



油/田/化/学/丛/书

油田化学工程

马喜平 全红平 编著



化学工业出版社

油/田/化/学/丛/书

油田化学工程

YOUTIAN HUAXUE GONGCHENG

马喜平 全红平 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分为七章,分别介绍了油气开采过程中的注水、酸化、水力压裂、化学堵水及调剖、原油乳状液与破乳、原油的清防蜡与降凝降黏、化学驱油等方面的原理知识、工艺、各工艺过程中的处理剂和工作液。

本书可作为高等院校与石油工程有关的本科生和研究生的专业教材,也可供从事石油天然气开采和油田化学等工作的工程技术人员、研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油田化学工程/马喜平,全红平编著. —北京:
化学工业出版社, 2018. 7

(油田化学丛书)

ISBN 978-7-122-32047-6

I. ①油… II. ①马… ②全… III. ①油田化学
IV. ①TE39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 082555 号

责任编辑: 曾照华

文字编辑: 李 玥

责任校对: 王素芹

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 298 千字 2018 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

丛书前言

油田化学是近几十年发展起来的一个交叉学科,针对油气田开发、生产过程中的化学问题,涉及石油钻井、固井、完井、油气增产的酸化、压裂、提高采收率等各方面,是化学和石油工程结合的特殊学科。石油开发中的泥浆工程师、固井工程师、采油工程师、井下作业工程师都要具备油田化学知识。油田化学已经是油气田开发、生产中必需的知识,也是保证油气正常生产的技术。

随着石油化工的发展,一些高性能、专用性的高分子材料、表面活性剂和无机材料相继问世,高分子工业、表面活性剂工业和无机材料有了突飞猛进的发展。由于这些材料具有多种应用功能,在原油勘探开发(钻井、固井)、油井增产、提高采收率、稠油开采输送、石油工程材料保护、油田环境治理中都是必不可少的化学品。目前油田化学方面的丛书很少,为此我们编写了“油田化学丛书”。

本套丛书在高分子、表面活性剂、石油地质及开发知识的基础上,介绍了高分子材料、表面活性剂和无机材料在石油工程各环节中应用研究的最新进展,由西南石油大学油田化学教研室组织编写。作者根据多年来在高分子材料、表面活性剂和无机材料及其在油气田开发中的应用领域不断的探讨,将相关的研究工作和心得融合在书中。本丛书包括《石油化学工程》《油田用聚电解质的合成及应用》《油田化学品的制备及现场应用》《表面活性剂及其在石油工程中的应用》《特殊油气井化学工作液》五册。分别介绍了钻井、固井、完井、酸化、压裂、提高采收率等方面用离子型聚合物的合成、应用、特性、作用机理;油田化学品的主要制备方法,油气田钻井、固井、酸化、压裂、堵水调剖、化学驱油、防垢除垢、腐蚀与保护、集输和水处理方面化学品的制备及现场应用方法;表面活性剂在石油工程各环节中应用研究的最新进展;改善工作液材料、处理剂及工作液配方在固井、酸化、压裂、三次采油等方面的应用。

本套丛书可作为油气田应用化学、石油工程、油气田材料工程等学科的本科高年级学生、研究生课外阅读书籍,也可作为相关油田化学工程技术人员和油田化学助剂生产单位技术人员参考用书。

西南石油大学油田化学教研室

2017年2月

前言

油田化学是一个交叉学科，主要解决油气开发、生产、集输中与化学有关的技术和工程问题。而油田化学添加剂作为工作液的基本处理剂，用于注水、压裂、酸化、堵水调剖、提高采收率、原油破乳脱水和油气集输等多个作业中，应用十分广泛。油田化学处理剂涉及表面化学及表面活性剂、聚合物化学及物理、有机化合物、无机化合物及油气钻采、油层物理、油气地质、油气集输等多种学科知识。

本书主要介绍了油气开采过程中的注水、酸化、水力压裂、化学堵水与调剖、原油乳状液与破乳、原油的清防蜡与降凝降黏和化学驱油等方面的原理知识、工艺、各工艺过程中的处理剂和工作液。本书可作为高等院校石油工程有关的本科生和研究生的专业教材，也可供从事石油天然气开采和油田化学等工作的工程技术人员、研究人员参考。全书共分为7章，书中第1章至第4章由马喜平编写；第5章至第7章由全红平编写。

