

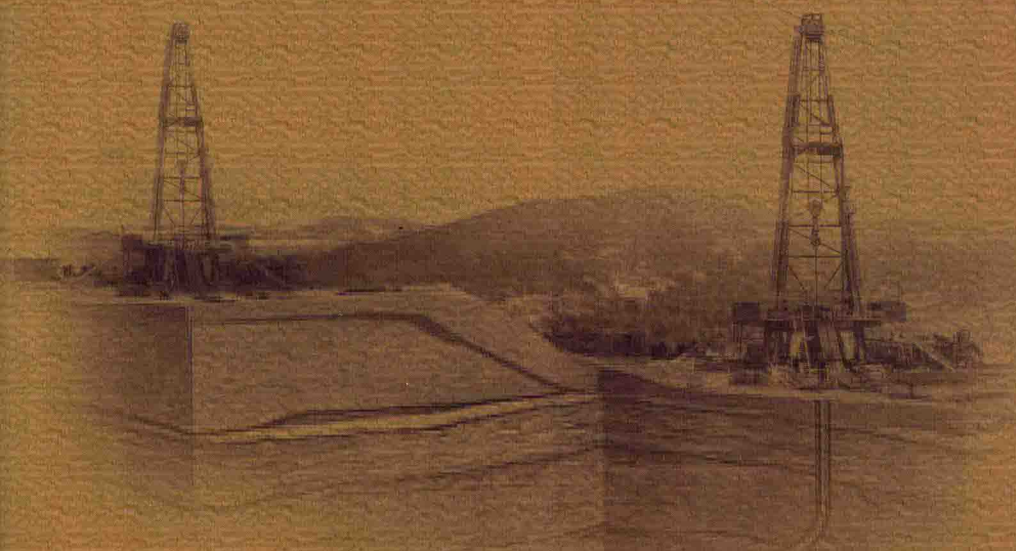
“十一五”国家重点图书出版规划项目

天然气工程手册

NATURAL GAS ENGINEERING HANDBOOK

气藏工程手册

李海平 任 东 郭 平 陈建军 主编

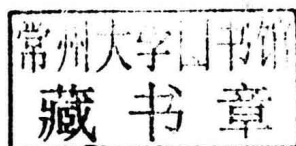


石油工业出版社

天然气工程手册

气藏工程手册

李海平 任 东 郭 平 陈建军 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本手册系统收集整理了气藏工程有关术语、气藏流体特征、储层物理参数、气藏类型判别、气井试井、气藏工程设计、气藏地质建模与数值模拟、气藏开发动态监测与分析、特殊气藏分析方法等内容,反映了目前我国气藏工程方法的最新动态。

本手册可供从事气藏开发动态分析、气藏开发方案设计、气藏开发生产管理、气藏工程研究等领域的工程技术人员、高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

气藏工程手册/李海平等主编.
北京:石油工业出版社,2016. 12

(天然气工程手册)

ISBN 978-7-5183-1536-9

I. 气…

II. 李…

III. 气藏工程-手册

IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 245670 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523712 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:24.75

字数:630 千字

定价:136.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《天然气工程手册》

编 委 会

李海平	马新华	吴 奇	张卫国	何江川
张明禄	宋德琦	张守良	汤 林	任 东
陈建军	郭 平	章卫兵		

专 家 组

孟慕尧	金忠臣	袁愈久	刘同斌	陈赓良
许可方	魏顶民	孟宪杰	李士伦	闵 琪
张 化	杨莉娜	胡光灿	颜光宗	冈秦麟
李颖川	杨川东			

序

近十多年来,我国天然气产业快速发展,天然气市场需求旺盛。天然气消费年均增速高达16%。天然气占能源消费总量的比重从2000年的2.2%升至2014年的5.6%。按照《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》,到2020年,天然气消费比重将达10%以上。天然气开发利用不仅对我国能源保障具有重要意义,而且对改善能源结构、促进环境保护也具有重大意义,我国政府高度重视天然气的发展,将天然气发展摆在国民经济发展的战略位置。

经过几代石油人的努力,我国天然气工业取得了很大的发展。目前已经形成了川渝、塔里木、长庆和青海等几大生产气区,建设了以“西气东输”、“陕京二线”等为代表的一批输气干线。这些都极大地促进了我国天然气技术的进步,尤其在低渗透致密砂岩气藏、疏松砂岩气藏、碳酸盐岩气藏、异常高压气藏、酸性气藏、火山岩气藏、凝析油气藏开发方面都取得了长足进步。

