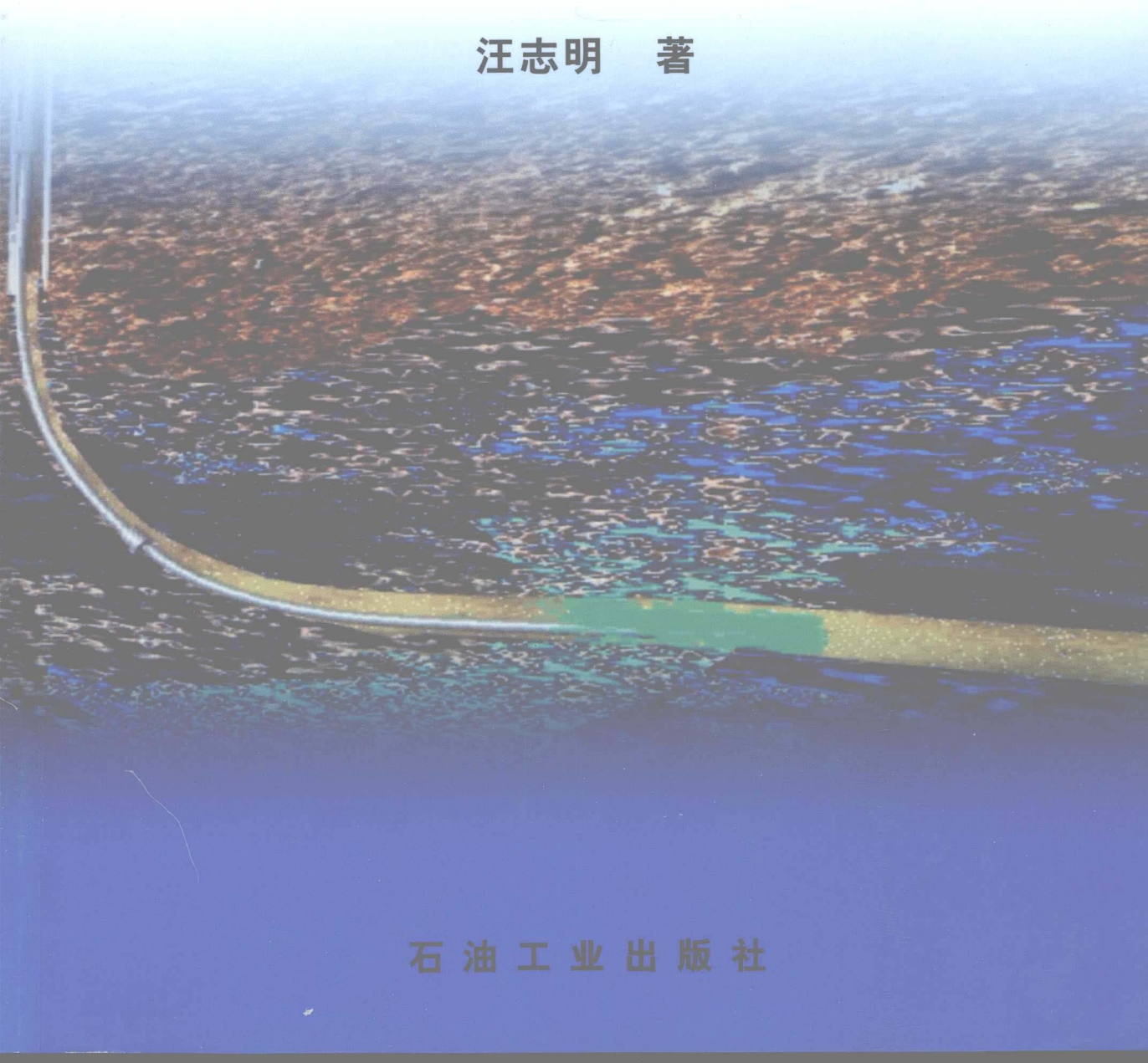


油气井流体力学与工程

Fluid Mechanics in Petroleum Engineering

汪志明 著



石油工业出版社

油气井流体力学与工程

汪志明 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对油气井井底湍流射流流动、井筒多相流动和近井地带耦合流动做了较全面的论述。全书共 8 章, 主要内容包括: 环空固液两相流动及携岩规律、大位移井水力计算与优化、气液两相流动及环空压力控制、超高压射流流动及破岩规律、水平井筒附近流动及表皮系数模型、水平井筒与油藏耦合流动及完井参数优化、煤层气藏渗流规律及动态预测和水力波传播规律及应用。

本书可作为从事石油工程理论与技术研究人员、开发人员的参考书, 也可作为石油天然气工程学科相关专业研究生教材和本科生选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

油气井流体力学与工程/汪志明著.

北京: 石油工业出版社, 2008. 10

ISBN 978 - 7 - 5021 - 6783 - 7

I. 油…

II. 汪…

III. 油气钻井 - 流体力学

IV. TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 146969 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523574 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京乘设伟业科技有限公司

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.5

字数: 341 千字 印数: 1—3000 册

定价: 35.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

流体力学是一门基础性很强、应用性很广的学科,它的研究对象随着生产的需要和科学的发展在不断地更新、深化和扩展。基于石油天然气工程学科中复杂流体介质流动问题的解决,不仅丰富和发展了油气井流体力学,而且促进了油气井复杂流动控制与优化技术的进步。

