

罗哲鸣
李传宪

编著

原油流变性 及测量

石油大学出版社

原油流变性及测量

罗哲鸣 李传宪 编著

石油大学出版社

内 容 简 介

本书概括地叙述了流变学的基础知识和测量物料流变性的原理和技术,着重论述了原油在外力作用下的流变特性、原油流变特性的评价和测量方法,最后介绍了非牛顿原油管道流动计算等问题。

本书按石油储运专业制定的教学大纲要求编写,是为石油大专院校储运专业师生提供的教材,也可供从事石油储运工艺研究、设计、生产管理的技术人员和其它相关工程技术人员学习和参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

原油流变性及测量/罗哲鸣,李传宪编著. - 东营:
石油大学出版社,1994.8(2001.2 重印)

ISBN 7-5636-0513-4

I. 原... II. ①罗...②李... III. ①原油-流变性
质-高等学校-教材 ②原油-流变-测量-高等学校-
教材 IV. TF622.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 02518 号

原油流变性及测量

罗哲鸣 李传宪 编著

出版者:石油大学出版社(山东 东营 邮编 257062)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpress>

电子信箱:upcpress@mail.hdpu.edu.cn

印刷者:泰安开发区成大印刷厂

发行者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:850×1168 1/32 印张 6.75 字数:180 千字

版 次:1994 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 2001 年 1 月第 1 版第 2 次印刷

印 数:1001—2000 册

定 价:9.80 元

前 言

流变学是近代发展起来的一门新兴边缘学科,其研究对象是力学特性复杂的物料。原油属复杂物料。

我国盛产含蜡原油和稠油。含蜡原油的显著特点是凝点高,但油温较高时粘度并不高。如大庆原油的凝点为 32°C ,油温为 50°C 时的粘度是 $23\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。稠油的显著特点是凝点较低,但在较高的温度下,粘度仍很高。如胜利单家寺原油的凝点是 12°C ,油温为 80°C 时的粘度高达 $771.3\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。这两类原油的固有流变特性给原油的储存和运输带来较大麻烦。目前采用的加热输油和保温储油的工艺方法虽然行之有效,但它需要昂贵的投资,耗费大量燃料,经营费用高,而且管道内和油罐中的原油受环境温度的影响,容易造成事故。为此,必须研究:(1)原油的粘度(表观粘度)对温度的依赖关系,原油在储存和管输过程中,原油的表观粘度受热历史、剪切历史、时间等的影响;(2)原油的触变特性、屈服特性,原油不能流动和恢复流动性的条件和规律;(3)原油的组成和内部结构对其流动性能的影响;(4)改善原油流动性能的措施、效果和机理;(5)非牛顿原油的管输压降计算等等。这些课题的解决将对降低能耗,提高储存和管输原油的经济效益,保证安全生产有着重要意义。上述课题均与流变学有关,必为石油储运工作者所关注。

本书是在广泛参阅有关国内外文献资料的基础上,结合我们多年从事原油流变性研究的工作实践、研究成果和教学经验,为石油储运专业编写的教材。本教材已在石油大学石油储运专业学生中使用了多年,先后于1986年、1990年作为校内教材两次印刷,现经进一步修改、充实后公开出版。本教材分五部分:流变学基础知识、流变性测量、原油的流变性、原油的流动性能评价及测试和管输非牛顿原油的压降计算。其中第二章和第三章的第五节由李

传宪编写,其余由罗哲鸣编写。本教材在编写过程中得到鲍冲教授的支持和帮助,所引用的数据大部分来自石油大学储运实验室的历次流变实验研究结果,在此向所有实验人员表示谢意。

本书虽经几次修改,肯定还存在不少缺点,恳请读者批评指正。

罗哲鸣

1994年2月

目 录

概述.....	1
第一章 流变学基础.....	4
第一节 力、变形及典型流场举例	4
一、连续介质中的应力	4
二、连续介质的变形(包括流动)	6
三、典型流场举例	8
第二节 本构方程、流变模式	9
第三节 物料的流变学分类	11
第四节 单相和假均匀复杂混合物的流变性分类	13
第五节 与时间无关的粘性流体	16
一、牛顿流体.....	16
二、假塑性流体.....	18
三、胀流型流体.....	21
四、宾汉姆(Bingham)流体	22
五、屈服-假塑性流体	23
第六节 与时间有关的粘性流体	26
一、概述.....	26
二、触变性流体的特征.....	26
三、触变性测量及触变模式.....	32
第七节 粘弹性流体	42
第八节 非均匀流体	47
一、分散体系.....	48
二、悬浮体系的流变性.....	49
第二章 流变性测量	53
第一节 概述	53

