

基于计算流体力学的肿瘤压迫血管流动分析

王盘娜¹ 王一卓 曲禹柏 高丽娇 王赛宇 段文博*

齐齐哈尔医学院医学技术学院

[摘要]目的: 运用计算流体力学的知识研究分析不同形状的肿瘤对血管的压迫情况。方法: 肿瘤压迫血管是常见现象, 本文将肿瘤模型简化成方形及球形, 研究方形肿瘤及球形肿瘤对血管的压迫情况, 并基于计算流体力学软件FLUENT分析了不同肿瘤形状下的流场状态。结果: 方形肿瘤后方会形成旋涡, 球形因为流线型结构的原因, 在后方并不会产生旋涡。结论: 不论是方形还是球形肿瘤, 在肿瘤右边界处都会产生高压区, 从而对血管形成压迫作用。

[关键词]肿瘤; 血管; CFD; 医工交叉

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-627X.2021.12.1998

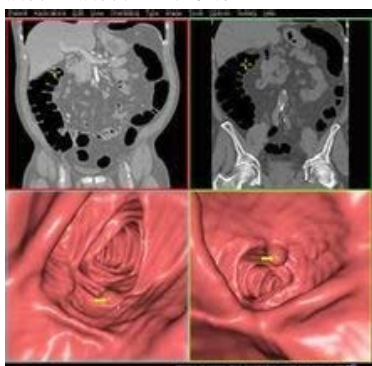
引言

肿瘤是机体在各种致癌因素作用下, 局部组织的细胞在基因水平上失掉了对其生长的正常调控, 导致异常增生而形成的新生物, 这种新生物常常形成局部肿块, 因而得名。学界一般将肿瘤分为良性和恶性两大类。肿瘤发生是由于细胞电子平衡失调所致。活性氧是一种缺乏电子的物质, 进入人体后争夺电子, 如果夺去细胞蛋白分子的电子, 使蛋白质接上支链发生烷基化, 形成畸变的分子而致癌。该畸变分子因为自己缺少电子而夺取邻近分子的电子从而使邻近分子也发生畸变而致癌。由此恶性循环就会导致形成大量畸变的蛋白分子。这些畸变的蛋白分子繁殖复制时可能导致基因突变, 形成大量癌细胞, 最后出现癌症症状。

(1) 异型性: 肿瘤组织在细胞形态和组织结构上与其来源的正常组织有着不同程度的差异, 这种差异称为异型性。组织结构的异型性是指肿瘤组织在空间排列方式上与其来源的正常组织的差异。良性肿瘤细胞的异型性不明显, 在排列上与正常组织不同, 对于肿瘤的诊断有赖于组织结构的异型性的判断。恶性肿瘤的组织结构异型性明显, 瘤细胞排列更加紊乱, 失去正常的排列结构、层次及极向。

(2) 肿瘤的生长方式: 肿瘤可以呈膨胀性生长、外生性生长和浸润性生长。

1) 膨胀性生长: 是大多数良性肿瘤所表现的生长方式, 呈结节状, 有完整的包膜, 肿瘤生长缓慢, 往往与周围组织分界明显, 对周围的器官、组织一般是挤压或阻塞的作用, 破坏器官的结构和功能并不明显。因其与周围组织分界清楚, 手术容易摘除, 摘除后不易复发。



2) 外生性生长: 一种发生在体表、体腔表面或管道器官表面的肿瘤, 常向表面生长, 形成突起的乳头状、息肉状、菜花状的肿物。良性、恶性肿瘤均可呈外生性生长, 但恶性肿瘤在外生性生长的同时, 也呈浸润性向基底部生长, 且外生性生长的恶性肿瘤由于生长快、血供少, 容易发生坏死、脱落而形成底部高低不平、边缘隆起的恶性溃疡。

3) 浸润性生长: 为大多数恶性肿瘤的生长方式。由于肿瘤相对正常组织生长过快, 侵入周围组织间隙、淋巴管、血

管等并浸润、破坏周围组织, 肿瘤多数没有完整包膜或没有包膜, 与周围组织分界不明显。

(3) 肿瘤的扩散-----是恶性肿瘤的主要特征。

1) 直接蔓延: 瘤细胞沿着组织间隙、淋巴管、血管或神经束浸润生长, 破坏邻近正常的组织、器官, 并继续生长, 称为直接蔓延。

2) 转移: 瘤细胞从原发的生长部位侵入淋巴管、血管或体腔, 迁移到其他部位继续生长, 形成与原发肿瘤同一类型同一性质的肿瘤, 这个过程称为转移。良性肿瘤不转移, 只有恶性肿瘤才转移, 常见的转移途径有以下几种:

- a. 淋巴道转移: 上皮组织的恶性肿瘤多经淋巴道转移;
- b. 血道转移: 各种恶性肿瘤均可发生
- c. 种植性转移: 常见于腹腔器官的癌瘤。

血管瘤是临床上常见的血管肿瘤性疾病, 根据病理学特征可将其分为良性肿瘤、交界性肿瘤以及恶性肿瘤。截至目前, 血管瘤的确切病因和发病机制并不十分清楚, 怀疑与胚胎发育时期血管的异常增生有关, 尤其是在早期的血管性组织分化阶段, 由于控制它的基因段出现小范围的错构, 而导致特定部位的组织分化异常而引起血管瘤。血管瘤根据分型不同, 在症状上也有所区别, 良性的血管瘤主要表现为皮肤形态、颜色的改变, 交界性或恶性肿瘤的皮肤损伤表现为界限不清的紫色或红色斑块。良性的血管瘤常常可自行恢复, 预后较好; 恶性的血管瘤即使经过治疗, 预后仍相对较差。

本病传染性低, 是婴儿最常见的良性肿瘤, 发生率为4%~5%。婴幼儿及30~50岁成年人是该病的两个发病高峰年龄。母体长期接触皮革、塑料、油漆涂料、农药等有害物质是本病的高危因素, 容易导致孩子出现血管瘤。

典型症状:

(1) 良性血管瘤

1) 婴幼儿血管瘤的皮肤与周围正常皮肤边界较清晰, 可见为血性、擦伤样或毛细血管扩张性斑片, 出生后6个月瘤体可迅速增殖, 肉眼可见的明显隆起于皮肤表面, 同时可伴有皮肤温度的上升, 但一般无痛感。

2) 梭形细胞血管内皮瘤好发于肢体皮肤而形成结节, 伴有静脉石产生。

3) 先天性血管瘤因名思义, 在出生时即存在, 根据其消退情况可分为快速消退型、部分消退型和不消退型。主要表现为紫红色的隆起或斑块, 边界清, 形状不规则, 按压可出现部分或完全的褪色。

4) 丛状血管瘤又称成血管细胞瘤, 大小通常为2~5cm, 常见于婴幼儿, 好发于颈部、躯干上部, 形成界限不清, 暗红色斑和斑块、丘疹等。

5) 上皮样血管瘤表现为单发或多发性的红色结节, 表面光滑, 并可逐渐发展成红色肿物, 质硬, 甚至可出现破溃出血的情况, 一般无自觉症状, 偶感瘙痒、触痛。

6) 分叶状毛细血管瘤 (又称化脓性肉芽肿) 是一种皮肤良性肿物, 多在外伤后形成, 因其血管丰富, 增长快, 易出血, 故难以自行消除, 这种血管瘤的特征为以毛细血管增生并形成的小叶状结构, 多呈单发息肉状, 极少数可出现多发性卫星样损害。

(2) 交界性血管瘤

交界性血管瘤的表现较为多样, 患者可出现皮肤黏膜上紫红色斑块或结节, 色泽深浅不一, 由于瘀斑或毛细血管扩张而常常边缘不清, 可伴有皮肤表面温度升高、静脉曲张、紫癜、瘀斑等症状, 且伴疼痛。

(3) 恶性血管瘤

恶性血管瘤在发生转移后患者的个体症状各不相同, 常见的转移部位有肝、肺、骨、脑。远处转移可以无明显症状, 也可以引起转移器官的功能障碍。

综上, 正常细胞转变为肿瘤细胞后就具有异常的形态、代谢和功能, 并在不同程度上失去了分化成熟的能力。它生长旺盛, 并具有相对的自主性, 即使后来致癌因素已不存在时, 仍能持续性生长, 不仅与机体不协调, 而且有害无益。肿瘤压迫血管是很常见的病症^[1-3], 压迫部位的不同将造成不同的生理反应。而压迫血管时, 血管内的流动状态也各不相同。本文采用计算流体力学仿真软件FLUENT, 建立包含颈动脉的血管模型, 研究肿瘤压迫颈动脉后, 血管内血液的流动状态, 为以后研究提供基础和参考依据。

1. 血液流动方程

血管中血液为连续介质, 描述血管中血液的流动可采用流体力学经典的连续方程及动量方程进行描述, 连续性方程及动量方程分别为式 (1) 及式 (2)^[4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + S_d \quad (2)$$

式中, ρ 为血液密度, kg/m^3 ; u 为血液速度, m/s ; P 为压力, N ; τ 为应力张量; ρg 为连续相液体所受重力, N ; S_d 为离散相颗粒相对连续相作用的附加源项。

