



苏里格气田 排水采气新技术

龙运辉 编著



SULIGE QITIAN

PAISHUI CAIQI XINJISHU



化学工业出版社

苏里格气田 排水采气新技术

龙运辉 编著

SULIGE QITIAN

PAISHUI CAIQI XINJISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了苏里格气田以及国内外气田排水采气新技术,对气井井筒多相流理论基础知识进行了简单介绍,同时重点阐述了苏里格气田排水采气技术、国内其他气田排水采气技术、国外气田排水采气技术、气井排水采气数值模型与分析以及天然气田高超音速喷管雾化排水采气新技术。

本书可供天然气田工程专业技术人员参考,也可作为大学石油工程、天然气输运工程等专业本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

苏里格气田排水采气新技术/龙运辉编著. —北京:
化学工业出版社, 2017.5

ISBN 978-7-122-29227-8

I. ①苏… II. ①龙… III. ①气田开发-排水采
气-生产技术-内蒙古 IV. ①TE375

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第043750号

责任编辑:张艳 刘军

文字编辑:孙凤英

责任校对:边涛

装帧设计:王晓宇

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张12 字数221千字 2017年5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: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

到 2014 年年底，我国最大气田——苏里格气田累计产气突破 1000 亿立方米，达到 1000.3 亿立方米。苏里格天然气已覆盖包括北京、天津、西安等全国 40 多个大中城市，惠及 2.5 亿人。

苏里格气田属典型的低渗、低压、低丰度气田，开发难度很大。8 年来，长庆油田通过科技和管理创新，气田规模日益扩大，气田产量逐年攀升。自 2007 年年底日产气量突破 1000 万立方米以后，平均每年以近 1000 万立方米速度递增，2013 年年底，气田年产气量突破 200 亿立方米，成为我国年产气量最大的整装气田。截至目前，苏里格气田共建气井 7989 口、集气站 135 座、骨架干线 28 条，建成天然气处理厂 6 座，年集输处理能力具备 280 亿立方米。苏里格已步入现代化大气田建设的新时期。“大油田管理，大规模建设”的时代要求，对原有的管理体制、建设标准等提出了挑战。苏里格气田推行“标准化设计、模块化建设、数字化管理”的建设模式，这也是长庆油田在油气田建设史上进行的一次创新、一场革命。

苏里格气田地质条件差，大多数区块是低渗透和超低渗透气田，这给生产带来很大的困难，为此，针对这种地质条件，相关人员通过大力开展科学研究，发展和引进新工艺、新技术，在低渗透气田的生产中做出了很大的成绩。

长庆油田苏里格气田和相关大专院校、科研单位一起承担了气田排水采气技术的各种科研项目，这些研究成果解决了生产中的一些难题，促进了气田生产的发展，对气田开发做出了较大贡献。

本书是作者对多年来从事苏里格气田工程技术研究的成果总结，是在对苏里格气田和国内外气田一些排水采气最新技术总结的基础上编写的。

本书主要介绍苏里格气田排水采气新技术。内容涉及气井井筒多相流理论基础、苏里格气田排水采气技术、国内其他气田排水采气技术、国外气田排水采气技术、气井排水采气数值模型与分析以及天然气田高超音速喷管雾化排水采气新技术。

