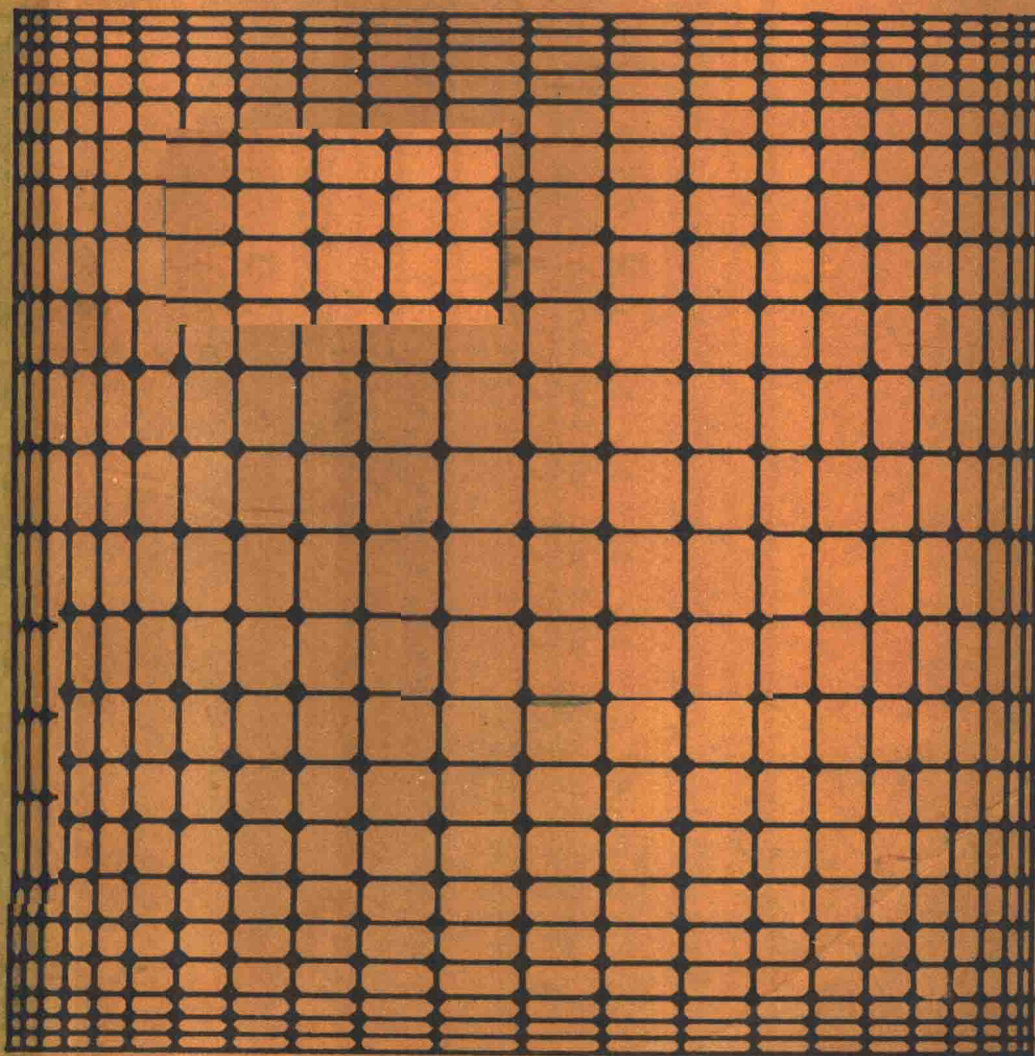


黄大能 沈威等 编译

新拌混凝土的 结构和流变特征



新拌混凝土的结构 和流变特征

黄大能 沈 威 等 编译

中国建筑工程出版社

本书是一本专论新拌混凝土流变学的理论著作。全书共分两篇，第一篇为黄大能编写的“水泥与混凝土流变学”；第二篇围绕“水泥浆结构和性能”专题选译了有关国际会议上发表的部分论文。

流变学的基本理论，对研究水泥混凝土的演变规律、确定混凝土各阶段的性能特点，特别是凝固前的结构形成和发展的动力学过程，有着重要的作用。

本书适于从事水泥混凝土研究、混凝土施工的工程技术人员，以及高等院校师生参考。

新拌混凝土的结构和流变特征

黄大能 沈 威 等 编译

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：850×1168毫米 1/32 印张：12 $\frac{1}{4}$ ；字数：326千字

