

# 基于术前 CTA 构建的计算机仿真模型探究收缩期异常尖波对非体外循环下冠状动脉旁路移植桥血管流量及近中期通畅率的影响\*

姜娟<sup>1</sup> 韩增强<sup>2</sup> 刘有军<sup>3</sup> 毛伯龔<sup>4</sup> 范枕溥<sup>2</sup> 陈彧<sup>2</sup> 赵舟<sup>2</sup>

**[摘要]** 目的:使用基于冠状动脉(冠脉)CT 血管造影(CTA)图像构建的冠脉旁路移植(CABG)流体仿真模型,通过微创手段获得患者 CABG 术后桥血管血流动力学参数,并与术中实际测量瞬时桥流量参数进行对比,探讨异常尖波存在的临床意义。**方法:**选取 2018 年 9 月—2019 年 9 月于我院心外科实施首次单纯非体外循环下 CABG 患者 21 例。术前完善冠脉 CTA 检查,术中移植后通过即时血流测量仪(transit time flow measurement, TTFM)完成桥血流测定并记录数据。对术前冠脉 CTA 资料进行计算机仿真处理,构建个体化模型,计算各个靶血管位点流体力学参数,并与实际手术方案桥流量进行对比。术后 1 周全部患者出院前完成冠脉 CTA 复查,术后 1 年完成冠脉 CTA 患者 16 例(76.2%),术后两年完成冠脉 CTA 复查患者 9 例(42.9%),术后 3 年完成冠脉 CTA 复查患者 5 例(23.8%)。**结果:**共 11 例患者 13 支桥血管存在异常尖波。通过计算机仿真模型模拟的桥血管流量与术中 TTFM 实测流量相比差异无统计学意义[(32.58±26.52) mL/min vs (26.66±20.94) mL/min,  $P=0.160$ ]。按照有无异常尖波分组,异常尖波组中模拟流量明显高于实测流量[(17.91±15.58) mL/min vs (40.68±33.00) mL/min,  $P=0.006$ ]。异常尖波组术后冠脉 CT 提示桥血管狭窄甚至闭塞 5 例(38.46%),非尖波组存在狭窄 3 例(6.81%),两组狭窄发生率比较差异有统计学意义( $P=0.011$ )。**结论:**TTFM 中收缩早期的异常尖波很可能是一种非正常血流波形,可能对桥流量存在影响,并会加剧桥血流震荡,降低远期通畅率。

**[关键词]** 冠状动脉旁路移植术;计算机仿真;瞬时血流测定;血流波形

**DOI:**10.13201/j.issn.1001-1439.2023.09.010

**[中图分类号]** R654.2 **[文献标志码]** A

## A computer simulation model based on preoperative CTA to investigate the effect of abnormal systolic sharp wave on graft flow and early and mid-term patency rate in off-pump coronary artery bypass grafting

JIANG Juan<sup>1</sup> HAN Zengqiang<sup>2</sup> LIU Youjun<sup>3</sup> MAO Boyan<sup>4</sup>  
FAN Guangpu<sup>2</sup> CHEN Yu<sup>2</sup> ZHAO Zhou<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Geriatrics, People's Hospital of Peking University, Beijing, 100044, China; <sup>2</sup>Department of Cardiac Surgery, Heart Center, People's Hospital of Peking University; <sup>3</sup>School of Life Science and Bioengineering, Beijing University of Technology; <sup>4</sup>School of Life Sciences, Beijing University of Chinese Medicine)

Corresponding author: ZHAO Zhou, E-mail: zhaozhou8@126.com

**Abstract Objective:** To explore the clinical significance of abnormal sharp waves by using a fluid simulation model based on coronary CT angiography (CTA) images to obtain the hemodynamic parameters of the grafts by non-invasive methods, and to compare with the actual instantaneous graft flow measured during the operation by transit time flow measurement (TTFM) in coronary artery bypass grafting (CABG). **Methods:** A total of 21 patients who underwent the first off-pump CABG in the Department of Cardiology of our hospital from September

