

·神经介入 Neurointervention·

基于计算流体力学模拟脑血流流线的微导管塑形在颈内动脉-后交通动脉瘤介入治疗中的应用

许岗勤, 张 坤, 蔡栋阳, 杨博文, 赵同源, 薛绛宇, 李天晓

【摘要】 目的 探讨根据计算流体力学(CFD)模拟脑血流流线的动脉瘤栓塞微导管塑形方法在颈内动脉-后交通动脉瘤介入治疗中的应用,评价其有效性和安全性。**方法** 分析郑州大学人民医院 2020 年 1 月至 2021 年 12 月使用 CFD 模拟脑血流流线进行微导管塑形介入栓塞的颈内动脉-后交通动脉瘤 7 例的临床资料,分析微导管到位成功率、稳定性及动脉瘤栓塞效果。**结果** 7 例患者 7 枚颈内动脉-后交通动脉瘤,体外模型试验微导管均能顺利到位且稳定成功;微导管术中稳定、支撑力良好,无导管脱出等。术后即刻 6 枚动脉瘤完全栓塞,1 枚瘤颈少量残留。术中无栓塞导管操作相关并发症。**结论** 基于 CFD 模拟脑血流流线进行微导管塑形,导管塑形精准,到位成功率高,稳定、支撑力良好,大大降低了导管塑形难度,值得进一步研究探索。

【关键词】 动脉瘤介入栓塞; 颈内动脉瘤; 颈内动脉-后交通动脉瘤; 微导管塑形

中图分类号:R743 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2022)-07-0651-04

Application of microcatheter shaping technique based on CFD simulation of cerebral blood flow lines in interventional treatment of internal carotid-posterior communicating artery aneurysms XU Gangqin, ZHANG Kun, CAI Dongyang, YANG Bowen, ZHAO Tongyuan, XUE Jiangyu, LI Tianxiao. Cerebrovascular Division of Interventional Therapy Center, People's Hospital of Zhengzhou University; Cerebrovascular Disease Hospital of Henan Provincial People's Hospital; Henan Provincial Neurointerventional Engineering Research Center, Zhengzhou, Henan Province 450003, China

Corresponding author: LI Tianxiao, E-mail: dr.litianxiao@vip.163.com

【Abstract】 Objective To discuss the application of microcatheter shaping technique based on computational fluid dynamics(CFD) simulation of cerebral blood flow lines in interventional treatment of internal carotid artery-posterior communicating artery(ICA-PCoA) aneurysms and to evaluate its clinical effectiveness and safety. **Methods** The clinical data of 7 patients with ICA-PCoA aneurysm, who received interventional treatment by using microcatheter shaping technique based on CFD simulation of cerebral blood flow lines at the People's Hospital of Zhengzhou University of China between January 2020 and December 2021, were retrospectively analyzed. The catheterization success rate, the stability of microcatheter, and the effect of aneurysm embolization were evaluated. **Results** A total of 7 ICA-PCoA aneurysms were detected in the 7 patients. In vitro model testing, the microcatheter could be successfully placed in the correct site and kept in stable position. During operation, successful insertion of the microcatheter was achieved in all patients. The microcatheter tip was stable in place with satisfactory holding power, and no microcatheter prolapse occurred. Immediately after surgery, complete embolization of aneurysm was achieved in 6 patients, and small amount of residual neck was observed in another patient. No procedure-related complications occurred. **Conclusion** The microcatheter shaping technique based on CFD simulation of cerebral blood flow lines can accurately shape the catheter, the shaped-catheter can be smoothly inserted to the target site, and the microcatheter tip is stable in position with satisfactory holding power. This microcatheter shaping technique greatly reduces the

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2022.07.003

基金项目: 国家自然科学基金(81601583), 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC1300702)

