

国外石油管道输送技术

国外石油管道输送技术

《国外石油管道输送技术》翻译组译

石油化学工业

石油化学工业出版社

内 容 提 要

本书是根据美国石油工业出版公司1971年出版的《油气管线手册》(Oil And Gas Pipelining Handbook)一书摘译的有关输油部分。

本书内容包括:管沟开挖、管线焊接、管线的涂层和包扎材料、管线工作压力、管线的维修和防腐、管道的摩擦系数和压降、压力与粘度、比重与重量的对照等技术资料和数据。还介绍了大直径管线的经济性和电子计算机在维修中的应用等有关资料。可供输油管线设计人员、现场技术人员和有关领导同志及工作人员批判地参考。

国外石油管道输送技术

《国外石油管道输送技术》翻译组译

*

石油化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

石油化学工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 $7 \frac{1}{4}$ 插页 1

字数 170 千字 印数 1—5,600

1976年6月第1版 1976年6月第1次印刷

书号15063·油42 定价 0.65 元

译者序

这本书是根据美国石油工业出版公司在1971年所出版的“油气管线手册”(Oil And Gas Pipelining Handbook)一书译成的。本书只翻译了其中有关输油部分的一些文献和图表，并作了删节。

由于时间匆忙，水平有限，在译文中难免有不妥之处，望读者指正。

《国外石油管道输送技术》翻译组

目 录

液体石油输送管线的工作压力	1
在现场用超声波检查大口径管线的环向焊缝	34
自动电焊机	40
大直径管线的经济性	43
标定液体涡轮流量计	46
管线维修中的问题及其解决办法	51
控制腐蚀是维修工作中的一个重要部分	57
电子计算机在维修中的应用	60
被油污染土壤复原的新方法	65
浮顶油罐和固定顶油罐蒸发损耗的确定	68
聚乙烯涂覆层包扎管所需材料表	74
沥青玛蒂脂管的重量和比重	75
涂覆层的底层和中间层的涂料用量表	76
管子涂覆和包扎所需的材料	77
管沟开挖表	78
输油管道的摩阻系数及压降计算	79
每哩的压力损失	89
在不同管径的情况下同样摩擦损失的当量长度	90
在同样压力下不同管径的排量比较	91
焊条需要量	92
焊缝长度与管径的关系	93
管线穿越河流时的浮力比较	94
粘度换算表	95
压力对油的粘度的影响	96
API比重与比重的对照表	97
不同比重的油柱高折合成, 磅/时 ²	98
避免储存蒸发耗损所需之蒸汽压, 磅/时 ²	99
较轻的烃的蒸汽压, 磅/时 ²	100
API 比重、波美比重、比重和重量的对照表	101
在60°F时API比重与比重、重量、压力的对照表	103
将不同温度下的体积折算成华氏60度时的体积表	104
计算输油管线压降的图表	106
圆和圆筒的周长、面积和体积	107
单位换算	109
电动机的电流, 安培	112

大庆原油的某些流变性质

杨基广

一 前 言

随着石油工业的高速发展，原油开采量日增，矿区原油的集输和向炼厂输送任务更加繁重。目前我国各大油田所产原油又多是高粘度、高含蜡的劣质原油，特别是大庆原油在常温下就凝塔为膏状，流动性很差，给输送这一些原油带来了困难。

现在解决高粘度、高含蜡劣质原油输送的习用方法是加热输送。加热的原油在管路中沿程温度逐渐降低，粘度增长很快，摩擦阻力加大，能量消耗增多，有时甚至因对原油性质了解不够，经验不足，不能及时采取措施发生“冻结”，造成全线停输事故，停输后的启动十分复杂。为了保证安全，要将原油保持在较高温度（一般在凝固点 5°C 以上）下输送，选择过高的泵压和加热温度，消耗大量燃料，安装多余的设备，使设计与实际生产情况不相符合，造成投资浪费，经营费用增高。

