

泡沫循环钻井 理论与实践

万里平 孟英峰 王存新 魏 纳 © 著

PAOMO XUNHUAN ZUANJING
LILUN YU SHIJIAN

石油工业出版社

泡沫循环钻井理论与实践

万里平 孟英峰 王存新 魏 纳 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在概述泡沫流体理论与泡沫循环方法基础上,详细阐述了物理法、机械法及化学法三种消泡方法的室内研究结果与循环机理,其中重点介绍了十二烷基苯磺酸钠无机盐循环泡沫法、低分子醇类循环泡沫法、油酸泡沫循环法和调节两性表面活性剂 pH 值循环泡沫法等四种化学消泡方法;同时介绍了可循环防塌泡沫钻井液的室内研究成果;最后实例介绍可循环微泡沫钻井液与普通可循环泡沫钻井液在油田的应用情况。

本书可供从事石油钻井、完井及油田开发方面的工程技术人员使用,也可作为石油大专院校相关专业的本科生、研究生和教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫循环钻井理论与实践/万里平等著.

北京:石油工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-5183-1077-7

I. 泡…

II. 万…

III. 泡沫钻井-油气钻井

IV. TE242.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 314879 号

出版发行:石油工业出版社

(北京朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523535 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12

字数:290 千字

定价:75.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

泡沫钻井技术起源于20世纪50年代中期的美国。在国内新疆石油管理局首先开展了泡沫钻井技术的研究与应用,于1984年在克拉玛依油田红-29井成功地进行我国第一口泡沫钻井,现场应用取得明显效果,随后四川、华北、辽河、长庆、胜利、青海、滇黔桂等其他油田都先后进行了泡沫钻井、泡沫洗井、泡沫水泥固井和泡沫修井,在研究和应用泡沫流体技术方面取得一定成果,并积累了丰富的经验。然而在常规的泡沫钻井过程中,从井口返出的泡沫具有黏度高、体积大、含气量大的特点,若不经机械或化学处理,井口返出的泡沫无法再次利用,不仅浪费原材料,而且污染环境。因此,从经济和环保角度出发,开展泡沫流体的循环利用显得尤为重要。

本书是在国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“先进钻井技术与装备”的子课题“全过程欠平衡钻井技术”(编号:2006AA06A104)研究成果基础上总结编写而成,并加入了笔者近几年的最新研究成果。内容涉及机械消泡、无机盐法循环泡沫、低分子醇类循环泡沫、油酸泡沫循环利用、两性表面活性剂HA-1的合成及其循环泡沫研究、可循环防塌泡沫钻井液研制、微泡沫钻井液和常规泡沫钻井液循环利用实例。不仅有实验研究和理论分析,而且有详细的实例介绍。是“中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室——欠平衡研究室”课题组近年来在泡沫钻井方面研究成果的总结。

全书共分9章,第1章为泡沫钻井与泡沫循环概述,第2章介绍机械消泡实验研究结果,第3章介绍了无机盐循环泡沫室内研究结果,第4章为低分子醇类循环泡沫研究,第5章讲述油酸泡沫循环实验,第6章为两性表面活性剂的合成及泡沫循环实验研究,第7章为可循环防塌泡沫钻井液研究及性能评价,第8章介绍了可循环微泡沫钻井液,第9章介绍了国内外泡沫流体循环利用实例。

在本书的编写过程中,课题组陈浩教授、李永杰副教授、李皋研究员、邓虎高级工程师提出了许多改进意见,同时还参考和引用了国内外一些油田的科研成果和实验数据。除本书后面所列的参考文献外,可能还有部分遗漏,不便一一列举,在此对这些科研人员表示感谢!此外,课题组的许多研究生也参与了本书的部分文字编辑工作!

为照顾各章节的独立性和相互连贯性,不同章节有些个别概念和内容作了必要的重复。限于篇幅,有些内容涉及的技术细节可能不够全面,读者可参考本书所列的参考文献。

由于水平有限,缺点和不足在所难免,望广大读者提出宝贵意见,便于日后改进。

2015年9月

目 录

第1章 泡沫钻井与泡沫循环概述	(1)
1.1 泡沫的组成与分类	(1)
1.2 泡沫形态与结构	(5)
1.3 泡沫流体的几个重要参数	(6)
1.4 泡沫流体性能测试方法	(9)
1.5 泡沫流体在油田的应用	(13)
1.6 泡沫流体稳定影响因素	(15)
1.7 泡沫流体消泡方法	(21)
第2章 机械消泡	(32)
2.1 机械消泡装置	(32)
2.2 机械消泡实验	(35)
2.3 本章小结	(42)
第3章 无机盐循环泡沫室内研究	(43)
3.1 循环原理	(43)
3.2 Waring - Blender 法循环实验	(44)
3.3 API 装置实验	(50)
第4章 低分子醇类循环泡沫研究	(54)
4.1 醇的一般性质	(54)
4.2 实验药品	(57)
4.3 泡沫的配制及性能	(58)
4.4 低分子醇类抑泡和消泡性能评价	(61)
4.5 循环实验	(66)
4.6 醇类与其他发泡剂的循环性能研究	(76)
4.7 磷酸三丁酯循环泡沫能力实验	(77)
4.8 异戊醇乳化实验	(81)
4.9 泡沫循环台架实验	(83)
4.10 醇类循环机理	(84)
第5章 油酸泡沫循环实验	(86)
5.1 实验方法及实验药品	(86)
5.2 实验内容	(86)
5.3 实验结果与讨论	(87)