在20世纪80年代以四川气田开发为背景编写的《天然气工程手册》,曾在天然气发展过程中发挥了重要作用,但伴随着天然气开发技术的快速发展,该手册已不能适应现场和科研单位工程技术人员的需求。同时从事天然气各个领域工作的工程技术人员和管理人员越来越多,他们迫切需要一套与天然气工程紧密相关的工具书,因此,全面修订出版《天然气工程手册》非常必要。

由中国石油勘探与生产分公司组织编写的新版《天然气工程手册》,既考虑了手册类书籍的编写特点,又较全面地概括了当前国内外成熟的天然气工程技术和管理要求,充分体现了手册应有的科学性、实用性和可操作性。《天然气工程手册》丛书的出版,一定会对从事天然气各个领域工作的工程技术人员和管理人员具有很好的指导作用,并为促进我国天然气开发利用做出更大的贡献。



丛 书 前 言

《天然气工程手册》丛书作为一套用于天然气开发工程专业的工具书,由《气藏工程手册》《采气工程手册》《天然气集输工程手册》《天然气处理与加工手册》四个分册组成。在中国石油勘探与生产分公司的支持下,从2007年开始,中国石油咨询中心、石油工业出版社组织国内有关科研院所、高校以及油气田企业百余名专家学者历时8年编写完成。该套丛书可用于指导各类复杂气藏开发的技术管理、设计、生产操作,对从事天然气开发与利用的技术人员具有较强的应用价值,对高校相关专业师生也有较好的参考价值。

编写《天然气工程手册》丛书,是我国天然气工业快速发展的需要。早在20世纪80年代,中国天然气工业的发展已经在四川独树一帜。1982年四川石油管理局组织编写了《天然气工程手册》,对推动我国天然气工业的发展、培养现场技术人才起到了重要作用。进入21世纪以来,天然气作为清洁能源,在我国进入快速增长阶段,全国天然气消费由过去不足百亿立方米迅速上升到千亿立方米以上。产量的快速增长,国外天然气的规模引进、大力度的开展输气管网建设以及天然气消费市场的形成,为经济发展、环境改善做出了积极贡献。这个时期天然气开发的突出特点是:

- (1) 中国主要的气藏类型如碳酸盐岩、异常高压砂岩、高含硫、低渗透致密砂岩、疏松砂岩、火山岩等气藏得到全面开发,取得很多新的成果和经验;
- (2) 围绕经济有效快速上产,单井高产、区块接替稳产等一批新的天然气开发理念得到实施;
- (3) 水平井、大型压裂酸化改造等工程技术得到广泛应用;
- (4) 天然气高压集输、油气混输、脱水、脱硫、脱碳等大规模处理技术和设备的广泛应用,使地面系统建设向标准化设计、模块化建设方向快速发展;
- (5) 适应天然气平稳保供的多种季节调峰和应急调峰手段建设正处在重要实施阶段;
- (6) 天然气安全生产和HSE建设不断落实和完善;
- (7) 天然气开发队伍快速扩大,人才队伍的培养越来越受到重视。

为了及时总结天然气开发已取得宝贵经验和科研成果,并为今后一个时期我国气田开发实现有质量、有效益、可持续和科学发展提供技术支持,中国石油勘探与生产分公司组织编写了这套《天然气工程手册》丛书。

考虑《天然气工程手册》丛书既要符合专业手册类书籍的特点,也要适应天然气开发技术发展和管理进步的需求,在组织编写中坚持了以下4个原则:

(1)顶层设计,系统架构。通过顶层设计,构架了《天然气工程手册》的系统内容,明确了各分册的内容与重点,划分了工作界面,基本统一了手册的写作风格。

(2)技术为主,兼顾管理。手册重点内容涵盖了天然气开发各专业、各环节的技术问题,包括名词术语、公式原理、参数求取、开发指标、工艺方法等,也对天然气规划计划、开发技术经济评价、HSE等重要管理工作进行了阐述与归纳。

(3)共性集述,分类详解。在每个章节编写时,将章节中出现的共性内容放在前面集中阐述,然后根据不同气藏类型、不同开发过程、不同工艺方法等将特殊性内容分开详细阐述,使阐述的内容更有针对性。

(4)突出重点,体现实用。手册编写力求语言简练,尽量多的采用图表、公式等简洁的方式表达。在方法、公式的选择中尽量选用成熟、先进、实用技术,同时兼顾国内外新的标准、技术、规范,以及可预见的未来发展方向。