本书在编写过程中，参阅了大量文献资料，在此对所引用文献的作者表示感谢！同时，本书在编写过程中得到了西南石油大学化学化工学院油田化学研究所各位同仁的支持与帮助，在此一并感谢！

由于我们水平有限，书中个别观点难免有不当之处，敬请专家、读者批评指正。

编著者

2018年1月

目录

第 1 章 注水

1.1 注水水源选择及水质要求	1
1.1.1 注水水源的选择	1
1.1.2 注水水质指标	3
1.2 注水水处理技术	6
1.2.1 注水水质处理措施	6
1.2.2 注水水质处理设备	7
1.2.3 注水系统	9
1.2.4 注水井投注	10
1.2.5 水处理工艺	11
1.3 水处理化学剂	13
1.3.1 絮凝剂	13
1.3.2 杀菌剂	15
1.3.3 除氧剂	22
1.3.4 缓蚀剂	23
1.3.5 阻垢剂	25
参考文献	30

第 2 章 酸化

2.1 酸化增产原理	32
2.1.1 酸处理工艺分类	32
2.1.2 酸化增产原理	33
2.1.3 地层的伤害	36
2.2 酸液体系	37
2.2.1 酸液类型及选择	37

2.2.2	盐酸	38
2.2.3	盐酸-氢氟酸(土酸)及多组分酸	39
2.2.4	甲酸和乙酸	40
2.2.5	粉状酸	40
2.2.6	其他无机酸	41
2.2.7	缓速酸	41
2.3	酸液添加剂	43
2.3.1	酸液添加剂及选择	43
2.3.2	缓蚀剂	44
2.3.3	铁离子稳定剂	47
2.3.4	表面活性剂	48
2.3.5	黏土稳定剂	49
2.3.6	增黏剂和降阻剂	50
2.4	酸化工艺	50
2.4.1	酸化处理井层的选择	50
2.4.2	常用酸化工艺	51
参考文献		55

第 3 章 水力压裂

3.1	水力压裂造缝机理	58
3.1.1	地应力场	58
3.1.2	地应力场确定	60
3.1.3	裂缝的形态及方位	61
3.1.4	影响裂缝形成的因素	62
3.2	压裂液	62
3.2.1	水基压裂液	65
3.2.2	水基压裂液添加剂	72
3.2.3	泡沫压裂液	84
3.2.4	油基压裂液	89
3.2.5	清洁压裂液	90
3.3	压裂液性能评价	92
3.3.1	流变性能	93
3.3.2	压裂液的滤失性	93
3.3.3	压裂液的降阻率	93
3.3.4	压裂液的破胶性能	93
3.3.5	压裂液的界面张力与润湿性能	93
3.3.6	压裂液残渣含量	94

3.3.7 压裂液与地层流体的配伍性	94
3.3.8 压裂液交联时间	94
3.3.9 压裂液对基岩渗透率的伤害率测定	94
3.3.10 压裂液的溶解性	94
3.4 压裂工艺技术	95
3.4.1 分层及选择性压裂	95
3.4.2 控缝高压裂技术	97
3.4.3 测试压裂技术	98
参考文献	98

第4章 化学堵水及调剖

4.1 油井堵水	100
4.2 堵水方法	102
4.3 堵水剂分类	102
4.3.1 选择性堵水剂	103
4.3.2 非选择性堵水剂	115
4.3.3 化学堵水剂总结与发展趋势	122
4.4 注水井调剖	123
4.4.1 注水井调剖的概念及意义	123
4.4.2 注水井调剖剂	124
4.5 注水井调剖的发展趋势	132
4.6 用于蒸汽采油的高温堵水剂	133
4.6.1 泡沫高温堵水剂	134
4.6.2 氧化镁沉淀	134
4.6.3 聚合物乳胶浓缩液	134
4.7 高温注蒸汽调剖剂	135
4.7.1 高温调剖剂选择依据	136
4.7.2 性能指标确定	136
4.7.3 高温调剖剂性能评价体系	136
参考文献	137

