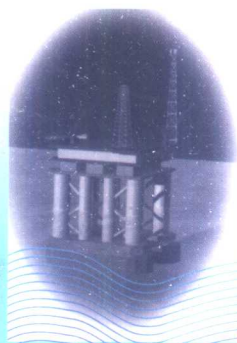




非牛顿流体流动理论及其 在石油工程中的应用

郑永刚 著



石油工业出版社 PETROLEUM INDUSTRY PRESS

非牛顿流体流动理论及其在 石油工程中的应用

郑永刚 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了非牛顿流体在垂直、倾斜及水平圆管和偏心环空中层流与紊流流动及顶替的理论,以及非牛顿流体在偏心环空中的紊动扩散理论;另外还介绍了圆管和环空中的分层流动理论,活动套管和井壁渗透对顶替效率的影响及注水泥模拟实验方法等。

本书可作为石油院校有关专业及其它院校力学专业高年级学生和研究生参考用书,对于从事石油注水泥工程、管道输送工程以及非牛顿流体力学科研工作的有关技术人员也有参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

非牛顿流体流动理论及其在石油工程中的应用/郑永刚著.
北京:石油工业出版社,1999.5

ISBN 7-5021-2520-5

I. 非…

II. 郑…

III. 非牛顿流动-应用-石油工程

IV. TE31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 03765 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 7 印张 200 千字 印 1—1000

1999 年 5 月北京第 1 版 1999 年 5 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2520-5/TE·2060

定价: 19.80 元

前 言

本书是以作者在西南石油学院完成的博士论文为基础写成的，主要介绍了非牛顿流体在垂直、倾斜及水平圆管和偏心环空中层流与紊流流动及顶替的理论，以及非牛顿流体在偏心环空中的紊流扩散理论。

作者特别感谢导师郝俊芳教授，可以说如果没有导师当年的精心指导和后来的大力鼓励，就没有出版本书的可能性。虽然离开母校和导师已有几年了，但导师严谨的治学风格和精深的学术造诣，至今仍然深深地影响着学生，也必将是学生今后效仿的榜样。

本书的实验部分是在西南石油学院固井实验室完成的，因此，作者感谢该实验室全体老师在实验工作上给予的大力支持。

本书第九章也包含了作者目前正在承担的国家自然科学基金项目“水力管道掺气减阻的理论及实验研究”的部分内容，因此，作者感谢国家自然科学基金委员会的资助。本章的部分内容也包含了作者的研究生谢翠丽同学的工作。

也感谢曾经给予作者大力关心、支持和指导的专家、教授。

作者还要感谢四川大学图书馆的郭素芬女士，她对本书的打印工作付出了大量的劳动。

同时，作者还要向书中引用到其学术论著及研究成果的众多学术前辈与同行们鸣谢。

最后，特别要感谢石油工业出版社，他们对本书的出版给予了大力的支持。

作者

1999年春于蓉城

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 非牛顿流体流动的基本特点	1
第二节 非牛顿流体顶替理论的研究现状	4
第三节 非牛顿流体顶替机理的研究方法	7
第四节 非牛顿流体层流顶替过程的物理描述	8
第二章 非牛顿流体在圆管中的流动与顶替	9
第一节 概 述	9
第二节 非牛顿流体在垂直圆管中的层流流动及顶替	10
第三节 牛顿流体在圆管中的紊流流动及顶替	15
第四节 非牛顿流体在圆管中的紊流流动及顶替	25
第五节 本章小结	38
第三章 非牛顿流体在倾斜偏心环空中的层流流动	39
第一节 概 述	39
第二节 牛顿流体在偏心环空中的层流流动	39
第三节 幂律流体在偏心环空中的层流流动	41
第四节 宾汉流体在倾斜偏心环空中的层流流动	41
第五节 本章小结	54
第四章 非牛顿流体在垂直井偏心环空中的层流顶替	55
第一节 概 述	55
第二节 幂律流体在偏心环空中的接触顶替	56
第三节 宾汉流体在偏心环空中的接触顶替	60
第四节 非牛顿流体在偏心环空中的非接触顶替	62
第五节 偏心环空中滞流对顶替效率的影响	66

