



电子、语音版

·综述·

椎动脉夹层动脉瘤血管内治疗的研究进展

赵天浩¹, 刘铭仁¹, 杜璨¹, 黄军^{1,2}

1. 中南大学湘雅医院神经外科, 湖南长沙 410008
2. 国家老年疾病临床医学研究中心(湘雅医院), 湖南长沙 410008

摘要:椎动脉夹层动脉瘤(VADA)为颅内最常见的动脉夹层病变,其破裂可引发致命性蛛网膜下腔出血,对患者生命构成严重威胁,是临床处置中极具复杂性与挑战性的疾病亚型之一。治疗策略的制定常受多重因素制约,涵盖椎动脉解剖变异、动脉瘤破裂状态及其与小脑后下动脉的解剖关系等核心要素。现阶段,临床主要干预手段包括开颅手术与血管内治疗两大类。随着血管内技术的迭代更新,特别是血流导向装置的持续革新,血管内治疗已逐步确立为VADA的重要治疗路径。其策略体系可归纳为解构性与重建性两类,前者通过阻断载瘤动脉或瘤腔以实现治疗目标;后者则借助支架辅助弹簧圈栓塞或血流导向装置植入,在维持血管通畅性的同时促进瘤体闭塞。近年来,血管内器械的升级与临床经验的累积持续推动VADA治疗策略的优化。该文系统综述VADA血管内治疗的最新研究进展及策略选择要点,旨在为临床治疗决策提供理论依据与实践参考。

关键词:椎动脉夹层动脉瘤;蛛网膜下腔出血;血管内治疗;血流导向装置;支架辅助弹簧圈栓塞;小脑后下动脉

中图分类号:R651.1

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2025.05.009

Research advances in endovascular treatment of vertebral artery dissecting aneurysm

ZHAO Tianhao¹, LIU Mingren¹, DU Can¹, HUANG Jun^{1,2}

1. Department of Neurosurgery, Xiangya Hospital of Central South University, Changsha, Hunan 410008, China

2. National Clinical Research Center for Geriatric Disorders (Xiangya Hospital), Changsha, Hunan 410008, China

Corresponding author: HUANG Jun, Email: 13508488502@163.com. DU Can, Email: can_du.md@csu.edu.cn

Abstract: Vertebral artery dissecting aneurysm (VADA) is the most common intracranial arterial dissection, and VADA rupture can cause fatal subarachnoid hemorrhage, thereby posing a serious threat to the life of patients. It has become one of the disease subtypes with extreme complexity and challenges. Development of treatment regimens is often limited by various factors including anatomical variation of vertebral artery, the status of aneurysm rupture, and the anatomical relationship between the aneurysm and the posterior inferior cerebellar artery. At present, the main clinical interventions include craniotomy and endovascular treatment. With the updates in endovascular techniques, especially the continuous innovation of flow diversion devices, endovascular treatment has gradually been established as an important treatment modality for VADA. The treatment strategies can be classified into deconstructive and reconstructive techniques; deconstructive strategies achieve treatment goals by blocking parent artery or aneurysm sac, whereas reconstructive strategies preserve luminal patency while facilitating aneurysm occlusion through stent-assisted coil embolization or placement of flow diversion devices. In recent years, the refinements of endovascular devices and the accumulation of clinical experience continue to promote the optimization of VADA treatment strategies. This article reviews the latest research advances in

基金项目:国家自然科学基金项目(82160554);国家老年疾病临床医学研究中心临床研究项目(2021LNJJ15);湖南省自然科学基金项目(2020JJ8051;2024JJ5618)。

收稿日期:2024-07-22;修回日期:2025-09-24

通信作者:黄军,中南大学湘雅医院神经外科教授、主任医师、博士研究生导师,研究方向为脑血管病与脑肿瘤的临床与基础研究,Email: 13508488502@163.com。

杜璨,中南大学湘雅医院神经外科主治医师、博士,研究方向为脑血管病的临床与基础研究,Email: can_du.md@csu.edu.cn。

endovascular treatment of VADA and the key points in the selection of treatment strategies, in order to provide a theoretical basis and practice reference for clinical decision-making.

Keywords: vertebral artery dissecting aneurysm; subarachnoid hemorrhage; endovascular treatment; flow diversion device; stent-assisted coil embolization; posterior inferior cerebellar artery

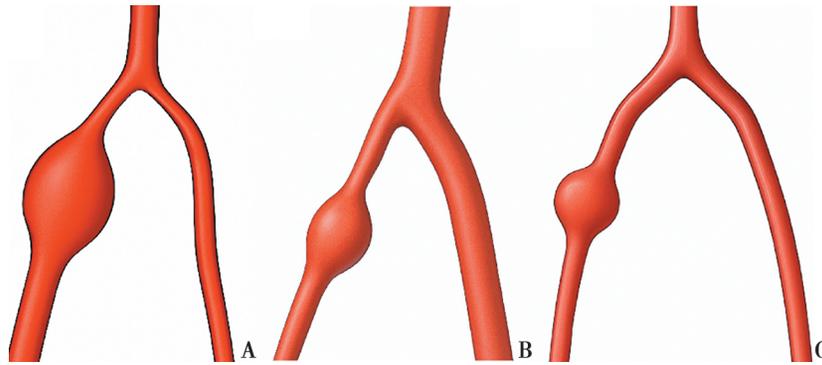
椎基底动脉系统的血管壁由内膜、中膜与外膜构成,与同管径的颅外血管相比,其壁厚较薄且缺如外弹力层,故椎动脉夹层动脉瘤(vertebral artery dissecting aneurysm, VADA)为颅内最常见的自发性夹层动脉瘤^[1]。VADA临床表现异质,可无症状,亦可出现局灶性头痛、后循环缺血或蛛网膜下腔出血(subarachnoid hemorrhage, SAH)等^[2]。当前手术策略主要包括显微外科开颅与血管内治疗。

