴合、联合腔内锚定装置缩小间隙, 术后密切 CTA 随访, 对持续性内漏尽早行栓塞或再次支架修复; ② 平行支架与主体支架的重叠段易出现血流速度减慢, 增加支架内血栓形成风险; ③ 上肢入路释放平行支架时, 易导致主动脉弓斑块脱落, 斑块栓塞分支动脉, 引发远期闭塞。

3. 影响 TEVAR 术后弓上分支动脉远期通畅率的关键因素

TEVAR 术后弓上分支动脉的远期通畅率并非仅由重建技术决定, 而是受主动脉弓部解剖特征、支架

选择与操作、围手术期与术后管理、患者基础疾病等多因素共同影响, 其中解剖因素是基础, 支架选择与操作是关键, 术后管理是保障, 患者基础疾病是重要危险因素。

3.1. 主动脉弓部解剖特征

主动脉弓部的解剖复杂性是影响弓上分支远期通畅率的核心因素, 也是术前术式选择的重要依据, 主要包括弓部成角、分支开口位置、血管壁条件及主动脉直径等。① 弓部成角: 主动脉弓部过度成角($>60^\circ$)会导致分支支架与主体支架之间出现明显的角度偏差, 血流在分支支架内形成涡流, 加速内膜增生和血栓形成, 成角越大, 远期通畅率越低; ② 分支开口位置: 弓上分支开口位于主动脉弓外侧壁或弯角处时, 支架定位难度大, 且血流冲击更明显, 远期狭窄风险显著高于开口位于弓部内侧壁的患者; ③ 血管壁条件: 主动脉弓部严重钙化、附壁血栓形成时, 支架与血管壁的贴合度差, 易出现内漏, 且钙化斑块可能脱落栓塞分支动脉; 同时钙化血管壁的顺应性差, 支架的径向支撑力易导致血管壁损伤, 引发内膜增生; ④ 主动脉直径: 主动脉弓部过度扩张(直径 $>40\text{ mm}$)会导致支架贴壁不良, 远期移位风险增加, 进而影响分支支架的通畅性; 而弓部狭窄则会导致血流速度过快, 冲击分支支架, 增加支架内狭窄风险。

3.2. 支架选择与操作因素

支架的材质、位置, 均可影响分支动脉重建后的几何形态和管腔结构, 进而影响支架系统稳定性和分支远端血运, 从而影响脑卒中、上肢缺血等分支血管闭塞并发症的发生[17]。① 支架规格: 分支支架直径需与靶血管直径精准匹配, 通常选择比靶血管直径大 10%~20%的支架, 过小易导致支架内狭窄, 过大则易导致支架贴壁不良; 主体支架与分支支架的重叠长度需足够(通常 $\geq 10\text{ mm}$), 重叠过短易导致支架移位, 影响分支血供; ② 支架设计与材料: 支架覆膜材料的柔顺性、金属骨架的支撑力与主动脉壁的顺应性匹配度越高, 远期对血管壁的刺激越小, 内膜增生风险越低, 通畅率越高; 分支支架的开口设计越贴合分支动脉的解剖形态, 血流动力学越稳定, 远期通畅性越好; ③ 操作精准度: 支架定位偏差、术中破膜不规整、分支支架植入角度不当等操作失误, 均会导致分支开口对齐不良、血流紊乱, 是术后远期分支狭窄或闭塞的重要原因, 尤其是开窗技术和分支支架技术, 对操作精准度的要求极高。

3.3. 围手术期与术后管理因素

围手术期管理与术后长期随访, 是保障弓上分支动脉长期通畅的重要环节。① 麻醉方式或可影响术后分支血管通畅性。Zha 等[18]发现全身麻醉(OR = 2.498, 95% CI: 1.002~6.229)是 TBAD 患者 TEVAR 术后卒中的独立危险因素。② 抗凝抗板治疗: 一项回顾性研究[19]表明, 抗凝及抗血小板药物并不会对 TEVAR 术后中期主动脉重塑及生存造成负面影响, 也不影响假腔血栓化进程, 可作为术后常规抗栓策略的参考; 若围术期用药不规范或术后过早停药, 会明显升高支架内血栓风险。③ 术后随访与再干预: TEVAR 术后需定期门诊随访, 以进行计算机断层扫描血管造影(CTA)、血管超声等影像学检查, 及时发现分支血管狭窄、内漏、支架移位等问题, 并进行早期再干预, 可有效维持分支血管的通畅性。