第5章 原油乳状液与破乳

5.1 原油乳状液及其性质	139
5.1.1 原油乳状液的生成	139
5.1.2 影响原油乳状液稳定的因素	141
5.1.3 原油乳状液的性质	147

5.1.4	原油乳状液的危害	150
5.2	原油脱水方法和原理	151
5.2.1	物理沉降分离	151
5.2.2	电脱水	152
5.2.3	润湿聚结脱水	154
5.2.4	化学破乳法	154
5.2.5	生物破乳法	155
5.3	原油化学破乳剂及其评价方法	156
5.3.1	原油破乳剂发展概况	156
5.3.2	原油破乳剂的分类	158
5.3.3	常用化学破乳剂	159
5.3.4	化学破乳剂的评价指标	167
5.4	原油化学破乳剂的破乳机理	168
5.4.1	原油乳状液破乳理论	168
5.4.2	破乳过程	169
5.4.3	原油破乳剂的破乳机理	170
	参考文献	171

第 6 章 原油的清防蜡与降凝降黏

6.1	蜡的化学结构及特征	173
6.1.1	蜡的化学结构	173
6.1.2	蜡的特征	175
6.2	油井结蜡影响因素及结蜡现象	175
6.2.1	油井结蜡影响因素分析	175
6.2.2	油井结蜡现象	178
6.3	油井清蜡技术	179
6.3.1	机械清蜡	179
6.3.2	热力清蜡	181
6.3.3	化学清蜡	183
6.4	油井防蜡技术	186
6.4.1	油管内衬与涂层防蜡	186
6.4.2	强磁防蜡技术	188
6.4.3	化学防蜡技术	189
6.4.4	微生物清防蜡技术	194
6.4.5	其他防蜡方法	196
6.5	化学药剂清防蜡的施工方法	196
	参考文献	197

第 7 章 化学驱油

7.1 采收率与影响采收率的因素	200
7.1.1 采收率	200
7.1.2 影响采收率的因素	201
7.2 聚合物驱油	203
7.2.1 聚合物驱油机理	204
7.2.2 聚合物驱油剂	206
7.2.3 聚合物驱油的研究进展	210
7.3 表面活性剂驱油	211
7.3.1 表面活性剂驱油机理	212
7.3.2 表面活性剂驱油技术	215
7.3.3 化学驱油用表面活性剂研究进展	217
7.4 碱驱油	218
7.4.1 碱驱油的作用机理	219
7.4.2 碱驱油的适用条件	219
7.4.3 碱驱油的现场试验	220
7.5 三元复合驱油	220
7.5.1 三元复合驱油的作用机理	221
7.5.2 影响复合驱油的因素	223
参考文献	223

第1章

注水

注水是指通过高压注水泵加压后经注水井把满足一定水质标准的清水或污水注入油层，以补充地层能量，保持油层压力，从而达到提高采油速度、采收率以及延长油井自喷期的目的。其作为提高原油采收率的二次采油方法，是保持油井高产稳产的一项重要技术措施。

随着油田的不断开发，注水已经成了油田提高采收率的一种重要的方法。油田投入开发后，随着开采时间的增长，油层本身能量不断地被消耗，致使油层压力不断地下降，地下原油大量脱气，黏度增加，油井产量大大减少，严重时还会停喷停产。为了弥补原油采出后所造成的地下亏空，保持或提高油层压力，实现油田高产稳产，并获得较高的采收率，必须对油田进行注水。水驱油的目的是向地层补充能量，油、水作为两种不互溶的介质，其界面张力高达 $30\sim 50\text{mN/m}$ 。油层为高度分散体系，界面性质对油水流动有着关键影响，油层岩石是由几何形状和大小极不一致的矿物颗粒所构成的，从而形成复杂的空间网络，加之油层的非均质性，这些都增加了水驱油的复杂性。

1.1 注水水源选择及水质要求

1.1.1 注水水源的选择

水源的选择主要考虑四个问题：一是必须要有充足的水量，水源既能满足油田目前日注水量的要求，又能满足注水设计年限内所需要的总注水量；二是水源水质稳定良好，处理的工艺过程简单；三是要充分地利用含油污水，以减少环境污染；