《天然气工程手册》第一分册《气藏工程手册》主要内容包括流体的物理化学性质与储层参数、气体渗流与试井、气藏工程设计、地质建模与数值模拟、动态监测与分析等,由李海平、任东、郭平、陈建军任主编,以西南石油大学、中国石油勘探开发研究院廊坊分院为主,并邀请西南油气田、长庆油田、塔里木油田、青海油田等主要油气田有关开发技术骨干参加编写。第二分册《采气工程手册》主要内容包括采气工程基础、完井试气、压裂酸化、采气和修井等,由张守良、马发明、徐永高任主编,以中国石油西南油气田公司采气工程研究院为主,并邀请其他主要油气田单位参加编写。第三分册《天然气集输工程手册》主要内容包括天然气集输管道、站场、设备、防腐与保温、自动控制、安全与环境等,由汤林、汤晓勇、刘永茜任主编,以中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司为主,并邀请其他油气田设计单位参加编写。第四分册《天然气处理与加工手册》主要内容包括产品质量标准与试验方法、天然气脱水、天然气脱硫、天然气脱碳、凝液回收、天然气液化等,由孟宪杰、常宏岗、颜廷昭任主编,以中国石油西南油气田公司天然气研究院为主,并邀请其他主要油气田单位参加编写。

《天然气工程手册》内容广泛,涵盖气藏类型多,内容涉及从开发到天然气集输处理加工的各专业,为了完成好手册的编写工作,使其充分反映我国天然气开发方面取得的技术进步,确保内容的准确性和实用性,在编写组织上采取了产、学、研、管相结合编写的办法,充分调动现场工程技术人员积极参与,成立了手册编委会和专家组,多次召开编写讨论会、专家审稿会,请一批老专家进行了细致把关审阅,尤其针对国内外天然气工程标准的差异导致计算系数的变化情况进行了严格审查和复核。

本手册在编写、出版过程中得到了中国石油勘探与生产分公司、中国石油咨询中心、中国石油西南油气田公司、中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、中国石油长庆油田公司、西南石油大学、石油工业出版社有限公司等单位的大

力支持,在此表感谢。尤其对孟慕尧、金忠臣、袁愈久、刘同斌、陈赓良、许可方、魏顶民、孟宪杰、李士伦、闵琪、张化、杨莉娜、胡光灿、颜光宗、冈秦麟、李颖川、杨川东等专家付出的辛勤劳动,表示衷心感谢!

本手册涉及的内容十分广泛,书中必定会存在不足或错误之处,请读者不吝赐教,以便于今后的修订完善。

编者前言

进入 21 世纪以来,我国天然气工业得到长足发展,气藏工程技术与方法作为气田开发的基础科学,在学习和引进国外先进技术和管理的同时,自身发展也日新月异,并形成一批成熟的技术方法和管理标准,在气田开发的信息化、数字化、自动化和标准化管理中发挥着重要作用。因此,编制一部适应时代要求的气藏工程手册,满足我国天然气发展进步的要求,是本手册编写的初衷。

根据我国天然气工程应用的实践,本手册编写重点在以下几个方面进行完善:一是对大量文献、教科书中的气藏工程经验公式、计算方程及图表等进行鉴别收录,特别是对不同工程单位下系数取值的严谨性进行检查和改正,以确保公式、图表的准确性。二是增加了气藏分类、储量计算标准、动态分析管理规范、气藏工程设计要求及指标预测等大量的管理内容,以适应现代气藏管理的需要。三是注重新工艺、新方法的应用,包括现代气井渗流理论及试井与产能评价方法,水平井、特殊井的试井与气藏工程,满足天然气开发工程的新进展和新思路。四是涵盖部分特殊气藏的分析方法,重点针对目前常见的边底水气藏、低渗透气藏、凝析气藏、疏松砂岩气藏、高酸性气藏、异常高压气藏、火山岩气藏等类型介绍了主要特点及开发特征。