大庆油田一出油，部党组就提出了解决这项三高（高粘度、高凝固点、高含蜡）原油的输送任务。当时曾参考一些国外不完全的资料，开展了群众性的科研活动。北京石油学院于1960年进行了降凝试验，实践过程中观察到凝固的原油受到机械搅拌就会变稀，重新恢复流动。原油经过热处理可以降低凝固点等现象。

根据党的多、快、好、省建设社会主义和部党组的要求，制定经济有效的输送方案，合理地进行管路设计计算，保证经济、安全、可靠的操作经营和采取措施，就要回答：大庆原油

能否不加热进行输送；加热输送时，温度是否必须保持在凝固点以上。在低温时原油的流动性如何，经搅拌的原油稠度降低多少；管线输送一段时间后，启动需要多大压力等一系列问题。就要研究大庆原油的本质与周围环境所构成的矛盾及其运动规律。因此，了解原油的流变性质，解决三高原油的输送是我国储运工作者迫切需要解决的问题之一。

本文为了解决大庆原油的集输问题，就其粘度——温度关系，触变性，结构的恢复和屈服剪切应力等流变性质以及热处理效果进行了初步的探讨。力图为集输系统的管路设计、操作经营和采取措施提供一些参考依据。

二、文献综述及机理探讨

1. 流体流变性质及其分类

流变学是研究物质流动和形变的科学，属于物理化学力学的一部分，主要研究物体的非弹性形变，具有结构的流体和固体的流动等。如液体的粘性流动，胶体的“粘度迟滞”和塑性，以及分散体系的松弛现象，弹性后效和触变性等。这些性质被叫做物质的流变性质。

流体的流变性质可以从不同途径来进行研究，物理化学家往往从流体的物理和化学性质来研究。一些理论流变学者则提出较为复杂的数学模型来描述流体的流变性质。在实用流变学范围里主要讨论物体在外力作用下，剪切应力与速度梯度等参数之间的相互关系。目前实用流变学的研究多限于物体处在层流流动的范围，这一范围是实用价值较大的部份。根据参数关系是否随外力作用时间的延续而变化分为两大类。

1. 流变性质与时间因素无关的流体

不因外力作用时间的长短而改变其流变性质的流体，根据

在层流情况下，对流体施加的剪切应力和由此产生的垂直于剪切面的速度梯度之间的关系一般又分为下列几种流体。

牛顿性流体

互相距 dy 的两个平行平面间的流体薄层（图1），其中一个平面固定，在另一个面积为 A 的平面上作用一个平行于平面的外力 F ，在稳定情况下，力 F 将被流体内部的粘滞力所平衡。当流体在层流状态时，剪切应力 τ 与速度梯度 $\frac{dv}{dy}$ 成正比例：

$$\tau = F/A = \mu \left(-\frac{dv}{dy} \right) = \mu (-\gamma) \quad (1)$$

式中的 μ 是比例系数，又称谓牛顿粘度，其单位是 [达因·秒/厘米²]，1 达因·秒/厘米² 叫做泊，其百分之一叫做厘泊，这一方程就是著名的牛顿流体内摩擦定律。

以剪切应力与速度梯度在直角坐标纸中标绘，它们之间的关系是通过坐标原点的直线（图2曲线1）。此类曲线称做流动曲线）。关系线的斜率就是流体的牛顿粘度，是一个常数，代表流体的流变性质。曲线与 x 轴的夹角越大，则流体的粘度也越大。这类流体的主要特点是粘度与速度梯度的变化无关。凡是在恒定温度时，符合这一定律的流体都称为牛顿性流体，不符合上述规律的流体统称非牛顿性流体，以下介绍的都是非牛顿性流体。

