

# Advances in Endovascular Treatment of Intracranial Aneurysms

Yuanzhen Ma Jiwei Zhang\* Yang Liu

Affiliated Hospital of Chengde Medical College, Chengde, Hebei, 067000, China

## Abstract

Intracranial aneurysms are cerebrovascular protrusions caused by localized abnormal vascular changes. Their rupture results in subarachnoid hemorrhage and intracerebral hematomas associated with high morbidity and mortality rates, posing a severe and long-standing challenge in neurosurgery. According to epidemiological data, the annual rupture rate of unruptured intracranial aneurysms is approximately 1%, and the risk of rupture increases exponentially with increasing aneurysm diameter and a patient history of SAH. Over the past three decades, the management of IAs has transitioned from surgical clipping to endovascular treatment. Recently research has focused on stent manufacturing technologies, such as laser-cut stents, braided stents, flow diverters, and intrasaccular flow disruption devices, as well as stent and coating materials. This study reviews recent developments in the endovascular treatment of intracranial aneurysms to provide a reference for clinical practice.

## Keywords

Intracranial aneurysms; Endovascular treatment; Stent-assisted coiling; Flow diverters; Intrasaccular flow disruption.

## 颅内动脉瘤血管内治疗方式进展

马远贞 张继伟\* 刘洋

承德医学院附属医院, 中国·河北承德 067000

## 摘要

颅内动脉瘤是由于局部血管异常改变所引起的脑血管瘤样凸起, 其破裂会引发蛛网膜下腔出血及具有高致残、高致死率的脑内血肿, 是神经外科领域长期以来的严峻挑战。根据流行病学数据显示, 颅内未破裂动脉瘤的年破裂率约为1%, 且随着动脉瘤直径的增加、患者存在SAH病史, 其破裂风险均呈指数级升高。近三十年来, 颅内动脉瘤的治疗方式经历了从开颅夹闭到血管内治疗的变革, 近年来又围绕支架制造工艺如雕刻支架、编织支架、血流导向装置、瘤内扰流装置, 支架与涂层材料进行深入探索。本研究针对颅内动脉瘤血管内治疗的研究的近年发展进行综述, 以此为临床治疗提供参考。

## 关键词

颅内动脉瘤; 血管内治疗; 支架辅助弹簧圈栓塞术; 血流导向装置; 瘤内扰流

## 1 引言

颅内动脉瘤 (IAs) 是由于先天发育异常或后天损伤等因素导致血管壁细胞增殖和局部血管异常扩张改变所引起的脑血管瘤样凸起, 是一种常见的脑血管病, 其破裂所引发的急性蛛网膜下腔出血 (aSAH) 就诊前死亡率约为12~15%, 在中国、欧洲地区、澳大利亚的28天累积病死率分别为16.9%、20%~38%、26.7%<sup>[1]</sup>。在幸存的患者中, 仍有一半以上遗留有永久性神经功能障碍, 其高致死致残率是神经外科领域长期以来的严峻挑战。流行病学统计显示, 成

年人颅内未破裂动脉瘤 (UIA) 的患病率为2%~3.2%, 年破裂率约为1%。随着动脉瘤直径增加、既往存在aSAH病史、发病部位等因素, 破裂风险呈指数级上升。国际未破裂颅内动脉瘤研究 (ISUIA) 的一期和二期研究指出, 前循环直径小于7mm的UIA的5年累积破裂率小于1.5%, 但位于后循环且直径大于10mm的动脉瘤的破裂风险显著增高<sup>[2,3]</sup>, 这证实了其治疗的必要性。过去三十年, 国际蛛网膜下腔动脉瘤试验 (ISAT) 指出, 血管内治疗组可获得相较于开颅夹闭术降低约7.4%绝对风险的收益, 且癫痫风险也有所降低, 其10年随访结果显示虽然其复发率略高且5年后生存优势有所减小, 其创伤较小、早期致残率较低的优势确立了其一线治疗地位<sup>[4,5]</sup>。研究指出, 早期的裸弹簧圈栓塞术在宽颈动脉瘤治疗中仍有20%~30%的复发率, 而应用支架辅助弹簧圈栓塞术 (SAC) 可降低至10%~15%<sup>[6]</sup>, 这为积极行SAC治疗提供了理论依据。在直径大于25mm的巨大动脉瘤的治疗实践中, SAC仍有20%以上的复发率, 血流导向装置 (FD) 则通过更高的网孔密度进行血流导向、促进