全书共分九章,第一章术语,由李海平、郭平编写;第二章流体的物理化学性质描述与计算,由郭平、刘煌编写;第三章储层物理参数,由杜建芬、汪周华编写;第四章气藏类型划分,由万玉金、韩永新编写;第五章气体渗流与气井试井,由李晓平、庄惠农、吴峰、谭晓华、孙贺东编写;第六章气藏工程设计,由杨洪志编写;第七章气藏地质建模与数值模拟,由杨洪志、胡雪涛编写;第八章开发动态监测与动态分析,由冯曦、孙贺东、卢涛、刘永辉编写;第九章特殊气藏分析方法,其中水驱气藏由冯曦编写,低渗透气藏由卢涛、刘启国编写,出砂气藏由王小鲁编写,异常高压气藏由刘启国、王洪峰编写,凝析气藏由王洪峰、黄全华编写,高含硫气藏由刘义成、杨学峰编写,火山岩气藏由舒萍编写。全书由李海平、任东、郭平、陈建军主编统稿,编写过程中得到胡文瑞、孟慕尧、李士伦、冈秦麟、袁愈久等专家的指导,感谢马新华、罗涛在编写过程中的支持与帮助,龙芳对书的修改和编辑也作出了贡献。

由于编者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便改进完善。

目 录

第一章 术语	(1)
参考文献	(9)
第二章 流体的物理化学性质描述与计算	(10)
第一节 天然气的物理化学性质	(10)
一、天然气组分	(10)
二、天然气有关组分的物理化学常数	(11)
三、视临界参数计算	(11)
四、天然气物性参数	(17)
第二节 凝析油气体系相态特征	(36)
一、反凝析相图	(36)
二、油气体系气液相平衡	(37)
三、状态方程	(42)
四、凝析油、气两相物性参数	(48)
第三节 地层水物性参数	(51)
一、地层水的矿化度	(51)
二、溶解气水比	(53)
三、地层水的压缩系数	(53)
四、地层水的体积系数	(54)
五、地层水的黏度	(55)
六、地层水的密度	(56)
第四节 流体取样与 pVT 分析	(57)
一、气藏流体取样	(57)
二、气藏流体相态分析内容及应用	(58)
参考文献	(59)
第三章 储层物理参数	(60)
第一节 储层岩石基本物性	(60)
一、储层岩石的孔隙度	(60)
二、储层岩石的渗透率	(65)

三、储层岩石的流体饱和度	(71)
四、储层岩石的压缩系数	(78)
五、裂缝储层岩石参数	(78)
第二节 储层岩石渗流物理性质	(80)
一、储层岩石的毛细管压力	(80)
二、多相流体在岩石中的相对渗透率	(87)
参考文献	(94)
第四章 气藏类型划分	(95)
第一节 气藏单因素分类系列及判别指标	(95)
一、按气藏圈闭因素分类	(95)
二、按储层因素分类	(96)
三、按驱动因素分类	(97)
四、按相态因素分类	(98)
五、按气藏饱和程度分类	(100)
六、按天然气组分因素分类	(101)
七、按气藏原始地层压力分类	(102)
八、按气井产能分类	(102)
九、按气藏埋藏深度分类	(103)
第二节 天然气藏组合分类	(103)
一、气藏组合命名原则	(103)
二、组合方式	(104)
参考文献	(104)
第五章 气体渗流与气井试井	(105)
第一节 气体渗流基础	(105)
一、气体渗流微分方程	(105)
二、气体稳定渗流	(107)
三、气体不稳定渗流	(108)
四、气液两相渗流	(111)
第二节 气井产能试井分析方法	(116)
一、直井产能分析方法	(117)
二、水平井产能分析方法	(128)
第三节 气井不稳定试井分析方法	(132)

一、气井常规试井分析方法	(132)
二、气井现代试井分析方法	(145)
第四节 水平井试井分析方法	(157)
一、水平井渗流模型	(157)
二、水平井试井分析典型曲线	(159)
三、水平井试井分析方法	(163)
第五节 多井试井设计	(169)
一、多井试井的设计思路	(169)
二、多井试井的模拟设计	(169)
三、制定多井试井现场实施计划	(172)
第六节 试井设计	(173)
一、试井设计的原则与内容	(173)
二、试井模拟设计要点	(176)
参考文献	(182)
第六章 气藏工程设计	(185)
第一节 气藏工程设计概述	(185)
第二节 气藏工程设计内容	(186)
一、开发单元	(186)
二、开发方式	(192)
三、开发井网	(192)
四、生产制度界限与合理配产	(196)
五、采气速度与稳产时间	(198)
六、方案设计与比选	(199)
参考文献	(202)
第七章 气藏地质建模与数值模拟	(203)
第一节 气藏地质模型	(203)
一、地质模型的概念与分类	(203)
二、建立地质模型需要的参数	(205)
三、建立地质模型的步骤和流程	(205)
四、地质模型的应用	(207)
第二节 气藏模拟模型	(210)
一、模型选择	(210)