塑性流体（宾汉姆塑性体）

静置的塑性流体，在小剪切应力作用下，产生弹性形变，接近于理想弹性固体。当剪切应力增加到某一数值后，流体开始流动。使流体流动的最小应力称为屈服剪切应力，典型的塑性流体的流动曲线如图2曲线2所示，其流变方程为

$$\tau = \tau_{y0} + \mu_p \frac{dv}{dy} \quad \tau > \tau_{y0} \quad (2)$$

式中的 τ_y 值等于流动曲线应力轴上的截距。属于这一类型的流体，常见的有泥浆、油墨等。

塑性流体

塑性流体的流动曲线在 $\tau - \dot{\gamma}$ 直角坐标中通过原点，其斜率随速度梯度增加而减小（图2曲线3）。剪切应力与速度梯度间的关系比较复杂，不同的作者得出不同的经验函数关系式（2），其中最主要，对工程上应用较方便的是“幂定律”关系。

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n \quad n < 1 \quad (3)$$

K 值说明流体的稠度，流体越粘， K 值越大，指数 n 说明流体偏离牛顿性流体的程度， n 值与 1 的差值越大，偏离牛顿性质越远。这类物体又可叫作“幂定律”流体。

膨胀性流体

膨胀性流体的流动曲线如图2曲线4所示。它的最大特点是随着速度梯度增加曲线的斜率增大，即稠度增加，其流变方程式与塑性流体的一样，但其流动行为指数 $n > 1$ 。

2. 流变性质与时间因素有关的流体

除上述的四种流体以外，还有一些流体的力学性质与剪切持续时间有很大关系。在恒定的温度，以恒定的速度梯度持续剪切时，流体的剪切应力和稠性随着剪切时间延长而降低，最后达到某一稳定数值。停止剪切后，静置过程中稠性又逐渐恢复，这样的性质叫触变性。

流变性质和触变性流体相类似的叫做流凝性流体。在恒定剪切速度下，其剪切应力随持续剪切时间延长而增加。这种行为一般在小、中速度梯度时表现得特别明显。

牛顿性流体在层流时具有粘度性质。各种非牛顿流体的稠性是在层流时根据 $\tau - \dot{\gamma}$ 曲线或根据说明曲线的流变方程式中

的常数相应地确定的。为了能和大家习惯的牛顿性流体对比，人们常对非牛顿流体用“表观粘度”来说明流体的稠性，表观粘度就是以单位面积上的剪切应力与相应的速度梯度之比来定义的，表示式为：

$$\mu_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (4)$$

流变性质与时间因素

表 1

无失的各种流体的表观粘度列在表 1 中。可以看出非牛顿流体的表观粘度值都随着速度梯度的变化而增减，亦即表观粘度只对应于其测定时的速度梯度才有意义。

流体类型	表观粘度	说明
牛顿性流体	$\mu_a = \tau / \dot{\gamma}$	$\mu_a = \mu$
塑性流体	$\mu_a = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p$	
假塑性流体	$\mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1}$	$n < 1$
膨胀性流体		$n > 1$

五、原油流变性质及其机理的研究

十九世纪末，人们发现了高粘度、高含蜡而凝固的所谓“三高”原油。在低温情况下，原油出现“粘度反常”，偏离了常见的牛顿流体的性质。它的流动规律不符合牛顿流体的内摩擦定律。利用用于牛顿流体管路压降计算的公式进行设计时与实际管路压降产生较大的误差，并且在低温时原油的粘度升高很快，甚至发生凝固。给输送带来了很大的困难。随着“三高”原油的开采量增多，输送任务加大，解决“三高”原油的输送问题极为迫切，从而引起了人们的重视和研究。

最初是从输送方法和改变原油流动性质方面进行研究的。近年来，利用现代测量仪器和胶体化学的研究成果，对原油流变性质进行了系统地研究。

1954 年瑞特 (Ritter R. A) [3] 测定了包括低温范围内原油的粘度—温度曲线，1962 年苟威尔 (Govier G. W.) 和瑞特

(Ritter) [4] 详细研究低温时高含蜡原油的流变性质指出:

(1) 原油的流变性质在倾点以上较高的温度时, 即偏离牛顿流体, 且随温度降低而增加; (2) 其非牛顿行为是假塑性和触变性而两者常联系在一起; (3) 触变行为表现在受到10~100分钟的持续剪切后, 结构就破坏, 此后原油与正常的假塑性行为相同等。九条结论。1963年高米恩 (KOTEN B. F.) [5] 对土库曼原油流变性质的研究指出: 对土库曼原油高于凝固点以上10~20°C 时出现粘度常数; 在凝固点以下粘度开始与速度梯度有关, 随它增加而减小; 土库曼原油有明显的触变性, 至受剪切时其剪切应力下降。

在对原油流变性质研究的同时, 一些物理化学家也对原油物理性质和组成进行了研究, 以探求呈现非牛顿性质的内部原因。原油是由烷烃、环烷烃、芳香烃及含氧、氮、硫的混合物组成, 同时原油中还存在着水、无机盐等杂质。在常温下从正烷到十五烷的正烷烃及异构体是液态, 为原油的主要成分。十六烷以上的高烷烃是固体, 就是我们称为石蜡。环烷烃和芳香烃的氧、氮、硫等的化合物可成为胶质及沥青质。胶质溶于液态烃中, 而沥青质不溶于烃, 成细小颗粒悬浮在原油中。石蜡在原油中的溶解度受石蜡的熔点、原油比重(组成)的影响。当温度降低到原油的饱和状态以下, 出现过饱和, 温度再继续降低, 石蜡就要析出结晶中心——晶核, 出现两相系统, 这时的温度被称做原油的析蜡温度; 温度不断下降, 继续析出的石蜡会在晶核上一层层的建造起来, 逐渐长大, 靠近晶体的边缘部分又会再熔至新结晶, 使晶粒合併, 晶粒的成长受介质的粘度、石蜡的浓度、温度降落梯度和搅拌等因素的影响。石蜡的析出使流体内部结构发生了变化, 流体的流变性质由牛顿性转变为非牛顿性流体。

原油中的沥青质高度分散在原油中，在析蜡过程中可做晶核，又可与半极性的胶质一起吸附在晶粒表面，降低其表面能，阻碍晶体的成长，并使其表面变为高度不规则的超胶团结构，胶团相互接触后，因其表面性质不同，它们不能形成整齐的、紧密的聚结构，而是在胶团表面能较高的某些环节上联接起来，构成峰峦状的析蜡结构单元。是在液态烃中，温度越低，析出的石蜡增多，许多结构单元又会联接起来形成各空腔互不连通的空間网络结构，延续到布满全部容器，使原油失去流动性，即原油发生凝固。特格加勒耶夫 (Гергарев B. H.) 和王洪兴 [8] 在偏光显微镜下观察了石蜡结晶的形状并拍摄了照片，进一步证明了原油中石蜡结晶的论点，凝固的原油在外力作用下，破坏了原油中的网状结构，释放出包圍在空腔中的液体原油，使之恢复流动，随着外力作用时间的延长，结构破坏数量增多，稠度降低，即呈现触变现象。

目前，高粘度、高含蜡而凝原油的流变性质及其造成复杂流变性的机理研究的还很不够，有许多现象还得不到完满的解释，在本文中主要讨论原油的流变学性质，不涉及机理的研究。

四 管路应用

研究原油流变性质的目的是将实验数据应用于管路压降计算，进行设计，指导操作经营和提供采取措施的依据。

大家知道，流体在管路中流动的压降，即能量的消耗，在层流时能量主要用于克服流体的内摩擦阻力，而在紊流时主要用于相邻层间能量的交换，也就是说，管路中的压降规律与流态有关，管路内流体所处的流态取决于雷诺数的大小，当管路的直径选定时，雷诺数等于流体的平均流速与表观粘度的比值，由实验得知，高粘度、高含蜡而凝原油在高温、小粘度时，原

