



现代力学丛书

管道式油气水 分离技术

吴应湘 许晶禹 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代力学丛书

管道式油气水分离技术

吴应湘 许晶禹 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

油田的油气水分离是一个非常复杂的过程,且气相和液相产品还与操作的压力、温度条件、各相含率、油品条件等密切相关,这也在一定意义上增加了油水分离工艺的难度。油水混合液的分离是油气水分离的重点和难点,本书以工程项目为依托,将研究团队多年的研究工作加以系统整理,共分为七章:第1章和第2章介绍了管道式分离技术应用的基本原理;第3章至第6章分别对不同的管道式分离技术的原理、理论基础、研究过程和成果进行总结,包括:螺旋管道多相分离器、T型管多分岔管路多相分离器、柱型旋流多相分离器和导流片型管道式多相分离器;第7章简要介绍了新型管道式分离技术的现场应用情况,为管道式分离技术的进一步优化和应用推广提供可靠的数据基础。

本书内容丰富,结构清晰,叙述深入浅出,便于自学,可供力学、石油工程、化工等相关专业的高等院校学生与相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

管道式油气水分离技术/吴应湘,许晶禹著. —北京:科学出版社,2017.3
(现代力学丛书)

ISBN 978-7-03-051971-9

I. ①管… II. ①吴… ②许… III. ①油田水—分离 IV. ①TE311

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第042779号

责任编辑:刘信力/责任校对:彭 涛
责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬



2017年3月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 275 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“现代力学丛书”编委会

主 编：郑哲敏

副主编：白以龙

编 委：(按汉语拼音排序)

白以龙 樊 菁 洪友士

胡文瑞 李家春 王自强

吴承康 俞鸿儒 郑哲敏

丛 书 序

“现代力学丛书”是由中国科学院力学研究所编著的一套丛书，由科学出版社出版。本丛书作者为中国科学院力学研究所科研人员、客座研究人员和其他相关人员。出版本丛书的目的是总结和提高我们近年来的科学研究成果，并促进相关学科领域的开拓。中国科学院力学研究所自成立以来，既从事基础研究，也以基础研究为手段，参与和承担了国家和部门委托的许多任务，取得了一系列重要的成果。我们认为，将这些成果分类整理、系统化，并加以提高，在此基础上出版专著，是一件很有价值的事，既有利于中国科学院力学研究所科研工作的进一步提高，也有利于为广大读者获取新的知识，共同促进力学学科的繁荣发展。

本丛书可供相关专业的科研人员和研究生参考。

郑哲敏

二〇〇九年二月于北京

序 (一)

管道式油气水分离是未来油气田开发中油气水分离技术的发展趋势，它不但能有效地节省产液处理设备的占地空间，极大地节省油田开发投资，提高生产效率，而且可突破海上采油平台和采油井井底的空间限制及深海海底的水压限制，解决井底和深海水下油水分离的难题。该技术的发展涉及力学、化学、自动控制等多学科领域，融合了油气水多相流、化学破乳与聚并、界面测试与控制等诸多科学与技术问题。中国科学院力学研究所吴应湘研究员的研究团队在该领域进行了系统、深入的研究，经过二十余年的发展在该领域取得了很好的成果，部分技术已经在油田应用。

经过半个多世纪的发展，管道内油气水多相流动的理论研究已经取得了若干进展，发表的学术论文也很多，但是相关技术的工业现场应用仍不乐观。据我所知，国内外尚未有管道式油气水分离技术方面的学术专著出版，这对于油气水分离领域的科研工作者应该是一大缺憾。吴应湘研究员等以工程项目为依托，将其多年的研究工作加以系统整理，梳理出该领域重要而亟待解决的科学问题等，以专著《管道式油气水分离技术》出版，有望产生重要的学术影响及工业价值。同时，对于很多现场工程师而言，该专著也将有很好的参考作用。

郑哲敏

中国科学院院士 中国工程院院士

序 (二)