1983年1月第一版 1983年1月第一次印刷

印数：1—5,300册 定价：1.95元

统一书号：15040·4299

序

水泥混凝土是一种多相混合物，从加水拌和开始即具有随时间、温度、湿度以及受力状态而出现弹、粘、塑性演变的特点。所以，研究材料变形和流动的流变学，就成为水泥应用科学发展所不可缺少的基础理论之一。

水泥混凝土的凝结硬化，实质上是从粘塑性向粘弹性发展的过程。因此，水泥浆体的微观结构、物理性质，水泥浆与集料的界面结构，水泥浆与纤维材料或其他组成材料的共同作用，以及内聚力和粘附力的产生和发展等等，都和流变学有着密切的关系。掌握流变学的基本理论，研究水泥混凝土的演变规律，确定各阶段的性能特点，特别是凝固前的结构形成与发展的动力学过程，将为水泥混凝土改性，进一步挖掘水泥潜能，设计满足不同工程需要的混凝土等方面，提供必要条件。

近年来，世界各国水泥混凝土工艺发展较快，外加剂和特种混凝土的发展正为混凝土在建筑材料中的竞争能力提供有利条件。水泥混凝土工艺的发展是和进一步掌握基础理论分不开的。因此，本书的出版将对我国从事水泥混凝土研究、教学和施工的人员有所裨益，有助于水泥混凝土工艺的发展。

本书主编之一黄大能同志在1979~1980年间，应上海同济大学及武汉建筑材料工业学院邀请，先后在两校开设《水泥浆和新拌混凝土的物理性质》和《水泥与混凝土流变学》两个专题讲座。听讲对象除大专院校的教师外，还有各科研、施工单位及工厂的工程技术人员等。有鉴于各方面的迫切需要，特作整理补充，编成本书第一篇，即“水泥与混凝土流变学”。另外，由于流变特征主要决定于水泥浆结构，因此又围绕“水泥浆结构和性能”专题选译了部分重要文献，编成本书第二篇。参加本篇译校

的有：刘公诚、沈威、陈志源、沙文丹、金容容、袁莹、黄大能、黄成毅和赵宇平等。

本书编纂过程中，得到建筑材料科学研究院、同济大学及武汉建筑材料工业学院各单位有关同志的支持，特别是魏金照、袁润章、崔可浩等同志的帮助，特此致谢。

限于水平，不妥之处，谨请读者批评指正。

编 者

1981年3月

目 录

第一篇 水泥与混凝土流变学

一、流变学的基本内容.....	1
二、弹性、塑性、强度和粘性.....	4
三、宾汉姆体、马克斯韦尔液体和凯尔文固体.....	9
四、测流学简介.....	14
五、水泥应用科学的近代发展.....	20
六、水泥浆与新拌混凝土的物理结构.....	24
七、水泥与混凝土凝固前的流变特征.....	30
八、混凝土的工作性问题.....	35
九、水泥与混凝土凝固后的流变特征.....	39
十、结语.....	44
十一、参考文献.....	46

第二篇 水泥浆结构和性能

一、水泥浆的物理性质.....	49
二、水泥浆的结构与物理性质	122
三、硬化水泥浆的相组成	175
四、不同尺度的水泥浆显微结构	199
五、硬化水泥浆的结构——更好地了解材料 性能的基础	220
六、水灰比对硬化水泥浆结构和强度的影响	237
七、从混凝土工艺的实际问题，看水泥浆在复合 材料中的行为	247
八、新拌波特兰水泥浆的流变性	265

九、新拌混凝土流变性的研究	300
十、新拌混凝土工作性的测定原理，并推荐一种 简易的两点试验法	319
十一、新拌水泥浆流变性的研究	339
十二、水泥混合物的流变性能	361

第一篇 水泥与混凝土流变学

黄 大 能 编

一、流变学的基本内容

顾名思义，流变学是研究材料流动和变形的科学。早在1928年，在美国宾汉姆（E.C.Bingham）教授的倡议下，在美国成立了流变学会。1940年在英国成立了流变学家俱乐部。在苏联，流变学也早已成为科学上的习惯用语。然而，成为材料科学发展中的重要基础学科之一，则是在第二次世界大战以后的事。随着人工合成材料的发展，为了解决超高温、超高压、超高强、超高速冲击下的材料特性，从微观结构联系到宏观行为，使流变学的内容日益完整、系统化起来。迄今，已用于各种金属和非金属材料、各种有机和无机材料，逐渐扩展，已包括黑色和有色金属、水泥和混凝土制品、玻璃，陶瓷和粘土制品、木材、沥青、土壤，以及高分子聚合物，如橡胶、塑料，还有油漆、涂料等。