5.4 结论	(92)
第6章 两性表面活性剂的合成及泡沫循环实验研究	(93)
6.1 HA-1 的合成	(94)
6.2 合成产物分析	(95)
6.3 合成条件优化	(97)
6.4 HA-1 结构确定	(99)
6.5 HA-1 表面性质的测定	(101)
6.6 HA-1 发泡性能评价	(104)
6.7 HA-1 泡沫循环实验	(108)
6.8 HA-1 泡沫循环台架实验	(116)
第7章 可循环防塌泡沫钻井液研究及性能评价	(123)
7.1 国内外研究现状	(123)
7.2 泡沫对井壁稳定性影响研究	(124)
7.3 防塌处理剂的研制	(133)
7.4 可循环防塌泡沫钻井液综合性能评价	(144)
7.5 泡沫防塌机理研究	(148)
第8章 可循环微泡沫钻井液	(150)
8.1 微泡沫研究进展	(150)
8.2 微泡沫结构	(153)
8.3 可循环微泡沫钻井液在吐哈油田的应用	(155)
8.4 可循环微泡沫钻井液在伊朗 Babal 探井的应用	(160)
第9章 泡沫流体循环利用实例	(165)
9.1 委内瑞拉西部油田水基泡沫近平衡钻井	(165)
9.2 可循环空气泡沫钻井技术在元坝 10 井的应用	(175)
9.3 可循环空气泡沫钻井技术在高升油田的应用	(179)
参考文献	(182)

第 1 章 泡沫钻井与泡沫循环概述

泡沫钻井是指钻井时将大量的气体(如空气、氮气、天然气、柴油机尾气等)分散在含少量发泡剂的液体中作为循环介质的钻井工艺。液体是连续相(分散介质),气体是非连续相(分散相)。泡沫的分散程度较低,属于粗分散体系,通常气泡直径大于 10^{-7}m ,用显微镜或肉眼就能分辨出气泡的大小。

1.1 泡沫的组成与分类

通常将地面添加有表面活性剂而未充气发泡的泡沫流体称为泡沫基液,而将充气后体积扩大数倍直至数百倍的泡沫流体称为泡沫或泡沫液或泡沫流体。组成泡沫的主要成分包括气相、液相、发泡剂、稳泡剂及其他添加剂。

1.1.1 气相

气相有空气、氮气、天然气以及二氧化碳等,相应的泡沫称为空气泡沫、氮气泡沫、天然气泡沫和二氧化碳泡沫,根据情况选用。气体都是由高压设备强行注入,气液体积比(标准状态下)在(100~200):1的范围。由于空气和天然气存在易燃、易爆等不安全因素,故一般采用氮气或二氧化碳作为气相。

1.1.2 液相

钻井泡沫用得最广泛的液相是水(包括淡水、地层水或盐水),称之为水基泡沫。除水以外,理论上醇、烃等在一些特定条件下也可用作配制泡沫的液相,但工程实际中应用较少。随着我国页岩气勘探开发力度的加大,油基钻井液和油基泡沫的应用越来越多。

1.1.3 发泡剂

在液相中加入少量的发泡剂,经高速搅拌或采用发泡装置与气体混合即能形成泡沫。发泡剂从原理上就是能降低气相和液相界面张力的表面活性剂。这种表面活性剂的分子一般由两个极性端组成,一端是亲气相结构,而另一端则是亲液相结构,所以在气、液界面上表面张力将大大降低,使气、液相容,从而形成稳定的泡沫,如图 1.1 和图 1.2 所示。

发泡剂是泡沫钻井的关键,好的发泡剂必须具有如下特点:

- (1) 发泡性能好,发泡量大,基液与气体接触后可产生大量泡沫;
- (2) 泡沫稳定性强,能在长时间的循环和高温条件下性能稳定;
- (3) 抗污染能力强,与地层流体及入井液配伍性好,遇到原油、盐水、碳酸盐及各种化学剂,也能保持其稳定性,在井下不发生各种化学沉淀等伤害油气层的情况;
- (4) 凝固点低,具有生物降解能力,毒性小;
- (5) 配制泡沫基液用量少,来源广,成本低;
- (6) 发泡剂亲油亲水平衡值(*HLB*)在 9~15 范围内。

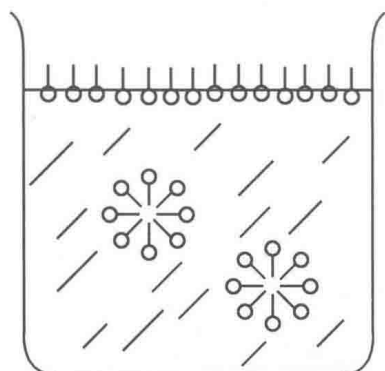


图 1.1 表面活性剂分子在气、液界面的排列

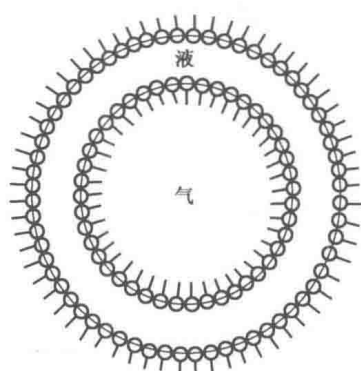


图 1.2 表面活性剂形成的泡沫示意图

发泡剂的品种较多,按其分子结构,常分为阴离子表面活性剂、阳离子表面活性剂、非离子表面活性剂和两性表面活性剂。其中阴离子表面活性剂在发泡剂中最为常见,虽然起泡能力强,但易于与地层水中的一些阳离子(如 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等)反应产生沉淀,使其失去表面活性。阳离子表面活性剂性能较好,特别是抗矿化度的能力较强,但因其价格高,在应用上受到限制。非离子表面活性剂来源方便,性能稳定,应用很广泛,但就发泡能力而言往往比离子型表面活性剂差。两性表面活性剂的发泡能力相对较低,属于次发泡剂。油田常用的几种发泡剂性能见表 1.1。

