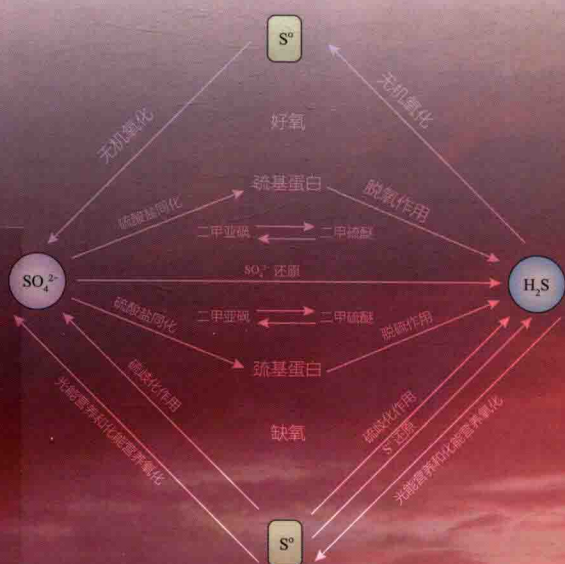


Principle and Application of Sulfide Control Technology
in Oilfield Ground System

油田地面系统硫化物的 生态调控技术原理及其应用研究

魏 利 马士平 李殿杰 蔡永春 等著



化学工业出版社

Principle and Application of Sulfide Control Technology
in Oilfield Ground System

油田地面系统硫化物的 生态调控技术原理及其应用研究

魏 利 马士平 李殿杰 蔡永春 等著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分9章,内容包括绪论、试验材料与方法、硫酸盐还原菌的特性及危害、硫化物生态抑制调控机理及其调控策略研究、葡萄花油田地面系统水质特性及对现有工艺的影响、葡萄花油田地面系统硫酸盐还原菌的种类及分布特征、油田硫化物的提取方法及其组成分析、硫化物收集池中硫化物氧化剂及其应用效果研究以及硫化物生态抑制剂现场调控应用研究。

本书理论与工程应用有效结合,具有较强的先进性和学术性,可供从事油田微生物、生物腐蚀控制、环境生物技术的研究人员、工程技术人员和管理人员参考,也可供高等学校环境科学与工程及相关专业师生参阅。



图书在版编目 (CIP) 数据

油田地面系统硫化物的生态调控技术原理及其应用
研究/魏利等著. —北京: 化学工业出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-122-32771-0

I. ①油… II. ①魏… III. ①油田-地面网-硫化物
IV. ①TE39②O613. 51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 174581 号

责任编辑: 刘兴春 刘 婧
责任校对: 王素芹

文字编辑: 汲永臻
装帧设计: 韩 飞

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 装: 三河市航远印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 27½ 彩插 12 字数 697 千字 2018 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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: 168.00 元

版权所有 违者必究



序

2016年随着“水十条”和“土十条”的出台，国家对环保空前地重视；同时随着环保法的深入实施，我国许多油田企业环保问题突出，很多生产项目、在建工程由于环保不达标，被勒令整顿和停产，油田企业必须重视和面对这一问题，寻找新的技术和方法解决环保问题。

油田硫化物对于油田的安全生产、油田地面污水处理系统以及生产设备的腐蚀造成了严重的危害。然而多年来，虽然有了一些研究，但还没有真正系统性的研究。很多研究处于初级阶段，许多的科学问题还没有得到解决。

魏利博士等科研工作者，创新性地提出了硫化物生态调控的策略，通过改变硫酸盐还原菌的代谢过程，改变其代谢底物，从而使其失去进行硫酸盐还原产生硫化物的“活性”，使硫酸盐还原菌由有害菌变成有益菌。生态调控是以往生物抑制策略的延续和改进，强调整体效能、系统健康和持续控制。作者提出SRB菌活性的生态调控方法，改变了以往单纯追求以杀灭SRB数量为目的的传统思维模式，转变了以抑制SRB菌活性为目的的研究思路，是油田系统控制SRB菌危害观念的变革和方法的创新。生态调控的方式主要包括改变代谢底物的比例、调控系统中微生物菌群的比例以及微生物的种类。针对硫化物的相关理论和基础性研究，有利于填补油田硫化物研究领域的空白。