【作者简介】马远贞 (1998—), 男, 中国辽宁沈阳人, 硕士, 医师, 从事神经外科专业神经介入治疗研究。

【通讯作者】张继伟 (1978—), 男, 满族, 中国河北承德人, 硕士, 主任医师, 从事神经外科专业神经介入治疗研究。

瘤内血栓形成及内皮化以修复血管壁,使其5年完全闭塞率提高至95.2%<sup>[7]</sup>。本文旨在对颅内动脉瘤血管内治疗技术演进、器械革新进行系统综述,以期临床决策提供参考。

## 2 支架辅助弹簧圈栓塞术

在载瘤动脉置入支架的SAC相较于早期的单纯弹簧圈栓塞治疗已取得十分明确的疗效优势,这是由于支架能对填塞的弹簧圈予以更可靠、更充分的支撑,获得更高的填塞密度,因此动脉瘤复发率明显降低,同时对宽颈动脉瘤治疗中弹簧圈植入载瘤动脉的并发症具有较好的预防作用,总体疗效及安全性均较好。近年来,利用不同支架特性改变局部血管内血流、促进内皮化以提高疗效已经成为新的研究热点。临床应用的支架可划分为激光雕刻与编织型两类,二者因制造工艺的不同而有明确的疗效差异,激光雕刻支架的金属覆盖率一般为5%~10%,网孔密度约为0.28 pores/mm<sup>2</sup>。因编织工艺的特性,与之明显不同的是,编织型支架的金属覆盖率为11%~16%,网孔密度为0.78 pores/mm<sup>2</sup>,而LVIS EVO的金属覆盖率已达28%。较高的金属覆盖率及网孔密度赋予了编织支架一定的血流导向作用<sup>[8,9]</sup>。2021年的研究指出,编织支架组5.52%的复发率低于激光雕刻支架组的6.87%,且其在长期随访结果中体现出更高的内皮化及血管壁修复效果,具备远期愈合的优良特性<sup>[9]</sup>。2024年针对LEO Baby支架进行的研究指出,其术中即刻造影的Raymond I级闭塞率为30.8%,随访时完全闭塞率已达82.4%,复发率为2.9%,此结果支持了其具有较好的远期疗效<sup>[10]</sup>。2023年的一项队列研究显示,激光雕刻支架的部署成功率可达99%,明显优于编织支架组的94%,二者具有显著差异。编织支架组的围术期颅内出血率6%较激光雕刻组的1%显著增高( $p=0.0142$ )<sup>[11]</sup>。相关讨论分析指出,其原因可能在于编织结构摩擦阻力较大,释放过程中更易发生轴向短缩,在术者调整时因而更有可能造成内皮损伤。但同时也是基于编织支架轴向短缩时会产生局部径向膨胀的特性,术者得以在跨越瘤颈时主动推送微导管,使支架中段向瘤内膨出形成灯笼样结构,由此对弹簧圈予以更好的支撑,更严密地覆盖瘤颈,同时保护分支动脉。局部因短缩而增高的金属覆盖率也为血栓远期内皮化提供了理想的基底,其疗效得到了进一步提升。该技术为分叉部宽颈动脉瘤提供了一种更安全、更有效的单支架治疗方案,在简化既往复杂的双支架方案的同时兼顾了对分支动脉的保护,也能够达到以更高的填塞密度致密填塞动脉瘤的治疗目标。这为临床治疗研究提供了新的方向。

## 3 血流导向装置与表面改性技术

FD通过30%~35%以上高金属覆盖率的致密网孔阻挡并分散瘤颈局部的血液冲击并导向载瘤动脉远端的方式,使瘤内血液流速与局部壁剪切力(WSS)显著降低,产生血流滞止引起瘤内血栓形成并促进其内皮化加速瘤颈愈合。相

较于SAC,应用FD治疗巨大动脉瘤或梭形动脉瘤可显著降低其复发风险。但其较高的金属覆盖率也具有更高的支架内血栓形成风险,需进行长期双重抗血小板治疗。近年来,应用表面改性技术降低其致栓性已成为其新的研究热点。

Pipeline Shield通过应用合成磷酸胆碱聚合物涂层模拟细胞膜表面结构以降低其局部致栓性。2018年一项研究证实,相较于裸金属支架FRED,该涂层显著降低了凝血酶-抗凝血酶复合物的生成量<sup>[12]</sup>。且PFLEX研究的1年随访结果中,该设备在不增加支架内再狭窄的风险的前提下,具备81.8%的完全闭塞率,这证明该涂层在抑制支架内血栓形成的同时并未对正常的内皮化疗效产生影响<sup>[13]</sup>。新一代p64与p48支架则选用添加亲水涂层的方案来抑制支架内血栓的形成。COATING研究通过对比使用亲水涂层支架叠加单抗血小板治疗及使用裸金属FD叠加双抗血小板治疗的安全性及疗效进行了对照研究,其术后1个月的结果显示两组在安全性终点上均无显著统计学差异<sup>[14]</sup>。以上两种表面改性抗栓方案均为使用FD治疗急性破裂动脉瘤或无法耐受双抗的患者时精简围术期抗血小板用药提供了方案选择及理论依据,拓宽了FD的使用适应症。