第六节 本章小结	73
第五章 非牛顿流体在水平及倾斜偏心环空中的顶替	74
第一节 概 述	74
第二节 非牛顿流体在水平偏心环空中的顶替	77
第三节 非牛顿流体在倾斜偏心环空中的顶替	84
第四节 本章小结	88
第六章 非牛顿流体在偏心环空中的紊流流动及顶替机理 ...	90
第一节 概 述	90
第二节 非牛顿流体在偏心环空中的紊流流动	90
第三节 幂律流体在偏心环空中的紊流顶替	98
第四节 宾汉流体在偏心环空中的紊流流动及顶替	100
第五节 本章小结	103
第七章 非牛顿流体在环空中的紊动扩散	104
第一节 概 述	104
第二节 环空紊动扩散模式	106
第三节 紊动扩散对顶替效率的影响	117
第四节 本章小结	118
第八章 非牛顿流体在带渗透性壁面偏心环空中的层流 流动	119
第一节 概 述	119
第二节 偏心环空抽吸流动	120
第三节 抽吸对顶替效率的影响	128
第四节 本章小结	129
第九章 非牛顿流体在水平偏心环空及圆管中的分层 流动	130
第一节 概 述	130
第二节 牛顿流体在水平偏心环空的分层流动	131
第三节 非牛顿流体在偏心环空的分层流动	137
第四节 牛顿流体在圆管中的层流分层流动	140

第五节	牛顿流体在圆管中的紊流—层流分层流动·····	148
第六节	非牛顿流体在圆管中的层流分层流动·····	156
第七节	非牛顿流体在圆管中的紊流—层流分层流动···	164
第八节	本章小结·····	172
第十章	活动套管在偏心环空中诱导的流场及其应用·····	173
第一节	概 述·····	173
第二节	楔形区域流场研究·····	174
第三节	活动套管能提高注水泥顶替效率·····	184
第四节	本章小结·····	191
第十一章	注水泥模拟实验·····	193
第一节	概 述·····	193
第二节	实验装置与实验原理·····	193
第三节	实验及结果分析·····	196
第四节	理论模型的实验验证·····	201
第五节	本章小结·····	202
符号说明	·····	203
参考文献	·····	207

第一章 绪 论

第一节 非牛顿流体流动的基本特点

一、偏心环空中非牛顿流体流动的基本特点

牛顿流体是指其应力应变曲线满足牛顿内摩擦力定律的流体，而除牛顿流体外的流体都称为非牛顿流体。一般说来，非牛顿流体的应变曲线（或本构方程）要比牛顿流体复杂得多。

1925年，Ostwald^[1]发现了有名的 Ostwald 曲线，如图 1-1 所示，在剪应力较小和较大的范围内，非牛顿流体的应力应变曲线和牛顿流体的相同，呈直线分布。在中等剪应力下才显示出其非牛顿（假塑性）流变行为。可见，在通常情况下，也就是中等剪切速率下，非牛顿流体的流变行为要比牛顿流体复杂。

1933年，N.A.V.Piercy 等人^[2,3]利用复变函数方法，求出了牛顿流体在偏心环空中轴向层流流动的流场解析解。而对非牛顿流体在偏心环空中的流动，由于其本构方程的特殊性，也由于其流道形状或边界条件的复杂性，至今未能求出其精确解析解，而仅求出了其近似解析解及数值解^[4~12]。该问题之所以如此复杂，另外一个原因在于其运动方程中含有周向剪切应力沿周向的变化率等项。

二、偏心环空非牛顿流体流动的研究方法

目前对非牛顿流体在偏心环空中轴向层流流动的研究方法共有 3 种：

- ① 偏心环空法；
- ② 同心环空法；

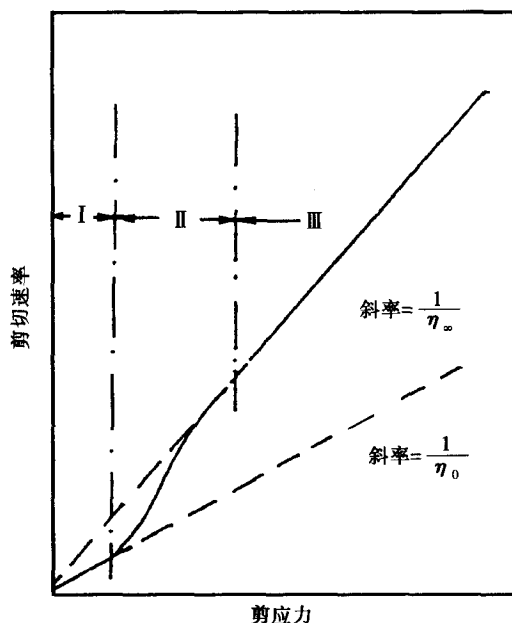


图 1-1 Ostwald 曲线^[1]
I、III—牛顿流体；II—非牛顿流体

③ 平板流法。

偏心环空法是完全按照偏心环空实际形状来研究,而无任何近似,因而是精确的。这通常需要使用数值方法,如文献[12]等。

同心环空法是用与偏心环空任一微元相同内外径的同心环空的相应微元来代替该微元,或者说是用无限个变间隙的同心环空的组合来代替偏心环空,其物理意义是略去了周向剪应力沿周向的变化率,如文献[13]等。

