



非牛顿流体力学

李兆敏 蔡国琰 编著

石油大学出版社

非牛顿流体力学

李兆敏 蔡国琰 编著

石油大学出版社

非牛顿流体力学

李兆敏 蔡国琰 编著

*

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

新华书店发行

石油大学印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 8.875 印张 231 千字

1998 年 4 月第 1 版 2001 年 11 月第 2 次印刷

印数 601—1200 册

ISBN 7-5636-1039-1/O · 60

定价:11.50 元

前 言

船舶、航空、水利工程的发展推动了牛顿流体力学学科的形成与发展。流体力学理论的完善与深化,其解决工程实际问题能力与技巧的日益提高,使得流体力学成为广大工程技术人员必须熟悉的一门基础课程。同时随着化学、食品、石油、生物等工业的发展,非牛顿流体力学正日益受到人们的重视。

1868年 Maxwell 首次发现应力松弛现象,提出了粘弹性理论与粘弹性流体模型。1876年, Boltzmann 建立了物体变形的力学行为与变形历史有关的一般理论。在20世纪初经过对物质的变形与流动特性的广泛研究之后,于1928年提出并建立新的学科“流变学”(Rheology)。流变学是一门关于物质的流动与变形的科学,而非牛顿流体力学是属于流变学的一个分支。

牛顿流体力学的研究对象是空气、水等物质的流动特性,而非牛顿流体力学的研究对象则是物质结构比水、空气要复杂得多的物质,如聚合物溶液、熔体、油漆、泥浆、蛋白液、纤维素悬浮液、胶体溶液、血液、“三高”原油等等一类物质的受力与运动响应之间的关系。

本教材既考虑到非牛顿流体力学的理论系统,又侧重解决工程实际问题所常用的理论与方法。鉴于非牛顿流体力学广泛采用张量的表述与运算方法,但是对于工程专业的大学来讲一般又不熟悉张量知识,所以本教材在附录中介绍了常用的张量基本知识,同时在教材中只在部分章节中由于理论阐述中的需要应用了张量。希望本教材能对工科大学生与研究生了解非牛顿流体力学的概况,掌握非牛顿流体流动的基本特征与解决非牛顿流体流动

的力学问题的基本方法有所裨益。

本教材曾多次在研究生与本科生的教学中试用过,效果较好,现进一步加以修订补充。由于编著者的水平所限,书中错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

李兆敏 蔡国琰

1998.3

目 录

第一章 非牛顿流体的物理性质	(1)
§ 1-1 非牛顿流体的基本特征	(1)
§ 1-2 非牛顿流体的粘性	(2)
§ 1-3 非牛顿流体的弹塑性	(7)
§ 1-4 非牛顿流体的某些流动现象	(8)
§ 1-5 非牛顿流体力学在石油工业中的应用	(12)
第二章 运动学基础	(13)
§ 2-1 参考坐标系	(13)
§ 2-2 相对变形梯度张量	(21)
§ 2-3 柯希-格林应变张量	(23)
§ 2-4 变形速度梯度	(24)
§ 2-5 李夫林-爱里克森张量	(27)
§ 2-6 柯希-格林张量与李夫林-爱里克森 张量之间的关系	(30)
第三章 本构方程	(32)
§ 3-1 纯粘性流体	(32)
§ 3-2 塑性流体	(36)
§ 3-3 线性粘弹性流体	(38)
§ 3-4 非线性粘弹性流体	(45)
§ 3-5 简单流体	(46)
第四章 控制方程	(49)
§ 4-1 连续性方程	(49)
§ 4-2 运动方程	(50)

§ 1-3	能量方程	(52)
§ 1-4	控制方程的分量形式	(54)
第五章	平行平板间的层流流动	(59)
§ 5-1	流体的运动特性	(59)
§ 5-2	流体的应力特性	(62)
§ 5-3	运动方程的求解	(65)
§ 5-4	幂律流体的流动	(69)
第六章	圆管内的层流流动	(72)
§ 6-1	运动学与应力特性	(72)
§ 6-2	运动方程及求解	(74)
§ 6-3	罗宾诺维奇-莫纳方程	(76)
§ 6-4	幂律流体在管内的流动	(80)
§ 6-5	宾汉流体在管内的流动	(83)
§ 6-6	卡森流体在管内的流动	(85)
§ 6-7	二阶流体在管内的流动	(86)
§ 6-8	圆管流动的力平衡关系式及应用	(90)
第七章	环形管道中的流动	(94)
§ 7-1	宾汉流体在环形管道中的流动规律	(94)
§ 7-2	幂律流体在环形管道中的流动规律	(98)
第八章	两旋转圆筒间的流动	(101)
§ 8-1	运动学与应力特性	(101)
§ 8-2	扭矩公式及速度分布公式	(103)
§ 8-3	Weissenberg 现象	(105)
§ 8-4	幂律流体在两旋转圆筒间的流动规律	(108)
第九章	非牛顿流体在锥板间的流动	(110)
§ 9-1	运动学与应力特性	(110)
§ 9-2	运动方程	(111)
§ 9-3	扭矩公式	(112)
§ 9-4	正应力差	(113)