管道式分离技术是近年来多相流学科与化工等交叉、融合形成的一个重要研究领域,有着广泛的应用前景。经过二十余年的发展,关于多相流动领域的研究已经取得了若干进展,发表的论文也很多,并且相关技术已经应用于工业现场。吴应湘研究员等将其多年的研究工作加以系统整理,并吸收国内外同行的相关优秀成果,梳理出该领域重要而亟待解决的科学问题,以专著《管道式油气水分离技术》出版,有望产生重要的学术影响及工业价值。对于很多研究者而言,该专著将有很好的参考价值。

曾恒一

中国工程院院士

符号说明

u	速度, m/s
ρ	密度, kg/m^3
μ	动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
R	半径, m
D	管道直径, m; 扩散系数
L	管道长度, m
d	油滴粒径, m
g	重力加速度, m/s^2
T	温度, $^{\circ}\text{C}$
β	体积相含率
q	下标, 第 q 相
α	截面相含率
τ	剪应力, Pa; 松弛时间, s
p	压强, Pa; 概率函数
f	摩擦因子
C_D	阻力系数
Re	雷诺数, $Re = \rho u D / \mu$
F_{bi}	流量配比, 分流比
η	分离效率
ε	湍流能量耗散率
k	湍流动能
F	作用力, N
t	下标, 切向速度; 时间, s
r	径向方向坐标
A	截面面积, m^2
ω	旋转角速度, rad/s
o	下标, 油相
w	下标, 水相
E	能量, J
We	Weber 数, $We = \rho u^2 d / \sigma$

σ	表面张力, N/m
V	体积, m^3
Δp	压降, Pa
max	下标, 最大值
min	下标, 最小值
Q	流量, m^3/h
Eu	Euler 数, $Eu = \Delta p / (\rho u^2)$
Δ	表面粗糙度, m
m	下标, 混合相
θ	下标, 切向
R	相关系数
v	流动速度, m/s
m	质量, kg
a	加速度, m/s^2
λ	黏度比, $\lambda = \mu_d / \mu_c$
e	单位质量能耗速度, J/s
s	周长, m
n	导流片的数量
P_r	压降比, $P_r = \Delta P_1 / \Delta P_2$
k	玻尔兹曼常量
c	摩尔浓度
J	通量
G	分子运动时间尺度快速变化的力
x	位移, m
R	气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$
N	阿伏伽德罗常量, 6.023×10^{23}
V_d^+	累积体积份额
ξ	无量纲曳力系数
ω	涡量
u	速度矢量
F_b	体积力
Π	势函数
0	下标, 初始值
∞	下标, 无穷远处

目 录

丛书序

序 (一)

序 (二)

符号说明

第 1 章 概论	1
1.1 油气水分离的作用	1
1.2 油水分离的基本方法	2
1.3 油水分离器的研究进展 (基本类型)	3
1.4 油田油气水分离器的新需求	12
1.4.1 深水平台多相分离	13
1.4.2 深海海底多相分离	13
1.4.3 采油井井下油水分离	17
参考文献	20
第 2 章 油气水分离的基本理论	22
2.1 重力分离	25
2.2 离心分离	27
2.2.1 受迫涡与自由涡	29
2.2.2 流体中旋涡运动的产生、扩散与衰减	31
参考文献	34
第 3 章 螺旋管道多相分离器	35
3.1 螺旋管中多相分离机理	35
3.2 螺旋管多相分离实验	38
3.2.1 带孔螺旋管的实验方法	38
3.2.2 实验用油的物性参数	39
3.3 螺旋管分离效率比较及分析	41
3.3.1 用第一孔含水率衡量分离效率的分析	41
3.3.2 第一孔含水率降低的分析	43
3.3.3 整体螺旋管分离器的分离效率分析	44
3.4 螺旋管多相分离数值计算	45
3.4.1 基本方程	45

