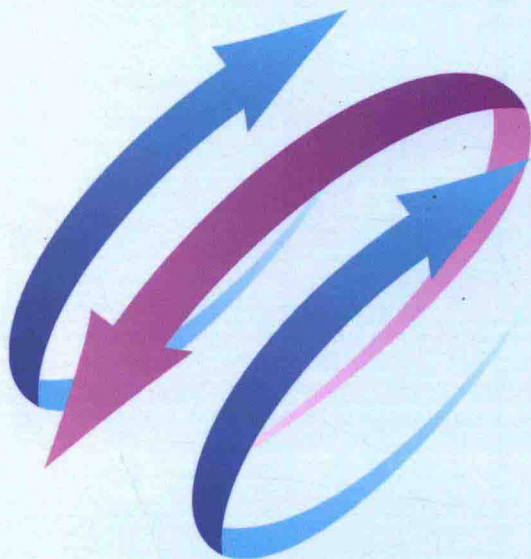




环空螺旋流场及其 在油气井固井中的应用

舒秋贵 罗德明 著

Annulus Helical Flow Field and Its Application in
Oil and Gas Well Cementing



科学出版社

西华师范大学出版基金资助

环空螺旋流场及其 在油气井固井中的应用

Annulus Helical Flow Field and Its Application
in Oil and Gas Well Cementing

舒秋贵 罗德明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍国内外注水泥顶替理论的研究现状和问题;随后介绍在旋流扶正器导流下油井环空螺旋衰减流场的实验研究方法;螺旋流场流速、压降分布规律;旋流扶正器结构设计理论与方法;旋流扶正器井下间距设计方法;注水泥顶替实验研究方法;最后介绍螺旋流顶替在油田中应用案例。

本书可供石油院校有关专业研究人员和学生及其他院校流体力学、水力学专业相关人员参考,对于从事固井工程的专业技术人员具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

环空螺旋流场及其在油气井固井中的应用=Annulus Helical Flow Field and Its Application in Oil and Gas Well Cementing /舒秋贵,罗德明著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049154-1

I. ①环… II. ①舒… ②罗… III. ①环空流速-应用-油气井-固井-研究 IV. ①TE26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143540 号

责任编辑:万群霞 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 9 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:200 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前,在油气井固井注水泥顶替方面利用旋流扶正器的导流作用实现螺旋流顶替的方式越来越多,但国内外对其理论与实际应用方法的研究很不成熟。现场使用旋流扶正器大多凭借经验,缺乏理论依据和行业标准。对旋流扶正器导流作用下的环空螺旋流场的相关研究就是在这一背景下展开的。本书主要是笔者在西南石油大学完成的博士论文和在中国石油化工集团公司西南石油局、西南油气分公司博士后工作站所完成的研究成果基础上编写成的。全书共7章,第1章评析文献中关于注水泥顶替理论与方法研究现状、存在的问题和研究难点;第2章介绍螺旋流场实验研究方法;第3章介绍螺旋流场流动基本规律的实验研究成果;第4章和第5章介绍旋流扶正器结构的优化设计理论及其井下应用方法;第6章介绍注水泥顶替实验方法和顶替实验研究成果,包括轴向流顶替和螺旋流顶替,规则井眼、不规则井眼的顶替。第7章介绍现场应用实践案例。其中第1章至第6章由舒秋贵编写,第7章由罗德明编写。全书由舒秋贵统稿。

本书的实验分为两部分,关于螺旋流场基本规律的实验研究是在西南石油大学固井实验室完成的。特别感谢我的博士生导师刘崇建教授,虽然恩师已故,但他的敬业精神、严谨的治学风格、精深的学术造诣,以及对我的谆谆教诲,仍激励我奋然前行。在博士论文撰写阶段,刘孝良副教授、陈英老师也给予了大力支持,在此一并表示感谢。不规则井眼螺旋流顶替实验是在中国石油化工集团公司西南石油局、西南油气分公司博士后工作站期间完成的,特别感谢指导老师徐进局长、罗德明高级工程师、曾桂元高级工程师,西南石油大学博士生导师郭小阳教授,西南固井分公司姚勇、焦健芳、邓天安,中国石油化工集团公司西南石油局钻井研究院张建同志及其他相关技术人员给予的帮助。同时感谢研究生付纷纷和谢丽萍同学为本书的资料收集及整理做出的努力。

