

Research of Oily Sludge Treatment Technology and
Technological Application

油田含油污泥处理技术及 工艺应用研究

陈忠喜 魏利 著



科学出版社

内 容 简 介

含油污泥是油田开发生产过程中,在钻井、压裂、试采、作业、原油处理、含油污水处理、原油储运等方面产生的主要污染物之一,含油污泥得不到及时处理,将会对生产区域和周边环境造成不同程度的影响。本书是作者通过多年在大庆油田开展调质-离心、电化学生物耦合、含油土壤生物修复等研究工作,积累了大量生产现场的数据资料,同时收集了我国主要油田油泥和油砂的处理技术与工艺资料,经过整理撰写而成的,全面反映了我国含油污泥处理的现状与技术水平,提出了许多新观点和新理论,内容新颖、信息量大、理论体系脉络完整,具有较强的实用性,是理论与实践相结合的成果。

本书可以作为从事油田含油污泥处理、固体废弃物处理、环境微生物、环境科学与工程等专业的研究生及高校教师的教学用书,也可以作为相关学科生产一线的研究人员和工作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

油田含油污泥处理技术及工艺应用研究=Research of Oily Sludge Treatment Technology and Technological Application/陈忠喜,魏利著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035432-7

I. ①油… II. ①陈… ②魏… III. ①油田-污泥处理-研究 IV. ①X741.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 203856 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:林青梅
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 9 月第一次印刷 印张: 28 1/4 插页: 18

字数: 552 000

定价: 128.00 元

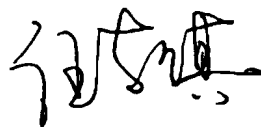
(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

随着现代科学技术的不断进步，含油污泥的处理成为近年来环境保护技术研究的热点和难点，如果处理不当将造成二次污染。我国在油田环保方面起步较晚，含油污泥的处理没有得到足够的重视，近几年才真正意义上开始进行含油污泥处理，国外技术成功引进的案例较少。油田在生产施工过程中，不可避免地产生大量含油污泥。油田含油污泥主要包括各种施工作业产生的落地油泥、沉降罐污泥、三相分离器油泥及生产事故产生的溢油污泥等。随着原油开采的不断深入，含油污泥总量不断增加，每年将新产生含油污泥几十万吨，对环境造成的污染日趋严重。含油污泥已被列入《国家危险废物名录》，按照《中华人民共和国清洁生产促进法》要求必须对含油污泥进行无害化处理。国内外耗费了大量人力、物力进行含油污泥有效处理的研究，相继尝试过焚烧、固化、脱水、回注、洗油、生物等技术方法处理含油污泥，但到目前为止还没有研发成功一种既高效又经济的技术。现行的许多方法视含油污泥为废物，仅仅利用了含油污泥的燃烧热，忽略了含油污泥本身所具有的资源价值。随着天然资源的短缺和固体废物排量的激增，许多国家把固体废物作为“资源”积极开展综合利用，固体废物已逐渐成为可开发的“再生资源”，含油污泥资源化利用将是其最终处置的根本方式。

作者根据多年来在生产和科研一线获取的实践经验，以近年来新兴的含油污泥处理技术为主线，依据含油污泥处理基本原理的不同对其进行分类及归纳总结，探讨不同处理要求和工艺条件下，各种工艺技术在含油污泥处理、环境工程治理等领域的应用。另外，该书内容充分体现了理论联系实际的思想，结合含油污泥处理技术在解决实际工程问题、指导工程实践中的应用，体现了该类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，该书在遵循全面落实科学发展观的基础上，汇集了调质-机械脱水工艺、焚烧工艺、热解工艺、生物处理技术、电化学生物耦合、油泥资源化技术等工艺技术与我国经济、环境、社会健康及可持续发展密切相关的含油污泥处理高新技术，将极大地满足从事环境化学、环境微生物学、环境工程、给水排水等领域的教学、科研、工程技术人员对此类技术的需求。



2012年6月

前 言

我国在油田环境保护方面起步较晚，含油污泥的处理没有得到足够重视，鲜有成熟的应用工艺和实例。含油污泥种类繁多、性质复杂，相应的处理技术和设备也呈现多元化趋势，目前含油污泥处理技术大致可分为调质-机械脱水工艺、热处理工艺（化学热洗、焚烧、热解吸）、生物处理法（地耕法、堆肥法、生物反应器）、溶剂萃取技术及对含油污泥的综合利用等。含油污泥已被列为危险固体废弃物，随着环保法规的逐步完善和企业技术进步的要求，含油污泥的污染治理技术已日益引起人们的关注和重视。