在血管内技术问世前,显微外科开颅术曾是VADA的主要治疗手段。彼时,因其解剖位置深在、操作间隙狭窄且毗邻关键神经结构,该术式被视为最具挑战性的动脉瘤手术之一。随着血管内治疗的兴起、经验的积累及介入器械的革新,其疗效与安全性已获充分验证,血管内

治疗遂成为VADA的核心干预方式。然而,治疗时机的把握、不同血管内策略的优选及其疗效评估仍存在不确定性。本文拟就上述问题的研究现状与进展做一综述。

1 椎动脉解剖特点与VADA发生发展机制

椎动脉起自锁骨下动脉,沿其走行上行至椎-基底动脉汇合处,传统解剖学将其划分为4段:V1(椎外段)、V2(椎骨段)、V3(寰椎段)及V4(颅内段)。其中,V4段经枕骨大孔入颅,与对侧同名动脉汇合成基底动脉,主要承担脑干、小脑及枕叶等关键结构的血供^[3]。依据管径差异,椎动脉可区分为优势侧与非优势侧。优势侧定义为单侧管径较对侧增粗 $\geq 0.3\text{ mm}$,或两侧管径近似但一侧与基底动脉的延续更为平直^[4]。图1示意了优势侧、非优势侧及双侧管径均衡状态下椎动脉瘤的发生模式。



A:优势侧椎动脉瘤;B:非优势侧椎动脉瘤;C:两侧直径均等椎动脉瘤。

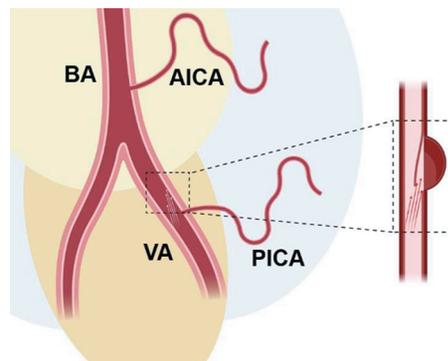
图1 椎动脉瘤发生模式

VADA的形成机制为动脉壁层间剥离,血液侵入内膜与中膜或中膜与外膜之间,致管壁局部膨出,呈瘤样扩张(图2)。迄今,VADA的确切病因尚未完全阐明,现有研究提示其系先天性因素与后天性因素协同作用的结果。前者主要涉及遗传易感性及血管壁发育异常;后者则多与头颈部外伤或过度活动等相关。若夹层病变持续进展,可因瘤体破裂引发SAH,或因管腔狭窄导致后循环缺血^[5]。

2 VADA临床评估

2.1 破裂VADA

破裂与未破裂的VADA在治疗策略上存在显著差异。破裂的VADA患者病情凶险,在短期内有较高的再出血风险^[6]。Yamada等^[7]的研究结果显示58.3%(14/24)的VADA患者再次出血,其中92.9%(13/14)的再出血事件发生在首次出血的24 h内。研究结果指出经历再出血



BA:基底动脉;AICA:小脑前下动脉;VA:椎动脉;PICA:小脑后下动脉。

图2 VADA发生机制

事件的VADA患者预后不佳并且病死率较高^[7]。因此,早期手术干预对于破裂性VADA至关重要。

2.2 未破裂VADA

未破裂VADA通常具有良好的自然病程,医生可结合患者的临床症状及动脉瘤形态特征制定治疗方案。未破裂VADA的临床表现常缺乏特异性,最常见症状为头痛和头晕,也可表现为短暂性不适、肢体无力或步态不稳等,有部分患者亦无明显临床症状。Liu等^[8]的研究结果表明约12.9%的VADA患者曾因脑缺血症状就诊。

有学者对182例有症状未破裂的VADA患者开展了定期随访(中位随访时间47个月),至末次随访时无1例发生动脉瘤破裂^[9]。另外一项对113例无出血或缺血事件发生VADA患者的随访研究(平均随访期为2.9年)结果显示,80.5%的患者影像学未显示出明显的形态学变化,仅有4.4%的患者动脉瘤大小有所增加^[10]。这表明在未破裂VADA病例中,通常无需紧急手术干预。最近的一项研究^[11]结果显示,既往服用阿司匹林可能是动脉瘤破裂的保护性因素,可能与其抗炎作用有关,服用大于1年的患者保护作用更为显著。因此,药物治疗和定期随访观察可能是治疗未破裂VADA的合理策略之一。

未破裂VADA的形态学与影像学特征有助于临床医生识别具有较高破裂或生长风险的动脉瘤,从而为早期手术干预提供依据。通过比较117例破裂和未破裂VADA的影像特征发现梭形动脉瘤、动脉瘤表面不规则、累及小脑后下动脉(posterior inferior cerebellar artery,

PICA)以及延迟增强(静脉期内动脉瘤内可见造影剂滞留)与动脉瘤破裂相关^[12]。Han等^[13]分析了249例VADA患者的影像特征(218例未破裂VADA,31例破裂VADA),发现供血动脉近端和远端同时狭窄、累及PICA与VADA破裂相关,而VADA位于优势椎动脉与其破裂呈负相关。此外,椎动脉迂曲程度被认为与VADA继续生长风险呈正相关^[14]。以上研究表明,当未破裂VADA呈现出与动脉瘤破裂或生长相关的影像学特征时,采取手术治疗是更合理的治疗策略。

