

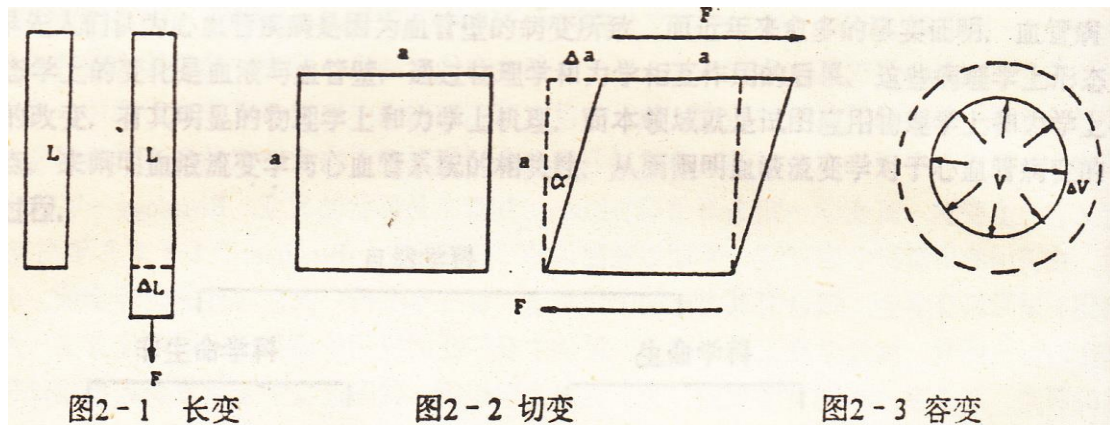
第 II 章 流变学基础

应力

通过一点，作一平面，这一平面上的力与该平面面积之比值称为应力。应力即为单位面积上所承受的力。这种力可分解为两个方向。垂直于该平面的力称为正应力，而平行于这一平面的力为切应力。

应变

物体在应力作用下，会发生变形，这种行为称为应变。应变可分为三种：长变、切变、容变。图 2-1~3 示这三种应变的情形（图中 F 与箭头示力作用的方向）。



长变：原先长度为 L ，施加应力以后长度为 $L + \Delta L$ ，则 $\Delta L/L$ 为长变。

切变：原先为棱长为 a 的正方体，上表面与下表面施加相反方向切应力以后，使这一正方体发生切向变形，使其原先垂直的棱 a 产生一个 α 角度的偏移。 $\tan \alpha = \Delta a/a$ 称为切变。

容变：原先的体积 V ，在应力作用下，体积增加至 $V + \Delta V$ ，那么 $\Delta V/V$ 称为容变。

长变、切变、容变均为无量纲数，而且往往是混杂发生的。

应变率

上述应变值，未考虑时间的问题，应变还与时间有关，应变与时间相除，即成为应变率。如变率的单位为 s^{-1} 。长变被时间相除，即称为长变率。切变被时间相除，即为切变率，切变率又称为速度梯度，容变被时间相除为容变率。

流体与固体

物质可分为两大类，即流体和固体。流体中又分为气体和液体。但从流变学、物理化学、胶体化学的角度，世界很多物质属分散体系，属于混合体系。如烟，是固体分散在气体之中，如牛奶是固体分散在液体之中；如面包和饼干是气体分散在固体之中；如面粉团是半固体；如面粉羹是半液体。总之世上很多物质既非属于固体，也非属于流体，而属于两者之间。流变学的产生，很大程度上是因为要对这些非纯固体和流体的物质进行研究相关的。

流体中的牛顿流体和非牛顿流体

流体可分为两大类：牛顿流体和非牛顿流体。有些流体服从牛顿流动定律。这种流体称为牛顿流体。另有一些流体不服从牛顿流动定律，被称为非牛顿液体。图 2-4 是一个阐明牛顿流

动定律的例子。

在两块平板之间高度为 H ，内充满液体，如上板面保持不动，而下板面以 V 的速度朝右运动，由于液体因粘附于两块板面，靠下板的液体与下板一样的速度往右运动，而粘附于上板面的液体保持静止不动，中间的液层将依次由底至上的层次由 $V \sim 0$ 的速度分布往右运动。如果施加在底面上的切应力为 τ ，那么牛顿定律的表示式为 $\tau = \eta (V/H)$ ，式中 V/H 为速度梯度，也即为变率 (γ)，也就是说 $\gamma = V/H$ ， η 为牛顿粘度，上式就变成 $\tau = \eta \gamma$ 。这就是牛顿流体流动定律，凡是符合此定律的流体称之为牛顿流体。反之如果不服从此定律的流体就称为非牛顿流体，当然也用别的定律的方程来描述之。