含油污泥的处理措施众多，每种方法都有其自身的优缺点和适用范围。仅靠单一的处理工艺很难满足环保的要求，而且从目前的发展趋势来看，将各种工艺有机组合，加强污泥的深度处理是发展的趋势。含油污泥直接填埋或将含油污泥脱水制成泥饼等简单处理措施是我国多数油田采用的主要方法，但这种方法带来了一定程度上的经济损失和环境污染。随着各项处理技术的日臻完善，焚烧法、筛分-调质离心法等处理措施将是污泥前处理的主要方向，而含油污泥的深度处理方法之一“电化学生物耦合处理”具有更广阔的发展前景。同时鉴于含油污泥中成分复杂，应及时分级、分阶段处理，从而达到含油污泥的无害化处理和资源化应用。

本书在国内首次集中阐述了油田含油污泥处理技术及工艺在环境保护与新能源开发等方面的应用实例，以含油污泥为研究对象，旨在利用各种工艺技术实现能源的回收，完成含油污泥的资源化利用。全书共 11 章。第 1 章绪论，分析了我国含油污泥处理的必要性及国内外含油污泥处理的现状，并对含油污泥处理发展趋势进行展望；第 2 章含油污泥特性、检测方法 & 处理标准，介绍了含油污泥的常规检测方法及含油污泥处理标准；第 3 章含油污泥减量化处理工艺技术研究 & 应用，介绍了含油污泥在污水处理过程中的减量化及含油污泥脱水工艺及技术；第 4 章筛分-调质-离心处理工艺技术研究 & 应用，介绍了筛分-调质-离心的原理及工艺发展现状，尤其以大庆油田采油四厂的筛分-调质-离心工艺为重点进行介绍，该工艺已经成为油田筛分-调质-离心的示范工程；第 5 章电化学生物耦合含油污泥深度处理工艺技术研究，主要介绍了电化学、微生物处理的原理及电化学生物耦合处理的应用；第 6 章超热蒸汽喷射和超声清洗工艺技术研究，介绍了超热蒸汽喷射处理含油污泥的工艺和技术特点及超声技术实际工程应用；第 7 章热解法处理工艺技术研究；第 8 章含油污泥焚烧处理工艺技

术研究及应用；第9章含油污泥清洗剂及其应用；第10章含油污泥资源化技术研究，主要介绍了含油污泥资源化，包括橡胶填料剂和污泥调剖技术等；第11章含油土壤生物修复技术研究，介绍了含油污染土壤的生物修复技术与原理及其在大庆油田的实际工程应用。总之，本书系统地介绍了含油污泥处理的技术原理及工艺，并归纳总结了其在环境污染治理与新能源回收开发等方面的应用，有助于增进读者对这类新兴技术的理解与认识。

本书由陈忠喜和魏利等共同撰写，具体分工如下：第1章由陈忠喜、魏利撰写；第2章由舒志明、魏利、李毅、乔明等撰写；第3章由古文革、黄文生、张国华、李枫、王明信、魏利撰写；第4章由夏福军、黄松、张宏奇、马骏、白明银等撰写；第5章由魏利、孙景欣、卢中民、王昭阳等撰写；第6章由陈忠喜、王玉晶、李福章、姬生柱、李中原等撰写；第7章由谢加才、王万福、张巧灵、陈忠喜等撰写；第8章由魏利、丁慧、孙绳坤、陈忠喜等撰写；第9章由魏利、郭书海、朱玉萍、张国华等撰写；第10章由张昌兴、张焱、韩专、匡少平、孙绳坤、杨敬民、陈忠喜等撰写；第11章由张宝良、朱玉萍、刘广民、陈忠喜、赵秋实等撰写。全书最后由陈忠喜、魏利统稿。

本书的撰写一直得到哈尔滨工业大学任南琪院士的关怀，任南琪院士在百忙之中为本书作序，在此表示衷心的感谢。

石油工程建设专业标准化委员会设计分标委王小林，大庆油田有限责任公司李杰训、匡丽、孙晓雷、解起生、邵华佩、白春云，以及大庆油田设计院郑琦、吴迪、冯涛对本书的编写给予了大力的支持与帮助，同时大庆油田设计院水化室工作人员为本书的出版做了大量的工作。在此对支持和关心本书撰写的领导、专家和同事表示衷心的感谢。