油基本属于牛顿性流体，管路压降计称可按牛顿性原油进行处理；在低温、高粘度时，原油的性质偏离了牛顿性质，要达到紊流需要很高的流速和很大的能量消耗，实用意义不大，另外非牛顿流体紊流规律的研究还不够，因此在本文中，只研究在层流情况的管路应用问题。为了便于比较，文中同时也讨论了牛顿性原油层流压降的计称。

牛顿性原油的管路压降计称是众所熟悉的达西——魏斯巴哈公式（或称凡宁公式）

$$\Delta P = \lambda \rho \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

式中摩擦系数 λ 决定于雷诺数 Re ，当 $Re = DV\rho/\mu \leq 2000 \sim 2300$ 时，流体为层流。将层流状态下的摩擦系数 $\lambda = 64/Re$ 代入方程式 (5)，可得到哈金——泊肃叶公式

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{52\mu V}{g D^2} \quad (6)$$

对非牛顿原油，因表观粘度 μ_a 随着速度梯度发生变化，上式 (6) 不能应用，无奈 (Mooney A.) [9] 根据流体的“一般”性质和“滑动”概念导出了与时间因素无关的流体在管壁处的速度梯度的计称公式：

$$\left(-\frac{dv}{dr}\right)_w = 3\left(\frac{Q}{\pi R^3}\right) + \frac{R\Delta P}{2L} \frac{d(Q/\pi R^3)}{d(R\Delta P/2L)} \quad (7)$$

米兹那 (Metzner A.B) 和瑞德 (Reed J.C) [10] 引入 $V = Q/\pi R^2$ $D = 2R$ 和

$$n' = \frac{d \ln(D\Delta P/4L)}{d \ln(8V/D)} \quad (8)$$

代入方程式 (7) 加以整理得

$$\left(-\frac{dv}{dr}\right)_w = \frac{3n'+1}{4n'} \frac{8V}{D} \quad (9)$$

当 n' 为常数时，对系数进行分离变量积分，并令积分常数

等于K, 得

$$\frac{D\Delta p}{4L} = K \left(\frac{8V}{D} \right)^n \quad (10)$$

通过方程式(10)可以计算非牛顿性流体在管内流动的压力降。

非牛顿性流体的流态变化的指标可以模拟牛顿性流体的雷诺数来确定。以“一般雷诺数” Re 表示

$$Re = \frac{D^{n'} V^{2-n'} \rho}{8^{n'-1} K} \quad (11)$$

这样习惯上的达西公式和 $Re-1$ 图表, 同样可以用来计算非牛顿流体在管路中层流时的压降, 但是式中的摩擦系数是 $64/Re$ 而不是 $64/Re$ 了。

苟威尔 (Govier G.W.) 建议非牛顿性原油由层流过渡到紊流的临界一般雷诺数采用 $Re \leq 3000$ 。若 $Re > 3000$ 流体便从层流过渡到紊流。

方程式(10)中的常数 n' , K' 可通过流体流变性质的实验结果用图解法或解流变方程求出。

三. 流变性质的测定方法

I. 通用的方法及其比较

适用于流变参数的测量方法和仪器的选择, 决定于所测流体的性质和要得到的参数的内容。常用于测定原油流变参数的仪器是凝固点测定仪, 恩氏粘度计, 毛细管粘度计和旋转粘度计等。

1. 凝固点测定仪: 是测定原油在特定条件下失去流动性的温度的仪器。标准仪器及测定方法详见石油部部订标准(SYB), 也可将试管内冷却至凝固的原油倾斜 45° , 缓慢加热至原油移动到某一位置时的温度作为凝固点。

由于凝固点是在特定条件下测定的，不能真正反映原油的流变性质。在凝固点以下的原油受到剪切时仍然可以流动，凝固点也不能说明原油的稠性大小。如华北孔5井原油凝固点为 -3°C ， 20°C 的粘度为 8.23×10^4 厘泊，而大庆混合原油凝固点为 30.5°C ， 20°C 的表现粘度（速度梯度为 9 s^{-1} ）为 9.0×10^2 厘泊。凝固点更说明不了原油的流变性质大小，但它的测量方法比较方便，因此常常用来粗略地说明原油的性质。

