

文章编号: 1004-7220(2023)03-0465-07

颈内动脉 Y 形分叉处双支架并联取栓术的有限元模拟

赵可佳¹, 蔡云寒², 颜文涛³, 王盛章^{1,2,4}

(1. 复旦大学 工程与应用技术研究院, 生物医学工程技术研究所, 上海 200433; 2. 复旦大学 航空航天系, 生物力学研究所, 上海 200433; 3. 上海市医疗器械检验研究院, 上海 201318; 4. 复旦大学义乌研究院, 浙江 义乌 322000)

摘要: **目的** 利用有限元方法模拟单、双支架在理想颈内动脉 Y 形分叉处血管取栓过程, 依据仿真结果分析取栓过程中支架-血栓-血管相互作用, 为改善分叉处支架取栓效果提供指导。 **方法** 利用 CAD 软件建立模型, 利用有限元分析软件模拟单、双支架取栓过程。 **结果** 单支架模型取栓失败, 双支架模型取栓成功, 并且取栓过程中血栓的最大应力是单支架的 2 倍, 最大应变是单支架的 1.12 倍, 血管壁表面的最大接触压强大约是单支架的 2 倍。 **结论** Solitaire 双支架能够有效防止分叉处血栓移位并且成功取出血栓, 但血栓中段应力水平较高存在断裂风险; 取栓过程中前动脉侧血管接触压强更大, 血管壁损伤风险更大。因此, 有必要优化取栓支架的设计以提高其柔顺性。

关键词: 颈内动脉分叉; 支架取栓器; 双支架取栓术; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.03.006

Finite Element Simulation of Double-Stent Parallel Thrombectomy at Y-Shaped Bifurcation of Internal Carotid Artery

ZHAO Kejia¹, CAI Yunhan², YAN Wentao³, WANG Shengzhang^{1,2,4}

(1. Institute of Biomedical Engineering Technology, Academy of Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Department of Aeronautics and Astronautics, Institute of Biomechanics, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. Shanghai Testing and Inspection Institute for Medical Device, Shanghai 201318, China; 4. Yiwu Research Institute, Fudan University, Yiwu 322000, Zhejiang, China)

Abstract: **Objective** To study the process of single stent and double-stent thrombectomy at Y-shaped bifurcation of the ideal internal carotid artery by finite element simulation, analyze the stent-thrombus-vessel interaction during thrombectomy process based on the simulation results, and provide guidance for improving the effect of stent thrombectomy at the bifurcation. **Methods** The CAD software was used to build the model and the finite element analysis software was used to simulate the process of single stent and double-stent thrombectomy. **Results** Thrombectomy was unsuccessful in single stent model and successful in double-stent model, and the maximum stress of thrombus during embolus retrieval was twice that of single stent, the maximum strain was 1.12 times that of single stent, and the maximum contact pressure on the vessel surface was approximately twice that of single stent. **Conclusions** Solitaire double-stent can effectively prevent thrombus displacement at the

收稿日期: 2022-11-20; 修回日期: 2022-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11872152)

通信作者: 王盛章, 教授, E-mail: szwang@fudan.edu.cn

bifurcation and successfully retrieve the thrombus, but there is a risk of fracture due to the high stress level in middle section of the thrombus. The contact pressure of the vessel on anterior artery side is higher during thrombectomy, and the risk of vessel damage is greater. Therefore, it is necessary to optimize the design of stent retriever to improve its flexibility.

Key words: internal carotid bifurcation; stent retriever; double-stent thrombectomy; finite element analysis

机械取栓术对于大血管闭塞的急性缺血性卒中患者的治疗和康复非常有效^[1]。Yang等^[2]研究发现,单独血管内取栓不劣于静脉阿替普酶和血管内取栓联合治疗。然而,尽管目前有很多种类的机械取栓装置,但仍会遇到难治性闭塞^[3]。动脉分叉处的顽固性血栓是机械取栓的难点之一,高负荷量血栓造成颈内动脉末端栓塞性病变,使大脑中动脉及前动脉受累,进而影响整个脑半球的供血,有较高的致残率和病死率,使用单支架取栓治疗效果较差^[4-5]。最近,在闭塞部位同时使用两个支架取栓器的双支架取栓器技术,已被报道为抢救性取栓技术^[6]。但双支架并联取栓技术带来的血管损伤风险可能高于单支架取栓技术,故需要更大规模的前瞻性研究来验证该策略的有效性和安全性,以及其改善临床结果的能力^[7-8]。因此,有必要深入了解支架取栓有效性背后的机制,考虑支架-血栓-血管相互作用^[9],评价双支架取栓对血管壁的损伤,并进一步通过优化设计提高取栓支架的性能。