本书为笔者的部分学术研究成果,限于水平,书中可能存在观点或表述欠妥之处,敬请广大读者批评指正。

舒秋贵

2016年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 螺旋流在油气井固井中的应用背景	1
1.1.1 轴向流顶替理论与技术现状	1
1.1.2 螺旋流与注水泥顶替	11
1.1.3 小结	15
1.2 环空螺旋衰减流场研究的必要性	16
1.3 螺旋衰减流研究难点	17
1.3.1 螺旋衰减流场理论求解非常困难	17
1.3.2 相似模拟三维流场测速难度非常大	18
1.4 主要内容与研究方法	18
第 2 章 小尺寸环空螺旋流场测速方法	19
2.1 螺旋流场实验装置设计	19
2.1.1 测点设置	19
2.1.2 测试内容及方法	20
2.2 测速方法	21
2.2.1 轴向速度测量	21
2.2.2 周向速度测试方法	28
第 3 章 在旋流扶正器作用下的环空螺旋流场	29
3.1 实验介质	30
3.2 环空螺旋流场	30
3.2.1 轴向速度	30
3.2.2 旋流衰减规律	33
3.2.3 周向速度	41
3.2.4 螺旋流场阻力损失研究	45
3.3 本章小结	59

第4章 高效导流旋流扶正器结构研究	61
4.1 旋流扶正器国内外研究现状	61
4.2 新型高效导流旋流扶正器结构设计	62
4.2.1 新型高效导流旋流扶正器结构设计	62
4.2.2 旋流扶正器导流能力评价	66
4.2.3 准入性与导流效果的综合分析	72
4.3 本章小结	74
第5章 旋流扶正器井下间距设计	76
5.1 旋流扶正器安放设计理论研究	76
5.1.1 幂律流体的相关研究	77
5.1.2 宾汉流体的相关研究	81
5.1.3 应用示例	86
5.2 本章小结	87
第6章 顶替实验研究	89
6.1 注水泥顶替实验技术的发展	89
6.1.1 顶替实验装置与顶替实验方法	89
6.1.2 评价	91
6.2 顶替实验方法与顶替装置设计	91
6.2.1 顶替效率实验方法	92
6.2.2 顶替实验装置设计	92
6.2.3 顶替装置结构	93
6.2.4 对顶替实验装置的评价	94
6.3 顶替实验研究	95
6.3.1 实验介质设计	95
6.3.2 实验步骤	96
6.3.3 实验结果与分析	96
6.4 本章小结	113
第7章 螺旋流顶替技术应用案例与分析	115
7.1 螺旋流顶替技术在回接固井实践中的验证	115
7.1.1 案例1:元坝121井 $\Phi 193.7\text{mm}$ 套管回接固井	115
7.1.2 案例2:阆中1井 $\Phi 193.7\text{mm}$ 套管回接固井	116
7.1.3 河飞302井 $\Phi 177.8\text{mm}$ 套管回接固井	117

7.1.4 小结	118
7.2 川科 1 井 $\Phi 177.8\text{mm}$ 尾管固井	119
7.2.1 固井难点分析	120
7.2.2 固井技术措施	120
7.2.3 质量评价	121
7.3 在川西水平井固井中的应用	122
7.3.1 川西水平井概况	122
7.3.2 川西沙溪庙组水平井固井	123
7.4 本章小结	128
参考文献	130
附录 A 附表	137
附录 B 附图	142

第 1 章 绪 论

固井是建井过程中的一个重要环节。固井质量的好坏不仅关系到全井的钻井速度和成本,甚至关系到一口井的成败。特别是油层套管(或尾管)固井,其质量将直接影响油井的使用寿命及能否顺利进行油、气开采。