2. 恩氏粘度计：是检验石油产品的工业方法，其原理是测定被测流体与 20°C 同体积的水流出容器出口短节所需时间的比值。粘度单位以 E （度）来表示。其优点是使用方便，缺点是条件性很强。在测小粘度流体时，不能保证其在层流状态下流出容器；高粘度时不流出。它只适用于测定中等粘度的原油或其成品。这种仪器不能改变液层间的速度梯度，也不能使流体受到连续不断的剪切，所以不适用于非牛顿流体和具有流变性质流体的流变性质的测定。

与此类似的方法还有美国的塞布托，英国的雷特瓦特，法国的白布勒等〔11〕

3. 旋转粘度计：旋转粘度计中常见的是同轴圆筒形旋转粘度计，种类很多〔12〕。主要构造由一个内圆柱和一个外圆筒构成同心旋转构件（图3）。使其中之一保持固定，另一个在规定的转速下旋转，被测流体放在两个圆筒的间隙内，受到剪切的流体产生剪切应力，与作用在圆筒上的外力矩平衡。通过外力矩和转速所求得的流体剪切应力和速度梯度来确定其流变性质。流体的剪切应力和力矩的关系为：

$$G = 2\pi r^2 \tau \quad (12)$$

其半径为 r 处的速度梯度为：

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dr} = r \frac{d\Omega}{dr} \quad (13)$$

我们可以由直接测得的 G 和 Ω 求出 τ 和 $\dot{\gamma}$ 作流动曲线或求得 $\dot{\gamma} = f(\tau)$ 的流变学方程式。进而求出流变参数。如假塑性流体的流变学方程为 $\tau = K(-\dot{\gamma})^n$ ，若两边取对数，方程为

$$\ln \tau = \ln K + n \ln (-\dot{\gamma}) \quad (14)$$

在 $\tau - \dot{\gamma}$ 的双对数坐标纸上是一条直线关系。直线在 τ 轴上的截距即稠度系数 K ，直线的斜率即流动行为指数 n 。

对牛顿性流体可由仪器的几何尺寸， G 和 Ω 直接得到粘度的数值。将式(12)和(13)代入牛顿内摩擦定律并分离变量得

$$d\Omega = \frac{G}{2\pi r^3 \mu} dr \quad (15)$$

取下列边界条件

当 $r = r_1$ 时， $u = r_1 \Omega$ ； $r = r_2$ 时， $u = 0$

对(13)式进行积分，代入边界条件，得流体的粘度：

$$\mu = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4\pi r_1^2 r_2^2} \cdot \frac{G}{\Omega} \quad (15a)$$

在一般情况，仪器的几何尺寸是固定不变的，假式(15a)可以表示为

$$\mu = m G / \Omega \quad (15b)$$

式中： $m = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4\pi r_1^2 r_2^2}$ ，仪器常数，这样理论上只需一次测量

就可以测得牛顿流体的粘度。

旋转粘度计的最大优点是可以在较大的范围内改变流体的速度梯度，并能保持连续长时间的剪切，这一点对研究物质的非牛顿性和触变性有很大的意义。而且操作简单，可以自动记录。但其精确度不如毛细管粘度计高。一般仪器结构复杂，价格较贵。

