

Stanford B型主动脉夹层腔内修复术后主动脉重塑评估方式的研究进展

叶子鸣, 李应龙

贵州省人民医院介入科, 贵州 贵阳, 550002

通信作者: 李应龙, Email: 736751059@qq.com

【摘要】 胸主动脉血管腔内修复术(TEVAR)通过封堵主动脉夹层第一破口已成为B型主动脉夹层的首选治疗方案。即便在TEVAR术后,依然有一定比例的患者会经历主动脉扩张、假腔不闭合等血管重塑不良情况,这种情况可能会诱发持续的主动脉相关健康问题。因此,能够早期捕捉到可能预示TEVAR术后血管重建不良的信号变得极其关键,它对于评估患者远期生存状况及预后结果具有不可忽视的医学重要性。目前,对主动脉重塑的测量评估尚没有统一的评价方式,本文将对TEVAR术后主动脉重塑的测量评估方式:CT血管成像、血流动力学、人工智能等进行综述,以期临床精准决策和远期预后判断提供科学的参考依据。

【关键词】 主动脉疾病; 血管造影术; 血流动力学; 人工智能

【文章编号】 2095-834X(2024)08-64-05

本文著录格式: 叶子鸣, 李应龙. Stanford B型主动脉夹层腔内修复术后主动脉重塑评估方式的研究进展[J]. 当代介入医学电子杂志, 2024, 1(8): 64-68.

Progress on evaluation methods for aortic remodeling after endovascular repair of Stanford B-type aortic dissection

Ye Ziming, Li Yinglong

Department of Interventional Radiology, the People's Hospital of Guizhou Province, Guiyang 550002, Guizhou, China

Corresponding author: Li Yinglong, E-mail: 736751059@qq.com

【Abstract】 Thoracic endovascular aortic repair (TEVAR) has become the treatment of choice for type B aortic dissection by sealing the primary entry tear of the aortic dissection. Even after TEVAR, a certain percentage of patients still experience poor vascular remodeling such as aortic dilatation and non-closure of the false lumen, which may induce persistent aortic-related health problems. Therefore, the ability to capture early signals that may predict poor revascularization after TEVAR has become extremely critical, and it is of non-negligible medical importance in evaluating patients' long-term survival and prognostic outcomes. Currently, there is no uniform evaluation of the measurement and assessment of aortic remodeling. This article reviews the measurement and assessment of aortic remodeling after TEVAR, including CT angiography, hemodynamics and artificial intelligence, etc., with the aim of providing a scientific reference for precise clinical decision-making and long-term prognosis judgment.

【Keywords】 Aortic diseases; Angiography; Hemodynamics; Artificial intelligence

主动脉夹层(aortic dissection, AD)是指主动脉内膜和中层弹力膜发生撕裂,血液进入主动脉壁中层,顺行和/或逆行剥离形成壁间假腔,并通过一个或数个破口与主动脉真腔相交通。AD是主动脉疾病中最为严重的危急状况,起病急骤,病情进展快速,具有极

高的致死性,对人类生命安全带来极大威胁。据相关报道,急性Stanford B型主动脉夹层若未接受治疗,其院内死亡率约为11%,而复杂B型夹层未治疗者的病死率甚至可达到71%^[1],即便经过内科治疗,患者的5年生存率也仅仅维持在60%左右^[2]。因此,主动脉