\*基金项目:北京大学人民医院研究与发展基金青年科研培育课题(No:RDY2019-32)

<sup>1</sup>北京大学人民医院老年科(北京,100044)

<sup>2</sup>北京大学人民医院心脏中心心脏外科

<sup>3</sup>北京工业大学生命科学与生物工程学院

<sup>4</sup>北京中医药大学生命科学学院

通信作者:赵舟,E-mail:zhaozhou8@126.com

**引用本文:**姜娟,韩增强,刘有军,等.基于术前 CTA 构建的计算机仿真模型探究收缩期异常尖波对非体外循环下冠状动脉旁路移植桥血管流量及近中期通畅率的影响[J].临床心血管病杂志,2023,39(9):707-712. DOI: 10.13201/j.issn.1001-1439.2023.09.010.

2018 to September 2019 were enrolled. Coronary CTA examination was completed before the operation, and the graft blood flow was measured and recorded by TTFM after CABG. The preoperative coronary CTA data were processed by computer simulation, and the individual model was constructed. The fluid dynamics parameters of each target site were calculated and compared with the actual surgical plan. All patients completed coronary CTA one week after the operation before discharge, 16 patients (76.2%) completed coronary CTA one year after the operation, 9 patients (42.9%) completed coronary CTA two years after the operation, and 5 patients (23.8%) completed coronary CTA three years after the operation. **Results:** A total of 13 grafts from 11 patients had abnormal sharp waveforms. There was no significant difference between the flow measured by TTFM and the flow simulated by the computer model ( $[32.58 \pm 26.52]$  mL/min vs  $[26.66 \pm 20.94]$  mL/min,  $P=0.160$ ). Grouped according to the presence or absence of abnormal sharp waveform, the simulated flow was significantly higher than the measured flow by TTFM in the abnormal sharp wave group ( $[40.68 \pm 33.0]$  mL/min vs  $[17.91 \pm 15.58]$  mL/min,  $P=0.006$ ). There were 5 cases of graft stenosis or even occlusion in the abnormal sharp waveform group and 3 cases of graft stenosis in the non-sharp waveform group, the difference between the two groups was statistically significant (38.46% vs 6.81%,  $P=0.011$ ). **Conclusion:** The abnormal sharp waveform in the early systolic phase of TTFM is an abnormal blood flow waveform, which may affect graft flow and exacerbate graft blood flow turbulence, reducing long-term patency.

**Key words** coronary artery bypass grafting; computer simulation; transit time flow measurement; flow waveform

移植桥血管失败是影响冠状动脉旁路移植术(CABG)中远期效果的主要因素,桥血管移植术后近期出现狭窄乃至闭塞多由于外科操作失误和(或)不佳的血流动力学所引起<sup>[1-3]</sup>。即时血流测量仪(TTFM)以其准确性、便捷性、稳定性和可重复性成为判断 CABG 术中桥血管吻合口血流状态的重要手段<sup>[4-5]</sup>。在 TTFM 使用过程中经常会发现部分桥血管存在收缩早期异常尖波波形,但其他血流参数如平均流量(MGF)、搏动指数(PI 值)和舒张期血供比例(DF 值)等指标处于临界值状态,这种情况下是否需要重新吻合往往让外科医生难以抉择。这种异常的血流波形究竟对桥血管通畅率和患者临床结局有何影响?本次研究使用基于冠状动脉(冠脉)CT 血管造影(CTA)图像构建的 CABG 流体仿真模型,通过无创手段获得患者 CABG 术后桥血管血流动力学参数,并与术中实际测量的瞬时桥流量参数进行对比,探讨异常尖波存在的临床意义。