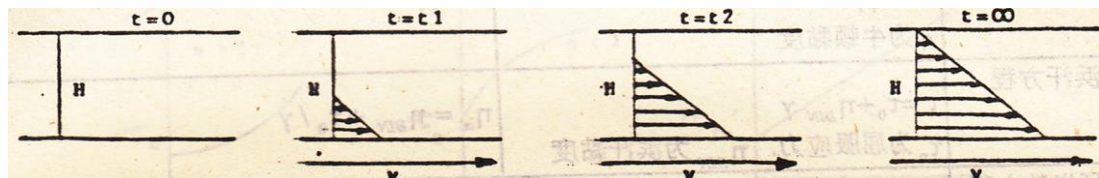


图 2-4 牛顿流动与牛顿流体

流动的类型

按流体的性质，可按如上所述分为牛顿流动和非牛顿流动；按流体所在流床，可分为管流和 Couette 流，前者为在某种形状的管子中的流动，后者为两个平行板间的流动；按照流态，可分层流和湍流，前者为有秩序的流动，后者存在着垂直的和逆向的流动。

层流和涡流的关系和雷诺数

流动的过程中失去层流的状态，就称为涡流，涡流的形成与流体的性质、流动的速度、流床的几何形状相关。由层流发展为涡流可以用一个雷诺 (Reinold number) 来表示。雷诺数用 Re 来表示。即 $Re = \rho vD / \eta$ ，式中 ρ 为流体比重，单位为 g/cm^3 ； v 为流体速度，单位为 cm/s ； D 为流管直径，单位为 cm ， η 为粘度，单位为泊，即为 $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1}$ ，如此看来恰好雷诺数是一个无量纲数。在物理意义上是流体运动的惯性力与摩擦力之间的比值。当雷诺数由 0 至 2300 之间，多为层流；当雷诺数由 2300 或更大时多为涡流。此外涡流的形成还与流床的分叉、弯曲、狭窄、增宽有关，如上这种几何形状容易产生涡流。血液的雷诺数大多情况下小于 2300，故血液在动、脉静中的流动多为层流。脑血管病发病处证明多为分叉，弯曲、狭窄、增宽有关，这种几何形状容易产生涡流。血液的雷诺数大多情况下小于 2300，故血液在动、静脉中的流动多为层流。脑血管病发病处证明多发于分叉，弯曲、狭窄、增宽处、因此证明脑血管病的发病与力学上的涡流及其应力对血管内皮细胞作用不均一性而导致损伤有关。

如何区分牛顿流体和非牛顿流体

1、本构方程对应力 τ 与切变率 γ 曲线回归和拟合

本构方程系体现切变率 γ 与切应力 τ 之间的关系式，通常用 $\tau = f(\gamma)$ 表示非依时性本构方程，或用 $\tau = f(\gamma, t)$ 表示依时性本构方程 (式中 t 表示时间)，表 2-1 示常用于血液流变学的本构方程 (表中 τ 为切应力， γ 为切变率)。表中列出本构方程名称、式子、和表观黏度 (η_a) 的表示方法。将实验获得的应力和切变率曲线进行各种方程的拟合。检查出那一个方程的回归系数接近于 1，那一个方程的标准估计误差最少，这就可以决定了这种流动最符合于什么方程。符合于牛顿方程的，即称为牛顿流体。相反，符合于其他方程的即符合于其他方程的流体。