表 1.1 国内常用几种发泡剂

类别	代号	名称	物理性质
阴离子型	ABS	烷基苯磺酸钠	白色或浅黄色粉状固体,溶于水成半透明液体,对碱、稀酸和硬水都较稳定,溶液表面张力低,泡沫丰富,去污力强
	K 12	十二烷基硫酸钠、十二醇硫酸钠	白色或浅黄色固体,溶于水成半透明液体,对碱、稀酸和硬水都很稳定,发泡能力强,去污力强,有乳化能力
	AES	脂肪醇醚硫酸钠	具有良好的生物降解性、去污力、起泡力及乳化等性能,并抗硬水
	F842	椰子油单乙醇酰胺磺化琥珀酸酯二钠盐	能溶于水,泡沫丰富稳定,耐硬水,有一定的洗净能力,抗原油、抗盐的能力强
	F873	F842 和脂肪醇醚磺化琥珀酸酯二钠盐的混合物	性能同 F842,且其耐温达 150°C ,优于美国同类产品(Adofoam)
非离子型	OP-10	烷基酚聚氧乙烯醚	溶于水的化合物,润湿性、去污能力都好,乳化性及起泡性较好。OP 系列主要型号有 OP-4,OP-7,OP-10,OP-15,OP-20 等,其中 OP-10 最常见
	OA-12 (或 OB-2)	十二烷基二甲基氧化胺	溶于水,泡沫稳定,具有抗静电效果,增稠、增溶效果好
阳离子型	TA-40	脂肪醚三乙醇胺盐	极易溶于水,泡沫丰富,去污力强,乳化、润湿、分散力好
	ABS 三乙	烷基苯磺酸盐三乙醇胺盐	溶于水,泡沫丰富,去污力、分散、乳化性能好
两性型	BS-12	十二烷基二甲基甜菜碱	易溶于水,泡沫丰富,去污力强,有乳化、分散、润湿性能

1.1.4 稳泡剂

使用单一的表面活性剂,即使其发泡性能较好,但半衰期一般都很短,而且温度对泡沫影响较大,一般情况下,泡沫的稳定性随温度的升高而下降。为了提高泡沫的耐温能力,延长泡沫的寿命,需要向泡沫基液中添加稳泡剂。稳泡剂是以延长泡沫稳定性为目的而加入的添加剂。稳泡剂按照作用方式可分为两类:第一类是增加表面黏度和表面弹性的物质。这类稳泡剂主要是一些小分子的极性有机物,它们的稳泡作用主要决定于极性基的种类。一般极性基稳定泡沫的顺序为:

N-极性取代酰胺 > 酰胺 > 硫酰胺 > 甘油醚 > 伯醇

这类稳泡剂包括:十二烷基二甲基氧化胺、烷基醇酰胺等非离子表面活性剂,脂肪醇和脂肪酸类稳泡剂。另一类稳泡剂是增加溶液黏度的水溶性高分子物质,例如羧甲基纤维素钠(CMC)、聚丙烯酰胺(PAM)、生物聚合物(XC)、羟乙基纤维素(HEC)、部分水解聚丙烯酰胺(PHP)、FA367等,其主要作用是增加泡沫液膜的黏滞性,降低泡沫液膜的排液速度,延长液膜的持续时间。

1.1.5 其他添加剂

根据现场实际情况,有时需要向泡沫钻井液中添加其他添加剂,比如流型调节剂、降滤失剂、缓蚀剂等。

用于钻井行业的泡沫流体,按照现场施工作业的要求不同可分为以下3种:不稳定泡沫、稳定泡沫和硬胶泡沫,其中尤以稳定泡沫和硬胶泡沫应用较多。不同的泡沫流体类型其组成也有所差异。

(1)不稳定泡沫。主要由气相、液相(主要为清水)和发泡剂组成,主要用于雾化钻井的雾化基液配制,在泡沫钻井中应用较少。

(2)稳定泡沫。稳定泡沫对低压、易渗漏的地层特别有效,是目前广泛应用的一种气体型钻井流体,主要成分为气相、液相、发泡剂和稳泡剂。胜利油田钻井工艺研究院研制的稳定泡沫配方为:清水+4% AC-2(发泡剂)+1% YJB-1(井壁稳定保护剂)+(2%~4%) WP-1或 WP-2(稳泡剂),该体系的抗温达180℃,抗油30%以上。该钻井液在盐227-1HF水平井进行首次应用。在钻井过程中,根据泡沫基液的消耗情况适时补充泡沫基液,根据全烃值、返砂情况、井口泡沫返出状态及小型实验结果,适时补充各种药剂,使之能满足可持续性、携岩、携油的要求。

(3)硬胶泡沫。如果用膨润土基液加气相、发泡剂和稳泡剂,便形成了硬胶泡沫,其稳定性会进一步加强。由于硬胶泡沫的黏度和切力较高,在较低返速下可保证对井眼的有效清洗,因此比稳定泡沫具有更高的携岩能力,一般适用于钻较大尺寸井眼和易坍塌地层。使用硬胶泡沫钻井时,有时会遇到水侵、气侵等复杂情况。一旦发生这种情况应立即停钻并对泡沫性能进行调整,通过增大液相注入速度来重新建立泡沫的良好循环。新疆油田自制硬胶泡沫(配方为:2%膨润土+3% TSB+0.3%增黏剂+0.5%稳泡剂,TSB为自制发泡剂)在BJ7168井和白22井进行了应用。现场应用结果表明,硬胶泡沫钻井液的发泡量大、稳定时间长、抗污染能力强,很好地满足了携岩及井壁稳定的要求。

目前石油行业泡沫流体应用中以稳定泡沫最为广泛,美国 Acti Systems 公司在 20 世纪 90 年代为满足低压、低渗地层钻井需求,开发了可循环微泡沫。这种钻井液在不注入空气和天然气的情况下可产生均匀气泡,将其命名为“Aphron”钻井液。其维护处理与常规的水基钻井液相同,但其密度低于清水。微泡是由多层包裹着气核的独立球体组成的,膜是维持泡沫稳定性的关键因素,泡沫的寿命与泡沫直径的平方成反比。由液膜包裹着的气泡,体积越小,耐压性能越强,越不容易破裂,即稳定性越好。辽河油田微泡沫钻井液配方为:基浆 + 0.3% 发泡剂 MF-1 + 0.03% 稳泡剂 SF-1 + 2% 降滤失剂 SMP-II + 0.05% 增黏剂 80A51 + 0.2% 增黏剂 XC + 1% 降滤失剂 SPNH。综合研究表明,微泡沫钻井液在井深几十米至 100m 范围应用效果最佳,在 500m 以内范围应用仍有一定效果。如果井深超过 500m,应用效果就不明显了。