## 1 对象与方法

### 1.1 对象

选取 2018 年 9 月—2019 年 9 月于我院心外科实施首次单纯非体外循环下 CABG 患者共计 229 例,其中术中 TTFM 存在异常尖波血流且资料(包括术前冠脉 CTA、术中 TTFM 血流图和术后 1 周冠脉 CTA)完整患者共计 35 例,进行计算机仿真模拟过程中因影像数据处理问题无效数据 14 例,实际入组病例 21 例。

### 1.2 冠脉 CTA 检查

所有患者术前完善冠脉 CTA 检查。术中血管移植后使用 Medistim VQ2011 型号 TTFM 测量桥血流并记录数据。全部桥血管吻合完毕后,鱼精蛋白中和待循环稳定根据桥直径选择合适尺寸的超声探头(2 或 3)在近吻合口处直接测量。术后 1

周全部患者出院前完成冠脉 CTA 复查,术后 1 年完成冠脉 CTA 复查患者 16 例(76.2%),术后两年完成冠脉 CTA 复查患者 9 例(42.9%),术后 3 年完成冠脉 CTA 复查患者 5 例(23.8%)。

### 1.3 计算机仿真处理

采用基于冠脉 CTA 图像构建的 CABG 流体仿真模型(图 1),结合 CT 和冠脉血流储备分数(FFR)的优势,从形态学和功能学两方面来综合评估冠脉的狭窄程度和供血功能<sup>[6-7]</sup>。通过深度学习算法,对术前冠脉 CTA 影像中的像素点进行处理,除去粘连的静脉和噪声等,抽取的所有冠脉像素点,获得冠脉的三维初分割。分别对主动脉和冠脉进行计算和再整合,利用区域增长及前波传导方法迭代式运算获得冠脉的母支分支关系,并构建出整个冠脉树的中心线。沿着中心线利用图像的灰度信息和梯度信息,重建血管轮廓,从而获得高于像素分辨率、更加精准连续曲线轮廓。通过比对沿中线相邻血管轮廓,对血管轮廓进行再排列和二次采样,并在血管轮廓间进行样条插值,并最终形成封闭的血管曲面。后续对整个血管面进行优化,使其与实际血管形态更加一致并生成光滑的血管三维模型(图 2)。然后再对所有分支的曲面进行布尔操作,最终得到完整的冠脉树模型。基于完整的模型后自动生成流体力学仿真所需的三维网格,同时还可以精准计算出患者的心肌质量、动脉血流量等信息。根据这些信息可以个性化设置动脉入口流量参数和出口流阻参数,自动设置血液物性参数、管壁物性参数以及流场初始条件等。最终,基于上述参数以及三维模型网格信息,计算得到目标血管每一个位置的物理量,包括流速、压力等参数,得到各种临床需要的参考指标,如剪切力、震荡剪切指数、FFR 值和血管移植后血流量等(图 3),并与实际手术方案桥流量进行对比。