要得到质量较好的固井,在固井施工过程中首先尽量提高水泥浆顶替钻井液的顶替效率,实现完全替净,即保证所需封固段完全被水泥充满。对顶替效率不高的封固段,即使在室内配制性能再好的水泥浆,在井下也会因受泥浆的污染而全盘失效。提高顶替效率、力求环空封固段替净一直是国内外固井界重点研究的课题。

水泥浆对泥浆的顶替效率差,会从以下几个方面影响固井质量。

(1) 注水泥过程中泥浆窜槽,为环空窜流提供了便捷的通道。

(2) 因顶替过程中未能将附着于井壁的虚泥饼顶替干净,随着水泥水化,虚泥饼脱水发生干裂,在界面产生微缝隙,这为油气水窜提供了有利通道。

(3) 因替净程度差,水泥浆与泥浆掺混,使水泥浆的性能变差,影响水泥水化,导致后期水泥石强度不高,影响界面胶结质量,增大水泥石渗透率,从而引发地层流体发生窜流。

因此,注水泥过程中如未能将泥浆替净,则起不到封严地层、防止环空窜流的目的,所以替净是保证固井质量的必要条件。

1.1 螺旋流在油气井固井中的应用背景

目前,注水泥顶替采用轴向流顶替和螺旋流顶替两种方式。轴向流顶替是顶替液沿井眼轴向一维顶替,是传统的固井注水泥顶替方式。螺旋流顶替是 20 世纪 80 年代末才出现的一种起步较晚的顶替方式。螺旋流顶替在一定程度上是对轴向流顶替方式的改进与补充。

1.1.1 轴向流顶替理论与技术现状

迄今为止,许多学者和工程师对轴向流顶替理论与实践做了大量的工作,理论上取得了一系列的有益成果,实践中也获得一系列的成功,固井施工质量

与安全也得到长足进步。国内外学者对影响顶替效率的因素也有了一些共识,包括套管的居中度、固井液的流动状态、顶替液流经封隔层的紊流接触时间、钻井液的触变性、水泥浆与钻井液的流变性能、水泥浆与钻井液的密度差^[1]等。分析认为,这些因素实质上都是从影响顶替界面的形态来影响顶替效率的。固井注水泥顶替钻井液效果的优劣主要在于顶替界面能否均匀平缓推进,顶替液与被顶替液不会剧烈掺混,发生顶替液窜流,或被顶替液锁在窄间隙而形成窜槽;顶替液与被顶替液之间的顶替界面越平缓,顶替效率越高。

为使顶替界面平缓,一些学者认为从两个方面采取措施可以实现。第一,顶替液本身的流速剖面平坦,对此研究主要运用的是单相流流态理论。该理论认为不同流态的流体运动其流速剖面的平缓程度不一样,顶替效果不一样,紊流与塞流流态其流速剖面很平缓,利于形成平缓的顶替界面,顶替施工实践中尽量避免使用层流顶替。第二,对于偏心环空还要求宽、窄间隙流体顶替界面均匀推进,这是对单相流流态运用的补充。即使宽、窄间隙流体都实现紊流,如果宽、窄间隙顶替界面速度相差较大,也会发生宽间隙顶替液窜流、窄间隙流体滞留形成窜槽,后文简称两相流顶替界面理论。两个方面的研究都有一系列成果,但也存在较多的分歧,甚至有些结论是矛盾的。

1. 单相流流态理论的运用

1) 紊流顶替理论与技术

紊流顶替研究始于1948年,Howard和Clark^[2]认识到紊流顶替有利于提高顶替效率,并认为提高顶替液的环空返速、降低钻井液的黏度有利于提高顶替效率。1949年,Owsley^[3]指出使用紊流顶替有利于提高顶替效率;1964年Brice和Holmes^[4]利用现场资料说明水泥浆在紊流流动时,接触封固层的时间不低于10分钟,能有效提高顶替效率。此后,紊流顶替技术被广泛接受。1972年,Tanaka和Miyazawa^[5]的实验说明,增加紊流水泥浆的顶替量对提高顶替效率有良好的作用,他们指出,同心环空时顶替量增大1.2~1.5倍,而偏心环空却要增大1.5~2倍。紊流顶替能取得较好的效果,物理解释为:流体以紊流流态流动时,紊流形成的平均流速分布较为平坦,一般情况下其循环效率比层流状态下要高^[6];且因其紊动效应,利于顶替液对被顶替液进行动量交换,从而加速对环空壁面泥浆的清除。但在紊流施工设计时,通常按照同心环空紊流计算临界雷诺数和临界流速^[7-9],而同心环空流理论只有在套管居中度大于85%时才适用,但实际套管居中度往往小于该值。Smith^[7]、Sauer^[8]实验中发现按同心环空设计的临界流速往往只能使部分环空紊流,窄间隙存

