

高等医学院校选修课教材

血液流变学

主编：王天佑



新疆人民卫生出版社

血液流变学

主编 王天祐

审订 李书田

李芳孝

责任编辑 张映畴

新疆人民卫生出版社出版

新疆新华书店发行

新疆建工印刷厂印刷

850×1168毫米 大32开本 5.76印张

1989年7月第1版第1次印刷

印数 1—4000

ISBN 7—6372—0058—0

R·59 定价：2.30元

前 言

本教材是在我院开设选修课讲义的基础上编写的，增编了近年来国内外最新进展资料，着重介绍了基本理论和研究方法，力求为临床应用和研究打下基础，以体现时代性、科学性和实用性。

本教材可作为医学院校研究生教材、医学生选修课教材，可供24~42学时教学选用，亦可作为临床医学工作者参考用书。

济宁医学院血液稀释研究所王保平编写了第三章第三节“血液稀释疗法”；石河子医学院附属医院王天慧编写了第三章第一、二、四、五节；石河子医学院物理教研室王天佑编写了第一、二、四、五章，并对全文进行了归纳整理。

新疆医学院物理教研室李书田教授，李芳孝副教授审定了全文。桂林医学院秦任甲副教授、

长治医学院明纪堂副教授、锦州医学院陈玉珂副教授、大理医学院谢勇讲师也参加了编审工作。

编写中有不当之处, 请不吝指教, 以便修订。

石河子医学院物理教研室

绪 论

科学发展到今天，建立在生物学基础上的医学模式已不能适应时代的需要。美国国家科学院研究得出结论：“生物学各个经典分支学科已无法引导人们对生命的各种各样表现作出现代的认识和评价”。因此有必要建立新的医学模式，把医学科学建立在生物化学、生物物理、生物数学的基础上。

生物物理学是本世纪中叶以后逐渐形成的一门边缘学科，它利用物理学的理论、方法与技术，研究生命物质的物理性质和生命活动的物理规律。从而探明生命系统中物质、能量、信息三者的关系及其运动和变化规律，这对于阐明生命的本质来说，无论在理论和实践上，意义都是十分重要的。

生物物理学是既繁荣而又继续成长着的学科，名目繁多，包罗万象，本文只涉及生物物理学中生物流变学这一分支。

1920年美物理化学家Bingham在对油漆、糊状粘土、印刷油墨的研究中，认为物质的变形与流动在科学上具有普遍的重要意义，以后逐渐形成一门新的分支科学，称为物质形变与流动的科学——流变学。

流变学的理论准备在上个世纪就已开始，对于弹性体的形变，我们已经有了经典的弹性理论，它建立在虎克定律，即应变与应力成正比的基础上；而对流体的流动也有了经典的流体力学，它是建立在牛顿粘滞性定律，即切变率与切应力成正比的基础上。

然而在我们研究的各种物质运动中，虎克定律与牛顿粘滞性定律不是都能成立的，因此在流体力学与弹性力学相互渗透的基础上发展了流变学这一学科。

流变学的特点之一在于：它所研究的重点，既不限于物体的

粘性流动，也不限于物体的弹性变形，而是兼有这两种物理属性或由两种物理属性并合而成的物体的新物理属性——粘弹性。流变学的特点之二在于：它的研究内容和范围不仅从宏观的角度，涉及物体的宏观力学性质和行为，而且从微观的角度，涉及构成物体的物质性质和内部微观结构以及它们物理化学行为和过程与物体的宏观力学行为和性质的关系。

流变学与生物或医学相结合形成一个新的边缘学科——生物流变学。1948年第一届国际流变学会议上提出这一概念。它是研究生物机体及组成系统、器官、细胞和生物大分子的流变性及它们所表现出的生命活动过程中流变现象的一门新兴边缘基础科学。

生物流体以及构成生物的器官、细胞、肌肉、神经、血管、结缔组织、骨骼等软硬组织表现出特异的流动性和变形性，这种特异流变性最为典型地表现在循环于血管中的血液上，因此有关血液的牛顿或非牛顿型流动的流变学就成为生物流变学中的一门大的分支科学——血液流变学。

血液维持着生命，古希腊哲学家认为“血液就是生命”。血液的流动性，是影响血液在血管内的不断循环流动，组织和器官的血液供给以及保证血液履行其供给组织和器官以正常生理活动所必需物质的营养功能，维持内环境的相对稳定和肌肉、神经的正常兴奋性功能，免疫功能以及体液调节功能的重要因素。一旦血液流变性质异常，造成血液淤滞，全身和局部微循环发生障碍，则导致组织脏器缺血缺氧，代谢失调和功能障碍等一系列后果。因此血液流变学诸因素可作为人体生理功能和病理变化的灵敏流变学指标，这对于临床诊断、疗效观察和疾病预防都有重要意义。