本书的出版得到了大庆油田含油污泥处理项目、国家自然科学基金(No. 50908063)、哈尔滨工业大学优秀青年教师基金(No. NQQQ92324547)、清华大学国家重点实验创新基金项目(10K08ESPCT)、城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金(HITQN01)、中国博士后科学基金第四十七批(20100470346)、国家创新团队项目(No. 50821002)的资助。

在本书的撰写和出版过程中，得到了北京惠博普能源技术有限公司(HBP)的资助，作者深表感谢。

由于作者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 含油污泥处理的意义和必要性	1
1.2 国内外相关技术及发展趋势	2
1.2.1 国内外含油污泥的处理现状	2
1.2.2 国外油田含油污泥处理关键技术	3
1.3 国内油田含油污泥处理技术	8
1.4 含油污泥处理技术的发展前景与展望	9
第 2 章 含油污泥特性、检测方法 & 处理标准	11
2.1 含油污泥来源及特性.....	11
2.1.1 大庆油田含油污泥来源及特性	11
2.1.2 辽河油田含油污泥来源及特性	18
2.1.3 大港油田含油污泥来源及特性	22
2.2 含油污泥的检测方法.....	25
2.2.1 含油污泥中油类污染物的测定方法	25
2.2.2 含泥率的测定	29
2.2.3 含油污泥中的矿物与有机污染物分析	29
2.2.4 含油污泥处理后油、水、泥三相的组分分析	29
2.2.5 含油污泥 pH 的测定	31
2.2.6 生物表面活性剂分析	32
2.2.7 含油污泥、含油土壤微生物观察及测定	32
2.3 含油污泥处理标准.....	38
2.3.1 国外含油污泥处理标准	38
2.3.2 国内含油污泥处理标准	40
第 3 章 含油污泥减量化处理工艺技术研究 & 应用	42
3.1 含油污泥减量化现状及研究进展.....	42
3.1.1 技术背景及其现实意义	42
3.1.2 污泥减量化技术的理论基础	42
3.1.3 含油污泥减量化处理技术现状	43

3.2	含油污泥源头减量化处理技术研究与应用	47
3.2.1	预氧化降污泥技术研究与应用	48
3.2.2	复合碱-污泥回用技术研究	51
3.2.3	含油污泥脱水药剂及其脱水性能	52
3.3	含油污泥排泥技术	54
3.3.1	积泥坑停产排泥工艺	54
3.3.2	压力排泥工艺	55
3.3.3	静压排泥技术	55
3.3.4	负压排泥技术	57
3.3.5	内置式机械刮吸泥技术	59
3.3.6	机械刮泥机排泥技术	61
3.4	含油污泥浓缩工艺技术	62
3.4.1	含油污泥特性	62
3.4.2	污泥自然浓缩试验	63
3.4.3	加药后污泥沉降时间效果试验	65
3.4.4	污泥浓缩工业化试验	66
3.5	污泥脱水技术	70
3.5.1	重力脱水-自然干化	70
3.5.2	板框压滤脱水	70
3.5.3	厢式压滤脱水	72
3.5.4	带式压滤脱水	73
3.5.5	离心脱水	75
3.6	两级水力旋流污泥稠化工艺应用	75
3.6.1	试验工艺	75
3.6.2	入口来液	76
3.6.3	脱水率评价方法	77
3.6.4	旋流浓缩试验	77
3.6.5	该工艺的特点	80
3.7	叠片螺旋式固液分离工艺应用	80
3.7.1	叠片螺旋式污泥脱水系统构成及工作原理	80
3.7.2	主要技术特点	81
3.7.3	现场实施效果	82
第4章	筛分流化-调质-离心处理工艺技术研究及应用	85
4.1	国外研究和应用现状	85
4.1.1	加拿大 MG 工程公司的 APEX 技术及应用	85