3.4.2 螺旋管多相分离数值计算结果	51
参考文献	54
第 4 章 T 型分岔管路多相分离器	55
4.1 T 型分岔管路多相流动的研究现状	55
4.1.1 两相流型	55
4.1.2 分支管路/主管路管径比	55
4.1.3 T 型分岔管路的管径	56
4.1.4 系统压力	56
4.2 T 型分岔管路多相分离机理	57
4.3 分岔管路多相分离数值模拟	57
4.4 分岔管路多相分离实验研究	63
4.4.1 实验平台	63
4.4.2 实验结果分析	67
参考文献	72
第 5 章 柱型旋流多相分离器	74
5.1 概述	74
5.1.1 理论模型研究进展	74
5.1.2 流场研究进展	76
5.1.3 数值模拟方法在旋流分离器中应用的研究进展	78
5.1.4 旋流器的结构	80
5.2 柱形旋流分离器理论分析	81
5.2.1 旋流器中分散相液滴受力分析	81
5.2.2 旋流器中液滴破碎机理分析	87
5.3 柱形旋流分离器理论分析	92
5.3.1 实验装置系统	92
5.3.2 实验结果及分析	96
5.3.3 油水分离效率的预测	106
5.4 旋流器内油水分离的数值模拟	111
5.4.1 数学模型	111
5.4.2 几何模型	114
5.4.3 模型验证	115
5.4.4 结果分析	116
5.4.5 小结	131
参考文献	132

第 6 章 导流片型管道式多相分离器	138
6.1 管道式导流片型分离器流场实验与分析	140
6.1.1 管道式导流片型分离器流场	140
6.1.2 油水分离可行性分析	150
6.1.3 管道式导流片型分离器油水分离的工作原理	150
6.1.4 油滴在管道式导流片型分离器中的运动分析	151
6.1.5 油滴在旋流场中的破碎及分布规律	154
6.1.6 管道式导流片型分离器油水分离模型	156
6.2 管道式导流片型分离器油水分离性能室内实验研究	160
6.2.1 实验装置	161
6.2.2 导流片型管道式多相分离器实验分析	162
6.2.3 双级管道式导流片型油水分离器分离性能实验	173
6.3 管道式导流片型分离器内油水两相流动的数值计算研究	175
6.3.1 管道式导流片型分离器流场特性	175
6.3.2 设计参数优化分析	178
6.3.3 导流片形状对 VTPS 油水分离性能的影响	179
6.3.4 长径比对 VTPS 油水分离性能的影响	180
6.3.5 除水筒对 VTPS 油水分离性能的影响	181
6.3.6 除水孔开设方式对 VTPS 油水分离性能的影响	182
6.3.7 除水口开设方式对 VTPS 油水分离性能的影响	184
6.3.8 油相密度对 VTPS 油水分离性能的影响	186
6.3.9 油相粒度对 VTPS 油水分离性能的影响	187
6.3.10 入口流量对 VTPS 油水分离性能的影响	189
参考文献	190
第 7 章 管道式分离技术现场中试及应用	192
7.1 陆丰 13-1 平台现场中试	192
7.1.1 分离系统设计	194
7.1.2 平台现场试验	194
7.2 渤西终端管道式油气水三相分离器工业设计及应用	196
7.2.1 总体设计方案	196
7.2.2 现场试验	197
7.2.3 现场试验结果	199
7.3 流花 11-1 油田管道式动态气浮选系统	200
7.3.1 试验方案设计	200

7.3.2 实验结果	201
7.4 绥中 36-1 油气处理厂含聚污水处理系统	204
7.4.1 试验方案设计	204
7.4.2 现场试验	206
7.4.3 实验结果	208
7.5 辽河油田冷 13 站低温脱水系统	211
7.5.1 试验目的及指标要求	211
7.5.2 主要设备及功能	211
7.5.3 试验步骤	214
7.5.4 试验效果	215
参考文献	215
索引	216