定量评价支架取栓效果的研究方法包括体外实验和数值仿真。许多研究通过体外实验模拟取栓过程,比较不同取栓支架的性能^[10-13],但是体外实验无法获得取栓过程中血栓和血管壁所受到的作用力。Luraghi等^[14-15]开发并验证了1个有限元仿真模型,模拟支架取栓器机械取栓术的所有步骤,并且进行了第1次患者特异性机械取栓术的模拟。张晓颖等^[16]对3款开口式取栓支架的取栓过程进行仿真分析。但是,使用有限元方法研究颈内动脉Y形分叉处双支架取栓术,目前还鲜有报道。

本文建立有限元模型,模拟单、双支架在理想颈内动脉Y形分叉处取栓的过程,对比单、双支架在分叉处取栓的效果。通过分析取栓过程中血栓的应力和应变研究支架与血栓的相互作用,以及支架与血管壁表面的接触压强研究取栓过程中支架

与血管的相互作用,评价其潜在的风险。

1 材料和方法

1.1 取栓支架建模

Solitaire (Medtronic公司,美国)是目前临床上最常用的取栓器之一,它是一种卷曲设计的镍钛合金支架。本研究使用的支架型号参考了临床病例^[6,17]中使用的支架,包括Solitaire FR 6 mm×30 mm和Solitaire FR 4 mm×20 mm两种规格。其中,Solitaire FR 6 mm×30 mm直径为6 mm,取栓区域长度为30 mm,本文中用长支架代称。Solitaire FR 4 mm×20 mm直径为4 mm,取栓区域长度为20 mm,本文中用短支架代称。两款支架二维图形均由CAD软件SolidWorks 2018 (Dassault System公司,法国)构建,并在ABAQUS/CAE 2018 (Dassault System公司,法国)中卷曲成圆柱状[见图1(a)]。



图1 模型几何形状和尺寸

Fig. 1 Geometry and dimensions of models (a) Stent retriever models, (b) Vessel model, (c) Thrombus model

建立内径为0.7 mm微导管模型并且使用S4R壳单元进行网格划分。使用ABAQUS/CAE 2018中集成的镍钛合金超弹性本构模型用于支架取栓器,材料参数为常用的镍钛合金材料参数^[18]。根据网格尺寸敏感性分析结果使用平均长度为0.2 mm的B31单元对支架模型进行网格划分。

1.2 颈内动脉Y形分叉血管建模

利用SolidWorks建立大脑颈内动脉Y形分叉段的理想模型[见图1(b)]。血管模型的中心线被

简化在 1 个平面上。该模型包含颈内动脉末端的一部分以及大脑前动脉的分叉和大脑中动脉的 M2 部分。血管内径由 M1 初始部分的 3.1 mm 减小到 M2 初始部分的 2.4 mm^[19],模型的曲率适中。取栓过程中,假设血管壁不发生形变。

1.3 血栓模型

本文在血管分叉处建立马鞍状的血栓模型^[20] [见图 1(c)],血栓几何形状与血管分叉处相似,直径基本充满整个血管管腔。根据先前的研究^[21],本文构建了直径在 2.2~2.3 mm 范围内、边缘处有半径为 0.75 mm 的圆角、两端长度约为 10 mm 的血栓模型。使用三阶泡沫(hyperfoam)材料模型模拟血栓的力学行为,其应变能函数如下^[22]:

$$\psi = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} [\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + (J^{-\alpha_i\beta_i} - 1)/\beta_i] \quad (1)$$