第二节 稳态简单剪切流动——测粘流动	54
第三节 细管法测定流变性	56
一、细管法测粘的原理	56
二、细管法测定非牛顿流体的流变性	58
三、测量误差分析	67
四、毛细管粘度计测定粘度	73
第四节 旋转法测定流变性	75
一、同轴圆筒旋转粘度计	75
二、锥-板旋转粘度计	92
三、旋转圆盘粘度计	94
第五节 落球法测定粘度	96
一、测定原理	96
二、滚动落球粘度计	98
第三章 原油的流变性	102
第一节 原油的组成	102
一、概述	102
二、蜡	103
三、胶质和沥青质	105
第二节 原油的分类	106
一、化学分类法	106
二、商品分类法	107
第三节 含蜡原油的流变性	110
一、流变类型与全粘温曲线	110
二、含蜡原油的触变性	115
三、低温含蜡原油的屈服现象	121
第四节 含蜡原油的历史效应	126
一、热历史的影响	126
二、冷却速度的影响	130
三、剪切历史的影响	134

四、综合历史的影响	136
第五节 稠油的流变性	138
一、概述	138
二、乳状液的定义及鉴别方法	141
三、乳化剂的分类及特点	143
四、乳状液的类型理论	144
五、影响乳状液稳定性的因素	145
六、稠油乳状液的流变性	146
第四章 原油流动性的评价及测试方法	151
第一节 试验油样的预处理	151
一、取样	151
二、预处理	152
第二节 原油的凝点及其测定	152
第三节 原油粘度(表观粘度)的测定及实验数据处理	156
一、利用 RV 测原油的动力粘度	156
二、利用 RV 测非牛顿原油的表现粘度	158
三、模拟热油管输条件的原油表现粘度测定	164
第四节 原油触变性测定	168
一、概述	168
二、R-G 模式	169
三、实验数据处理	170
第五节 原油屈服值测定	174
一、间接法	174
二、直接法	175
第五章 管输非牛顿原油的压降计算	184
第一节 流态划分	184
第二节 与时间无关的非牛顿流体层流压降计算	187
第三节 与时间无关的非牛顿流体紊流压降计算	190
一、经验关系式	191

二、半经验公式	191
三、例题	192
第四节 触变性原油在管道中流动问题的讨论	199
一、等温触变性原油沿长距离管道的流动	200
二、热含蜡原油沿长管道的流动	200
三、触变性原油沿短管流动	201
第五节 含蜡原油的停流及再启动压力的讨论	202
一、启动压力的计算	202
二、管输原油停流讨论	203
三、参量选取讨论	204
参考文献	206

概 述

流变学是研究力与变形(包括流动)相互响应的科学。

变形与流动是自然界常见的客观现象。随着建筑、水利、宇航、生物工程、石油、化工等等行业对复杂物料需求的飞速发展,流变学被赋予新的内容、特点和使命。

物料(物质的聚集体)在适当力系的作用下,改变其形状和尺寸即谓之变形。变形连续地无限地增加谓之流动。对物料的变形和流动,科学家们已有过大量研究:在弹性力学中,所研究的物料具有最简单的力学性质,即一点(或体积单元)的应力状态与应变状态之间,存在着——对应的关系。对于给定的物料来说,一定的应力状态必定与其应变状态彼此对应,应力与应变的关系符合虎克定律。对于大多数人造固体物料,当受力不大、且处于通常的工作条件下(如常温下)产生弹性变形时,大都可看作弹性物料。

当物料所受外力较大,超过了物料的弹性范围,而产生塑性变形后,物料的力学性质就远比弹性阶段复杂,这时应力与应变之间已不存在——对应的简单关系了。一点的应变状态不仅仅取决于当时的应力状态,而且还与以往的加载情况(加载途径)有关,但是只要加载途径给定后,该点的应变状态也就完全被确定了,如果应力不再改变,那么,应变状态也就不再发生变化了。这是塑性力学研究的问题。