根据泡沫质量^①可将泡沫分为干泡沫和湿泡沫两大类。干泡沫指含液尽可能少、含气尽可能多的情况,泡沫接近不稳定泡沫,推荐用于地层出水条件下的提速钻井,其井底压力小、钻速快,携岩能力主要靠高返速,岩屑悬浮能力差。对于干泡沫,其含液率一般低于 10%,泡沫呈多面体结构。湿泡沫指含液多、含气少的黏稠稳定泡沫,岩屑悬浮能力好,环空返速低,推荐用于需要液柱压力平衡地层压力的储层欠平衡钻井,或者松散砂岩类的不稳定地层。对于湿泡沫,其含液率一般为 10% ~ 20%,气泡近似于球形。

泡沫看似杂乱无章,而事实上具有相当规则的结构,遵循 Plateau 平衡条件。泡沫中每相邻 4 个气泡形成一组相互作用的基本单元,基本单元中每 3 个气泡围成一个凹三角形柏拉图通道,4 个柏拉图通道组成一个交汇点,每 2 个气泡形成一个液膜。图 1.3 为泡沫基本结构图。

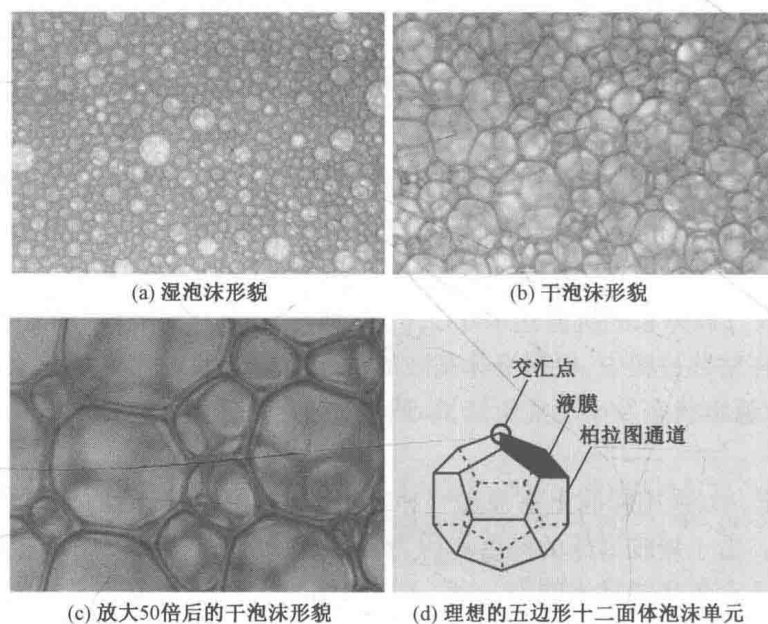


图 1.3 泡沫基本结构

① “泡沫质量”定义参见本书 1.3 节。

1.2 泡沫形态与结构

泡沫结构包括气泡的形状、平均尺寸大小和尺寸分布范围,还包括液体在泡沫中存在的形态与方式。泡沫尺寸大小的变化范围如果很宽(既有大泡沫又有小泡沫),则泡沫不稳定,因为大泡沫的气体会向小泡沫进行扩散。稳定的泡沫是气泡形状、尺寸都很均匀的结构,如图1.4所示。

