

含蜡原油流变特性 及其管道输送



罗塘湖 编著

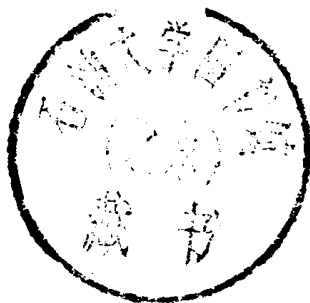


石油工业出版社

• 071133

含蜡原油流变特性及其 管道输送

罗塘湖 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书应用流变学与非牛顿流体力学的基本知识,着重研究了含蜡原油流变特性的变化规律、原油流变特性的评价、测量以及管道流动计算等问题。书中依据对国内外输油工艺技术现状及其发展趋势的综合分析,比较系统全面地论述了原油热处理、添加降凝剂和减阻剂、低粘液环等原油常温输送工艺技术。

本书可供从事原油集输和管道长输研究、设计和运行管理的科研工作者、工程技术人员,以及石油大专院校师生阅读参考。

含蜡原油流变特性及其 管道输送 罗塘湖 编著

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京同兴印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米32开本 7¹/₂印张 163千字 印1—1,500

1991年5月北京第1版 1991年5月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0501-8/TE·479

定价: 2.40元

前 言

本书的编写意图，在于应用流变学和非牛顿流体力学的基本知识，吸收国内外科研成果，研究含蜡原油流变特性的一般变化规律，分析含蜡原油非牛顿管流的特点，论述原油常温输送工艺的各种方法，以推进输油工艺科研工作和指导输油生产实践，发展输油工艺技术。

本书比较简略而系统地介绍了流变学的发展历史和基本知识，以及非牛顿流体的分类和它们的流变特征。在此基础上，吸收国内外科研成果，着重研究了含蜡原油流变特性的一般变化规律，论述了含蜡原油非牛顿管流计算方法，并总结国内同行们的实践经验，讨论了原油流变特性的评价和测量问题。

书中有相当大的篇幅用来论述含蜡原油常温输送工艺技术，诸如原油热处理输送工艺、原油添加降凝剂和减阻剂输送工艺、原油稀释输送工艺、原油低粘液环输送工艺、原油乳化输送、水悬浮输送和浆料输送工艺，等等。在研究每一种常温输送工艺时，都从其作用机理、应用场合、处理效果（即处理后原油流变特性的改善程度），应用技术和应用实例诸方面进行系统分析，着重总结国内外尤其是国内的实践经验和科研成果，力求作到理论与实践、科研攻关与生产应用相结合。

本书主要以从事原油集输和管道长输的科研工作者、设计工作者以及运行管理人员为对象，同时也可作为石油大专

院校储运专业师生的参考书。

由于著者水平有限，缺乏经验，书中谬误在所难免，敬请读者赐教，以便再版时修正。

在本书的编著过程中，除书末列出参考文献外，还吸收了有关课题的若干技术资料，著者谨致谢意。

1989. 9 于廊坊

目 录

绪论

第一章 非牛顿流体	6
第一节 本构方程和流变模式	6
第二节 流体分类	9
第三节 与时间无关的粘性流体	10
第四节 与时间有关的粘性流体	21
第五节 粘弹性流体	31
第二章 含蜡原油流变特性及其评价	42
第一节 原油的一般物性	42
第二节 含蜡原油流变特性的变化规律	48
第三节 含蜡原油流变特性的评价	66
第三章 含蜡原油流变特性的测量	69
第一节 实验油样的预处理	69
第二节 原油凝固点的测定	70
第三节 原油屈服值的测定	74
第四节 原油析蜡点的测定	76
第五节 原油蜡晶的观察	81
第六节 粘度测定与数据处理	83
第七节 用试验模型管路测取流变参数	87
第八节 原油触变性的测定	88
第四章 含蜡原油非牛顿流动计算	93
第一节 管路流动基本方程	93
第二节 与时间无关的非牛顿流体在管道中的层流流动	95
第三节 非牛顿流体流态的判别	106
第四节 与时间无关的非牛顿流体在管道中的紊流流动	108

