

· 综述 ·

主动脉弓原位开窗术的应用和进展

万乔浩, 张小明*

(北京大学人民医院血管外科, 北京 100044)

【摘要】 主动脉弓腔内修复术的重点与难点在于完全隔绝病变部位的同时维持弓上分支的血流, 原位开窗技术可以快速、有效地重建弓上分支血流。原位开窗技术的应用逐步扩大了胸主动脉腔内修复术治疗主动脉弓疾病的适应证。随着腔内技术的发展与适合主动脉弓部器械的出现, 单分支开窗到三分支开窗的临床应用都取得了满意的短中期结果。开窗的方式主要包括机械方法和物理方法, 机械方法是利用各种针具穿刺破膜, 而物理方法主要是应用激光和射频进行热能破膜。本文介绍了原位开窗术治疗主动脉弓疾病的应用和进展。

【关键词】 主动脉弓; 腔内修复术; 原位开窗

【中图分类号】 R654.3

【文献标志码】 A

【DOI】 10.11915/j.issn.1671-5403.2022.08.136

Application and progress of *in situ* fenestration of aortic arch

WAN Qiao-Hao, ZHANG Xiao-Ming*

(Department of Vascular Surgery, Peking University People's Hospital, Beijing 100044, China)

【Abstract】 The focus and difficulty in endovascular aortic arch repair is how to maintain the blood flow of the supra-aortic branches with total isolation of the lesion. *In situ* fenestration can quickly and effectively reconstruct the blood flow of the supra-aortic branches, and its application has gradually expanded the indications of thoracic endovascular aortic repair in the treatment of aortic arch diseases. The development of endovascular technology and the emergence of devices suitable for aortic arch have led to satisfactory short- and medium-term results of the clinical applications of fenestration on a single branch to three branches. The methods of fenestration are mainly mechanical and physical. The former is to use various needles to puncture the fabric, while the latter mainly includes use of thermal energy of laser and radiofrequency to ablate the fabric. This article aims to review the application and progress of *in situ* fenestration in the treatment of aortic arch diseases.

【Key words】 aortic arch; thoracic endovascular aortic repair; *in situ* fenestration

Corresponding author: ZHANG Xiao-Ming, E-mail: rmyywgwk@163.com

主动脉弓部疾病主要包括动脉瘤和夹层, 单独的弓部疾病很少见, 多由邻近节段的主动脉病变累及弓部。目前主动脉弓部疾病的治疗方式包括传统开放手术、杂交手术和全腔内修复术。专家共识推荐对于开放手术风险高的患者, 弓部腔内修复术是可行的选择^[1]。此外, 术中意外覆盖左锁骨下动脉(left subclavian artery, LSA)的情况很常见。由于主动脉弓解剖复杂且变异多样, 重建弓上分支是腔内修复术的挑战。因此, 原位开窗术(*in situ* fenestration, ISF)应运而生。

1 原位开窗术的应用发展

接受胸主动脉腔内修复术的患者中, 26%~40%的病例为了获得足够距离的近端锚定区需要覆盖

LSA, 但封堵LSA可能会引起脊髓缺血、上肢缺血、椎基底动脉缺血及脑卒中等并发症, 因此指南建议术中重建LSA^[2]。2004年McWilliams等^[3]首次经锁骨上切口采用针刺法进行ISF重建LSA。2009年Murphy等^[4]首次应用2.3 mm Turbo Elite激光消融导管于1例邻近LSA开口的创伤性胸主动脉横断的病例中进行ISF重建LSA。2015年Tse等^[5]首次发布了应用0.035英寸PowerWire射频导丝ISF重建LSA的报道。

目前ISF也逐步应用于左颈总动脉(left common carotid artery, LCCA)和无名动脉(innominate artery, IA)的重建。开放手术治疗主动脉弓疾病多需深低温停循环和体外循环的支持, 手术创伤大, 并发症发生率和死亡率较高。因此, 对于高龄体弱、多种合并症、

收稿日期: 2021-09-21; 接受日期: 2021-12-07

通信作者: 张小明, E-mail: rmyywgwk@163.com

解剖结构不适宜开放手术的患者,腔内修复术是更好的选择。2009年 Sonesson 等^[6]首次报道针刺 ISF 全腔内主动脉弓修复术,在左侧股动脉-双侧颈总动脉临时转流装置的辅助下成功重建了 LCCA 和 IA。在体外循环的支持下, Katada 等^[7]和 Shang 等^[8]应用针刺 ISF 分别完成了 6 例和 8 例主动脉弓上三分支的重建。上述研究表明 ISF 成功率高,短中期效果满意,但仍需长期随访数据来评估其效果。