式中: N 为拟合阶数; $\bar{\lambda}_i$ 表示主拉伸比; μ_i 、 α_i 和 β_i 是与温度相关的材料参数(见表 1)。

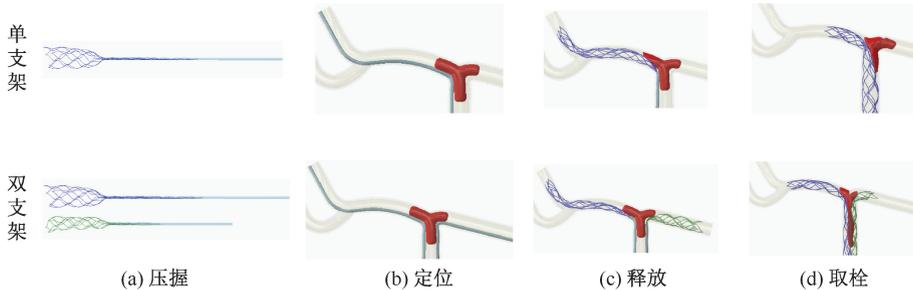


图 2 不同支架取栓器取栓模拟步骤

Fig.2 Simulation steps of thrombectomy for different stents (a) Crimping, (b) Positioning, (c) Releasing, (d) Thrombectomy

(1) 压握:将 Solitaire FR 6 mm×30 mm 和 Solitaire FR 4 mm×20 mm 分别拉入微导管中。在支架和导管之间定义硬接触,在支架表面定义摩擦因数为 0.2 的自接触。

(2) 定位:通过移动微导管的中心线将支架定位在血栓处。在单支架模型中将长支架定位在大脑中动脉 M1 段,在双支架模型中增加了短支架,将其定位在前动脉侧。

(3) 释放:沿微导管的中心线回撤微导管,自膨式支架取栓器展开。当支架被释放时,它与血栓和血管壁接触。在支架释放过程的仿真模拟中,支

表 1 血栓材料参数^[23]

Tab.1 Material parameters of thrombus^[23]

参数	数值	参数	数值
μ_1/Pa	38.20	α_3	5.91
α_1	5.91	β_1	0.484 5
μ_2/Pa	33.48	β_2	0.490 4
α_2	-2.90	β_3	0.484 5
μ_3/Pa	25.98		

用平均尺寸为 0.2 mm 的四面体单元 C3D4 对血栓的几何模型进行计算网格划分。选择与支架的网格尺寸相似的血栓的网格尺寸,从而更好地模拟支架与血栓之间接触。

1.4 模拟步骤

利用有限元仿真软件 ABAQUS/CAE 2018 模拟取栓支架植入以及取栓的整个过程。ABAQUS/Explicit 在解决大变形和接触问题方面具有良好的性能,所以使用这一求解器进行仿真。

本研究中支架取栓器取栓过程的模拟包括 4 个步骤(见图 2)。

架、血栓和血管壁之间的接触被定义为硬接触,根据 Gunning 等^[24]的体外测试设置摩擦因数为 0.1。在血栓表面定义无摩擦自接触。在双支架模型中增加了长、短支架表面的硬接触,摩擦因数设为 0.2。

(4) 取栓:支架取栓器完全释放后,通过在支架近端施加 25 mm 位移取回装置,以评估支架取栓器捕获血栓的能力。

2 结果

本文构建的有限元模型成功模拟了单支架和

双支架在理想 Y 形分叉血管处取栓过程。

图 3 显示了单、双支架释放步骤支架完全展开后在 25 mm 位移内取栓过程中支架和血栓的变形。在单支架取栓过程中,长支架展开后先与马鞍形血栓的一侧接触,取栓阶段支架取栓器使血栓从远端向近端折叠,之后长支架从血栓一侧滑过,基本与血栓分离,取栓失败[见图 3(a)]。

在双支架取栓过程中,两个支架取栓器展开后与马鞍形血栓的两侧接触,取栓过程中同时移动两个支架取栓器,血栓的近端被夹持在两个支架取栓器之间,近端变长,远端的两端被挤压在一起,血栓发生大变形,整体被折叠成长条状嵌入支架当中,与支架取栓器一同向近端移动,取栓成功[见图 3(b)]。