4.1.2	美国 Hydropure Technologies Inc. 的含油污泥处理 (STS)	90
4.1.3	德国 Hiller GmbH 公司的含油废物处理	91
4.1.4	德国 Hans Huber AG 公司的含油污泥成套预处理设备	91
4.1.5	荷兰 G-force CE bv 公司的油污处理设备	92
4.1.6	不同国家的含油污泥处理工艺方案比较	93
4.2	筛分-流化-调质-离心处理工艺原理	94
4.2.1	筛分-流化	94
4.2.2	调质	95
4.2.3	离心脱水	95
4.3	含油污泥流化-调质-离心处理试验研究	96
4.3.1	试验材料	96
4.3.2	试验方法	96
4.3.3	试验结果及分析	97
4.4	含油污泥筛分-流化-调质-离心处理工艺技术应用	100
4.4.1	含油污泥处理工程设计基本参数	100
4.4.2	处理规模	100
4.4.3	技术指标	102
4.4.4	主体处理工艺描述	102
4.4.5	筛分-流化-调质-离心工艺物料平衡	109
4.4.6	筛分-流化-调质-离心处理工艺现场运行结果	112
第5章	电化学生物耦合含油污泥深度处理工艺技术研究	124
5.1	含油污泥深度处理研究背景	124
5.2	电化学处理技术原理及应用	125
5.2.1	电化学处理技术原理	125
5.2.2	含油土壤中有有机污染物在电场中的行为及研究进展	127
5.2.3	电化学处理土壤中有有机污染物的工艺研究	129
5.2.4	含油污泥电化学处理工业化应用	130
5.2.5	含油土壤电化学处理技术的优势	132
5.3	微生物降解技术	133
5.3.1	微生物降解石油的机理	134
5.3.2	微生物降解石油过程的关键因素	137
5.4	大庆油田电化学生物耦合含油污泥深度处理技术	138
5.4.1	电化学生物耦合处理技术	138
5.4.2	研究的目的是和意义	139
5.4.3	含油污泥高效降解菌剂开发	139

5.4.4	室内电场作用方式和电场强度的选择	144
5.4.5	室内电化学生物耦合处理效能研究	149
5.4.6	电化学生物耦合处理现场试验工艺	152
5.4.7	电化学生物耦合处理现场试验	153
第6章	超热蒸汽喷射和超声清洗工艺技术研究	171
6.1	含油污泥离心脱水-超热蒸汽喷射处理工艺技术	171
6.1.1	“污泥离心脱水+超热蒸汽喷射处理”技术研究背景	171
6.1.2	超热蒸汽喷射原理	172
6.1.3	“污泥离心脱水+超热蒸汽喷射处理”工艺	172
6.1.4	现场工程应用	177
6.2	超声清洗处理技术研究	180
6.2.1	超声清洗技术原理	180
6.2.2	超声技术在原油破乳方面的应用与研究	181
6.2.3	主要研究内容和技术路线	182
6.2.4	超声技术清洗含油污泥试验	183
6.2.5	超声脱稳技术及其应用	196
第7章	热解法处理工艺技术研究	202
7.1	热解法的原理及国内外应用现状	202
7.1.1	热解法的原理	202
7.1.2	热解法国内外应用现状	202
7.2	含油污泥热解技术研究的技术路线	204
7.3	大港油田含油污泥热解试验研究	204
7.3.1	含油污泥室内热解试验	204
7.3.2	含油污泥现场小型热解试验	213
7.3.3	含油污泥处理现场试验	219
7.4	辽河油田热解法处理工艺技术研究	227
7.4.1	室内试验研究	227
7.4.2	现场试验	231
7.5	新疆油田含油污泥热解工艺技术研究	244
7.5.1	污泥基本特征	244
7.5.2	室内热解处理试验	244
7.5.3	中试热解处理试验	245
7.6	微波热解技术处理含油污泥工艺技术研究	247
7.6.1	微波热解机理	247
7.6.2	微波在污泥处理技术方面的研究进展	248

7.6.3	微波处理含油污泥室内试验	250
7.6.4	微波处理含油污泥现场试验	252
第8章	含油污泥焚烧处理工艺技术研究及应用	256
8.1	焚烧原理	256
8.2	污泥焚烧技术	256
8.3	污泥焚烧技术的应用现状	259
8.4	基于不同焚烧炉类型的油泥焚烧工艺	260
8.4.1	循环流化床焚烧工艺	260
8.4.2	旋转窑焚烧工艺	260
8.4.3	旋转窑热解工艺	262
8.4.4	层燃技术和热解气化技术相结合焚烧工艺	263
8.4.5	不同焚烧工艺的方案比较分析	264
8.5	含油污泥室内焚烧试验	265
8.5.1	含油污泥的基本特性	265
8.5.2	室内焚烧试验分析的泥组分性质	265
8.5.3	室内焚烧试验评价	266
8.6	辽河油田含油污泥焚烧处理工艺技术研究	266
8.6.1	焚烧试验	266
8.6.2	含油污泥焚烧处理工艺及应用	270
8.6.3	主要工程量	279
8.7	胜利油田油泥砂焚烧处理工艺应用研究	280
8.8	超热蒸汽喷射污泥处理后焚烧试验	282
第9章	含油污泥清洗剂及其应用	283
9.1	含油污泥清洗剂作用机理及分类	283
9.1.1	化学清洗剂的作用机理	283
9.1.2	清洗剂的分类	284
9.2	生物表面活性剂的制备及油泥处理效能研究	287
9.2.1	研究目的和意义	287
9.2.2	生物表面活性剂的研究现状	287
9.2.3	研究技术路线	290
9.2.4	生物表面活性剂的制备方法	291
9.2.5	含油污泥生物处理效果分析讨论	296
9.3	生物酶制剂对油泥砂的清洗效能研究	303
9.3.1	生物酶的研究和应用现状	303
9.3.2	国内外油泥砂处理方法研究进展	304