2 原位开窗术的技术特点

主动脉弓腔内修复术的支架包括定制开窗支架和分支支架,定制开窗支架耗时长、费用高,急诊不适用,目前上市的分支支架主要适用于 LSA 的重建,同样费用高。而 ISF 具有便捷、易操作、费用较低的优点,可用于急诊和紧急补救。ISF 的目的在于隔绝主动脉病变的同时保留弓上三分支的血流,其操作步骤分为主体支架窗口建立、扩大窗口及植入桥接支架。

2.1 窗口建立

窗口建立的方式分两大类:机械方法和物理方法。机械方法指针刺开窗,其针具包括导丝和空心针。McWilliams 等^[3]使用 0.018 英寸导丝的硬头端开窗, Sonesson 等^[6]使用 Mediplast 公司的 20 cm 长 20 G 穿刺针进行了 LCCA 和 IA 开窗, Manning 等^[9]使用预先弯制的 22 G 腰穿针配合改良的经颈静脉肝内穿刺鞘完成了 LSA 开窗, Tan 等^[10]使用重返真腔导管进行了 LSA 开窗。

目前 LSA 开窗的路径主要是经左锁骨上切口暴露 LSA 逆行穿刺和经左肱动脉逆行穿刺。由于开放手术出血与感染风险相对较高,耗时长,增加了卒中、膈神经和胸导管损伤的风险,而术中常规需要经左侧肱动脉置入刻度猪尾导管测量主动脉的直径,因此优先选择经左肱动脉逆穿行 LSA 开窗。多数 LSA 从主动脉弓发出的角度较锐并走行迂曲,难以获得满意的穿刺角度,可导致主体支架移位、损伤血管等后果。研究表明针具以垂直于主体支架的角度进行穿刺开窗的质量最高并且可以降低损伤血管的风险^[11]。此外,由于 LSA 的直径比针具的直径大很多,穿刺时针具不稳定可产生偏移、回缩和损伤血管等。为了解决上述问题,预先置入左侧肱动脉-股动脉牵引导丝并联合可调弯鞘和顺应性球囊辅助固定针具的方法已实施并取得一定效果。国产的可调穿刺装置结合可调弯鞘,将穿刺针调节至垂直主体支架的方向,其尖端有一个顺应性球囊,可协助针尖固定于 LSA 中心,并有 3 个可调穿刺深度级别,

其临床效果满意^[12]。Bai 等^[13]发表了关于腔内可调控破膜系统临床应用的中期随访结果,技术成功率高且效果满意。

针刺开窗技术需要合适的穿刺角度结合适宜的力量才能穿透靶点,这种力量有时难以控制并可能会损伤血管,在靶血管过度扭曲和发出角度较锐的病例中限制了其使用,而激光和射频开窗更具优势。激光和射频开窗属于物理方法,二者的原理是利用热能作用于靶点而蒸发或融化织物材料而创建窗口。激光和射频不需要依靠直接机械力进行穿刺开窗,其能量的释放受机器开关的控制,较针刺更不易损伤血管。研究表明射频探针穿透涤纶织物支架较容易,但要穿透膨体聚四氟乙烯覆膜支架较困难,而激光对上述两种材料均有良好的穿透性能^[5,14]。此外,工作状态的射频探针与金属支架接触时可能出现短路现象^[5]。目前临床应用射频探针原位开窗的经验不足,其针对不同支架的最优能量设定尚需探索。

最早用于 ISF 的激光是准分子激光,一种脉冲式气体激光器发射紫外波段激光。Murphy 等^[4]应用 308 nm 波长 Turbo Elite 激光消融导管, Sonesson 等^[14]应用 0.9 mm Turbo Elite 激光消融导管进行 LSA 开窗均取得满意效果。Jayet 等^[15]报道了多种支架在针刺开窗和激光开窗后的生物力学改变,形态分析示激光开窗的窗口呈圆形和烧灼状边缘,而针刺开窗将织物线推挤到一侧,张力试验示激光开窗相较针刺开窗更易降低支架机械强度。由于激光与组织相互作用取决于所吸收激光能量的类型和吸收能量的材料,为了减少激光能量对血管壁的伤害,理想的激光辐射波应该被支架覆膜材料吸收,而不被血管壁吸收,因此二极管激光器逐渐用于临床。二极管激光器是一种可以直接将电能转换为波长范围从红外线到紫外线光波的半导体装置。Qin 等^[16]报道二极管激光装置 LASEmar[®] 1500 用于 ISF 快速有效且安全,810 nm 波长激光在血红蛋白中吸收快,在血液中的穿透深度为 0.3 mm,故其对血管壁的热损伤极小。Li 等^[17]报道了国产二极管激光装置静脉曲张激光治疗仪用于 ISF 的早中期效果,也证实了其安全有效。

