

# 基于CTA影像学的Stanford B型主动脉夹层破口最大直径精准测量研究

乔健<sup>1,2</sup>, 葛阳阳<sup>1</sup>, 曹龙<sup>1,3</sup>, 容丹<sup>1</sup>, 郭伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>解放军总医院第一医学中心血管外科, 北京 100853; <sup>2</sup>解放军联勤保障部队第九四一医院普通外科, 青海西宁 810000; <sup>3</sup>解放军联勤保障部队第九八三医院普通外科, 天津 300142

**摘要:** **背景** 破口尺寸对于主动脉夹层的发生、进展及预后具有重要的影响。随着腔内治疗技术的发展, 国内外均报道了利用封堵器封堵破口的案例, 该技术成功的关键在于精准测量破口的大小, 然而目前并无标准的破口尺寸测量方法。**目的** 利用计算机体层成像血管造影(computed tomography angiography, CTA)影像精准测量主动脉夹层破口的最大直径, 为破口封堵器的选择提供依据。**方法** 选取2022年1月—2024年1月我国Stanford B型主动脉夹层多中心临床注册研究(ROBUST)纳入的主动脉夹层患者, 基于其CTA影像数据, 借助Mimics软件的动态区域增长及布尔运算功能三维重建破口并在二维平面测量其最大直径, 应用3-Matic软件测量三维重建破口最大直径, 对比分析三维重建测量法与二维平面测量法的结果。**结果** 共纳入Stanford B型主动脉夹层患者102例, 其中男性91例, 女性11例, 平均年龄(51.47±12.36)岁, 共观测破口146个。三维重建测得破口最大直径显著大于二维平面测得破口最大直径[M(IQR): 14.02(6.99~22.07) mm vs 10.28(4.86~15.92) mm,  $P<0.001$ ]。按主动脉 Ishimaru 分区对比显示: Z3~Z9 各个区域破口最大直径的三维重建测量结果均大于二维平面测量结果( $P<0.05$ )。**结论** 基于CTA影像三维重建破口为主动脉夹层破口最大直径的测量提供了新的方法, 对于封堵器型号的选择具有重要指导意义。

**关键词:** 主动脉夹层; 计算机体层成像血管造影; 图像三维重建; 主动脉夹层破口最大直径测量

中图分类号: R620

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)06-0583-07

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25021805

引用本文: 乔健, 葛阳阳, 曹龙, 等. 基于CTA影像学的Stanford B型主动脉夹层破口最大直径精准测量研究 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (6): 583-589.

## Precise measurement of the maximum diameter of type B aortic dissection tears based on CTA imaging

QIAO Jian<sup>1,2</sup>, GE Yangyang<sup>1</sup>, CAO Long<sup>1,3</sup>, RONG Dan<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Vascular and Endovascular Surgery, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China;

<sup>2</sup>Department of General Surgery, Chinese PLA Joint Logistics Support Force 941st Hospital, Xining 810000, Qinghai Province, China;

<sup>3</sup>Department of General Surgery, The 983rd Hospital of the Joint Logistics Support Force of the Chinese People's Liberation Army, Tianjin 300142, China

Corresponding author: GUO Wei. Email: guoweiplagh@sina.com

**Abstract: Background** The size of the intimal tear significantly influences the occurrence, progression, and prognosis of aortic dissection. With the development of endovascular treatment techniques, both domestic and international studies have documented successful clinical cases of aortic tear occlusion using endograft devices. The success of this technique relies heavily on the accurate measurement of the tear size. However, there is currently no standardized method for measuring the tear size. **Objective** To accurately measure the maximal diameter of the aortic dissection tear by utilizing CTA imaging, so as to provide guidance for the selection of tear occluders. **Methods** Patients with Stanford type B aortic dissection enrolled in the ROBUST multicenter registry in China from January 2022 to January 2024 were selected. Based on their computed tomography angiography (CTA) imaging data, the tears were three-dimensionally reconstructed using Mimics software with dynamic region growing and Boolean operations. The maximum diameter of the entry tear was measured both on two-dimensional CTA images using Mimics software and the three-dimensional reconstruction using 3-Matic software. The measurements from these two methods were then compared and analyzed. **Results** A total of 102 patients with Stanford type B aortic dissection were enrolled, comprising 91 males and 11 females, with a mean age of (51.47 ± 12.36) years. Totally 146 entry tears were identified and analyzed. The maximum diameter of the tears measured by three-dimensional reconstruction was significantly larger than that measured in the two-

收稿日期: 2025-02-18

第一作者: 乔健, 在读硕士。Email: qqjjdy@163.com

通信作者: 郭伟, 主任医师。Email: guoweiplagh@sina.com

dimensional plane ( $M[IQR]$ : 14.02(6.99 - 22.07) mm vs 10.28(4.86 - 15.92) mm,  $P<0.001$ ). Stratified analysis based on the Ishimaru aortic zoning system demonstrated that three-dimensional reconstruction measurements consistently yielded larger maximum tear diameters compared to two-dimensional planar quantification across all Zone3-Zone9 anatomical segments ( $P<0.05$ ). **Conclusion** 3D reconstruction of tears based on CTA images offers a novel methodological option for measuring the maximum diameter of aortic dissection entry sites, providing critical guidance for endovascular occluder device sizing.