平板流法是用无限个变高度的平板来代替偏心环空,其物理意义是令环空曲率趋于零。该方法在机械工业界早已出现^[14],并得到广泛应用。

非牛顿流体在偏心环空中轴向层流流动的运动微分方程可写为^[15]

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g^{①} \quad (1-1)$$

这就是偏心环空模型（图 1-2）。

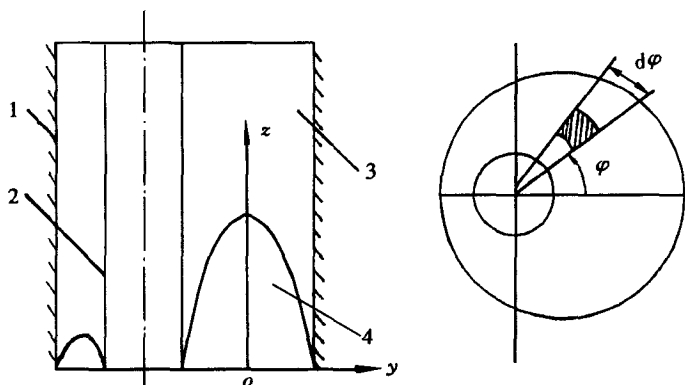


图 1-2 偏心环空模型

1—井眼；2—套管；3—泥浆；4—水泥浆

上式中左边第二项代表周向切应力沿周向的变化率。Н. А. Гукасов^[16~18]认为该项与其它各项相比很小，可以忽略。因此，上式成为

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \quad (1-2)$$

这就是同心环空模型^[13]。

①全书符号说明统一列于书末。

许多学者已经证明, 对非牛顿流体在偏心环空中的轴向层流流动, 可以用变高度的平板流模型近似研究。文献[11]指出, 当内管外径和外管内径的比值大于 0.3 时, 用变高度的平板流模型代替偏心环空中流动, 具有满意的精确度。文献[12]进一步指出, 当环空内径与外径比值大于 0.6 时, 可以用平板流模型精确模拟偏心环空中的流动。平板流模型如图 1-3 所示。

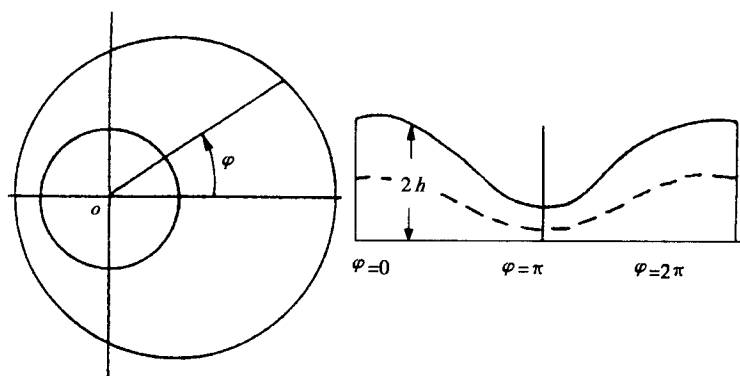


图 1-3 平板流模型

对平板流模型, 令 $r \rightarrow \infty$, 由 (1-1) 式可得

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \quad (1-3)$$

这就是平板流模型^[4~8]。

第二节 非牛顿流体顶替理论的研究现状

一、历史回顾

由于石油固井工程发展的需要, 非牛顿流体在偏心环空中的

顶替机理，这一研究领域才得到了充分的研究与发展。因此，可以说非牛顿流体顶替机理是与注水泥技术密不可分的。非牛顿流体顶替机理是注水泥技术的主要理论基础，而注水泥过程又是非牛顿流体顶替理论的具体应用。一是理论，二是技术，二者互相补充，互相推动，同步发展。

注水泥顶替机理的研究，已有半个多世纪的历史了。1940年，P.H.Jones 和 D.Berdine^[19]对注水泥顶替机理进行了开创性的研究。他们着重指出，泥浆和水泥浆都是非牛顿流体。它们需要一定的压力降才能达到一定的流速，如果套管偏心，就极易在宽间隙处流动而在窄间隙处形成窜槽。因此，扶正套管是减少窜槽的有力措施。