2.2 扩大窗口

窗口建立后需将其孔径扩大才能置入分支支架,目前扩大窗口的方法是使用球囊扩张,主要包括切割球囊和非顺应性球囊。初始窗口建立后,需要足够支撑力的导丝和适宜孔径的窗口才能使球囊导管顺利通过。早期 Manning 等^[9]报道先用 22 G 穿

刺针刺入移植物,再用18G穿刺针将孔扩大。随着穿刺器具的发展,目前一般能直接建立有效的孔径。由于织物结构紧密,或金属支架刚好位于分支血管开口处,因此需要足够压力强度的球囊才能取得满意的窗口直径。切割球囊充盈时,其上的显微外科刀片可将孔周边的纤维切断利于扩张。非顺应性球囊以其出色的耐高压能力将孔径撑大。临床中关于球囊的选择包括单用切割球囊、单用非顺应性球囊及联合应用这两种球囊。也有先用半顺应性球囊再用非顺应性球囊的报道^[12]。Lin等^[18]报道了切割球囊和非顺应性球囊用于不同支架的开窗效果体外试验,结果显示虽然切割球囊所开窗口面积更大(除了Talent支架)且更圆,但其对织物破坏的程度也更大,更易导致窗口周围的织物结构不稳定,增加了内漏的风险,甚至其切断的纤维会造成血流远端的栓塞。有研究显示,使用准分子激光开窗,非顺应性球囊的直径不建议超过8mm,以免造成织物严重撕裂^[19]。不同开窗方式情况下,不同移植物的适宜开窗面积还需要更多的试验来获得。

2.3 植入桥接支架

桥接支架在保证弓上分支通畅的同时,还可维持主体支架的稳定性,降低移位和内漏的风险。桥接支架包括金属裸支架和覆膜支架,其中覆膜支架最为常用。国内常用的覆膜支架包括戈尔的肝素涂层血管内覆膜支架系统和巴德的血管覆膜支架,血管弯曲选用前者,血管较直选用后者^[17]。研究报道示,当病变没有累及弓上分支,近端锚定区位于正常血管壁的情况下,金属裸支架用于重建分支动脉是安全的,不会增加内漏的风险^[20]。Shang等^[8]报道靶血管直径太大时也可以植入金属裸支架。当桥接覆膜支架与主体支架连接部出现狭窄时可以植入金属裸支架扩张狭窄,还可以在桥接覆膜支架内植入金属裸支架以加固窗口的稳定性^[12]。为了减少内漏和移位的发生,桥接支架近端应进入主体支架腔内,但具体进入的长度尚无统一标准。有报道LSA支架进入主体支架腔内0.5~1.0cm^[8]、LCCA支架进入主体支架腔内0.5cm^[20]、IA支架进入主体支架腔内2cm^[21]。桥接支架远端的位置以不封堵重要分支血管为宜,如重建LSA时支架远端不覆盖左椎动脉开口,重建IA时支架远端不封堵右锁骨下动脉等。

3 原位开窗术的辅助技术

3.1 提高窗口质量

无论使用哪种开窗方式,保持开窗工具垂直作

用于主动脉移植物是最安全且最有效的途径。弓上分支血管走行扭曲和发出角度锐利等病例中,很难确保开窗工具垂直于织物,可能降低窗口质量,甚至损伤血管及周围脏器。2014年Hongo等^[21]设计了“乌贼捕捉”技术来解决这个问题。此技术的主要过程是先对折一根0.014英寸细导丝,再将导丝折叠端穿过导管后经靶血管逆行进入主动脉腔内形成一个线圈,然后在圈内释放主体支架,最后将开窗工具经靶血管逆行到达织物开窗部位,同时适度拉紧细导丝并完成开窗。该技术有助于开窗工具与移植物之间保持稳定和垂直角度,从而提高窗口质量并降低并发症的发生。该技术的弊端在于:(1)拉紧细导丝尾端的力量要适宜,力量太小达不到满意效果,力量过大会导致支架移位;(2)当主动脉存在附壁血栓或斑块时,操作导丝进入线圈可能导致血栓或斑块脱落引起栓塞并发症。Mulorz等^[22]认为在“乌贼捕捉”技术中导引导丝选入线圈的过程,有时操作困难、耗时并增加栓塞的风险,因此改良了此技术。术者在1例主动脉穿透性溃疡患者的激光ISF腔内修复术过程中,首先经左侧股动脉进入一根亲水涂层导丝并从左侧腋动脉穿出,再在体外将线圈导管套紧导丝经LSA进入主动脉内,然后将导丝推送至升主动脉并被替换成超硬导丝,其余步骤同“乌贼捕捉”技术,手术过程操作顺利,术后未出现并发症。随着ISF越来越普及,辅助技术的应用对于确保手术的成功与安全非常重要。