3 VADA血管内治疗方法

VADA血管内治疗主要分了解构性手术与重建性手术两类。解构法包括载瘤动脉闭塞(parent artery occlusion, PAO)或动脉瘤腔内闭塞(internal trapping, IT)。解构法治疗改变了原有血管解剖结构及血流动力学状态,重建法则通过血管内装置恢复自然的血管壁结构和生理血流。根据所使用装置的不同,重建法可进一步分为单支架置入、重叠支架置入、支架辅助弹簧圈栓塞(stent-assisted coiling, SAC)以及血流导向装置(flow diverter, FD)置入。在制定VADA治疗方案时,需综合考虑动脉瘤破裂状态、形态学特征、是否位于优势供血动脉以及与PICA解剖关系等因素,从而选择最合适的治疗策略^[15]。近年来,VADA血管内治疗不同手术方式疗效的临床研究结果对比见表1。

表1 VADA血管内治疗不同手术方案疗效的研究结果对比

作者(发表年份)	aSAH占比	手术方式	病例数量	并发症发生率	再治疗率	复发率	预后良好率
Liu, et al (2023) ^[8]	25/196	PAO	17	0	NS	NS	NS
		FD	24	12.5%	NS	NS	NS
		SAC/single stent	161	11.0%	NS	NS	NS
Catapano, et al (2022) ^[16]	54/91	PAO	47	2.0%	4%	NS	68.0%
		FD	29	7.0%	14%	NS	83.0%
		SAC	15	27.0%	40%	NS	67.0%
Kim, et al (2011) ^[17]	73/119	SAC	62	3.2%	NS	10.20%	NS
		IT/PAO	57	7.0%	NS	17.10%	NS
Aihara, et al (2018) ^[18]	93/100	IT	100	30.0%	NS	NS	54.0%
Malcolm, et al (2020) ^[19]	21/21	PAO	21	57.1%	4.76%	NS	61.9%
Zhao, et al (2014) ^[20]	57/97	SAC	113	0.9%	NS	7.22%	NS
Yeung, et al (2012) ^[21]	0/3	FD	3	0	0	0	100%
Oh, et al (2022) ^[22]	0/27	FD	27	7.7%	29.6%	29.6%	96.2%
Lu, et al (2023) ^[23]	0/16	FD	16	0	0	NS	100%
Li, et al (2022) ^[24]	0/67	FD	25	4.0%	NS	0	NS
		SAC/single stent	42	4.8%	NS	9.1%	NS
Zhang, et al (2022) ^[25]	13/13	FD	13	0	NS	NS	92.3%
Levitt, et al (2016) ^[26]	4/13	FD	13	0	NS	0	72.7%
Maus, et al (2018) ^[27]	14/14	FD	14	50.0%	NS	NS	NS
Han, et al (2025) ^[28]	0/75	FD	75	NS	NS	31.2%	98.7%

注:aSAH=动脉瘤性蛛网膜下腔破裂出血;aSAH占比=aSAH病例数/总病例数;SAC=支架辅助弹簧圈栓塞;IT=动脉瘤腔内闭塞;PAO=载瘤动脉闭塞;FD=血流导向装置;NS=Not specified(研究结果未明确说明)。

3.1 解构法

PAO是解构法中常用的治疗方式之一,可有效降低动脉瘤复发及再治疗的风险。对于位于非优势侧、未累及PICA且患侧血流可经对侧侧支循环充分代偿的VADA,闭塞其近端或远端椎动脉可能是适宜的治疗选择^[29-30]。一项研究结果显示,使用PAO治疗的47例非优势侧VADA患者中并发症发生率为2%(1/47),仅有1例患者发生再出血,再治疗率为4%^[16]。Liu等^[8]研究结果表明使用PAO治疗的VADA患者,达到了100%的治愈率且无再治疗病例。虽然重建法和PAO均取得了良好预后(86% vs 92%),但研究显示PAO的长期闭塞率更高(88% vs 81%)^[31]。此外,一项研究对比了接受重建法(62例)与解构法(57例)治疗的VADA患者的疗效,结果显示两组间动脉瘤复发率无差异^[17]。该研究还指出,VADA是否累及PICA可能是影响其复发的一个重要因素。

解构法存在术后延髓缺血的风险。既往研究显示延髓缺血事件发生率为38%~47%^[32-33]。术前评估VADA与PICA之间的解剖关系以及椎动脉颅内段穿通支的形态对于预防术后并发症的发生具有重要的临床意义。一项纳入100例接受IT治疗VADA患者的回顾性研究结果显示术后延髓梗死率为30%,可能与病变位置及闭塞长度相关^[18]。VADA与PICA的解剖关系是影响延髓梗死发生的重要因素。当VADA位于PICA远端时,术后延髓梗死发生率最低(约6%),而当VADA位于PICA近端、PICA与小脑前下动脉(anterior inferior cerebellar artery, AICA)共同起源于椎动脉同一部位或PICA起源于颅外段时,延髓梗死发生率最高(可达50%~53%)。此外,保护脊髓前动脉有助于降低延髓梗死的风险。类似地,有研究指出在PICA缺如的椎动脉中常存在更丰富的穿通血管,闭塞此类VADA可能会增加后循环缺血事件的发生风险^[34]。此外,有研究团队对VADA术后延髓梗死的危险因素进行分析,基于DSA结果将延髓穿通血管形态分为两类:终端型与纵向型。终端型穿通血管较短,且不与其他穿支相吻合;纵向型则沿延髓纵向走行,并可形成吻合血管网。终端型穿通血管在VADA术后更易发生闭塞或形成盲端,从而导致较高的延髓梗死风险^[33]。

