

低密度钻井流体技术

张振华 鄢捷年 樊世忠 编著

石油大学出版社

低密度钻井流体技术

张振华 鄢捷年 樊世忠 编著

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

低密度钻井流体技术/张振华等编著. - 东营:石油大学出版社,2003

ISBN 7-5636-1882-1

I.低… II.张… III.流体力学-应用-油气钻井 IV.TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 113533 号

书 名:低密度钻井流体技术

作 者:张振华 鄢捷年 樊世忠

责任编辑:陆丽凤(电话 0546-8395938)

出 版 者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://suncetr.hdpu.edu.cn>

电子信箱: cbs@mail.hdpu.edu.cn

印 刷 者:东营市新华印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本:140×202 印张:10.875 字数:283 千字

版 次:2004 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1—1200 册

定 价:20.00 元

内 容 简 介

本书较全面地阐述了低密度钻井流体技术涉及的基本原理和技术要点,并尽力反映近年来国内外在低密度钻井流体领域的研究成果和技术进展。主要内容有:低密度钻井流体技术的选择和技术要点、空气、天然气和雾化钻井液技术、泡沫钻井液技术、可循环微泡沫钻井液技术、充气钻井液技术、水包油钻井液技术、使用密度减轻材料的低密度钻井液技术、油基与合成基钻井液技术、无固相清洁盐水钻井完井液技术以及无膨润土低固相聚合物钻井液技术等。

本书对从事低压钻井的现场技术人员、管理人员和有关科研院校的研究人员具有一定的参考价值。



前 言

20世纪90年代以来,随着欠平衡钻井技术在世界范围内复杂中小油气田、断块油气田、薄油层、低压低渗低产能油田、稠油和超稠油油气藏以及老油田的技术挖潜中的大规模应用,欠平衡钻井技术成为了继水平井技术之后的另一大发展方向,低密度钻井流体技术也随之迅速发展,取得了突飞猛进的发展,已经成为低压钻井和欠平衡钻井的核心技术之一,在油气田的高效开发中发挥着越来越重要的作用。

本书结合近年来国内外在低压钻井和欠平衡钻井方面的实践,对低密度钻井流体技术进行了较为详细的介绍和分析。该书内容涉及低密度钻井流体的概念、类型、技术要点、井筒中多相流的计算以及实际的操作事例等诸多方面,突出了理论性和实用性相结合的特点,目的在于推动该技术的进一步发展和运用。

本书由长期从事该领域研究的三位作者编著完成。其中第一章、第二章、第四章、第五章、第六章、第七章、第九章和第十章由张振华执笔,第三章由樊世忠执笔,第八章由鄢捷年执笔,全书由张振华负责统稿。在本书的编著过程中,辽河石油勘探局工程技术研究院刘乃震院长提供了大量的技术资料和技术指导,参与编写工作的还有辽河工程院科技科的沈桂莲、张小波、刘宏丽和蔡久双,油田化学所的孙延德、关键和崔晓艳,钻井所欠平衡项目组的孟祥奎、陈思路,同时大庆石油学院石油工程系的韩洪升教授、孙玉学教授以及侯汉昭高级工程师对本书的编写工作给予了大力的协助,在此一并表示感谢。

低密度钻井流体技术还在深入发展,本书的出版旨在起到抛

砖引玉的作用。由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 6 月



目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 低密度钻井流体技术发展趋势简述	1
§ 1.2 低密度钻井流体的性能要求	2
§ 1.3 低密度钻井流体的分类	4
§ 1.4 低密度钻井流体选择过程中应注意的问题	8
第二章 空气、天然气和雾化钻井液技术	13
§ 2.1 概述	13
§ 2.2 空气、天然气和雾化钻井的定义及优缺点	14
§ 2.3 空气、天然气和雾化钻井工艺及装备	15
§ 2.4 与空气、天然气和雾化钻井有关的理论问题	20
§ 2.5 空气、天然气和雾化钻井的现场应用	27
第三章 泡沫流体钻井技术	42
§ 3.1 泡沫流体的作用和优点	42
§ 3.2 泡沫流体的组成	44
§ 3.3 泡沫流体的性能	54
§ 3.4 泡沫流体的稳定机理	64
§ 3.5 泡沫流体技术	87
§ 3.6 泡沫流体装备及现场应用	94
第四章 可循环微泡沫钻井液技术	102
§ 4.1 概述	102
§ 4.2 微泡沫发泡剂发泡机理及性能研究	103
§ 4.3 稳泡机理及稳泡剂研究	110
§ 4.4 可循环微泡沫钻井液体系研究	124
§ 4.5 微泡沫钻井液保护储层的效果分析	129