在连续的泥浆槽;当整个环空水泥浆流速达到临界流速时,不存在泥浆滞留现象。

受地层承压能力和机泵能力的限制,水泥浆因其密度大、黏度高,紊流往往无法实现,这时工程上改用前置液(预冲洗液和隔离液)。Haut 和 Crook^[10]、Couturbr 等^[11]提出,隔离液能在合理的泵速下进入紊流而不产生过大的摩阻压降;隔离液可以被加重而使其密度大于泥浆但小于水泥浆,且没有过多的固相沉降,黏度比泥浆高,比水泥浆低;隔离液具有低失水的特点,有很好的稳定性;隔离液能给套管和地层创造水湿环境,与水泥浆和泥浆相容。但隔离液、预冲洗液是否有效? Gullot 等^[12]研究认为:预冲洗液并没有人们所认为的能防止钻井液与水泥浆直接接触,即使在按照标准设计施工,预冲洗液自然流向宽间隙,并且流得很快,从而穿过泥浆,窄间隙仍为泥浆占据,后续水泥浆仍然与窄间隙泥浆直接接触,并沿轴向或在套管内(没有下胶塞的情况下)与泥浆混合;而且因隔离液的黏度比泥浆高,顶替过程中,隔离液先从宽间隙流走,或窄间隙被隔离液占据,这使水泥浆顶替隔离液比顶替泥浆更困难,发生前置液滞留,此时有可能存在水泥浆、泥浆和隔离液三相混合,隔离液实际上没有起到隔离效果。

通常认为,紊流顶替技术是最有效的顶替泥浆技术。但在下列情况下不能实施^[6]:①如果按所需接触时间设计使用未加重的较稀顶替液的体积量,可能造成地层孔隙压力失控;②使用加重的顶替液实现紊流顶替,可能受机泵能力的限制;③顶替液从套管鞋返出时,由于 U 形管效应可能会使流速降低;④因成本的原因而节省顶替液的体积量和薄弱易漏失地层,也可能限制了大排量注水泥施工;⑤井眼不规则,存在扩眼或缩径的情况,紊流流场在不规则段往往存在涡流,使顶替液与被顶替液混合,或根本无法实现紊流。

2) 塞流顶替理论与技术

塞流顶替理论与技术是 20 世纪 60 年代因实际条件限制紊流顶替技术的应用而发展起来的低速顶替技术。1965 年, Parker 等^[13]指出,采用环空返速低于 0.45m/s 的塞流顶替,可以改善井径扩大处残留泥浆的顶替效果。Parker 等^[13]通过实验发现,水泥浆和钻井液界面间发生化学反应生成的聚凝物作为固相以较低速度向上运移,足够低的速度情况下顶替更完全,污染减少。水泥浆的速度和水泥浆与泥浆之间的密度差是形成塞流的最主要的因素。塞流要求顶替流速低,且水泥浆黏度高于泥浆黏度。因此,塞流在下列情况下受限制而不能使用:①钻井、固井需要高黏度泥浆时;②水泥浆中往往含有分散剂,使水泥颗粒间的结构稳定性变差,降低剪切值,这往往导致水泥浆窜流,界

面聚凝物形成不了,不利于顶替;③U形管效应,水泥浆与钻井液之间的密度差越大,U形管效应越容易发生,不利于塞流顶替的形成;④对于深井和高温井,塞流顶替需要很长时间不现实。刘崇建等^[1]实验研究得出,套管偏心时,低速塞流顶替效率最好,塞流临界返速计算公式如下。