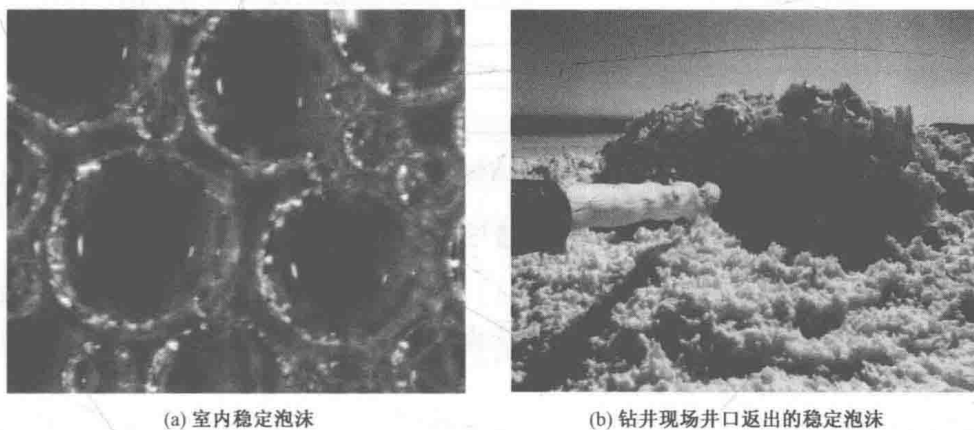


图 1.4 稳定泡沫形态

泡沫质量不同,其结构形态亦不相同,Mitchell 根据泡沫质量的不同将泡沫划分为 4 种类型或 4 个区域,如图 1.5 和图 1.6 所示。

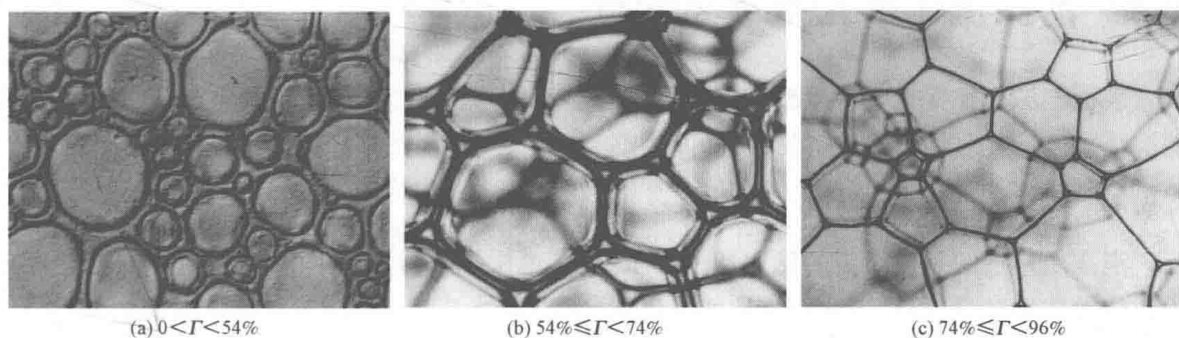


图 1.5 不同质量时泡沫形态

(1) 气泡分散区:当泡沫质量为 $0 \sim 54\%$ 时,称为气泡分散区。此时各气泡为相互分开、互不接触的球形,泡沫未形成彼此相互连接的整体结构,泡沫流体的切力基本上是基液的切力,没有泡沫的结构切力[图 1.5(a)]。此时泡沫流体的有效黏度,一部分是基液黏度,一部分是孤立的球形泡在流动中相互摩擦、碰撞产生的附加黏度,泡沫流体的流型属于牛顿流型。

(2) 气泡干扰区:当泡沫质量为 $54\% \sim 74\%$ 时,称为气泡干扰区。此时球形泡逐渐胀大,相互接触,形成两个气液表面中间夹一个薄液层的结构,整个气泡由球形向空间多面体过渡[图 1.5(b)]。此时泡沫的结构切力、结构黏度迅速增加。

(3) 气泡变形区:当泡沫质量为 $74\% \sim 96\%$ 时,称为气泡变形区。此时泡沫形成理论状态

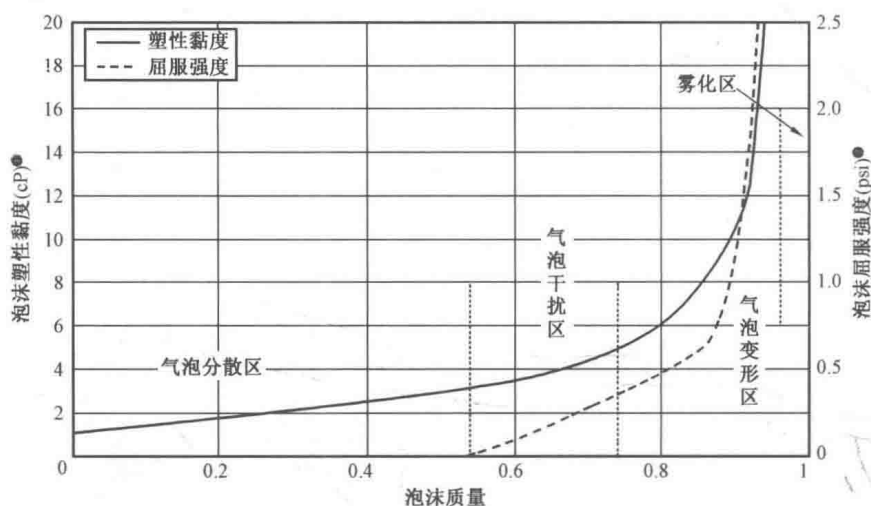


图 1.6 泡沫质量与泡沫流变性关系

为平面 5 边形组成的空间 12 面体, [图 1.5(c)]。接触面处两个气液表面夹的中间液层变薄, 泡沫流体的有效黏度、有效切力最大, 此时泡沫流体属于宾汉流体或带屈服值的假塑性流体, 泡沫的结构黏度达到最大。

(4) 雾化区: 当泡沫质量超过 96% 时, 称为雾化区。此时泡沫液膜变得薄而脆, 总体形成不稳定的“干”泡沫, 甚至破泡成雾。不同泡沫有不同的破泡成雾临界点, 尤其是稳定黏稠泡沫, 有时破泡成雾点泡沫质量高达 99.9%。

1.3 泡沫流体的几个重要参数

表征泡沫流体性能的参数较多, 包括泡沫质量、发泡体积、半衰期以及与泡沫流变性相关的泡沫黏度、密度、切力、滤失量等。

1.3.1 泡沫质量、气液比

泡沫质量指的是在给定的压力和温度条件下, 单位体积的泡沫中所含气体的体积, 即泡沫中气体的体积含量, 以百分比或其比值来度量, 常用符号 Γ 表示。泡沫质量关系式如下:

$$\Gamma = \frac{Q_g}{Q_F} = \frac{Q_g}{Q_g + Q_L} \quad (1.1)$$

式中: Γ 为泡沫质量; Q_g 为泡沫中气体的体积; Q_L 为泡沫中液体的体积; Q_F 为泡沫总体积, 即泡沫中气体体积与液体体积之和。

而泡沫的气液比则是在标准状态 (0℃, 1atm) 单位体积的泡沫中所含气体体积与液体体积之比。

① 1cP = 1mPa · s。

② 1psi = 1lbf/in² = 6.89476 × 10³ Pa。

1.3.2 液体滞留量

与泡沫质量相对应的另一概念是液体滞留量或持液率,指的是在一定温度压力条件下,单位体积泡沫中所含泡沫液体的体积,即泡沫中液体体积含量,常用 H_L 表示。有:

$$H_L = \frac{Q_L}{Q_F} = \frac{Q_L}{Q_g + Q_L} \quad (1.2)$$

显然, $H_L + \Gamma = 1$ 。有时,也称液体滞流量为液体体积分数(Liquid Volume Fraction,简称LVF),二者在概念和数值上是一致的。

1.3.3 发泡体积

泡沫基液的发泡体积可反映发泡剂的发泡能力。发泡体积的大小与发泡剂的性能、浓度、稳泡剂的性能、液相黏度等因素有关。发泡体积常用 Waring Blender 法(或称搅拌法)评价:实验时,在 Waring 搅拌杯(图 1.7)中加入 100mL 泡沫基液,高速($>5000\text{r/min}$)搅拌 60s 后,关闭开关,将产生的泡沫倒入 1000mL 量筒,读取泡沫体积,表示发泡剂的发泡能力。一般水基泡沫的发泡体积都在 500mL 以上。