由于笔者水平所限，书中难免会有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正！

编著者

2017 年 2 月

目录

CONTENTS

1 气井井筒多相流理论基础1	
1.1 多相流动的基本概念.....2	
1.1.1 多相流体渗流的物理特征.....2	
1.1.2 流体的物理性质.....3	
1.1.3 流体流动的基本概念.....4	
1.2 流动基本方程.....9	
1.2.1 连续性方程.....9	
1.2.2 能量方程——伯努利方程式.....9	
1.2.3 动量方程.....9	
1.2.4 流体流动阻力.....10	
1.2.5 气体状态方程.....13	
1.3 气液两相流型及其转变.....13	
1.3.1 水平管流型.....14	
1.3.2 垂直管流型.....15	
1.4 含气率截面相份额.....19	
1.5 气液两相压力降计算.....20	
1.5.1 单相流动压力损失.....20	
1.5.2 多相流动压力损失.....22	
1.6 临界流速与临界液滴直径.....32	
1.6.1 Turner 液滴模型.....33	
1.6.2 临界液滴直径.....35	
2 苏里格气田排水采气技术37	
2.1 低压低产气井排水采气工艺技术.....38	
2.1.1 优选管柱排水采气技术.....39	
2.1.2 泡沫排水采气工艺技术.....39	
2.1.3 柱塞气举排水采气工艺技术.....40	
2.1.4 水井复产综合工艺技术.....41	
2.2 低产低压气井排水采气技术对策.....43	
2.2.1 泡沫排水采气工艺技术.....43	
2.2.2 气举排水采气工艺技术.....43	
2.2.3 柱塞举升排水采气工艺技术.....43	
2.2.4 优选管柱排水采气工艺技术.....44	
2.2.5 涡轮泵排水采气工艺技术.....44	
2.2.6 机抽排水采气工艺技术.....44	
2.2.7 射流泵排水采气工艺技术.....44	
2.2.8 天然气连续循环采气工艺技术.....45	
2.2.9 电潜泵.....45	
2.2.10 同心毛细管技术.....46	
2.3 苏东气田排水采气技术.....46	
2.3.1 泡沫排水采气工艺.....46	
2.3.2 井间互联气举排水采气.....49	
2.3.3 连续油管试验.....50	
2.4 苏里格气田排水采气“一井一策”.....50	
2.4.1 “一井一策”排水采气工艺.....51	
2.4.2 “一井一策”工艺方案.....52	
2.5 气井涡流排水采气新技术.....53	
2.5.1 国外应用情况.....54	
2.5.2 国内应用情况.....54	
2.6 速度管柱排水采气技术.....56	
2.6.1 连续管设备组成及施工.....56	
2.6.2 连续管作业过程.....56	
2.6.3 速度管柱排水采气施工过程.....57	
2.6.4 速度管柱排水采气技术改进.....58	
2.7 连续油管排水采气技术.....59	
2.7.1 连续油管排水采气技术.....60	
2.7.2 速度管柱优选.....61	
2.8 柱塞气举排水采气工艺技术.....62	
2.8.1 苏里格气田的地质概况.....62	

2.8.2	柱塞气举工艺原理及要求	62	2.16	气举排水采气工艺技术	81
2.8.3	工艺参数设计	63	2.16.1	富水区开发技术政策及配套技术	82
2.8.4	现场试验及效果	63	2.16.2	单项气举排水采气工艺	82
2.8.5	结论	64	2.16.3	复合气举排水采气工艺	83
2.9	小直径管排水采气工艺技术	64	2.16.4	结论	85
2.9.1	配套设备	64	3	国内其他气田排水采气技术	86
2.9.2	工艺参数优选	65	3.1	气井泡排排水	87
2.9.3	现场试验情况	66	3.2	多效发泡剂	88
2.9.4	结论	67	3.3	中原油田白庙气藏排水采气	89
2.10	橇装式小直径管排水采气	67	3.4	连续气举排液采气技术	91
2.10.1	工作原理及设备参数	67	3.5	柱塞(球塞)气举技术	92
2.10.2	现场试验	69	3.6	深抽排水采气工艺	95
2.10.3	结论	70	3.7	井间互联井筒激动排液复产工艺	96
2.11	积液气井排水采气工艺优化	71	3.8	注氮采气技术	97
2.11.1	积液气井开采工艺现状	71	3.9	多级节流阀互助排液	98
2.11.2	低产气井排水采气工艺优化	71	3.10	深层、高温、高压气井排水采气工艺	99
2.11.3	富水区生产气井工艺优化	72	3.10.1	气井深度排水采气工艺技术	99
2.12	优选管柱排水采气技术	74	3.10.2	深井、高温、高矿化度排水采气技术	100
2.12.1	优选管柱排水采气技术理论	74	3.10.3	大庆深层低渗透气井排液	101
2.12.2	现场应用效果	75	3.11	吉林油田排水采气	101
2.12.3	结论	76	3.11.1	泡沫排水采气	101
2.13	井下节流气井泡沫排水采气机理	76	3.11.2	气举排水采气	101
2.13.1	实验研究	77	3.11.3	优选管柱排水采气	102
2.13.2	实验结果分析	77	3.11.4	电潜泵排水采气技术	102
2.14	井下节流泡沫排水采气工艺适用性	77	3.11.5	机抽排水采气工艺	102
2.14.1	苏里格西区气井产水情况	78	3.12	川渝气田排水采气工艺技术	103
2.14.2	苏里格西区井筒积液状况及泡沫排液效果	78	3.12.1	川渝气田排水采气工艺技术现状及发展方向	103
2.14.3	典型气井泡沫排水效果及影响因素分析	79	3.12.2	气井排水采气工艺原理及应用	106
2.14.4	井下节流条件下泡沫排水工艺适用性分析	80	3.12.3	川中充西须四段气藏气井	107
2.14.5	结论及建议	81	3.12.4	洛带气田采气管柱优选	108
2.15	气井井筒排液影响因素分析	81	3.12.5	川渝气田不同类型有水气藏	