在临床实践中,对于部分破裂VADA患者,若处理动脉瘤难以保留分支血管通畅,可能需要牺牲椎动脉的分支血管。一项研究结果显示在21例接受牺牲近端PICA治疗的破裂VADA患者中,57%(12/21)的患者发生了缺血性卒中,包括8例小脑卒中、1例延髓卒中以及3例小脑与延髓联合卒中,其中1例患者因缺血性卒中接受了枕下减压术^[19]。在术前Hunt-Hess评分 ≤ 3 分的患者中,71%的患者在随访中取得了良好预后。尽管手术相关卒中发生率较高,但患者总体仍可取得相对良好的预后。牺牲近端PICA以防止再破裂往往被视为VADA治疗的最终

手段,并且这项研究基于临床实际情况选择性地采取该策略以治疗动脉瘤,目前尚缺乏评估PICA闭塞安全性的标准化方法,仍需进一步研究。

综上所述,非优势侧椎动脉、侧支代偿良好的患者可以采用解构法,该治疗方法可以即刻消除再出血风险,但出现后循环缺血的风险较高。

3.2 重建法

当VADA位于优势供血侧、侧支循环代偿不足或需保留受累的PICA时,应优先选择血管重建术,以恢复椎动脉及其分支的正常血流,降低后循环缺血风险。目前,FD和SAC是VADA血管重建的常用方法。

3.2.1 SAC

SAC于2002年获美国食品药品监督管理局(FDA)批准应用于临床。该技术利用支架重建载瘤动脉,并结合弹簧圈栓塞动脉瘤腔,以期在实现动脉瘤闭塞的同时保持载瘤动脉通畅。Kim等^[17]对62例接受SAC治疗的VADA患者(包括28例破裂和34例未破裂病例)进行了回顾性分析。结果显示,术后再出血率为3.2%,复发率为10.2%,所有未破裂VADA患者在随访期间均保持了良好的神经功能状态。Sönmez等^[31]对205例接受重建法治疗的VADA患者进行了系统回顾,结果显示长期闭塞率高达81%,围手术期并发症发生率为4%,病死率为4%,复发率为5%,92%的患者具有良好的神经功能。一项多中心回顾性研究^[35]对608例接受SAC治疗的症状性未破裂VADA患者进行了分析,结果显示病死率为2.3%,预后良好率高达95.1%。与解构法相比,尽管解构法可实现较高的血管闭塞率,但在动脉瘤复发、再治疗和再出血方面与重建法相比并无差异。然而,解构法因需牺牲病变血管,可能导致较高的缺血性并发症风险。随着血管内治疗装置的不断进步,重建手术治疗的动脉瘤闭塞率有望持续提高^[8, 29-30]。

Zhao等^[20]分析了接受SAC治疗未破裂非囊性VADA的113例患者,其中58例接受单支架治疗,55例接受多支架辅助治疗,对94例患者进行了12~78个月的影像随访,发现10例动脉瘤复发,其中7例DSA复发和3例治疗后出血性复发。研究结果认为多支架治疗与动脉瘤复发相关,术后即刻栓塞程度和动脉瘤累及PICA等因素被确定为复发的风险因素。另一项多中心回顾性研究发现影响VADA患者SAC治疗后预后的因素包括术前脑缺血、糖尿病和围手术期并发症^[35]。

3.2.2 FD的使用

FD是一种通过高金属覆盖率减少动脉瘤内血流的血管内治疗装置,通过血流导向作用治愈颅内动脉瘤。自从2011年获得FDA批准第一款FD即Pipeline血流导向装置(pipeline embolization device, PED)用于治疗大型和巨型颅内动脉瘤以来,FD在治疗复杂颅内动脉瘤上取

得了显著进展。FD在后循环动脉瘤中的应用仍然存在争议,有研究指出FD在后循环颅内动脉瘤中的并发症和病死率高于前循环动脉瘤^[36]。然而,对后循环动脉瘤亚组的进一步分析显示,椎动脉瘤患者的良好神经功能预后率高于基底动脉中段和椎基底动脉交界处的动脉瘤,表明FD在椎动脉瘤中的应用相对安全,并且研究结果显示FD治疗夹层动脉瘤的治愈率最高^[37]。一项早期小规模研究中,FD治疗被应用于3例VADA患者,随访30个月后未报告复发、支架狭窄或分支血管闭塞的事件^[21]。另外一项纳入27例接受FD治疗的VADA患者的回顾性研究分析发现,仅2例患者出现缺血性并发症,大部分患者取得了长期良好的临床结果^[22]。Lu等^[23]的单中心回顾性分析结果显示,16例患者接受FD治疗后的随访阶段未发生与手术相关并发症并取得了良好的临床结局。这些研究为FD在VADA血管内治疗中应用提供了依据。随后,FD在VADA治疗上的应用逐渐增加。FD可能是治疗VADA的一种有发展潜力的治疗方式,尤其是在涉及重要分支血管和优势椎动脉的情况下,表现出长期良好的临床结果^[38-39]。

相比于SAC,FD在治疗VADA方面显示出更优的疗

效,动脉瘤闭塞率更高,并且复发率更低^[24,40]。Zhang等^[41]比较了FD和SAC治疗未破裂非囊性椎动脉瘤的效果,两种治疗方式在手术并发症、血管造影结果和良好临床预后率方面无差异,但FD治疗的椎动脉瘤闭塞率更高,这与上述研究结果一致。

另一项系统回顾比较了FD与SAC在治疗未破裂非囊性后循环动脉瘤的效果和安全性,结果显示两者的完全或近完全闭塞率无差异,FD的围手术期并发症率高于SAC,达到了18%,其中最常见并发症是脑梗死^[42]。然而,研究结果显示FD治疗后的严重并发症较少,两种治疗方式的最终良好神经功能率无明显差异^[42]。