图 1.7 Waring 搅拌杯

1.3.4 半衰期与排液时间

泡沫的稳定性取决于重力和表面张力作用下液膜内的液体排出和气泡的合并程度,半衰期与排液时间是评价泡沫体系稳定性的两个关键参数。

实验时,在 Waring 搅拌杯中加入 100mL 泡沫基液,高速($>5000\text{r/min}$)搅拌 60s 后,关闭开关,将所有泡沫倒入 1000mL 量筒,开始计时。随时间的推移,液体不断从泡沫中析出,记录从泡沫中排出 50mL 液体所需要的时间即为泡沫半衰期,常用 $t_{1/2}$ 或 $t_{0.5}$ 表示。

排液时间主要反映泡沫初期的排液速率,在一定程度上也反映泡沫体系的稳定性。这需要连续记录排液量与时间的关系,或者用红外线乳化液稳定仪分析。油田钻井现场一般不进行排液时间测定。

对于由大小均匀的气泡组成的稳定泡沫而言,其排液半衰期可表示为:

$$t_{0.5} = \frac{580\mu h}{\rho g d^2 H_L} \quad (1.3)$$

式中: μ 为液体黏度; h 为泡沫柱的最初高度; ρ 为溶液密度; g 为重力加速度; d 为气泡的直径; H_L 为液体体积分数。

1.3.5 泡沫的携岩能力

携岩能力指的是流体在循环过程中把固体颗粒从井底或任何井段带到地面或从地面带到井内任何位置的能力,主要受动切力和黏度的影响。岩屑被泡沫的气泡承托着,并且气泡之间

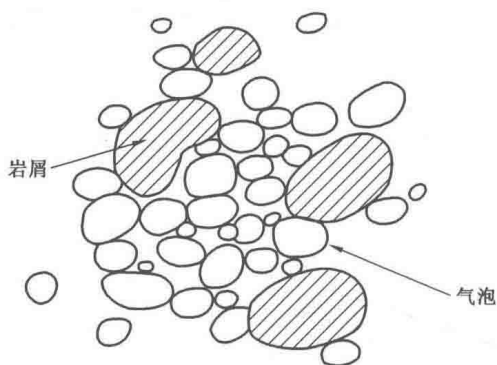


图 1.8 泡沫悬浮岩屑机理示意图

的相互作用夹持着岩屑,只有当岩屑下面的气泡被挤出一条通道或是变形的时候,岩屑才会下沉。岩屑的重量是不足以使气泡变形的,如果有足够的气泡存在,岩屑便不会发生运动,也不至于沉降。气泡不会被岩屑压破,故岩屑就被气泡夹持着而不发生沉降,如图 1.8 所示。

岩屑在液体中的沉降速度公式为:

$$u = \frac{2R}{\eta(\rho_0 - \rho)} \quad (1.4)$$

式中: u 为岩屑在液体中的沉降速度, cm/s ; η 为液体的动力黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ρ_0 为岩屑的相对密度; ρ 为液体的相对密度; R 为岩屑半径, cm 。

由式(1.4)可以看出,假设 ρ_0 、 ρ 和 R 一定,则 η 越大, u 越小,即液体的动力黏度越大,其携岩能力就越好。

清水的黏度为 1cP ,而泡沫的黏度为 $(4 \sim 5) \times 10^2\text{cP}$,因此岩屑在泡沫中的沉降速度要比在清水中的自然沉降小两个数量级。例如,直径 $0.5 \sim 0.8\text{mm}$ ($20 \sim 40$ 目)的岩屑在泡沫质量为 $70\% \sim 80\%$ 泡沫中,沉降速度仅为 $(0.3 \sim 0.6) \times 10^{-5}\text{m/s}$,近似为零。因此一般而言,岩屑在稳定的高质量的泡沫中沉降速度可以忽略不计。由于微细岩屑在稳定的泡沫中基本不沉降,所以泡沫具有良好的携岩性能。

1.3.6 泡沫的密度

泡沫流体是气体和液体混合的多相分散体系,其中液体是连续相,气体是非连续相。在实际钻井作业中,可视泡沫在其稳定时间内,气体间无相对运动,泡沫流体为相对稳定的多相分散体系。泡沫密度($\rho_{\text{泡}}$)取决于基液密度($\rho_{\text{液}}$)、气体密度($\rho_{\text{气}}$)和泡沫质量(Γ),它们之间的关系为:

$$\rho_{\text{泡}} = \rho_{\text{液}}(1 - \Gamma) + \rho_{\text{气}} \Gamma \quad (1.5)$$

由于气体是可以压缩的,因而泡沫的密度与压力和温度有关,即在井筒中,不同井深处的泡沫密度不同。要计算井深 H 处的液柱压力,可进行分段计算后再累加,即将井深 H 等分成 n 段,每一段的长度为 ΔH 。当 ΔH 非常小时,可认为在 ΔH 段内泡沫的密度不变。泡沫钻井时,一般井口有回压,在计算时,要将井口的回压考虑进去,故计算井下液柱压力 p (MPa) 的公式为:

$$p = 9.8 \times 10^{-3} \Delta H \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{\text{液}} + \alpha p_0}{1 + \alpha \left(\frac{p_0}{p_i + p_{\text{回}}} \right) \left(\frac{T_i}{T_0} \right)} \quad (1.6)$$

式中: p_i 和 T_i 分别为第 i 段井深处的绝对压力和温度; $\rho_{\text{液}}$ 为基液密度; α 为气液比; p_0 为标准状况下的压力 (0.1013MPa); T_0 为标准状况下的温度 (273.15K); $p_{\text{回}}$ 为井口回压; ρ_0 为标准状态下气体密度 (空气密度为 0.001293g/cm^3)。

某井泡沫钻井时,泡沫基液排量为 $0.6\text{m}^3/\text{min}$,密度为 1.04g/cm^3 ,标准状况下空气注入量

为 $30\text{m}^3/\text{min}$, 地面温度为 21°C , 地面压力为 0.1MPa , 地温梯度为 $2.6^\circ\text{C}/100\text{m}$, 井口回压为 0.5MPa 。计算出井深与泡沫密度和平均当量密度的关系如图 1.9 所示, 井深与液柱压力的关系如图 1.10 所示。