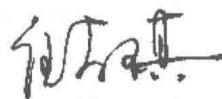
习近平总书记提出了“一带一路”的伟大创举，“一带一路”所倡导的共商、共建、共享的发展理念和互联互通的发展模式，使世界向构建人类命运共同体迈进了一大步。科技的创新发展是原动力。李克强总理提出了“大众创业、万众创新”的号召，核心是创新，创新的一个重要的内容是技术，技术的终极目标要真正地解决生产的实际问题，光靠引进国外的技术是不可行的，只有根据本土的特点研发出接地气的、自主知识产权技术才是解决环保问题的核心和关键，也是最可靠的途径。

由哈尔滨工业大学环境学院的魏利博士、大庆油田采油七厂马士平总工程师、李殿杰所长、蔡永春工程师等共同著的《油田地面系统硫化物的生态调控技术原理及其应用研究》一书，在国际上首次提出了由硫酸盐还原菌滋生产生的硫化物的生态调控理论，并进行了现场的应用，填补了国内在油田污水处理以及防腐领域的图书空白，将对广大环保科研工作者从事的科学研究和工程实践具有针对性的指导意义。

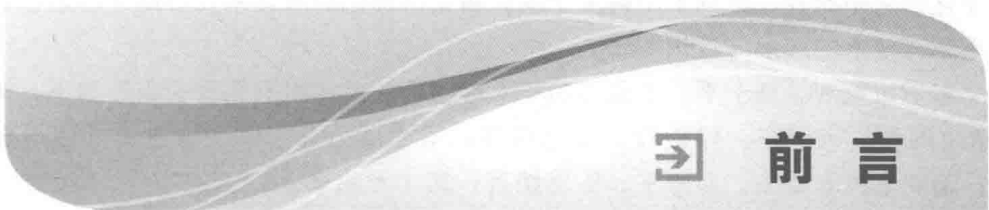
作者多年来一直从事油田微生物研究，尤其是油田硫酸盐还原菌的研究，积累了丰富的研究经验；硫酸盐还原菌代谢过程中产生的硫化物，对污水处理、生

物腐蚀产生了严重的危害。作者多年来在生产和科研一线，在开展硫化物处理方面获取实践经验，经过多年的自主研发，系统地描述了油田的硫酸盐还原菌的特性、硫化物的组成及其分布以及硫化物的生态调控机理，研发出了新型的硫化物生态抑制剂，并现场进行了工业化的推广和应用。该研究真正意义上实现了“产学研”的结合，从科研到工程应用的转化。另外，本书在内容上充分体现了理论联系实际的思想，结合油田硫化物造成的危害，在解决实际工程问题、指导工程实践中的应用，体现了该新兴技术对于人类社会实际生产的应用价值及意义，在内容上也充分体现了学以致用原则。

总之，本书在遵循全面落实科学发展观的基础上，自主研发的新型的硫化物生态调控技术与我国经济、环境、社会健康及可持续发展密切相关的硫酸盐还原菌治理、硫化物控制以及生物腐蚀的高新技术，将极大地满足从事环境保护、环境微生物学、环境工程等领域的教学、科研、工程技术人员对此类技术的需求。



2018 年 1 月



前言

我国由于油田环境保护方面起步较晚,随着我国史上最严厉的环保法的实施,《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)和《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)出台,油田环保的压力是空前的。

油田硫化物对油田安全的生产、油田地面污水处理系统以及生产设备都造成了严重的危害。油田硫化物的处理措施众多,每种方法都有其自身的优缺点和适用范围。

《油田地面系统硫化物的生态调控技术原理及其应用研究》一书,在国内首次集中阐述油田硫化物的组成分布、硫化物的生态调控机制及工艺在环境保护与新能源开发等方面的应用实例,以硫化物为研究对象,旨在利用各种工艺技术实现硫化物的消减以及硫酸盐还原菌的数量控制,同时实现污水处理的低成本运营。