3.4. 患者基础疾病与全身因素

患者的基础疾病可能会影响 TEVAR 术后弓上分支血管重塑情况, 进而降低弓上分支血管的远期通畅率。① 动脉粥样硬化: 合并严重颈动脉、冠状动脉粥样硬化的患者, 血管内皮功能差, 内膜增生速度快, 易导致分支支架内狭窄; 且粥样硬化斑块脱落的风险高, 易栓塞分支动脉, 引发闭塞; ② 糖尿病与高脂血症: 糖尿病患者的血管内皮修复能力差, 高脂血症会导致脂质在支架内沉积, 加速内膜增生, 两者均会显著增加分支支架狭窄或闭塞的风险; ③ 肾功能不全: 肾功能不全患者的凝血功能异常, 且血管钙化程度重, 支架内血栓形成和狭窄的风险均显著升高。Maldonado 等[20]研究表明脑血管疾病病史、慢

性阻塞性肺疾病、冠心病、吸烟是术后脑血管意外的危险因素。

4. 提升 TEVAR 术后弓上分支动脉远期通畅率的优化策略

针对影响弓上分支动脉远期通畅率的多因素, 临床需从术前评估、术式选择、术中操作、术后管理等全流程进行优化, 实现“个体化治疗”, 最大程度提升远期通畅性, 改善患者预后。

4.1. 精准的术前解剖评估与个体化术式选择

术前通过多层螺旋 CTA、三维重建等影像学技术, 精准测量主动脉弓部的直径、成角、分支开口位置、血管直径等解剖参数, 明确解剖特征; 同时结合患者的基础疾病、手术紧急程度、预期寿命选择最适合的重建技术: ① 对于解剖形态规整、预期寿命较长的择期患者, 优先选择定制开窗技术或分支支架技术, 利用其高远期通畅率的优势; ② 对于解剖变异较大、无法等待定制支架的择期患者, 可选择成品开窗支架或 PMEG; ③ 对于急诊病例或无定制支架条件的患者, 可选择平行支架技术; ④ 对于弓部过度成角、严重钙化的极复杂病例, 建议采用杂交手术, 结合开胸与腔内技术, 提升分支重建的精准度和远期通畅性。

4.2. 优化术中操作与支架固定

术中操作的核心是保证支架定位精准、贴壁良好、血流动力学稳定, 减少操作失误对分支血管通畅的影响。① 采用三维导航、IVUS 等技术辅助支架定位, 提高开窗支架窗孔/分支支架与弓上分支开口的对齐精度, 减少定位偏差; ② 对于弓部成角较大的患者, 选择柔顺性好的支架, 必要时采用球囊扩张技术, 改善支架与血管壁的贴合度; ③ PMEGs 操作中, 规范手工开窗和缝合流程, 保证窗孔边缘规整, 减少支架结构破坏, 提升支架的稳定性。

4.3. 规范围手术期与术后长期管理

各中心应建立标准化的围手术期与术后随访方案, 为减少弓上分支血管并发症提供保障。① 个体化抗栓治疗: 根据患者的血栓风险、出血风险制定个体化的抗凝、抗血小板治疗方案, 避免过早停药; 对于高血栓风险患者(如合并房颤、糖尿病), 可适当延长双联抗血小板治疗时间; ② 严格危险因素控制: 术后长期控制患者的血压、心率、血糖、血脂, 改善血管内皮功能, 降低内膜增生风险; 指导患者戒烟、戒酒, 养成健康的生活方式; ③ 建立长期随访体系: 制定标准化的随访计划, 术后 1、3、6、12 个月进行常规 CTA 或血管超声检查, 随后每年复查 1 次, 终身随访; 及时发现并处理支架狭窄、内漏、移位等并发症, 对于狭窄程度 >50% 的分支动脉, 及时采用球囊扩张、支架植入等再干预措施, 维持血供通畅。

4.4. 推动器械创新与技术融合

推动 TEVAR 弓上分支重建器械的国产化与个体化创新, 针对亚洲人群的弓上分支解剖特征, 设计更适合的支架产品, 提高解剖匹配度, Li 等人[21]针对单分支支架的尝试也获得一定的成果; 研发专用的弓上分支平行支架, 优化支架的柔顺性和支撑力, 减少支架受压和血流紊乱; 越来越多的医师选择改良 PMEGs 技术, 已经有中心获得了针对 PMEGs 中期疗效的有效肯定结果[22]-[24]。同时, 发展机器人辅助 TEVAR、三维导航定位等新技术, 提高术中操作的精准度, 减少人为操作误差, 进一步提升弓上分支重建的效果。

5. 总结与展望

TEVAR 术后弓上分支动脉的远期通畅率是衡量弓部病变腔内治疗疗效的核心指标, 直接决定患者的

远期预后。目前不同重建技术的远期通畅率存在显著差异, 定制开窗技术和分支支架技术是远期通畅性最优的选择, 适用于解剖规整的择期患者; 平行支架技术虽操作简便、时效性强, 但远期通畅率偏低, 适用于急诊手术的救命性治疗, 联合腔内锚定技术可显著改善其远期疗效; 原位开窗和 PMEG 则适用于解剖变异较大或急诊的特定病例。