的开发.....	108	5.5 凝析气井的最低允许产量.....	134
3.13 井下节流及其对携液能力的 影响.....	109	5.6 临界流量对产水量的影响及 计算模型.....	134
3.14 毛细管加注泡沫排水采气新 技术.....	111	5.7 定向气井连续携液临界产量 预测模型.....	136
3.15 新疆油田排水采气.....	112	5.8 雾化喷嘴数值研究.....	137
3.16 海上气田气井排水采气 技术.....	112	5.8.1 雾化理论分析及数学模型 建立.....	137
4 国外气田排水采气技术.....	116	5.8.2 喷嘴雾化效果数值仿真 研究.....	137
4.1 成熟工艺技术的发展.....	117	5.8.3 仿真结果与误差分析.....	138
4.2 同心毛细管技术.....	117	5.8.4 喷嘴雾化排水的可行性 分析.....	138
4.3 天然气连续循环采气工艺.....	118	5.9 气体加速泵排水采气举升效率 研究.....	138
4.4 涡轮排水采气工艺.....	119	5.9.1 气体举液机理研究现状.....	139
4.5 组合排水采气工艺.....	120	5.9.2 举升效率计算模型.....	139
4.6 超声波雾化技术.....	120	5.9.3 应用实例.....	140
4.7 气举排水采气工艺.....	120	5.9.4 结论.....	140
4.8 井下气液分离同井回注技术.....	120	6 天然气田高超音速喷管雾化 排水采气新技术.....	141
4.9 井间互联井筒激动排液复产 工艺技术.....	121	6.1 概述.....	142
4.10 聚合物控水采气工艺技术.....	121	6.2 高超音速喷管雾化的理论 研究.....	142
4.11 电潜泵倒置排水采气法.....	122	6.2.1 临界流喷嘴.....	143
4.12 气体加速泵技术.....	122	6.2.2 渐缩喷管与拉伐尔喷管.....	144
4.13 国外排水采气技术发展 趋势.....	124	6.2.3 拉伐尔喷管的设计计算.....	148
5 气井排水采气数值模型与 分析.....	125	6.3 超音速喷管的数值模拟.....	149
5.1 气井连续携液模型.....	126	6.3.1 基本数学模型.....	149
5.2 气井排液的节点分析.....	127	6.3.2 雾化模型.....	154
5.3 气井排水采气分析设计软件.....	127	6.3.3 数值模拟过程.....	158
5.3.1 软件技术路线.....	128	6.4 数值模拟结果分析.....	158
5.3.2 软件主要功能模块.....	128	6.5 喷管雾化技术的试验研究.....	165
5.4 排水采气综合平台软件.....	130	6.5.1 排水采气的实验室试验.....	165
5.4.1 软件总体结构的设计 思路.....	130	6.5.2 现场试验.....	171
5.4.2 系统的开发流程.....	132	6.6 研究成果.....	181
5.4.3 综合、统一的软件平台和 开发环境.....	132	6.7 应用前景.....	181
5.4.4 系统界面的设计思想.....	133	参考文献.....	182