全书共分为9章:第1章绪论,分析和综述了油田硫化物去除的必要性,并对有关硫化物的组成、分布、生物利用、转化及防治,以及硫循环污水处理等的应用进行了展望;第2章试验材料与方法,介绍了硫化物的分析检测方法,涉及的生态调控检测主要指标的检测方法;第3章硫酸盐还原菌的特性及危害,详细地分析总结了硫酸盐还原菌的分类、呼吸作用、电子传递、溶质运输和细胞能量、生态学特性、生物腐蚀等研究现状以及进展;第4章硫化物生态抑制调控机理及其调控策略研究,介绍了油田常用的杀菌剂、生物腐蚀控制方法、硫化物生态调控的相关理论,以及作者新提出的“反硝化细菌底物选择作用”理论;第5章葡萄花油田地面系统水质特性及对现有工艺的影响,主要介绍了葡萄花油田的地面污水处理系统的水质特性、硫化物含量以及水质对现有工艺的影响;第6章葡萄花油田地面系统硫酸盐还原菌的种类及分布特征,主要介绍了采用微生物高通量测序技术,对油田地面系统中不同的工艺段、油藏的微生物群落解析,分析硫酸盐还原菌种类组成以及分布规律;第7章油田硫化物的提取方法及其组成分析,主要介绍油田硫化物的提取方法,油田硫化物的组成成分的研究;第8章硫化物收集池中硫化物氧化剂及其应用效果研究,主要介绍硫化物氧化剂的组成,高含油硫化物收集池硫化物的现场去除效果研究;第9章硫化物生态抑制剂现场调控应用研究,介绍了新型的硫化物生态抑制剂组成,在大庆油田采油七厂的生态调控现场研究,以及实际工程应用情况。

总之,本书系统地介绍了油田硫化物的组成,开发了一种新型的硫化物生态抑制剂,深入地解析了硫化物生态抑制调控机理,并开展了硫化物生态调控现场

工业化的应用研究，开创了国内关于硫化物生态调控的新技术，有助于增进读者对该新兴技术的理解与认识。

本书由魏利、马士平、李殿杰和蔡永春等著，参加本书编写的人员如下：第1章由魏利、宗继东、付艳玲、孟思明著；第2章由马士平、于红方、赵恩芳著；第3章由李殿杰、邓海平、陈思媛著；第4章由蔡永春、梁东虎、付燕来、韩国勇著；第5章由王峰、李继友、陈向武、刘忠宇著；第6章由刘国宇、马西平、郝书岳、张润泽、王峰著；第7章由李殿杰、王亚鹏、杨春、王超著；第8章由李殿杰、邓辉、白冰、魏喜志著；第9章由李春颖、胡蓓、魏东著。全书最后由魏利、马士平、李殿杰和蔡永春统稿、定稿。

本书的编写一直得到哈尔滨工业大学任南琪副校长的关怀，任南琪院士在百忙之中为本书欣然作序，在此全体著者表示衷心的感谢！

大庆油田采油七厂万贵春厂长、大庆油田设计院陈忠喜副总工程师、北京大学环境科学与工程学院倪晋仁院士等对本书的编写给予了鼎力支持与帮助，在此对支持和关心本书编写的领导、专家和同事表示衷心的感谢。

本书的现场试验在大庆油田采油七厂葡三联合站的帮助和支持下完成，书稿的撰写和出版得到了大庆油田采油七厂的鼎力帮助，著者深表谢忱！同时本书得到了广州市创新领军人才专项资金、城市水资源与水环境国家重点实验室开放研究基金（2017TS06）、国家创新团队项目（No. 51121062）的资助。

本书在撰写过程中参考了相关领域的教材、专著以及国内外生产实践相关资料，在此对这些著作的作者表示感谢。

由于本书是首次探索性的研究工作的著作，且著者水平有限，疏漏和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

著者

2018年5月

目 录

第 1 章 绪论

1.1 硫化物的种类	1
1.2 有机硫化物	2
1.2.1 有机硫化物的成因	2
1.2.2 有机硫化物的检测和去除	2
1.3 硫化物的形成	2
1.4 参与硫化物形成的细菌	4
1.5 硫化物的组成分布	5
1.5.1 硫化物的空间分布	6
1.5.2 硫化物在特定物质及过程中的分布	6
1.6 硫化物的分析检测方法	6
1.6.1 色谱法	7
1.6.2 光谱法	8
1.6.3 电极电位滴定法	8
1.6.4 其他方法	8
1.7 硫化物的转化机制	10
1.8 硫化物的生物去除	12
1.9 硫化物的生物利用	16
1.10 硫化物的生物转化	16
1.11 硫化物对重金属的去除以及转化	17
1.12 硫化物去除和转化的其他方法	20
1.12.1 化学方法	20
1.12.2 物理方法	21
1.12.3 联用技术	21
1.12.4 处理工艺对脱硫的影响	22
1.13 FNA 技术在管道腐蚀中的控制	22