第十章	旋转圆板间的流动 ·····	(115)
§ 10-1	运动方程·····	(115)
§ 10-2	表观粘度公式·····	(116)
§ 10-3	法向应力差·····	(118)
第十一章	非牛顿流体的螺旋流动规律 ·····	(120)
§ 11-1	螺旋流的速度微分方程·····	(120)
§ 11-2	牛顿流体在圆管和环形空间中的 螺旋流动·····	(125)
§ 11-3	幂律流体在圆管和环形空间中的 螺旋流动·····	(128)
§ 11-4	宾汉流体在圆管和环形空间中的 螺旋流动·····	(135)
第十二章	非牛顿流体的传热特性 ·····	(141)
§ 12-1	宾汉流体的圆管温度场分布·····	(142)
§ 12-2	幂律流体的圆管温度场分布·····	(145)
§ 12-3	幂律流体圆管进口段的传热·····	(147)
§ 12-4	幂律流体平行平板间的粘性发热问题·····	(150)
第十三章	层流边界层 ·····	(151)
§ 13-1	牛顿流体层流边界层的相似性解·····	(151)
§ 13-2	幂律流体平板边界层问题的相似性解·····	(158)
§ 13-3	幂律流体的二维层流自由射流·····	(160)
§ 13-4	幂律流体的轴对称层流自由射流·····	(165)
第十四章	判别非牛顿流体流态的方法——Z 值法 ·····	(169)
§ 14-1	圆管内牛顿流体流动的 Z 值·····	(170)
§ 14-2	圆管内幂律流体流动的 Z 值·····	(172)
§ 14-3	环形空间内幂律流体流动的 Z 值·····	(174)
第十五章	非牛顿流体的紊流流动 ·····	(178)
§ 15-1	紊流的基本知识·····	(178)
§ 15-2	牛顿流体紊流的半经验理论和基本	

	方程	(180)
§ 15-3	非牛顿流体紊流流动的半经验理论	(186)
§ 15-4	紊流的随机理论	(192)
§ 15-5	Bingham 流体在圆管内的紊流流动	(198)
§ 15-6	幂律流体在圆管内的紊流流动	(202)
§ 15-7	紊流减阻	(209)
第十六章	非牛顿流体的渗流特点	(216)
§ 16-1	渗流流体的流变模型及渗流的非线性 定律	(216)
§ 16-2	单相稳态渗流	(219)
§ 16-3	非牛顿流体的非稳态渗流	(221)
第十七章	流变测量	(224)
§ 17-1	细管法测定流变性	(224)
§ 17-2	旋转法测定流变性	(234)
§ 17-3	法向应力差的测定	(251)
§ 17-4	复数粘度的测定	(253)
附 录	张量基础知识	(259)
参考文献	(273)

第一章

非牛顿流体的物理性质

§ 1-1 非牛顿流体的基本特征

流动是一种连续变形的运动。流体通常是指受任何微小剪切力作用都能连续变形的物质。简单剪切流动中的剪切应力与速度梯度的关系符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,如空气、水等。非牛顿流体的基本特征是能够流动,但流动过程中剪切应力与速度梯度之间的关系不符合牛顿内摩擦定律,并且包括那些只有在有限大小剪切应力作用下才能开始流动的物质。

固体与流体的区别在于固体受一定大小的剪切力作用时,仅产生一定程度而不是无限制的连续变形。外力除去后能恢复原状的变形称为弹性变形,不能恢复原状的变形称为塑性变形。有的非牛顿流体既有粘性又有弹性,称为粘弹性流体。

非牛顿流体包括很多种类的流动物质,如高分子聚合物的溶液或熔体、泥浆、油漆、血液、蛋白液、纤维素悬浮液、胶体溶液等。

在非牛顿流体力学中,把非牛顿流体作为连续介质来处理,对于单相介质流体或溶液来讲,宏观的力学分析中作为最小单位的流体微团尺度远远大于分子尺度,对于多相介质如悬浮液等,只要固相体颗粒直径远小于特征长度并且均匀分布于溶剂中,也可近似地作为连续介质来处理,如异重流、悬浮液等。还应指出,非牛顿流体一般均为液体,即属于不可压缩流体。