大面积进行血液流变学诸项指标普查，一些表面健康但伴有血液粘度诸因素升高者，可进一步检查成因；从而对癌症、心脏病、异常红蛋白症以及某些免疫性疾病做出早期防治。

有抑制地降低血液粘度的“血液稀释疗法”，对许多疾病治疗均收到出人意料的良好疗效。从科学本质来看，这是一种典型的以增强血液流动性为主的“血液流变学”疗法，这和中医“活血化瘀”疗法也是一脉相承的。因此，采用血液流变学研究方法，探讨中医理论及阐明中医药的作用机理也将成为重要研究课题。

总之，血液流变学的研究对病理解剖学、病理生理学、诊断学、预防医学、药理学、老年医学、人工脏器、人造血液等都有着重要意义，也有助于我们对一些疾病发生机理的深入了解和认识。

目 录

绪论

第一章 流变学基础	(1)
§ 1—1 应力, 应变.....	(1)
§ 1—2 牛顿流动.....	(3)
一、牛顿粘滞性定律.....	(3)
二、切变率.....	(5)
三、流动曲线.....	(7)
§ 1—3 非牛顿流动.....	(7)
一、非牛顿流体.....	(7)
二、非牛顿流体屈服应力.....	(9)
三、非牛顿流动公式描述.....	(11)
1. 幂定律.....	(12)
2. Bingham公式.....	(12)
3. Hersche—Bulkley 公式.....	(13)
4. Casson 公式.....	(14)
§ 1—4 粘弹性.....	(16)
一、粘弹性体.....	(16)
二、粘弹性体力学模型.....	(16)
三、动粘弹性.....	(18)
§ 1—5 圆管内的流动.....	(21)
一、圆管内的层流.....	(21)
二、stokes关系式.....	(21)
三、速度分布及流量.....	(23)

四、泊肃叶流动	(26)
§ 1—6 湍流	(28)
一、临界雷诺数	(28)
二、阻力系数及湍流的流量	(28)
第二章 血液的流变性	(31)
§ 2—1 血液的粘度	(31)
一、血液	(31)
二、血液粘度	(32)
1. 血浆粘度	(32)
2. 血液的表观粘度及屈服应力	(33)
§ 2—2 影响血液粘度的因素	(34)
一、血细胞压积对血液粘度的影响	(34)
二、红细胞聚集作用对血液粘度的影响	(36)
三、红细胞变形能力对血液粘度的影响	(38)
四、切变率对血液粘度的影响	(41)
五、血浆蛋白含量对血液粘度的影响	(42)
六、其它影响血液粘度的因素	(44)
§ 2—3 红细胞变形性	(46)
一、红细胞变形性在血液流动中的意义	(47)
二、影响红细胞变形性的因素	(50)
三、红细胞可变形性的生理意义	(57)
§ 2—4 血小板流变性	(58)
一、血小板粘附, 聚集	(58)
二、血小板流态; 止血及血栓形成	(65)
§ 2—5 白细胞的流变学	(68)
一、白细胞的趋边; 粘附	(68)
二、白细胞的变形	(70)
§ 2—6 血液在圆管内的流动	(70)
一、速度分布	(71)

二、流量	(72)
§ 2—7 微血管中的血液流变性	(74)
一、血浆层	(74)
二、轴向集中	(77)
三、Fahraeus—Lindqvist 效应	(78)
四、Fahraeus—Linagvist 效应的逆转	(82)
五、微循环中的脉动流	(84)
六、血细胞在微血管中的流变行为	(85)
第三章 血液流变学在临床中的应用	(87)
§ 3—1 临床检验中的各项指标及相互关系	(89)
§ 3—2 在疾病诊断, 治疗与预防中的价值	(92)
一、心脑血管疾病诊断, 治疗与预防中的价值	(93)
二、癌转移预防中的意义	(96)
三、休克与白细胞	(98)
四、中医机理探讨与中药疗效判定	(104)
五、其它疾病诊断治疗中的应用	(107)
§ 3—3 血液稀释疗法	(110)
§ 3—4 降低血液粘度途径与方法	(117)
§ 3—5 血液流变学及组织供氧与药物治疗的关系	(120)
第四章 血液流变诸项指标测定技术	(122)
§ 4—1 粘度的测定	(122)
一、毛细管粘度计	(122)
二、锥—板粘度计	(125)
§ 4—2 红细胞变形性的测定	(128)
一、粘性法	(129)
二、电导法	(130)
三、激光衍射测量法	(132)