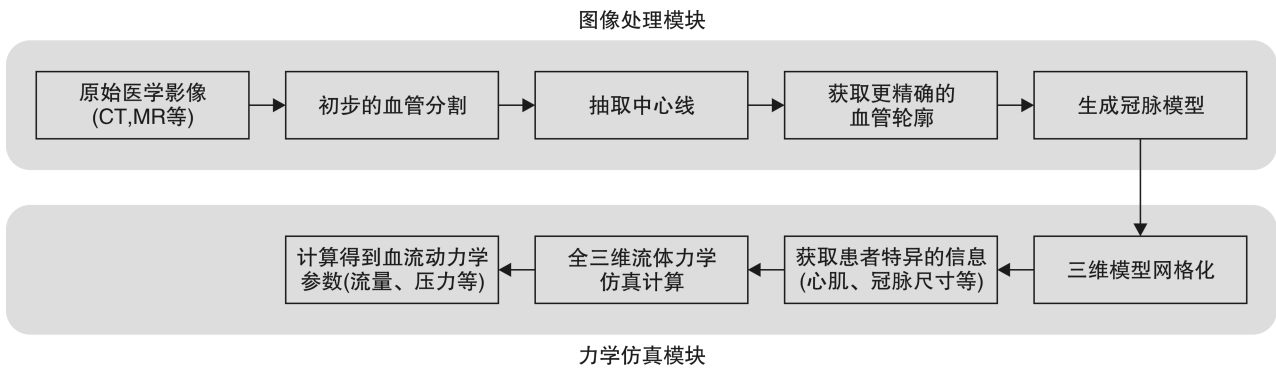


图 1 计算机仿真处理技术流程图

Figure 1 The technology flowchart of the computer simulation model

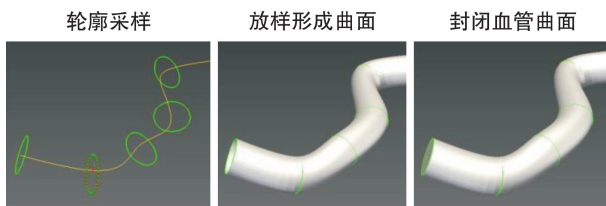


图 2 血管三维模型

Figure 2 The 3D vascular model

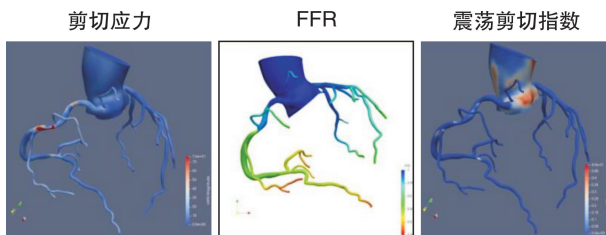


图 3 计算血动力学参数得到 FFR 等相关参数

Figure 3 Relevant parameters such as FFR obtained by calculating hemodynamic parameters

#### 1.4 术后狭窄评估

术后冠脉 CTA 结果由 2 名高年资放射科医师评估移植血管通畅性和(或)再狭窄程度,按 Fitzgibbon 移植血管分级标准<sup>[8]</sup>:A 级:移植血管无狭窄或狭窄 $<50\%$ ;B 级:移植血管狭窄 $\geq 50\%$ ,但未完全闭塞;O 级:移植血管完全闭塞。

#### 1.5 异常尖波的定义

使用 TTFM 中发现某些桥血流图存在异常尖波,既往文献对此并无描述和界定,我们和流体力学学者在临床实践中发现其异常存在,并对其进行定义:收缩早期波形高于舒张期流量主波形 1.5 倍以上,同时伴有左侧靶血管位点 DF 值 $<60\%$ 或右侧靶血管位点 DF 值 $<50\%$ 。见图 4。

#### 1.6 围术期管理和手术方法

所有患者术前完善常规化验和检查。术前常规服用阿司匹林(100 mg/d, qd),术后拔除气管插管后开始服用阿司匹林(100 mg/d, qd)和氯吡格

雷(75 mg/d, qd)双联抗血小板治疗。

全部患者气管插管静脉吸入复合全身麻醉,常规正中开胸,使用低频电刀直视下获取乳内动脉(IMA),直视下或内窥镜下获取大隐静脉(SVG)、直视下获取桡动脉(RA)。非体外循环下完成所有靶血管吻合。

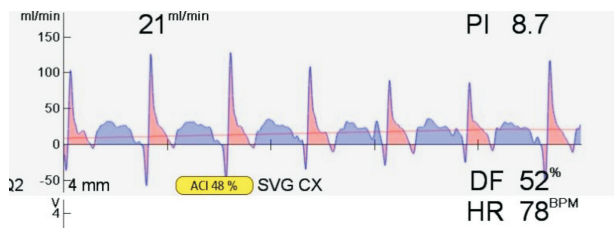


图 4 异常尖波的定义

Figure 4 Definition of abnormal sharp waves

#### 1.7 统计学处理

所有回收数据使用 EpiDate3.1 软件建立数据库,分别两次平行录入数据,并对录入数据进行逻辑查错、整理和对异常值进行分析处理后形成最终分析数据库。应用 SPSS 20.0 软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料以  $\bar{X} \pm S$  表示,组间比较采用  $t$  检验。计数资料以百分比(%)描述,组间比较采用  $\chi^2$  检验,理论频数过小者采用 Fisher 确切概率法。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