中国石油大学(北京)油气井流体力学研究室自 1988 年以来,长期围绕油气井井底湍流射流流动、井筒多相流动和近井地带耦合流动开展理论和实验研究,先后完成了十余项国家和省部级研究课题,并获国家科技进步二等奖 2 次,省部级科技进步一等奖 2 次、二等奖 1 次。结合研究课题已培养博士后、博士生和硕士生 40 多名,其中 4 人已晋升为教授、研究员或教授级工程师,3 人走上国有特大型或大型企业局级领导岗位,1 人获 2007 年 SPE(国际石油工程师协会)博士论文竞赛第一名。结合本科生、研究生培养的需要,开设了《油气井流体力学基础》和《油气井流体力学》课程。这部著作主要是在总结 20 年来研究室科研成果和本科生、研究生课程讲稿基础上撰写而成的。同时,对国外油气井流体力学的最新研究进展也做了相应的介绍。

在本著作的撰写过程中,魏建光博士、郭晓乐博士、王小秋博士、薛亮博士、张健博士、平立秋博士、郝希宁博士参与了部分章节的撰写工作。同时也得到了中国石油大学国家重点学科“油气井工程”老一辈学科带头人沈忠厚先生、刘希圣先生的长期指导,也得到了国家重点学科负责人、“长江学者特聘教授”高德利博士的关心和支持。在此致以诚挚的谢意。

全书共 8 章,主要内容包括:环空固液两相流动及携岩规律、大位移井水力计算与优化、气液两相流动及环空压力控制、超高压射流流动及破岩规律、水平井筒附近流动及表皮系数模型、水平井筒与油藏耦合流动及完井参数优化、煤层气藏渗流规律及动态预测和水力波传播规律及应用。本书可作为从事石油工程理论与技术研究人员、开发人员的参考书,也可作为石油天然气工程学科相关专业研究生教材和本科生选修课教材。

由于作者水平有限,书中不当之处,恳切欢迎同仁及读者批评指正。

作 者

2008 年 3 月于中国石油大学(北京)

目 录

第1章 环空固液两相流动及携岩规律	(1)
1.1 固液两相流动研究概况	(1)
1.2 环空固液两相流动机理	(2)
1.3 岩屑运移最小返速模型	(5)
1.4 岩屑运移稳定流动	(10)
1.5 岩屑运移不稳定流动	(18)
参考文献	(25)
第2章 大位移井水力计算与优化	(27)
2.1 大位移井循环压耗计算方法	(27)
2.2 大位移井水力参数设计方法	(33)
2.3 大位移井水力延伸极限	(36)
2.4 大位移井水力学风险分析	(39)
参考文献	(55)
第3章 气液两相流动及环空压力控制	(56)
3.1 气液两相流动概述	(56)
3.2 气液两相流动模型与评价	(56)
3.3 欠平衡钻井循环压耗计算	(60)
3.4 欠平衡钻井油藏与井筒耦合流动	(75)
3.5 欠平衡钻井井底负压差设计与控制	(81)
参考文献	(85)
第4章 超高压射流流动及破岩规律	(86)
4.1 井下增压器水力结构模型	(86)
4.2 射流元件水力结构与水力特性	(94)
4.3 超高压淹没射流流动规律	(101)
4.4 超高压射流与机械齿联合破岩	(106)
参考文献	(111)
第5章 水平井井筒附近流动及表皮系数模型	(112)
5.1 水平井井筒附近储层物性参数预测方法	(112)
5.2 水平井井筒附近储层污染参数预测模型	(114)
5.3 均质储层水平井表皮系数模型	(120)
5.4 非均质储层水平井综合表皮系数模型	(131)

参考文献	(132)
第6章 水平井筒与油藏耦合流动及完井参数优化	(133)
6.1 水平井简单相变质量流流动	(133)
6.2 水平井筒气液两相变质量流流动	(138)
6.3 水平井筒与油藏耦合流动	(146)
6.4 水平井完井段完井参数优化	(156)
参考文献	(165)
第7章 煤层气藏渗流规律及动态预测	(166)
7.1 煤岩基质中气体吸附规律	(166)
7.2 基质中气体扩散规律	(168)
7.3 天然裂缝系统气体流动	(170)
7.4 煤层气藏储层渗透率评价	(171)
7.5 煤层气藏生产动态预测	(177)
参考文献	(188)
第8章 水力波传播规律及应用	(190)
8.1 水力波在地层中的传播模型	(190)
8.2 水力波在地层中一维传播规律	(196)
8.3 水力波在地层中二维传播规律	(198)
8.4 水力波在地层中三维传播规律	(202)
8.5 水力波井下发生装置设计	(205)
参考文献	(208)

第 1 章 环空固液两相流动及携岩规律

本章基于环空固液两相流动机理,依据流体力学基本原理建立了多个不同工况的岩屑运移模型。通过模拟分析,揭示了环空中岩屑运移规律,开发了一套大位移井井眼清洁监测与控制系统^[1],并在工程中取得了成功应用。

1.1 固液两相流动研究概况

固液两相流动广泛存在于自然界及能源、化工、石油、矿业、水利等各个领域。尤其近年来,随着科学技术的发展,新材料、新技术、新工艺的出现,固液两相流理论的应用范围不断扩大,它在现代工业和科学技术各个领域中的重要性也越来越明显。例如,固体颗粒的水力输运,泥沙在河流中的运移,化学工业中的搅拌、过滤等单元操作,湖泊、河流和海洋的污染,石油钻井中岩屑的运移,油层水力压裂工艺中支撑剂的运移等等,不胜枚举。目前,国内外对于固液两相流的研究都极为重视,它已成为当今流体力学研究中最具挑战性的前沿领域之一。

由于固液两相混合物的组成、内部结构及状态的复杂性,至今尚无统一的分类标准。如果按混合物组成来分,可以分为牛顿型均匀混合物、非牛顿悬浮体、牛顿固液两相混合物和非牛顿固液两相混合物四种。前两种由于流动结构简单,目前研究比较深入,而后两种由于流动机理复杂,不仅存在各相内部的一些复杂力学特性,而且还存在各相间作用,时至今日,两相流的许多关键性问题仍不甚清楚,没有形成统一认识,例如固相颗粒间的相互作用机理、固相边界条件等。正是由于这些悬而未决的难点,严重阻碍了固液两相流研究的进展。