四、微吸管法	(133)
五、核孔膜滤过法	(134)
§ 4—3 红细胞聚集性测定	(136)
一、粘性测量法	(136)
二、细胞沉降法	(137)
三、红细胞电泳率测定	(139)
§ 4—4 纤维蛋白原测定	(141)
§ 4—5 血小板粘附和聚集功能的测定	(142)
§ 4—6 中风预报	(147)
§ 4—7 血液粘弹性测定	(149)
§ 4—8 微循环各项指标测定	(154)
§ 4—9 血液流变测定的标准化问题	(156)
第五章 血液流变学未来和展望	(161)

第一章 流变学基础

§ 1-1 应力 应变

一、应力

研究物体变形，流动以及弹性和粘弹性时，我们常分析其内力。内力是指物体内部各部分间相互作用的力。对于在外力作用下，处于平衡状态的物体，假如我们所要讨论的是作用在某一截面上的内力，仅仅知道内力在截面上的总和还是不够的，还必须知道内力在截面上各点的分布，因此引入应力概念。

应力为材料单位面积上所受的作用力。

如图 1-1 所示，截面上任取一面积元 ΔS ，设 ΔS 上所受力为 ΔF ，则其应力为：

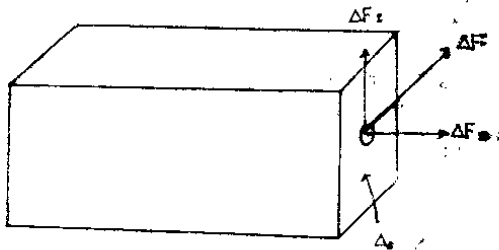


图1-1 应力

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta S} = \frac{dF_t}{dS} \quad (1-1)$$

n 表示 ΔS 面上的法线方向。

如果把 ΔF 分解成垂直于截面分力 ΔF_n 和平行于截面的分力 ΔF_t ，则可得：

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta S} \quad (1-2)$$

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta S} \quad (1-3)$$

我们称 σ 为正应力， τ 为切应力。

应力单位为 $N \cdot m^{-2}$ 。

应力为矢量，可以用矢量法则分解和合成。应力和它在切向及法向上的分量满足：

$$T^2 = \sigma^2 + \tau^2 \quad (1-4)$$

二、应变

物体在外力作用下发生形状和大小改变，称为形变。较为常见为长度、体积和形状三者所发生的改变。

从数量上表示各种形变程度，引入以下概念：

1. 张应变：

物体在受到一定外力拉伸时，发生长度变化 ΔL 和物体原来长度 L 的比值来表示变化程度，称张应变。即

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1-5)$$

2. 体应变：

物体受到压力，体积发生变化但不改变形状时，体积变化

ΔV 与原体积 V 之比称为体应变。即：

$$\theta = \frac{\Delta V}{V} \quad (1-6)$$

3. 切应变：

物体受切向力作用，发生只有形状变化而没有体积变化的弹性形变。如图1—2，物体底面固定，顶面受到一切力作用，产生切变，其程度以 $\frac{\Delta x}{L}$ 来衡量，这一比值称为切应变，以 γ 表示，即：

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} = \text{tg}\varphi \quad (1-7)$$

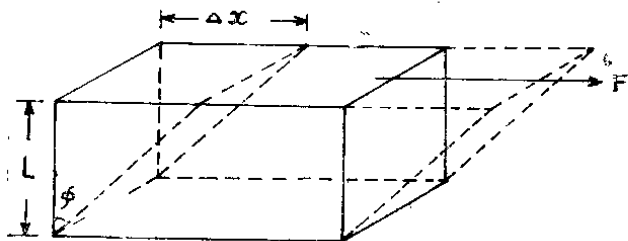


图1—2 切应变

上面三种应变都是无量纲的，它们与物体长度，体积和形状都没有关系。

§1—2 牛顿流动

一、牛顿粘滞性定律

实际液体都具有不同程度的粘滞性（Viscosity）。当流速

不太大时，粘滞液体表现为分层流动，相邻各层因流速不同而相对滑动，彼此不相混合，液体的这种流动状态称为片流或层流。

层流时各液层之间有内摩擦力，即粘滞力。现在我们讨论影响粘滞力大小的因素。把液体放在相距为 L 的两块平行板A和B之间，如果B板固定不动，而A板受一恒值切向力 F 作用，短时间后A板以一定速度 v_0 从左向右运动，如图1--3所示。

