

主动脉血管损伤力学机理研究进展

祝夏敏¹ 檀梦天²

(1. 河北工程大学土木工程学院 河北邯郸 056038; 2. 河北工程大学附属医院 河北邯郸 056002)

摘要: 主动脉夹层作为高血压严重并发症之一其临床特点为急性起病, 死亡率高。高血压患者的主动脉血管内长期存在具有较高流速及压力的血液流动, 这种持续高速、高压的血液流动将造成主动脉血管内膜功能损伤、血管壁结构异常等。利用 CT 扫描断层图像和数学模型分析血液和管壁内膜材料的力学行为, 可对主动脉血管在血液流动作用下的损伤评估进行有效预测。因此, 本文对主动脉血管损伤力学机理研究进展进行综述, 以期对主动脉夹层的预防提供新思路。

关键词: 主动脉夹层; 血管损伤; 力学分析

0. 引言

2022 年国家心血管病中心报道, 急性主动脉夹层发病率大约为每十万分之七, 其中 50% 的患者在 48h 内死亡, 70% 在一周内死亡, 90% 在三个月内死亡。主动脉夹层发病急、病程进展快, 发病时间难预测, 导致难以把握最佳治疗时机[1]。流固耦合数值模拟技术是近年来快速发展的一种计算方法, 能够较为真实地模拟流体和结构之间的相互作用。通过该技术, 可以更加精确地模拟主动脉夹层形成过程中的力学环境, 探究不同因素对主动脉壁的影响, 从而实现血管损伤位点的判断和主动脉夹层的形成机制的预测, 为主动脉夹层的预防和治疗提供新思路。

主动脉夹层通常发生在壁面压力最大的位置, 在收缩期加速至收缩峰值期, 血管壁面压力从近心端向远心端逐渐降低, 升主动脉、主动脉弓和降主动脉近端处的 Von Mises 应力高于降主动脉远端, 最大应力值分布在升主动脉和主动脉弓处。已有研究结果证明壁面压力和等效应力的分布与主动脉夹层形成存在关系, 在高血压、动脉结构异常或外伤等因素作用下, 主动脉内的压力和血流会发生变化, 造成内膜或者中膜破裂, 沿管壁薄弱部分撕裂, 形成真、假腔, 进而发展成主动脉夹层[2]。



图 1 主动脉夹层示意图^[2]

Fig.1 Schematic diagram of aortic dissection^[2]

1. 主动脉夹层病理生理学特点

主动脉夹层是一种主动脉壁的病理性疾病, 其特点在于血管壁内层发生撕裂, 形成假腔。研究表明, 主动脉夹层的病理

生理学特点主要包括血管壁的层间剥离、内膜剥离和血管瘤样突起(图 2)。这些特点改变了血管壁的力学特性, 从而导致了主动脉夹层的形成和发展。而且, 内皮细胞的损伤会导致血管壁对血流的应力反应性降低, 使得血管壁的层间剥离更加容易发生。此外, 主动脉夹层发生时血管壁的弹性模量和强度明显下降, 这主要是血管壁内结构蛋白发生断裂和变性, 导致了血管壁自身承受力降低。

血管壁的变形和扩张性增加也是主动脉夹层的病理生理学特征之一。研究发现, 主动脉夹层患者的血管变形率和扩张性均显著增加, 这与血管壁内部结构的受损密切相关。这种变形和扩张性的增加会加速主动脉夹层的扩展, 并增加主动脉夹层破裂的风险。在夹层形成后, 假腔内的血流动力学条件发生了明显改变, 这对血管壁形成血栓、栓子等并发症具有重要影响[4]。

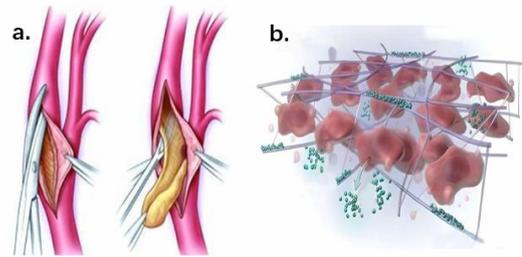


图 2 颈动脉内膜剥离与主动脉弹力板层结构^[3]

Fig. 2 Carotid artery intimal dissection and flexible lamina structure of the aorta^[3]

2. 主动脉血管壁的流固耦合力学模型

主动脉夹层是一种同时涉及到流体力学和固体力学的复杂血管疾病。在力学模型中, 通常将主动脉夹层视为如图 3 所示的多层壁管结构, 考虑到动脉材料的非线性、各向异性和渐进损伤等特性, 需采用合适的数学方法描述其本构行为[5]。比如在力学模型中, 需要考虑血管和血液的材料特性, 包括血管的弹性模量、屈服强度、断裂韧度以及血液的粘度等参数。此外, 主动脉血管的几何特性也是建立分析模型的重要参数, 如文献[6]在研究与 Stanford B 型主动脉夹层形成相关的危险因素时,