随着科学技术的进步,人们进一步发现,不少物料在某些特定条件下表现出更为复杂的与时间因素有关的力学性质。例如金属在高温下的蠕变现象,即金属在高温下,受恒定的载荷作用,其变形随时间缓慢地增加。与蠕变现象对应的是松弛效应,即物料在固定的形变下,其应力随时间逐渐衰减,这种现象称之为松弛效应。

蠕变现象与松弛效应说明,这类物料(高温金属、陶瓷、岩石、某些高分子聚合物……)中一点的应变状态不仅与该点同一瞬间的应力状态有关,还与该点在此时刻之前的整个受力历史有关。换句话说,这样的物料是有记忆的。固体流变学就是研究与上述现象有关的一门新的力学分支。

对于流体,经典流体力学已对牛顿流体作了全面深入的研究,其目的是:从流体的力学性质服从牛顿内摩擦定律和体系的运动方程出发,研究和确定该流体的流动参数。例如:让水沿特定的管道流动,可求得水的流量或压力降。但是世界上许多能流动的物料,例如:高分子溶液、油脂、泥浆、血液、某些原油及各种悬浮液等等,其力学性质并不符合牛顿内摩擦定律,常称为非牛顿流体。流体流变学就是着重研究非牛顿流体受力与变形(流动)的科学。流体流变学是从体系的运动方程和流动参数出发,以研究和确定流体的流变性,建立本构方程(或流变模式)为目的的。

流变学的应用范围非常广泛,一切物料都具有特定的流变性质,只是某些物料在一定的条件下其流变性比较单纯。如:在弹性范围的固体,其应力与应变成正比。而另一些物料,在某些条件下其流变性异常复杂。如地震的孕育过程;高分子聚合物的成型过程;金属的蠕变以及油漆、油墨、各种悬浮液的流动问题等等,必须以研究它的流变性为基础。甚至生物体内也观察到流动、变形现象,如血液的流动、血管的变形、人肺等软组织的变形等,则构成生物流变学。

流变学又是一门边缘学科,它涉及力学、物理、数学、化学工程、材料结构、生物工程等等多种学科理论。不同物料的研究方法不尽相同,但概括地可分为两类:1)宏观方法,即从连续介质力学理论出发,通过实验研究,建立物料的流变模式。2)微观方法:依据物理概念将物料的微观结构模型化,经数学推导,建立物料的本构方程。

流变学是力学学科中比较年轻的一个分支。1929年,宾汉姆

(Bingham)教授倡议在美国成立流变学会并出版流变学杂志。一般以此作为流变学的创立标志。1948年在荷兰召开了第一届国际流变学会议,以后每四年举行一次国际流变学会议。我国于1985年11月在长沙举行了第一届全国流变学会议,1987年11月在成都举行了第二届全国流变学会议,以后每三年举行一次全国性流变学会议。流变学具有无限广阔的发展前景,将为解决我国现代化进程中提出的有关科学问题作出贡献。

第一章 流变学基础

流变学以其具体研究对象的不同可分为不同的学科分支。但在所有流变学的研究中一般包括三个基本内容:1) 力、变形(流动)和所研究的流场定义;2) 本构方程和所研究物料的流变模式(或流变方程);3) 物料的流变性测量技术。下文将分别论述。

第一节 力、变形及典型流场举例

流变学是研究力与变形(包括流动)相互响应的科学。流体流变学可以定义为研究流体的应力和相应的应变之间相互关系的科学。因此有必要了解力和变形的基本概念。

一、连续介质中的应力

我们研究的对象是流体。流体是由无数分子组成的,可归属于连续介质。为研究方便,将流体假设为由许多称之为质点(或物理点)的微小流体微团组成。这些流体微团必须是:无空隙地充满了流体所占据的整个空间,它们的运动或平衡永远是互相牵连的,这个条件就把流体模型化了;而且各个微团的基本物理性质的变化是连续的,如温度、密度、浓度等等。具备上述特点的物料可称为连续介质。