塑性液体:

$$V \leq 0.00583(D_o - D_i) \frac{\tau_0}{\eta_p} \quad (1-1)$$

式中, V 为塞流平均流速, cm/s; D_o 为环空外径, cm; D_i 为环空内径, cm; τ_0 为液体的动切力, Pa; η_p 为液体的塑性黏度, Pa · s。

幂律液体:塞流的条件为 $Re < 100$ 。其中,

$$Re_m = \frac{\rho (D_o - D_i)^n \bar{u}^{2-n}}{12^{n-1} K \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n} \quad (1-2)$$

式中, ρ 为流体密度, g/cm³; n 为流性指数, 无因次; K 为稠度系数, Pa · s ^{n} 。

国内注水泥流变性设计长时间沿用行业标准^[9]。过高的速度或紊流会使聚凝物破裂,成串的聚凝物流出,污染水泥浆,降低顶替效率。邓建民^[14]根据塞流顶替理论,提出最小泥浆静切力的设计标准,推导出钻井液零滞留的条件。但塞流顶替缺乏紊流顶替状态的紊动效应,流体间的动量交换作用弱,对井壁虚泥饼和高黏附泥浆驱替能力弱。

3) 层流流态

井下流体塞流流态使用往往受前述情况影响实现不了塞流,也往往受地层承压能力或机泵能力的限制而实现不了紊流流动。因此,实际顶替流态为层流。当前层流顶替理论研究成果相对较多。

单相层流的流速剖面为抛物线形,容易导致顶替界面不稳定,因此,学者们展开了对流速剖面形态的影响因素与影响规律的研究。Li 和 Novotny^[15]在对同心环空牛顿液体单相流研究中得出:①水泥浆黏度、密度和进口流速对流体流速剖面均有影响,降低水泥浆黏度可以使流速剖面更平缓,比高黏度水泥浆更利于顶替;②随着水泥浆的密度提高,流速剖面越平缓,因此,提高水泥浆的密度有利于顶替;③进口速度不如前两个因素影响明显,但也有轻微的影响。流速越低,流速剖面越平缓,也就是说,降低流速更利于顶替。另外,对于幂律流体,流性指数越小,流速剖面越平缓;对于宾汉流体,动塑比越大,流速剖面越平缓。Silva 等^[16]提出利用流速剖面的扁平系数这一比较简便的方法

来优化设计注水泥顶替的思路。

2. 两相流顶替界面理论

因单相流与两相流存在较大的差异性,对单相流的研究结论不一定适合两相顶替流。学术界对两相顶替流理论的研究做了大量的工作,很多学者从环空宽、窄间隙流体的流动条件与宽、窄间隙流体运移速度快慢,顶替界面的均匀推进的实现条件进行研究。

1960年,McLean等^[17]假设最窄间隙充满泥浆,宽间隙充满水泥浆,计算最窄间隙泥浆平均流速和整个环空平均流速之比,若该比值小于1,则发生水泥浆窜流。1989年,Lockyear和Hibbert^[18]分析认为水泥浆剪切应力必须大于泥浆静胶凝强度。水泥浆剪切应力理论模型为

$$\tau = \frac{(\Delta p / \Delta L) d_h}{4} \left[1 - \left(\frac{d_h - G_{an}}{d_h} \right)^2 \right] \quad (1-3)$$