收稿日期: 2024-07-30

基金项目: 贵州省基础研究计划项目, 黔科合基础-ZK[2023]一般206

夹层疾病的治疗需尽早进行。自 1994 年, Dake 等^[3]首次阐述胸主动脉腔内修复术(thoracic endovascular aortic repair, TEVAR)应用于胸主动脉疾病的疗法。该技术的出现, 使得 TEVAR 逐渐成为主动脉夹层治疗的关键方法之一。TEVAR 方法利用覆膜支架被放置在主动脉真腔内部, 用以遮盖主动脉近端的内膜破损区域, 从而提升真腔内的血液流动, 降低假腔内的压力水平, 并诱导假腔内血栓的形成过程。主动脉真腔的扩张、假腔内血栓的形成以及假腔逐渐缩小并最终趋于闭塞的形态学演变, 被定义为主动脉重塑(aortic remodeling, AR)。这一变化对于提高 TEVAR 手术后的中期生存率以及手术的成功率而言, 是一个至关重要的指标^[4]。B 型主动脉夹层病患在经历 TEVAR 治疗后, 其结果并不统一。有的病人可能会遇到主动脉继续增大、假腔持续开放等血管重塑方面的挑战, 这些问题有可能导致主动脉相关的后续健康问题出现, 如主动脉夹层动脉瘤、主动脉破裂出血、内脏缺血等^[5]。因此, 迅速辨别并应对那些可能表明 TEVAR 手术后血管重塑效果不理想的因素, 显得尤为关键, 对提高患者远期生存预后具有重要的临床意义。目前, 对主动脉重塑的测量评估目前尚没有统一的评价方式, 本文将对 TEVAR 术后主动脉重塑的测量评估方式: CT 血管成像(computed tomography angiography, CTA)、血流动力学、人工智能(artificial intelligence, AI)等进行综述, 以期临床提供精准决策和远期预后判断提供科学的参考依据。

1 主动脉重塑的影响因素

目前认为, TEVAR 术后假腔完全血栓化、假腔供血、远端破口数量及 TEVAR 干预时机等是主动脉重塑的主要影响因素。其中 TEVAR 术后假腔完全血栓化提示主动脉良性重塑, 预后良好, 而假腔部分血栓化和假腔通畅则提示预后不良^[6-10]。TEVAR 术后假腔供血也可能导致主动脉负性重塑^[11]。TEVAR 术后远端破口数量与主动脉负性重塑相关, 可增加患者远期发生主动脉事件的可能性, 尤其对内脏动脉段残余裂口数量大于 2 个的患者^[12-14]。TEVAR 干预时机的选择对主动脉重塑的影响, 目前国内外学者尚有争议。多数学者认为, 在急性期(≤ 14 d)内, 治疗所遇到的主要挑战在于逆撕风险较高, 而亚急性期(15~90 d)则被视为一个理想的治疗阶段, 它不仅能够促进血管的积极重塑, 还能显著降低发生致命性并发症的可能性^[15-17]。根据最新的美国和日本研究结果显示, TEVAR 手术之后超过 7 d 的患者更容易出现主动脉扩张等血管不良重塑现象, 而相比之下, 早期进行手术则更有可能促进主动脉的良性形态学改变^[18, 19]。关

于支架移植长度如何影响 TEVAR 手术后的血管重塑, 目前存在不同的观点。大多数人倾向于认为, 较长的支架移植对夹层假腔的重塑过程具有更为积极的影响^[20]。有研究结果显示, 支架的长度并不对血管重塑产生显著影响^[21, 22]。在一项多中心的研究中, 通过计算支架在降主动脉中的占比来评估其覆盖范围, 结果显示当支架占比超过 31.3% 时, 胸主动脉发生扩张的风险会显著下降^[23], 这表明较长的支架有助于实现血管的良性重塑。然而, 也有观点认为, 支架过长可能会增加发生神经系统并发症的风险^[24]。一项前瞻性多中心研究揭示^[25], TEVAE 术后初期脊髓损伤发生率为 1.8%, 4 年内未受脊髓损伤的比例为 97.8%, 支架的延伸范围, 成为了中期阶段脊髓发生损伤的一个单独的预测指标。另一项研究指出^[26], 对于支架平均长度为 157.1 mm 的患者, 在住院期间未观察到脊髓缺血的症状, 然而该研究并未提及出院后神经系统并发症的具体情况。TEVAR 手术后神经系统并发症的潜在原理, 以及如何在支架长度与脊髓受损风险之间找到恰当的平衡, 仍然需要进一步的科学研究。