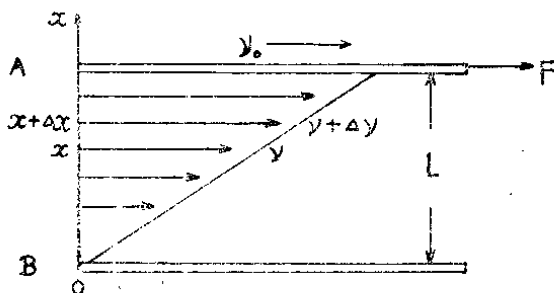


图1-3 Couette流动

由于分子力的作用，在A、B两板表面上各附着一层液体，附着在B板上液层速度为零，附着在A板上液层以速度 v_0 运动。A、B两板间液体分层平行于A板运动，液体速度从上板到下板逐渐减小，各层液体流速不变，成稳定层流，一般叫Couette流动。由于相邻两液层之间有相对运动，快的一层给慢的一层以拉力，慢的一层给快的一层以阻力，这一对力就是粘滞力。

设在OX轴上任一点 x 处流速为 v ， $x + \Delta x$ 处流速为 $v + \Delta v$ ，我们把 $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ 在 $\Delta x \rightarrow 0$ 时的极限 $\frac{dv}{dx}$ 称为在 x 方向的速度梯度。即

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta x} = \frac{dv}{dx} \quad (1-8)$$

在上述情况下，

$$\frac{dv}{dx} = \frac{v_0}{L} \quad (1-9)$$

牛顿用水、乙醇之类的均质流体做实验得出，两液层之间粘滞力F大小是和液层的接触面积S，以及该处的速度梯度 $\frac{dv}{dx}$ 成正比的，即

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dx} \quad (1-10)$$

这个公式叫作牛顿片流关系式，即牛顿粘滞性定律。

式中比例系数 η 表示液体流动难易程度。其值取决于液体的性质并和温度有关，称为液体粘滞系数或粘度。因此粘度是材料常数，其国际制单位是帕斯卡·秒(Pa·S)，厘米克秒制单位是泊(P)， $1 \text{ Pa} \cdot \text{S} = 10 \text{ P}$ ， $1 \text{ P} = 100 \text{ CP}$ 。血液流变学中，我们常用厘泊(或毫帕斯卡·秒)来作粘度的单位。

符合牛顿粘滞性定律的流体称为牛顿流体，在确定温度下，牛顿流体粘度为一常数，随着温度升高，粘度降低，这是由于热在液体中产生了原子级大小的微小空间。液体内运动，只有当一个分子能推开另一个分子时才能发生，因此若有一空间能容纳被推开分子时，运动就容易了，因而粘滞性降低。

实验证明，水、乙醇、血浆、血清等均质流体都是牛顿流体，血液因含有血细胞，不是牛顿流体，其粘度随 $\frac{dv}{dx}$ 而变化，因此 η 不是常量。

二、切变率

液体流动时，各层之间内磨擦力(即粘滞力)F是与接触面积相平行，故称切向力，单位面积上切向力称为切应力，即 $\tau = F/S$ 故式(1-10)可写成：

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad (1-11)$$

上式说明切应力与速度梯度成正比。我们分析Couette流动。如图(1-4)所示,流体中取长方形OABC,经过t秒后,变成平行四边形OA'B'C。

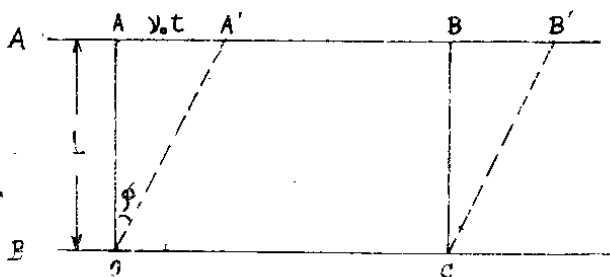


图1-4 Couette 流

$$\text{则切应变} \quad \gamma = \text{tg}\phi = \frac{v_0 t}{L}$$

$$\text{由式(1-9)} \quad \frac{dv}{dx} = \frac{v_0}{L}$$

$$\therefore \gamma = \frac{dv}{dx} \cdot t$$

切应变 \$\gamma\$ 对时间求导

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dx} \quad (1-12)$$

即得切应变对时间的变化率,称为切应变率。其单位为 \$\text{S}^{-1}\$。可简称切变率。

式(1-12)说明在Couette流动中切变率等于速度梯度。

将式(1-12)代入式(1-11)则得:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1-13)$$

切应力与切变率成正比,亦为牛顿粘滞性定律。