**Keywords:** aortic dissection; computed tomography angiography; three-dimensional image reconstruction; maximum diameter measurement of aortic dissection tears

**Cited as:** Qiao J, Ge YY, Cao L, et al. Precise measurement of the maximum diameter of type B aortic dissection tears based on CTA imaging[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(6): 583-589.

Stanford B型主动脉夹层(type B aortic dissection, TBAD)的核心治疗目标在于有效封堵破口, 隔绝假腔血流, 促进主动脉良性重塑<sup>[1-2]</sup>。胸主动脉腔内修复术(thoracic endovascular aortic repair, TEVAR)目前已成为TBAD的主要治疗手段<sup>[1,3-5]</sup>。近年来, 国内外均陆续报道了应用封堵器原位封堵破口的技术方法<sup>[6-8]</sup>。不同于TEVAR, 封堵器能够有效规避长段覆膜支架置入术相关的截瘫风险, 无需为封堵破口重建分支动脉, 拥有良好的应用前景。国内外封堵器应用经验均显示封堵器技术成功的关键在于精准测量破口最大直径, 并据此选择尺寸适配的封堵器<sup>[7,9]</sup>。

目前无针对破口直径标准的测量方法。计算机断层成像血管造影(computed tomography angiography, CTA)无创、经济快速、空间分辨率高, 图像后处理空间巨大, 是目前主动脉夹层诊疗和随访过程中首选的影像学检查手段, 适用于任意位置夹层破口大小的评估<sup>[2,10-11]</sup>。就应用CTA影像数据观测破口尺寸而言, 目前常用的方法主要包括二维平面测量和经虚拟仿真内镜(virtual intravascular endoscopy, VIE)测量<sup>[12-16]</sup>。然而VIE阈值参数调节过程烦琐且缺乏统一标准, 成像结果高度依赖操作者主观经验; 此外, 临床实践中操作者仅能使图像平滑完整, 无法确保是否准确还原了破口的真实结构, 因此VIE并非可靠的破口尺寸测量手段。通过CTA二维图像测量破口直径法应用最为广泛, 但破口具有三维立体的解剖结构, 二维平面测量结果可能并不能反映其真实大小。基于CTA影像数据阈值分割技术的兴趣组织三维重建方法广泛应用于胸心外科、骨科及肝胆外科等的术前评估测量以及术中治疗器材型号选择, 并不断发展, 已被验证为一种准确可靠、可复性高的解剖结构形态学观测工具<sup>[17-21]</sup>。本研究旨在建立一种基于TBAD患者CTA影像数据三维重建的破口最大直径测量方法, 对比该方法与传统二维图像测量法的结果, 为破口封堵器型号选择

提供新的方法。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

从我国B型主动脉夹层多中心临床注册研究(registry Of type B aortic dissection with the Utility of Stent graft, ROBUST)中获取影像资料<sup>[22]</sup>。ROBUST研究的纳入标准: (1)既往曾经接受过TEVAR治疗或准备接受TEVAR治疗的TBAD患者; (2)同意参与ROBUST研究。排除标准: 无法接受CTA检查(怀孕或备孕状态、哺乳期、慢性肾功能不全或有碘化造影剂过敏史)<sup>[22]</sup>。

为保证三维重建破口的精确度, 本研究在ROBUST研究入组要求的基础上设定如下标准。纳入标准: 2022年1月—2024年1月连续入组ROBUST研究的所有患者。排除标准: (1)CTA扫描层厚大于1 mm; (2)术前CTA成像质量不佳(主动脉夹层真腔、假腔、破口及内膜片显示不清晰, 不完整)。ROBUST (ChiCTR-POC-17011726)研究为回顾性研究, 因此免除了所有患者书面知情同意的要求。

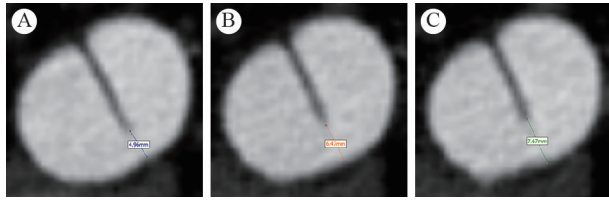
### 1.2 破口选择

破口定义为CTA二维平面图像上观察到的主动脉夹层真假腔联通之处<sup>[23-24]</sup>。将DICOM格式的CTA检查数据导入Mimics 26 (Materialise, 比利时)软件, 二维平面阅片识别破口, 按改良的Ishimaru主动脉分区法记录其位置: Z3区: 左锁骨下动脉开口以远2 cm内的区域; Z4区: Z3区远端至第6胸椎(T6)水平内的区域; Z5区: Z4区远端至腹腔干动脉开口近端的区域; Z6区: 腹腔干开口近端至肠系膜上动脉开口近端的区域; Z7区: 肠系膜开口近端至肾动脉开口近端的区域; Z8区: 肾动脉开口近端至远端的区域; Z9区: 肾动脉开口远端至腹主动脉分叉内的区域<sup>[25]</sup>。