1. 14	生物硫循环去除硫化物的方法	23
1. 15	生物脱硫的利用和控制	25
1. 16	生物硫循环在污水处理中的应用	26
1. 16. 1	硫的生物转化网络	26
1. 16. 2	不同电子供体和受体作用下的生物硫转化	28
1. 16. 3	异养 SRB 利用有机物作为电子供体, 乙酰辅酶 A 或 TCA 循环 提供碳源进行新陈代谢	28
1. 16. 4	关键微生物	30
1. 16. 5	硫化物转化生物技术	34
1. 16. 6	SRB 的生物技术应用	37
1. 16. 7	影响硫酸盐还原生物过程效率的因素	38

第 2 章 试验材料与方法

2. 1	硫化物测定方法	40
2. 1. 1	碘量法	40
2. 1. 2	比色法 (亚甲蓝比色法)	41
2. 1. 3	可溶性硫化物快速检测方法——电极法	42
2. 2	Zeta 电位测定	49
2. 3	含油量的检测方法	50
2. 4	粒径中值和粒径分布的测定	50
2. 4. 1	粒径中值的测定	50
2. 4. 2	粒径分布的测定	51
2. 5	矿化度的测定方法	52
2. 5. 1	氯离子含量的测定 (硝酸银沉淀滴定法)	52
2. 5. 2	碳酸根、碳酸氢根、氢氧根离子含量的测定	53
2. 5. 3	硫酸根离子含量的测定 (铬酸钡分光光度法)	54
2. 5. 4	钙、镁、钡、锶离子测定 (络合滴定法)	55
2. 5. 5	pH 值的测定 (玻璃电极法)	56
2. 6	COD 的测定方法	57
2. 7	BOD 的测定方法	58
2. 8	重金属离子的测定方法	60
2. 9	碱度测定方法	62
2. 10	静止浮升法油水分离测试	63
2. 11	采出液类型测定	64

2.12	采出液含水构成及沉降试验方法	64
2.13	采出液破乳脱水试验方法	64
2.14	模拟聚合物驱原油乳状液稳定性试验方法	65
2.14.1	模拟聚合物驱原油乳状液的配制方法	65
2.14.2	原油乳状液稳定性评价方法	65
2.14.3	不同类型原油破乳剂对原油乳状液稳定性影响试验方法	65
2.15	不同类型破乳剂对原油乳状液稳定性影响检测方法	65
2.15.1	Zeta 电位测定	65
2.15.2	油水界面膜强度测定方法	67
2.15.3	油水平衡界面张力测定方法	67
2.15.4	油水界面剪切流变性测定方法	67
2.16	悬浮固体富集、分离提纯方法	68
2.17	悬浮固体含量测定	68
2.18	腐生菌、铁细菌、硫酸还原菌测定	69
2.19	硫酸根的检测方法	69
2.20	硝酸根的检测方法	70
2.21	亚硝酸根的检测方法	72
2.22	微生物分子生物学高通量测序的方法	74
2.22.1	DNA 提取	74
2.22.2	常用的测序引物	74
2.22.3	生物信息学基础分析	75
2.22.4	生物信息学高级分析	78

第3章 硫酸盐还原菌的特性及危害

3.1	硫酸盐还原菌的生态学	80
3.1.1	自然生境中的硫酸盐还原作用	80
3.1.2	环境因素对 SRB 生长的影响	84
3.1.3	在有机物厌氧消化过程中 SRB 的生态学	85
3.1.4	生物学的硫循环	86
3.1.5	与光营养生物的合营生长	88
3.1.6	与产甲烷菌和产乙酸菌的相互作用	89
3.2	SRB 的特征和活性	90
3.2.1	细菌的多样性	90
3.2.2	生物化学活性	91