第1章 概 论

1.1 油气水分离的作用

从油井产出的采出液通常都是原油、天然气 (或油田伴生气)、水以及其他杂质组成的混合液,而原油和天然气又都是碳氢化合物的混合物。原油是由相对分子质量较大的烃组分组成,在常温常压下呈液态;天然气是由相对分子质量较小的烃组分组成,在常温常压下呈气态。在油藏的高温、高压条件下,天然气溶解在原油中,以纯液态形式存在。当油气混合物从井下沿井筒向上流动到达井口,继而沿集输管线流动时,随着压力的降低,溶解在液相中的轻组分不断析出,并随其组成以及当地的压力温度条件,形成一定比例的油气共存混合物。同时,按照石油生成的有机成因理论:石油是由水中的微生物死去后沉积于水域的底部,进而被沉积的泥砂所掩埋,并且在地下高温、高压和缺氧条件下分解而生成的。这样,生油地层一般是古代湖泊或海洋区域的沉积岩,岩石的孔隙被水充满,储集了石油后,油的周围仍为广大的含水区,石油和外围含水区构成一个范围很大的水动力学系统。正是这种水动力学系统为油田的开发提供了主要的驱动力,这也使采液中含有大量水分成为必然 (当然,若按无机生成理论,油周围的含水区域不是必要的,但目前为止,无机成因油藏仍属凤毛麟角)。另外,若属砂岩地质,石油开采的渗流过程中可能会携带出一定量的泥沙 (砂)。这样,要得到炼油厂使用的原油和用户使用的天然气,就必须对油井产出的油气水混合液进行处理,去除采出液中的含水和其他杂质。将油井产液处理到炼油厂使用的原油和用户使用的天然气的整个过程都与油气水分离有关,可见油气水分离是油田生产的最重要的工艺流程之一。在油田开采后期,由于地层压力下降,地层的原油运移性能变差,为了保证油井的正常生产和提高原油采收率,往往采用活性水驱油、碱水驱油、聚合物驱油、三元复合驱油、泡沫驱油等技术,这使产液中不仅含有更高的水分,而且含有一定的化学药剂。这些化学药剂会使产液的油水乳化变得更为严重、更加稳定,且表面活性剂、碱、聚合物溶液等驱替剂在地层中的冲刷、溶蚀、离子交换和裹挟等作用下,使得油藏中的细微颗粒、黏土等固体颗粒与原油和化学剂絮凝在一起,形成稳定的悬浮液。这就进一步增加了油气水分离的困难。

按照国家标准,合格原油中的含水率应不大于 1%,优质原油中的含水率应不大于 0.5%,合格天然气中 C_{5+} 组分含量应不大于 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 、有机硫含量不大于 $250\text{mg}/\text{m}^3$ 。同时,在原油生产过程中,由于原油中存在很容易吸附到油水界面的

有机酸、胶质、沥青、石蜡等天然界面活性物质,从而形成较强的界面膜和稳定的水包油(O/W)型乳状液(通常称为乳化油,粒径在 $0.1\sim 10\mu\text{m}$);且油藏中的细微沙砾、黏土等固体颗粒在水、表面活性剂、碱、聚合物溶液等驱替剂的冲刷、溶蚀、离子交换和裹挟等作用下,形成稳定的悬浮物;另外,直径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的油珠会溶解在水中,形成溶解油。这些乳化油、悬浮物、溶解油等将存在于原油脱出的水中形成含油污水。这些含油污水不能直接排放或回注,而必须进一步处理到可以排放或回注的标准。就污水中的含油量和悬浮物而言,油田污水的一级排放标准为:石油类 $<5\text{mg/L}$,悬浮物 $<70\text{mg/L}$;二级排放标准为:石油类 $<10\text{mg/L}$,悬浮物 $<300\text{mg/L}$;三级排放标准为:石油类 $<20\text{mg/L}$ 。油田回注水的质量标准为:在 $0.1\sim 0.6\mu\text{m}^2$ 的注入层渗透率条件下,一级回注标准为:悬浮物 $<3\text{mg/L}$,悬浮物粒径中值 $<2\mu\text{m}$,含油 $<8\text{mg/L}$;二级回注标准为:悬浮物 $<4\text{mg/L}$,悬浮物粒径中值 $<2.5\mu\text{m}$,含油 $<10\text{mg/L}$;三级回注标准为:悬浮物 $<5\text{mg/L}$,悬浮物粒径中值 $<3\mu\text{m}$,含油 $<15\text{mg/L}$ 。要使油田采液成为合格的原油、天然气和排放的回注水,就需采用各种各样的分离手段和工艺。图1.1给出从油田采液到合格原油、天然气、外排水的基本分离流程。