Zhang等^[25]对存在壁内血肿的VADA患者在接受FD或SAC重建治疗后进行随访,发现FD相比于SAC更有利于降低VADA的壁内血肿大小,在SAC治疗组中,5例患者壁内血肿在术后继续生长,最终复发。并且发现FD治疗后患者mRs评分改善较SAC组更佳。这凸显了FD在治疗VADA的另一优势,即对于伴有壁内血肿VADA的治疗更为有效,并可以降低其复发可能。

血管内治疗VADA的不同手术方式优势与局限性对比见表2。

表2 血管内治疗VADA的不同手术方式优势与局限性对比

手术方式	最佳适用动脉瘤类型	优势	局限性
PAO	非优势侧,累及且无法保留PICA的VADA	彻底消除动脉瘤再出血风险,复发率低,治愈率高	牺牲载瘤动脉,后循环缺血风险高
IT	非优势侧,累及且无法保留PICA的VADA	完全孤立动脉瘤,杜绝血流进入,再通和复发风险极低,有效防止再出血	牺牲血管节段较长,后循环缺血风险高
SAC	优势侧未累及PICA的VADA	保留载瘤动脉,实现动脉瘤即刻闭塞	需双抗治疗,复发率相对较高
FD	优势侧累及PICA的VADA	实现血流重构,处理复杂形态VADA的能力强	需长期双抗,有迟发性分支闭塞风险

注:PAO=载瘤动脉闭塞;IT=动脉瘤腔内闭塞;SAC=支架辅助弹簧圈栓塞;FD=血流导向装置;PICA=小脑后下动脉;VADA=椎动脉夹层动脉瘤。

4 FD在VADA血管内治疗中的进展

4.1 FD对穿支血管的影响

在VADA治疗过程中,被FD覆盖的穿支血管术后是否通畅是一个被重点关注的焦点。Dai等^[43]在兔子的主动脉中植入单个、双个和多个FD,随访的血管成像显示,分支血管均保持通畅。Wu等^[44]通过软件分析了FD置入后,后循环动脉瘤的血流动力学的变化,发现分支血管中的血流不会完全被阻断,在某些情况下分支血管的血流速度可能会增加。这表明由于FD置入后分支闭塞率较低,不可避免的情况下可以覆盖后循环的分支和穿支血管以达到最优的治疗效果。

在覆盖分支血管的FD置入后,跨装置的血流压力梯度可能是决定分支通畅性的因素之一。一项多中心回顾性研究^[45]评估FD治疗后循环动脉瘤后分支覆盖与闭塞和缺血事件的相关性。研究结果表明具有代偿性侧支分支的血管(如椎动脉和大脑后动脉)的闭塞率高于PICA、AICA和小脑上动脉等后循环分支。类似的结果也出现

在FD治疗前循环动脉瘤后的分支血管变化中,当被FD覆盖时,眼动脉和后交通动脉的闭塞率较高,这可能是由于颈外动脉和大脑后动脉的丰富侧支循环。侧支循环降低了FD跨越的血流压力梯度,从而增加了近端分支血管闭塞的概率。侧支循环的存在也解释了分支血管闭塞及其不对应的临床症状。终末动脉如脉络膜前动脉或大脑中动脉的穿支,在FD覆盖后更有可能保持通畅,因为它们没有明显的侧支供应。

因VADA与PICA解剖关系最为密切,研究FD覆盖PICA后血管通畅性的研究最多。目前研究结果提示,FD覆盖PICA后,大部分患者PICA保持通畅。有研究报告了13例VADA患者接受了FD治疗(包括4例破裂VADA),在围手术期内未发生PICA供血区域的脑缺血事件^[26]。对FD治疗后的VADA患者的随访结果显示8例患者动脉瘤闭塞且PICA通畅,1例患者出现轻度支架内狭窄^[26]。Fu等^[46]对32例累及PICA的VADA患者进行回顾性分析,结果显示定期随访的30例中28例PICA通畅,2

例PICA闭塞归因于PAO,所有患者均取得了良好的结果,无新发神经功能缺损。选择合适尺寸的装置,FD释放后与血管壁贴壁良好,是确保覆盖PICA的开口而不损害血流的关键因素。

4.2 FD在破裂VADA中的应用

除需关注FD覆盖的穿支血管术后通畅性外,FD应用于破裂VADA的适用性、如何提升治疗效果并防治并发症,亦是FD临床应用中的重点问题。目前,对于FD应用于破裂VADA的经验有限,仅有少数病例报告可供参考^[16, 26, 47]。Catapano等^[16]在一项单中心研究中比较了FD和SAC治疗优势侧破裂椎动脉瘤的临床结果,FD组的并发症率为6.8%(2/29),再治疗率为13.8%(4/29),均低于SAC组的并发症率26.7%(4/15)和再治疗率40%(6/15)。Maus等^[27]对14例接受FD治疗的破裂VADA患者的回顾性研究结果显示术后7例患者立即获得了良好的闭塞结果。然而,7例患者在围手术期因广泛性SAH而死亡。在幸存的7例患者中,4例具有良好的临床预后(mRS≤2分),5例的mRS评分为3~4分,随访中所有动脉瘤均显示完全闭塞。Catapano等^[16]研究发现破裂VADA患者接受FD组治疗后的并发症率低于SAC组,但FD组的2例患者可能由于抗血小板治疗出现了出血并发症。最近的一项研究结果显示,在13例接受FD治疗的患者中,92.3%(12/13)的患者取得了良好的结果(mRS≤2分),并且研究者提出FD治疗后小型夹层动脉瘤通常会迅速消失,有利于降低SAH患者急性期再次破裂的风险^[48]。