#### 2 结果

##### 2.1 患者基线资料

本研究纳入患者共计 21 例,其中 1 例患者桥血管因出现异常尖波血流图而重新吻合,但无明显改变。全部患者无二次手术,无神经系统并发症,无伤口并发症,无主动脉内球囊反搏(IABP)和(或)体外膜肺氧合(ECMO)植入。全部患者均顺利出院。患者基线资料见表 1。

##### 2.2 患者术后随访桥血管情况

本组研究中共有 11 例患者 13 支桥血管存在异常尖波,其中术后 1 周冠脉 CTA 提示其中 7 支

桥血管未见异常。有问题的6支桥分别是:1例复查CTA提示至右冠主干的静脉桥闭塞,同时伴有心肌酶升高(CK-MB高于正常上限10倍),但患者围术期生命体征平稳并顺利出院;1例乳内动脉桥(LIMA-LAD)术后1周CTA提示线样征,但术后1年复查CT提示乳内动脉桥血管直径和功能正常;2例静脉桥术后1周CTA提示存在A级狭窄,术后1年复查时变为B级狭窄,其中1例术后3年狭窄无明显进展;2例静脉桥术后1周冠脉CTA未见异常,但术后1年CTA提示存在B级狭窄。

在非尖波组中,2例静脉桥术后2年内新发A级狭窄。术后随访冠脉CTA异常桥血管共涉及15例患者,其中存在异常尖波患者11例,非异常尖波患者4例在术后2年内新发A级狭窄及术后线样征改变。具体结果见表2。

### 2.3 桥血管流量

通过计算机仿真模型模拟的桥血管流量与术中TTFM实测流量相比,差异无统计学意义。按照有无异常尖波分组,在异常尖波组中模拟流量和实测流量相比,模拟流量明显高于实测流量,且差异存在统计学意义( $P < 0.05$ );在非尖波组中,模拟流量和实测流量相比差异无统计学意义。

异常尖波组术后冠脉CT提示桥血管狭窄甚至闭塞5例(38.46%),非尖波组存在狭窄3例

(6.81%),两组狭窄发生率比较差异有统计学意义( $P = 0.011$ )。

表1 患者基线资料

Table 1 General data 例(%),  $\bar{X} \pm S$

项目	数值
年龄/岁	63.71±8.42
男性	16(76.2)
血管移植支数/支	3.10±0.831
BMI/(kg/m <sup>2</sup> )	25.52±3.73
术前射血分数/%	62.13±12.19
术前左室舒张末期内径/cm	5.10±0.51
糖尿病	9(42.9)
高血压	13(61.9)
高脂血症	9(42.9)
外周血管疾病	3(14.3)
既往脑血管意外	3(14.3)
慢性阻塞性肺疾病	1(4.8)
NYHA分级	2.14±0.36
陈旧性心肌梗死	3(14.3)
既往经皮冠脉介入	3(14.3)
慢性肾功能不全	1(4.8)
围术期神经系统并发症	0
围术期CK-MB高于上限10倍 <sup>a)</sup>	1(4.8)