作者单位: 450003 郑州大学人民医院脑血管介入治疗中心, 河南省人民医院脑血管病医院, 河南省脑血管病国际联合实验室

通信作者: 李天晓 E-mail: dr.litianxiao@vip.163.com

difficulty of shaping the catheter, which is worthy of further research and exploration. (J Intervent Radiol, 2022, 31: 651-654)

[Key words] interventional embolization of aneurysm; intracranial aneurysm; internal carotid artery-posterior communicating artery aneurysm; microcatheter shaping

颈内动脉-后交通动脉瘤约占颅内动脉瘤 25%^[1], 介入栓塞是重要治疗方式。微导管塑形是栓塞核心技术, 良好的微导管塑形有利于手术安全进行, 并获得满意的栓塞效果^[2]。由于颈内动脉颅内段走行迂曲、动脉瘤朝向各异、瘤颈常伴有后交通动脉, 常规行微导管“猪尾、C 形”塑形通常到位困难或到位后不稳定, 多需要进行复合弯曲塑形, 而且具体形状与手术医师个人经验密切相关, 年轻医师学习导管塑形周期较长。本研究利用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟后交通动脉瘤载瘤动脉及动脉瘤入瘤血流流线图, 根据主流线进行微导管塑形, 分析微导管到位情况及栓塞时稳定性, 以期探索一种新的导管塑形方式, 降低颈内动脉-后交通动脉瘤导管塑形技术难度, 提高手术安全性。

1 材料与方法

1.1 患者资料

7 例患者中男 4 例, 女 3 例, 年龄 (50±6) (38~79) 岁。共 7 枚颈内动脉-后交通动脉瘤, 均为未破裂囊性动脉瘤, 瘤颈均为窄颈或相对宽颈 (可行单纯栓塞, 减少因使用支架对栓塞导管产生影响, 影响结果判断), 动脉瘤平均大小 4.7 (2~8) mm。本研究经郑州大学人民医院伦理委员会审核通过, 患者或家属签署手术知情同意书。收集患者年龄、性别、基础病史等临床资料及影像学资料。

1.2 微导管塑形和介入治疗

7 例患者介入治疗前均接受全脑血管 DSA 造影, 载瘤动脉行 3D-DSA 检查, 明确动脉瘤位置、大小、朝向、形态及与载瘤动脉的关系, 并选择合理的工作角度等。建立 CFD 模型和血流流线模型; 患者 DSA 图像均由 Artiszee Biplane VC14 DSA 机 (Siemens, 德国) 采集为医学数字成像和通信 (DICOM) 格式导出, CFD 原始数据采集资料方式参考 Gao 等^[3]报道方法, 重建图像经 MeshLab (1.3.3 版) 软件修补和去除血管细小分支, 立体光刻 (STL) 格式导出至 Harpoon 软件 (4.3a 版) 进行 3D 网格化处理, Ansys 软件 (20.0 版) 设定出入口相关参数, 设定血液黏滞系数 μ 及血液密度 ρ 分别为 0.003 45 Pa 和 1 050 kg/m³,

入口速度根据测定的健康成人志愿者平均入口速度设为 0.32 m/s, 出口处压力设为 0 Pa。通过 Ensign 软件 (9.0 版) 对动脉瘤瘤腔和载瘤动脉管腔内 Velocity 血流动力学应力色阶量化, 模拟空间内血流流线, 保留主流线 3D 图像。根据 3D-DSA 数据 1:1 打印动脉瘤中空透明树脂模型, 并根据主流线进行微导管 (Headway 17) 塑形 (微导管头端长度: 微导管进入动脉瘤弯曲至动脉瘤瘤顶的 2/3 距离), 蒸汽熏蒸, 然后体外进行微导管到位试验。