1

气井井筒多相流理论基础

气液两相流动是流体力学的一个分支，是一种十分复杂的流动。多相流最重要的特征是流动结构及分布上的不均匀性和状态的多值性，且各相间存在可变形的相界面。这些相界面及其所引发的特征与各相的物性、流量、流动参数、管道几何形状以及几何位置等因素直接相关。到目前为止，多相流和流体力学一样，是一门以实验为基础的学科^[1]。

人们对多相流流动特性研究主要有以下几个方面：

- ① 气液两相流流型及其转变；
- ② 含气率；
- ③ 气液两相压力降；
- ④ 气液两相流动的不稳定性。

在天然气工业中，人们主要研究流型及其转变、含气率和压力降计算等方面^[2~4]。

1.1 多相流动的基本概念

1.1.1 多相流体渗流的物理特征

在地层条件下，流体在储层中流动必然与储层岩石发生作用，产生各种界面现象，主要有：界面张力、吸附作用、润湿作用、毛细现象等，使流体在岩石中分布与流动受到影响，对于天然气藏，相对渗透率及水驱气特征是气藏工程研究的重要基础资料，对动态预测具有重要意义。

(1) 表面张力

表面张力受分子间力、温度、压力和物质极性影响，两种物质极性差越大，表面张力越大。表面张力测定主要有毛细管上升法、气泡-液滴最大压力法和悬挂液滴法等。

(2) 吸附作用

天然气储层都是水湿的，孔、喉壁上都存在吸附水膜，地层条件下的压差不可能将其除去，一般情况下小于或等于吸附层厚度的孔隙被水膜占据，天然气或凝析油也会吸附在岩石表面，吸附量与温度、压力、溶质浓度和溶剂性质有关。

吸附量的测定主要有重量法和容量法。重量法是在恒定温度条件下，测定不同压力时吸附剂在吸附前后的重量计算吸附量；容量法采用吸附前后气体体积的变化计算吸附在吸附剂（岩石）上的吸附量。

(3) 润湿性

润湿性是存在两种非混相流体时，其中一相流体沿固体表面延展或附着的倾向性，润湿性决定了孔道中毛细管力的方向，一般通过测定润湿接触角或毛细管压力曲线及相渗曲线确定。天然气藏储层岩石一般都认为是水湿的，毛细

管力是天然气渗流的驱动力。

(4) 毛细管压力

油气储层通常被看作是一套由毛细管网络构成的多孔介质，由于湿润性不同，任何两相界面的存在都会产生毛细管压力。毛细管压力测定主要有半渗透隔板法、离心法和压汞法。

① 半渗透隔板法可采用抽真空或加压两种方法在岩样中建立压差，非湿性驱替湿相在压差条件下达到平衡，确立毛细管压力和湿相饱和度的关系。该方法分析时间长，但可在接近地层条件下进行。

② 离心法是依靠离心力建立压差，压汞法则采用非湿相汞做介质，在外力与毛细管压力平衡时，汞即可进入相应大小的孔隙。离心法主要用测定具有较高孔隙度样品的毛细管压力。

③ 压汞法试验压力高（压汞仪进汞压力达 414MPa），测试速度快。

(5) 相对渗透率

气-液相对渗透率的测定分稳态法和非稳态法两种。稳态法测定使气、水按一定比例同时注入岩心，待两相流量和岩心两端压差稳定，计算相应每相的相对渗透率和对应的含水饱和度，然后再减少气量提高水量依次测量不同含水饱和度下的相对渗透率，直至气相相对渗透率小于 0.5% 结束实验。非稳态法是用加湿氮气驱替饱和水的岩心，计量不同时间的产水量、产气量及压力，直至达到 30min 内水量不增时停止实验，根据非稳态驱替数据计算相对渗透曲线。目前实验测试主要在室温条件下进行，应在模拟地层条件下进行测试。