3.2 建立临时转流

主动脉弓的解剖形态复杂且有多种变异,颅脑的血流全部由主动脉弓上分支血管供应,而脑组织耐缺血的时间较短,因此有效维持脑血流至关重要。目前ISF重建LSA不需要额外的脑血流保护措施,但ISF重建LCCA和IA时,一般需要提前建立临时转流或体外循环来维持脑血流。Sonesson等^[6]首次在股-双颈动脉临时转流的支持下完成了全主动脉弓腔内修复术,成功重建了LCCA和IA。股-颈动脉体外临时转流的建立需要在颈部做切口暴露颈动脉,由于围术期抗凝和抗血小板治疗,且颈部切口不适宜加压包扎,因此术后切口出血的风险较大甚至可能导致窒息。因此,有学者提出了临时腔内转流(temporary endovascular shunt, TES)技术^[23],1例位于胸主动脉2区的假性动脉瘤患者需要应用ISF重建LCCA和LSA,术者应用TES技术恢复了主体支架释放后LCCA和左侧椎动脉供血,从而维持了颅脑足够的血供。对于0区和1区病变的患者行ISF,一般需要在体外循环的支持下重建三支。

4 总 结

原位开窗术在造影直视下操作,定位准确,可迅速完成开窗重建分支血管,内漏发生率低,可重复性强,是当前腔内修复术的研究热点。其核心在于有效窗口的建立,主体支架释放后会覆盖弓上分支的开口,完全阻断分支血流,若不能迅速建立有效的窗口,将会导致脑缺血事件的发生。主动脉弓原位开窗术的发展方向是研发设计更安全、易操作的开窗器具和易定位且稳定的支架移植术。

【参考文献】

[1] Czerny M, Schmidli J, Adler S, *et al.* Current options and recommendations for the treatment of thoracic aortic pathologies involving the aortic arch: an expert consensus document of the European Association for Cardio-Thoracic surgery (EACTS) and the European Society for Vascular Surgery (ESVS)[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2019, 55(1): 133-162. DOI: 10.1093/ejcts/ezy313.

[2] Upchurch GR Jr, Escobar GA, Azzizadeh A, *et al.* Society for vascular surgery clinical practice guidelines of thoracic endovascular aortic repair for descending thoracic aortic aneurysms[J]. *J Vasc Surg*, 2021, 73(1S): 55S-83S. DOI: 10.1016/j.jvs.2020.05.076.

[3] McWilliams RG, Murphy M, Hartley D, *et al.* *In situ* stent-graft fenestration to preserve the left subclavian artery[J]. *J Endovasc Ther*, 2004, 11(2): 170-174. DOI: 10.1583/03-1180.1.

[4] Murphy EH, Dimaio JM, Dean W, *et al.* Endovascular repair of acute traumatic thoracic aortic transection with laser-assisted *in-situ* fenestration of a stent-graft covering the left subclavian artery[J]. *J Endovasc Ther*, 2009, 16(4): 457-463. DOI: 10.1583/09-2746.1.

[5] Tse LW, Lindsay TF, Roche-Nagle G, *et al.* Radiofrequency *in situ* fenestration for aortic arch vessels during thoracic endovascular repair[J]. *J Endovasc Ther*, 2015, 22(1): 116-121. DOI: 10.1177/1526602814565776.

[6] Sonesson B, Resch T, Allers M, *et al.* Endovascular total aortic arch replacement by *in situ* stent graft fenestration technique[J]. *J Vasc Surg*, 2009, 49(6): 1589-1591. DOI: 10.1016/j.jvs.2009.02.007.

[7] Katada Y, Kondo S, Tsuboi E, *et al.* Endovascular total arch repair using *in situ* fenestration for arch aneurysm and chronic type A dissection[J]. *Ann Thorac Surg*, 2016, 101(2): 625-630. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2015.07.032.