<sup>a)</sup>本中心近年弃用常规肌钙蛋白改为超敏肌钙蛋白,故使用CK-MB作为衡量标准。

表2 术后随访冠脉CTA异常桥血管

Table 2 Postoperative abnormal vessels in coronary CTA

桥血管	组别	支数	TTFM是否存在异常尖波	术后1周冠脉CTA	术后1年冠脉CTA	术后2年冠脉CTA	术后3年冠脉CTA
AO-SVG-RCA	1	1	是	O级	无	无	无
LIMA-LAD	1	1	是	通畅	无	无	无
AO-SVG-OM	2	1	是	A级	B级	无	B级
AO-SVG-CX	3	1	是	A级	B级	无	无
AO-SVG-PDA	4	1	是	通畅	B级	无	无
AO-SVG-CX	5	1	是	通畅	B级	无	无
LIMA-LAD	6	1	是	线样征	通畅	无	无
AO-SVG-PDA	6	1	是	通畅	通畅	无	无
LIMA-LAD	7	1	是	通畅	通畅	无	无
AO-SVG-PDA	8	1	是	通畅	无	无	无
AO-SVG-RCA-PDA	9	1	是	通畅	无	无	无
AO-SVG-Dx	10	1	是	通畅	无	无	无
RIMA-CX	11	1	是	通畅	无	无	无
AO-SVG-CX	12	1	否	通畅	通畅	A级	无
AO-SVG-Dx	13	1	否	通畅	A级	无	无
RIMA-RCA	14	1	否	线样征	无	无	无
AO-RA-CX	15	1	否	线样征	无	通畅 <sup>a)</sup>	无

<sup>a)</sup>本例患者实施冠脉造影,提示桡动脉桥通畅无狭窄。其余桥血管术后冠脉CTA未见明显异常。LIMA:左侧乳内动脉;RIMA:右侧乳内动脉;RA:桡动脉;SVG:大隐静脉桥;LAD:前降支;RCA:右冠脉;PDA:后降支;OM:钝缘支;Dx:对角支;AO:升主动脉;CX:回旋支。

表 3 计算机模拟和术中 TTFM 流量对比

Table 3 The flow simulated by computer model and measured by TTFM

组别	流量/(mL/min)	$\bar{X} \pm S$
全部桥血管数(57支)		0.160
模拟流量	32.58±26.52	
术中流量	26.66±20.94	
异常尖波组(13支)		0.006
模拟流量	40.68±33.00	
实际流量	17.91±15.58	
非尖波组(4支)		0.603
模拟流量	29.70±21.58	
实际流量	32.22±22.01	

### 3 讨论

关于在收缩早期桥血流波形中的异常高尖波,既往无相关研究对其进行描述和定义。通过对心脏解剖结构、生理学和流体力学研究可知,人体冠脉供血主要集中在舒张期,表现为舒张期供血优势,仅在部分右冠系统中表现为均衡型(即收缩期、舒张期供血比例相似),因此有理由认为无论是正常冠脉供血,还是在狭窄冠脉上实施移植手术后的桥血流,均不应存在收缩期(尤其是收缩早期)的高尖波。此外,流体力学学者在基于人体生理学和流体力学理论上所构建的计算机模型既无法模拟出上述波形,更无法对其进行合理解释。本研究术前使用模型估测术中桥血流流量,一方面验证移植效果是否满意,也通过对比二者数据进一步验证模型的准确性和可信度;另一方面通过对模拟血流与存在高尖波波形血流对比发现,存在尖波的真实血流远低于模拟血流( $P=0.006$ )。基于此,有理由怀疑这样的波形可能对桥流量存在影响,并加剧了桥血流震荡,降低了远期通畅率。

随着冠脉外科研究的不断深入,血流动力学对于 CABG 桥血管中远期通畅率的影响也逐渐成为焦点。过低的壁面切应力(WSS)、高壁面切应力梯度(WSSG)以及高振荡剪切指数(OSI)等指标均被认为是不佳的血流动力学因素,是导致移植桥血管失败的重要风险因素<sup>[9-10]</sup>。目前,基于流体力学用于 CABG 术前规划的计算机仿真研究并不多,国外具有代表性的是 Pekkan 等<sup>[11]</sup>基于商业软件和设备开发了 SURGEM 手术规划和血流动力学仿真系统,该系统作为手术规划系统的雏形,为血流动力学手术规划的基本方法提供了很重要的指引。本研究使用的计算机仿真模型基于患者术前冠脉 CTA 和冠脉造影结果,构建个体化冠脉模型,在获取患者特异性信息后进行全三维流体力学仿真计算,可以获得冠脉任意靶点局部的血流动力学参数(包括流量、压力等),并在此基础之上构建空间血管。在应用于构建旁路移植模型之前,该仿真模型算法在介入治疗