### 1.3 二维平面测量

分别在矢、冠、轴3个平面测量破口最大直

径,测量单位为mm,测量结果记录至小数点后2位<sup>[15-16]</sup>(图1)。将每个破口3个平面测量值中的最大值作为其最大直径的二维平面测量结果。



CTA轴位平面图像某破口,在其直径最宽大的数个扫描层面连续进行测量,将最大测值确定为该破口在轴位平面的最大直径。A:平面测得直径为4.96 mm; B:平面测得直径为6.47 mm; C:平面测得直径为7.67 mm,则该破口在轴位平面的最大直径为7.67 mm。本图所示测量过程在Mimics中完成。

图1 破口CTA轴位平面图像最大直径测量

Fig. 1 Measurement of the maximum diameter of a tear on CTA axial plane images

#### 1.4 破口三维重建

在轴位平面确定拟重建破口位置,通过重复应用动态区域增长(dynamic region grow)及布尔求和(boolean unite operation)功能分割主动脉夹层真假腔,使分割所得蒙版与真假腔的边缘充分吻合(图2)。通过形态增长(morphology dilation operation)及布尔求减(morphology minus operations)功能获得破口周围主动脉内壁及内膜片的三维重建蒙版。用蒙版编辑(mask edit)功能充分显露破口(图3)。

#### 1.5 三维空间测量

将上述蒙版文件转换为mxd格式并导入3-matic 18 (Materialise, 比利时)软件,应用标记功能勾勒破口边缘,将其分离为独立实体以便观察破口三维结构(图4)。多角度观察破口形态,大致确定其长径和短径(图5),将长径端破口边缘上较突出的点位作为测量线起点,环绕破口边缘拉动测量线,将长度值最大的测量线确定为破口的最大直径,见图6、图7。

为了避免测量误差,所有破口直径二维平面测量均由2名具有5年以上血管外科工作经历的临床医师分别完成,取其测量结果的平均值进行统计;每个破口三维重建、三维直径测量均由1名血管外科医师重复进行2次,取其平均值进行统计。

#### 1.6 统计学分析

采用SPSS 25.0软件进行统计分析,测量数据均呈非正态分布,以 $M(IQR)$ 表示,应用Wilcoxon符号秩检验比较不同测量方法的差异;二维矢、冠、轴平面测量结果的比较行Holm-Bonferroni矫正。计算各二维平面测量结果与三维重建测量结

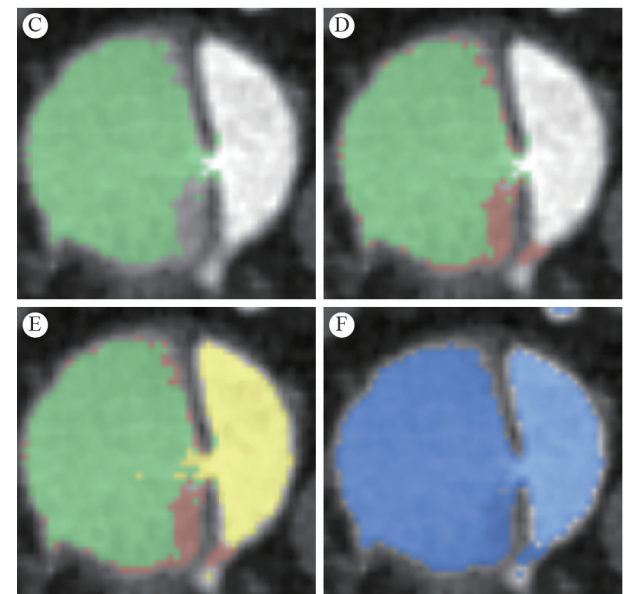
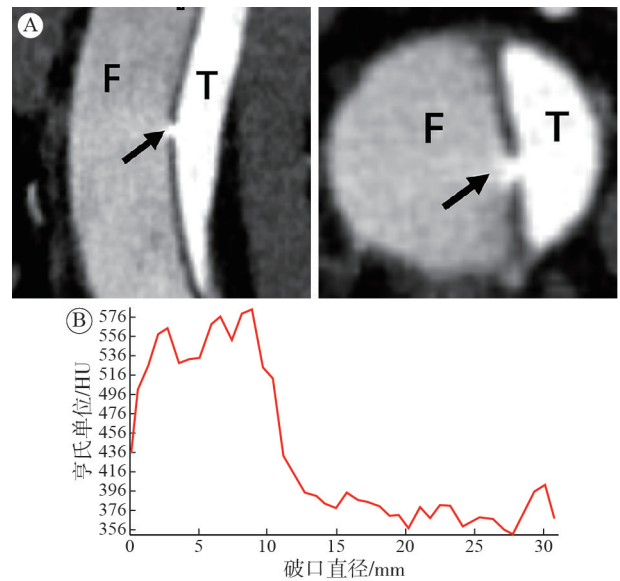