第五节	触变性流体在管道中的流动	110
第六节	管路启动压力的计算	111
第七节	非牛顿流体非等温管路特性分析	112
第五章	含蜡原油管输工艺	114
第一节	输油工艺现状及其发展预测	114
第二节	含蜡原油热处理输送	121
第三节	添加降凝剂输送	147
第四节	添加减阻剂输送	164
第五节	稀释输送	179
第六节	低粘液环输送	182
第七节	乳化输送	199
第八节	水悬浮输送	202
第九节	浆料输送	204
第十节	伴热保温输送	205
第十一节	天然气饱和输送	207
第十二节	剪切处理输送	208
第十三节	其它输送工艺	211
附录		214
附录 1	改性原油凝固点测定法——直接冷却法	214
附录 2	改性原油凝固点测定法——熔化法	216
附录 3	原油凝固点测定法——凝点法	218
附录 4	原油析蜡点直观测定法	222
附录 5	使用差示扫描量热仪(DSC)测定 原油析蜡点的方法	226
参考文献		229

绪 论

我国的输油管道始建于50年代。截止1987年底，我国油气管道已有1.4万多公里，其中干线原油管道7862公里，初步形成了东北、华北和华东总长5350公里的东部输油管网。管道已与铁路、公路、水运和航空构成我国的五大运输行业。

根据国家交通运输“中长期科学技术发展纲要（草案）”关于油气管输工艺研究任务的规定，应“开展输油工艺基础研究；革新输油工艺，以满足不同油性与不同输油条件下的特殊需要，加强常温输油工艺以及高粘、易凝原油的多种物理、化学备输法的研究；开展不同成品油与不同原油的顺序输送及水输、器输、壁处理、原油改质等探索性管输工艺研究。”

我国现已投入开发的油田，大部分采出原油含蜡较高。除大庆、胜利、任丘和中原等俗称“三高”（含蜡量高、凝固点高、粘度高）原油外，另外还有特高含蜡易凝原油（含蜡40%左右，凝固点40~50℃）和特高含胶重质稠油（含胶30%左右，相对密度0.9以上）。总之，从流体力学的观点分析，我国原油大都流型复杂，流动性能差。因此，针对我国原油物性和流变特性，采用不同的物理和化学方法对原油进行改性，从而建立和发展具有我国特色的输送工艺技术体系，便成为我们石油储运科技工作者的首要任务了。

随着我国海上油田和西部地区油田的开发，海洋管道和

沙漠管道的建设任务已经提到议事日程上来，从而对输油工艺技术提出了新的更高要求。

当今，输油工艺技术日益新型化、多样化。在含蜡原油输送的科研、设计和生产运行中，越来越多地涉及流变学问题。为了建立和发展具有我国特色的输送工艺技术体系，我们应当进一步加强含蜡原油流变学的实验研究，并把含蜡原油流变学作为应用流变学的一个重要分支。这是输油工艺应用理论研究的一项重要任务。

流变学是研究物料（物质的聚集体）变形与流动的科学。即使在古时候，人们在日常生活中研究已有物料的使用时，就已经获得了有关物料变形与流动方面的知识。

在适当力系的作用下，改变物料的形状和尺寸，称为变形。变形连续地无限地增加，称为流动。变形和流动，是自然界常见的现象。随着医学、建筑、运输、冶金、水利、宇航、生物工程、石油化工、纺织、地学等工业技术的发展，特别是高分子聚合物工业的飞速发展，流变学的研究内容也不断丰富和发展。