四是在选择水源时要考虑水的二次利用。

目前,国内各油田作为注水用的水源主要有以下几种类型。

1.1.1.1 地下水

浅层地下水一般产于河流冲积沉积层中,其水量丰富,水质较好,一般不受季节影响,且具有较小腐蚀性。深层地下水的矿化度较地面水高,水中含有铁、锰等离子,对于含铁较高的水应进行除铁。

1.1.1.2 地面水

地面水主要有江河水、湖泊水以及水库水等。江河水水量丰富,矿化度低,但泥砂含量大,用于油田注水时需要澄清处理。湖泊、水库水具有良好的澄清能力,水中泥砂含量较河水少,但浅水湖泊水或水库水由于水中溶解氧充足,水生动植物大量繁殖,常有异常气味及胶体,用作油田注水时亦需作水质处理。地面水水质和水量受季节影响变化较大。

1.1.1.3 油田污水

油(气)田水与石油、天然气一同被开采出来后,经过原油脱水工艺进行油水分离形成原油脱出水,天然气开采过程分离出游离水,这两部分共称为产出水。产出水又叫油田污水,其保持了油(气)田水的主要特征,由于具有高含盐、高含油的特性,直接外排将会造成环境污染。实际上,油田污水不仅仅是油田产出水,还包括了石油、天然气勘探、开发、集输等生产作业过程中形成的各类污水,如钻井、油田酸化、压裂等作业污水以及注水管线、注水井清洗水等,但油田污水以产出水为主。

(1) 采油污水

经过一段时间注水后,注入的水将与原油天然伴生的地层水一起随原油被带出,随着注水时间的延长,采出流体含油率在不断下降,而含水率不断上升,这样便产生了大量的采油污水。由于采油污水是随着原油一起从油层中被开采出来的,又经过原油收集及粗加工过程,因此,采油污水中杂质种类及性质都和原油地质条件、注入水性质、原油集输条件等因素相关,该类水是含有固体杂质、溶解气体、溶解盐类等多种杂质的废水。

(2) 采气污水

在天然气开采过程中随天然气一起被采出的地层水称为采气污水。与采油污水相比,采气污水较为洁净,量也较少。

(3) 钻井污水

在钻井作业中,泥浆废液、起下钻作业产生的污水,冲洗地面设备及钻井工具而产生的污水和设备冷却水等统称为钻井污水。钻井污水所含杂质和性质与钻井泥浆有密切关系,即不同的油气田、不同的钻探区、不同的井深、不同的泥浆材料,在钻井过程形成的污水性质亦不尽相同。一般钻井污水中的主要有害物质为悬浮

物、油、酚等。

(4) 洗井污水

向油层注水的注水井在经过一段时间运行后,由于注入水中携带有未除净的(或在注水管网输送过程中产生)悬浮固体(腐蚀产物、结垢物、黏土等)、油分、胶体物及细菌等杂物,在注水井吸水端面或注水井井底近井地带形成“堵塞墙”,从而导致注水井注水压力上升,注水量下降。故通道需定期反冲洗,以清除“滤网”上沉积的固体及生物膜等堵塞物,使注水井恢复正常运行,该过程则会产生洗井污水。洗井污水为水质极其恶化的污水,表现为悬浮物浓度高、铁含量高、细菌含量高、颜色深,且含有一定量的原油和硫化氢成分。

(5) 油田作业废水

在原油、天然气的生产过程中,通常要采用酸化、压裂等油田作业措施来提高原油、天然气的产量,在这过程中也会形成一定量的废液或污水。该类废液或污水在油田污水中所占的比例相对较小,但由于水质特殊,其处理起来仍具有较大的难度。

(6) 海水

海湾沿岸和海上油田注水一般会使用海水。由于海水含氧量和含盐量高,腐蚀性强,悬浮固体颗粒随季节变化大,因此,施工过程中通常会在海岸打浅井做水源井,并使用密封系统,使其过滤从而减少水的机械杂质。

1.1.2 注水水质指标

注水水质是指溶解在水中的矿物盐、有机质和气体的总含量,以及水中悬浮物含量及其粒度分布。在注水过程中,当注入水与地层水、储层岩石矿物不配伍,注入条件变化及不溶物造成的地层堵塞均会伤害油层。注水引起的地层损害类型及产生原因和影响如表 1-1 所示。