## 4 瘤内抗流装置

瘤内抗流装置(IFD)是采用植入扰流器通过囊内填塞或瘤颈封闭实现血流滞止的方案,主要针对解剖结构复杂的分叉部动脉瘤进行治疗,从而避免了在分叉部使用Y型支架重建可能引发穿支动脉覆盖缺血的风险。

第一类是以Woven EndoBridge(WEB)装置为代表的囊内填塞抗流方案,其由镍钛合金编织而成,2010年第一代WEB DL投入临床,WEB-IT试验指出,其5年随访充分闭塞率达87.2%,完全闭塞率为58.1%。术后30天的手术相关并发症率仅0.7%,且分支保护效果极好<sup>[15]</sup>。2020年其完成了从双层向单层的低剖面工艺迭代。随着新一代低剖面WEB-17的应用,一项2024年的研究分析指出其末次随访时的充分闭塞率已提升至91%(95%CI 86%~94%),完全闭塞率达69%<sup>[16]</sup>。WEB的另一大优势在于简化抗血小板治疗的可行性。CLARYS研究显示,由于其研究对象针对急性破裂动脉瘤,仅43%的患者术中接受了抗血小板药物,且30%的患者在术后继续给药。术后1年的再出血率为0%,且其术中及围术期的装置相关并发症率仅为3.3%,其中血栓事件极为罕见<sup>[17]</sup>。这证实了该装置在降低抗栓强度,减少出血风险的同时并不会增加其继发血栓的风险。其相关并发症多是由于装置位置问题所导致,分析称WEB装置的锚定过于依赖径向支撑力,以至于在血流冲击及瘤壁生物学重塑的持续作用下,装置易发生垂直塌陷并向瘤底移位,致使瘤颈处形成再通间隙<sup>[17]</sup>。因此,术前规划常常采取选择略大于瘤径的尺寸以对抗远期压缩、维持形态稳定。

第二类是以Contour装置为代表的瘤颈封闭技术,其采

用伞状、盘状结构锚定于瘤颈，减少对瘤底支撑的依赖，显著降低了操作中穿破瘤顶引发破裂的风险。且其具有一定自适应性，尺寸容错率较 WEB 更高。其可以重塑瘤内流场，降低约 67% 的平均流速及 87% 壁剪切力，从而形成稳定的血流滞止<sup>[18]</sup>。在临床应用中，Contour 的技术成功率高达 98%，随访有效闭塞率为 84.21% 至 93%，总体不良事件率为 4.7%，对比 WEB 均显示出其潜在治疗优势<sup>[19,20]</sup>。

## 5 结语

当前颅内动脉瘤血管内治疗方案的研究重点已从裸弹簧圈栓塞术转向对载瘤动脉血管壁进行血流动力学治疗。以上研究重点的变化体现在雕刻型、编织型支架与血流导向装置的工艺迭代，特别是表面改性涂层技术的应用，在显著提升宽颈、巨大及梭形动脉瘤的治疗有效性的同时，降低支架内栓塞等并发症发生风险，提高安全性；瘤内扰流装置则为此前因结构复杂难以设计手术方案的分支部病变提供了更安全有效的方案选择，且减少了长期使用双联抗血小板方案潜在的出血并发症风险。以上研究重点的转变可能在将来为颅内动脉瘤的血管内治疗带来更好的疗效。