§ 4.6	高温高压下微泡沫钻井液管路流动试验研究	130
§ 4.7	微泡沫钻井液高温高压流变性试验研究	145
§ 4.8	微泡沫钻井液现场的初步应用	158
第五章	充气钻井液技术	168
§ 5.1	充气钻井液的定义及使用范围	168
§ 5.2	充气钻井液的组成、性能及气体注入方式	169
§ 5.3	充气钻井液常用设备及工艺	173
§ 5.4	充气钻井液的有关计算	175
§ 5.5	充气钻井液的现场应用	185
第六章	水包油钻井液技术	191
§ 6.1	概念及基本性质	191
§ 6.2	配方及性能	192
§ 6.3	水包油负压钻井过程中井底压力的计算方法	195
§ 6.4	水包油钻井液的现场应用	207
第七章	使用密度减轻材料的低密度钻井液技术	213
§ 7.1	概述	213
§ 7.2	空心玻璃微珠的物理性能	214
§ 7.3	空心玻璃微珠钻井液性能	215
第八章	油基与合成基钻井液技术	220
§ 8.1	全油基钻井液	222
§ 8.2	油包水乳化钻井液的组成与性能	233
§ 8.3	活度平衡的油包水乳化钻井液	268
§ 8.4	低毒油包水乳化钻井液	279
§ 8.5	合成基钻井液	293
第九章	无固相清洁盐水钻井完井液技术	307
§ 9.1	基本原理	307
§ 9.2	优缺点及适用地层	308
§ 9.3	盐水浓度与密度之间的关系	308



§ 9.4 温度和压力对清洁盐水钻井完井液性能的影响	317
§ 9.5 几种常用低密度无固相清洁盐水钻井液的配制	320
第十章 无膨润土低固相聚合物钻井液技术	325
§ 10.1 概述	325
§ 10.2 体系类型	326
§ 10.3 新型无膨润土聚合物钻井完井液体系介绍	328
参考文献	334



第一章 绪 论

§ 1.1 低密度钻井流体技术发展趋势简述

20 世纪 90 年代以来,由于世界范围内油气田的勘探开发从整装大油田、高压和常规压力、中高渗透均质砂岩油气藏等良好的勘探开发条件,转移到了复杂中小油气田、断块油气田、薄油层、低压低渗低产能油田、稠油和超稠油油气藏等条件恶劣的勘探开发条件,同时由于老油田的长期高效开发,地层压力逐渐降低,这种形势迫使石油工作者采用新的思路和技术,低压低密度钻井流体技术就是在这种形势下大规模开展起来的,并取得了突飞猛进的发展,尤其是欠平衡钻井技术,成为继水平井技术之后的另一大发展方向。由于其明显的技术优势,比如机械钻速比常规过平衡钻井提高一倍以上,全世界对这种新技术的兴趣空前高涨,加上不断完善的配套设备和技术,比如井口旋转控制系统、高压注气系统、地面分离系统、监测仪表系统以及相应的软件技术,使得欠平衡钻井技术在美国、加拿大和欧洲被广泛应用。随着欠平衡钻井技术的深入发展,相应的低密度钻井流体技术也取得了迅速的发展,已经成为低压钻井的核心技术之一。

加拿大使用低密度钻井流体及欠平衡钻井工艺主要用于加拿大西部碳酸盐岩油气藏以及裂缝性油气藏。1994 年和 1995 年,加拿大用欠平衡钻井技术打井 230 口和 330 口。1996 年约 425 口,1997 年约 525 口,1998 年约 1 500 口。在加拿大,欠平衡钻井技术可比普通钻井技术的钻速提高 2~6 倍,与常规水平井方法相比,运用欠平衡钻井技术完成的水平井的产量可提高 7~10 倍,油层

渗透率可提高 5 倍,无表皮损害,对气井效果尤为显著。目前,加拿大已经开展了 500 多口井的充气钻井试验,其中大多数采用注氮气方式完成。美国使用低密度钻井流体和欠平衡钻井技术主要用于得克萨斯州和路易斯安那州的奥斯汀白垩岩层的油气开发及美国的煤层气开发中。2002 年,美国使用低密度钻井流体进行欠平衡钻井的数量占美国国内年钻井总数的 20% 以上,预计到 2005 年这个比例还将上升到 37%。