表 1-1 注水引起的地层损害类型及产生原因和影响

损害类型	产生原因	影响
水敏	注入水引起黏土膨胀	缩小渗流通道、堵塞孔喉
速敏	注水强度过大或操作不平衡(工作制度不合理)	内部微粒运移、堵塞渗流通道
悬浮物堵塞	注入水中含有过量的机械杂质、油污、细菌及系统的腐蚀产物	运移、沉积、堵塞孔喉
结垢	注入水与地层流体不配伍产生的无机垢和有机垢	加剧腐蚀,为细菌提供生长繁殖场所,堵塞渗流通道
腐蚀	由于水质控制不当(包括溶解气和细菌)而引起,腐蚀方式有电化学腐蚀和细菌腐蚀两种	损坏设备,产物堵塞渗流通道
碱敏	注入水 pH 值高,引起黏土分散	黏土分散、运移、堵塞孔喉

1.1.2.1 注水水质基本要求

在注水过程中控制注水水质是预防地层损害、提高注水效果的最直接和最主要

的途径。注水水源除要求水量充足、取水方便和经济合理外,还必须符合以下要求:

- ① 水质稳定,与油层水相混不产生沉淀;
- ② 水注入油层后不使黏土产生水化膨胀或产生悬浊;
- ③ 不得携带大量悬浮物,以防注水时堵塞油层渗滤端面;
- ④ 对注水设施腐蚀性小;
- ⑤ 当一种水源量不足,需要采用第二种水源时,应首先进行室内试验,证实两种水的配伍性好,对油层无伤害才可注入。

1.1.2.2 注水水质的指标体系

根据油田注水的特殊用途,对油田注水水质主要考虑以下三个方面。

(1) 注入性

油田注入水的注入性是指注入地层(储层)的难易程度。在储层物性(如渗透率、孔隙结构等)相同的条件下,悬浮固体含量低、固相颗粒粒径小、含油量低、胶体含量少的注入水易注入地层,其注入性好。

(2) 腐蚀性

在油田注水的实施过程中,地面涉及注水设备(如注水泵)、注水装置(如沉降罐、过滤罐等)、注水管网;地下涉及注水井油套管等。这些设备、管网、装置等大多是金属材质,因此,注入水的腐蚀性不仅会影响注水开发的正常运行,且还会影响生产成本。影响注入水腐蚀性的主要因素有:pH值、含盐量、溶解氧、 CO_2 、 H_2S 、细菌和水温。

(3) 配伍性

油田注入水注入地层(储层)后,如果作用结果不影响注水效果或不使储层的物理性质如渗透率变差,则可认为油田注入水与储层的配伍性好,反之则油田注入水与储层的配伍性差。油田注入水与储层的配伍性主要表现为结垢和矿物敏感性两个方面,二者都会造成储层伤害,影响注水量、原油产量及原油采收率。

因此,水质指标可分为三大类,即腐蚀类控制指标、堵塞类控制指标以及检验腐蚀和堵塞控制效果的综合评价指标,表1-2为水质指标体系及分类。而对于某一特定的油气层,合格的水质必须满足各项注水水质指标。

表 1-2 水质指标体系及分类

类别	指标项目	内容
堵塞类控制指标	悬浮固相	粒径,含量
	含油量	粒径,含量
	相容性	与油层岩石相容,与油层流体相容
腐蚀类控制指标	溶解气	H_2S , O_2 , CO_2
	细菌	SRB, TGB
	pH值	6~8
综合评价指标	总铁含量	Fe^{3+}
	膜滤系数	根据油层渗透率
	年腐蚀率	小于0.076mm/a

注入水中的悬浮物会沉积在注水井井底,造成细菌大量繁殖,腐蚀注水井油套管,缩短注水井使用寿命;还能造成注水地层堵塞,使注水压力上升,注水量下降,甚至注不进水。从理论上讲,注入水中悬浮固体的含量越低、粒径越小,其注入性就越好,但其处理难度就越大、处理成本也就越大。因此,注入水中悬浮固体的含量以及粒径大小指标应从储层实际需要、技术可行性与经济可行性三方面来综合考虑。

注水开发过程是一个庞大的系统工程,涉及的金属材质的设备、管网、油套管等数量众多,投资巨大。国内外注水开发油田实践表明,减缓注入水的腐蚀性,对于提高油田注水开发的经济效益意义重大。注入水中的油分产生的危害与悬浮固体类似,主要是堵塞地层,降低水的注入性。油田污水中的油分按油珠粒径大小可分为四类:浮油、分散油、乳化油、溶解油。