患者全身麻醉后, 常规全身肝素化, 股动脉入路引入 6 F 指引导管 (血管迂曲患者使用中间导管), 置于同侧颈内动脉近颅底段。根据 3D-DSA 重建图像选取最佳工作角度, 微导管 (Headway 17) 头端根据脑血流主流线进行蒸汽熏蒸塑形, 微导丝配合下栓塞微导管超选入动脉瘤腔内——导丝将导管导引至颈内动脉眼段, 缓慢推送导管, 自行进入动脉瘤; 导丝将导管导引至动脉瘤远端, 回撤微导管, 导管弹入瘤腔; 导丝进入动脉瘤腔, 缓慢跟进导管并进入瘤腔。根据动脉瘤大小选择合适弹簧圈进行栓塞 (宽颈动脉瘤行支架辅助栓塞), 造影显示动脉瘤致密栓塞, 撤出栓塞导管。

1.3 术后随访

术后 3、6、12 个月随访, 改良 Rankin 量表 (mRS) 评分评估临床情况; 术后 6~12 个月复查 MRA 或 DSA, 观察动脉瘤闭合情况 (Raymond 栓塞分级: I 级为动脉瘤完全栓塞, II 级为瘤颈残留, III 级为动脉瘤部分栓塞)。

2 结果

7 枚后交通动脉瘤, 体外模型微导管试验中微导管均能顺利到位, 导管到位后推拉微导管头端可稳定于动脉瘤腔内不同位置, 头端指向良好。术中 6 例微导管经一次塑形顺利到位, 1 例因近端血管动脉硬化较重, 操作时间较长, 导管形态变化, 以主血流形态进行二次塑形, 导管顺利到位; 推送到位 5 例, 导丝引到远端后回撤到位 2 例; 栓塞过程中导管稳定, 无脱出, 均未使用辅助技术; 术后即刻动脉瘤完全栓塞 6 枚, 瘤颈残留 1 枚。无术中破裂出血等微导管操作相关并发症。所有患者均获得临床随

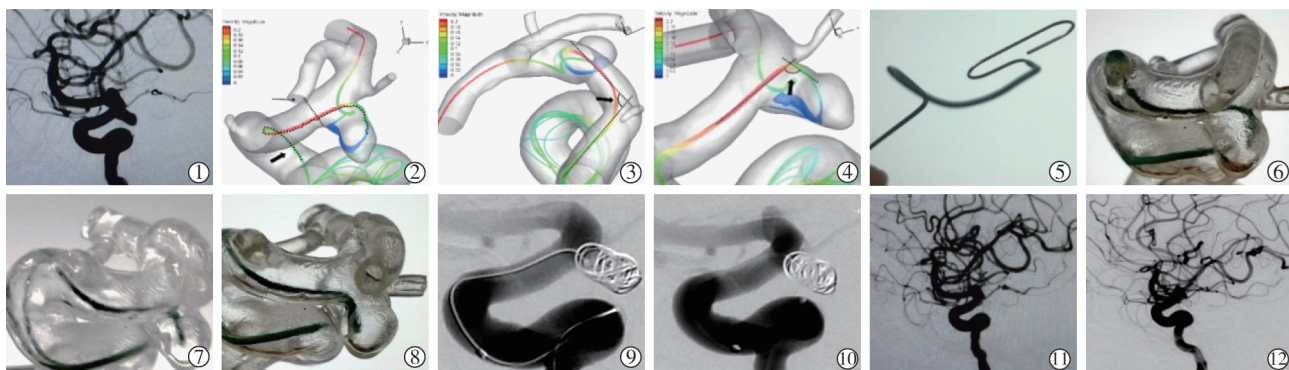
访 3~6 个月,7 例 mRS 评分均为 0 分;影像随访 5 例,4 例完全栓塞,1 例瘤颈残留。基于 CFD 模拟脑血流塑形微导管栓塞颈内动脉-后交通动脉瘤影像见图 1。