式中, $\Delta p / \Delta L$ 为环空摩擦压降梯度; G_{an} 为环空间隙宽度; d_h 为井径。

由式(1-3)分析可知,对于偏心环空,随着 G_{an} 变化,水泥浆壁面剪切应力也将发生变化。环空摩擦压降梯度 $\Delta p / \Delta L$ 是环空几何条件、液体流变性、环空速度或顶替速度的函数。窄间隙泥浆运动较困难,需要较大的泵速才能提高顶替效率。套管偏心将导致环空压降比同心环空明显降低,相应地,水泥浆壁面剪切应力也比需要的低,从而使泥浆顶替出现问题。因此,在泥浆胶凝强度较高和顶替速率较低的情况下,窄间隙水泥浆壁面剪切应力太小,泥浆不运动。利于泥浆被顶替的因素为:较低的泥浆胶凝强度;好的居中度;较高的顶替速率。利于水泥浆的驱动因素为:较高的套管居中度;隔离液比水泥浆稀;水泥浆剪切应力低,即自身流动阻力小。1990年,Lockyear等^[19]进一步考虑了浮力的作用,认为泥浆被顶替需考虑两种力,即摩擦压降和密度差引起的静压降。要使窄间隙被顶替液A流动,摩擦压降和密度差引起的静压降之和必须大于被顶替液剪切应力。分析得出顶替液B替走被顶替液的条件为

$$\left| \frac{\Delta p_B / \Delta L}{2\tau_{yA} / b} + \frac{(\rho_B - \rho_A) g \cos \theta}{2\tau_{yA} / b} \right| > 1 \quad (1-4)$$

式中, $\Delta p_B / \Delta L$ 为顶替液压降梯度; ρ 为密度; τ_y 为被顶替液剪切应力; b 为环空间隙。

根据式(1-4)可知,无密度差且当第一项较高时,即使雷诺数较低也能获得较高的顶替效率。确保最小的窜槽所需要的雷诺数可能取决于居中度。上

述分析只是考虑窄边间隙的泥浆是否流动的问题。但即使宽、窄间隙的流体都流动,宽、窄间隙的顶替界面也可能很不相同。要使宽、窄间隙顶替界面稳定,必须使宽间隙的平均流速小于(或近似等于)窄间隙的平均流速,则要求:

$$\left[\frac{dp}{dl} \right]_1 + \rho_1 g \cos \theta < \left[\frac{dp}{dl} \right]_2 + \rho_2 g \cos \theta \quad (1-5)$$

式中, ρ 为浆体密度; dp/dl 为压降梯度; θ 为井斜角; 1 和 2 分别为泥浆和水泥浆。

根据上述分析,要使顶替效率提高,需遵循以下几个原则:尽可能提高套管居中度;尽可能降低被顶替液的剪切力;顶替液相对于被顶替液需要有足够大的表观黏度,并且居中度越低,顶替液与被顶替液的表观黏度比则越高。

Brady 等^[20]在上述研究的基础上,提出有效层流顶替的设计标准。

(1) 密度级差:顶替液的密度大于被顶替液,浮力效应对顶替界面的稳定作用。

(2) 摩擦压力级差:由顶替液产生的摩擦压力大于被顶替液产生的摩擦压力。

(3) 最小压力梯度:偏心环空,宽间隙的壁面剪切应力比窄间隙的剪切应力高,当流体具有静切应力时,其流动壁面剪切应力应该高于流体静应力值。为实现该条件,设计时需要确保最小的流速获得所需最小的压力梯度。

(4) 速度差:窄间隙的流速不小于宽间隙的流速,从而使顶替界面平缓。

国外对以上有效层流的实现制定了行业标准^[21]。有效层流顶替理论确保了窄间隙泥浆流动和宽、窄间隙流速相等,为顶替界面的均匀推进提供了理论指导。但该理论要求密度级差、摩擦压力级差、最小压力梯度,以及宽、窄间隙速度近似相等四个条件同时满足,这对指导施工显得比较保守。

刘崇建等^[1]进行了类似的研究,得出水泥浆与泥浆无密度差时窄间隙宾汉流体宽、窄间隙流速相等的条件为

$$\eta_{pc} = \eta_{pm} \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2 \quad (1-6)$$

式中, η_{pc} 为水泥浆的塑性黏度; η_{pm} 为泥浆塑性黏度; e 为套管偏心度。

满足式(1-6)的 η_{pc} 称为临界塑性黏度。若顶替液的塑性黏度小于临界塑性黏度,钻井液在窄间隙的流速小于水泥浆在宽间隙的流速。反之,则窄间隙的钻井液流速大于宽间隙水泥浆的流速。进一步结合窄间隙钻井液流动条件可知,水泥浆动切力 τ_{oc} 和塑性黏度 η_{pc} 对顶替效果的作用在不同的流量情况