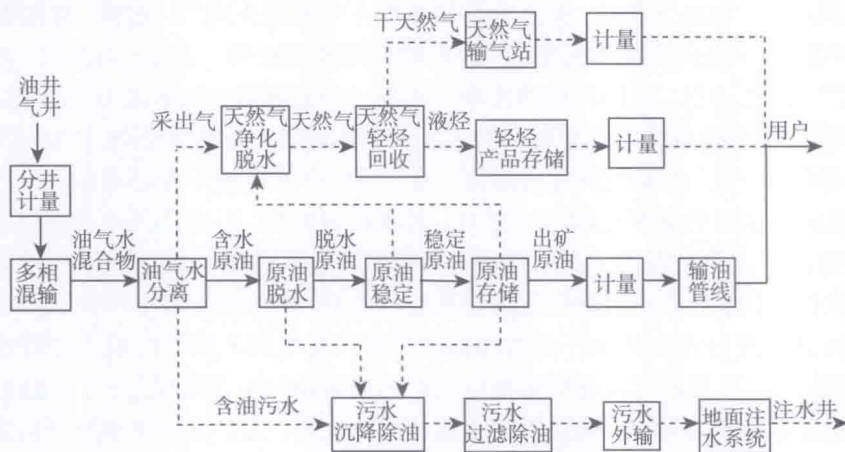


图 1.1 油田采液处理工艺流程框图

1.2 油水分离的基本方法

在油水混合物中,根据油滴粒径的大小不同可分为浮油、分散油、乳化油和溶解油四种形态^[1]。当油滴粒径大于 $100\mu\text{m}$ 时,油以连续相的形式存在,形成油块或油层,称为浮油;当油滴粒径为 $10\sim 100\mu\text{m}$ 时,以微小的油滴悬浮于水中,称为分散油;乳化油中油滴粒径极小,一般小于 $10\mu\text{m}$,多数情况下粒径为 $0.1\sim 2\mu\text{m}$;而

当油滴粒径小于 $0.1\mu\text{m}$, 以分子形式呈均匀状态存在时则为溶解油。在油气水分离过程中, 需要根据油相存在状态和其粒径大小, 选择不同的处理方法或者几种方法的综合使用才能进行有效分离。根据分离原理的不同, 油水分离方法可归纳为四大类: 物理方法、化学方法、物理化学方法和生物化学方法。物理方法是利用各相密度、电导率等物理性质的差异而实施的分离方法, 主要有重力沉降脱水、离心旋流脱水、高压静电脱水、高频脉冲脱水、微波辐射脱水、超声波脱水等。化学方法是将含水原油加热到一定温度, 并在原油中加入适量的化学药剂 (破乳剂、聚并剂等), 破坏油水乳化液的稳定状态, 实现油水混合液的脱水。物理化学方法是将物理脱水方法与化学脱水方法结合使用, 达到油水分离的目的。生物化学方法是用微生物胞体组成的生物破乳剂破坏油水乳化液的稳定状态, 实现油水混合液的脱水。

每种脱水方法都有各自的特点和适用条件。因此, 选用原油脱水方法时要综合考虑原油性质、含水率、油水乳化性质和程度、乳状液分散度和稳定性等因素。

在油田的水处理过程中, 根据要求处理的深度不同, 将上述方法分为初级治理、二级治理和三级治理^[2]。初级治理属于预处理, 用来去除浮油和固体悬浮物, 主要采用物理方法和物理化学方法, 包括重力沉降法、离心法、粗粒化法、浮选法、过滤法、膜分离法、絮凝沉降法等。二级治理用来去除污水中含有的大量有机污染物, 主要采用生物化学方法, 包括活性污泥法、曝气法、生物过滤法、生物转盘法等。三级治理也叫深度处理, 多采用化学法和物理法, 包括离子交换、电渗析、超滤、反渗透、活性炭吸附、臭氧法等。经三级处理后, 通常治理效果都比较好, 出水可重复利用, 但费用很高。