3 讨论

颈内动脉-后交通动脉瘤因其特殊的解剖学位置,容易生长甚至破裂出血,具有较高的致残致死率^[4]。随着介入技术及新型器材的出现,介入栓塞治疗效果和安全性不断提高,逐渐成为颅内动脉瘤主要治疗手段之一^[5-6]。动脉瘤栓塞微导管塑形是介入手术的核心技术,密切关系到手术效果和手术安全。颈内动脉虹吸段血管多走行迂曲,瘤颈处常有后交通动脉发出,动脉瘤大小、朝向和形态各异,因此术者需根据不同特点对微导管进行各种形状的塑形。传统微导管塑形主要是术者根据血管 3D 图像凭自身经验将微导管塑成大致形状,故带有较强的主观性,导管精准性较差^[7]。尤其是对于微导管到位困难的后交通动脉瘤,术中需反复多次尝试塑形,微导丝强行引导,从而导致反复操作、手术时间长,甚至引起灾难性后果。国内外学者为改变微导管塑形困难现状做出了诸多努力。Yamaguchi 等^[8]术中将直头导管引入载瘤动脉,头端置于动脉瘤附近并留置 5 min,依靠体温对微导管依据血管形态进行塑形,然后将微导管取出,再根据 3D 重建图像对微导管头端进入动脉瘤的最后一个弯曲进行蒸汽塑形,此方法减少术者塑形弯曲的数量,但头端弯曲仍需术者根据经验进行塑形,并没有改变塑形本质,反而增加了手术操作时间。部分学者将 3D 打印技术应用于微导管塑形,根据动脉瘤术前影像数

据 1:1 打印血管模型或剖面中空模型,体外依据 3D 模型血管形态进行微导管塑形,或利用计算机软件在血管 3D 图像内部人为设定微导管走行路线,然后 3D 打印微导管走行路线的形态模型,据此进行塑形等^[9-11]。这些技术可使术者更加直观地了解动脉瘤局部解剖结构,以便使动脉瘤栓塞导管塑形更加精准,然而微导管塑形的本质与传统方法一样,无法摆脱对术者丰富塑形经验的依赖。有学者 3D 打印 1:1 动脉瘤中空模型,将微导管导入模型内,头端置于动脉瘤内,然后整体置入 50℃热水中热塑形 5 min,将导管取出消毒后进行手术^[12]。此方法的塑形思路不同于传统方式,减少了对手术经验依赖,但其直头微导管沿大弯侧进入动脉瘤,存在较高张力,塑形后可能存在微导管头端调整困难、填塞时张力高等问题,而且术前需将手术微导管提前塑形并熏蒸消毒灭菌,耗时较长,术中微导管塑形后弹性回缩后无法及时再次塑形^[13],不适用于急诊手术及大规模推广。

血流动力学在颅内动脉瘤发生、发展及破裂过程中起十分重要作用,传统动脉瘤塑形方式完全依靠术者手术经验,未考虑与动脉瘤密切相关的血流动力学问题。本研究创新性提出依据 CFD 模拟脑血流流线进行微导管塑形方法:先利用 CFD 模拟脑血流流线,提取主血流流线 3D 图像,根据 3D 图像进行微导管塑形,其完全不同于传统导管塑形方式,摆脱了对术者手术经验的依赖,只需根据 3D 主流线图进行 1:1 塑形微导管(塑形后微导管形态)即可,方法简单,塑形精准,到位成功率高,支撑力好,大大降低微导管塑形难度,缩短手术时间,提高了手术成功率和手术安全性。本组患者术前体外模型



患者女,56岁,体检发现颅内动脉瘤入院:①工作位 DSA 造影示右颈内动脉-后交通动脉瘤(4.1 mm×3.7 mm),相对宽颈,瘤颈约 3.5 mm;②③④CFD 模拟主血流呈不同角度 3D 图形;⑤根据主血流 3D 图像 1:1 塑形 Headway 17 微导管;⑥⑦⑧动脉瘤模型微导管到位试验微导管到位顺利,推拉微导管,导管头端可稳定于瘤颈远心端、瘤颈中央及瘤颈近心端,微导管头端方向良好;⑨⑩术中填塞弹簧圈过程中微导管稳定,支撑力良好;⑪术后即刻造影示动脉瘤栓塞致密,载瘤动脉通畅;⑫术后 6 个月复查造影示动脉瘤愈合良好,载瘤动脉通畅