作用于连续介质上的力,基本上可分为两类,即外力和内力。

外力——周围物体对该连续介质作用而形成的力。在流变学研究中,外力常常是已知的,如:重力、压力和扭矩等。

内力——流体微团之间的相互作用的力。应该指出:即使没有特定外力的作用,流体微团之间依然存在着相互作用的内力,只是此时各内力处于动平衡状态,使连续介质保持一定的形状。流变学

中所指的内力是在特定外力作用下,流体微团之间相互作用的力发生了相应的变化,破坏了原来的平衡状态,增加了附加内力,使连续介质产生相应的变形(或流动),建立新的动平衡状态。这种附加的内力称为应力。应力是随外力的变化而变化的。

作用在物体某一点上的力,一般可用一个向量来表示,因为表征一个力不仅要有大小而且还要有方向。如果力不仅仅作用在一点上,而是同时作用在相互联系的许多点上(如压力使水沿管道流动),此时力的表示,就要涉及一种称之为张量的高阶向量。因为我们研究的是连续介质,作用在连续介质上的任意力,使它产生一个三维空间内力系。若以直角坐标作为参照系,空间力就可分解为如图 1-1 所示的九个分量。习惯上规定,第二个下标表示应力的方向,第一个下标表示应力作用面的法线方向。例如 τ_{xx} 代表作用在垂直于 x 轴的 xy 面上,沿 x 方向的应力。 τ_{xy} 代表作用在垂直于 x 轴的 xy 面上,沿 y 方向的应力。

由图 1-1 可以看出,在特定外力作用下,连续介质中微元体的应力张量可以分解为九个分量。如果确定了九个应力分量在某种坐标系中的值,就能求得在任何坐标系(如球坐标、柱坐标)中的分量值。

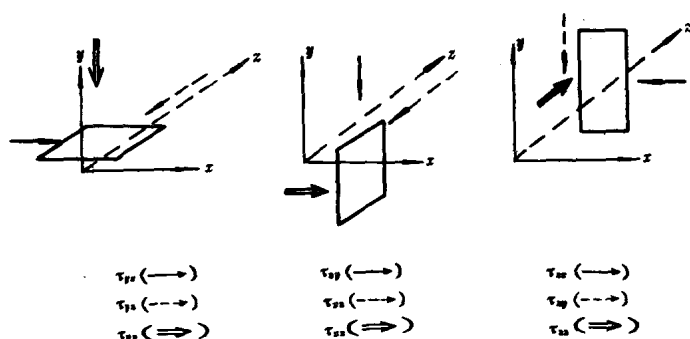


图 1-1

应力张量可以用矩阵形式表示,它的全部展开式为

$$T_r = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

T 是 tensor(张量)的第一个字母,用 T_r 表示应力张量。两个下标字母相同的分量是法向应力分量;两个下标字母不同的分量是剪切应力分量。

对于各向同性的连续介质,则应力张量是对称张量,其分量 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{xz} = \tau_{zx}$; $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ 。因此只需六个独立分量,就能完全表征连续介质中的应力状态。

以上是连续介质的三维空间应力状态的一般表示法。对物料的流变性研究而言,特别重要的是应力状态的一些特殊类型。例如:在充分长的时间内处于静止状态的液体中,微元体的任何面不存在剪切应力分量,在互相垂直的三个面上的法向应力相等,而且仅有各向同性的压力 P 存在,这样,应力状态就大大简化了。又如:有一外力 ΔP 作用于圆形管道内,使水沿管道产生稳定的层层流动,水中相应的应力张量 T_r 可以简化为 $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \Delta P D / 4L$,其它应力分量均为零,沿管流方向的剪切应力 τ_{xy} 即可求解。

二、连续介质的变形(包括流动)

物料变形(包括流动)的基本特征,是物料中各点发生了一定的相对移动。根据连续介质的概念,可以把物料的状态定义为构成物料的物理点(质点)在空间位置上占据一定的位置,形成一种确定的构形,因此决定物料状态的是物理点构成相对于某一参照系的确定位置。从这个意义上讲,物料状态的变化称为变形,而物料连续地、无限地变形就是流动。其变形的连续性不仅包括两个物理点之间在空间位置上的相邻性,且变形后两物理点仍保持相邻,也就是说在变形过程中,物料的连续性不会破坏。