主动脉弓部解剖特征、支架选择与操作、围手术期管理及患者基础疾病是影响远期通畅率的关键因素, 临床需通过精准的术前解剖评估、个体化的术式选择、规范的术中操作及长期的术后随访管理, 实现弓上分支动脉通畅率的最大化。

近年来, 随着腔内器械的不断创新、影像学技术的发展及操作水平的提升, TEVAR 弓上分支重建的效果不断改善, 远期通畅率呈逐步提升趋势。但目前仍存在诸多问题: 如弓部极端成角、严重钙化等复杂病变的重建技术仍不成熟, 国产支架的远期随访数据不足, 抗凝、抗血小板治疗的标准化方案尚未统一。未来, 需要开展更多多中心、大样本、前瞻性随机对照研究, 进一步验证不同重建技术的远期疗效, 探索标准化的围手术期管理方案; 同时, 推动器械创新与技术融合, 未来器械研发应聚焦柔顺性-支撑力平衡设计、低剖面输送系统、国人解剖适配的通用型分支/开窗支架, 并结合机器人辅助与精准导航, 进一步降低并发症、提升远期通畅率, 最终实现 TEVAR 术后弓上分支动脉远期通畅率的进一步提升, 改善患者的远期生存质量。

参考文献

- [1] Settepani, F., Cappai, A., Basciu, A., Barbone, A. and Tarelli, G. (2016) Outcome of Open Total Arch Replacement in the Modern Era. *Journal of Vascular Surgery*, **63**, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2015.10.061>
- [2] Iafrancesco, M., Ranasinghe, A.M., Dronavalli, V., Adam, D.J., Claridge, M.W., Riley, P., et al. (2015) Open Aortic Arch Replacement in High-Risk Patients: The Gold Standard. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **49**, 646-651. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezv149>
- [3] Huang, Y., Schaff, H.V., Dearani, J.A., Oderich, G.S., Bower, T.C., Kalra, M., et al. (2021) A Population-Based Study of the Incidence and Natural History of Degenerative Thoracic Aortic Aneurysms. *Mayo Clinic Proceedings*, **96**, 2628-2638. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2021.02.027>
- [4] Vilacosta, I., San Román, J.A., di Bartolomeo, R., Eagle, K., Estrera, A.L., Ferrera, C., et al. (2021) Acute Aortic Syndrome Revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, **78**, 2106-2125. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2021.09.022>
- [5] Bossone, E. and Eagle, K.A. (2021) Epidemiology and Management of Aortic Disease: Aortic Aneurysms and Acute Aortic Syndromes. *Nature Reviews Cardiology*, **18**, 331-348. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-00472-6>
- [6] Hauck, S.R., Kupferthaler, A., Kern, M., Rousseau, H., Ferrer, C., Iwakoshi, S., et al. (2022) Branched versus Fenestrated Thoracic Endovascular Aortic Repair in the Aortic Arch: A Multicenter Comparison. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **164**, 1379-1389.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2022.03.023>
- [7] Tsilimparis, N., Law, Y., Rohlfes, F., Spanos, K., Debus, E.S. and Kölbel, T. (2020) Fenestrated Endovascular Repair for Diseases Involving the Aortic Arch. *Journal of Vascular Surgery*, **71**, 1464-1471. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2019.06.205>
- [8] Canaud, L., Chassin-Trubert, L., Abouliatim, I., Hireche, K., Bacri, C., Alric, P., et al. (2024) Total Arch Thoracic Endovascular Aortic Repair Using Double Fenestrated Physician-Modified Stent-Grafts: 100 Patients. *Journal of Endovascular Therapy*, **31**, 89-97. <https://doi.org/10.1177/15266028221116747>
- [9] Reyes Valdivia, A., Pitoulias, G., Pitoulias, A., El Amrani, M. and Gandarias Zúñiga, C. (2020) Systematic Review on the Use of Physician-Modified Endografts for the Treatment of Aortic Arch Diseases. *Annals of Vascular Surgery*, **69**, 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2020.07.040>
- [10] Rynio, P., Kazimierczak, A., Jedrzejczak, T. and Gutowski, P. (2018) A 3-Dimensional Printed Aortic Arch Template to Facilitate the Creation of Physician-Modified Stent-Grafts. *Journal of Endovascular Therapy*, **25**, 554-558. <https://doi.org/10.1177/1526602818792266>
- [11] McWilliams, R.G., Murphy, M., Hartley, D., Lawrence-Brown, M.M.D. and Harris, P.L. (2004) *In Situ* Stent-Graft Fenestration to Preserve the Left Subclavian Artery. *Journal of Endovascular Therapy*, **11**, 170-174. <https://doi.org/10.1583/03-1180.1>