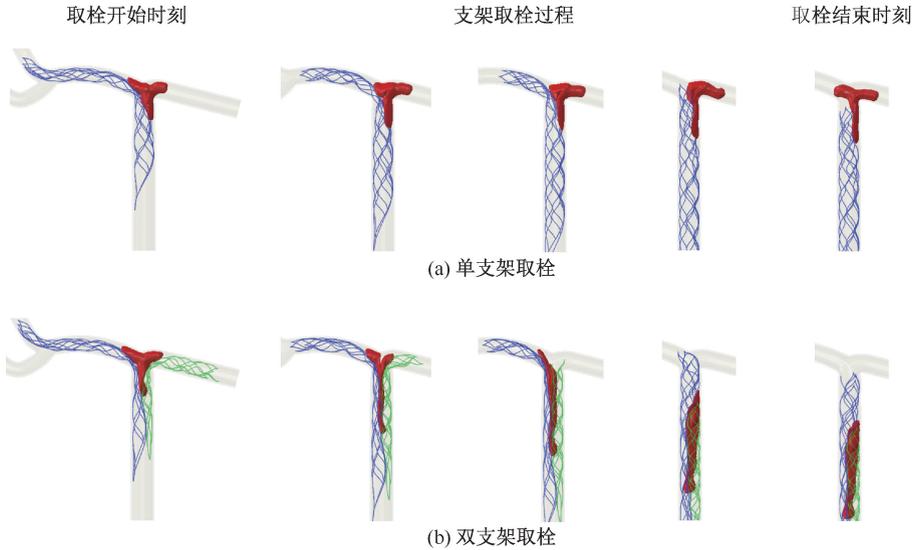


图 3 不同支架取栓过程中支架取栓器和血栓变形

Fig. 3 Deformation of stent retrievers and thrombus during thrombectomy of different stents

(a) Single stent thrombectomy, (b) Double-stent thrombectomy

图 4(a) 比较了两个模型取栓过程中血栓上第 1 主应力的分布状况。在单支架取栓过程中,位于前动脉一侧的血栓没有发生应力集中现象,血栓应力集中分布在大脑中动脉侧与长支架接触的位置。最后血栓与长支架分离,应力集中位于血栓与支架取栓器接触的部分。在双支架取栓过程中,由于在中动脉和前动脉侧都部署了支架取栓器,血栓的两侧都出现了应力集中现象。应力集中主要发生在血栓的中段与支架接触的部分,故血栓中段存在断裂风险。如果血栓从中段破坏后变成两段,双支架仍然与血栓有较大的接触面积,具有捕获血栓的能力,血栓逃逸的风险较小。单支架模型最大应力为 172.2 kPa; 双支架模型最大应力为 344.9 kPa, 大约是单支架模型的 2 倍。双支架取栓时血栓应力明显升高,表明两个支架与血栓具有更强的相互作用。

第 1 主应变的分布状况。在单支架取栓模型中,支架释放后由于在分叉处难以完全扩张,大应变出现在血栓中动脉侧的两端,中段部分基本无应变。在取栓过程中,大应变出现在支架取栓器与血栓接触的位置。在双支架取栓模型中,支架释放后,由于血栓被两个支架夹持,大应变出现在血栓的近端。在取栓过程中,大应变主要出现在长条状血栓的中段部分,长条状血栓两端应变较小。单支架模型的最大应变为 1.127; 双支架模型的最大应变为 1.304, 大约是单支架模型的 1.16 倍。双支架取栓模型应变水平升高,表明血栓在双支架的作用下发生了更大的变形。

图 5 比较了两个模型在取栓过程中血管壁表面的接触压强。单支架取栓模型血管壁最大接触压强为 177.8 kPa, 出现在分叉处中动脉端; 双支架取栓模型最大接触压强为 357.2 kPa, 大约为单支架模型的 2 倍, 出现在分叉处前动脉端。两个模型