胡克最先于1660年阐述了弹性物体的应力与应变的线性关系。牛顿最先于1687年阐述了牛顿流体的剪切应力与剪切速率的线性关系。胡克定律和牛顿内摩擦定律于十七世纪提出，但直到十九世纪末才由柯西、纳维、斯托克斯等人将其推广应用于三维变形和流动，并且为科学界所广泛接受。此后，胡克弹性固体力学和牛顿流体力学随着它在许多工程的分支学科中的应用而得到巨大发展。但应指出，流变学一般不研究以上两种材料。

随着科学技术的发展，人们发现不少物料在某些特定的条件下，表现出与时间因素有关的复杂的力学性质。例如，

物料的蠕变现象，松弛效应和触变特性等。金属在高温下，受到恒定载荷的作用，其变形随时间而缓慢地增加，此即蠕变。物料在固定形变下，其应力随时间而逐渐衰减，谓之松弛。含蜡原油在低温条件下，其结构强度随剪切作用时间的延续而减弱，表明它具有触变性。凡此种现象说明，这些物料中某点的应变状态，不仅与该点同一瞬间的应力状态有关，而且还与该点在此刻之前的整个应力历史有关，因此，这些物料是具有记忆性的。流变学则是研究与上述现象有关的一门新的力学分支。

流体流变学主要研究和确定流体的流变特性，建立物料的本构方程或流变方程，它着重研究的对象是非牛顿流体，象油漆、石墨、悬浮液、钻井泥浆、含蜡原油等等。

流变学所研究的物料对象和应用范围十分广泛。在研究物料的流动问题时，大至地球的各种运动（如地震的孕育过程、泥石流、滑坡、雪崩、海洋流动等），小到血液在微血管中的流动，以及高分子聚合物化工流体、油漆、石墨、悬浮液、浆料、钻井泥浆、含蜡原油等物料的流动问题，都必须研究和考虑物料的流变特性。

流变学是一门边缘学科，它涉及力学、物理学、化学、材料科学、工程科学等多种学科。流变学的研究方法可以归纳为两大类，一种是宏观的方法，即从连续介质力学角度出发，进行实验研究；另一种是微观方法，由物料的微观结构入手，建立起物料的本构方程或流变方程。我们在含蜡原油流变学的研究中，一般采用前一种研究方法，即通过大量的实验研究，揭示其流变特性，针对某种条件建立流变模式方程，以此描述含蜡原油受力变形的关系。

流变学是比较年轻的力学分支。1929年，宾汉姆(Bing-

ham) 教授首先倡议在美国成立流变学会, 出版了第一期“流变学杂志”(Journal of Rhlology), 同年12月举行了流变学会的第一次会议, 一般以此作为流变学创立的标志。在第二次世界大战之前, 美国流变学会是世界上唯一的流变学会。1945年12月, 国际科学联合会组织了一个流变学联合委员会。1947年, 在卡门(Karman)主席的主持下举行了委员会第一次会议。之后, 国际流变学会议每五年举行一次; 1968年以后, 每四年举行一次。1973年, 国际流变学委员会被接纳为国际纯粹和应用化学联合会的分支机构。1974年, 又被接纳为国际理论和应用力学联合会的分支机构。

流变学的发展在我国起步较晚。但随着我国国民经济的发展和科学技术的进步, 近年来我们在流变学的研究、教学和应用方面, 取得了较大成绩。为了推动我国流变学的发展, 由中国化学会和中国力学会共同组织流变学委员会, 于1985年11月召开了首届全国流变学会议。1987年11月召开了第二届全国流变学会议, 交流和探讨了我国在高聚物流变学、石油流变学、冶金流变学、浆体流变学、食品流变学、生物流变学等等各方面的研究成果和新进展。1988年, 我国流变学专家参加了第十届国际流变学会议, 使我国流变学的研究开始进入国际流变学的主流。