流变学应该属于力学范畴内的一个分支，但是它和力学显然不同。力学只研究物体作为一个实体的运动规律，不联系到物体本身的内部结构和性质。而流变学在研究流动和变形规律时必须联系到物体机构中质点之间的相对运动，因此必须联系到物体的结构与性质。在掌握质点间相对运动规律的基础上，区别出物体的弹性、塑性、粘性的不同变形状态来。

流变有三个原理：（1）任何实际存在的物质，无时无刻不在“流动”着。（2）在承受各向同性压力时，任何物质的反映

相同，即形态不变，密度稍增，一般具有弹性。（3）弹性、塑性、粘性和强度是物质四个基本流变特征。任何实际存在物质都同时具有以上四种特征，只是程度各不相同。

流变学也是研究物体在外力作用下所产生的随时间发展的变形与应力关系的科学。所谓流动和变形，从宏观行为分析，都可归结为变形与应力的关系随时间发展的规律。只是流动是指液体材料，变形是指固体材料。其实，从微观结构分析，固体和液体都是由大量粒子高度密集，在空间堆积而成的物体。由于两者分子的平均间距近似，可压缩性也都很小，所以两者之间的差别远没有与气体之间的差别那样大。只是固体的晶格属于远程有序而液体则是近程有序。固体晶格规律性较高，有空间骨架，而液体只在一定中心范围内分布有规律，稍远即无规律。仅此差别，所以从流变学的观点解释，流动和变形实质上是一回事，即流动只是在不变的剪切应力下，物体随时间产生的连续性变形。因此所谓固体和液体，流动和变形，就没有严格的区分界限。

流变学也是研究物体弹、塑、粘性演变的科学。重要的是时间因素的考虑，包括外界条件（温、湿度等）持续时间、荷载持续时间等对弹、塑、粘性的影响。任何材料本身的内部结构都确定了各自的松弛时间，而松弛时间的长短直接确定了在外力作用下的流变性质。混凝土是松弛时间极长的固体物质，但在更长的荷载持续时间下会出现“粘性流动”。水是松弛时间极短的液体物质，但在石片的快速冲击下，会呈现“弹性变形”。因此，流变学还需确定物体在外力作用下，某一瞬间内的应力与应变的定量关系。

因此，流变学很自然地要把物体基本物理结构与在外力作用下引起的力学特性联系起来研究。一切宏观的力学行为，都决定于物体本身微观的物理结构。突出的例子是一般粘弹性物体所特有的徐变与松弛两个特征。由于这两个流变特征，就引出了所谓凯尔文（W.T.Kelvin）固态粘弹性体和马克斯韦尔（J.Maxwell）液态粘弹性体的两种不同物体来。

这种把物质看作准各向同性的，准均质的，因而只在宏观上

试图找出物质变形和应力关系的流变研究，称为宏观流变学。如果联系到物质的显微结构，企图从测试所得变形-应力随时间变化规律进行物质微观结构分析，从任何物质不可能是均质出发，并从组成材料共同作用所表现的流变特征来进行的流变研究，称之为微观流变学。五十多年的流变学历史，就是从宏观流变学向微观流变学过渡的历史。但迄今为止，微观流变学还只能说尚处于初创的阶段。

在把物质看作多成分复合材料时，往往需要利用模型来形象地描绘其结构性能。这类模型，一般称为结构模型，都由若干元件所组成。基本元件有三个：

- (1) 一个具有完全弹性的弹簧；图 1。
- (2) 一个在桌面上静置的重物，与桌面间存在摩擦力，图 2；也可简化为图 3。
- (3) 一个带孔的活塞，在充满粘性液体的油壶中运动；图 4。

上述三个基本元件相应地表达了三个理想物体，即：

- (1) 如果图 1 中弹簧属于理想弹性固体，则称为胡克固体 (Hooke)，其流变曲线及流变方程如图 5；



图 1 理想弹性体模型



图 2 理想塑性体模型



图 3 理想塑性体的简化模型

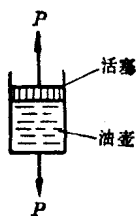


图 4 牛顿液体模型

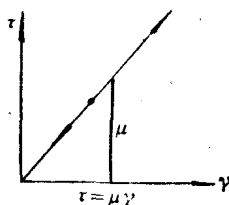


图 5 胡克固体的流变曲线和方程

(2) 如果图2中的重物在 P 作用下作等速运动, 则为理想塑性固体, 称圣维南固体(St. Venant), 流变曲线及方程如图6;