1948年，G.C.Howard 和 J.B.Clark^[20]进行了注水泥顶替模拟实验，首先认识到了泥浆性能的重要性，并指出，降低泥浆粘度有利于提高注水泥顶替效率。

1964年，J.W.Brice 和 R.C.Holmes^[21]根据现场试验研究表明，使用紊流注水泥技术，其接触时间需要在10min以上。

1967年，R.H.McLean^[22]等人提出了临界动切力的概念，他们认为当水泥浆的动切力约为临界动切力时，注水泥顶替效率显著改善。

R.C.Haut 和 R.J.Crook^[23~25]于1979年、1980年、1982年连续发表文章，介绍他们的实验方法与结果，并提出了泥浆不流动系数的概念。他们认为泥饼性能和最大静切力是影响顶替效率的两个最主要因素。还指出高的上返速度，即使未达到紊流总比低返速下的顶替效率高。

1973年，C.R.Clark^[26]等人通过实验研究了活动套管对顶替效率的影响，并得出结论：活动套管有利于提高顶替效率。

1990年，E.B.Nelson^[27]出版了《Well Cementing》一书。该书总结了当今西方注水泥技术的最新成就。书中对水泥性能、添加剂作用、水泥浆流变性、顶替机理、防气窜、注水泥工艺及

注水泥技术等都有详细的叙述。

从上述学者的研究中,可以得出影响注水泥顶替效率的7种因素:

- ① 泥浆不流动系数 MIF;
- ② 泥浆、水泥浆流变性能;
- ③ 活动套管;
- ④ 扶正套管;
- ⑤ 顶替返速或流态;
- ⑥ 接触时间;
- ⑦ 水泥浆与泥浆的相对密度差。

前苏联在这方面的代表人物是 Н.А.Гукасов^[16~18]、А.И.Булатов^[28,29]。А.И.Булатов 等人于 70 年代、80 年代、90 年代出版了多本专著研究注水泥技术。其中包括注水泥顶替机理研究、防气窜研究、水泥石强度研究及隔离液技术研究。Н.А.Гукасов 主要研究了偏心环空的水力计算问题。他详细研究了偏心环空注水泥顶替机理。但是,他的研究是从单一流体流速方程出发,因而其结论是近似的,并且他的研究仅限于垂直井牛顿液和宾汉液的轴向层流顶替。关于紊流顶替,Н.А.Гукасов 直接借用了牛顿流体紊流流动的流速指数方程。

二、现状与展望

时至今日,关于非牛顿流体在偏心环空中的顶替机理的理论还远未成熟,许多影响顶替效率因素的作用机理还未完全明白,其主要原因是能精确反映顶替过程的顶替模式还未建立起来,多数研究均是在较多的假设条件下进行的,是借用牛顿流体的或者是从单一流体流动方程出发等等。

西方学者主要用实验方法来研究注水泥顶替机理^[27],缺乏足够的理论论证,而前苏联学者的研究又过分繁杂,理论不够严密。因此,这方面还有许多问题值得深入细致的研究。

随着非牛顿流体力学及科学化钻井的进一步发展,依靠广大

流体力学专家及钻井专家的共同努力，相信一定会攻破一个个的科学难关，弄清楚影响顶替效率各个因素的作用机理，为现场注水泥作业提供一定的理论依据。

第三节 非牛顿流体顶替机理的研究方法

一、平板流模型

因为一般情况下，套管和井眼组成的偏心环空均能满足平板流近似所要求的内外径比值条件，所以可以利用平板流模型，从偏心环空非牛顿流体流动的运动微分方程式出发，建立反映顶替过程的数学模型。然后，利用数值方法求解顶替模型。

二、几点假设

在本书中，除特别声明外，总是假设：

- ① 环空是刚性的，壁面光滑；
- ② 所有流体均不可压缩；
- ③ 层流顶替情况下，水泥浆与泥浆之间的界面无掺混；
- ④ 体积流量恒定；
- ⑤ 不计温度的影响。

三、顶替效率的定义

如图 1-2 所示，对圆管和偏心环空中的顶替，整体顶替效率可定义为

$$E_d = \frac{Qt_0}{Z_{\max} \cdot S} \times 100\% \quad (1-4)$$

对圆管中的顶替， $Z_{\max}$ 就是圆心处的最大界面位置，即圆心处界面离进口端的距离；而对偏心环空， $Z_{\max}$ 是宽间隙处的最大界面位置，即 $Z_{\max} = Z_{\max}(0)$ 。这里 Q 是体积流量， t_0 是顶替时间， S 是环空横截面面积。对偏心环空中的顶替，剖面顶替效率可定义如下。