流变学中有三种基本变形:简单拉伸、简单剪切和体积压缩与膨胀。

简单拉伸——物料只有一个方向上发生拉伸应变。如长细比很大的杆件发生单向拉伸时,只能度量出拉伸方向的应变。

简单剪切——平行于力作用方向的相邻面之间产生的相对移动。物料的形状变化是棱边夹角歪斜的结果,但尺寸不变。简单剪切变形随时间持续发展的结果是简单剪切流动,如水沿水平等径管道的稳态层层流动。

体积压缩和膨胀——是静压变化引起的。静压是一种各向同性的力。对于各向同性的物料,只是改变体积单元的体积,而不导致各边长度比和夹角的变化,即原来是球形的变形后仍为球形。

真实物料的实际变形,只不过是其中之一种或是基本变形的叠加而构成的复杂变形。因而对物料的任意变形而言,需要用应变张量和应变速率张量来描述,可以记为

$$T_e = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

$$T_s = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \dot{\epsilon}_{xy} & \dot{\epsilon}_{xz} \\ \dot{\epsilon}_{yx} & \dot{\epsilon}_{yy} & \dot{\epsilon}_{yz} \\ \dot{\epsilon}_{zx} & \dot{\epsilon}_{zy} & \dot{\epsilon}_{zz} \end{bmatrix}$$

T_e 代表二阶应变张量的一般形式。 T_s 代表二阶应变速率张量的一般形式。应变张量是以物理点位移矢量的变化为依据的,应变速率张量是以物理点的速度矢量的变化为依据的。如果物料只有物理点位移矢量的变化,那么只产生 T_e 。如果物料只有物理点速度矢量的变化,那么只产生 T_s 。对于各向同性物料也只有 6 个相应的应变(或应变速率)张量分量,它们是彼此独立的。即使只有 6 个独立张量分量,求解也是困难的,但若与具体流场结合起来,就有可能简化。例如:水在外压作用下,沿水平圆形管道作稳定的层层流动,只有在力作用方向上产生的剪切流动,而且只有一个方向上的应变速率分量不为零。经数学推导,此状态下的应变速率常用剪切率 γ 表示,而且

$$\dot{\gamma} = \left(-\frac{du}{dr}\right)$$

三、典型流场举例

流场是指液体的物理点(或微团)的物理量(如位移、运动速度……)在给空间内的分布。典型流场是为简化运动微分方程而引入的简单流场,而且此简单流场在实际生产中又具有现实意义。

这里介绍一个简单剪切流场,如图 1-2 所示。此流场由两块平行平板所组成,其中上板移动,下板固定,板间距 h 远远小于平板的宽度 W 。当上板以一定速度移动时,带动两板间的纯粘性液体,使两板间液体层的物理点的运动速度形成线性分布,紧贴上板的液层速度最大,紧贴下板的液层速度为零。此时以液层物理点的运动速度在两平行平板间的分布来表示的流场,可作如下描述:以直角坐标为参照系,上述流场有 $V_x = V_y = 0$ 。沿力作用方向的各液层的速度以 V_x 表示, V_x 的大小与液层所在位置成比例,即 $V_x = D \cdot y$ 。 D 定义为速度梯度,可表示为 $D = V_x / y$, y 是某液层所在位置。如果将速度梯度以微分形式表示,则 $\dot{\gamma} = dV_x / dy$, $\dot{\gamma}$ 定义为剪切率。因此在此流场下,纯粘性流体没有应变张量,只有应变速率张量,而且可以大大简化。其中只有应变速率分量 $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{\dot{\gamma}}{2}$, 其余应变速率分量均为零。

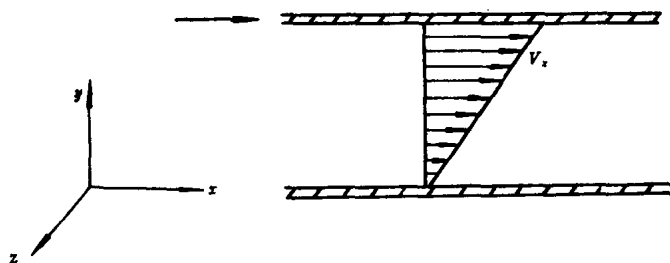


图 1-2

属于简单剪切流场的还有:(1) 管流中的 Poiseuille 流动;(2) 同轴旋转圆筒间的 Couette 流动和 Searle 流动;(3) 旋转锥板间的