两相流理论模型研究的早期尝试性工作大致是从 20 世纪 40 年代末开始。几十年来,人们根据不同的观点及假设建立了不同的两相流模型。各模型及特点如表 1.1 所示^[2]。早期的模型考虑因素比较少,形式简单,计算方便,但误差较大;后期的模型更加接近实际情况,比较完善,然而计算困难,不能满足工程应用需要,但对于两相流动机理的研究具有重要作用。

表 1.1 两相流基本模型

类别	模型	特 点	大致年代 (20 世纪)
离散 模型	单颗粒动力学模型	不考虑颗粒对流体的影响	40 年代末
	颗粒轨迹模型	考虑颗粒对流动的影响,考虑了相间耦合,粗略地考虑了紊流扩散	70 年代中
连续 介质 模型	扩散模型	不考虑颗粒对流体运动影响,相间相对运动等价于流体的扩散漂移	60 年代初
	单流体模型	部分考虑了颗粒对流体流动的影响,不考虑相间相对运动	70 年代
	双(多)流体模型	全面考虑颗粒对流体流动的影响、相间相对运动及相间作用	70 年代

目前,固液两相流的研究仍然以实验为主,通过实验得到数据和规律,建立完全经验性的,或者半经验半理论性的模型,由于计算简便,误差又在许可范围之内,因此在工程中得到了广泛应用。

1.2 环空固液两相流动机理

从本质上说,钻井中环空岩屑运移属于复杂非牛顿固液两相流动问题。岩屑运移机理研究^[3,4]是理论建模的前提,而后者所揭示的岩屑运移规律又反过来促进了前者的发展。

1.2.1 岩屑颗粒受力分析

不同井段有着不同的岩屑运移机理。在直井段,由于岩屑的重力下沉方向与钻井液轴向速度在同一直线上,原则上,只要钻井液平均上返速度大于岩屑的受阻沉降速度,岩屑就能被携带出井筒。而在大斜度井段和水平井段,岩屑重力沉降方向与钻井液轴向速度不在一条直线上;在水平井段,二者方向正交,其合速度指向井眼下侧,因而极易在井壁下侧形成岩屑沉积床。

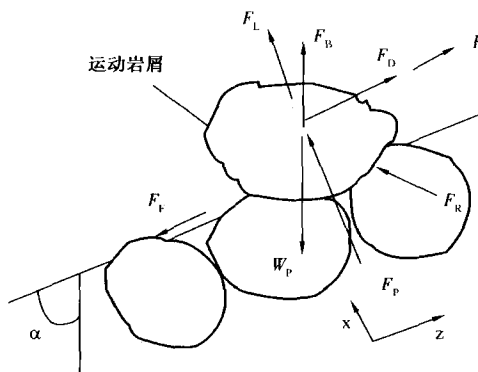


图 1.1 岩屑颗粒受力图

从微观上讲,当钻井液流经由松散岩屑颗粒形成的岩屑床时,岩屑床表面颗粒除了承受颗粒的重力 W_p 、浮力 F_B 和相邻颗粒间的支撑力 F_R 外,还将承受拖曳力 F_D 、上举力 F_L 和流体作用于岩屑上的压力 $F_{\Delta p}$ 的作用。当大量的颗粒以推移形式运动时,这些颗粒间还存在着摩擦力 F_f 和粒间离散力 F_p 。静止岩屑床上突起颗粒的受力见图 1.1。

当环空液流经过岩屑床层表面时,由于岩屑颗粒表面粗糙不平,液流与颗粒表面相接触后将因摩擦而产生摩擦力,其方向与液流方向相同。另外,由于颗粒顶部的流线发生分离,在颗粒背水面产生漩涡,因而在颗粒前后就产生了压力差,造形状阻力。拖曳力即为前者和后者的合力。另外,岩屑颗粒顶部与底部的流速也不同,前者为液流的运动速度,后者为颗粒间渗流流体的运动速度,其比液流速度要小得多,因而颗粒上下将产生压力差,此压力差便产生了上举力,方向向上。

当岩屑颗粒离开岩屑床面以推移形式运动时,一方面因与流动更快的流体相接触,拖曳力大幅度增加,而另一方面由于颗粒上下的压力急剧减小,上举力很快消失。但在环空中流动的绝不止一颗岩屑,当大量岩屑同时存在且液流和颗粒间存在相对运动时,颗粒间的绕流流态将使颗粒间相互产生影响。其表现形式之一就是颗粒将承受一个与液流方向相垂直的力,此力便是粒间离散力,颗粒靠得越近时,离散力越大。

1.2.2 岩屑颗粒运动形式

岩屑所受各力的综合结果在群体上就表现为不同的运动形式:接触质、跃移质、层移质和悬移质运动,如图 1.2 所示。其中接触质、跃移质和层移质又统称为推移质^[5,6]。

1. 推移质运动

位于岩屑床表面突出位置的颗粒,当液流拖曳力大于颗粒阻力时,便开始以滑动的形式运动,由于岩屑床表面粗糙不平,滑动往往会转化为滚动。但无论为哪一种形式,在运动中都与岩屑床保持接触,称为接触质运动。在滚动过程中,上举力增加,使该颗粒脱离岩屑床而跳起。

在颗粒逐渐升高的过程中,一方面钻井液流速越来越大,另一方面岩屑的水平分速也逐渐增加。当岩屑上升到一定的高度以后,颗粒的水平分速接近钻井液轴向流速。从这一点起,该岩屑又转而下落。跳起的岩屑在落到岩屑床表面时对周围的岩屑有冲击作用,作用力的大小则与其跃起的高度和钻井液流速有关。若岩屑跃起较低,则它从液流中取得的动量不大,在落回岩屑床表面后不会继续跳动。若跃起较高,则落到床层后还可以重新跳起。若跃起很高则不但自己反弹跳起,而且还使下落点附近的颗粒也跳起前移。此时即形成跃移质运动。