下并不完全一样。提高偏心环空水泥浆的顶替效果和减少水泥浆的返高差异,采取的主要措施有:①在低速情况下,提高水泥浆与钻井液的动切力比;②在高速情况下,提高水泥浆与钻井液的塑性黏度比;③当水泥浆和钻井液流变性能不能满足式(1-5)时,尽可能提高套管居中度。

另一些学者以流体动量方程、动力学方程、连续性方程为基础,有的还联合组分输运方程,结合非牛顿流体的本构方程,在一定简化条件下对顶替界面运移进行了研究。

1975年,Flume^[22]采用平板流法研究了同心环空幂律流体层流顶替模型。该模型假设条件为:体积流量恒定,忽略界面上的对流与扩散,顶替峰面平滑;环空压力仅是轴向坐标的函数,而与径向坐标、周向坐标、时间等无关;顶替液沿流道中心流动,而被顶替液沿壁面附近流动;顶替界面与单相流的速度剖面一样呈中心对称,求解时设顶替界面中心无剪切力,中心两侧界面上顶替液与被顶替液的剪切力相等。根据上述假设,推导出了顶替液和被顶替液的流动速度公式、界面位置运移公式。

1978年,Martin等^[23]实验中沿着与柱面垂直方向上的所有参数都取平均值。顶替数学模型研究采用假设流体(泥浆、隔离液、水泥浆)不混合,有明显的界面分隔,流体间不发生化学反应;横向速度足够快,从而使每个横截面达到静力学平衡。研究结果认为,成功固井需同时满足下列条件:高居中度,限制停泵时间,顶替液对被顶替液高密度比和高黏度比,选择适合的隔离液(密度和黏度在顶替液和被顶替液之间,尤其在偏心度大时更应强调这点)。他们认为,使用了这种隔离液更适合用低速顶替。

陈家琅和刘永建^[24]、刘永建等^[25]、陈家琅等^[26]、陈家琅^[27]、王保记^[28]用Flume相近的方法研究了偏心环空宾汉流体、幂律流体的顶替速度计算式,泥浆不滞留的间隙极限宽度和最小流动压力梯度。通过推导得出的公式有:泥浆和水泥浆的流速、流量公式;泥浆不滞留的环空间隙极限宽度计算公式;确保窄间隙不滞留泥浆的最小顶替压力梯度计算式。研究得出,提高顶替效率的措施有:①增大泥浆的动塑比,降低水泥浆的动塑比,增大水泥浆与泥浆的比重差,采用适当的顶替压力梯度;②在水泥浆、泥浆参数一定时,适宜的顶替压力梯度值取决于套管偏心度;③套管不居中是影响顶替效率的一个重要因素,但不是唯一的、起决定作用的因素,有时套管居中度很好,但顶替效率和固井质量不见得高,所以,提高定向井偏心环空注水泥顶替效率的问题最终可归结为泥浆、水泥浆流变学问题;④套管在井中斜置或弯曲,破坏环空轴向流场,形成二维、三维复杂流场,可以减小或清除偏心环空滞留区,与其防止套管偏

心,不如再适当拉大套管扶正器安放间距,让扶正器之间的套管段呈弯曲状态。

一些学者较系统地研究了直井、大斜度井、水平井、同心和偏心环空宾汉流、幂律流、罗伯逊-斯蒂夫流型的接触和非接触层流顶替的理论,取得一系列有益成果^[1,29-35]。研究指出:①对于幂律流体来说,增大水泥浆与泥浆密度差,增大泥浆流性指数,减小水泥浆流性指数,减小泥浆稠度系数,增大水泥浆稠度系数,增大流量,减小套管偏心度,都有利于提高顶替效率;提出活动套管所诱导的回流与剪切流场是提高注水泥顶替效率的有利因素。对于非接触层流顶替,使用隔离液顶替对顶替无益。②对于宾汉流体,增大水泥浆与泥浆的密度差,其整体顶替效率增加;增大水泥浆动切应力,减小泥浆动切应力,其整体顶替效率和剖面顶替效率均增加;增大水泥浆的塑性黏度,减小泥浆的塑性黏度,其整体顶替效率和剖面顶替效率均增加;增大流量,其整体顶替效率增加。