表 2-1 常用于血液流变学的本构方程（表中为 τ 切变应力， $\dot{\gamma}$ 为切变率）。

方程名称	方程式(τ 切应力, $\dot{\gamma}$ 切变率)	表现粘度 η_a
牛顿方程	$\tau = \eta \dot{\gamma}$ η_N 为牛顿黏度	$\eta_a = \eta_N = \text{常数}$
宾汉方程	$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma}$ τ_0 为屈服应力 η_B 为宾汉黏度	$\eta_a = \tau_0 / \dot{\gamma} + \eta_B$
幂指数方程	$\tau = \eta_p \dot{\gamma}^n$ η_p 为幂指数黏度常数 n 为幂指数	$\eta_a = \eta_p \dot{\gamma}^{n-1}$
赫尔薛一巴尔克方程	$\tau = \tau_0 + \eta_H \dot{\gamma}^n$ τ_0 为屈服应力 η_H 为赫尔薛一巴尔克黏度常数 n 为幂指数	$\eta_a = \tau_0 / \dot{\gamma} + \eta_H \dot{\gamma}^{n-1}$
卡松方程	$(\tau^{1/2} - \tau_0^{1/2})^2 = \eta_C \dot{\gamma}$ τ_0 为屈服应力 η_C 为卡松黏度	$\eta_a = \eta_C + \tau_0 / \dot{\gamma} + 2 \tau_0 \eta_C \dot{\gamma}^{-(1/2)}$
黄敬荣方程	$\tau - \tau_0 = \eta_N \dot{\gamma} + CA \dot{\gamma}^n \exp(-C \int_0^{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}^n dt)$ τ_0 为屈服应力, η_N 为牛顿黏度, 令由缢钱体与分散的红细胞间的反应其级数为 n , 其反应的速度常数为 C , A 系指当切应力为零时缢钱体与分散的红细胞间的平衡系数, t 为切变率 $\dot{\gamma}$ 变为最大值时的时间	$\eta_a = [\tau_0 + \eta_N \dot{\gamma} + CA \dot{\gamma}^n \exp(-C \int_0^{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}^n dt)] / \dot{\gamma}$

上表中前五个为非依时性, 最后一个为依时性, 其参数可回归得, 用来描述血液流变学性质。

2、对切应力 τ 和切变率 $\dot{\gamma}$ 曲线作图

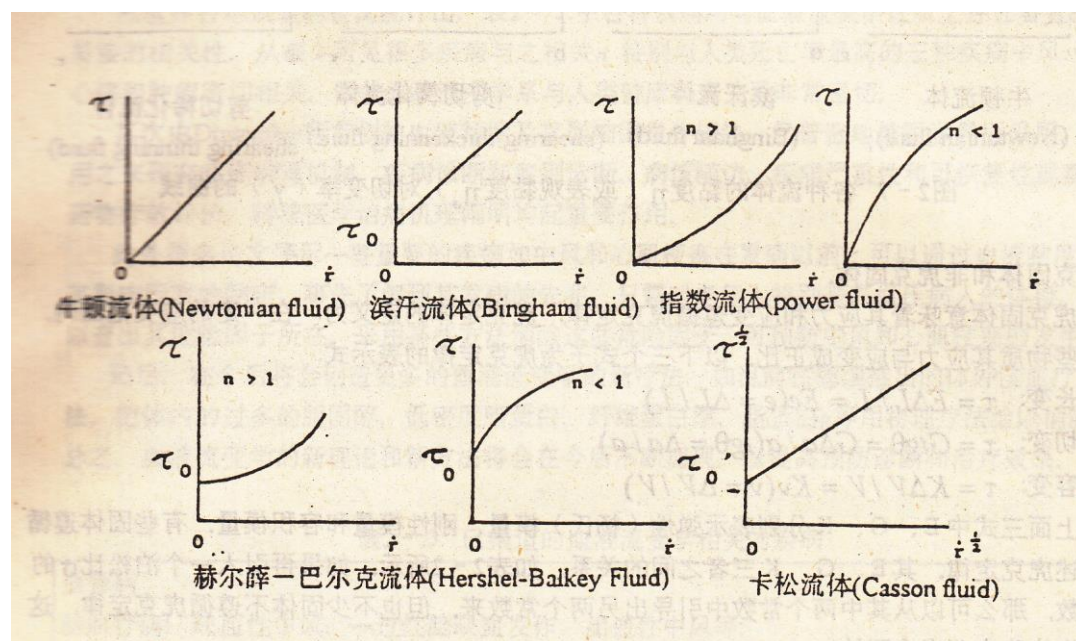


图 2-5 示七种曲线的特征

按图的形状即可以判断出是否属于牛顿液体，还是属于非牛顿液体。图 2-5 示七种曲线的特征，其中牛顿液体的特征必需是一条通过原点的直线。而非牛顿液体则为曲线，或不通过原点的直线或曲线。