图2 夹层分割

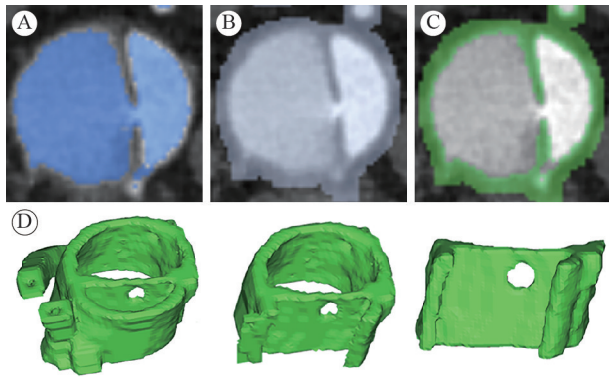
Fig. 2 Dissection segmentation

果之间的Spearman相关系数。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 患者特征及破口分布

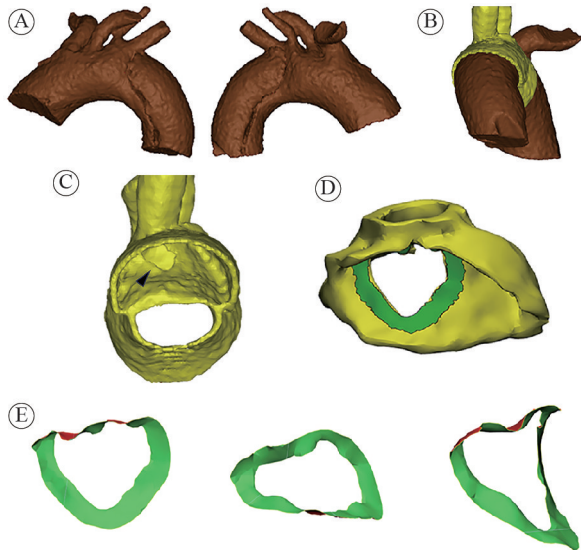
本研究最终纳入102例拟行TEVAR治疗的B型主动脉夹层患者,其中男性91例(89.2%),女性



A: 接图2, 与真假腔及破口边缘充分吻合的蓝色蒙版; B: 应用形态扩张功能, 蓝色蒙版扩增为覆盖内膜片的灰色蒙版; C: 应用布尔求减功能, 灰色蒙版与蓝色蒙版相减, 获得绿色的内膜片蒙版; D: 应用蒙版编辑功能, 去除大部分主动脉壁, 充分暴露破口及周围内膜片。以上全部操作均在Mimics中完成。

图3 破口处内膜片分割

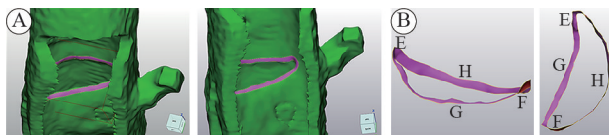
Fig. 3 Intimal flap segmentation at the tear site



A: 夹层主动脉三维重建。夹层起自于Z3区大弯侧, 假腔紧临左锁骨下动脉远端向下延伸; B: 破口处内膜片及主动脉壁三维重建; C: 经蒙版编辑显露破口(黑色三角形); D: 勾勒破口边缘; E: 将真腔侧勾勒内膜片边缘内膜片分离, 多角度观察其空间结构。A~C在Mimics中操作, D~E在3-Matic中操作。

图4 破口处内膜片勾勒

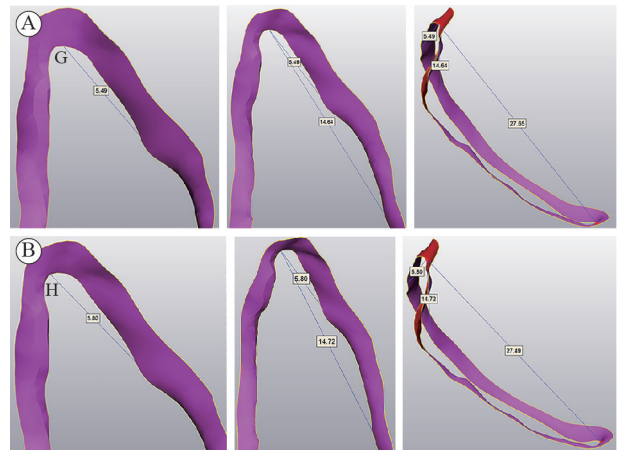
Fig. 4 Intimal flap contouring at the tear site



A: 按上述步骤勾勒的某破口边缘(粉色条带); B: 通过不同角度观察, 可确定EF方向为该三维重建破口的长径方向, GH方向为短径方向。以上操作均在3-Matic中完成。