3.3 硫酸盐还原菌的分类学研究	92
3.3.1 硫酸盐还原菌分类的研究意义	92
3.3.2 传统分类	93
3.3.3 嗜温革兰氏阴性 SRB	94
3.3.4 嗜热革兰氏阴性 SRB	96
3.3.5 革兰氏阳性 SRB	96
3.3.6 硫酸盐还原古菌	97
3.3.7 嗜温革兰氏阴性 SRB 的系统发育学研究	97
3.3.8 嗜热革兰氏阴性菌的系统发育学研究	99
3.3.9 革兰氏阳性 SRB 的系统发育学研究	100
3.3.10 硫酸盐还原古菌的分类学关系	101
3.3.11 除 16S rDNA 以外的遗传标记分析	101
3.3.12 新的分类方法及技术	102
3.3.13 铁氧化还原蛋白	103
3.3.14 细胞色素 C	103
3.3.15 氢化酶	103
3.3.16 在生态物圈中 SRB 的起源和进化	104
3.3.17 未培养新发现的 SRB	104
3.4 硫酸盐还原菌的呼吸作用	105
3.4.1 硫酸盐的激活及其还原成亚硫酸氢盐	105
3.4.2 亚硫酸氢盐还原的影响	106
3.4.3 连三硫酸盐途径	108
3.4.4 直接六电子还原机理	112
3.5 电子供体/受体的新陈代谢及电子传递蛋白的特征	115
3.5.1 电子供体新陈代谢	115
3.5.2 电子受体代谢途径	116
3.5.3 电子传递链重建	118
3.5.4 用可溶的和/或增溶的蛋白进行蛋白定位与重建	118
3.5.5 原生质球、膜制品、加入或不加入可溶性蛋白	119
3.5.6 蛋白与蛋白之间的相互作用: 计算机建模	119
3.6 溶质运输和细胞能量	120
3.6.1 异化型硫酸盐还原的热力学	120
3.6.2 硫酸盐运输	122
3.6.3 硫酸盐活化的能量学	126
3.6.4 亚硫酸盐还原的能量学	127
3.6.5 质子移动力的产生	128

3.6.6	硫酸盐还原能量学的综合评价	128
3.6.7	通过硫酸盐还原以外的其他过程实现的能量储存	130
3.7	生物腐蚀	132
3.7.1	硫酸盐还原菌参与生物腐蚀	132
3.7.2	非生物腐蚀	133
3.7.3	微生物对腐蚀的影响	134
3.8	结论与展望	142

第4章 硫化物生态抑制调控机理及其调控策略研究

4.1	硫酸盐还原菌及其硫化物对石油工业的危害	143
4.1.1	原油中微生物的活动	143
4.1.2	设备表面的生物活动	144
4.2	石油工业中的防护措施	144
4.2.1	阴极保护与涂层防腐	144
4.2.2	环境变化	144
4.2.3	生物杀伤剂控制	145
4.2.4	油田常用杀菌剂的种类	146
4.3	生物杀菌剂的应用	148
4.3.1	细菌检测系统	148
4.3.2	筛选生物杀菌剂	149
4.3.3	生物杀菌剂投加量	149
4.3.4	影响生物杀菌剂活性的因素	149
4.3.5	提高生物杀菌剂性能的方法	150
4.4	多种控制方法	151
4.4.1	热冲击	151
4.4.2	冰的成核作用	151
4.4.3	微生物生长模式的控制	152
4.5	蓄油池酸化	152
4.6	腐蚀与微生物群落的关系	153
4.6.1	发生腐蚀的可能性与微生物参数的关系	153
4.6.2	相关的腐蚀机制与微生物种群	153
4.7	新型生态调控抑菌抑制硫酸盐还原菌活性的技术	155
4.7.1	微生物控制 SRB 的机理基础	155
4.7.2	新型硝酸盐基处理技术	155