图 4(b) 比较了两个模型在取栓过程中血栓上

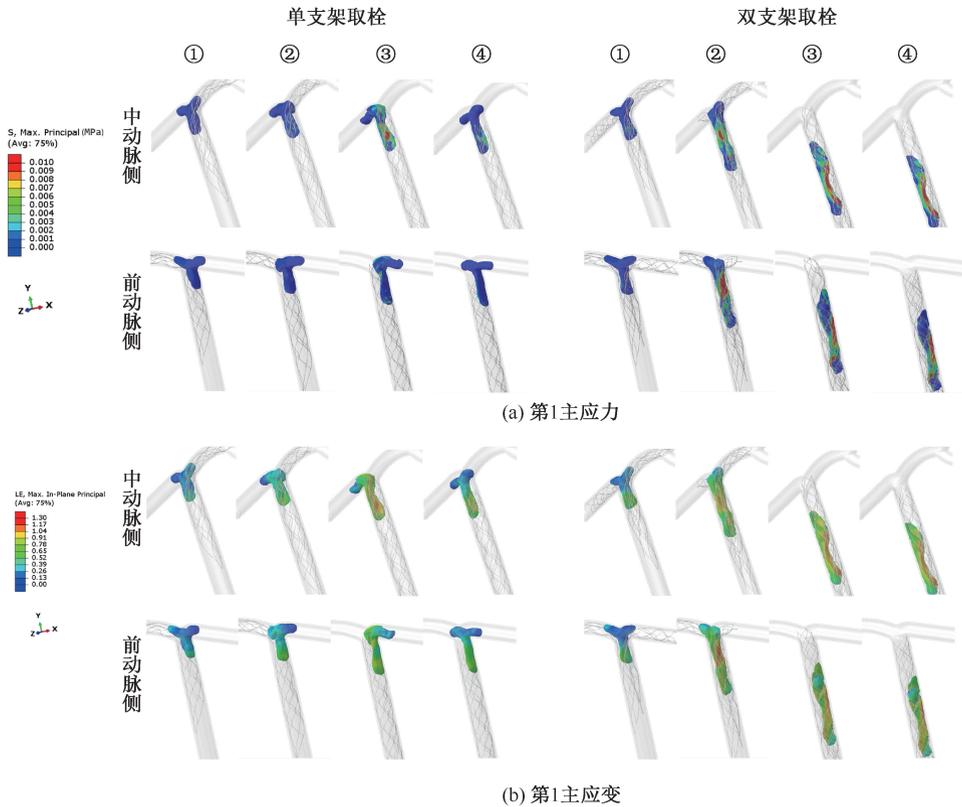


图 4 不同支架取栓过程中血栓两侧应力、应变分布

Fig. 4 Stress and strain distributions on both sides of thrombus during thrombectomy of different stents

(a) The first principle stress, (b) The first principle strain

注: ① 取栓开始时刻, ②、③ 取栓过程中, ④ 取栓结束时刻。

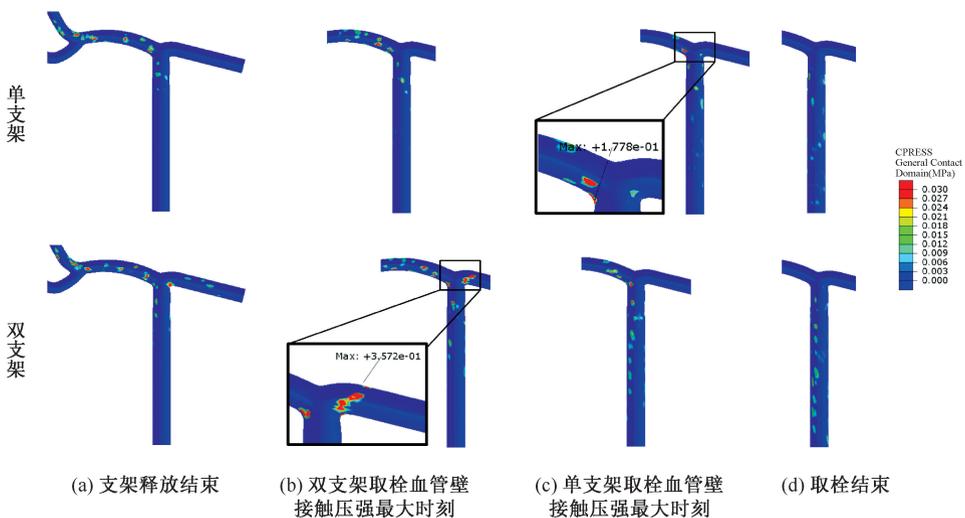


图 5 不同支架取栓过程中不同时刻血管壁表面接触压强

Fig. 5 Contact pressure on the vessel surface at different moments during thrombectomy of different stents

(a) At the end of stent release, (b) At the moment of maximum contact pressure on the vessel during double-stent thrombectomy, (c) At the moment of the maximum contact pressure on the vessel during single stent thrombectomy, (d) At the end of thrombectomy