2 主动脉重塑的主要测量评估方式

2.1 主动脉 CT 血管成像 在 AD 的诊断及测量手段中, CTA 占据主导地位, 其诊断敏感性超过 90%, 特异性几乎达到满值。对比其他成像方式, CTA 具有更高的可用性、图像采集与处理速度快且灵敏性优异。此外, CT 多平面重建方法在精确测定血管直径以及评估累及范围方面, 发挥着至关重要的辅助作用^[27]。主动脉重塑的评估工作通常利用 CTA 图像来完成, 包括测量真腔、假腔以及全主动脉的直径; 同时检查假腔内是否存在血栓, 并评估其程度; 此外, 还需测量主动脉夹层破口的大小以及数量。根据具体研究需求, 可以分别测量主动脉峡部、肺动脉分叉等不同部位的真腔、假腔直径以及总直径, 并记录假腔内血栓的形成程度。直径测量方法: CT 横断面图像用于特定区域的测量, 主动脉直径是通过测量其血管外壁之间的直线距离得出, 而真腔和假腔的直径则是通过量取垂直于内膜片方向上的血管内壁间距来获取。利用 CTA 动脉期图像中对比剂的充盈情况来评估假腔血栓的形成程度: 当血流顺畅无阻时, 表明无血栓形成; 当血栓与血流同时存在时, 表示部分血栓形成; 当假腔内被血栓完全堵塞且没有血流时, 则为完全血栓形成。确定测量平面时, 以支架位置为依据来评估支架相关的并发症; 而以解剖学标志为依据, 则可以评估主动脉的整体重塑情况。

2.2 血流动力学技术 随着精准医疗范畴的持续扩展和需求的稳步增长, 主动脉夹层的功能性评估逐渐

崭露头角,成为个性化医疗方案的新方向。主动脉疾病的病理生理过程及其TEVAR治疗后的影响,与流体力学之间存在着紧密联系。血流动力状态的变异直接促使假腔扩张及真腔受压。因此,血流动力学特性在血管结构重塑过程中发挥的作用,往往早于形态学上的改变显现^[28]。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术及4D flow MRI方法能够进一步为该疾病提供更为详尽的功能性数据。CFD作为一种有效的工具,被广泛应用于心血管病血流动力学的模拟研究中,同时在AD发病机制的深入探究以及临床治疗效果的评价中也发挥着重要作用^[29]。CFD技术能够依据临床所获取的CTA资料,开展数值模拟研究工作,从而获取主动脉内血液动力学参数的全面分布特征,具体包含流速值、压强值以及壁面剪切力值等。这些参数经过进一步处理生成的个性化数据,可以应用于预测TEVAR手术之后的中长期血管形态变化情况,为医学研究提供有价值的参考^[30-35]。4D flow MRI是一种具备时间分辨率特性的三维相位对比磁共振成像方法。它能够从不同方向捕获血流数据,进而获取到全面且细致的三维动态参数集,这些参数集可用于计算多种血流相关指标,为医学研究提供重要数据支持^[36]。根据一项最新研究成果,4D flow MRI技术获取的患者特定边界条件与非特定条件相比,展现出更高的血流状态模拟准确性。该技术可辅助针对B型主动脉夹层患者的个性化TEVAR手术前后,建立主动脉血流动力学模型,使手术效果预测及治疗方案评估更为精确,同时为患者前期决策过程提供详细个性化数据支持。这些数据资料在主动脉夹层TEVAR手术前期决策研究中,具有重要参考价值^[37]。

2.3 人工智能技术 AI的定义是计算机模拟人类的思维及行动方式。机器学习技术的出现,赋予计算机“学习”的能力,使其能够从数据中自主提取特征模式。深度学习则是机器学习领域内的一个新兴分支,其核心目标是构建能够模拟人脑神经网络的计算系统,通过模仿人脑的工作机制来实现对数据的有效解析^[38]。由于AD通常具有夹层累及范围广、主动脉内膜片空间形态多变,远端破口数量及结构不一的特点,针对这种复杂主动脉解剖结构,尤其是TEVAR术后主动脉重塑细节及规律,标准的影像学成像技术往往未能全面契合主动脉夹层在临床探索中的需求。机器学习,在人工智能的广阔范畴中占据一席之地,针对数据处理问题提供了解决方案,其范围广泛,既包括了既有测量数据的快速查找,也扩展到了对原始影像素材的详尽剖析等更为复杂且繁重的作业内容。机器学习通过建立高维复杂的数学模型,利用反馈机制,不断优化模型参数,对数据进行快速良好的处理来预测结果^[39,40]。同时,机器学习技术可实现对AD累及范围、