随着塔里木油田解放 128 井和轮古系列井欠平衡钻井的成功应用,国内低压钻井技术进入了一个新的阶段。解放 128 井发现了 $1\,500\text{ m}^2$ 古潜山油藏,取得了高效益的开发油气田;千米桥板深 7 号、板深 8 号和板深 701 号等井由于采用了欠平衡钻井技术,原油产量达 $800 \sim 1\,000\text{ t/d}$,获高产凝析油气流。2003 年,辽河油田在辽河西部凹陷古潜山马古 1 井,采用密度为 1.03 g/cm^3 的无固相低密度钻井液进行欠平衡钻井,取得了辽河盆地深层勘探的历史性突破。

国内外低压钻井及欠平衡钻井的成功实践证明,在未来的钻井技术发展中,欠平衡钻井技术将同水平井、分支井和连续油管钻井一样,成为各油田钻井技术发展的一个重要方面,尤其是针对油气田开发后期的低压低渗透油气藏而言,它是保护油气层、提高采收率、克服各种钻井复杂问题的重要技术措施。而低压钻井及欠平衡钻井的核心技术之一就是低密度钻井流体技术。

§ 1.2 低密度钻井流体的性能要求

低密度钻井流体往往使用在低压油气藏中,是与油气藏接触的第一种工作流体。钻开油气层的优质低密度钻井完井流体不仅要在组成和性能上满足地质和钻井工程的需要,而且还必须满足保护低压油气藏的基本要求。



Allen 和 Roberts^[1]对打开油气藏的低密度钻井完井流体提出了如下要求:

(1) 钻井完井液的粘度能够控制,以便能以理想的流速携带井下的固相颗粒(钻屑和砂子等)到地面。同时钻井完井液在井下静止时,需要钻井完井液对固相颗粒有长时间的悬浮能力。

(2) 必须减少流体的滤失量。在传统的操作过程中,滤失量是通过加入降滤失剂来控制的。但在欠平衡钻井过程中,井底处于负压状态是减少液体滤失的主要机理。

(3) 低密度钻井流体的组成以及油井控制系统必须能够控制或调节井下压力。钻井完井液密度的调整与地层压力、钻井风险和经济因素有关(比如地层压力不是很高,地层水就应该是完井液的主要组分,因为高密度的无机盐非常昂贵)。即使是在欠平衡的状态下,通过添加加重材料(同时加入增粘剂和悬浮剂)来提高液体密度也是可取的。在传统的操作中,如果地层压力低于清水和油的压力梯度时,就必须使用暂堵剂和降滤失剂去封堵漏失层。而在欠平衡钻井过程中,应该使用性能理想的钻井完井液,使钻井完井液的当量密度低于地层压力,这样流体漏失就可以避免了。钻井完井液应尽量保持无固相,以避免产层和射孔孔眼堵塞。

(4) 使井下工具能有效地工作。这个要求包括所有井下的操作过程(欠平衡或者其他操作过程)。

(5) 减小产层伤害,并且保持裸露井眼的稳定性。低密度钻井完井液应具有化学稳定性,对钻具没有腐蚀性,或者具有适当的缓蚀能力(比如能减少与管路中自由氧的相互作用,能将溶液中的铁离子进行螯合并且不产生沉淀),能抑制细菌的生长,在高温下具有稳定性。不管是在欠平衡阶段,还是在过平衡阶段,低密度钻井完井液不能与地层中的固相颗粒和地层流体发生反应,并且在井下高速剪切和重复使用的情况下保持钻井完井液性能的稳定。

(6) 钻井完井液必须是无毒的。

(7) 地面上搅拌、储存、油井控制和固相控制处理设备必须是安全的、可靠的和经过测试的。

(8) 钻井完井液体系的成本必须是可接受的。

§ 1.3 低密度钻井流体的分类

美国钻井承包商协会(IADC)把低密度钻井流体分为四类:

(1) 干空气钻井流体,即用干空气或天然气作为钻井流体介质。应用这类流体的关键因素是保证必要的环空流速,使钻屑完全被从井底携带到地面。

(2) 雾状钻井流体,即少量液体分散在空气介质中形成雾状流体。

(3) 稳定泡沫,这是气体介质分散在液体中,并配以发泡剂、稳定剂或粘土形成的分散体系。其携带岩屑能力较强。

(4) 充气钻井流体,即气体分散在钻井液中形成的钻井流体。使用这种流体的目的是为了控制较低的流体密度,适应低压低渗油气层及易漏地层。

随着低密度钻井流体技术的深入发展,上述分类已不能满足低压钻井的实际需要。根据地层类型和地层孔隙压力系数的不同,出现了更多的低密度钻井流体体系。按照密度由低到高的顺序,大致归纳起来有以下几类:① 空气/天然气钻井流体;② 雾状钻井流体;③ 一次性泡沫钻井流体;④ 可循环泡沫或微泡沫钻井流体;⑤ 充气钻井流体;⑥ 原油、柴油或油包水、水包油钻井流体体系;⑦ 加有新型降密度剂的钻井流体;⑧ 各种无固相和低固相的钻井流体等。

由于欠平衡状态可以由自然方式或人工诱导方式产生,因此可根据不同的钻井方式选择相应的低密度钻井流体。自然方式根据地层孔隙压力而定,当孔隙压力系数小于 1.0 时用气体型钻井



流体,当地层孔隙压力系数大于 1.0 时用水基或油基型钻井流体,保持液柱有效压力小于所钻地层孔隙压力,使井底压力处于欠平衡状态。此时往往形成边喷(原油或天然气)边钻。当发生严重漏失时,采用泥浆帽钻进,即在环空保持超平衡钻井,经过钻柱注入低密度钻井液。人工诱导方式是在钻井过程中,通过向钻井液中加入密度降低剂(包括氮气、空气、天然气、油料及空心玻璃微珠等)使井底压力处于欠平衡状态,也可直接应用各种低密度流体。国内应用实例有在新疆局 GD1154、GD1179、G2068 等井完成的欠平衡钻井试验,在 3 200~3 875 m 井段实现边喷边钻,钻井液密度比当量地层压力低 0.192 g/cm^3 ,原油产量大幅度提高;塔里木解放 128 井 5 568.07~5 750.30 m 的水平井段在地层压力系数为 1.076 的条件下采用低密度钻井液钻进,后发生漏失,在环空中加入密度为 1.25 g/cm^3 的加重钻井液,采取泥浆帽钻进,钻井液有进无出,最后该井获得了日产 168 t 原油及 $108 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气的高产。

Millhone, R.S. 对常用的低密度钻井流体的使用范围及基本性能进行了分类^[2],见表 1-1。

常规无固相或低固相钻井液体系具有一定的优点,如具有较强的抑制性、流变性和较好的携屑能力。但这些钻井液体系需要充气来降低液柱压力实现低压或欠平衡钻进时,含有气体的钻井液的高粘度将导致很高的循环压耗,这就难以维持实施井眼清洁所需要的紊流和欠平衡条件,降低了常规气液分离器和固控设备的使用效率。

在一些孔隙压力比较合适的地层实施欠平衡钻井作业时,可以使用油包水或水包油低密度钻井流体,但使用这种钻井流体的缺点是在有气体侵入后钻井液粘度较高,脱气效果会受到影响。

在人工诱导的欠平衡钻井作业中,在水、油或油基钻井液中充气得到了广泛应用。用水(或清洁盐水)、原油或柴油作为基液进

行充气时,这些液体的粘度较小,但当这些基液与足量的气混合后

表 1-1 低密度钻井流体的使用范围及基本性能

完井液 体系	密度范围		使用温度范围		稳定性 (静态)	与粘土 反应	固相 含量	腐蚀性
	lb/gal	g/cm ³	°F	°C				
气 体 类								
空气/天 然 气	0~0.17	0~0.02a	全部	全部	无限	—	—	很小
雾	0~0.58	0~0.07 a	32~212	0~100 a	无	很小	很小	有
泡 沫	0~5.00	0~0.6 a	32~212	0~100 a	有限	很小	—	有
甲 醇	6.6	0.8	-146~148	-97~64	无限	很小	—	有
油 类								
柴 油	7.03	0.84	-12~660	10~350	好	—	—	—
原 油	7~8	0.84~0.96	—	—	好	—	—	—
乳化油	7~8.3	0.84~1	—	—	较好	很小	—	很小
加重油	7~17	0.84~2	—	—	可变	—	b	—
加重 乳化油	8.3~17	1~2	—	—	好	很小	b	很小
水 基 类								
清洁水	8.3	1.0	32~212	0~100	无限	0~极大	—	有
盐 水	8.5	1.02	32~212	0~100	好	0~极大	—	很小
无 机 盐 类								
KCl	8.3~9.8	1~1.18	-29 c	-20 c	很好	0~很小	—	很小
NaCl	8.3~10.0	1~1.2	-29 c	-20 c	很好	0~最大	—	很小
CaCl ₂	8.3~11.6	1~1.4	-51 c	-60 c	很好	0~很小	—	很小
CaBr ₂	8.3~15.2	1~1.18	-12 c	10 c	很好	0~很小	—	中等
ZnBr ₂	8.3~19.2	1~2.3	-40 c	-40 c	很好	0~中等	—	最大