(6) 水驱气

水驱气实验可获得采气速度、水驱采收率、无水采收率等水驱气特征参数。首先气驱水建立束缚水饱和度，并保持较高的压力以模拟储层条件，然后以高于该压力转换为水驱，计量采出气量、出水量及进（出）口压力，计算残余气饱和度、残余气下水相渗透率、残余水饱和度、残余水下的气相渗透率。

1.1.2 流体的物理性质

流体的物理性质有流动性、黏性、压缩性等。

(1) 流体的流动性

静止流体在任意小的剪切力作用下，在足够大的时间内将产生连续不断的变形，剪切力消失，变形停止，流体的这一性质就称为流动性。如容器中的水倾斜后将发生变形，直到水面呈水平状态，这时切向力消失。流动性是流体的固有属性，是流体与固体的根本区别。

(2) 流体的黏性

当两层流体之间有相对运动（即变形）时，其间也会产生阻碍相对运动的

力。运动快的流层对运动慢的流层施加拉力，运动慢的流层对运动快的流层施加阻力，这一对内力称为流体的黏性内摩擦力，流体的这种抵抗相对运动的属性称为流体的黏性。黏性内摩擦力的产生有两个原因：一是两层流体间分子的吸引力；二是两层流体间分子的动量交换。对于液体，因分子间距离较小，内摩擦力主要取决于分子的吸引力。对于气体，因分子间距离较大，内摩擦力主要取决于分子间的动量交换。

流体的黏性常用流体的动力黏性系数 μ 及运动黏性系数 ν 来描述。黏性系数是物性参数，对于不同的流体，它的值不同。另外，它是用来度量流体抵抗变形运动能力的物理量， μ 的值越大，表明流体抵抗变形的能力越大，即流体越黏稠。

实验证实，黏性系数随压力变化不大，随温度变化较大。液体的黏性系数随温度的升高而减小，气体的黏性系数随温度的升高而增大。这是因为液体的黏性主要取决于分子间的吸引力，温度升高，液体分子振荡速度增加，容易克服保持它们位置的束缚，增大流动性，而气体的黏性主要取决于分子间的动量交换，温度增加，分子的热运动加剧，气体的黏性也就增加。

(3) 流体的压缩性

流体的密度或容积随压力或温度变化而变化的性质称为流体的压缩性。真实流体都是可压缩的。

液体在通常压力或温度下的可压缩性很小。例如水的压力从 1atm (1atm=101325Pa) 增加到 100atm 时，容积仅缩小 0.5%，温度从 20℃ 变化到 100℃，容积仅变化 4%。因此，通常把液体近似为不可压缩流体，即认为液体的密度为常数。气体的压缩性比液体大得多。气体密度 (ρ) 随压力 (p) 和热力学温度 (T) 的变化关系用热力学状态方程 $\rho=f(p, T)$ 来表示。常见的气体多数服从完全气体状态方程 $p=R\rho T$ ，其中， R 为气体常数。