注入水膜滤系数的大小与许多因素有关。如悬浮固体的含量以及粒径大小、含油量、胶体与高分子化合物浓度等。膜滤系数越大,注入水的注入性就越好。在油田产出水中本来仅含微量的氧,但在后来的处理过程中,与空气接触而含氧量增加。浅井中的清水、地表水含有较高的溶解氧。在大多数天然水中都含有溶解的 CO_2 气体。油田采出水中 CO_2 主要来自三个方面:由地层中地质化学过程产生,为提高原油采收率而注入 CO_2 气体,采出水中的 HCO_3^- 在减压、升温条件下分解。油田水中的 H_2S 气体,一方面来自含硫油田伴生气在水中的溶解;另一方面来自硫酸还原菌分解。

在适宜的条件下,大多数细菌在污水系统中都可以生长繁殖,其中危害最大的为硫酸还原菌、黏泥形成菌(也称腐生菌或细菌总数)以及铁细菌。

1.1.2.3 注水水质标准

随着人们对油田注水开发认识的深入和对注水油藏保护的逐步重视,碎屑岩油藏注水水质推荐标准由早先的1988版不断修改和完善到现用的2012版。表1-3为2012版碎屑岩油藏注水推荐水质主要控制指标。

表 1-3 2012 版碎屑岩油藏注水推荐水质主要控制指标 (SY/T 5329—2012)

注入层平均空气渗透率/ μm^2		<0.01	$0.01\sim0.05$	$0.05\sim0.5$	$0.5\sim1.5$	>1.5
控制指标	悬浮固体含量/(mg/L)	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 5.0	≤ 10.0	≤ 30.0
	悬浮物颗粒直径中值/ μm	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 3.0	≤ 4.0	≤ 5.0
	含油量/(mg/L)	≤ 5.0	≤ 6.0	≤ 15.0	≤ 30.0	≤ 50.0
	平均腐蚀率/(mm/a)	≤ 0.076				
	硫酸盐还原菌(SRB)/(个/ mL)	≤ 10	≤ 10	≤ 25	≤ 25	≤ 25
	腐生菌(TGB)/(个/ mL)	$n \times 10^2$	$n \times 10^2$	$n \times 10^3$	$n \times 10^4$	$n \times 10^4$
	铁细菌(IB)/(个/ mL)	$n \times 10^2$	$n \times 10^2$	$n \times 10^3$	$n \times 10^4$	$n \times 10^4$

注: $1.1 < n < 10$ 。

水质的主要控制指标若已达到注水要求且注水顺利,可以不考虑辅助性指标;如果达不到要求,应查其原因并进一步检测辅助性指标。注水水质辅助性指标包括

溶解氧、硫化氢、侵蚀性二氧化碳、铁、pH 值等。表 1-4 为推荐水质辅助性控制指标。

表 1-4 推荐水质辅助性控制指标

辅助性检测项目	控制指标	
	清水	污水
溶解氧含量/(mg/L)	≤ 0.50	≤ 0.10
硫化氢含量/(mg/L)	0	≤ 2.0
侵蚀性二氧化碳含量/(mg/L)	$-1.0 \leq \rho_{\text{CO}_2} \leq 1.0$	

注：1. 侵蚀性二氧化碳含量等于零时此水稳定；大于零时此水可溶解碳酸钙并对注水设施有腐蚀作用；小于零时有碳酸盐沉淀出现。

2. 水中含亚铁离子时，由于铁细菌作用可将二价铁转化为三价铁而生成氢氧化铁沉淀。当水中含硫化物时，可生成 FeS 沉淀，使水中悬浮物增加。

1.2 注水水处理技术

1.2.1 注水水质处理措施

在水源确定的基础上，一般要进行水质处理。水源不同，水处理的工艺也就不同。常用的水处理措施有沉淀、过滤、杀菌、脱氧、除油、曝晒等。

1.2.1.1 沉淀

来自不同水源的水一般含有一定数量的机械杂质，为了除去这些机械杂质，水质处理的第一步就是进行沉淀。沉淀是让水在沉淀池或罐内停留一定时间，使其中所悬浮的固体颗粒依靠重力作用沉淀下来。经沉淀后的水质，其悬浮物含量 $< 50 \text{ mg/L}$ 。足够的沉淀时间和快速的下沉速度是水处理质量的保证。为了达到这一目的，一般在沉淀池或罐内安装迂回挡板以增大其流程来延长沉淀时间。同时，在沉淀过程中需要加入絮凝剂以增大颗粒直径来加速水中悬浮物和不溶物的沉淀。