对宽间隙

$$E_{dw} = \frac{\int_0^h Z dy}{Z_{\max}(0) \cdot h} \times 100\% \quad (1-5)$$

对中间隙

$$E_{dm} = \frac{\int_0^h Z dy}{Z_{\max}(90) \cdot h} \times 100\% \quad (1-6)$$

对窄间隙

$$E_{dn} = \frac{\int_0^h Z dy}{Z_{\max}(180) \cdot h} \times 100\% \quad (1-7)$$

对任意间隙

$$E_{d\varphi} = \frac{\int_0^h Z dy}{Z_{\max}(\varphi) \cdot h} \times 100\% \quad (1-8)$$

这里 Z 是水泥浆与泥浆的界面位置函数, 即界面离井底 (进口端) 的距离, h 是环空间隙宽度的一半, $Z_{\max}(\varphi)$ 是任意间隙 (φ) 下的最大界面位置。 E_d 、 E_{dw} 、 E_{dm} 及 E_{dn} 等是用来衡量水泥浆顶替泥浆的程度。

第四节 非牛顿流体层流顶替过程的物理描述

由流体力学理论知道, 非牛顿流体在偏心环空中的轴向层流顶替流场, 可视为以不同速度轴向流动的无数层流体组成; 而每层流体又是由无数根不同流速的流线组成; 每条流线, 由井底至井口, 由无数个速度相同的流体粒子 (包括水泥浆粒子与泥浆粒子) 组成。这就是轴向层流流动或顶替的微观物理描述。

第二章 非牛顿流体在圆管中的 流动与顶替

第一节 概 述

在石油工程中,水泥浆与泥浆在套管中的层流流动及顶替属于非牛顿流体在圆管中层流流动及顶替的范畴。另外,在石油储运工程中,也存在成品油的顺序输送问题,这实际上也是牛顿流体在圆管中的顶替问题。非牛顿流体在圆管中的层流流动,已有许多学者研究过,但对顶替问题,还未见有报道。

水泥浆或泥浆在套管中的紊流流动属于非牛顿流体在圆管中的轴向紊流,而水泥浆对泥浆的顶替则属于非牛顿流体的轴向紊流顶替。因此,研究该题目有很大的实用价值。

由于紊流流动的无规则性和复杂性,因而时至今日,紊流流动的问题在理论上则基本没有解决^[30]。虽然紊动微分方程式早由雷诺于1895年导出,但由于该方程的不封闭性,使得该方程的求解成为紊流研究的主要困难之一。可喜的是,本世纪30年代初,人们提出了一系列半经验理论,用以阐述明渠流和管道流的紊流结构^[31]。虽然这些理论无法用于描述紊流的脉动结构,但在解决时均流速分布等问题上却得到了较好的结果。这些理论基本上满足了当时生产的需要,较好地解决了一些工程问题。由于这些理论普遍简单易用,因而受到工程师们的青睐,得到了广泛的应用。提出这些理论的代表性学者有 L.Prandtl、V.Karman、G.I.Taylor 等人。然而由于这些理论的前提存在不少缺陷,特别是有关脉动结构的假设与近代试验资料相差较大,

人们已逐渐放弃使用这些理论来推求时均流速的分布规律。

由于紊流流场的复杂性,长期以来,紊流流场的研究都局限于粘性流体。对非牛顿流体紊流流场的研究,也仅是运用实验手段进行定性分析,而对其理论研究还未见任何报道。为讨论方便,本文假设所研究的系统是稳定的。

第二节 非牛顿流体在垂直圆管中的层流流动及顶替

如图 2-1 所示,当流动方向与重力方向相反时,非牛顿流体在圆管中均匀流动的平衡微分方程式为

$$\frac{1}{r} \frac{1}{dr} (r\tau_{rz}) = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \quad (2-1)$$

当流动方向与重力方向相同时,用 $-\rho g$ 代替 (2-1) 式中的 ρg 。

一、层流流动^[15,36]

(一) 牛顿流体

在 (2-1) 式中,令 $\frac{\partial p_1}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g$, 并应用牛顿流体的本构方程和无滑移边界条件,积分 (2-1) 式,可得流速分布为

$$u = -\frac{1}{4\mu} \frac{\partial p_1}{\partial z} (R^2 - r^2) \quad (2-2)$$

(二) 宾汉流体

同理,可得