(3) 如果图4油壶中的液体属于理想粘性液体, 则称为牛顿液体(Newton), 流变曲线及方程如图7。

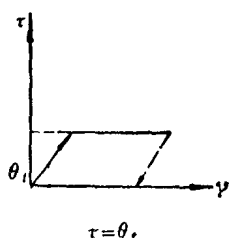


图6 圣维南固体的流变曲线和方程

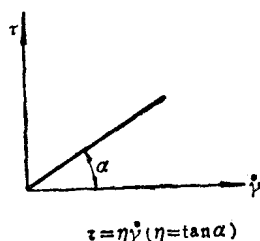


图7 牛顿液体的流变曲线和方程

世间实际并不存在以上三种物体, 所以称为理想体, 但真实物体往往可从上述三种理想体导出。流变方程也可由上述三个基本方程组成。

综上所述, 流变学从初创发展到今天, 其内容是逐渐丰富起来的, 并且随着材料科学的发展, 流变学也还在不断发展着。初期的流变学是从化学、分子物理学和固体力学的交界处生长的一门边缘科学, 但它已逐渐与现代热力学、结晶学、物理化学、流体力学、弹塑性理论以及断裂力学都发生了较密切的关系。

二、弹性、塑性、强度和粘性

流变学包含有许多专用术语, 一些术语词汇很易似是而非地误解。因此在后文中, 凡接触到的一些重要词汇将从流变学观点先在定义和概念上予以阐明。

任何物体, 除理想刚性物体外, 在应力作用下, 都有不同程度的变形。变形包括形状改变和体积改变。它有三个涵义: 应

变，对弹性变形而言；永久变形，对塑性变形而言；流动，对液体言。因此，流动是变形的一种特殊形式，即：在不变的剪切应力下，材料随时间产生的连续性变形，其中全部或至少部分是非可逆的。

流动有两种：内部抗剪应力与流动速率无关的称为塑性流动。抗剪应力随流速增加而增长的称为粘性流动。

任何物体在外力作用下发生变形时，从所反映的性能分析，不外乎弹性、塑性、粘性和强度四种。这四种性能都属于基本流变性能，从这些性能再派生出脆性、延性、韧性等其他性能来。

弹 性

使物体产生变形的力，在作用停止以后，物体能恢复其原来的体积（指气体和液体）或形状（指固体）的性能称为弹性。对固体言，在弹性极限以内的变形，变形大小与作用力成正比关系。作用力除去后，变形一般都能全部消失。当作用力超过物体弹性极限时，固体就失去弹性，这时若不出现破裂，便出现塑性变形。

刚性模量（ μ ），容积模量（ K ），杨氏模量（ E ）和泊桑比（ γ ），四者是弹性固体的主要流变参数。

刚性模量是剪应力 τ 与剪应变 γ 的比值。对理想胡克固体言，其流变方程为 $\mu = \tau / \gamma$ ，即在弹性极限内时，是一个材料的常数。刚性模量愈大，在一定剪切应力下，变形愈小，因此材料愈接近刚体。

然而，材料在承受各向同性压力（ P ）时，产生的是各向同性的压缩变形，亦即材料密度（ ρ ）的增加或容积（ V ）的缩小。其流变方程为：

$$-P = K \Delta V / V。$$

在胡克理想固体的某一特定条件下， K 是常数。然而事实上，压缩不可能无限制发展，因此 K 必然是随着 P 的增加而增加的。

当材料在承受单轴轴向压力或拉力时，在材料弹性极限范围内时，应力（ σ ）和应变（ e ）的比值为杨氏模量（ E ）或称弹性模量，即 $E=\sigma/e$ 。符合胡克定律的弹性体， E 是一个常数。常用材料的杨氏模量（ $E \times 10^{-11}$ 试条）为：

铅 1，混凝土 2，锡 4，玻璃 7，锌 8，铜 12，熟铁 18，钢 25。

条状材料在承受单轴轴向压力或拉力而产生轴向应变（ e_1 ）的同时，必然产生横向平面上的变形（ e_2 ）。因轴向应变而产生的横向应变与轴向应变之间的比值，即称为泊桑比（ γ ），流变方程为 $\gamma = -e_2/e_1$ 。轴向如为压缩（+），横向就膨胀（-），轴向如为拉伸（-），横向就收缩（+）。