石油流变学是工业流变学的一个分支, 而含蜡原油流变学又是石油流变学的一个重要组成部分。

国内外研究含蜡原油流变学已有近三十年的历史。在我国, 一些高等院校, 科研单位在这方面进行了大量的实验研究工作。

在输油管道运行中, 由于某种原因引起管道输量不断下

而压力持续升高时,如果不能及时采取措施,最终将导致凝管。这种恶性事故,以往在油田集输管道上和长距离大口径输油干线上都曾发生,给国家财产造成严重损失。究其原因,重要的一条教训是缺乏流变学和非牛顿流体力学方面的知识,对含蜡原油的流变特性缺乏认识。因此,深入研究含蜡原油流变特性的变化规律,据此指导输油生产实践,具有理论和实际意义。

第一章 非牛顿流体

流体流变学着重研究非牛顿流体，研究和确定流体的流变特性。

第一节 本构方程和流变模式

本构方程是表示物料应力张量和应变速率（应变）张量之间的关系。由于这种关系仅仅由物料结构的本性所决定，因此，对于某一给定的物料，这种关系是唯一的，故称为本构方程。本构方程的一般形式为

$$\phi(\tau_{ij}, \varepsilon_{ij}, \dot{\gamma}_{ij}, t, \dots) = 0 \quad (1-1)$$

式中 τ ， ε ， $\dot{\gamma}$ 和 t 分别表示应力、应变、应变速率和时间。式（1-1）表明，应力与应变速率（应变）的基本关系中包含时间这一重要因素。

本构方程关联应力张量和应变速率（应变）张量的全部分量。一般而言，当全部应力分量仅由应变分量的瞬时值所确定时，物料为纯弹性的，其本构方程可表示为 $\tau = \tau(\varepsilon_{ij})$ ；而当全部应力分量仅由应变速率所决定时，则物料为纯粘性的，本构方程可表示为 $\tau = \tau(\dot{\gamma})$ ；如果全部应力张量分量不仅取决于应变张量分量，而且取决于应变速率张量分量，此时物料为粘弹性的，其本构方程可表示为

$$\tau = \tau(\varepsilon_{ij}, \dot{\gamma}_{ij}, t, \dots) \quad (1-2)$$

在生产实践和科学实验研究中，人们对物料性质的认识，总是在特定的变形或流动条件下进行的。例如，对弹性

材料作简单拉伸，就可得到符合胡克定律的本构方程，即 $\sigma = E\varepsilon$ 。再如，对水作简单稳定的剪切流动，便可得出符合牛顿内摩擦定律的本构方程，即 $\tau = \mu\dot{\gamma}$ 。当我们研究含蜡原油的流型变化和本构关系时，也是在一定的温度和流动条件（剪切速率范围）下进行的。

一般情况下，人们把物料在某些特定条件下得出的应力与应变速率（应变）之间的关系称为物料函数。也就是说，物料函数表示在特定条件下的简单变形或流动中，应力分量和应变速率（应变）之间的关系。因此，物料函数是本构方程的特例，它是本构方程对物料在特定条件下的流变现象的具体描述。物料函数可由实验测定的应力和应变速率（应变）之间的关系直接确定，可以表示为不同的经验方程，而这种经验方程对物料并不是唯一的，因为它取决于物料本身的特性和一系列外部条件。

物料函数也称流变模式。物料常数是应力与应变速率（应变）关系中所需的标量参数值，它由各种流变模式定义。物料的流变学分类常以流变模式为依据。由流变模式所表征的应力与应变速率（应变）关系的曲线，通常称为流变曲线，这将在后面详细讨论。

依据流变模式对物料进行流变学分类，仍然是一种理想化的方法。实际上，在一般的条件下，有些物料可以明确地归属于固体或液体，而另一些物料则既不是明显的固体，也不是明显的液体，情况是复杂的。在一定的条件下，当物料的某种运动特征占优势或为主时，方可用某一理想化的流变模式加以描述。比如，一团油灰与刚性地面碰撞时，颇象弹性球，有回弹现象；但若将其放在地面上，长时间观察在重力作用下的运动特征时，就会发现它象粘性流体那样，向四