图5 破口长径确定

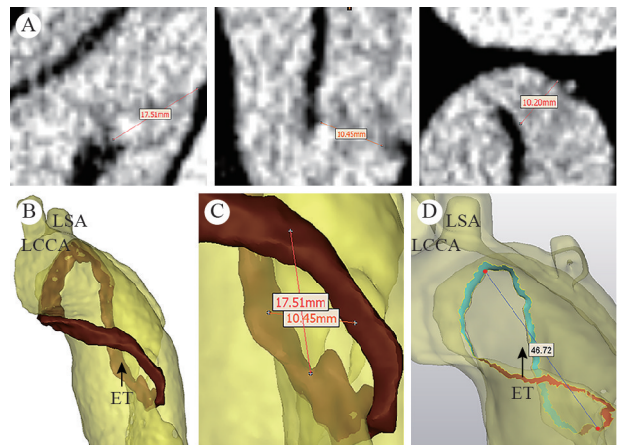
Fig. 5 Measurement of the tear maximum diameter



同图5所示破口, 在破口长径一端存在两个较为明显的远离另一端的点(G点、H点), 分别以G点、H点作为测量起始点, 环破口边缘拉动测量线另一端, 将3-Matic实时显示的测量数值最大时的径线确定为该破口的最大直径。A: 以G点为测量起始点, 破口最大直径为27.65 mm; B: 以H点为测量起始点, 破口最大直径为27.49 mm, 最终确定该破口的最大直径为27.65 mm。以上操作均在3-Matic中完成。

图6 破口最大直径测量

Fig. 6 Determination of the tear long-axis



A: 左锁骨以远破口在CTA矢、冠、轴平面测得最大径依次为17.51 mm、10.45 mm、10.2 mm; B: 红色蒙版为三维重建破口边缘内膜片; C: 矢状位平面及管状位平面破口直径测量线在三维空间中的位置; D: 三维重建破口, 测量最大直径为46.72 mm。LCCA: 左颈总动脉; LSA: 左锁骨下动脉; ET: 破口。A~C操作在Mimics中完成, D操作在3-Matic中完成。

图7 Z3区某破口二维平面测量与三维重建后测量

Fig. 7 Two-dimensional plane measurement and three-dimensional reconstruction measurement at the tear site in Zone3

11例(10.8%); 平均年龄(51.47±12.36)岁。所有患者一般情况见表1。复杂型B型夹层为伴有动脉破裂或先兆破裂、脏器灌注不良、动脉快速扩张、持续或反复疼痛及药物难以控制的高血压; 急性期夹层为发病≤14 d<sup>[11,25]</sup>。基于CTA影像多维度观测破口共146个。Z4区破口占比最高(33.6%, n=

49), 其次为Z3区(21.9%, n=32), Z5~Z9区的远端破口相对较少(Z5: 10.3%; Z6: 8.2%; Z7: 4.1%; Z8: 8.2%; Z9: 9.6%)。

表1 Stanford B型主动脉夹层患者术前临床特征(n=102)

指标	结果
年龄/(岁, $\bar{x}\pm s$ )	51.5 $\pm$ 12.4
男性/(例, %)	91(89.2)
BMI/[kg/m <sup>2</sup> , $M(IQR)$ ]	25.6(22.4~28.9)
高血压/(例, %)	89(87.3)
糖尿病/(例, %)	7(6.9)
脑血管疾病/(例, %)	9(8.9)
心血管疾病/(例, %)	5(4.9)
呼吸系统疾病/(例, %)	56(54.9)
复杂型/(例, %)	76(74.5)
急性/(例, %)	91(89.2)

## 2.2 破口最大直径二维平面测量与三维重建测量比较

三维重建还原了破口空间立体结构, 据此测得的破口最大直径显著大于二维平面测得的破口最大直径[ $M(IQR)$ : 14.02(6.99~22.07) mm vs 10.28(4.86~15.92) mm,  $P<0.001$ ], 见表2; 分区对比显示, Z3~Z9区两种测量方式的结果均有统计学差异( $P<0.05$ ), Z3区 [ $M(IQR)$ : 24.46(18.01~27.85) mm vs 15.66(11.45~19.74) mm,  $P<0.001$ ], Z4区 [ $M(IQR)$ : 18.41(14.26~27.31) mm vs 13.41(10.34~17.63) mm,  $P<0.001$ ]的差异尤为显著。图7示Z3区某破口三维重建后测得最大直径(46.72 mm)是二维平面测量结果(17.51 mm)的2.67倍, 测量值增加166.9%。而远端Z5~Z9区破口三维重建测量结果增幅相对较小, 其中Z7区 [ $M(IQR)$ : 5.16(4.35~7.84) mm vs 3.31(2.91~5.52) mm,  $P=0.03$ ]差异最小, 见表3。

矢状位测量结果与轴位测量结果 [ $M(IQR)$ : 7.88(3.82~12.88) mm vs 7.02(3.85~12.31) mm,  $P=0.012$ ]、冠状位测量结果与轴位测量结果 [ $M(IQR)$ : 8.10(3.80~13.63) mm vs 7.02(3.85~12.31) mm,  $P=0.021$ ]均有统计学差异, 矢状位测量结果与冠状位测量结果无统计学差异 [ $M(IQR)$ : 7.88(3.82~12.88) mm vs 8.10(3.80~13.63) mm,  $P=0.824$ ]。Spearman秩相关分析的结果显示, 矢状位、冠状位和轴位平面测量结果均与三维重建测量结果显著正相关, 其中与矢状位测量结果相关性最强( $r=0.924$ ,  $P<0.001$ ,  $n=146$ ), 冠状位次之