泊桑比无量度。不同材料因其内部结构的不同，泊桑比也不同：混凝土 0.1~0.2，铝 0.13，锌 0.20，玻璃 0.24，钢 0.30，铜 0.32，铅 0.40，橡胶达 0.49，而软木塞则为 0。

塑 性

使固体产生变形的力，在超过该固体的屈服值后，在应力保持不变下，出现能使该固体长期保持变形形状和尺寸，亦即长期与固体内部的弹性反应保持平衡状态的一种性能称为塑性。塑性变形是非可逆的。从材料结构分析，塑性变形是由产生在构成材料的晶体的滑移面上的剪切应力而引起的。但滑移面上的塑性变形并不出现断裂现象。对软质材料言，塑性也可解释为保持材料固定形状的能力。

屈服值是指材料所受外力超过弹性极限所达到的某一数值，这个在外力不增加情况下变形骤然增大的应力值称为屈服值、屈服点或屈服应力（ θ_1 ）。因此，屈服值是在应力应变线（或应力应变速率线）上相当于从弹性变形转变为塑性变形的转折点。

属于圣维南理想塑性固体的物体，不论位移多大，其屈服应力是一个常数，因此流变方程为： $\tau = \theta_1$ 。

屈服值分上屈服值和下屈服值两个数值。上述自弹性变形转

为塑性变形的转折点属于上屈服值。下屈服值对金属材料言，是指上屈服值达到后应力突然下降到一个出现连续塑性变形的稳定的数值。对非金属材料言，相当于宾汉姆模型中剪切速率与应力轴相交点的应力值。也就是剪切速率为零时的应力值。

从热力学观点分析，外力作用于物体而出现的弹性变形，即为弹性势能的贮存。当弹性势能的贮存量超过物体单位体积中允许的最大贮存量时，必然会出现势能转为热能而消散，就表现为塑性变形。这个转变点就是屈服应力值。

与弹性和塑性变形两者存在密切关系的性能有**刚性、脆性、延性和韧性**。后四种性能都是从前二者派生而来。

刚性是材料抵抗弹性变形的能力。

脆性是材料在外力作用下一直到破碎以前不出现塑性变形的一种性能。一般情况，所谓脆性是材料在出现塑性变形以前，也就是在达到屈服值以前就断裂了，因此脆性材料的强度不会超过该材料的弹性极限。它的抗冲击性能，抗动荷载性能都很差。

延性或称可锻性，是与脆性恰巧相反的一种性能。它表现为材料在破碎以前所能承受的塑性变形的总的能力。脆性和延性与金属加工锻造有密切关系。随着温度上升，延性增加，脆性减弱。温度下降则反之。加荷速度也可影响材料脆性和延性的转换。

韧性是材料在外力作用下产生塑性变形过程中吸收能量的能力。或可解释为材料在达到断裂前单位体积内所需消耗的功的总量。

水泥混凝土结构改性的主要方向，是改脆性为韧性，因此应从流变学的角度研究改性途径及措施。

强 度

当符合胡克定律的物体，应变不断增加时，可能出现两种情况，一是如该物体具有塑性，到超过屈服值后呈圣维南体的变形，即塑性变形在应力不再增加下无限止地发展。二是物体如具

脆性，则在达到屈服值前即出现断裂。这两种情况下的应力都称为该材料的强度。因此，强度极限也就是材料承受变形的极限。

从流变学观点分析，材料承受变形极限是与外力施加速度和持续时间密切有关的，因此，材料强度的大小也必然受外力施加速度和持续时间所影响。

粘 性

粘性是指包括气体和液体在内的流体，由其内部结构所产生的阻碍相对流动的一种性能，因此也称内摩擦。

流动着的液体中若从平行于流动的方向分成不同流速的若干层，则相邻于两层间所产生的与平面平行而流向相反的阻力即为粘性。牛顿粘性是指具有层流特征（无紊流）的属于牛顿液体的剪应力与剪切速率的常数比值，称为粘性系数。