1.2.1.2 过滤

过滤是水质处理的重要措施之一，它是通过过滤设备来除掉水中微小的悬浮颗粒和大量细菌。水质标准分级决定了过滤等级，过滤所用的设备称为过滤罐。按工作压力可将过滤罐分为重力式和压力式滤罐。利用水池的水面和水管的出口或清水池水位的高度差进行过滤的滤罐为重力式滤罐。压力式滤罐是利用水在一定压力下通过完全密封的滤罐进行过滤，油田上常用的是压力式滤罐。经过滤后的水质其机械杂质含量应 $< 2 \text{ mg/L}$ ，方可算为有效的过滤。

1.2.1.3 杀菌

任何水系统都含有不同程度的细菌，油田水中常见的有害细菌主要有硫酸盐还

原菌 (SRB)、腐生菌 (TGB) 和铁细菌 (FB)。这些细菌都会对注水设备造成腐蚀, 并且菌体与腐蚀产物会对地层造成堵塞。因此当这三种细菌含量超标时, 必须进行杀菌处理。杀菌方法有化学法和物理法两种。化学法是通过向注入水中添加适当的化学药剂来进行杀菌, 物理法主要是利用紫外线进行杀菌。目前, 油田水处理系统应用最为广泛的杀菌方法是化学法。

1.2.1.4 脱氧

地面水源因与空气接触常溶有一定的氧, 有的水源的水还含有二氧化碳和硫化氢气体。在一定的条件之下, 这些气体对金属和水泥均有腐蚀性, 因此注水前需用物理法或化学法除去注入水中所溶解的氧气、二氧化碳和硫化氢气体。物理法脱氧主要方法有真空脱氧和气提脱氧。真空脱氧的原理是抽真空设备将脱氧塔内压力降低, 由于气体在液体中的溶解能力与系统的压力成正比, 随着压力降低, 溶解气含量降低, 从而使塔内水中的氧分离出来并被抽掉。气提脱氧是利用天然气或氮气作为气提气对水进行逆流冲刷使水表面氧的分压降低从而脱除氧气, 但气提脱氧不易达到较高的最终脱氧指标, 有时采用化学脱氧来弥补。化学脱氧是在水中投加化学药剂, 通过其与水中氧反应生成无腐蚀性且易溶解产物从而达到除去水中溶解氧的目的。

1.2.1.5 除油

目前油田注水的含油污水回注量已占油田总注水量的 70%~80%, 而污水中含油量一般在 100~200mg/L, 这种污水如果直接用来回注会伤害地层。因此, 在回注前除了除去水中大量悬浮物外还必须对其进行除油处理, 使其达到注水水质标准方可用来回注。通常采用两种方法进行除油, 一是筛选出适用的高效破乳剂; 二是采用粗粒化, 让极细的油滴互相聚合成大油滴而从水中分离出来。目前, 常用的除油装置有重力除油装置和气浮选槽除油装置。

1.2.1.6 曝晒

当水源水含有大量的过饱和碳酸盐 (重碳酸钙、重碳酸镁和重硫酸亚铁等) 时, 因为其化学性质不稳定, 注入地层后因温度升高可能产生碳酸盐沉淀而堵塞孔道。因此, 在注入地层前用曝晒法使其沉淀除去。

1.2.2 注水水质处理设备

油田水处理一般包括除油和过滤两个方面。近年来国内外都在设备的研发上做了很多的工作, 在对原有设备改进的基础上也出现了许多新的设备。如各种浮选设备、水力旋流器以及过滤设备等。这些设备的成功开发对提高含油废水的处理效果, 对改进设备的处理效能以及实现处理设备功能的一体化都具有重大意义。

1.2.2.1 除油沉降设备