由于岩屑床由松散的粒状材料所组成,并非一个密实体,液流拖曳力不仅可以作用于岩屑床表面岩屑上,还可以深入到岩屑床表面以下各层的颗粒。环空流速小时,表层岩屑以滑动、滚动、跃移的形式运动。床面以下颗粒依然在原来的位置上静止不动。流速加大以后,拖曳力增大,此时不仅表层岩屑开始运动,岩屑床表面以下的岩屑也开始运动。随着液流流速的不断加大,运动不断向深层发展,从而形成岩屑群的层状运动,即为层移质运动。

2. 波状运移

当推移质运动达到一定规模后,岩屑床表层便形成起伏的沙波,波状运移是推移质运动的必然结果。由于岩屑床层组成不均匀,加上液流的脉动,即令原来比较平整的床层也可能产生小的凹凸不平。这种不平一经产生,就会影响液流,使接近岩屑床层的钻井液流速发生变化。在岩屑床层凸起处,流速增大,在凸起部分的下游,产生平轴环流,环流以下将出现较稳定的加速区。这种流速分布状态要求岩屑床层变成与之相适应的形式,即沙波的形式。钻井液流速越大,液流作用力就越大,岩屑起动后运动的距离就越长,沙波的波长也越大,超过一定限度后沙波就归于消失。图 1.3 为水平井段中岩屑的波状运移示意图。

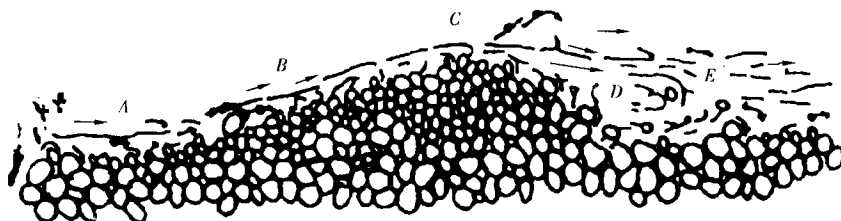


图 1.3 水平井段中岩屑的波状运移示意图

3. 悬移质运动

当钻井液以紊流形式运动时,由于紊流的扩散作用使钻井液各层之间不仅有动量的交换,

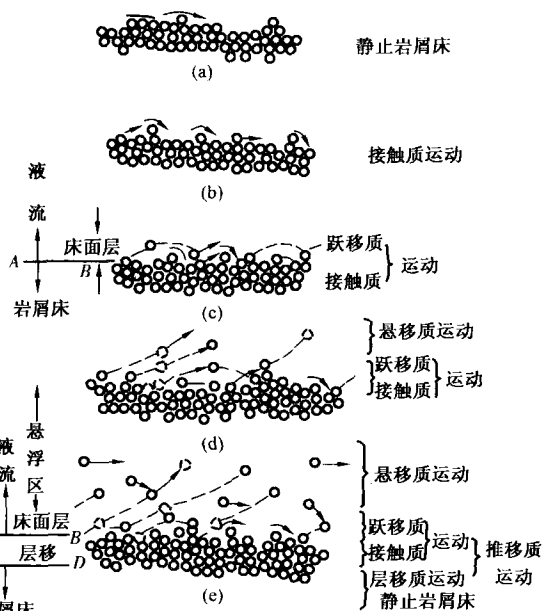


图 1.2 岩屑颗粒的不同运动形式

而且也有质量(岩屑)的交换。当岩屑沉速小于钻井液径向脉动速度时,岩屑就可能以悬移的形式运动。

环空流态为紊流时,其紊动猝发体以低速带的形式自岩屑床面附近上升过程中,也携带了那里的岩屑。若岩屑沉速较大,则在上扬过程中会很快落到低速液团的外面,又重新回到岩屑床层,这样的岩屑便属于跃移质。若岩屑沉速较小,就会随低速液团上升。当猝发体崩解时,岩屑达到悬浮最高点,转而开始下沉。在降落过程中,一部分岩屑被正在向岩屑床层运动的高速带所攫取,回到近壁流区;另一部分岩屑落入正在上升的漩涡中,又转而向两侧散开,在两股高速带之间,形成一股新的向上抬升的低速带。随高速带下落的岩屑也在岩屑床层附近推向两侧,进入另一个低速带,再次开始新的行程,岩屑进入悬浮状态。在悬移质和床层岩屑间同样存在着不断的交换,并在外部条件不变时,形成一种动态平衡。

当岩屑以悬移质的形式运动时,它的迹线是不规则的。岩屑浮游的位置,时而接近井眼上侧,时而接近岩屑床。虽然有时也落到岩屑床层上停留,或发生置换现象,但浮游的连续性是相当大的,它前进的速度与钻井液轴向流速基本相同。

1.2.3 环空固液两相流典型流型

宏观上讲,在任一给定的岩屑浓度下,当由高到低逐渐降低混合物速度时,可以观察到四种不同的流动物理模型:

(1)拟均匀悬浮流动模型。在较高的流速下,强烈的紊动使得固体颗粒完全悬浮,颗粒浓度在环空断面分布比较均匀,称为拟均匀悬浮流动模型,见图 1.4(a)。

(2)非均匀悬浮流动模型。当流速、紊流强度和外力降低时,颗粒虽然仍然悬浮,但颗粒浓度在环空分布不再均匀,而是越接近环空下半部浓度越大,称为非均匀悬浮流动模型,见图 1.4(b)。