最大接触压强都出现在血管分叉处,表明取栓过程中过弯时支架对血管壁有更强的作用,血管内膜可能受到损伤。由于双支架与血管壁接触面积更大,接触压强较高的区域面积也显著大于单支架模型。

3 讨论

本文仿真结果表明,双支架取栓术对于颈内动脉分叉处血栓是一种有效的抢救性技术。虽然在双支架取栓模型中得到了再通的结果,但是双支架对血栓和血管壁都有着更强的作用。可能出现血栓的断裂以及对血管内膜的损伤。

仿真中支架取栓器释放后在分叉处出现了不完全扩张现象,这与 Tsumoto 等^[25]临床研究中通过对比增强高分辨率锥形束 CT 观察到的现象一致,可能是造成单支架无法在分叉处取出血栓的原因。本文推测,出现不完全扩张现象原因是分叉处血栓对支架的作用,或者是支架在弯曲处不能够完全扩张。Machi 等^[12]研究发现,支架取栓器在过弯时发生贴壁不良的现象。这也为支架取栓器的优化设计提供了思路,即提高支架取栓器在弯曲处的贴壁性与扩张程度可能有利于血栓的取出。虽然在双支架取栓模型中同样出现了不完全扩张现象,但是由于在近端双支架对血栓的近端形成了“钳夹”效应成功取出了血栓,这与单支架通过摩擦作用取栓是两种不同的作用机制,同样也为支架取栓器的设计提供了思路。在取栓过程中,在颈内动脉段,单支架模型中长支架的扩张程度要大于双支架模型中两个支架的扩张程度。本文推测,双支架模型两个支架的相互作用增加了两个支架的径向支撑力,使其能够更好地捕获血栓,这可能也是双支架取栓成功的原因之一。

本研究的局限性如下:① 血管被理想化为不可变形的刚体,而不是具有非线性行为的变形体;② 模型没有考虑血流对血栓过程的影响;③ 颈内动脉 Y 形分叉模型为理想化模型,实际的颈内动脉 Y 形分叉比这个理想模型更加复杂。在以后的研究中,将对这些不足进行改进。

4 结论

本文利用有限元建模和仿真方法对颈内动脉 Y 形分叉处单支架取栓与双支架取栓进行模拟,通

过对比单、双支架取栓结果,得到以下主要结论:双支架取栓能够成功取出颈内动脉 Y 形分叉处的血栓;双支架取栓过程中血栓中段会发生应力集中,容易出现断裂;双支架取栓对于血管壁具有更大的接触压强,可能造成血管内膜损伤;为了减少双支架取栓时对血管的损伤风险,建议在曲率更大的分支侧选用顺应性更大的支架。

参考文献:

- [1] GOYAL M, MENON BK, VAN ZWAM WH, *et al.* Endovascular thrombectomy after large-vessel ischaemic stroke: A meta-analysis of individual patient data from five randomized trials [J]. *Lancet*, 2016, 387(10029): 1723-1731.
- [2] YANG P, ZHANG Y, ZHANG L, *et al.* Endovascular thrombectomy with or without intravenous alteplase in acute stroke [J]. *N Engl J Med*, 2020, 382(21): 1981-1993.
- [3] ABDALLA RN, CANTRELL DR, SHAIBANI A, *et al.* Refractory stroke thrombectomy: Prevalence, etiology, and adjunctive treatment in a North American Cohort [J]. *Am J Neuroradiol*, 2021, 42(7): 1258-1263.
- [4] LIEBESKIND DS, FLINT AC, BUDZIK RF, *et al.* Carotid I's, L's and T's: Collaterals shape the outcome of intracranial carotid occlusion in acute ischemic stroke [J]. *J Neurointerv Surg*, 2015, 7(6): 402-407.
- [5] LEE JS, HONG JM, LEE SJ, *et al.* The combined use of mechanical thrombectomy devices is feasible for treating acute carotid terminus occlusion [J]. *Acta neurochirurgica*, 2013, 155(4): 635-641.
- [6] 丁明祥, 黄晓光, 谢兵, 等. 双支架取栓技术在急性颅内大动脉 T 形分叉处闭塞的应用 [J]. *齐齐哈尔医学院学报*, 2020, 41(17): 2117-2119.
- [7] SASAKI I, IMAHORI T, YANO T, *et al.* Crossing double stent retriever technique for refractory terminal internal carotid artery occlusion [J]. *Radiol Case Rep*, 2022, 17(6): 1848-1852.
- [8] PATRO SN, IANCU D. Dual-stent retrieval for mechanical thrombectomy of refractory clot in acute stroke as a rescue technique [J]. *Can Med Assoc J*, 2017, 189(17): E634-E637.
- [9] YOO AJ, ANDERSSON T. Thrombectomy in acute ischemic stroke: Challenges to procedural success [J]. *J Stroke*, 2017, 19(2): 121-130.
- [10] WEAFFER FM, DUFFY S, MACHADO I, *et al.* Characterization of strut indentation during mechanical thrombectomy in acute ischemic stroke clot analogs [J]. *J*