中通过与有创 FFR 实测结果不断地进行对比和校正,初步验证了该仿真模型数据与真实数据之间具有良好的匹配度和一致性<sup>[12-13]</sup>。本研究首次应用该模型构建 CABG 仿真模型,并将其模拟流量数据与术中 TTFM 实测流量进行对比,发现两组桥血管流量数据之间差异并无统计学意义( $P=0.160$ ),也在一定程度从侧面验证了该仿真模型的准确性。该结论目前尚未见于其他研究。

TTFM 已成为很多开展冠脉外科手术中心的标准配置。尽管其在某些时刻可能存在高估流量的问题,比如有研究显示当桥流量高于 68 mL/min 时 TTFM 获得的测量数据可能与真实数据存在偏差,高于真实流量,但更多的研究则对其准确性予以了肯定,并认为其对 LIMA 桥的评估较对其他桥血管更为准确<sup>[14-16]</sup>。

尽管 TTFM 的应用已经相当广泛,但对某些瞬时血流波形,外科医生仍未有明确合理的认知和解读,从而影响术中临床决策。关于如何解读收缩期早期的异常尖波,一直以来文献鲜有报道且未明确界定,流体力学专家对此也非常感兴趣<sup>[16-18]</sup>。因为通过计算机仿真模型不论是构建狭窄还是调整远端阻力变化均无法获得上述波形,也就无法对该波形做出合理解释<sup>[19]</sup>。早期流体力学专家认为上述波形可能与吻合口有效面积随心脏收缩-舒张而产生的周期性弹性改变相关。但随着学科交叉融合、认识不断深入,发现收缩早期高尖波的存在并非正常生理性原因,可能与桥血管空间走行扭转受阻和(或)吻合口局部受力后形态改变有关。此外,异常尖波对桥血管流量和近中期通畅率产生何种影响也鲜有报道,毕竟翻修吻合口且获得流量改善的比例在真实世界中并不高。本研究通过对异常尖波予以定义,并按照上述界定分组对比,发现异常尖波组实测桥流量要远远低于模拟流量( $P=0.006$ ),并且存在异常尖波的桥血管近中期狭窄率可能也相对更高( $P=0.011$ )。考虑到冠脉属于舒张期优势灌注,因此有理由认为异常尖波的存在可能意味着桥流量的损耗,属于一种非正常状态。

关于异常尖波的定义,查阅以往相关研究并未对 TTFM 瞬时血流波形中的高尖波形予以明确界定。在对血管移植模型构建和使用过程中,我们依据自身经验定义了具有临床意义的异常尖波<sup>[20]</sup>。结合 DF 值最主要的考虑是这种类型的尖波意味着存在流量损失。当然,该判断是否准确需要更大规模样本以及流体力学专家进一步深入分析和论证。