## 参考文献

- [1] LIN R J, GUAN S, WANG J, et al. Mechanisms and interventions in aneurysmal subarachnoid hemorrhage: unraveling the role of inflammatory responses and cell death in early brain injury (review)[J]. *Molecular Medicine Reports*, 2025, 32(3): 1 ~ 8.
- [2] WIEBERS D O. Unruptured intracranial aneurysms: natural history, clinical outcome, and risks of surgical and endovascular treatment[J]. *Lancet*, London, England: 2003, 362(9378): 103 ~ 110.
- [3] Unruptured intracranial aneurysms—risk of rupture and risks of surgical intervention[J]. *New England Journal of Medicine*, 1998, 339(24): 1725 ~ 1733.
- [4] MOLYNEUX A. International subarachnoid aneurysm trial (ISAT) of neurosurgical clipping versus endovascular coiling in 2143 patients with ruptured intracranial aneurysms: a randomised trial[J]. *Lancet*, 2002, 360(9342): 1267 ~ 1274.
- [5] MOLYNEUX A J, KERR R S, YU L-M, et al. International subarachnoid aneurysm trial (ISAT) of neurosurgical clipping versus endovascular coiling in 2143 patients with ruptured intracranial aneurysms: a randomised comparison of effects on survival, dependency, seizures, rebleeding, subgroups, and aneurysm occlusion[J]. *Lancet*, 2005, 366(9488): 809 ~ 817.
- [6] CAGNAZZO F, CAPPUCCI M, LEFÈVRE P-H, et al. Treatment of intracranial aneurysms with self-expandable braided stents: a systematic review and meta-analysis[J]. *American Journal of Neuroradiology*, 2018, 39(11): 2064 ~ 2069.
- [7] DESHMUKH A S, PRIOLA S M, KATSANOS A H, et al. The management of intracranial aneurysms: current trends and future directions[J]. *Neurology International, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2024, 16(1): 74 ~ 94.
- [8] CHO S, JO W, JO Y, et al. Bench-top comparison of physical properties of 4 commercially-available self-expanding intracranial stents[J]. *Neurointervention*, 2017, 12(1): 31 ~ 39.
- [9] ZHANG L H, CHEN X H, DONG L G, et al. Clinical and angiographic outcomes after stent-assisted coiling of cerebral aneurysms with laser-cut and braided stents: a comparative analysis of the literatures[J]. *Frontiers in Neurology*, 2021, 12: 666481.
- [10] TANG H S, LU Z W, ZENG Z W, et al. Treatment of saccular wide-neck intracranial aneurysm using leo baby stent: a single-center experience based on 156 cases[J]. *Neurosurgical Review*, 2024, 48(1): 5.
- [11] ZHANG J, HE L, XIA X, et al. Braided stent-assisted coil embolization versus laser engraved stent-assisted coil embolization in patients with unruptured complex intracranial aneurysms[J]. *Clinics*, 2023, 78: 100202.
- [12] GIRDHAR G, ANDERSEN A, PANGERL E, et al. Thrombogenicity assessment of pipeline flex, pipeline shield, and FRED flow diverters in an in vitro human blood physiological flow loop model[J]. *Journal of Biomedical Materials Research, Part A*, 2018, 106(12): 3195 ~ 3202.
- [13] MARTÍNEZ-GALDÁMEZ M, LAMIN S M, LAGIOS K G, et al. Treatment of intracranial aneurysms using the pipeline flex embolization device with shield technology: angiographic and safety outcomes at 1-year follow-up[J]. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, 2019, 11(4): 396 ~ 399.
- [14] PIEROT L, EKER O F, HENKES H, et al. 1-month safety results in a randomized controlled trial (COATING) evaluating a surface-modification flow diverter (p64-MW-HPC) under single antiplatelet treatment[J]. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, 2025: jnis-2025-24306.
- [15] FIORELLA D, MOLYNEUX A, COON A, et al. Safety and effectiveness of the woven EndoBridge (WEB) system for the treatment of wide necked bifurcation aneurysms: final 5 year results of the pivotal WEB intra-saccular therapy study (WEB-IT)[J]. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, 2023, 15(12): 1175 ~ 1180.
- [16] GHOZY S, MOTAWEI A S, MOUSSALEM C, et al. Safety and efficacy of the woven endo-bridge-17 device for intracranial aneurysm treatment: a systematic review and meta-analysis[J]. *Interventional Neuroradiology*, 2024: 15910199231226294.
- [17] SPELLE L, HERBRETEAU D, CAROFF J, et al. Clinical assessment of WEB device in ruptured aneurysms (CLARYS): results of 1-month and 1-year assessment of rebleeding protection and clinical safety in a multicenter study[J]. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, 2022, 14(8): 807 ~ 814.

- [18] MÜLLER S J, KHADHRAOUI E, SCHWAB R, et al. A systematic review of the contour neurovascular system for the treatment of intracranial aneurysms[J]. *Neuroradiology Journal*, 2025: 19714009251336321.
- [19] GHOZY S, LASHIN B I, ELFIL M, et al. The safety and effectiveness of the contour neurovascular system for the treatment of wide-necked aneurysms: a systematic review and meta-analysis of early experience[J]. *Interventional Neuroradiology*, 2024, 30(4): 496 ~ 505.
- [20] GÜNKAN A, SCARCIA L, FERREIRA M Y, et al. Safety and efficacy of the contour neurovascular system for treating intracranial aneurysms: a systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Neurointerventional Surgery*, 2025, 18(1): 26 ~ 33.