发现 280 例病例中左锁骨下动脉根部直径、主动脉弓宽度、升主动脉曲率、主动脉弓曲率半径以及主动脉弓局部扭转度等主动脉形态与主动脉夹层的发生相关；张建华等测量了升主动脉和主动脉弓的形态学参数，发现升主动脉和主动脉弓的宽度、高度和角度可能是主动脉夹层新的形态学预测指标[7]；张薛欢等采用形态学分析与计算流体力学结合的方法探索了 Stanford B 型主动脉夹层病发机理，发现降主动脉近端面积明显增大、左锁骨下动脉和主动脉之间的夹角明显减小、主动脉弯曲度显著增加[8]。而且，血管壁厚度、内外直径等几何参数也需要被纳入模型中，以更准确地描述主动脉夹层的力学行为。除了考虑静态负荷下的力学性能，疾病的力学模型也需要考虑动态负荷下的响应，构建合理的疾病力学模型将有助于深入理解主动脉夹层病理生理过程，为临床诊断和治疗提供更可靠的依据。

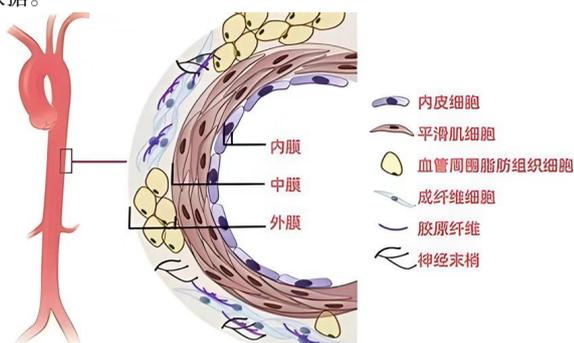


图 3 主动脉壁结构示意图⁰

Fig.3 Schematic diagram of the aortic wall structure⁰

3 基于流固耦合理论的血管力学损伤机制

力学损伤机制是造成主动脉夹层的重要因素之一。在血管内部，流体会对血管壁施加力，这种血管壁受力的情况会引起主动脉内部的应力和应变。血管壁的物理性能会受到振动和血流剪切力的影响，当受力超过了血管壁的承受极限时，就会发生力学损伤。一般情况下，主动脉夹层的力学损伤机制可以分为两种类型：一是由于外部冲击力或外力作用于血管壁，导致血管内部应力和应变失衡，从而引发夹层的形成；二是由于血流动力学条件的改变，使血管内部的力学环境发生改变，进而导致血管壁损伤，最终形成夹层。

此外，力学损伤机制还可能与血管壁的微结构变化相关。在外力作用下，血管内部的组织结构可能会发生改变，细胞连接的完整性受到破坏，血管壁的弹性和韧性减弱，进而导致夹层形成。研究表明，血流动力学条件的改变会影响血管内部力学环境，进而导致血管壁受力情况发生改变，最终引力学损伤[9]。

4 基于流固耦合理论的血管损伤预防与修复

血管力学损伤的预防和修复是主动脉夹层研究的重要目标

之一。通过提高血管壁的韧性和弹性来预防血管力学损伤已经成为研究的热点。其中，通过细胞外基质的生物力学调节来增强血管壁的抗拉强度和抗压强度被认为是一种潜在的预防策略。另一方面，常见的受损血管修复策略包括促进血管内皮细胞的再生和修复，也可通过植入支架或人工血管来加固血管壁，降低血管进一步损伤和破裂的风险[10]。

总结与展望

近年来，越来越多的研究表明，血管的力学损伤在主动脉夹层的发生和发展中扮演着关键的角色。可基于流固耦合理论深入研究主动脉内血液和血管壁之间的相互作用，揭示血管力学性能的损伤对主动脉夹层的影响机制，最终为临床诊疗提供新思路。

参考文献：

- [1]中国心血管健康与疾病报告 2022[R].北京:国家心血管病中心,2022.
- [2]NIENABE CA ,et al.Aortic dissection.Nat Rev Dis Primers,2016,2:16-53
- [3]VERMA S and S C SIU,Aortic dilatation in patients with bicuspid aortic valve.NEngl J Med,2014,370(2):1920-9
- [4]王志敏,余振球,石乙君等.2015—2021 年主动脉夹层住院患者的临床特点、发病与治疗方式变化趋势[J].中华高血压杂志,2023,31(12):1247-1255.
- [5]YINGZI ZHAO,PAUL M,VANHOUTTE,et al.Vascular nitric oxide:Beyond eNOS.Journal of Pharmacological Sciences, 2015,129(2):1-12
- [6]李嘉琦,张静怡,王家平.B 型主动脉夹层主动脉形态改变危险因素的研究[J].中国循环杂志,2023,38(07):742-749.
- [7]张建华. 基于 CTA 的主动脉形态学特征对急性 B 型主动脉夹层的预测价值研究[D].中国医科大学,2023.
- [8]张薛欢,李振锋,许欢明等.基于形态学和血流动力学的 B 型主动脉夹层病发机理分析[J].医用生物力学,2020,35(03):271-275+283
- [9]RYLSKI B, BRANCHETTI E, BAVARIA JE, et al. Modeling of predissection aortic size in acute type A dissection: more than 90% fail to meet the guidelines for elective ascending replacement[J]. J Thorac Cardiovasc Surg,2014,148:944 - 948.
- [10]HAYASHI K, HIRAYAMA E. Age-related changes of wall composition and collagen cross-linking in the rat carotid artery - in relation with arterial mechanics. J Mech Behav Biomed Mater, 2017, 65: 881-889.

基金项目：邯郸市科技专项计划项目（21422083341）