§ 1-2 非牛顿流体的粘性

粘性是由流体分子结构所决定的。牛顿流体的分子结构比较简单,所以由牛顿内摩擦定律所表征的粘性系数仅是温度与压力的函数,而与流动状态无关。

非牛顿流体的物质构成远比牛顿流体复杂。反映在粘性上,同一种非牛顿流体的粘性不仅与温度、压力等环境条件有关,而且还与其流动状态有关。一般讲很难用单一的系数来表征其实际的粘性,有的情况下可采用以牛顿内摩擦定律为模式来定义非牛顿流体的粘度,用 μ_a 或 η_a 表示:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1-1)$$

τ 为剪切应力, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, η_a 或 μ_a 称为非牛顿流体的表观粘度。这里不同于牛顿流体的是表观粘度 η_a 或 μ_a 不是常数,而是剪切速率的函数。

一、表观粘度随剪切速率增加而减小

表观粘度随剪切速率增加而减小的流体称为假塑性(Pseudo-plastic)流体,或称剪切变稀型(Shear-thinning)流体,大多数非牛顿流体都具有剪切变稀的特性。图 1-1 是共聚甲醛树脂熔体的表观粘度 η_a 与剪切速率关系曲线,说明该熔体属剪切变稀型流体。

对于大分子结构的非牛顿流体,剪切运动会使分子结构形态发生变化,从而影响到流体的表观粘度。例如溶剂为牛顿流体的具有丝状大分子结构的溶液,在剪切力作用下其分子形态会有相当大的变化。在静止时大分子结构呈多孔的线圈状,如图 1-2(a)所示。在简单剪切运动中,剪切力将线圈结构拉平、理直,如图 1-2(b)所示,这种作用还使原来因溶解作用受限于线圈状分子结构中的部分溶剂释放出来,从而使流体粘度变小。

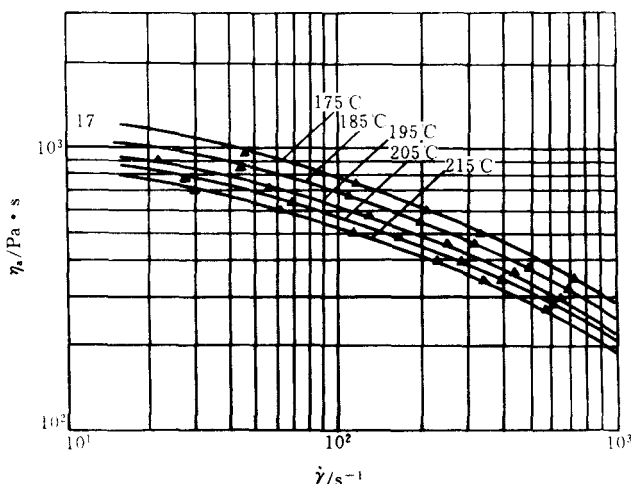


图 1-1 共聚甲醛树脂的粘度对
温度和 $\dot{\gamma}$ 的依赖关系

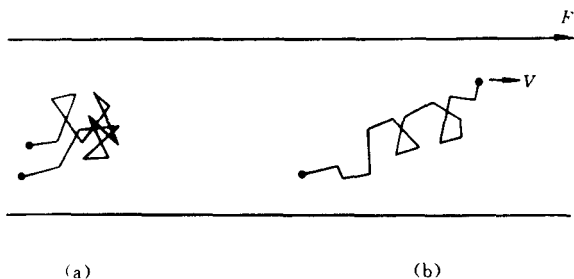


图 1-2(a)、(b) 丝状大分子结构在剪切力作用下变形示意图

粘度的变化一般都限于一定的剪切速率范围以内,当剪切速率低于一定值之后粘度就不再发生变化,称之为零剪切粘度,用 η_0 表示。当剪切速率高于一定值之后,粘度也不再变化,称之为极限粘度,用 η_{∞} 表示。由此可见这类非牛顿流体的非牛顿性限于一定的剪切速率范围以内,超出这个范围就具有牛顿流体的流变特性,其粘度变化曲线如图 1-3 所示。