4.7.3 反硝化控制 SRB 的研究现状	156
4.8 关于生态调控抑制硫酸盐还原菌的理论基础研究	160
4.8.1 基质竞争性抑制作用	160
4.8.2 反硝化中间产物抑制理论	162
4.8.3 反应系统内部形成厌氧硫循环的观点	163
4.8.4 电位控制观点	164
4.9 生态调控硫酸盐还原菌机理验证	164
4.9.1 DNB 和 SRB 对基质的竞争作用	164
4.9.2 反硝化中间产物抑制作用	165
4.9.3 自养硝酸盐还原菌的氧化作用	169
4.10 反硝化细菌底物选择作用——新理论的提出	171
4.10.1 同时反硝化和硫酸盐还原功能菌株的分离和功能验证	171
4.10.2 反硝化细菌的系统发育分析及功能验证	177
4.10.3 反硝化细菌底物选择作用理论的阐述	182
4.11 外加电子受体调控微生物群落功能理论的阐述	182
4.12 大庆七厂葡萄花油田采出水中微生物反硝化和硫酸盐还原 能力分析	183
4.12.1 微生物的反硝化作用机理及影响因素	183
4.12.2 油田采出水中微生物的硝酸盐还原与硫酸盐还原相对能力	184
4.13 污水系统硫化物抑制方案及其工艺节点硫化物控制策略	187
4.13.1 油田细菌控制方法和技术评价	187
4.13.2 油田回注水系统细菌控制技术优化研究	188
4.13.3 硫酸盐还原菌活性生态抑制适应的投药点	192
4.13.4 硫酸盐还原菌活性生态抑制剂加药方法和加药原则	192
4.13.5 采油七厂葡三联污水处理站硫化物控制方法和主要工艺段	193

第 5 章 葡萄花油田地面系统水质特性及对现有工艺的影响

5.1 葡三联污水系统各工艺节点硫化物化验分析	195
5.1.1 取样点和取样位置说明	195
5.1.2 葡三联地面污水处理系统工艺段的常规水质分析	195
5.1.3 葡三联地面污水处理系统工艺段矿化度的分析	203
5.1.4 葡三联地面污水处理系统硫元素及其碳组成分析	204
5.1.5 水质波动范围	205
5.2 典型地面污水处理系统水质组成以及污染物分析	206

5.2.1	从井口采出液到整个地面污水处理系统典型的工艺段到注入井的工艺段的水质分析	206
5.2.2	葡三联的污水组成成分分析	208
5.2.3	葡四联污水工艺污水成分分析	253
5.3	典型的油田生产废水污染物组成分析和对现有污水处理系统的影响评价以及改进措施	284
5.3.1	洗井水的成分组成分析	284
5.3.2	不同掺混比例洗井水对现有污水站来水的油水分离、破乳能力以及石油类、悬浮物去除的影响	291
5.3.3	洗井水对现有污水处理系统的处理效果及方法和措施以及洗井水的处理工艺方法	296
5.3.4	注水管线冲洗水对污水站来水油水分离、破乳能力以及石油类、悬浮物去除的影响	303
5.3.5	注水管线冲洗水对现有污水处理系统的处理效果及方法和措施	307

第6章 葡萄花油田地面系统硫酸盐还原菌的种类及分布特征

6.1	高通量测序在油田环境微生物群落分析中的应用	309
6.2	微生物高通量测序的试验材料与方法	310
6.2.1	主要仪器设备和实验材料	310
6.2.2	主要仪器和设备	310
6.2.3	油田油藏样品和含油污水的 DNA 提取方法	311
6.2.4	高通量测序生物信息学的分析方法	312
6.3	葡三联井口和地面系统的微生物群落组成	313
6.3.1	葡 191-85 井口的微生物群落组成分析	313
6.3.2	油岗来水的微生物群落组成分析	316
6.3.3	一沉出口的微生物群落组成分析	317
6.3.4	二沉出口的微生物群落组成分析	319
6.3.5	悬浮污泥出口的微生物群落组成分析	321
6.3.6	一滤出口的微生物群落组成分析	322
6.3.7	二滤出口的微生物群落组成分析	324
6.3.8	污水岗出口(去注)的微生物群落组成分析	325
6.3.9	葡三联地面污水处理系统硫酸盐还原菌的来源与组成分析	327
6.4	葡四联的污水处理系统的微生物群落解析	328

6.4.1	三联来水的微生物群落组成分析	328
6.4.2	横向流进口的微生物群落组成分析	329
6.4.3	横向流出口的微生物群落组成分析	331
6.4.4	一滤出口的微生物群落组成分析	333
6.4.5	二滤出口的微生物群落组成分析	335
6.4.6	葡四联地面污水处理系统中的微生物群落组成分析	336
6.5	洗井水的微生物群落解析以及硫酸盐还原菌的组成	337
6.6	葡509管道水微生物群落以及硫酸盐还原菌的组成分析	339
6.7	关于硫酸盐还原菌群落的变化、分布以及数量的讨论	341
6.7.1	葡三联的地面系统中硫酸盐还原菌属的数量和分布	343
6.7.2	葡四联的地面系统中硫酸盐还原菌属的数量和分布	344
6.8	葡萄花油田地面系统微生物群落组成及硫酸盐还原菌种类	345