真假腔空间布局、假性血栓形成状况等多项影像特征的量化提取,这为进一步剖析TEVAR术后主动脉重塑的原理及规律开辟了新的途径,提供了宝贵的研究契机。Fantazzini A等^[41,42]利用卷积神经网络,在主动脉CTA图像的轴、矢、冠状面上定位并自动分割主动脉,整合三平面数据以获得更全面的预测。Bin Lu等^[43]基于三维深度卷积神经网络,实现了主动脉、真腔及假腔的全自动分割与测量。该模型优化了AD图像处理与测量流程,通过精确、可靠、稳定的操作,提升了AD自动分割、测量及诊断效率,为B型主动脉夹层自动分割与直径测量提供了新手段^[44,45]。

当前,B型主动脉夹层病人在经历了TEVAR手术治疗后,关于血管重塑预测因素的研究重点,偏向于历史回顾性质的分析探讨,该方式在预测术后血管重塑状况上展现出一定约束性,目前仍需要开展更多深入研究,以期达到对该领域更全面的理解与改进。主动脉CTA的原始图像资料,成为流体力学研究和人工智能分析所依赖的核心信息源,CTA图像质量的规范化对后续分析至关重要。CFD技术可用于揭示主动脉夹层动力变化规律,提供主动脉夹层相关的血流动力学参数,辅助疾病发展状况的评判和治疗方案的制定工作。AI技术当前已能够清晰辨识主动脉夹层的真腔、假腔及内膜片,精确测定主动脉、真腔和假腔的尺寸,对AD的CTA图像进行高效自动化解析,且精确度高,在AD的CTA诊断方面,表现出优异的诊断能力。AI在TEVAR术后主动脉重塑方面的运用,预期能为临床决策的精确性及长期预后评估提供更可靠的科学依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Enezate TH, Omran J, Al-Dadah AS, et al. Thoracic endovascular repair versus medical management for acute uncomplicated type B aortic dissection[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2018, 91(6): 1138-1143.
- [2] 中国医师协会心血管外科分会大血管外科专业委员会. 主动脉夹层诊断与治疗规范中国专家共识[J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2017, 33(11): 641-654.
- [3] Dake MD, Miller DC, Semba CP, et al. Transluminal placement of endovascular stent-grafts for the treatment of descending thoracic aortic aneurysms[J]. *N Engl J Med*, 1994, 331(26): 1729-1734.
- [4] 张红刚, 乔彤. Stanford B型主动脉夹层腔内修复术后主动脉重塑研究进展[J]. *中华外科杂志*, 2018, 36(6): 477-480.
- [5] Wang XL, Huang HY, Li Z, et al. Risk factors associated with aortic remodeling in patients with stanford type B