- Neurointerv Surg, 2019, 11(9): 891-897.
- [11] OHSHIMA T, KAWAGUCHI R, NAGANO Y, *et al.* Experimental direct measurement of clot-capturing ability of stent retrievers [J]. *World Neurosurg*, 2019, 121: e358-e363.
- [12] MACHI P, JOURDAN F, AMBARD D, *et al.* Experimental evaluation of stent retrievers' mechanical properties and effectiveness [J]. *J Neurointerv Surg*, 2017, 9(3): 257-263.
- [13] 邱晓键, 张晓颖, 谷雪莲, 等. 优化取栓支架的力学性能 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(3): 419-424.
- QIU XJ, ZHANG XY, GU XL, *et al.* Mechanical properties of optimized stent retrievers [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(3): 419-424.
- [14] LURAGHI G, RODRIGUEZ MATAS JF, DUBINI G, *et al.* Applicability assessment of a stent-retriever thrombectomy finite-element model [J]. *Interface Focus*, 2021, 11(1): 20190123.
- [15] LURAGHI G, BRIDIO S, RODRIGUEZ MATAS JF, *et al.* The first virtual patient-specific thrombectomy procedure [J]. *J Biomech*, 2021, 126: 110622.
- [16] 张晓颖, 谷雪莲, 田浩, 等. 开口式取栓支架的生物力学研究 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(4): 589-595.
- ZHANG XY, GU XL, TIAN H, *et al.* Biomechanical study of the open-type stent retriever [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(4): 589-595.
- [17] 徐可, 李辉, 黄楚明, 等. 急性颈内动脉 T 型闭塞血管内开通治疗体会 [J]. *中国临床神经外科杂志*, 2021, 26(7): 541-543.
- [18] 蔡云寒. 编织支架治疗颅内动脉瘤的数值仿真研究及其在手术规划中的应用 [D]. 上海: 复旦大学, 2021.
- [19] RAI AT, HOGG JP, CLINE B, *et al.* Cerebrovascular geometry in the anterior circulation: An analysis of diameter, length and the vessel taper [J]. *J Neurointerv Surg*, 2013, 5(4): 371-375.
- [20] MCCARTHY R, MIRZA M, JOHNSON S, *et al.* Aspects of ischemic stroke biomechanics derived using *ex-vivo* and *in-vitro* methods relating to mechanical thrombectomy [J]. *J Biomech*, 2022, 131: 110900.
- [21] WEAFFER FM, DUFFY S, MACHADO I, *et al.* Characterization of strut indentation during mechanical thrombectomy in acute ischemic stroke clot analogs [J]. *J Neurointerv Surg*, 2019, 11(9): 891-897.
- [22] STORÅKERS B. On material representation and constitutive branching in finite compressible elasticity [J]. *J Mech Phys Solids*, 1986, 34(2): 125-145.
- [23] FERREIDONNEZHAD B, MOERMAN KM, JOHNSON S, *et al.* A new compressible hyperelastic model for the multi-axial deformation of blood clot occlusions in vessels [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2021, 20(4): 1317-1335.
- [24] GUNNING GM, MCARDLE K, MIRZA M, *et al.* Clot friction variation with fibrin content; Implications for resistance to thrombectomy [J]. *J Neurointerv Surg*, 2018, 10(1): 34-38.
- [25] TSUMOTO T, TSURUSAKI Y, TOKUNAGA S. Interaction between the stent strut and thrombus characterized by contrast-enhanced high-resolution cone beam CT during deployment of the Solitaire stent retriever [J]. *J Neurointerv Surg*, 2017, 9(9): 843-848.