第7章 油田硫化物的提取方法及其组成分析

7.1	含硫化物的水样的采集方法	349
7.2	水中的硫化物提取方法	350
7.2.1	油水分离离心提取法硫化物提取	350
7.2.2	油水分离膜过滤硫化物提取	350
7.2.3	硫酸锌固定法	352
7.3	硫化物的组成成分分析	353
7.3.1	离心后的悬浮物和硫化物（油中硫化物）	354
7.3.2	离心后的悬浮物和硫化物（水中硫化物）	358
7.3.3	液相中有机物硫的存在形式	361
7.4	水中硫化物的组成分析	368

第8章 硫化物收集池中硫化物氧化剂及其应用效果研究

8.1	硫化物去除剂的主要成分组成	370
8.2	室内试验的验证	370
8.2.1	硫化物收集池的取样点	370
8.2.2	室内氧化剂去除效果研究	371
8.2.3	室内硫化物氧化剂结合工艺处理效果	372
8.3	气浮除油以及收集池中硫化物去除试验（室内评价）	374

8.4 硫化物氧化剂对硫化物收集池污水作用前后的物质变化	376
8.4.1 氧化剂处理前的 GC-MS 图谱分析	376
8.4.2 硫化物含油污水通过氧化剂氧化后的 GC-MS 图谱	379
8.5 硫化物收集池污水中硫化物氧化剂现场试验	381
8.5.1 现场装置需要的场地和电压等	381
8.5.2 运行方式	381
8.5.3 现场装置摆放	382
8.5.4 现场反应器运行	382
8.6 现场试验去除效果分析	383
8.6.1 不加氧化剂的处理效果 (连续流试验)	383
8.6.2 来水加入氧化剂 10min 后, 气浮出水和含油中的硫化物变化 情况	384
8.6.3 来水加入氧化剂 20min 后, 气浮出水和含油中的硫化物变化 情况	384
8.6.4 来水加入氧化剂 30min 后, 气浮出水和含油中的硫化物变化 情况	385
8.6.5 长时间作用下的氧化效果 (药剂提前加入), 气浮出水和含油中 的硫化物变化情况	385
8.7 固定作用时间下加药浓度的优化	386
8.7.1 试验的方案	386
8.7.2 氧化剂 (0.1mL/L) 作用 30min 后气浮效果分析	386
8.7.3 氧化剂 (0.5mL/L) 作用 30min 后气浮效果分析	387
8.7.4 氧化剂 (1mL/L) 作用 30min 后气浮效果分析	387
8.7.5 氧化剂 (1.5mL/L) 作用 30min 后气浮效果分析	388
8.7.6 氧化剂 (2mL/L) 作用 30min 后气浮效果分析	388

第 9 章 硫化物生态抑制剂现场调控应用研究

9.1 硫化物生态抑制剂的主要成分组成	390
9.2 室内试验的配伍性试验	392
9.2.1 与杀菌剂母液的配伍性试验	392
9.2.2 与现场用的杀菌剂稀释液的配伍性试验	393
9.3 与现有絮凝剂的配伍性试验	394
9.3.1 与絮凝剂母液的配伍性试验	394
9.3.2 与絮凝剂稀释液的配伍性试验	395

9.4 现场杀菌剂和生态抑制剂的配伍性试验	396
9.5 生态抑制剂现场试验（单独投加）+ 絮凝剂（单独）（2015 年 的试验）	397
9.5.1 现场加药和加药方式	397
9.5.2 现场加药试验效果分析	397
9.6 生态抑制剂现场试验（单独投加）+ 絮凝剂（单独）（2016 年 的试验）	401
9.6.1 硫酸盐还原菌生态抑制现场试验药剂的方案	401
9.6.2 现场试验数据监测	401
9.7 生态抑制剂加入前后微生物群落的解析	407
9.7.1 高通量测序生物信息学的分析方法	407
9.7.2 未加药、加厂家杀菌剂和生态抑制剂下对微生物群落变化 的影响	408
9.8 现场生态抑制的总结	410
9.9 地面污水处理工艺生态抑制总结	411
9.9.1 对生态抑制机理研究的总结	411
9.9.2 现场生态抑制的总结	411

参考文献