图 1 基于 CFD 模拟脑血流塑形微导管栓塞颈内动脉-后交通动脉瘤影像

试验验证了导管塑形的精准性,并提供了导管头端于瘤腔的位置信息,使得术中更加从容;术中微导管到位顺利,头端位置良好,填塞动脉瘤时导管头端指向良好、位置稳定,便于调整,手术时间大大缩短,安全性得以提升。

综上所述,依据 CFD 模拟脑血流流线进行微导管塑形是微导管塑形新思路,可降低微导管塑形难度,缩短手术时间,提高手术成功率和安全性。但是由于样本量较少,且仅对于颈内动脉-后交通动脉动脉瘤进行研究,需要大样本量研究数据及复杂病例进一步证实此思路的可行性和可靠性。

[参考文献]

- [1] Taweessomboonyat C, Tunthanathip T, Kaewborisutsakul A, et al. Outcome of ruptured posterior communicating artery aneurysm treatment comparing between clipping and coiling techniques[J]. World Neurosurg, 2019, 125: e183-e188.
- [2] Zhang GD, Liu YS, Liu YJ, et al. Safety and efficacy of complete versus near-complete coiling in treatment of intracranial aneurysms [J]. J Intervent Med, 2020, 3: 136-141.
- [3] Gao B, Baharoglu MI, Cohen AD, et al. Stent-assisted coiling of intracranial bifurcation aneurysms leads to immediate and delayed intracranial vascular angle remodeling[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2012, 33: 649-654.
- [4] Junior JR, Telles JPM, da Silva SA, et al. Epidemiological analysis of 1404 patients with intracranial aneurysm followed in a single Brazilian institution[J]. Surg Neurol Int, 2019, 10:249.
- [5] Golnari P, Nazari P, Garcia RM, et al. Volumes, outcomes, and complications after surgical versus endovascular treatment of aneurysms in the United States(1993-2015): continued evolution versus steady-state after more than 2 decades of practice[J]. J Neurosurg, 2020, 134: 848-861.
- [6] 章 杨,陈 力,顾 奕,等. 胚胎型大脑后动脉伴发型颈内动脉后交通动脉瘤血管内治疗——单中心经验[J]. 介入放射学杂志, 2020, 29:1067-1071.
- [7] Spottiswoode BS, van den Heever DJ, Chang Y, et al. Preoperative three-dimensional model creation of magnetic resonance brain images as a tool to assist neurosurgical planning[J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2013, 91: 162-169.
- [8] Yamaguchi S, Ito O, Koyanagi Y, et al. Microcatheter shaping using intravascular placement during intracranial aneurysm coiling[J]. Interv Neuroradiol, 2017, 23: 249-254.
- [9] 林之琪,宫海波,徐方远,等. 3D 打印技术在颅内动脉瘤栓塞术的应用[J]. 中华实验外科杂志, 2020, 37:615-617.
- [10] 刘 权,张绪新,李彦钊,等. 剖面 3D 打印技术辅助微导管塑形在颅内动脉瘤介入栓塞术中的应用[J]. 中华神经创伤外科电子杂志, 2019, 5:284-288.
- [11] 徐 超,王 波,李珍珠,等. 3D 打印模型辅助微导管塑形在颅内动脉瘤栓塞术中的应用[J]. 中华神经外科杂志, 2017, 33:367-369.
- [12] Xu Y, Tian W, Wei Z, et al. Microcatheter shaping using three-dimensional printed models for intracranial aneurysm coiling[J]. J Neurointerv Surg, 2020, 12: 308-310.
- [13] Kiyosue H, Hori Y, Matsumoto S, et al. Shapability, memory, and luminal changes in microcatheters after steam shaping: a comparison of 11 different microcatheters[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2005, 26:2610-2616.

(收稿日期:2022-06-09)

(本文编辑:边 倩)