4. 毛细管粘度计：毛细管粘度计是直接模拟管路流动的仪器，种类很多，其构造主要由三部分构成：容器、毛细管和

接收器。在自身液柱或外加压力下测量固定体积的液体经过毛细管所需的时间。对牛顿性液体在层流情况下，根据液体的体积和流出时间的哈金—泊肃叶公式，可直接标出液体的粘度：

$$\mu = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l V} t \quad (16a)$$

式中：t — 固定体积的液体流出时间，秒。

若粘度计一定，压差 Δp 为常数时则 (16a) 式可改写为

$$\mu = m t \quad (16b)$$

用毛细管粘度计测量液体的粘度时，如果忽略了动能损失和管端效应，可得到很精确的结果 (13)。其数据可以直接用于管路压降计标。如对幂塑性液体，可以直接得 $D\Delta p/4l$ 和 $8um/D$ ，根据方程式 (10) 两边取对数得

$$\ln(D\Delta p/4l) = \ln K' + n' \ln(8um/D) \quad (17)$$

在 $D\Delta p/4l - 8um/D$ 的双对数坐标纸中绘出测量数据的曲线可以求得 K' 和 n' ，从而直接计标任意管径的层流状态的压降。

从方程式 (14) 和 (17) 可以看出，用旋转粘度计与毛细管粘度计所求得的流变参数是不同的，它们之间的关系可通过下面的方法导出。

将方程式 (9) 取对数并进行微分，得

$$\frac{d(\ln(-du/dr)_w)}{d(\ln \tau_w)} = \frac{d[\ln(3n'+1/n')]}{d(\ln \tau_w)} + \frac{d(\ln 8um/D)}{d(\ln \tau_w)} \quad (18)$$

将方程式 (14) 微分，移项得

$$n = d(\ln \tau) / d(\ln(-du/dr)) \quad (19)$$

将方程式 (19) 和 $n' = d \ln(D\Delta p/4l) / d \ln(8um/D)$ 代入方程式 (18) 得

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n'} + \frac{d \ln(\frac{3n'+1}{2n'})}{d(\ln \tau_w)}$$

$$\text{或} \quad n = n' / \left(1 - \frac{1}{3n'+1} \left(\frac{dn'}{d \ln \tau} \right) \right) \quad (20)$$

当 $D\Delta p/4l$ 与 $8\mu_m/D$ 在对数坐标中呈直线关系时 $d\eta/d\ln\tau = 0$ $\eta = \eta'$ 这时积分方程式 (3) 得

$$\frac{D\Delta p}{4l} = K \left(\frac{3\eta + 1}{4\eta} \right)^n \left(\frac{8\mu_m}{D} \right)^n \quad (21)$$

比较方程式 (21) 和 (10) 得

$$K' = K \left(\frac{3\eta + 1}{4\eta} \right)^n \quad (22)$$

若 $D\Delta p/4l$ 与 $8\mu_m/D$ 在对数坐标中不是直线 η 和 η' 之间的关系比较复杂。因此用旋转粘度计测得的流变参数就不如直接用毛细管测得的数据。

但毛细管粘度计对测定深色、稠凝原油不方便，而且如何用以研究触变性的问题尚未获得解决。因此限制了它的应用范围。

II. 试验设备的选择及其描述

大庆原油是深色、高粘度、高含蜡稠凝原油。在凝固点以上即呈现非牛顿性质，测值重复性较差，在凝固点以下，原油的流变性质在毛细管中就更难测定，特别对其触变性的研究，用毛细管粘度计也不能达到目的。因此我们决定选用旋转粘度计。

开始我们曾试用过斯托莫 (Stomer) 旋转粘度计，但它不能保证长时间的恒定剪切（靠下落重物带动旋转），而且圆柱夹缝中的速度梯度很难求得。也考虑过改装泥浆静剪力仪为旋转粘度计，但它是外圆筒旋转，恒温问题没有解决。故此都没有采用，最后确定了应用 RHEOTEST 旋转粘度计（以下称 R-V 旋转粘度计）。其构造如图 4，主要参数列在表 2 中。根据方程 (9) 估计管壁处的速度梯度列在表 3 中，可以看出 R-V 旋转粘度计的速度梯度变化范围与俗称的 1" - 8" 管内速度梯度基本符合。并且该仪器的测粘范围在 $10 \sim 10^7$ 厘泊的广阔区域内，它适用于测量低粘度、高粘度时的原油数据。其旋转由