- [12] Evans, E., Veeraswamy, R., Zeigler, S. and Wooster, M. (2021) Laser *in Situ* Fenestration in Thoracic Endovascular Aortic Repair: A Single-Center Analysis. *Annals of Vascular Surgery*, **76**, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2021.05.006>
- [13] Tazaki, J., Inoue, K., Higami, H., Higashitani, N., Toma, M., Saito, N., *et al.* (2017) Thoracic Endovascular Aortic Repair with Branched Inoue Stent Graft for Arch Aortic Aneurysms. *Journal of Vascular Surgery*, **66**, 1340-1348.e5. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2017.03.432>
- [14] Atkins, M.D. and Lumsden, A.B. (2022) Parallel Grafts and Physician Modified Endografts for Endovascular Repair of the Aortic Arch. *Annals of Cardiothoracic Surgery*, **11**, 16-25. <https://doi.org/10.21037/acs-2021-taes-171>
- [15] Voskresensky, I., Scali, S.T., Feezor, R.J., Fatima, J., Giles, K.A., Tricarico, R., *et al.* (2017) Outcomes of Thoracic Endovascular Aortic Repair Using Aortic Arch Chimney Stents in High-Risk Patients. *Journal of Vascular Surgery*, **66**, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2016.11.063>
- [16] Liu, M., Wu, X., Wu, S., Li, X., Xin, S. and Zhang, J. (2023) Comparison of Chimney and Fenestrated Techniques for Supra-Aortic Branch Revascularization during Thoracic Endovascular Aortic Repair: A Systematic Review and Meta-Analysis. *CardioVascular and Interventional Radiology*, **46**, 1315-1328. <https://doi.org/10.1007/s00270-023-03537-4>
- [17] Nardi, A. and Avrahami, I. (2017) Approaches for Treatment of Aortic Arch Aneurysm, a Numerical Study. *Journal of Biomechanics*, **50**, 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.11.038>
- [18] Zha, Z., Pan, Y., Zheng, Z. and Wei, X. (2021) Prognosis and Risk Factors of Stroke after Thoracic Endovascular Aortic Repair for Stanford Type B Aortic Dissection. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **8**, Article 787038. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.787038>
- [19] Chang, H., Rockman, C.B., Cayne, N.S., Veith, F.J., Jacobowitz, G.R., Siracuse, J.J., *et al.* (2021) Anticoagulation and Antiplatelet Medications Do Not Affect Aortic Remodeling after Thoracic Endovascular Aortic Repair for Type B Aortic Dissection. *Journal of Vascular Surgery*, **74**, 1833-1842. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2021.05.059>
- [20] Maldonado, T.S., Dexter, D., Rockman, C.B., Veith, F.J., Garg, K., Arko, F., *et al.* (2013) Left Subclavian Artery Coverage during Thoracic Endovascular Aortic Aneurysm Repair Does Not Mandate Revascularization. *Journal of Vascular Surgery*, **57**, 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2012.06.101>
- [21] Li, X., Zhou, Q., Li, C., Wan, Z., Zhang, H., Cai, N., *et al.* (2025) Thoracic Endovascular Aortic Repair with Unibody Single-Branched Stent-Graft for Type B Aortic Dissection: A Real-World Multicenter Study. *International Journal of Surgery*, **111**, 941-949. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000002029>
- [22] Huang, J., Tian, H., Chen, Z., Teng, B., Zhao, Y. and Li, F. (2024) Outcomes of Thoracic Endovascular Aortic Repair with Physician-Manufactured Partial Micropore Stent Grafts for Aortic Arch Pathologies. *Journal of Vascular Surgery*, **79**, 1005-1012. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2023.12.043>
- [23] Teng, B., Chen, Z., Ao, Y., Zhao, Y., Li, F., Fu, Q., *et al.* (2023) One Year Follow-Up Outcomes of Endovascular Treatment for Aortic Dissection with a Partial Micropore Stent Graft in Which Fixation of the Stent Is Done in Zone 0: A Pivotal Trial First in Human. *European Journal of Radiology*, **161**, Article 110720. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110720>
- [24] Wang, Z., Wang, C., Li, F. and Zhao, Y. (2020) Endovascular Repair during Complex Thoracic Aortic Dissection Using a Micropore Stent Graft: Midterm Follow-Up Clinical Outcomes. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, **95**, E111-E119. <https://doi.org/10.1002/ccd.28437>