二、表观粘度随剪切速率增加而增加

与假塑性流体相反,粘度随剪切速率的增加而增大的流体称为胀流型(Dilatant)流体。例如某些悬浮液随剪切速率的增加其粘度也会增加。一般讲,这种胀流性

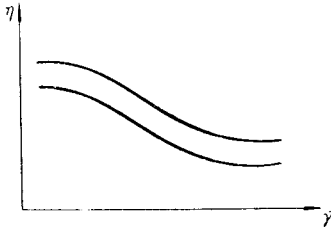


图 1-3 粘度随剪切速率变化曲线

体现在分散体系中,如淀粉液、海滩上的湿沙、絮凝化的油漆等。在这种分散体系中颗粒状物质紧紧堆积在一起,连续相流体充填在很细小的缝隙中,在剪切力作用下堆积体中出现细小裂缝,流体能够在小剪切速率情况下较容易地缓慢流过这些缝隙,但高剪切速率情况下缝隙中的流动变为紊流,连续相流体的流动阻力大大增加,表现为这种非牛顿流体的粘度随剪切速率增加而增加。

三、表观粘度与剪切速率作用时间有关

上述的流体粘度随剪切速率大小的变化而变化是与剪切作用时间无关的,在同一剪切速率作用下不论时间长短其粘度是不变的。

被称之为触变性(Thixotropic)流体的粘度不仅与剪切速率有关。而且与剪切速率作用时间有关,在不变剪切速率作用下,随着作用时间的增加其粘度下降,并且当剪切作用停止,流体处于静止状态之后其粘度又重新升高,但不一定按原来的样子恢复。见图 1-4。

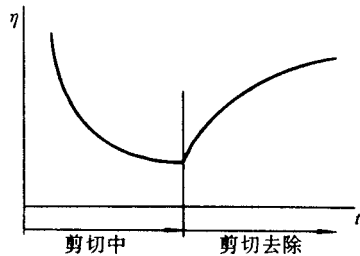


图 1-4 触变性流体的粘度随时间的变化规律

这种现象的物理解释是多种多样的,比较典型的说法如下:在分散体系中细微的颗粒有不同的电势,促使其形成三维的格状结构,如果分散相具有板片状,就会搭接成如图 1-5(a)所示的屋状结构,棒状分散相则会形成不同的格架状结构,如图 1-5(b)所示,而球状分散相则会形成珠链状格状网格,如图 1-5(c)所示。

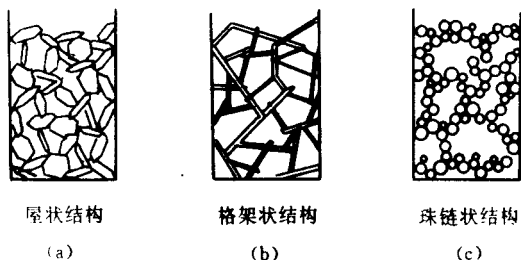


图 1-5 触变性流体流动现象的物理解释

具有极性表面的固体颗粒在非极性液体中形成的沉积空间要比在极性液体(如酒精或水)中的沉积空间大。液体浸润的表面越小,则形成格状结构的倾向越强,有人认为将格状单元组合起来的约束力是静电的作用,它来源于可交换的约束离子。例如在阴离子镍氰化物中,触变性由于单价或多价阴离子的存在而发生变化;高分子浓溶液、高分子冻胶等具有分子链的缠结与物理交联结构,在剪切作用下这种结构受到破坏,表现为粘度下降,当剪切作用停止,格状结构逐渐恢复,影响这种结构破坏与恢复的时间因素会在很大的范围内变化,使得这种物质的测量变得很复杂。

将这种触变性物质在旋转粘度计中试验时,在恒定转速情况下,其扭矩读数随时间而下降,特别是在实验开始的数秒内特别明显。

触变性由流变图中的滞后曲线表示,如图 1-6 所示。当剪切应力达到 τ_c 时流体开始流动,随着剪切应力增加,剪切变形按曲线 I 增加;到达 M 点后逐渐减小剪切应力,那么变形速率不再沿曲线 I 下降而是沿曲线 II 下降,直到 b 点,从而形成了一条滞后曲

线

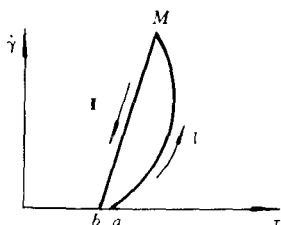


图 1-6 触变性流体的滞后曲线

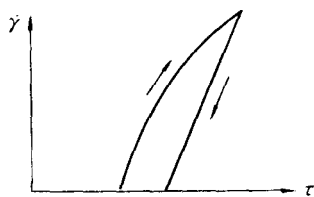


图 1-7 震凝性流体的滞后曲线

另外一类物质如流态石膏浆等在剪切作用下其粘度反而随剪切作用时间的增加而上升,称为反触变性流体或震凝流体,其流变图如图 1-7 所示。

还有的流体在小剪切速率下呈触变性,即粘度要下降,但在高剪切速率作用下粘度又会上升,即在剪切作用时间内由触变性变化为震凝性,其滞后曲线如图 1-8 所示。

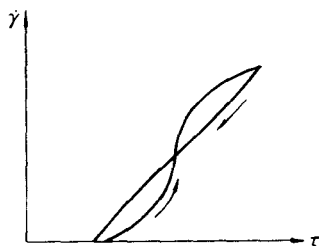


图 1-8 具有触变性和震凝性双重流动流体的流动性质特性

某些物质在剪切作用下其结构受到破坏,粘度下降,剪切作用的很长时间内结构也不会恢复,这种物质就不具有触变性。

Cheng 和 Evans 提出了如下的动力学方程来描述触变行为:

$$\tau = \eta(\lambda, \dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (1-2. a)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = g(\lambda, \dot{\gamma}) \quad (1-2. b)$$

式中 λ ——结构参数,表征触变体的结构特征;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率。

方程(1-2. a)表示表观粘度不仅是 $\dot{\gamma}$ 的函数,而且与结构参数 λ 有关。方程(1-2. b)表示结构参数 λ 的时间变化率,反映结构的破

坏或形成的速度。函数 $\eta(\lambda, \dot{\gamma})$ 与 $g(\lambda, \dot{\gamma})$ 可用半经验方法加以确定, 例如用线性、多项式、指数等类函数来逼近, 通过实验来确定待定系数。

当结构破坏的速率与结构恢复的速率相同时, 就达到平衡状态。在一定的实验时间范围内, 当这两种速率接近到一定程度时, 可称之为似平衡状态。

§ 1-3 非牛顿流体的弹塑性

前面已提到, 非牛顿流体一般为液体, 属不可压缩流体。按照牛顿流体的观点, 不可压缩流体是没有弹性的, 流体的流动变形是不能恢复的, 但是许多非牛顿流体不仅有粘性, 而且还具有弹性, 这就是说非牛顿流体的变形既有不可恢复的变形部分也有可恢复的变形部分, 在流动变形过程中具有弹性恢复效应, 或呈现应力松弛现象, 这种非牛顿流体称为粘弹性流体。粘弹性流体的变形状态不仅决定于当时的应力状态而且与变形历史有关, 或者说具有记忆性。

固体在外力作用下一般是先产生弹性变形, 当应力超过屈服限时就产生塑性变形, 不是在任意微小剪切力作用下就会产生流动变形, 它有一个屈服限, 称为屈服应力。这种变形是不会恢复的。当剪切应力小于屈服应力时, 此类流体不会流动, 只有当剪切应力超过屈服应力值时才开始像牛顿流体一样流动, 这种流体称为宾汉 (Bingham) 流体。如果剪切应力超过屈服应力后的流动中其表观粘度不是常数, 则称之为广义宾汉流体。

§ 1-4 非牛顿流体的某些流动现象

一、管流剪切变稀现象

图 1-9 所示为垂直的双管中分别放置牛顿流体(N),例如甘油水溶液;高分子溶液(P),例如聚丙烯酰胺水溶液。

t_1 时刻两液体液面相平, 打开阀门使流体流出, t_2 时刻 P 流得较快, 液面低于 N。但当管中只剩下少量液体的 t_3 时刻, N 液面低于 P, 并且先流空。

现象解释: 高液位的高剪切应力下高分子溶液由于剪切变稀, 粘度变得比 N 小, 液面下降较快。但随着液面下降, 剪切力变小, 使 P 的粘度超过 N, 下降变慢, 最后反而较迟流完。

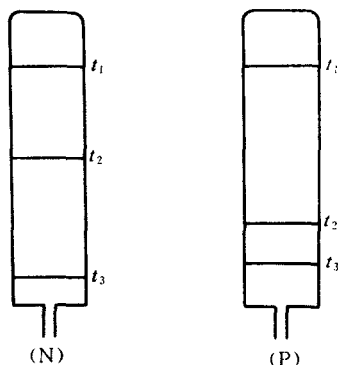


图 1-9 管流剪切变稀现象

二、韦森堡效应(Weissenberg Effect)

1944 年, 韦森堡在英国帝国工学院公开表演了一个有趣的实验。在一个烧杯中盛有粘弹性流体, 一实验杆直立于烧杯中心, 并作旋转运动。实验发现, 当实验杆旋转时, 粘弹流体向杯中心运动, 杯中心的流体沿杆向上爬, 液面变成凸形。甚至实验杆的旋转速度很低时, 也可以观察到上述现象。这种现象称为“爬杆效应”或“韦森堡效应”, 如图 1-10 所示。

若将非牛顿流体置于两个圆盘之间, 当下盘旋转时, 上盘受到