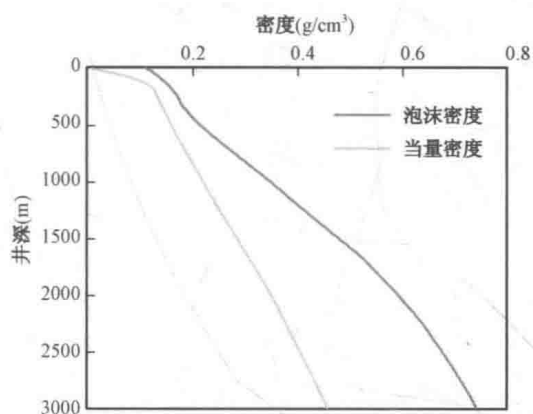


图 1.9 泡沫密度与井深关系

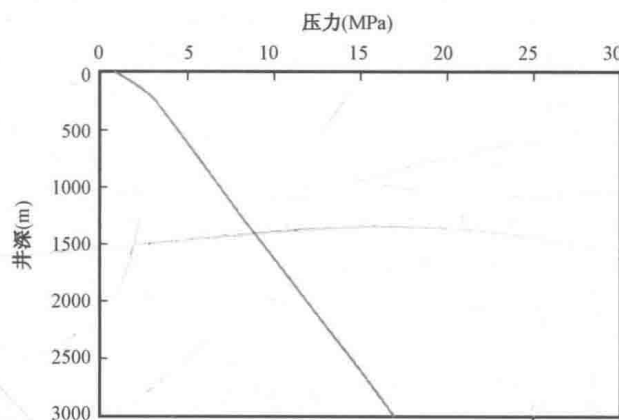


图 1.10 液柱压力与井深关系

1.4 泡沫流体性能测试方法

泡沫的性能很多, 概括起来有泡沫发泡能力、稳定性、悬浮性、携岩携水能力、滤失性、热物理性能、腐蚀性、导电性、发泡剂的生物降解性、发泡剂的毒性等。其中最主要的性能是泡沫发泡能力和稳定性。在油田实际应用中也主要是测定这两方面的指标。评价发泡剂的发泡能力和泡沫稳定性的方法很多, 如 Ross - Miles 法、Waring Blender 法、DIN 孔盘打击法、API 推荐法、压气气流法、Drill - Aid 法等, 最常用的方法为 Waring Blender 法和 API 推荐法。

1.4.1 一维泡沫稳定性测试方法

为了观测液膜衰变的整个过程, 以便深入了解泡沫衰变的微观机理, 研究者开发了一系列液膜稳定性评价技术。

1.4.1.1 垂直液膜法

Lunkenheimer 等开发了一种测量垂直液膜稳定性的方法, 如图 1.11 所示。

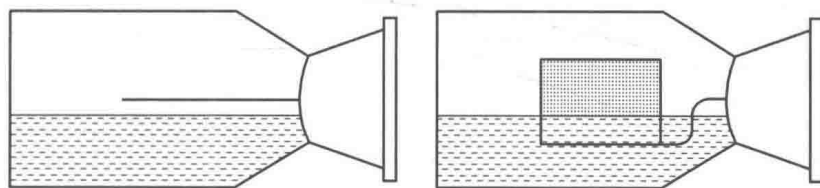


图 1.11 垂直液膜法

其原理是: 在一个横放的玻璃广口瓶内放置一定量的待测表面活性剂溶液, 先将一个细金属丝制成的矩形框浸没到液面以下几毫米, 框面与液面平行, 然后将玻璃瓶旋转 90° , 这样就在矩形框内形成一层液膜, 框的底部仍浸没在液面以下, 框面与液面垂直, 水平边与液面平行。

该方法的优点是简便易行,可以实时观测液膜随时间的变化,研究液膜的衰变过程。

1.4.1.2 毛细管法

Kumar 等采用内径为 $200 \sim 1000 \mu\text{m}$ 不等的厚壁毛细管,通过调整上界面和毛细管顶部的距离来形成曲膜或平膜,采用微分干涉仪测量膜的曲率,利用表面张力平衡技术测量膜厚的变化,从而可以测量液膜的曲率对其排液过程的影响。Angarska 等采用内径分别为 1.4mm 、 1.9mm 和 2.2mm 的毛细管来测量由于驱动压的变化而对液膜变薄过程产生的影响。

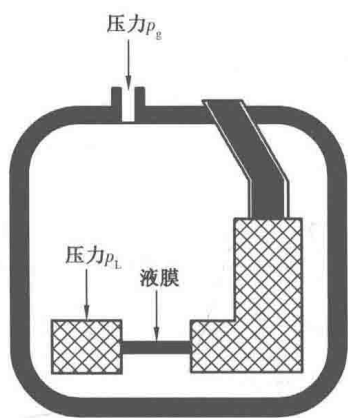


图 1.12 薄液膜—压力平衡法

1.4.1.3 薄液膜—压力平衡法(TLF - PBT)

Exerowa 等开发了一种测量液膜稳定性的方法,如图 1.12 所示。

该方法的原理是在多孔盘的孔中产生液膜,通过缓慢增加测试室中的压力直到液膜破裂,可以测量液膜的临界破裂压力 ($p_c = p_g - p_L$),这个压力值越高,则该液膜的强度越高。另外,还可以通过改变孔的大小来测量不同尺寸液膜的强度。

1.4.1.4 动态法

Nguyen 等开发了一种测试运动液膜性质变化的装置。该装置的主体是一个双锥型的玻璃管,入口和出口处的直径为 $3.00\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$,中间直径为 $7.98\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 。玻璃管外罩以控温装置,用摄像装置进行数据采集。该技术的优点在于采用 T 型阀控制 N_2 流量,气流稳定后再将液膜吹入玻璃管内,避免两通阀在通气瞬间压力过大而出现冲破液膜的危险。该法可以动态地检测液膜在前进过程中面积扩张和缩小时的 结构变化。