(3)移动床流动模型。当流速进一步降低时,颗粒不能保持悬浮,开始向下沉降,并冲

击外管壁,有的颗粒反弹回液流中,有的沉积于管底边。先是形成个别沙丘,然后形成连续移动床。对于混合有大小颗粒的系统,沉降速度有大有小,床层由沉降速度快的颗粒所组成。具有中等沉降速度的颗粒处于非均匀悬浮中,最低沉降速度的颗粒处于拟均匀悬浮中,随流体流动速度降低,移动床层逐渐加厚,但所有岩屑仍然在运动,称为移动床流动模型,见图 1.4(c)。

(4)固定床流动模型。当混合物的流速进一步降低时,床层最底部的颗粒几乎停止运动,上部则为移动床层和流体层。随流体速度减小,底部静止床层逐渐增厚,悬浮和运动的颗粒越来越少,直至全部静止,这种包含有固定床层的流动就是固定床流动模型,见图 1.4(d)。

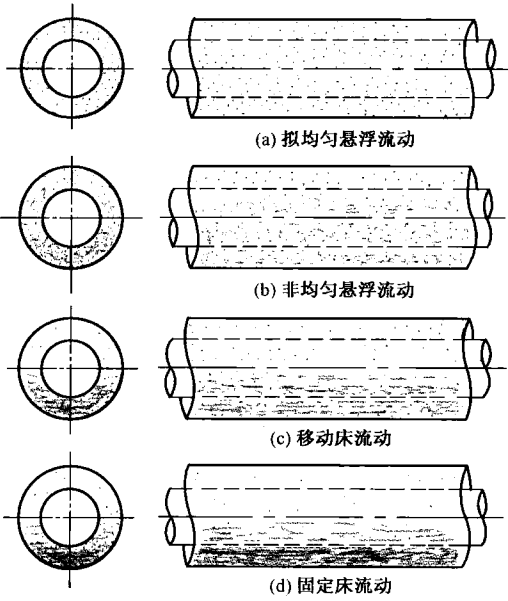


图 1.4 环空固液两相流动的物理模型

1.3 岩屑运移最小返速模型

钻井中循环钻井液的主要目的除了建立井眼钻井液与地层孔隙压力的平衡外,另一个重要的作用就是清洗井底并将岩屑从井底有效地携至地面,以确保快速、优质和安全钻进。显然,如何合理选择环空返速是实现上述目的的关键。最小环空返速是指达到井眼清洁标准所需要的最小环空返速值,计算最小环空返速的模型即为最小返速模型。

1.3.1 颗粒沉降末速

计算携岩所需最小环空返速,必须首先计算岩屑在钻井液中的沉降速度。由于岩屑颗粒密度较大,岩屑在流体中会向下沉降,并逐渐达到一稳定速度,即颗粒沉降末速。颗粒沉速的大小与其密度、形状和粗糙度有关,同时也受颗粒迎流面积大小和流体性质(密度和粘度)影响。由于几何关系和边界条件十分复杂,除了在理想条件下,我们还不能建立颗粒沉降速度的解析表达式,因此,国内外学者提出了许多半经验半理论的公式,并在工程中取得了广泛应用。

1. 牛顿流体

如图 1.5 所示,球形颗粒以最终速度 v_s 穿过流体,则作用在它上面的垂直方向的合力为零,由力平衡关系可以得到:

$$\begin{aligned} F_r &= W_p - F_B = (\rho_s - \rho_f)gV_s \\ &= (\rho_s - \rho_f)g(\pi d_s^3/6) \end{aligned} \quad (1.3.1)$$

式中 F_r ——颗粒所受粘性阻力, N;

ρ_s ——颗粒密度, kg/m^3 ;

ρ_f ——流体密度, kg/m^3 ;

V_s ——颗粒体积, m^3 ;

d_s ——颗粒直径, m;

g ——重力加速度, 9.8m/s^2 ;

v_s ——颗粒沉速, m/s 。

粘性阻力 F_r 与球形颗粒的沉降速度 v_s 之间的关系为:

$$F_r = f_s \frac{\pi d_s^2}{4} \frac{\rho_f v_s^2}{2} \quad (1.3.2)$$

式中 f_s ——颗粒摩阻系数, 量纲一。

由方程(1.3.1)和方程(1.3.2)可以求出颗粒沉降速率的一般方程为:

$$v_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_s (\rho_s - \rho_f)}{f_s \rho_f} g} \quad (1.3.3)$$

由方程(1.3.3)可以看出,沉降末速与球形颗粒直径以及颗粒与流体的密度差成正比例变化,而与球体的摩阻系数 f_s 成反比变化。因此,沉降末速的计算就转变为求解不同情况下的摩阻系数 f_s 。研究表明, f_s 与颗粒雷诺数有关,在层流、过渡流和紊流三种情况下变化规律不同。

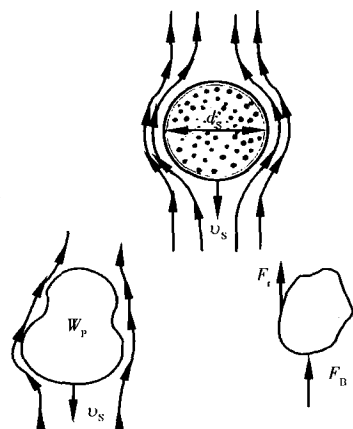


图 1.5 流体在沉降颗粒上的流线

颗粒雷诺数 Re_p 计算公式为:

$$Re_p = \frac{\rho_f v_s d_s}{\mu} \quad (1.3.4)$$

式中 Re_p ——颗粒雷诺数,量纲一;