[8] Shang T, Tian L, Li DL, *et al.* Favourable outcomes of endovascular total aortic arch repair *via* needle based *in situ* fenestration at a mean follow-up of 5.4 months[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2018, 55(3): 369-376. DOI: 10.1016/j.ejvs.2017.11.022.

[9] Manning BJ, Ivancev K, Harris PL. *In situ* fenestration in the aortic arch[J]. *J Vasc Surg*, 2010, 52(2): 491-494. DOI: 10.1016/j.jvs.2009.07.088.

[10] Tan TW, Coulter AH, Zhang WW. Percutaneous *in situ* left subclavian artery fenestration using reentry catheter during endovascular thoracic aortic aneurysm repair[J]. *Int J Angiol*, 2016,

25(5): e77-e80. DOI: 10.1055/s-0034-1395978.

[11] Riga CV, Bicknell CD, Basra M, *et al.* *In vitro* fenestration of aortic stent-grafts: implications of puncture methods for *in situ* fenestration durability[J]. *J Endovasc Ther*, 2013, 20(4): 536-543. DOI: 10.1583/12-4175.1.

[12] Wang L, Zhou X, Guo D, *et al.* A new adjustable puncture device for *in situ* fenestration during thoracic endovascular aortic repair[J]. *J Endovasc Ther*, 2018, 25(4): 474-479. DOI: 10.1177/1526602818776623.

[13] Bai J, Wang C, Liu Y, *et al.* A novel fenestrating device: quick fenestrator for reconstructing supra-aortic arteries *in situ* during thoracic endovascular aortic repair[J]. *Can J Cardiol*, 2021, 37(10): 1539-1546. DOI: 10.1016/j.cjca.2021.04.024.

[14] Sonesson B, Dias N, Abdulasak M, *et al.* Midterm results of laser generated *in situ* fenestration of the left subclavian artery during thoracic endovascular aneurysm repair[J]. *J Vasc Surg*, 2019, 69(6): 1664-1669. DOI: 10.1016/j.jvs.2018.09.052.

[15] Jayet J, Heim F, Coggia M, *et al.* An experimental study of laser *in situ* fenestration of current aortic endografts[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2018, 56(1): 68-77. DOI: 10.1016/j.ejvs.2018.03.016.

[16] Qin J, Zhao Z, Wang R, *et al.* *In situ* laser fenestration is a feasible method for revascularization of aortic arch during thoracic endovascular aortic repair[J]. *J Am Heart Assoc*, 2017, 6(4): e004542. DOI: 10.1161/jaha.116.004542.

[17] Li C, Xu P, Hua Z, *et al.* Early and midterm outcomes of *in situ* laser fenestration during thoracic endovascular aortic repair for acute and subacute aortic arch diseases and analysis of its complications[J]. *J Vasc Surg*, 2020, 72(5): 1524-1533. DOI: 10.1016/j.jvs.2020.01.072.

[18] Lin J, Parikh N, Udgiri N, *et al.* Laser fenestration of aortic stent-grafts followed by noncompliant *vs* cutting balloon dilation: a scanning electron microscopy study[J]. *J Endovasc Ther*, 2018, 25(3): 397-407. DOI: 10.1177/1526602818772311.

[19] Lin J, Udgiri N, Guidoin R, *et al.* *In vitro* laser fenestration of aortic stent-grafts: a qualitative analysis under scanning electron microscope[J]. *Artif Organs*, 2016, 40(11): E241-e252. DOI: 10.1111/aor.12777.

[20] Bai J, Liu Y, Jin J, *et al.* Mid-term results of *in situ* fenestration stented with balloon-expandable bare metal stents during thoracic endovascular aortic repair[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2020, 95(6): 1163-1168. DOI: 10.1002/ccd.28743.

[21] Hongo N, Miyamoto S, Shuto R, *et al.* "Squid-capture" modified *in situ* stent — graft fenestration technique for aortic arch aneurysm repair[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2014, 37(4): 1093-1098. DOI: 10.1007/s00270-014-0933-y.

[22] Mulorz J, Knapsis A, Ertas N, *et al.* Gimme' the loop: modifications to the squid-capture technique for laser-fenestrated thoracic endografting[J]. *J Endovasc Ther*, 2021, 28(4): 524-529. DOI: 10.1177/15266028211007475.

[23] Xiong J, Guo W, Liu X, *et al.* Novel temporary endovascular shunt technique to assist *in situ* fenestration for endovascular reconstruction of the distal aortic arch[J]. *J Vasc Surg*, 2015, 62(1): 226-228. DOI: 10.1016/j.jvs.2013.12.030.