( $r=0.898$ ,  $P<0.001$ ,  $n=146$ ), 轴位最弱( $r=0.875$ ,  $P<0.001$ ,  $n=146$ )。

表2 不同测量方法下全部破口最大直径

Tab. 2 Descriptive statistics of the maximum diameter of all tears under different measurement methods

测量方法	测量结果/[mm, $M(IQR)$ ]
矢状位平面最大直径	7.88(3.82~12.88)
冠状位平面最大直径	8.10(3.80~13.63)
轴位平面最大直径	7.02(3.85~12.31)
二维平面最大直径	10.28(4.86~15.92)
三维重建最大直径	14.02(6.99~22.07)

表3 不同测量方法下不同位置破口最大直径

Tab. 3 The maximum diameter of tears at different locations under different measurement methods

位置	测量方法	测量结果/[mm, $M(IQR)$ ]	$P$ 值
Z3(n=32)	二维平面最大直径	15.66(11.45~19.74)	<0.001
	三维重建最大直径	24.46(18.01~27.85)	
Z4(n=49)	二维平面最大直径	13.41(10.34~17.63)	<0.001
	三维重建最大直径	18.41(14.26~27.31)	
Z5(n=12)	二维平面最大直径	4.90(3.49~11.47)	0.009
	三维重建最大直径	7.32(4.70~15.60)	
Z6(n=12)	二维平面最大直径	4.83(3.91~6.37)	0.004
	三维重建最大直径	6.46(5.29~8.65)	
Z7(n=6)	二维平面最大直径	3.31(2.91~5.52)	0.030
	三维重建最大直径	5.16(4.35~7.84)	
Z8(n=12)	二维平面最大直径	6.89(2.59~8.77)	0.004
	三维重建最大直径	7.16(3.56~10.66)	
Z9(n=23)	二维平面最大直径	4.05(2.58~6.24)	<0.001
	三维重建最大直径	5.10(3.14~8.03)	

## 3 讨论

随着近年来主动脉夹层血流动力学研究的不断深入和破口封堵器的临床应用, 获取准确的破口最大直径数据已成为研究者和临床医师亟待解决的关键问题。如何精准测量破口最大直径, 影像学检查方法的选择是首要问题。CTA、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、血管腔内超声(intravascular ultrasound, IVUS)及经食管超声心动图(transesophageal echocardiography, TEE)是目前主动脉夹层诊疗和随访的主要影像学检查方法<sup>[11,26]</sup>。IVUS和TEE空间分辨率高、能够实时成像, 但其检查范围有限, 对检查者专业水平要求较高, 作为侵入性检查无法广泛应用于夹层患者的术前评估和长期随访<sup>[11,27]</sup>。MRI无电离辐射危害, 但空间分辨率较低, 对夹层破口这类微小病变的解剖形态观察能力相对不足, 目前更多应用

于主动脉夹层的血流动力学研究中<sup>[2,10]</sup>。借助多平面重建技术,在二维CTA图像测量破口直径是目前最常用的方法<sup>[7,14-15,28]</sup>。然而破口虽小,却仍为三维立体的解剖结构,其尺寸和形态取决于内膜片缺损的宽度以及破口边缘内膜片在三维空间上的相对位置;如本研究所示,二维平面的测量结果为该平面与破口边缘两交点之间的线性距离,并无法准确反映破口的最大直径。通过影像数据后处理技术还原破口三维空间结构是解决破口最大直径测量问题的基本思路。以成像原理而言,基于IVUS影像数据进行破口三维重建或许能够最大程度还原破口的空间形态,然而IVUS的普及率和便捷性限制了该方向的探索。基于CTA影像数据三维重建的VIE技术虽然能够呈现破口的三维立体结构,但成像结果受主观设置的阈值范围影响较大,并非可靠的测量工具。基于阈值分割的三维重建技术则克服了VIE的缺陷,操作者可以根据蒙版与原CT图像的重叠程度判断设定的阈值范围是否准确,并可手动编辑蒙版以使其与原CT图像充分吻合,进而保证三维重建模型的准确性(图2、图3)。在保证原始影像数据质量的情况下,该技术准确还原人体复杂解剖结构的能力已被临床工作验证,在骨科、心血管外科及胸外科等领域中都得到了广泛的应用<sup>[17-21]</sup>。有研究基于CTA数据三维重建冠状动脉,并对比了重建模型与IVUS测量冠状动脉斑块长度的数据,结果显示二者相关系数高达0.95<sup>[29]</sup>,随着近年来机器学习手段的引入,三维重建的准确性、可重复性和快捷性得到进一步提升<sup>[30]</sup>。