- aortic dissection after thoracic endovascular aortic repair [J]. *Genet Mol Res*, 2015, 14(4): 11692–11699.
- [6] Tsai TT, Evangelista A, Nienaber CA, et al. Partial thrombosis of the false lumen in patients with acute type B aortic dissection[J]. *N Engl J Med*, 2007, 357(4): 349–359.
- [7] Tolenaar JL, van Keulen JW, Jonker FH, et al. Morphologic predictors of aortic dilatation in type B aortic dissection[J]. *J Vasc Surg*, 2013, 58(5): 1220–1225.
- [8] Trimarchi S, Tolenaar JL, Jonker FH, et al. Importance of false lumen thrombosis in type B aortic dissection prognosis[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2013, 145(3): S208–S212.
- [9] Piazza M, Squizzato F, Miccoli T, et al. Definition of type II endoleak risk based on preoperative anatomical characteristics[J]. *J Endovasc Ther*, 2017, 24(4): 566–572.
- [10] Kamman AV, Brunkwall J, Verhoeven EL, et al. Predictors of aortic growth in uncomplicated type B aortic dissection from the Acute Dissection Stent Grafting or Best Medical Treatment(ADSORB)database[J]. *J Vasc Surg*, 2017, 65(4): 964–971.
- [11] 陈金鹏, 柏志斌, 计佳杰, 等. Stanford B型主动脉夹层假腔供血动脉分支对腔内治疗后假腔重塑的影响[J]. *介入放射学杂志*, 2020, 29(10): 1039–1042.
- [12] 徐乐吟, 来志超, 邵江, 等. Stanford B型主动脉夹层远端破口的腔内治疗策略[J]. *中华外科杂志*, 2021, 59(8): 711–715.
- [13] 杨睿, 贾贺月, 郭伟, 等. 胸主动脉腔内修复术后腹段假腔重塑影响因素分析[J]. *中华外科杂志*, 2021, 59(11): 934–939.
- [14] Chen IM, Chen PL, Huang CY, et al. Factors affecting optimal aortic remodeling after thoracic endovascular aortic repair of type B (III b) aortic dissection[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2017, 40(5): 671–681.
- [15] Canaud L, Ozdemir BA, Patterson BO, et al. Retrograde aortic dissection after thoracic endovascular aortic repair [J]. *Ann Surg*, 2014, 260(2): 389–395.
- [16] Li DL, Zhang HK, Chen XD, et al. Thoracic endovascular aortic repair for type B aortic dissection: analysis among acute, subacute, and chronic patients[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 67(10): 1255–1257.
- [17] Li HL, Wu S, Chan YC, et al. Early and mid-term mortality and morbidity of contemporary international endovascular treatment for type B aortic dissection—A systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Cardiol*, 2020, 301: 56–61.
- [18] Wang GJ, Cambria RP, Lombardi JV, et al. Thirty-day outcomes from the society for vascular surgery vascular quality initiative thoracic endovascular aortic repair for type B dissection project[J]. *J Vasc Surg*, 2019, 69(3): 680–691.
- [19] Miyairi T, Miyata H, Chiba K, et al. Influence of timing after thoracic endovascular aortic repair for acute type B aortic dissection[J]. *Ann Thorac Surg*, 2018, 105(5): 1392–1396.
- [20] Qing KX, Yiu WK, Cheng SW. A morphologic study of chronic type B aortic dissections and aneurysms after thoracic endovascular stent grafting[J]. *J Vasc Surg*, 2012, 55(5): 1268–1276.
- [21] Gupta JD, Naazie IN, Zarrintan S, et al. Outcomes of thoracic endovascular aortic repair for uncomplicated type B dissections based on chronicity[J]. *J Vasc Surg*, 2022, 76(6): 1458–1465.
- [22] Chou HW, Chan CY, Chang CH, et al. Comparisons of aortic remodelling and outcomes after endovascular repair of acute and chronic complicated type B aortic dissections[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2018, 27(5): 733–741.
- [23] Xue Y, Ge Y, Ge X, et al. Association between extent of stent-graft coverage and thoracic aortic remodeling after endovascular repair of type B aortic dissection[J]. *J Endovasc Ther*, 2020, 27(2): 211–220.
- [24] Sobocinski J, Lombardi JV, Dias NV, et al. Volume analysis of true and false lumens in acute complicated type B aortic dissections after thoracic endovascular aortic repair with stent grafts alone or with a composite device design[J]. *J Vasc Surg*, 2016, 63(5): 1216–1224.
- [25] Piazza M, Squizzato F, Milan L, et al. Incidence and predictors of neurological complications following thoracic endovascular aneurysm repair in the global registry for endovascular aortic treatment[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2019, 58(4): 512–519.
- [26] Xue Y, Ge Y, Ge X, et al. Association between extent of stent-graft coverage and thoracic aortic remodeling after endovascular repair of type B aortic dissection[J]. *J Endovasc Ther*, 2020, 27(2): 211–220.
- [27] Müller-Eschner M, Rengier F, Partovi S, et al. Accuracy and variability of semiautomatic centerline analysis versus manual aortic measurement techniques for TEVAR[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2013, 45(3): 241–247.
- [28] 李伟浩, 沈晨阳, 张小明, 等. 计算流体力学技术在胸