关于FD是否适用于治疗破裂VADA的争论主要集中在以下问题上。首先,使用FD通常需要更严格的抗血小板治疗方案以减少术后缺血事件风险。然而,破裂VADA患者往往缺乏时间进行充分抗血小板治疗。其次,目前缺乏广泛认可的针对破裂VADA患者抗血小板治疗方案。此外,使用双重抗血小板药物后动脉瘤具有再出血的潜在风险。

为应对这些挑战,新一代FD PED-shield提供了一个有前景的解决方案。PED-shield是一种通过在支架表面构建一层3 nm厚的磷酸胆碱共价涂层,通过磷酸胆碱具有的高度生物相容性,最大限度地减少血小板的黏附与激活,从而实现抗血栓形成的目的。一项多中心临床研究结果显示PED-shield可安全用于治疗破裂颅内动脉瘤,并且具有患者仅需使用单一抗血小板药物的优势^[49]。此外,一项多中心回顾性分析^[50]评估了PED-shield在治疗破裂复杂动脉瘤(包括水泡样动脉瘤、夹层动脉瘤和梭形动脉瘤)中的疗效和安全性。17例患者接受了单支架治疗,16例患者接受了双支架治疗,仅有4例患者术后服用了阿司匹林,而其余患者遵循双重抗血小板治疗方案。术后随访中未报告任何缺血事件发生,术后3个月完全闭塞率达到了82.6%。在仅使用单一抗血小板药物的患者

中,无论是单一支架置入或者双支架置入,均未发生缺血并发症,这证实了PED-shield作为破裂复杂颅内动脉瘤的首选治疗方案的潜力。

有研究者在此基础上对围手术期抗血小板治疗方案进行优化。Chiu等^[51]报道了1例使用PED-shield治疗的破裂VADA患者,其抗血小板治疗方案采用阿司匹林联合静脉抗血小板药物阿昔单抗,以兼顾血栓预防与出血风险的平衡。

采用分期手术置入FD治疗破裂VADA是平衡出血风险和治疗效果的策略。

Li等^[52]在弹簧圈栓塞后分期置入FD。该研究纳入的20例患者在FD治疗后的随访期间均未出现出血或缺血性并发症,随访mRS评分均小于1分,显示出良好的临床预后。Matsukawa团队^[53]也报道了1例采用类似分期治疗方案处理VADA的患者,在急性期通过高分辨率血管壁磁共振定位破裂点,并行弹簧圈栓塞,随后于亚急性期置入FD。该病例最终实现了动脉瘤的完全闭塞,同时保持了PICA的通畅和载瘤动脉的重建。

4.3 影响FD在VADA中治疗效果的因素

尽管FD在VADA治疗上取得了一定突破,但仍有限制FD治疗效果的危险因素。最近一项研究对接受FD治疗的75例未破裂VADA患者(共计77个VADA)进行回顾性分析发现术后VADA复发患者占31.2%(24/77),术前动脉瘤载瘤动脉显著狭窄和小脑后下动脉受累可能是未破裂VADA在接受FD治疗后复发的危险因素^[28]。此外,较长的随访时间是预防动脉瘤复发的保护因素。作者认为,其原因可能在于随访期间FD未直接接触动脉壁区域的内皮化过程得到进一步改善;并且一旦FD治疗后实现动脉瘤完全闭塞,其复发风险显著降低。

5 总结与讨论

破裂VADA病程凶险,需及时进行外科干预。相反,未破裂VADA病程相对较温和,通过评估动脉瘤影像学特征可以帮助外科医生识别易破裂的VADA。其治疗策略包括解构性和重建性方法,治疗方法的选择需综合考虑动脉瘤的破裂状态、形态特征、供血动脉的优势以及与PICA的解剖关系。在复杂形态的VADA处理中,FD在增加动脉瘤闭塞率和减少再治疗方面相对于SAC更具有优势。当优势侧椎动脉发生VADA破裂导致SAH并且动脉瘤累及PICA时,临床情境尤为棘手,新一代FD PED-shield的出现有望成为破裂复杂VADA的首选治疗方案,但仍需深入研究其安全性及疗效。

参 考 文 献

- [1] URASYANANDANA K, SONGSANG D, AURBOONYAWAT T, et al. Treatment outcomes in cerebral artery dissection and literature review[J]. Interv Neuroradiol, 2018, 24(3): 254-262.
- [2] ZEDDE M, PASCARELLA R. Intracranial vertebral artery