1.4.1.5 强化电阻技术

Barigou 等用橡皮球将表面活性剂溶液挤入有两个电极组成的毛细量筒内,形成薄的液膜圆环,通过测量液膜环的电阻随时间的变化来表征液膜的排液规律。该法克服了传统电阻测量方法中无法测试靠壁液膜的电阻问题,测试数据更加精确。

1.4.2 二维泡沫稳定性测试方法

液膜的性质对于理解泡沫稳定性的微观机理至关重要,但一维泡沫稳定性测试方法无法测量 Plateau 边界处的液膜排液和气体透过液膜的扩散情况,研究中需开发与实际泡沫体系更加接近的测量技术——二维泡沫稳定性测试方法。

Rusanov 等研究开发了一种测量溶液发泡性和泡沫稳定性的方法——单层泡沫法,其示意图如图 1.13 所示。

其原理是:空气从微型压缩机通过调节阀到达测量室中的玻璃毛细管。测量室中预先放置一定量的待测表面活性剂溶液,当毛细管中的气体通过

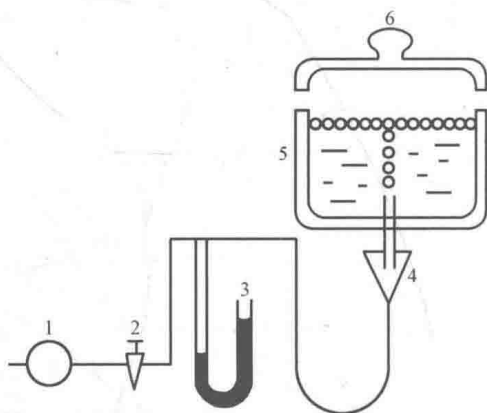


图 1.13 单层泡沫法测量发泡性装置

1—微型压缩机;2—调节阀;3—压力计;
4—玻璃毛细管;5—测量室;6—盖子

溶液后,便在液面上形成一层气泡。标志溶液的发泡力的气泡寿命 t 可用下式计算:

$$t = \frac{N}{n} \quad (1.7)$$

式中: N 为溶液表面存在的气泡总数; n 为单位时间从毛细管产生的气泡数。

此法是二维泡沫研究中最具代表性的方法,既可以测量 Plateau 处液膜的性质,又可以对不同溶液的发泡能力进行对比,非常直观简便。

1.4.3 三维泡沫稳定性测试方法

由于二维泡沫稳定测试技术忽略了泡沫体系内部气泡之间的聚并过程,与实际应用的泡沫稳定性仍有很大差别,所测得的数据不能直接指导应用。因此实际应用中还需运用模拟真实泡沫体系的稳定性测试技术——三维泡沫稳定性测试技术。

1.4.3.1 传统方法

(1) 气流法。气流法又称改进的 Bikerman 法,是根据美国 API 标准,模拟油气井结构设计的。其原理是一定流速的气体通过玻璃砂滤板,滤板上盛有一定量的测试溶液,气体通过滤板后在容器(刻度量筒)中形成泡沫,如图 1.14 所示。当固定气体的流速并使用同一容器时,流动平衡时的泡沫高度 h 可以作为泡沫性能的量度。由于 h 是在一定气流下泡沫生成与破坏处于动态平衡时的泡沫高度,因此 h 值包含泡沫稳定性及发泡性两种性能。

气流法仪器简单,重复性良好,是目前比较常用的泡沫性能评价方法之一。但若刻度量筒直径过小(小于 3cm),存在壁效应,将对测试结果产生一定的误差。

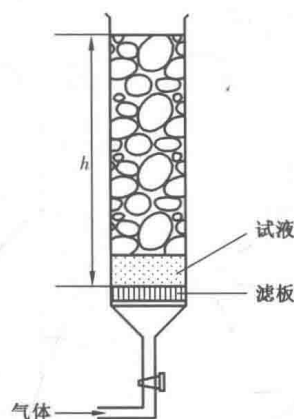


图 1.14 气流法测试装置

(2) 振荡法。在密闭器皿中加入待测溶液,振荡一定次数,注意振荡的方式(如振荡的次数、快慢、方向、时间等),停止振荡后以产生的气泡溶液的体积作为待测液发泡性能的量度,记下从停止振荡到泡沫衰减为原来高度的一半所需的时间 $t_{1/2}$,用于表征泡沫的稳定性。此法简单易行,被广泛用于实验室溶液发泡能力的初步测量。缺点是难以控制振荡的力度,每次实验之间的误差较大。

(3) 倾倒法(Ross-Miles 法)。这种方法所用仪器称为罗氏迈尔仪(ASTM 标准, Ross-Miles 仪),如图 1.15 所示。在粗管内装入 50mL 试液,泡沫移液管内装入 200mL 试液。粗管的外套中通入恒温水,使试验在规定温度下进行。试验时,使泡沫移液管内的 200mL 试液从 900mm 高自由流下冲击粗管底部的试液后,产生泡沫。一般以 200mL 试液流完时的泡沫高度(单位: mm)作为发泡能力的量度,以

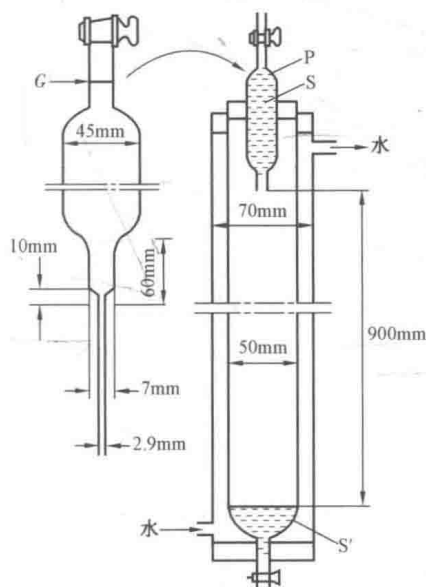


图 1.15 罗氏迈尔仪示意图

P—泡沫移液管; G—200mL 刻度;
S—试液(200mL); S'—试液(50mL)