9.3.3	油田油泥砂成分分析	305
9.3.4	油泥砂处理工艺	305
9.4	含油污泥化学清洗药剂的制备及去除效能研究	308
9.4.1	化学清洗药剂的筛选原则和技术要求	308
9.4.2	SL1001 清洗药剂的制备	309
9.4.3	SL1001 清洗剂除油效果试验	309
9.4.4	复合型清洗破乳剂的研制	313
9.5	清洗剂配套设备试验	319
9.5.1	油泥清洗设备原理与设计	319
9.5.2	室内反应器试验	324
9.5.3	含油污泥处理现场试验	328
第 10 章	含油污泥资源化技术研究	331
10.1	含油污泥资源化定义	331
10.2	含油污泥调剖技术研究	331
10.2.1	含油污泥调剖原理	331
10.2.2	含油污泥除油预处理技术	332
10.2.3	含油污泥体膨颗粒调剖剂的合成及条件优化	336
10.2.4	污泥体膨颗粒调剖剂的理化性能评价	339
10.2.5	污泥调剖剂室内放大聚合试验	343
10.2.6	含油污泥调剖剂封堵性能	343
10.2.7	含油污泥调堵剂的生产	345
10.2.8	含油污泥调堵剂与膨润土调堵剂的性能对比	345
10.2.9	含油污泥调堵剂现场施工方案	346
10.2.10	现场施工	348
10.2.11	实施效果	350
10.3	含油污泥制备橡胶填料剂研究	354
10.3.1	研究背景	354
10.3.2	含油污泥加工成橡胶填料剂的理论依据	355
10.3.3	油田含碳酸钙污泥成分特征	357
10.3.4	含碳酸钙污泥制备橡胶填料剂的生产工艺	358
10.4	含油污泥制备辅助新型燃料技术	361
10.4.1	研究背景	361
10.4.2	含油污泥作为辅助燃料技术试验	362
10.5	含油污泥固化技术研究	367
10.5.1	固化技术原理	367

10.5.2 含油污泥固化前处理	367
10.5.3 固化技术制作道砖试验	369
10.5.4 烧结制作建筑砌块试验	370
第 11 章 含油土壤生物修复技术研究	372
11.1 含油土壤修复技术研究进展	372
11.1.1 土壤的石油污染	372
11.1.2 土壤石油污染修复技术	373
11.1.3 土壤石油污染生物修复技术	378
11.2 影响石油污染土壤生物修复技术效果的因素	386
11.2.1 微生物及其活性	386
11.2.2 石油污染物的生物可利用性和浓度	391
11.2.3 土壤特性	392
11.2.4 其他因素	393
11.3 降解石油微生物的鉴定与生物修复制剂的研制	394
11.3.1 石油污染土壤的类型	394
11.3.2 降解石油微生物的筛选、鉴定	395
11.3.3 石油污染土壤微生物种群动态变化分析	399
11.3.4 生物修复制剂的研制	403
11.4 室内试验研究	407
11.4.1 不同试验参数对生物修复技术处理效果的影响	407
11.4.2 生物修复产品的效果评价	411
11.4.3 试验结果	413
11.5 原油污染土壤的现场试验研究	413
11.5.1 以污染井场为主体的土壤生物修复现场试验	414
11.5.2 以联合站内清除的含油污泥为主体的生物修复试验	418
11.5.3 以落地原油回收处理点的含油污泥为主体的生物修复现场试验	419
11.5.4 现场试验结论	419
11.6 技术分析及推广应用前景分析	421
11.6.1 技术分析	421
11.6.2 处理成本及社会效益分析	421
11.6.3 推广应用前景分析	422
参考文献	424
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 含油污泥处理的意义和必要性