- dissection without hemorrhagic presentation[J]. *Neurol Sci*, 2025, 46(9): 4667-4678.
- [3] GAILLOUD P. The segmentation of the vertebral artery: an ambiguous anatomical concept[J]. *Interv Neuroradiol*, 2022, 28(6): 765-772.
- [4] HONG JM, CHUNG CS, BANG OY, et al. Vertebral artery dominance contributes to basilar artery curvature and perivertebral junctional infarcts[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2009, 80(10): 1087-1092.
- [5] WU ZB, ZHOU MH, MAALIM AA, et al. LEO or LEO baby within enterprise overlapping stents combined with coil embolization treatment for ruptured vertebrobasilar artery dissecting aneurysms[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 25153.
- [6] OTAKI Y, NAGANO T, SAITO F, et al. Ruptured vertebral artery dissection treated with endovascular intervention[J]. *World Neurosurg*, 2024, 189: e162-e167.
- [7] YAMADA M, KITAHARA T, KURATA A, et al. Intracranial vertebral artery dissection with subarachnoid hemorrhage: clinical characteristics and outcomes in conservatively treated patients[J]. *J Neurosurg*, 2004, 101(1): 25-30.
- [8] LIU PX, LI ZZ, HU LX, et al. Clinical characteristics, endovascular choices, and surgical outcomes of intracranial vertebral artery dissecting aneurysms: a consecutive series of 196 patients[J]. *J Neurosurg*, 2023, 138(1): 215-222.
- [9] AHN SS, KIM BM, SUH SH, et al. Spontaneous symptomatic intracranial vertebrobasilar dissection: initial and follow-up imaging findings[J]. *Radiology*, 2012, 264(1): 196-202.
- [10] KOBAYASHI N, MURAYAMA Y, YUKI I, et al. Natural course of dissecting vertebrobasilar artery aneurysms without stroke[J]. *Am J Neuroradiol*, 2014, 35(7): 1371-1375.
- [11] 杨倩, 李军荣, 张雪梅, 等. 阿司匹林与颅内动脉瘤破裂的相关研究[J]. *国际神经病学神经外科学杂志*, 2023, 50(6): 24-28.
- [12] LEE HJ, CHOI JH, LEE KS, et al. Clinical and radiological risk factors for rupture of vertebral artery dissecting aneurysm: significance of the stagnation sign[J]. *J Neurosurg*, 2022, 137(2): 329-334.
- [13] HAN JL, CHEN JG, TONG X, et al. Morphological characteristics associated with ruptured intracranial vertebral artery dissecting aneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2023, 15(4): 321-324.
- [14] PARK JY, HA SH, JEONG S, et al. Association between vertebral arterial tortuosity and aneurysm growth in intracranial vertebral artery dissection[J]. *J Clin Neurol*, 2024, 20(6): 617-623.
- [15] DUANGPRASERT G, NOIPHITHAK R, SUKHOR S, et al. Efficacy and predicting factors of multimodal treatment for ruptured intracranial vertebral artery dissecting aneurysms[J]. *Neurosurg Rev*, 2023, 46(1): 321.
- [16] CATAPANO JS, DUCRUET AF, CADIGAN MS, et al. Endovascular treatment of vertebral artery dissecting aneurysms : a 20-year institutional experience[J]. *J Neurointerv Surg*, 2022, 14(3): 257-261.
- [17] KIM BM, SHIN YS, KIM SH, et al. Incidence and risk factors of recurrence after endovascular treatment of intracranial vertebrobasilar dissecting aneurysms[J]. *Stroke*, 2011, 42(9): 2425-2430.
- [18] AIHARA M, NAITO I, SHIMIZU T, et al. Predictive factors of medullary infarction after endovascular internal trapping using coils for vertebral artery dissecting aneurysms[J]. *J Neurosurg*, 2018, 129(1): 107-113.
- [19] MALCOLM JG, GROSSBERG JA, LAXPATI NG, et al. Endovascular sacrifice of the proximal posterior inferior cerebellar artery for treatment of ruptured intracranial aneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12(8): 777-782.
- [20] ZHAO KJ, ZHAO R, HUANG QH, et al. The interaction between stent(s) implantation, PICA involvement, and immediate occlusion degree affect symptomatic intracranial spontaneous vertebral artery dissection aneurysm (sis-VADA) recurrence after reconstructive treatment with stent(s)-assisted coiling[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(9): 2088-2096.
- [21] YEUNG TW, LAI V, LAU HY, et al. Long-term outcome of endovascular reconstruction with the pipeline embolization device in the management of unruptured dissecting aneurysms of the intracranial vertebral artery[J]. *J Neurosurg*, 2012, 116(4): 882-887.
- [22] OH HS, BAE JW, HONG CE, et al. Flow diverter in unruptured intracranial vertebral artery dissecting aneurysm[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 912863.
- [23] LU XY, ZHANG YS, ZHOU H, et al. Flow diverters in the treatment of unruptured vertebral artery dissecting aneurysm: a single-center experience[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1050619.
- [24] LI L, XU GQ, GAO HL, et al. Endovascular treatment of intracranial vertebral artery unruptured dissecting aneurysms: comparison of flow diversion and stent-assisted coiling or stenting alone[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 919866.
- [25] ZHANG YS, PENG QC, ZHOU YY, et al. Outcomes of reconstructive endovascular treatment of vertebrobasilar dissecting aneurysms with intramural hematoma[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 914878.
- [26] LEVITT MR, PARK MS, ALBUQUERQUE FC, et al. Posterior inferior cerebellar artery patency after flow-diverting stent treatment[J]. *Am J Neuroradiol*, 2016, 37(3): 487-489.
- [27] MAUS V, MPOTSARIS A, DORN F, et al. The use of flow diverter in ruptured, dissecting intracranial aneurysms of the posterior circulation[J]. *World Neurosurg*, 2018, 111: e424-e433.
- [28] HAN JL, LI XB, NIU H, et al. Risk factors for the persistence of unruptured intracranial vertebral artery dissecting aneurysms treated with flow diverters[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 13677.
- [29] URASYANANDANA K, WITHAYASUK P, SONGSAENG D, et al. Ruptured intracranial vertebral artery dissecting aneurysms: an evaluation of prognostic factors of treatment outcome[J]. *Interv Neuroradiol*, 2017, 23(3): 240-248.