2. 几何模型与计算条件

本文将压迫血管的肿瘤形状抽象成方形及球形两种形式, 两种肿瘤形状如图1所示。血管网格划分采用四面体网格。选择密度液态水为连续相, 并将液态水密度调整为 1050 kg/m^3 , 以模拟血液密度。采用SIMPLE算法对压力速度进行耦合求解, 设定进口速度为 0.7 m/s , 初始化流场, 开始计算。



图1 两种肿瘤性状

3. 结果与讨论

(1) 肿瘤压迫血管流动分析

经模拟计算得出方形和球形肿瘤压迫条件下, 血管内血液流动状态如图2及图3所示。从图2可以看出, 在方形肿瘤压迫情况下, 血液从进口进入, 随着行进距离的增加, 当到达方形肿瘤边界时, 因为此处的阻挡作用, 血液无法从通过边界, 因此会从肿瘤上方狭窄通过, 因为此处的截面积减小, 在流量不变时, 此处的速度将增大。同样的, 球形肿瘤压迫血管条件下, 也是因为流动截面积的减小, 球形肿瘤上方的血液流动速度也将变大。

在肿瘤的后方, 两种不同形状肿瘤下流动状态有明显差

别。可以看到对于方形肿瘤, 血液在肿瘤后方会产生旋涡。而对于圆形肿瘤, 在肿瘤后方的血液并不会产生旋涡。产生这种差别的原因主要是由于圆形肿瘤相较于方形肿瘤具有更好的流线型特征, 流线型特征可以保持原有的流动状态, 减小旋涡的产生。

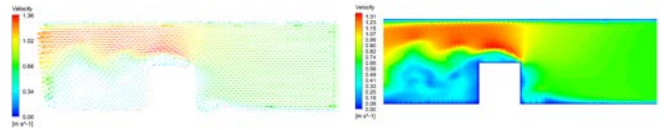


图2 方形肿瘤压迫下血管内流场

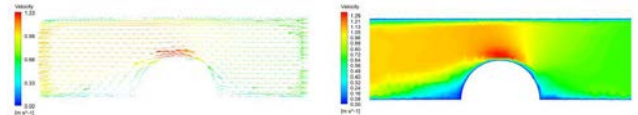


图3 球形肿瘤压迫下血管内流场

(2) 压力场分析

对于血管内流动, 血液的压力分布是一个非常重要的参数, 能够反映血液高速流动时受到阻碍作用下的压力分布情况。从图4中可以看出, 无论是方形肿瘤还是球形肿瘤, 从入口到肿瘤右边界区间内的压力要大于右边界到出口区间内的压力, 产生这种现象的原因主要是因为血液流经肿瘤狭窄处速度增大, 根据伯努利原理, 可得狭窄处及之后的压力将会下降, 因此就造成了右侧压力大于左侧压力。在肿瘤右侧边界处, 有一小区域压力非常高, 形成这一现象的原因是因为肿瘤阻挡, 速度骤减, 从而形成高压区。高压区将对血管壁产生一定的压迫作用。

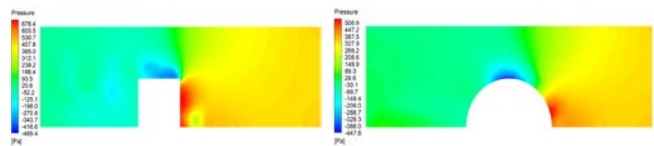


图4 血管内压力场分布情况

4. 结论

本文采用计算流体力学软件ANSYS FLUENT, 对血管进行建模, 并对方形及球形压迫血管进行了数值模拟。结果表明, 方形肿瘤后方会形成旋涡, 球形因为流线型结构的原因, 在后方并不会产生旋涡; 同时, 不论是方形还是球形肿瘤, 在肿瘤右边界处都会产生高压区, 从而对管壁造成一定的压迫。

参考文献:

[1] 贾政军, 张金花. 恶性肿瘤及心脑血管疾病情况的初步分析[J]. 基层医学论坛, 2006, 10 (1): 2.
 [2] 甘建红. 颅底良性肿瘤压迫周围血管的有限元力学模型[J]. 系统仿真学报, 2009 (7): 1851-1855.
 [3] 陈伟达, 金黑鹰, 梅世文, 等. 肠系膜巨大脂肪瘤合并肠系膜血管压迫1例报告[J]. 中国微创外科杂志, 2017, 17 (5): 478-480.
 [4] 姚文瑛, 许松林, 吴云, 等. 基于计算流体力学的血液和血栓通过静脉瓣时流动分析[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60 (4): 339-348.

本文系2020齐齐哈尔医学院大学生创业创新项目 (项目编号: 202011230086) 的结题成果

作者简介: 王盘娜 (2000—), 女, 大学本科, 主要研究方向为血液动力学模拟。