含油污泥是油田开发生产过程中,在钻井、压裂、试采、作业、原油处理、含油污水处理、原油储运等方面产生的主要污染物之一,含油污泥得不到及时处理,将会对生产区域和周边环境造成不同程度的影响^[1~4]:含油污泥中的油气挥发,使生产区域内空气质量总烃浓度超标;散落和堆放的含油污泥污染地表水甚至地下水,使水中 COD、BOD 和石油类严重超标;含油污泥含有大量的原油,造成土壤中石油类超标,土壤板结,使区域内的植被遭到破坏,草原退化,生态环境受到影响。在原油生产系统中,一部分污泥在脱水和污水处理系统中循环,造成脱水和污水处理工况恶化,注入水水质超标致使注入压力越来越大,不仅造成了能量的巨大损耗,还会导致井筒内套管变形,影响原油生产。由于含油污泥中含有硫化物、苯系物、酚类、蒽、茈等有毒有害物质,而且原油中所含的某些烃类物质具有致癌、致畸、致突变作用,油田含油污泥已被国家列为危险固体废物(HW08),纳入危险废物进行管理。

随着国家对环保要求日趋严格,含油污泥减量化、无害化、资源化处理将成为污泥处理技术发展的必然趋势。含有石油和其他有害物质的污泥,采用一定的回收处理技术,可将污泥中的原油回收,在实现环境治理和防止污染的同时,可以取得一定的经济效益;另外处理后的污泥可用于高渗透率油层调剖,或再采用相应治理技术处理,达到国家排放标准,或者铺路等综合利用,能够彻底实现含油污泥的无害化处理^[5~8]。因此,对含油污泥进行经济有效的治理与利用对油田可持续发展具有重要的实际意义。

油田在开发生产过程中,不可避免地产生大量含油污泥。油田含油污泥主要包括落地油泥、沉降罐污泥、三相分离器油泥及生产事故产生的溢油污泥等。随着原油开采的不断深入,含油污泥总量不断增加,经初步调查我国每年新产含油污泥 4×10^5 t 左右,对环境造成的污染日趋严重。含油污泥已被列入《国家危险废物名录》,按照《中华人民共和国清洁生产促进法》要求必须对含油污泥进行无害化处理。目前国内外动用了大量人力、物力进行含油污泥有效处理的研究,相继尝试过焚烧、固化、脱水、回注、生物等方法处理含油污泥,但到目前为止还没有研发成功一种既高效又经济的技术。现行的许多方法视含油污泥为废物,

仅仅利用了含油污泥的燃烧热,忽略了含油污泥本身所含有的资源价值。随着天然资源的短缺和固体废物排量的激增,许多国家把固体废物作为“资源”积极开展综合利用,固体废物已逐渐成为可开发的“再生资源”,含油污泥资源化利用将是其最终处置的根本方式。我国由于在油田环保方面起步较晚,含油污泥的处理没有得到足够的重视,国内这方面的技术研究较少,国外技术成功引进的案例更少^[9,10]。

1.2 国内外相关技术及发展趋势

1.2.1 国内外含油污泥的处理现状

含油污泥种类繁多、性质复杂,相应的处理技术和设备也呈现多元化趋势,目前含油污泥处理技术有筛选流化-调质-离心工艺、热处理工艺(化学热洗、焚烧、热解析)、生物处理法(地耕法、堆肥法、生物反应器)、溶剂萃取技术及对含油污泥的综合利用等。目前,国内外应用较多并且比较成功的是采用物理法和化学法(离心分离加化学药剂处理)相结合,即调质-机械脱水工艺,该技术比较成熟,在欧美各地的油田应用广泛并且处理效果良好。该方法的不足是处理效果会受污泥来源的影响,对于含有大量的砖瓦、草根、塑料等杂物的污泥,需要配套预处理设备和工艺。

胜利油田、辽河油田和河南油田近几年采用焚烧法处理含油污泥,缺点是污泥中具有较高经济价值的原油没有回收利用。国内其他油田采用的污泥处理工艺只是简单地进行浓缩和分离。国外如加拿大 MG 工程公司采用的是机械脱水工艺(配合自己专有的药剂);荷兰吉福斯公司采用的是调质-机械脱水+生物处理法;德国 HILLER 公司采用的是调质-机械脱水+电化学工艺;新加坡的 CLEANSEAS 公司则采用机械脱水+美国 ADTU 热解吸的工艺;而法国、德国的石化企业多采用焚烧的方式。溶剂萃取技术目前只局限于实验室研究,很难达到工业化应用。减量化、无害化、资源化处理仍然是目前含油污泥处理的目标和趋势。