如以 η 为粘性系数，则 $\phi = \frac{1}{\eta}$ 为流动系数，因此，流动性为粘性的倒数。

粘性以泊为量度，即在流体内两个相距1厘米、面积各为1厘米²的平行层，在其切线方向作用1达因的力，使两层流速相差1厘米/秒时的粘度为1泊，所以：

$$1\text{泊} = 1\text{达因} \cdot \text{秒} / \text{厘米}^2 = 1\text{克} / \text{厘米} \cdot \text{秒}$$

温度对粘性很敏感，液体升温时粘性减小，而气体升温时粘性反增大。20°C下的水粘度为0.01泊或称1厘泊，空气20°C下为 1.8×10^{-4} 泊。

属于宾汉姆模型的粘塑性物质，应力超过屈服值后，应力与剪切速率的常数比值称为塑性粘度，它的倒数为活动度。

若剪应力与剪切速率的比值不是常数，而是随剪切速率而变的比值，则称为表观粘度。

悬浮分散系统的粘性液体，在静止状态下形成较致密的复杂结构，显示较大粘性。但当被搅动，随着剪切速度梯度的增加而

结构表现疏松，粘度减小。搅动停止后又很快恢复致密结构，粘度迅速回升的可变粘性，称为结构粘性。对于这种粘性可变的液体，也有人称之为广义牛顿液体，或非线性牛顿液体。

需要与结构粘性在概念上明确区分的是触变性。粘性液体被搅动后随剪切速率的增加而结构疏松，表观粘度减小，但当搅动停止，结构缓慢地恢复致密，粘度也缓慢地恢复原状的一种性能称为触变性。

三、宾汉姆体、马克斯韦尔液体和凯尔文固体

宾 汉 姆 体

早在1919年，宾汉姆发现油漆是属于同时具有塑性和粘性的物质。在这基础上，他把理想圣维南塑性体和理想牛顿粘性体的流变方程合并，成为：

$$\tau = \theta_i + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$$

后人称之为宾汉姆体。式中包括了两个系数， θ_i 为屈服应力， η_{pl} 为塑性粘度，其流变曲线见图8。

从图看出，宾汉姆体在 $\tau \leq \theta_i$ 时，不发生流动。因此，圣维南体是宾汉姆体粘性为零时的特殊形式。同时， $\tau > \theta_i$ 后宾汉姆体就按牛顿理想体的规律产生流动。

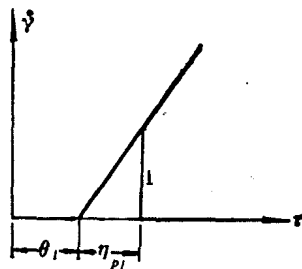


图9及图10为宾汉姆体在细管

图8 宾汉姆体流变曲线图

中的流动示意。图中看出，O—A段显示 $\tau < \theta_i$ ，细管中没有流动。A—B段，流体沿管壁首先克服阻力，开始产生流动，也就是结构开始破坏。这种沿管壁的流动，属于塞流现象。B—C段应力加大，塞流现象逐渐消失，接近于全部流动。而C—D段，则速度梯度 $\dot{\gamma}$ 接近抛物线，全部流动，其流速与 $\tau - \theta_i$ 成正比。因此将CD线延长到E点，E点即为屈服应力 θ_i 。

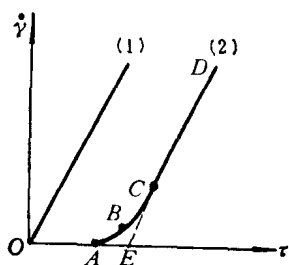


图 9 牛顿液体(1)与宾汉姆体(2)的流变曲线

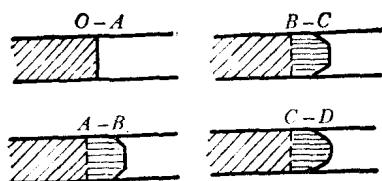


图 10 细管流动示意图

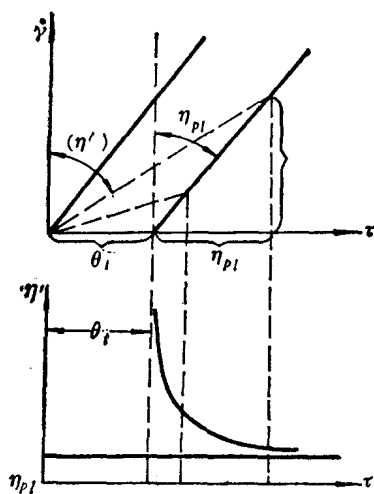


图 11 宾汉姆体表现粘度 η' 与 τ 关系曲线