

动脉粥样硬化形成的流体力学因素

赵朝林

(泸州医学院物理教研室)

动脉粥样硬化是一种与脂质代谢障碍有关的疾病.病变主要累及大、中动脉,以动脉内膜脂质沉着,形成粥样硬化斑块为特征.此病多见于中、老年人,是危害人们身体健康的一大病症.它的病因和发病机理很复杂,迄今尚未完全明了.它的病灶具有一定的区域分布:(1)血管弯曲、血管分叉等处其切应力作用强的部位;(2)血管弯曲的内侧管壁、血管分支的前口等部位中血流处于低切变率的流动分离区或湍流区.显然该病的发生与血液在这些部位的流动密切相关.现在以动脉弯曲为例,从流体力学角度对该病的成因作一些分析.

由于血液是悬浮颗粒的非牛顿液体,血管具有弹性;血液在血管内流动是脉动的,显然,我们不能直接引用泊肃叶流动的运动规律.但在很多情况下,对循环系统可作局部模拟,可把血液的流动看成牛顿液体的流动.比如,血液在动脉内流动时,血液流动的脉冲振幅较小,波被衰减,在生理学振数下,血液流动在各瞬间内可看成为定常流动;虽然血液呈非牛顿性,但在切变率 $\dot{\gamma}$ (即速度梯度 $\frac{dv}{dx}$)较大,比如 $\dot{\gamma} > 100\text{s}^{-1}$ 时,就可把血液看成牛顿液体.人体的动脉血管的切变率大

多在 100s^{-1} 以上,因此,除毛细血管外,在研究血液在动脉中流动时把血液看成牛顿液体是允许的.当动脉的某些部位因某些病变而硬化,其弹性减弱,就可将其视为刚性管.于是血液在这种动脉内流动就可简化为牛顿液体在刚性管内的泊肃叶流动.现就以此为依据来讨论血液在弯曲动脉内的流动.

当牛顿液体在弯曲刚性管内流动时,液体的每一体元必须改变其运动方向,正如质点作曲线运动一样,必须在垂直于运动方向上有力的作用.这个力在液体中来自侧向的压强梯度,其方向是从外侧指向弯曲的内侧.该压强梯度在一个截面上大体是均匀的,即对于一给定质量的液体元所施的侧向力接近相等,亦即给出相同的侧向加速度,如图1中的(a).但由于运动较快的液体元比较难于改变运动方向,因此,原来在管中心运动较快的液体有向弯曲外侧移动的倾向,从而使轴向速度分布的剖面产生如图1中的(b)的变化.原来在中心运动的液体外移,将由近管内侧壁处运动较慢的液体所置换,结果形成一个横向循环或二次流动,图1中的(c)即为管截面上流线的投影.由于轴向流速的分布不像直管那样以中心轴对称分布,其外侧

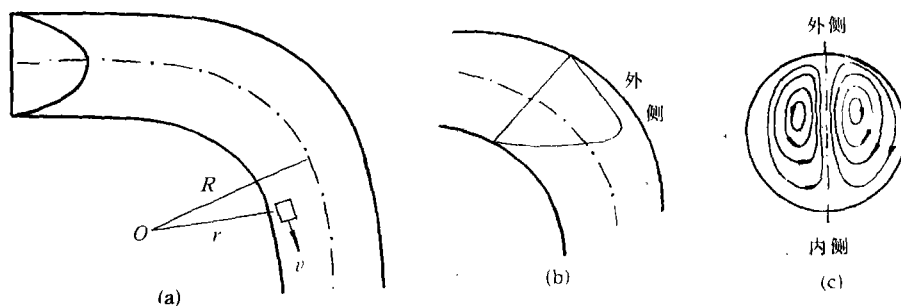


图1 在弯曲管内液体的运动 (a)液体元应有指向内侧的加速度 v^2/r (b)轴向速度分布剖面图 (c)二次流动

管壁附近有最大数值,切变率也比直管泊肃叶流动时大得多,相应的切应力也大得多,故弯曲管中的压强损失也大得多.压强和切应力的变动将会引起内皮细胞的损伤.应力较高的部位,动脉的内皮将变形、肿胀,最后发展成糜烂.若进一步用壁面切应力为 $38\text{N}/\text{m}^2$ 作用到内皮表面上,内皮表面则发生显著变化.由于内皮受损,使内皮层通透性增加,以致脂蛋白可以较容易地通过内皮细胞进入内膜,此时如果又有血浆脂蛋白增多,势必有更多的脂蛋白移入而在内膜中沉着或堆积,形成粥样硬化斑块.结果导致动脉硬化变窄.