在国际上,各地由于在地质和地理条件上的差异,土壤对油类有机物的耐受程度不同,因此对于污泥中的总石油烃(TPH)或者含油量,世界上没有统一的标准,但是很多国家和地区都根据本地区的实际情况以法规或指导准则的形式提出了相应的现场专用指标,对土壤或污泥中的含油量及有机物和重金属含量提出了相应的限制。大部分含油污泥处理指标要求都与污泥的最终处置方式有直接的关系。不同国家对处理后含油污泥中的含油量要求的指标见表 1.1。

表 1.1 不同国家对处理后含油污泥中剩余油含量要求的指标

国 别	土壤中含油量的要求 (质量分数)/%	
	填埋处置	筑路、铺路
加拿大	≤ 2	≤ 5
美国	≤ 2	≤ 5
法国	≤ 2	—

针对固体废物我国出台了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，并在此基础上制定了《国家危险废物名录》和《危险废物鉴别标准》，且对危险废物的处置给出规定，制定了《危险废物填埋污染控制标准》(GB 18598—2001)和《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2001)等，在这些标准和法规中，将含油污泥归类为危险固体废物，但是并没有对含油污泥中的含油量提出量化指标。大庆油田根据已建和在建的含油污泥处理站筛分流化-调质-离心处理工艺，依据国外对含油污泥处理后污泥中剩余油含量要求的指标 ($\leq 2\%$) 开展处理试验，并对处理后的污泥采用微生物处理技术和电化学处理技术进行深度处理，使深度处理后的污泥中含油的指标 $\leq 3\%$ ，满足《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—1984) 的要求。

1.2.2 国外油田含油污泥处理关键技术

荷兰吉福斯公司采用的是生物处理法，加拿大 TDS 公司、美国的 SWACO 公司采用的是热解析技术，法国、德国的石化企业多采用焚烧的方式。随着环保法规的逐步完善和企业技术进步的要求，含油污泥的污染治理技术已日益引起人们的关注和重视，半个多世纪以来，含油污泥处理技术发展很快，常见油泥处理工艺的特点见表 1.2。

表 1.2 常见油泥处理工艺的特点

处理方法	优 点	缺 点	主要适用物料
筛分流化-调质-离心处理工艺	适应性较强，可回收大部分油，实现资源化利用	处理后污泥含油量 $\leq 2\%$ ，满足填埋铺路要求，要达到农用污泥处理标准需要后接深度处理工艺	多种含油污泥
热解法	含油污泥完全无机化，烃类可回收利用；处理速度快；对污泥处理彻底	反应条件要求较高，操作比较复杂；设备投资大，能耗高；处理不好容易产生大气的二次污染	含水量不高，有机物含量高的污泥；经过物理化学方法处理后的含油污泥
焚烧技术	可以较好地解决污泥污染问题，满足环保要求；可以变废为宝，资源化利用；处理量较大	需要掺水煤浆一同燃烧，成本较高，能耗高，设备投资大，工艺技术要求较高，焚烧后可能存在粉尘、 SO_2 等二次污染	含水量不高，烃类含量高的污泥

续表

处理方法	优 点	缺 点	主要适用物料
生物处理技术	避免了污染物的多次转移； 能耗低，处理成本低	处理周期长，对环烷烃、 芳烃处理效果差，对含油 率高的油泥砂难适应，占 地面积大，受气候影响大	含油量较低的污泥
溶剂萃取工艺	效率高，处理彻底，大部 分石油类物质提取回收	对设备密闭性要求较高， 溶剂回收过程较复杂；萃 取剂价格昂贵，过程中存 在部分损失，处理成本高	罐底泥等含油量大的 污泥
调质技术	实现资源化利用	配伍性要求高，需要深入 细致的工作，才能扩大应 用规模	含油量不太高的污 泥

1. 调质-机械脱水技术

机械分离法是指污泥经重力、气浮等方法浓缩后，用机械力使污泥进一步脱水、减容或分离，以便于运输并满足污泥达标排放或利用要求。要通过调质-机械脱水使含油污泥实现油-水-固（无机固体）的三相分离，关键是使其中黏度大的吸附油解吸和破乳。为促进油从固体粒子表面分离，Surerldra 认为加入合适的电解质可增加系统的电荷密度，使它们取代油组分优先吸附在粒子表面，并使粒子更分散，为油从固体颗粒表面脱附创造更好的条件。