就主动脉夹层破口三维重建而言,难点在于如何快速准确地提取造影剂扩布不均的假腔、破口流道及内膜片。目前自动分割及机器学习均无法简单快速地获得足以观测所有破口形态的精细分割结果<sup>[30]</sup>。此外,若仅分割非实性的主动脉管腔,观察者无法直接界定破口边缘,更无法确定并测量破口最大直径。本研究借助Mimics软件的动态区域增长和布尔求和功能实现了夹层真假腔及破口流道的快速半自动分割,进一步通过形态增长及布尔求减功能解决了内膜片分割的难题,为准确测量破口真实最大直径奠定了良好的基础;在得到三维重建的破口模型后,应用3-Matic软件的标记功能将破口周围内膜片自重建模型中扣除,避免了破口周围解剖结构对于测量过程的遮挡和干扰;最后,借助3-Matic软件的径线长度实时显

示功能,滑动测量线以确定破口最大直径,从方学角度确保了测量结果的准确性和唯一性。

本研究基于CTA影像阈值分割技术三维重建破口并测量其最大直径,对比分析二维平面与三维重建测量结果,进一步揭示了传统二维测量方法的局限性。本研究定量分析结果表明,无论是基于整体样本还是分区样本,破口最大直径的三维重建测量结果与其二维平面测量结果均有统计学差异( $P < 0.05$ )。值得注意的是,二者的最大差值可达29.21 mm(图7),这一发现提示传统的二维平面测量方法可能严重低估了破口的实际尺寸。另外,两种方法测量结果的差异在近端的Z3区及Z4区尤为显著,三维测量值较二维测量值分别增加了56.3%和37.3%,而远端破口(Z5~Z9区)三维测量值增幅相对较小,提示不同区域破口空间结构的复杂程度可能存在显著差异:从解剖学角度考虑,在扭曲的内膜片上,破口越大,其边缘随之获得复杂空间位置的可能性越高,进而使破口的空间结构导致更为复杂;而在平直的内膜片上,无论破口大小如何,其空间结构均不会发生显著扭曲。值得注意的是,Z3区和Z4区相较于左锁骨下动脉远端的其他区域本就具有更大的主动脉曲率,即使不考虑内膜片的螺旋扭曲,该区域的内膜片的也更为弯曲,因此该区域大破口的空间结构可能更为复杂,其最大直径的三维重建测量结果与二维平面测量结果会出现更显著的差异;对于该区域的破口封堵,选择封堵器时应进行更为全面细致的形态学评估。此外,通过矢状位、冠状位和轴位平面测量结果的比较及与三维重建测量结果的对比分析,发现当无法进行三维重建时,矢状面和冠状面或许能够提供更准确的破口最大直径测量结果。

本研究的创新点:(1)采用了不同以往的分割方式三维重建破口,借助Mimics软件的布尔运算功能,实现了灰度值不均、重建难度大的破口处内膜片快速准确分割;(2)借助3-Matic软件的标记功能分离破口周围内膜片,确保测量过程无干扰,并通过多次滑动测量以确定测量结果为真正意义上的破口最大直径;(3)通过分区对比(Z3~Z9区),分析了破口三维重建在不同位置破口中的临床应用价值,为封堵器的型号选择提供了优化策略。

本研究存在以下局限性:(1)样本量相对较小,尤其是远端破口病例数不足,可能影响结果的普适性;(2)由于目前并无测量破口尺寸的影像学金

标准, 通过与某种影像检查方法比对并不能说明破口直径三维重建测量法的准确性; (3) 在失去血液充盈的离体夹层标本上获得的测量结果未必代表生理状态下破口的真实尺寸, 因此不能基于离体测量验证三维重建测量法的准确性。未来研究方向: (1) 扩大样本量, 特别是增加远端破口病例, 以进一步验证三维重建的临床价值; (2) 通过临床应用破口最大直径三维重建测量法指导封堵器型号选择, 验证其安全性和有效性; (3) 进一步探索封堵器对于破口形态尺寸的影响, 优化封堵器型号选择策略。

综上, 本研究介绍了一种基于CTA影像数据三维重建TBAD破口并测量其最大直径的新方法。该方法的测量值显著优于传统的二维测量法, 提示二维测量法可能低估破口直径。三维重建测量法为破口最大直径的精准测量提供了新的方法, 可作为封堵器的型号选择的重要参考依据。