1.1.3 流体流动的基本概念

(1) 流量与流速

① 体积流量 q_V (m^3/s 或 m^3/h)。单位时间内流经管道任意截面的流体体积：

$$q_V = \int_A \bar{v} \bar{n} dA \quad (1-1)$$

式中 \bar{v} —— 流动速度；

\bar{n} —— 向量；

A —— 面积。

② 质量流量 q_m (kg/s 或 kg/h)。单位时间内流经管道任意截面的流体质量：

$$q_m = \rho \int_A \bar{v} \bar{n} dA \quad (1-2)$$

体积流量与质量流量二者的关系为： $q_m = \rho q_v$ 。

③ 流速。

a. 平均流速 (m/s)。过流断面上各点的流速是不相同的，所以常采用一个平均值来代替各点的实际流速，称平均流速。

$$\bar{v} = \frac{q_v}{A} = \frac{\int_A v dA}{A} \quad (1-3)$$

b. 质量流速 [kg/(m²·s)]。单位时间内流经管道单位截面积的流体质量。

$$G = \frac{q_m}{A} = \frac{q_v \rho}{A} = u \rho \quad (1-4)$$

(2) 稳定流动与非稳定流动

① 稳定流动。各截面上的温度、压力、流速等物理量仅随位置变化，而不随时间变化。

② 非稳定流动。流体在各截面上的有关物理量既随位置变化，也随时间变化。

(3) 层流和湍流

① 层流。流体分层流动，相邻两层流体间只作相对滑动，流层间没有横向混杂。

② 湍流（也称为紊流）。当流体流速超过某一数值时，流体不再保持分层流动，而可能向各个方向运动，有垂直于管轴方向的分速度，各流层将混淆起来，并有可能出现涡旋，这种流动状态叫湍流。流体湍流时所消耗的能量比层流多，湍流区别于层流的特点之一是它能发出声音。

③ 过渡流动。介于层流与湍流间很不稳定的流动状态。

流体力学中，雷诺数是流体惯性力与黏性力比值的量度： $Re = \frac{\rho v r}{\eta}$ （速度

v 、密度 ρ 、黏度 η 、管子半径 r ），决定黏性流体在圆筒形管道中流动形态。通常当 $Re \leq 2000$ 时，为层流；当 $2000 < Re < 4000$ 时，为过渡流；当 $Re > 4000$ 时，为湍流。

(4) 气液两相流动的基本参数

多相流流动必须考虑每一相流体的物理特性，另外相与相之间的相互影响也必须考虑。计算中常常使用混合特性，因此需要确定整个管道中的气液局部体积比率。通常多相流公式运用于两相而不是三相。这是因为油和水被结合起来作为单一相处理，而气体则作为另外一相。

① 质量流量。质量流量 (W) 是指单位时间内流过管道总流通截面积的流体质量，气液两相流的总质量流量是各相质量流量之和，即

$$W = W_L + W_G \quad (1-5)$$

② 体积流量。体积流量是指单位时间内流过管道总流通截面积的流体体积，气液两相流的总体积流量是各相体积流量之和，即

$$Q = Q_L + Q_G \quad (1-6)$$

③ 质量流速。质量流速定义为质量流量与管道流通面积之比，气液各相的质量流量与气液两相流的总质量流量分别为

$$G_L = \frac{W_L}{A} \quad (1-7)$$

$$G_G = \frac{W_G}{A} \quad (1-8)$$

$$G = G_L + G_G \quad (1-9)$$

④ 折算流速（体积通量）。各相的折算流速（又称体积通量或表观流速）定义为该相的体积流量与管道流通面积之比，即

$$u_{SL} = \frac{Q_L}{A} \quad (1-10)$$

$$u_{SG} = \frac{Q_G}{A} \quad (1-11)$$

⑤ 混合流速（总体积通量）。两相混合流速（总体积通量）定义为两相的总体积流量与管道流通面积之比，即：

$$u_m = \frac{Q}{A} = u_{SL} + u_{SG} \quad (1-12)$$

⑥ 真实平均流速。该相的体积流量与该相在管道中所占的流通面积之比，表示为

$$u_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (1-13)$$

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (1-14)$$

⑦ 滑动速度。滑动速度也称滑移速度或相对速度，是气水两相真实流速之差，表示为

$$u_s = u_G - u_L \quad (1-15)$$

⑧ 滑动比（滑移比）。气相真实流速与液相真实流速之比称为滑动比或滑移比，表示为

$$s = \frac{u_G}{u_L} \quad (1-16)$$

⑨ 相份额。

a. 质量相份额（质量分数）。某一相的质量流量与两相总质量流量之比，表示为

$$\chi_L = \frac{G_L}{G} \quad (1-17)$$

$$\chi_G = \frac{G_G}{G} \quad (1-18)$$

b. 体积相份额（体积流量分数）。气液两相的体积相份额通常又称含气率和含水率。要区分两种体积相份额，一种是体积流量分数，一种是管道的真实体积相份额。体积流量分数有时也称为体积相份额，表示为