周流淌。

为进一步说明这一问题，提出了一个流变相似准则即德博拉 (Deborah) 准则

$$De = \frac{\text{材料的特征时间}}{\text{运动的特征时间}}$$

或者

$$De = \frac{\text{材料的记忆时间}}{\text{观察材料变形或流动的时间}} \quad (1-3)$$

这一准则将固体和液体的划分问题引入了一般化的概念之中。也就是说，当我们讨论物料归属于固体或液体时，决不能离开物料的运动特征。在一定的运动特征条件下，物料都可以显现出弹性或粘性。依据德博拉准则，当观察物料变形的时间很长或与其记忆时间相比相当长时，即 De 很小时，物料对力学的响应将与液体一样，呈现粘性；反之，若物料运动的特征时间很短或与其特征时间相比相当短时，即 De 很大时，物料对力学的响应将与固体一样，呈现弹性。当 De 趋于 1 时，也就是说，当物料的记忆时间与观察物料变形的时间同处一个数量级时，物料既呈弹性，也有粘性。我们知道水的特征时间约为 10^{-18} 秒，但在急速的运动中（比如发生水击时），它会显现出弹性来。再如山脉的特征时间约为 10^{18} 秒，若以若干亿年长的时间观察其运动时，它也会显现出流动性的。由此可见，德博拉准则是用以表征物料运动特征的一个极其重要的准则。

表1-1以粘度数据概略地说明一些物料的流动性能。

表 1-1 若干物料的粘度值

物 料 名 称	粘 度 数 据	
液态氢	0.001	mPa·s
水	1	mPa·s
大庆原油(50℃)	23	mPa·s
甘油	1	Pa·s
糖浆	100	Pa·s
高分子聚合物	1	kPa·s
高分子熔体	100	kPa·s
玻璃熔体	10^{12}	Pa·s
冰河的冰	10^{13}	Pa·s
地貌	10^{21}	Pa·s

第二节 流 体 分 类

一、牛顿内摩擦定律

对所有的流体来说，牛顿内摩擦定律均以层流流态为条件。描述牛顿流体的流变模式即为牛顿内摩擦定律

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1-4)$$

式中 τ 为剪切应力， $\dot{\gamma}$ 为剪切速率， μ 为给定的温度、压力条件下牛顿流体的特征性比例常数，该比例常数称为牛顿粘度或动力粘度。在某一特定条件下， μ 是唯一的。

二、流体的分类

流体可分为牛顿流体和非牛顿流体。

流变行为依从牛顿内摩擦定律的流体，统称为牛顿流体。

凡流变行为不依从牛顿内摩擦定律的流体，或者说凡剪切应力与剪切速率之间不存在线性关系的流体，统称为非牛

顿流体。

依据流变模式和流变曲线，流体又可被划分成不同类型的流变体，详见表1-2。

表 1-2 流体流变学分类表

纯 粘 性 流 体						粘弹性流体		
与 时 间 无 关					与 时 间 有 关			
牛 顿 流 体	假塑性体	膨胀性体	塑性体	屈服假塑性体	屈服膨胀性体	触变性体	震凝性体	多种类型
	非 牛 顿 流 体							

下面将根据流变学分类，着重对非牛顿流体逐一进行介绍。

第三节 与时间无关的粘性流体

一、牛顿流体

牛顿流体的流变曲线分别示于图1-1和图1-2。在算术坐标上的流变曲线图，显示为通过原点的直线，直线的斜率即为动力粘度。在对数坐标上的流变曲线图，也显示为直线，直线的斜率为1（其与横坐标轴的夹角为45°），在 $\gamma = 1$ 处所具有的截距等于动力粘度值。

所有的气体，许多液体，还有球形颗粒在气体或简单液体中的假均匀悬浮体系等，都具有牛顿流体的流变行为。空