实际生产中由于油田不同甚至同一油田的区块不同, 其采出液的成分和油相含率及油在水中的存在形式也都会不同, 并且在原油集输过程中往往根据现场情况的要求需要投加破乳剂、降黏剂等多种化学药剂, 这在一定程度上也加剧了油水分离的难度。随着全球范围内水资源短缺的加剧以及人们对环保的重视, 在污水处理排放时提出了更高的要求。同时, 单一分离方法均存在一定的局限性, 混合液经处理后很难达到排放、回注或其他工艺的指标。因此, 在油田现场应用时常采用多种分离方法联合使用, 将污水处理设施组合成合适的分离工艺流程, 以满足油中含水或水中含油规定的指标要求。

1.3 油水分离器的研究进展 (基本类型)

目前, 油田上常用的油水分离设备主要包括以下几种。

1. 重力式分离器

重力式分离器主要利用多相分离介质之间存在的密度差异, 所受到的重力不

同而达到相分离的目的。当油水混合液在罐内静止或处于层流状态时,密度较轻的油滴将按斯托克斯公式的运动规律进行沉降运动(即上浮运动)。当把油滴颗粒看成圆球分散于混合液中,且不考虑颗粒间的作用时,根据斯托克斯公式可知油滴的沉降运动速度与其半径的平方以及油水的密度差成正比,与连续相水的黏度成反比。根据这一关系可得到污水除油的难易程度,即油滴半径越大、油水密度差异越大、连续相水的黏度越小,则油水分离过程越容易进行。经重力式分离器后,混合液中的浮油和粒径较大的分散油可得到较好的分离。油田上常见的重力式分离器主要包括了卧式(或立式)除油罐、斜板隔油池和粗粒化(聚结)除油罐等。

图 1.2 是典型的卧式三相分离器示意图,它的工作原理为:混合液体由入口管进入分离器罐体后,流体的流向、流速突然发生改变,使气液得以初级分离。在重力作用下液相流体流入分离器的集液室,气相则在集液室上部运动。在罐体内停留足够的时间后,气相中夹带的较大液滴在重力作用下直接下沉进入集液室,其他少量雾状液滴经除雾器聚并成较大液滴后流入集液室;同时,集液室内的混合液体中残留的少量气体上升至液面并进入气相,油水两相在重力作用下得到了分层,水相沉入分离器的底部并从排水口流出,油相经由液面控制器控制的油阀流出分离器,从而达到了三相分离的目的。由颗粒的沉降运动可知,分离效率与混合液体在罐内的停留时间密切相关,而停留时间又取决于罐体体积和液体的流动速度。故在油田上为了提高分离效率,卧式分离器的体积一般都较大。

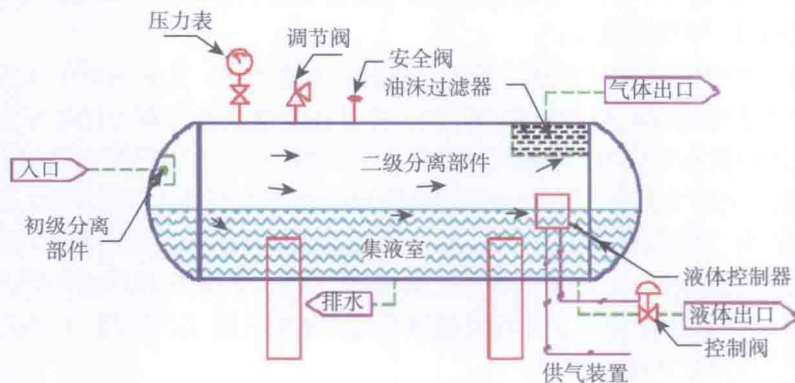


图 1.2 卧式三相分离器

1904 年 Hazen 根据实践经验提出了“浅池理论”,即在重力沉降过程中,分散相液滴的沉降效果是以颗粒的运动速度与池子面积为函数来衡量的,与池深、沉降时间无关,因此提高隔油池的处理能力有两个途径:扩大沉降面积、提高沉降速度^[3]。在此基础上发展起来的隔油池有平板式隔油池和斜板式隔油池,而平板式隔油池具有截留的油滴粒径大、处理效率低、占地面积大等缺点。斜板式隔油池是