Szabo 和 Hassager^[36]运用润滑理论进行简化,建立牛顿流体顶替的界面运动模型,获得近似解析解,并分析了等黏度牛顿流体间在中、低雷诺数情况下密度差的浮力效应对顶替的影响。研究得出,顶替效率理论上不依赖雷诺数;黏度比比浮力数对顶替效率的影响更大。但利用该研究结果预测顶替效率比实际偏大,尤其在偏心、井斜的情况下应用更受限制。

上述研究简化过多,与实际相差较大。一些学者研究发现,界面附近的顶替流,周向速度与轴向速度具有相近的量级,不可对周向运动忽略^[37],并且界面附近存在很明显的二次流^[38]。

Pelipenko 等^[37]、Bittleston 等^[38]采用流动参数的径向平均值,参考多孔介质渗透黏性指进的 Hele-Shaw 模型进行二维顶替模型的系列研究。该模型假设条件为:环空间隙流体是均匀的,界面附近流体为简单混合,界面两侧流变性不变,以赫巴流型作为非牛顿流体的流变模式。该研究认为,界面上下游存在方向相反的逆流,如果这种方向相反的逆流很强,其剪切流将破坏重力对界面稳定的作用;对于同心环空界面位置,增大井斜角和被顶替液的剪切力、稠度系数、流性指数,减小浮力数和顶替液的剪切力、稠度系数、流性指数,环空下侧的界面高度比上侧要高;在偏心度的影响下,增大井斜角、偏心度、浮力数和被顶替液的剪切力、稠度系数、流性指数,减小顶替液的剪切力、稠度系数和流性指数,界面位置呈现与同心环空相反的情况,即环空下侧的界面高度(窄边)比上侧(宽边)低。模型推导中所有变量进行环空间隙平均化处理,忽略径向速度,简化假设比以往研究较合理。界面位置计算公式包含了各种相

关参数,如偏心度、井斜角、密度差、流变性等。因此,Hele-Shaw 顶替理论模型能够描述整个环空内注水泥顶替界面形态,有利于保持注水泥顶替界面稳态的定量条件。但对近似解析解模型是在弱偏心的情况下运用摄动法推导的,对于其是否可以用于偏心度较大的情况,未作评价。Frigaard 和 Pelipenko^[39]还评价了有效层流顶替理论的不足,认为有效层流的 4 个标准实际上只要满足环空宽、窄间隙流速近似相等,其他 3 个条件自然得到满足。

当前,随着计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的逐步发展,固井界学者通过建立多相流模型(volume of fluid, VOF)^[40]研究顶替界面的运移情况,并获得一定的成功^[41-43]。该模型的假设条件是:通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一相流体的体积分数 a_i 来模拟两种或三种不混合的流体。对于 a_i 有:① $a_i = 0$ 时,第 i 相流体在单元中是空的;② $a_i = 1$ 时,第 i 相流体在单元中是充满的;③ $0 < a_i < 1$ 时,单元中包含了第 i 相流体和另一相或其他多相流体的界面。

出现在输运方程中的属性 φ 是由存在于每一控制容积中的分相决定的,例如,在两相流系统中:

$$\varphi = a_2 \varphi_2 + (1 - a_2) \varphi_1 \quad (1-7)$$

式中,下标 1 和 2 表示相。所有的其他属性都以这种方式计算。相之间的界面由求解连续性方程获得:

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial a_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1-8)$$

各相的体积分数由下式限制:

$$\sum_{q=1}^n a_q = 1 \quad (1-9)$$

通过求解整个区域内的单一的动量方程,作为结果的速度场是由各相共享的。如下所示,动量方程取决于通过属性 ρ 和 η 的所有相的容积比率。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial u_i} \left[\eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_k \quad (1-10)$$

式中, u_k 、 u_i 分别为速度分量; p 为压力; ρ 为密度; η 为黏性函数; x_i 、 x_k 分别为坐标。

质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1-11)$$