**作者贡献** 乔健: 数据收集, 论文撰写; 葛阳阳、曹龙、容丹: 审读和修订, 监督指导; 郭伟: 审读和修订。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

**数据共享声明** 本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取, Email: qjjdy@163.com。

#### 参考文献

- 1 周旻, 符伟国. Stanford B型主动脉夹层诊断和治疗中国专家共识 (2022版) [J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42 (4): 370-379.
- 2 Isselbacher EM, Preventza O, Hamilton Black J, et al. 2022 ACC/AHA guideline for the diagnosis and management of aortic disease [J]. J Am Coll Cardiol, 2022, 80 (24): e223-e393.
- 3 MacGillivray TE, Gleason TG, Patel HJ, et al. The society of thoracic surgeons/American association for thoracic surgery clinical practice guidelines on the management of type B aortic dissection [J]. Ann Thorac Surg, 2022, 113 (4): 1073-1092.
- 4 Trimarchi S, Gleason TG, Brinster DR, et al. Editor's choice - trends in management and outcomes of type B aortic dissection: a report from the international registry of aortic dissection [J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2023, 66 (6): 775-782.
- 5 林长泼, 符伟国. Stanford B型主动脉夹层的诊疗进展 [J]. 山东大学学报 (医学版), 2024, 62 (9): 7-12.
- 6 Cao L, Zhang HP, Guo W. First in man: sealing the distal re-entry tears of aortic dissection after thoracic endovascular aortic repair by an ENDOPATCH™ system [J]. Eur Heart J, 2023, 44 (3): 237.
- 7 Sandström C, Roos H, Henrikson O, et al. Endovascular plugs to occlude proximal entries in chronic aortic dissection [J]. Interact Cardiovasc Thorac Surg, 2022, 35 (3): ivac201.
- 8 Watanabe S, Saito Y, Murata K, et al. Amplatzer vascular plug with endologix AFX lining for visceral re-entry closure in a patient with chronic type B aortic dissection [J]. J Endovasc Ther, 2024, 31 (4): 734-737.
- 9 Ge YY, Zhang HP, Guo W. A novel endovascular double-disc implant for sealing intimal tears in aortic dissection [J]. JACC Asia, 2023, 3 (6): 937-941.
- 10 Murillo H, Molvin L, Chin AS, et al. Aortic dissection and other acute aortic syndromes: diagnostic imaging findings from acute to chronic longitudinal progression [J]. Radiographics, 2021, 41 (2): 425-446.
- 11 中华医学会放射学分会介入学组, 郑传胜, 梁斌, 等. 中国Stanford B型主动脉夹层影像诊断和介入治疗临床指南 [J]. 中华放射学杂志, 2023, 57 (5): 457-473.
- 12 Gielow M, Gerrah R. Virtual intravascular visualization of the aorta for surgical planning in acute type A aortic dissection [J]. JTCVS Tech, 2024, 25: 28-32.
- 13 Qi YF, Ma XY, Li G, et al. Three-dimensional visualization and imaging of the entry tear and intimal flap of aortic dissection using CT virtual intravascular endoscopy [J]. PLoS One, 2016, 11 (10): e0164750.
- 14 Li XN, Qiao HY, Shi Y, et al. Role of proximal and distal tear size ratio in hemodynamic change of acute type A aortic dissection [J]. J Thorac Dis, 2020, 12 (6): 3200-3210.
- 15 Kim JK, Goh JH, Kim JB, et al. Predictors of late adverse events in patients with surgically treated type I aortic dissection [J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2024, 68 (4): 444-453.
- 16 Codner JA, Lou XY, Duwayri YM, et al. The distance of the primary intimal tear from the left subclavian artery predicts aortic growth in uncomplicated type B aortic dissection [J]. J Vasc Surg, 2019, 69 (3): 692-700.
- 17 Takamoto T, Ban D, Nara S, et al. Automated three-dimensional liver reconstruction with artificial intelligence for virtual hepatectomy [J]. J Gastrointest Surg, 2022, 26 (10): 2119-2127.
- 18 Wu HC, Liu JX, Chen G, et al. Automatic semicircular canal segmentation of CT volumes using improved 3D U-Net with attention mechanism [J/OL]. https://doi.org/10.1155/2021/9654059.
- 19 Sardari Nia P, Olsthoorn JR, Heuts S, et al. Interactive 3D reconstruction of pulmonary anatomy for preoperative planning, virtual simulation, and intraoperative guiding in video-assisted thoracoscopic lung surgery [J]. Innovations (Phila), 2019, 14 (1): 17-26.
- 20 Chen S, Wang L, Li G, et al. Machine learning in orthodontics: Introducing a 3D auto-segmentation and auto-landmark finder of CBCT images to assess maxillary constriction in unilateral impacted canine patients [J]. Angle Orthod, 2020, 90 (1): 77-84.
- 21 He H, Wang PY, Zhou H, et al. The advantages of preoperative 3D reconstruction over 2D-CT in thoracoscopic segmentectomy [J]. Updates Surg, 2024, 76 (8): 2875-2883.
- 22 Rong D, Ge YY, Xue Y, et al. Protocol for the ROBUST (Registry Of type B aortic dissection with the Utility of STent graft) study: an ambispective, multicentre, open cohort study [J]. BMJ Open, 2017, 7 (12): e019317.
- 23 Motoki K, Zhu Y, Mirsadraee S, et al. A computational study of the effects of size, location, and number of tears on haemodynamics in surgically repaired type A aortic dissection [J]. Front Cardiovasc Med, 2023, 10: 1215720.
- 24 Sidawy AN, Perler B A. Rutherford's vascular surgery and endovascular therapy [M/OL]. https://shop.elsevier.com/books/rutherford-s-vascular-surgery-and-endovascular-therapy-2-volume-set/sidawy/978-0-323-77557-1.