3、管流中流量 Q 对于压力 P 作图

作为管流，其流量的大小与压力相关，如将流量 Q 与压力 P 作图，将可区分出牛顿流体和非牛顿流体(图 2-6)，牛顿流体示流量压力的特征为一条通过原点的直线。否则则为非。

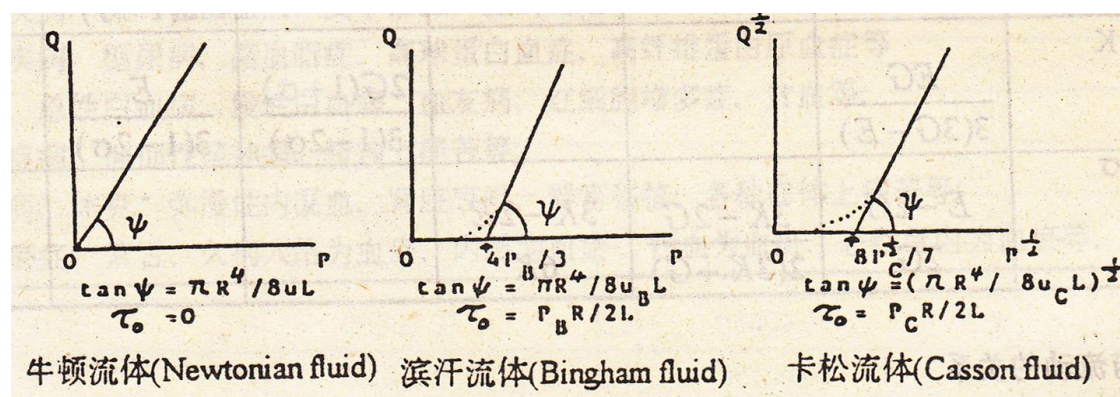


图 2-6 三种圆柱管流的流量 (Q) 对压力 (P) 的曲线

4、表观粘度 η_a 对切变率 γ 作图

将流体在不同切变率下测定的表观粘度与切变率作图 (图 2-7)，则获得各种形状的图线。如果粘度为一个常数，则为平行于切变率轴的一条直线，这就是牛顿流体 (对于牛顿流体而言，牛顿黏度就是表观黏度，是一个常数)。否则就是非牛顿流体，非牛顿流体大致按照形状可分为两类：一类为剪切稀化流体，即随着切变率的增大而粘度下降；另一类为剪切稠化流体，即随着切变率的增大而黏度增大。

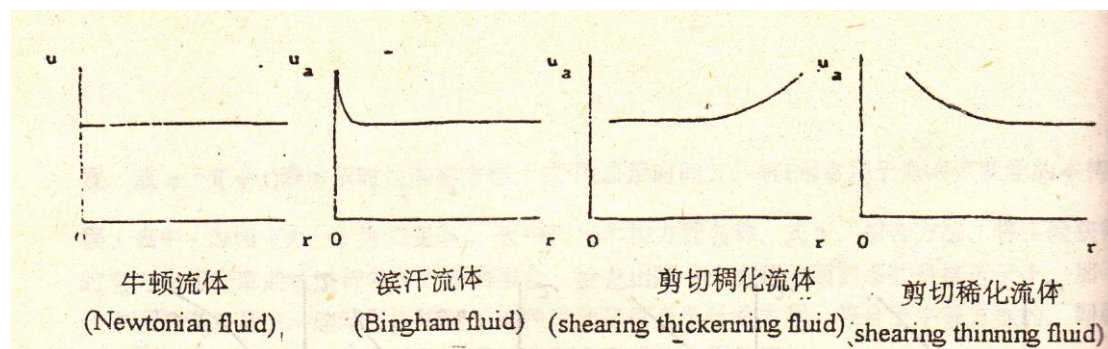


图 2-7 各种流体的表观黏度 η_a 对切变率 γ 所作的曲线

虎克固体和非虎克固体。

虎克固体意味着其应力和应变遵循虎克定律。虎克定律的定义为：在一定的应力范围内，某些物质其应力与应变成正比。以下三个式子为虎克定律的表示式：

长变： $\tau = E \Delta L / L = Ee$ ($e = \Delta L / L$ ，即长变)

切变： $\tau = G \tan \theta = G \Delta a / a$ ($\tan \theta = \Delta a / a$ ，即切变)