$$\beta_L = \frac{Q_L}{Q} \quad (1-19)$$

$$\beta_G = \frac{Q_G}{Q} \quad (1-20)$$

c. 截面积相份额。气液两相的流通截面积与管道总流通截面积之比称为该相的截面积相份额，表示为

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} \quad (1-21)$$

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad (1-22)$$

气液两相的截面积相份额又称截面含气率和截面含水率。通常认为管道的真实体积相份额与截面积相份额相等。不管相份额怎样定义，相份额之和总是等于1，对于气液两相流，即是，

$$\chi_w + \chi_o = 1$$

$$\beta_w + \beta_o = 1$$

$$\alpha_w + \alpha_o = 1$$

⑩ 混合黏度。混合黏度是指混合物的局部黏度，它有许多不同的定义方式。通常，在没有特别说明的情况下，它的定义如下：

$$\mu_m = \mu_L E_L + \mu_G E_G = \mu_L E_L + \mu_G (1 - E_L) \quad (1-23)$$

式中 E_L ——局部液体体积含量（持液率）；

E_G ——局部气体体积含量；

μ_m ——混合黏度；

μ_L ——液体黏度；

μ_G ——气体黏度。

注意：混合黏度是根据局部体积含量定义的，而无滑移黏度是根据输入体

积含量定义的。

⑪ 混合密度。混合密度是指混合物的局部密度，它的定义如下：

$$\rho_m = \rho_L E_L + \rho_G E_G = \rho_L E_L + \rho_G (1 - E_L) \quad (1-24)$$

式中 ρ_m ——混合密度；

ρ_L ——液体密度；

ρ_G ——气体密度。

⑫ 无滑移密度。无滑移密度是根据两相具有相同的局部速度的假设计算得到的。因此它的定义如下：

$$\rho_{NS} = \rho_L C_L + \rho_G C_G = \rho_L C_L + \rho_G (1 - C_L) \quad (1-25)$$

式中 C_L ——输入液体体积含量；

C_G ——输入气体体积含量；

ρ_{NS} ——无滑移密度。

无滑移密度是根据输入体积含量定义的，而混合密度是根据局部体积含量定义的。

⑬ 无滑移黏度。无滑移黏度是根据两相具有相同的局部速度的假设计算得到的。它有许多不同的定义方式。通常，在没有特别说明的情况下，它的定义如下：

$$\mu_{NS} = \mu_L C_L + \mu_G C_G = \mu_L C_L + \mu_G (1 - C_L) \quad (1-26)$$

式中 μ_{NS} ——无滑移黏度；

μ_L ——液体黏度；

μ_G ——气体黏度。

⑭ 表面张力。存在于气液两相之间的表面张力对于两相压降计算的影响非常小。但是在一些压降计算公式中，需要用到表面张力去求解一些无量纲数。Baker 和 Swerdloff 以及 Hough 和 Beggs 给出了一些关于油气和气水间表面张力的经验计算公式，气/水两相间的表面张力计算示例如下。下面公式给出了在

74°F $\left[t / ^\circ\text{C} = \frac{5}{9}(t / ^\circ\text{F} - 32) \right]$ 和 280°F 时的气水界面张力：

$$\sigma_{w(74)} = 75 - 1.108p^{0.349} \quad (1-27)$$

$$\sigma_{w(280)} = 53 - 0.1048p^{0.637} \quad (1-28)$$

式中 $\sigma_{w(74)}$ ——74°F 时的界面张力，dyn/cm (1dyn=10⁻⁵N)；

$\sigma_{w(280)}$ ——280°F 时的界面张力，dyn/cm；

p ——压力，psi (1psi=6.89kPa)。

如果温度高于 280°F，使用 280°F 的值；如果温度低于 74°F；使用 74°F 的值；如果温度位于两者之间，采用线性插值法求值。

1.2 流动基本方程

流体是由无数质点组成的，而流体质点是连续的、彼此无间隙的充满空间。通常把由运动流体所充满的空间称为流场。表征流体运动的物理量，通称为流体的流动参数。

1.2.1 连续性方程

对于稳定流动系统，在管路中流体没有增加和漏失的情况下对任意截面有：

$$m_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dots = \rho u A = \text{常数} \quad (1-29)$$