μ ——流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

将不同情况下的摩阻系数关系式代入一般方程(1.3.3)就可以得到不同情况下的沉降末速方程,例如,在雷诺数较低时($Re_p < 1$),由著名的斯托克斯(Stokes)定律知 $f_s = 24/Re_p$,代入方程(1.3.3)可以得到低雷诺数流动的沉降末速方程为:

$$v_s = \frac{1}{18} \frac{d_s^2}{\mu} (\rho_s - \rho_f) g \quad (1.3.5)$$

由于计算公式很多,这里不再详述,可以参见相关文献。

2. 非牛顿流体

(1) Moore 关系式。

Moore 提出对于非牛顿流体,使用表观粘度代替牛顿流体粘度,即可得到颗粒在非牛顿流体中的沉降速度。幂律流体的非牛顿表观粘度为:

$$\mu_a = 40k \left(\frac{d_{ao} - d_{ai}}{v_a} \right)^{1-n} \left(8 + \frac{4}{n} \right)^n \quad (1.3.6)$$

式中 μ_a ——非牛顿流体表观粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

v_a ——环空返速, m/s ;

d_{ao} ——环空外管内径, m ;

d_{ai} ——环空内管外径, m ;

n ——幂律流体流性指数,量纲一;

k ——稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

将该表观粘度代入方程(1.3.4)中可求出颗粒雷诺数,再根据图 1.6 即可得到相应的摩阻系数。图 1.6 所用的数据是根据钻井现场的石灰岩和页岩碎屑得到的。

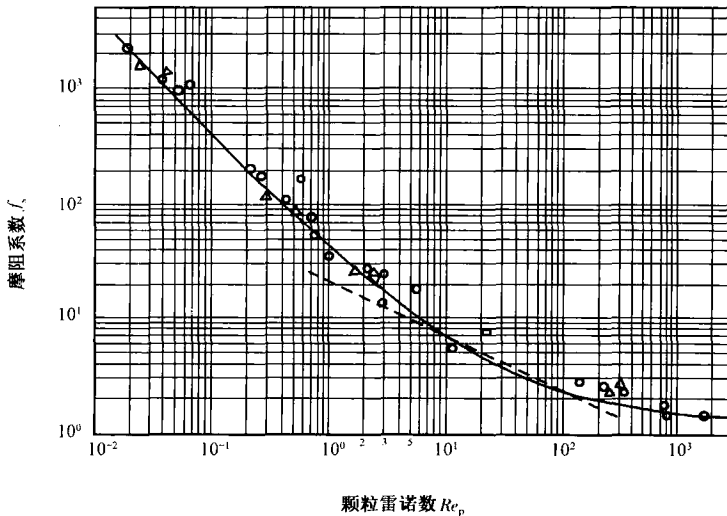


图 1.6 颗粒雷诺数—摩阻系数关系图

当 $Re_p > 2000$ 时,颗粒周围的流动完全变为紊流,此时的摩阻系数为常数(约为 1.5)。

当 $Re_p < 1$ 时,流体处于层流状态,其摩阻系数在同一条斜线上,满足:

$$f_s = \frac{40}{Re_p} \quad (1.3.7)$$

对于过渡流雷诺数, $10 < Re_p < 100$, 图 1.6 中的近似虚线由方程(1.3.8)表示:

$$f_s = \frac{22}{\sqrt{Re_p}} \quad (1.3.8)$$

将以上摩阻系数计算式代入方程(1.3.3),即可得到不同流态时的颗粒沉降速度。

(2) S. F. Chien 关系式^[7]。

S. F. Chien 提出了一种非牛顿流体中颗粒的自由沉降速度,即:

颗粒作层流(颗粒雷诺数 $Re_p < 10$)时的自由沉降速度关系式为:

$$v_s^2 + 0.4458e^{5.030\psi} \left(\frac{\mu_a}{d_s \rho_f} \right) v_s - 0.19449e^{5.030\psi} d_s \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) = 0 \quad (1.3.9)$$

式中 ψ ——颗粒球形度,量纲一。

而对于常见的不规则形状粒子(如:岩屑 $\psi \approx 0.7924$),式(1.3.9)可简化为:

$$v_s^2 + 0.240 \left(\frac{\mu_a}{d_s \rho_f} \right) v_s - 10.46878 d_s \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) = 0 \quad (1.3.10)$$

颗粒作湍流($Re_p > 50$)时的自由沉降速度关系式为:

$$v_s = 0.4410e^{2515\psi} \sqrt{d_s \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (1.3.11)$$

而对于常见的不规则形状粒子,式(1.3.11)可简化为:

$$v_s = 3.2355 \sqrt{d_s \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (1.3.12)$$

(3) 其他关系式。

Peden 和 Luo 提出了一种适用于幂律流体层流和紊流的摩阻系数计算式^[8],并建立了一种新的计算不规则形状颗粒沉速的模型,该模型适用于牛顿和非牛顿流体的各种流态。其模型可用下式表示:

$$v_s = \left(\frac{4}{3} g \frac{d_s^{1-b_1 n}}{a_1 C_\psi k^{b_1} \rho_f^{1-b_1}} \right)^{\frac{1}{2-b_1(2-n)}} \quad (1.3.13)$$

式中 a_1 和 b_1 为流性指数的函数,与流态有关,由实验确定; C_ψ 与颗粒形状有关,量纲一。

Fang 提出了一种适用于过渡流($Re_p < 100$)的颗粒沉速计算式^[9]为:

$$v_s = 0.302 \left[\frac{d_s^{1.667} (\rho_s - \rho_f)^{0.889}}{\mu_a^{0.778} \rho_f^{0.111}} \right] \quad (1.3.14)$$

他假设现场钻井过程中颗粒雷诺数均小于 100,当颗粒雷诺数接近 100 的时候,摩阻系数将趋近于一个定值。

3. 受阻颗粒沉降速度

当流体中颗粒浓度较小时,颗粒之间距离比较远,它们之间相互作用很小,可以忽略不计。但是,当悬浮液中含有大量的悬浮颗粒时,颗粒在沉降过程中要相互碰撞,使得颗粒自由沉降受阻。受阻颗粒的沉降速度是颗粒浓度 C_s 的函数。J. M. Ham 等人认为^[10]:颗粒的水动力分散是由颗粒间的粘性力产生的。受阻颗粒的沉降速度可采用以下两种方法求解:

(1)采用 J. F. Richardson 和 W. N. Zaki 在 1954 年提出的计算受阻颗粒沉降的关系式^[11]:

$$\frac{v_h}{v_s} = (1 - C_s)^m \quad (1.3.15)$$

式中 C_s ——颗粒浓度,量纲一;

v_h ——颗粒受阻沉速, m/s。

当 $1 < Re_p < 500$ 时, $m = 4.45 Re_p^{-0.1}$; 当 $Re_p > 500$ 时, $m = 2.39$ 。

(2)采用 D. G. Thomas 在 1963 年提出的絮凝状颗粒群中颗粒沉降速度计算关系式^[12],适用于粒径为微米级的颗粒沉降:

$$v_h = v_s e^{-5.9 C_s} \quad (1.3.16)$$

1.3.2 岩屑运移最小返速模型

由于直井段、水平井段和斜井段岩屑运移机理不同,其井眼清洁标准也不同,最小环空返速的计算方法也不同,分述如下。

1. 直井段

如前所述,理论上来说,只要钻井液返速大于岩屑沉降速度,岩屑就可以被携出。但不同的环空返速,环空中滞留的岩屑浓度不同,岩屑浓度过大也会带来安全问题。因此,必须通过调节环空返速来控制环空中岩屑浓度。通常认为环空岩屑浓度小于 5% 即为安全,此时的环空返速即为最小环空返速。

取某直井段单元分析,由连续性定理可以得到:

$$C_e = \frac{Q_s}{Q_s + Q_f} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_s}} = \frac{1}{1 + \frac{v_f A_a (1 - C_a)}{(v_f - v_s) A_a C_a}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - C_a}{(1 - \frac{v_s}{v_f}) C_a}} \quad (1.3.17)$$

式中 C_e ——岩屑排出或进入单元段的浓度,量纲一;

Q_s ——岩屑体积流量, m^3/s ;

Q_f ——钻井液体积流量, m^3/s ;

v_f ——钻井液返速, m/s;

A_a ——环空截面积, m^2 ;

C_a ——环空中岩屑浓度,量纲一。

在稳定状态下,岩屑输出速率等于岩屑进入环空流动系统的速率,即等于井底产生岩屑的速率,它与机械钻速有关,如下式所示:

$$C_v = \frac{ROP \times A_w}{ROP \times A_w + v_f A_a} = \frac{1}{1 + \frac{v_f}{ROP} \left(1 - \frac{d_{po}^2}{d_w^2}\right)} \quad (1.3.18)$$

式中 ROP ——机械钻速, m/s;

A_w ——井眼截面积, m²;

d_{po} ——钻杆外径, m;

d_w ——井眼内径, m。

联立方程(1.3.17)、方程(1.3.18)可以得到不同环空浓度所需的钻井液返速:

$$v_f = v_s + \frac{ROP}{\left(1 - \frac{d_{po}^2}{d_w^2}\right) C_a} \quad (1.3.19)$$

若令 C_a 为 5%, 则此时的 v_f 即为所求的最小环空返速。

2. 水平井段

由于水平井段岩屑运移机理比较复杂, 尤其是形成岩屑床后, 无法像直井段那样简单推导出岩屑浓度与环空返速的关系式, 为简化计算, 一些学者将不产生岩屑床所需要的环空返速定义为最小环空返速, 并通过试验结果对直井段岩屑运移速度进行修正而得到。比较有代表性的是 Larsen 通过试验得到的如下模型^[13]:

$$Q_{\min} = \frac{\pi}{4} (d_w^2 - d_{po}^2) v_{\min} \quad (1.3.20)$$

$$v_{\min} = C_{ang} C_{size} C_{RPM} C_{mwt} v_s + v_c \quad (1.3.21)$$

$$v_c = \frac{ROP \times d_b^2}{(D_w^2 - d_{po}^2) C_e} \quad (1.3.22)$$

$$C_{ang} = 0.0342\theta - 0.000233\theta^2 - 0.213 \quad (1.3.23)$$

$$C_{size} = 1.286 - 40.9448d_s \quad (1.3.24)$$

$$C_{RPM} = 1 - \frac{RPM}{600} \quad (1.3.25)$$

$$C_{mwt} = 1 - 0.0002779(\rho_f - 1042.5) \quad (\rho_f > 1042.5) \quad (1.3.26)$$

$$C_{mwt} = 1 \quad (\rho_f < 1042.5) \quad (1.3.27)$$

式中 $Q_{\min}$ ——最小排量, m³/s;

$v_{\min}$ ——最小环空返速, m/s;

C_{ang} ——井斜角修正系数, 量纲一;

C_{size} ——岩屑粒径修正系数, 量纲一;

C_{RPM} ——转速修正系数, 量纲一;

C_{mwt} ——钻井液密度修正系数, 量纲一;

v_c ——岩屑运移速度, m/s;

d_b ——钻头直径, m;

θ ——井斜角, ($^{\circ}$);

RPM ——钻杆转速, r/min 。

3. 斜井段

对于斜井段的最小环空返速计算, 可以首先计算垂直井段和水平井段最小返速值, 然后根据井斜角插值得到, 这已经被现场验证并广泛使用。

1.4 岩屑运移稳定流动

岩屑运移最小返速模型由于计算简便在现场得到了广泛应用, 但它无法描述斜井段和水平井段形成岩屑床后的岩屑运移规律, 即不同水力条件下的岩屑床高度和环空压耗的变化规律。这就需要建立环空中存在岩屑床时的分层流动模型, 其研究方法可以概括为实验回归和理论建模两大类。不考虑岩屑床的累积和运移过程, 环空流动达到稳定时的岩屑状态计算模型称为岩屑运移稳定模型。