续表

完井液 体系	密度范围		使用温度范围		稳定性 (静态)	与粘土 反应	固相 含量	腐蚀性
	lb/gal	g/cm ³	°F	°C				
加重水/盐类								
食 盐	8.3~15	1~1.8	见盐水数据		短~很长	0~最大	d	很小
碳酸盐	8.3~17	1~2.0	见盐水数据		短~很长	可变	b	可变
备注: a—对压力敏感(压力增加密度增加,对雾和泡沫的上限温度也一样); b—方解石、菱铁矿(有分级,能酸溶); c—上限对压力和组成很敏感; d—NaCl(有分级,能水溶)。								

具有较好的井眼清洁和携岩能力,由于其粘度较低,所以气液分离和控制固相较为容易。

在一些地层孔隙压力较低的情况下,可使用雾化实施欠平衡钻井作业,雾也可以对钻头和井下马达总成进行润滑。

纯空气、氮气或天然气也可用做欠平衡钻井的循环介质,使用这些介质可达到最低密度。

泡沫钻井液也是应用较广泛的欠平衡钻井液,其原因是泡沫能够实现较低的密度,从而实现较低的井底压力。泡沫钻井液包括一次性泡沫钻井液,另一种是可循环微泡沫钻井液。

加入低密度固体添加剂的钻井流体,这种低密度固体添加剂主要是指空心玻璃球(或者是塑料小球)。空心玻璃球的密度为 0.7 g/cm^3 ,而微型空心玻璃球的密度为 0.38 g/cm^3 ,抗破坏压力为 $20.7 \sim 27.6 \text{ MPa}$ 。在密度为 1.054 g/cm^3 的钻井液中加入 50% 的空心玻璃球,可使其密度降低到 0.7188 g/cm^3 ;当空心玻璃球的加量控制在 $35\% \sim 40\%$ 时,钻井液的密度可控制在 $0.78 \sim 0.82 \text{ g/cm}^3$ 之间。但空心玻璃球钻井液的成本要比普通钻井液高。

表 1-2 列出了 Sigma 工程公司提供的地层压力系数与优化钻

井液类型关系表。

表 1-2 根据地层压力系数优选钻井液类型对比表

地层压力系数	优化钻井液类型	地层压力系数	优化钻井液类型
0~0.02	空气/天然气/氮气	0.9~1.02	油或油基钻井液
0.02~0.07	雾化钻井液	1.0~1.3	水(盐水)
0.07~0.60	泡沫钻井液	1.3 以上	常规水基钻井液
0.60~0.90	充气钻井液		

§ 1.4 低密度钻井流体选择过程中 应注意的问题

在根据地层压力系数优选低密度钻井流体的过程中,要充分了解储层的特点和钻井情况,主要有以下几点:钻井液可实现的最低密度;井眼是否稳定;钻进的水平井段是否有水层;钻进地层是否存在多套压力系统和多种渗透性地层;地层属于哪种损害类型,是由于滤液与地层流体不配伍,还是滤液与地层岩石发生化学反应从而发生损害;地层中是否存在酸气;井眼几何形状的特点是否适合欠平衡钻井;适合的设备及消耗产品,包括作为钻井流体的液体和气体。

1. 钻井液可实现的最低密度

对于开发井特定的储层,其孔隙压力基本是已知的,所以在实施低压钻井或欠平衡钻井过程中欠压值确定的情况下,所需要的钻井液密度就确定了。而对于探井实施欠平衡,由于目前还没有一种能准确预测地层孔隙压力的方法,其给出的地层孔隙压力只是个参考值,而欠平衡钻井的核心就是钻井液的液柱压力要低于地层的孔隙压力,这就要求选择的欠平衡钻井液体体系的密度在一定的范围内可调,特别是可实现的最低密度要比给出的地层孔隙