- 主动脉疾病中的应用[J]. 中华外科杂志, 2015, 53(8): 637-640.
- [29] Chen D, Müller-Eschner M, Kotelis D, et al. A longitudinal study of type-B aortic dissection and endovascular repair scenarios: computational analyses [J]. *Med Eng Phys*, 2013, 35(9): 1321-1330.
- [30] Xu HM, Li ZF, Dong HW, et al. Hemodynamic parameters that may predict false-lumen growth in type-B aortic dissection after endovascular repair: a preliminary study on long-term multiple follow-ups[J]. *Med Eng Phys*, 2017, 50: 12-21.
- [31] Xu H, Piccinelli M, Leshnowar BG, et al. Coupled morphological-hemodynamic computational analysis of type B aortic dissection: a longitudinal study[J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46(7): 927-939.
- [32] Osswald A, Karmonik C, Anderson JR, et al. Elevated wall shear stress in aortic type B dissection may relate to retrograde aortic type a dissection: a computational fluid dynamics pilot study[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2017, 54(3): 324-330.
- [33] 李振锋, 许欢明, 熊江, 等. B型主动脉夹层数值模拟研究的现状与展望[J]. *中国医药*, 2018, 13(4): 636-640.
- [34] Xu H, Xiong J, Han X, et al. Computed tomography-based hemodynamic index for aortic dissection[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, 162(2): e165-e176.
- [35] 杨睿, 许欢明, 张薛欢, 等. 胸主动脉腔内修复术后血管重塑的血流动力学仿真分析[J]. *解放军医学院学报*, 2021, 42(3): 327-333.
- [36] Allen BD, Aouad PJ, Burris NS, et al. Detection and hemodynamic evaluation of flap fenestrations in type B aortic dissection with 4D flow MRI: comparison with conventional MRI and CTA[J]. *Radiol Cardiothorac Imaging*, 2019, 1(1): e180009.
- [37] 刘东婷, 张楠, 王文川, 等. Stanford B型主动脉夹层腔内修复术前后的个性化血流动力学仿真研究[J]. *心肺血管病杂志*, 2022, 41(4): 404-417.
- [38] Lecun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [39] 乔红艳, 郭邦俊, 张龙江. 机器学习在心血管影像中的研究进展[J]. *中华医学杂志*, 2019, 99(17): 1353-1357.
- [40] 卢光明, 许强, 张志强. 神经系统疾病人工智能医学影像现状与发展[J]. *中华放射学杂志*, 2018, 52(10): 734-737.
- [41] Brutti F, Fantazzini A, Finotello A, et al. Deep learning to automatically segment and analyze abdominal aortic aneurysm from computed tomography angiography[J]. *Cardiovasc Eng Technol*, 2022, 13(4): 535-547.
- [42] Fantazzini A, Esposito M, Finotello A, et al. 3D automatic segmentation of aortic computed tomography angiography combining multi-view 2D convolutional neural networks [J]. *Cardiovasc Eng Technol*, 2020, 11(5): 576-586.
- [43] Yu Y, Gao Y, Wei J, et al. A three-dimensional deep convolutional neural network for automatic segmentation and diameter measurement of type B aortic dissection[J]. *Korean J Radiol*, 2021, 22(2): 168-178.
- [44] Lyu T, Yang G, Zhao X, et al. Dissected aorta segmentation using convolutional neural networks[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2021, 211:106417.
- [45] Sedghi Gamechi Z, Bons LR, Giordano M, et al. Automated 3D segmentation and diameter measurement of the thoracic aorta on non-contrast enhanced CT[J]. *Eur Radiol*. 2019, 29(9): 4613-4623.

(本文编辑: 马萌萌, 许守超)