本研究桥流量的估测基于计算机仿真模型,但整体例数偏少,CABG 手术规划模型仍有待进一步验证和完善。关于异常尖波的定义是否准确、局部流场产生原因及其对桥通畅性的影响仍需要大量病例的验证。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Ishida M, Ishikawa H, Takami Y, et al. Relationship between fractional flow reserve and graft patency after coronary artery bypass grafting[J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, 69(11):1453-1459.
- [2] Tran-Nguyen N, Condemni F, Yan A, et al. Wall Shear Stress Differences Between Arterial and Venous Coronary Artery Bypass Grafts One Month After Surgery[J]. *Ann Biomed Eng*, 2022, 50(12):1882-1894.
- [3] Shuhaiber JH, Evans AN, Massad MG, et al. Mechanisms and future directions for prevention of vein graft failure in coronary bypass surgery[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2002, 22(3):387-396.
- [4] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization[J]. *Eur Heart J*, 2019, 40(2):87-165.
- [5] 赵舟, 韩增强, 范枕溥, 等. 微创左侧胸壁切口多支冠状动脉旁路移植术前降支平行侧侧吻合方式的尝试[J]. *临床心血管病杂志*, 2022, 38(11):921-925.
- [6] Dai N, Chen Z, Zhou F, et al. Association of Lipoprotein (a) With Coronary-Computed Tomography Angiography-Assessed High-Risk Coronary Disease Attributes and Cardiovascular Outcomes[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(12):e014611.
- [7] Lee SH, Hong D, Dai N, et al. Anatomic and Hemodynamic Plaque Characteristics for Subsequent Coronary Events[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9:871450.
- [8] Fitzgibbon GM, Kafka HP, Leach AJ, et al. Coronary bypass graft fate and patient outcome: angiographic follow-up of 5,065 grafts related to survival and reoperation in 1,388 patients during 25 years[J]. *J Am Coll Cardiol*, 1996, 28(3):616-626.
- [9] Fan TT, Lu Y, Gao Y, et al. Hemodynamics of left internal mammary artery bypass graft: Effect of anastomotic geometry, coronary artery stenosis, and postoperative time[J]. *J Biomech*, 2016, 49(5):645-652.
- [10] Sankaranarayanan M, Ghista DN, Poh CL, et al. Analysis of blood flow in an out-of-plane CABG model[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2006, 291(1):H283-295.
- [11] Pekkan K, Whited B, Kanter K, et al. Patient-specific surgical planning and hemodynamic computational fluid dynamics optimization through free-form haptic anatomy editing tool (SURGEM) [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2008, 46(11):1139-1152.
- [12] 邓欣, 沈雳, 王瑞, 等. 基于冠状动脉CT的血流储备分数在心肌缺血中的诊断应用价值: 一项单中心前瞻性研究[J]. *中国介入心脏病学杂志*, 2021, 29(3):138-142.
- [13] Zeng Y, Wang X, Tang Z, et al. Diagnostic accuracy of CT-FFR with a new coarse-to-fine subpixel algorithm in detecting lesion-specific ischemia: a prospective multi-center study [J]. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)*, 2023, S1885-5857(23)00196-2.
- [14] Amin S, Werner RS, Madsen PL, et al. Intraoperative Bypass Graft Flow Measurement With Transit Time Flowmetry: A Clinical Assessment [J]. *Ann Thorac Surg*, 2018, 106(2):532-538.
- [15] Niclauss L. Techniques and standards in intraoperative graft verification by transit time flow measurement after coronary artery bypass graft surgery: a critical review [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2017, 51(1):26-33.
- [16] Mao B, Feng Y, Wang W, et al. The influence of hemodynamics on graft patency prediction model based on support vector machine [J]. *J Biomech*, 2020, 98:109426.
- [17] Iida A, Sezai A, Orime Y, et al. An Experimental Study of the Effects of IABP on Coronary Artery Bypass Graft Flow Waveform [J]. *Ann Thorac Cardiovasc Surg*, 2021, 27(3):176-184.
- [18] Rezaeimoghaddam M, Oguz GN, Ates MS, et al. Patient-Specific Hemodynamics of New Coronary Artery Bypass Configurations [J]. *Cardiovasc Eng Technol*, 2020, 11(6):663-678.
- [19] 李兰兰, 刘有军, 毛伯龔, 等. 不同冠脉后负荷下竞争流对左乳内动脉桥血流动力学影响 [J]. *北京生物医学工程*, 2016, 35(4):331-338.
- [20] Li B, Mao BY, Feng Y, et al. The Hemodynamic Mechanism of FFR-Guided Coronary Artery Bypass Grafting [J]. *Front Physiol*, 2022, 12:503687.

(收稿日期:2022-12-16)