1.4.1 经验模型

汪海阁和刘希圣等在自建的室内实验设备上进行了大量的岩屑运移实验, 得到了水平井段岩屑床变化规律, 并通过对实验数据回归建立了水平井段岩屑床高度和环空压耗回归公式。

实验表明, 影响岩屑床厚度的因素很多, 其表达式为:

$$H = f[v_a, N, e, \mu_e, v_p, \rho_f, \rho_s, d_s / (d_{ao} - d_{ai})] \quad (1.4.1)$$

式中 H ——无量纲岩屑床高度(以下文中如非特殊说明, 岩屑床高度均指无量纲岩屑床高度), $H = 100h/d_{ao}, \%$;

h ——实际岩屑床高度, m ;

N ——内管转速, r/min ;

e ——内管偏心度, 量纲一;

μ_e ——钻井液有效粘度, $Pa \cdot s^n$;

v_p ——环空岩屑的注入速度, kg/min 。

$$\text{对于宾汉流体: } \mu_e = \mu_{\infty} + \tau_0 \frac{d_{ao} - d_{ai}}{12v_a} \quad (1.4.2)$$

式中 μ_{∞} ——宾汉流体塑性粘度, $Pa \cdot s$;

τ_0 ——宾汉流体动切应力, Pa 。

$$\text{对于幂律流体流体: } \mu_e = \frac{k \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^{1-n} (d_{ao} - d_{ai})^{1-n}}{12^{1-n} v_a^{1-n}} \quad (1.4.3)$$

在实验中, 环空结构一定, 内外管直径的影响不予考虑, 且在一定条件下岩屑尺寸对携岩的影响较小, 因而在这里也不予考虑。从而方程(1.4.1)可简化为:

$$H = f(v_a, N, e, \mu_e, v_p, \rho_f) \quad (1.4.4)$$

采用多元参数统计方法对实验数据进行回归, 得到水平段环空岩屑床高度经验模型^[14]如下:

$$\begin{aligned}
H = & 90.7609 - 61.90965v_a - 0.35468N - 170108e - 4.52489v_a^2 + 0.0001N^2 \\
& + 5.88684e^2 + 0.16236v_aN + 29.04527v_ae - 0.09465Ne \\
& + 0.00034v_aNe - \frac{25.108}{1000}(\rho_f - 1000) + 1.20133v_a \frac{v_p - 6}{6} \\
& + 2.16505 \sqrt[3]{\mu_e \cdot 1000} - 3.3953 \sqrt[4]{\mu_e \cdot 1000}
\end{aligned} \quad (1.4.5)$$

采用同样方法可以得到环空有岩屑床存在时水平段压耗经验公式^[15]如下:

$$\Delta p_c = \frac{0.0026068625H\Delta p_0}{f_d} \left[\frac{v_a^2}{g(d_{ao} - d_{ai})} \frac{1}{\rho_s/\rho_f - 1} \right]^{-1.25} + (1 - 0.00581695H)\Delta p_0 \quad (1.4.6)$$

式中 f_d ——达西—韦斯巴赫系数, $f_d = 64/Re$ ($Re < 2300$), $f_d = 0.316/Re^{0.25}$ ($Re > 2300$);
 Δp_0 ——无岩屑床时的环空压耗, Pa。

1.4.2 两层稳定流动

基于 Gavignet 和 Sobey 提出的大斜度井段中岩屑运移的两层模型^[16], 根据固液两相流理论, 建立了两层稳定岩屑运移新模型^[17,18], 模型中考虑了悬浮层颗粒扩散和岩屑床中流体流动的压力降, 因此该模型能够更加真实地反映环空岩屑运移过程。模型示意图如图 1.7 所示。

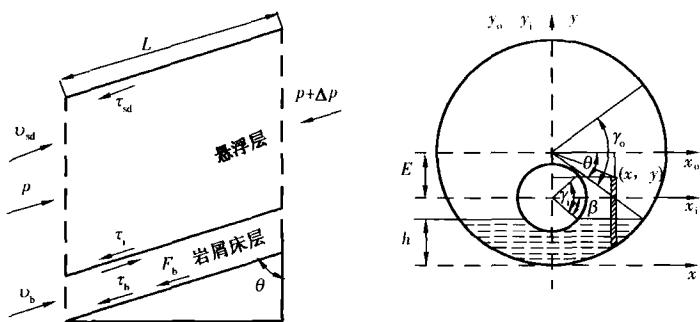


图 1.7 大位移井两层稳定岩屑运移模型示意图

模型假设在一定环空返速下, 因倾斜或水平环空内的快速沉降而使绝大多数岩屑颗粒聚集在环空底部形成岩屑床; 只有少数在液流中作悬浮运动, 服从某一扩散规律。岩屑床的厚度均匀, 且其中岩屑体积浓度为 52%。岩屑床面以上颗粒作悬浮运动, 不产生滚动、翻转和滑脱。岩屑颗粒具有相同的直径和圆球度。钻杆偏心但不旋转。

由连续性定理可以分别写出固相和液相的连续性方程:

$$\text{固相:} \quad A_{sd}C_{sd}v_{sd} + A_bC_bv_b = A_aC_e v_a \quad (1.4.7)$$

$$\text{液相:} \quad A_{sd}(1 - C_{sd})v_{sd} + A_b(1 - C_b)v_b = A_a(1 - C_e)v_a \quad (1.4.8)$$

式中 A ——面积, m^2 ;

C ——岩屑浓度, 量纲一;

v ——速度, m/s 。

式中下标“sd”表示悬浮层; “b”表示岩屑床层; “i”表示悬浮层与岩屑床层界面。