- [30] SCHOB S, BECHER A, BHOGAL P, et al. Segment occlusion vs. reconstruction-a single center experience with endovascular strategies for ruptured vertebrobasilar dissecting aneurysms[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 207.
- [31] SÖNMEZ Ö, BRINJKI W, MURAD MH, et al. Deconstructive and reconstructive techniques in treatment of vertebrobasilar dissecting aneurysms: a systematic review and meta-analysis[J]. *Am J Neuroradiol*, 2015, 36(7): 1293-1298.
- [32] IKEDA H, IMAMURA H, MINEHARU Y, et al. Effect of coil packing proximal to the dilated segment on postoperative medullary infarction and prognosis following internal trapping for ruptured vertebral artery dissection[J]. *Interv Neuroradiol*, 2016, 22(1): 67-75.
- [33] ENDO H, TANOUE S, HIRAMATSU M, et al. Risk factors for medullary infarction after endovascular trapping of vertebral artery dissecting aneurysms[J]. *Neurosurg Rev*, 2021, 44(4): 2283-2290.
- [34] TANOUE S, ENDO H, HIRAMATSU M, et al. Delineability and anatomical variations of perforating arteries from normal vertebral artery on 3D DSA: implications for endovascular treatment of dissecting aneurysms[J]. *Neuroradiology*, 2021, 63(4): 609-617.
- [35] ZHAO KJ, ZHAO R, YANG XJ, et al. Predictors of unfavorable outcome in stent-assisted coiling for symptomatic unruptured intracranial spontaneous vertebral artery dissecting aneurysms (uis-VADAs): results from a multicenter study[J]. *J Neurointerv Surg*, 2022, 14(10): 1008-1013.
- [36] KALLMES DF, HANEL R, LOPES D, et al. International retrospective study of the pipeline embolization device: a multicenter aneurysm treatment study[J]. *Am J Neuroradiol*, 2015, 36(1): 108-115.
- [37] GRIESSENAUER CJ, OGILVY CS, ADEEB N, et al. Pipeline embolization of posterior circulation aneurysms: a multicenter study of 131 aneurysms[J]. *J Neurosurg*, 2019, 130(3): 923-935.
- [38] NATARAJAN SK, LIN N, SONIG A, et al. The safety of pipeline flow diversion in fusiform vertebrobasilar aneurysms: a consecutive case series with longer-term follow-up from a single US center[J]. *J Neurosurg*, 2016, 125(1): 111-119.
- [39] FISCHER S, PEREZ MA, KURRE W, et al. Pipeline embolization device for the treatment of intra- and extracranial fusiform and dissecting aneurysms: initial experience and long-term follow-up[J]. *Neurosurgery*, 2014, 75(4): 364-374; discussion 374.
- [40] OH HS, BAE JW, HONG CE, et al. Stent-assisted coil embolization versus flow-diverting stent in unruptured vertebral artery dissecting aneurysms: efficacy and safety comparison[J]. *Neurosurgery*, 2023, 93(1): 120-127.
- [41] ZHANG YP, LIANG F, ZHANG YX, et al. Exploring the feasibility of pipeline embolization device compared with stent-assisted coiling to treat non-saccular, unruptured, intradural vertebral artery aneurysms[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 275.
- [42] DOMINGO RA, TRIPATHI S, PEREZ-VEGA C, et al. Treatment of posterior circulation non-saccular aneurysms with flow diversion versus stent-assisted coiling: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Neurointerv Surg*, 2021, 13(2): 159-163.
- [43] DAI D, DING YH, KADIRVEL R, et al. Patency of branches after coverage with multiple telescoping flow-diverter devices: an *in vivo* study in rabbits[J]. *Am J Neuroradiol*, 2012, 33(1): 171-174.
- [44] WU XZ, TIAN ZB, LIU J, et al. Patency of posterior circulation branches covered by flow diverter device: a hemodynamic study[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 658.
- [45] ADEEB N, GRIESSENAUER CJ, DMYTRIY AA, et al. Risk of branch occlusion and ischemic complications with the pipeline embolization device in the treatment of posterior circulation aneurysms[J]. *Am J Neuroradiol*, 2018, 39(7): 1303-1309.
- [46] FU WQ, GE HJ, LUO G, et al. Treatment of unruptured vertebral artery aneurysm involving posterior inferior cerebellar artery with pipeline embolization device[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 622457.
- [47] CEREJO R, BAIN M, MOORE N, et al. Flow diverter treatment of intracranial vertebral artery dissecting pseudoaneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2017, 9(11): 1064-1068.
- [48] DUANGPRASERT G, SUKHOR S, RATANAVINITKUL W, et al. Evaluation of flow diverter use in acutely ruptured vertebral artery dissecting aneurysms: a focus on safety and efficacy for rapid aneurysm obliteration[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2024, 242: 108345.
- [49] MANNING NW, CHEUNG A, PHILLIPS TJ, et al. Pipeline shield with single antiplatelet therapy in aneurysmal subarachnoid haemorrhage: multicentre experience[J]. *J Neurointerv Surg*, 2019, 11(7): 694-698.
- [50] BOUNAJEM MT, JOYCE E, SCOVILLE JP, et al. Safety and efficacy of the pipeline flex embolization device with shield technology for the acute treatment of ruptured internal carotid artery pseudoaneurysms: a multi-institution case series[J]. *Neurosurg Focus*, 2023, 54(5): E4.
- [51] CHIU AHY, RAMESH R, WENDEROTH J, et al. Use of aspirin as sole oral antiplatelet therapy in acute flow diversion for ruptured dissecting aneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2017, 9(5): e18.
- [52] LI YZ, FAN F, CHEN Z, et al. Safety and efficacy of staged coiling followed by flow diverter in the treatment of ruptured intracranial aneurysms[J]. *Neurosurg Rev*, 2025, 48(1): 37.
- [53] MATSUKAWA S, ISHII A, FUSHIMI Y, et al. Ruptured thrombosed vertebral artery dissecting aneurysm treated with staged flow diverter after prediction of the rupture point by vessel wall MRI[J]. *Neuroradiol J*, 2024, 37(6): 772-775.

责任编辑:王荣兵