容变： $\tau = K \Delta V / V = Kv$ ($v = \Delta V / V$ ，即容变)

上面三式中 E、G、K 分别表示弹性 (或杨氏) 模量、刚性模量和容积模量。有些固体遵循上述虎克定律。其 E、G、K 三者之间的关系。如表 2-2 所示。如果再引入一个泊松比 σ 的

参数，那么可以从其中两个常数中引导出另两个常数来。但也不少固体不遵循虎克定律，这些物体称为非虎克固体。

表 2-2 G、K、E 和 σ 之间的关系

	G, E	G, K	E, K	G, σ	E, σ	K, σ
E	-	$9KG/(3K+G)$	-	$2G(1+\sigma)$	-	$3K(1-2\sigma)$
G	-	-	$3EK/(9K-E)$	-	$E/2(1+\sigma)$	$3K(1-2\sigma)/2(1+\sigma)$
K	$EG/3(3G-E)$	-	-	$2G(1+\sigma)/3(3-2\sigma)$	$E/3(1-2\sigma)$	-
σ	$(E-2G)/2G$	$(3K-2G)/2(3K+G)$	$(3K-2E)/6k$	-	-	-

变形与流动的关系

变形可分为两类，一类为弹性变形（或可逆变形），另一类为非弹性变形（或非可逆变形）。前者为当应力撤消以后，物体恢复原状，后者则为应力撤消以后，物体不再恢复原状，前者则为变形，而后者则称为流动，此两者均为变形之列，前者为可逆变形，而后者是不可逆变形，变形是流动的基础，流动的起始；流动是变形在时间和空间上的继续。变形存在于流体和固体之中，而流动仅在于流体之中，如何区分流体和固体就在于此。流变学的特点就在于专门研究那些非属于固体也非属于流体的中间体的流动和变形的问题，这些物体的研究大大地促进了流变学的发展。

血液流变学与医学的关系

表 2-3 已报道的血液流变学相关的疾病

脑血管病：缺血性中风、一过性脑缺血发作、出血性中风等；
冠心病：急性心肌梗塞、心绞痛、心律失常等；
其他血管病：高血压、血栓闭塞性、脉管炎、视网膜血管病、深静脉血栓等；
肺部疾病：慢性支气管炎、哮喘性支气管炎、慢性支气管炎伴肺气肿、肺心病等
肿瘤和免疫性病：恶性肿瘤、多发性骨髓瘤、系统性红斑狼疮、动物肿瘤、皮肤病、人类白血病、动物白血病等；
传染性疾病：肝炎、肝硬化腹水等；
出血性疾病：流行性出血热、皮下紫癜、上消化道出血等；
代谢性疾病：糖尿病、高血脂症、高球蛋白血症、巨球蛋白血症、高纤维蛋白原血症等
血液病：急性白血病、慢性白血病、血友病、红细胞增多症、血小板增多症、贫血等；
精神科疾病：抑郁性精神病、精神上痛苦等；
其他疾病：休克、弥漫性内凝血、肾脏衰竭、器官移植等；
中医血瘀症：紫舌、久病人络为血瘀、污血为血瘀、恶性留内为血瘀等。

从世界各地发表的论文统计出，表 2-3 中各种疾病均与血液流变学性质上存在着直接或间接的相关性。从表 2-3 可见很多疾病与之相关，特别与人类死亡率最高的三种疾病中风、冠心病和肿瘤密切相关。因此血液流变学系与人类健康长寿关系非常密切。其次由 Dintenfass 所首创的血液粘度及其影响因素分析法，已普遍地被医学界所采用，并用之来研究临床病理机制、疾病诊断和鉴别诊断、病情随访、病症严重性和可恢复民生观察、药物疗效评价、传统医学治病机理阐明均起重要作用。此外，很多论文展示一些重要的病病如中风和心肌梗塞在发病以前，可以通过血液粘度及其影响因素的测定，事先了解到其发病的先兆，只需通过体检，可以查出其危险因子所在，采用某些方法消除这些危险因子，就可预防中风和心肌梗塞的发生。还有在创造血液流变学的新疗法上，如体外洗血疗法，把体内的过多的胆固醇、

低密度脂蛋白、纤维蛋白原、抗自身的抗体等有害物质用物理疗法给以消除。总之，血液流变学的新理论和新方法将会在不断涌现，将可以以提高预防、诊断和治疗效果。