对于不可压缩性流体（ $\rho = \text{Const}$ ）有：

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \dots = u A = \text{常数} \quad (1-30)$$

1.2.2 能量方程——伯努利方程式

实际流体在定常、重力场、不可压条件下，在流线上任意两点间可列出伯努利方程为：

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_1^2 f ds \quad (1-31)$$

伯努利方程中各项的含义： z 代表单位重力流体的位能，或简称位置水头； $\frac{p}{\rho g}$ 表示单位重力流体的压能，或简称压强水头； $\frac{v^2}{2g}$ 表示单位重力流体的动能，或简称速度水头； $\frac{1}{g} \int_1^2 f ds$ 表示单位重力流体沿流线从 1 点流到 2 点克服黏性阻力所做的功，或损失的能量。

1.2.3 动量方程

动量方程主要的作用是解决作用力问题，特别是流体与固体之间的总作用力。

动量定律：作用于物体的冲量，等于物体的动量增量。即： $\sum \bar{F} dt = d(m\bar{v})$ 。

恒定流动量方程式： $\sum \bar{F} = d(m\bar{v}) = a_{02} \rho_2 Q_2 \bar{v}_2 - a_{01} \rho_1 Q_1 \bar{v}_1$ 。方程是以断面平均流速模型建立的，实际的流速是不均匀分布的，所以用动量修正系数 a 修正。

将物质系统的动量定理应用于流体时，动量定理的表述形式是：对于恒定流动，所取流体段（简称流段，它是由流体构成的）的动量在单位时间内的变化，等于单位时间内流出该流段所占空间的流体动量与流进的流体动量之差；该变化率等于流段受到的表面力与质量力之和，即外力之和。

1.2.4 流体流动阻力

流动阻力的大小与流体本身的物理性质、流动状况及壁面的形状等因素有关。管路系统主要由两部分组成，一部分是直管，另一部分是管件、阀门等。相应流体流动阻力也分为以下两种。

直管阻力：流体流经一定直径的直管时由于内摩擦而产生的阻力。

局部阻力：流体流经管件、阀门等局部地方由于流速大小及方向的改变而引起的阻力。

根据柏努利方程的其他形式，可写出相应的范宁公式表示式，即流体在直管内流动阻力的通式：

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-32)$$

式中 Δp_f —— 压力损失；

λ —— 无量纲系数，称为摩擦系数或摩擦因数，与流体流动的 Re 及管壁状况有关；

l —— 流动长度；

d —— 管径。

值得注意的是，压力损失 Δp_f 是流体流动能量损失的一种表示形式，与两截面间的压力差 $\Delta p(p_1 - p_2)$ 意义不同，只有当管路为水平时，二者才相等。

范宁公式对层流与湍流均适用，只是两种情况下摩擦系数 λ 不同。

(1) 层流时的摩擦系数

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1-33)$$

即层流时摩擦系数 λ 是雷诺数 Re 的函数。

(2) 湍流时的摩擦系数

湍流时摩擦系数 λ 是 Re 和相对粗糙度 ε/d 的函数，可用莫狄 (Moody) 摩擦系数图表示。

根据 Re 不同，图可分为以下四个区域。

① 层流区 ($Re \leq 2000$)。 λ 与 ε/d 无关，与 Re 为直线关系，即 $\lambda = \frac{64}{Re}$ ，此时 $W_f \propto u$ ，即 W_f 与 u 的一次方成正比。

② 过渡区 ($2000 < Re < 4000$)。在此区域内层流或湍流的 $\lambda-Re$ 曲线均可应用，对于阻力计算，宁可估计大一些，一般将湍流时的曲线延伸，以查取 λ 值。

③ 湍流区 ($Re \geq 4000$ 以及虚线以下的区域)。此时 λ 与 Re 、 ε/d 都有关，当 ε/d 一定时， λ 随 Re 的增大而减小， Re 增大至某一数值后， λ 下降缓慢；当