Jan 等分别发明了通过含油污泥调质-机械脱水工艺回收油的有关专利技术：通过投加表面活性剂、稀释剂（癸烷）、电解质（NaCl 溶液）或破乳剂（阴离子或非离子）、润湿剂（可增加固体微粒表面和水的亲合力）和 pH 调节剂等，并辅以加热减黏（最佳为 50℃ 以上）等调质手段。含油污泥经过调质后，使污泥的脱水、沉降性能得到很大的改善。

德国 OMW 炼厂和 ESSO 公司应用三相卧式螺旋离心机处理含油污泥，该工艺是把油泥加热至 60~80℃ 并预搅拌或加入有机絮凝剂，处理量 60m³/h，可把含油污泥分为三相，由一台 Z42-3/441 离心机和油泥料泵、电气控制板和钢架组成了一个完整的处理系统。该离心机技术关键是可调叶轮工艺，可根据不同的油水密度差进行调节，在三相离心机后，用一台小型立式叠片分离机进行油相的精炼，可达到满意的处理效果。

在国外炼厂落地油、钻井废液、罐底油泥等含油废弃物的处理中，大部分采用调质-机械脱水的处理工艺，处理后的污泥大部分可以达到直接填埋处理的要求。但是，鉴于目前对废弃物填埋要求越来越严格的发展趋势，这种方法只能作为含油污泥的预处理方法，必将需要辅以后续的深度处理方法，使污泥的处置更彻底。

2. 溶剂萃取技术

萃取是某物质由一相（固相或液相）转移到另一相（为液相）内的相间传质过程，作为一种用以除去污泥所夹带的油和其他有机物的单元操作技术而被广泛研究，其中包括正处于开发阶段的超临界流体萃取。溶剂可分为有机溶剂和超临界溶剂，有机废物从污泥中被溶剂抽提出来后，通过蒸馏把溶剂从混合物中分离出来循环使用。萃取法处理含油污泥不但能有效去除泥中的油，也能有效去除其他微量有害物质。经萃取后大多数泥渣都能达到最佳常规污染控制技术（best demonstrated available technology, BDAT）的要求，回收油则可用于回炼。

早在1991年，炼油厂废物溶剂萃取已被美国环保局评定为最佳已验证可用工艺，它与污泥焚烧处理相比较，溶剂萃取工艺具有容易利用炼油厂现有设备等优点。用过的溶剂可以直接返回炼油厂或者增加辅助设施回收并使之在萃取系统内循环，可以大大降低处理费用，提高该工艺的经济效益。与其他方法相比，萃取法具有以下优越性：①工艺过程简单、快速、选择性高；②易于连续化和远距离操作；③有利于消除污染，改善环境；④节约能量。溶剂萃取在化工、冶金、环境及综合利用方面有广阔的发展前景，近年来随着我国石油化工工业的不断发展，为这项技术的推广奠定了更加稳定的基础，也开发了多种萃取剂和萃取装置，使萃取工艺能更好地应用于实际生产中。目前，在国外，由于成本高，萃取法还没有广泛应用于含油污泥处理。

3. 热处理技术

1) 化学热洗

化学热洗法（也称热脱附法）是美国环保局处理含油污泥优先采用的方法。目前主要用于落地油泥的处理。一般以热碱水溶液反复洗涤，再通过气浮实施固液分离。洗涤温度多控制在70℃左右，液固比2:1，洗涤时间20min，能将含油率为30%的落地油泥洗至残油率1%以下。混合碱可由廉价的无机碱和无机盐组成，也可选用廉价的洗衣粉等。该方法能量消耗低，费用不高，但是目前单纯以回收油污为处理目的的工艺在油田应用较少。

2) 焚烧

焚烧是最彻底的含油污泥处理方法，它能使有机物全部碳化，杀死病原体，使有害的重金属离子固化于焚烧灰渣中，难于溶出，可以最大限度地减少污泥体积。另外，焚烧法处理污泥速度快，不需要长期储存和远距离运输，可以就地焚烧。长期以来一直被国外大多数油田及炼油厂采用，但它对污泥预处理脱水要求严格，污泥含水率达到38%以下时才可不需辅助燃料直接燃烧。

法国、德国的石化企业多采用焚烧的方式，灰渣用于修路或埋入指定的灰渣