当动脉弯曲曲率较大时,血液沿弯管内侧流动就与液体绕过圆柱体的流动相类似.如图2所示.液体在弯曲管入口处(相当于圆柱体的前缘点)速度一定,随后管内侧流速增大,在赤道平面最大,在其后重新减小.而压强变化正好与此相反.很明显,在流动过程中,压强梯度将首先阻止物体表面附近运动缓慢的液体层,速度剖面将变形,在某点P反向压强完全阻住了壁面附近的液体,液体元静止,甚至形成逆流.液体就从边界层排出到液体主流之中,这就是分离现象.P点叫分离点.自P点出现与主流分

开的区域叫分离区.分离区中接近下游的点叫再附点(如弯曲管中的K点).分离区中的液体由于逆流而形成涡旋.当雷诺数相当大时,分离现象显著,P点上移,K点下移,分离区向下游延伸,涡旋转化为湍流.在弯曲管(动脉)的分离区中的液体(血液)一方面与主流之间缺少液体交换,该区内管壁的氧气和营养物质因供应不足,而导致血管壁性能下降和退化;另一方面该区内血液中的血小板就向涡流中心移动,且在涡流中心滞留而不能较快逸出.分离区内血流速度缓慢,血小板间或血小板与其他细胞间发生碰撞机会增多,形成聚集体.因此分离区的涡流为血小板聚集提供了重要场所.由于分离区都接近血管壁,血液同血管壁相接触的边界层纤维蛋白原浓度增加,所以在分离点同再附点相近处,可能会形成纤维蛋白的网络构造.纤维蛋白原的浓度越高,由纤维蛋白原“牵拉”而使红细胞、血小板形成的聚集体越大,红细胞叠连结构就在分离区内形成.如果血液中的脂质(胆固醇、甘油三脂)浓度增多,它往往就被分离区内的网状结构所羁留,于是动脉就隆起硬化,即动脉硬化斑块生成.所以高血脂是动脉硬化的一个危险因子.

由上所述,由于动脉弯曲,血液流动不可避免地要产生二次流动、边界层分离;若血液中脂质含量增高,脂质往往就会在血管的内、外侧沉着或羁留,即斑块生成,血管壁变硬、管腔狭窄,这就是动脉粥样硬化.可见二次流动、边界层分离是形成动脉粥样硬化的流体力学因素,而血液中脂质含量增高是它发生的物质基础.

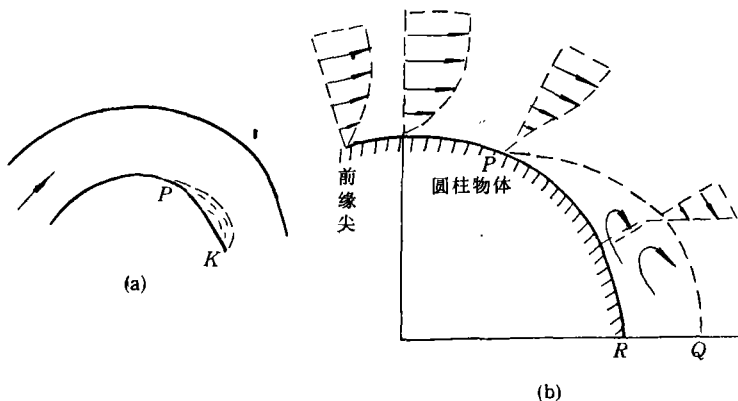


图2(a) 液体在弯管内侧产生分离区. (b) 液体沿大曲率物体流动,产生边界层分离(虚直线表流线,虚曲线表速度剖面)