二、数据准备	(211)
三、模型参数场建立	(214)
第三节 历史拟合	(219)
一、历史拟合的步骤	(219)
二、拟合目标数据	(220)
三、可调参数范围	(221)
四、模型数据检查	(222)
五、产量拟合	(222)
六、压力拟合	(223)
七、储量计算与评价	(224)
第四节 动态预测	(224)
一、气藏开发模拟研究	(225)
二、开发方案指标预测	(225)
第五节 数值模拟常用软件	(227)
一、数值模拟软件的发展	(227)
二、常用商业数值模拟软件特点	(227)
参考文献	(228)
第八章 开发动态监测与动态分析	(229)
第一节 动态监测和动态分析的作用及相互关系	(229)
一、气藏开发工作对动态监测和动态分析的需求	(229)
二、动态监测与动态分析的范畴及相互关系	(229)
第二节 动态监测	(230)
一、动态监测工作原则	(230)
二、动态监测工作目的及内容	(231)
三、动态监测技术方法	(231)
第三节 气井与气藏地层压力计算	(238)
一、气井井底压力计算	(238)
二、气井地层压力计算	(246)
三、气藏平均地层压力计算	(249)
第四节 气藏和气井产量递减分析	(250)
第五节 动态储量计算	(253)
一、计算方法及其适用条件概述	(253)

二、物质平衡法	(254)
三、生产数据分析法	(265)
四、流动物质平衡方法(边控流生产数据分析法)	(278)
第六节 气田生产动态指标	(281)
一、气田生产动态指标	(281)
二、动态指标计算方法	(281)
参考文献	(284)
第九章 特殊气藏分析方法	(285)
第一节 水驱气藏	(285)
一、水驱气藏概念	(285)
二、水驱气藏开发特点	(285)
三、水驱气藏开发研究核心问题	(289)
四、水驱气藏专项分析技术	(290)
五、水驱气藏开发治水常用对策	(298)
第二节 低渗透气藏	(300)
一、低渗透气藏基本概念	(300)
二、低渗透气藏基本特征	(300)
三、低渗透气藏开发主要技术方法	(301)
四、低渗透气藏产能分析	(303)
第三节 出砂气藏	(312)
一、出砂及岩石破坏机理	(312)
二、气井出砂的影响因素分析	(313)
三、出砂预测方法研究	(314)
四、出砂临界压差预测的新模型	(316)
第四节 异常高压气藏	(319)
一、应力敏感对气田开发的影响	(319)
二、异常高压气田产能评价方法	(324)
三、异常高压气井动态监测及评价方法	(332)
第五节 凝析气藏	(340)
一、凝析气藏物性特征及对开发影响	(340)
二、凝析气藏气井产能	(347)
三、循环注气凝析气田动态监测及评价	(352)

第六节 高含硫气藏	(357)
一、高含硫气藏开发特殊性	(357)
二、高含硫气藏专项分析技术	(358)
三、高含硫气藏开发对策	(361)
第七节 火山岩气藏	(362)
一、火山岩气藏	(362)
二、火山岩气藏开发特点	(363)
三、火山岩气藏开发的核心技术	(365)
参考文献	(370)
附录 常用单位换算表	(374)

第一章 术 语

1. 天然气 natural gas

广义定义为包括可燃烃类气体、非烃类气体等一切可从地下开采出的气体资源。常规定义天然气通常仅指烃类气体。根据国际化标准组织 2001 年颁布的国际标准 (ISO 14532: 2001), 天然气是以甲烷为主的复杂烃类混合物, 通常含有少量的乙烷、丙烷、丁烷和其他烃类, 以及不可燃气体如二氧化碳、氮气、硫化氢和少量惰性气体如氦、氩等。

2. 天然气藏 natural gas reservoir

地层中具有独立的压力系统和统一气水界面, 且只聚集有天然气的单一圈闭。根据气体的组成、相态和储层性质, 可以分为不同类型的气藏。

3. 天然气相对分子质量 molecular weight of natural gas

天然气是多种气体的混合物, 没有固定的分子式, 其相对分子质量随组成的不同而变化。由各个单组分按混合比例求得, 称为天然气的相对分子质量、视相对分子质量或平均相对分子质量。

4. 天然气标准条件

在确定天然气物化特性时工程计算中所采用的压力和温度条件。中国采用的物理标准是 760mm 汞柱 (0. 101325MPa) 和 0℃; 中国采用的工程标准是 0. 101325MPa 和 20℃; 西方国家采用 14. 69595psi (0. 101325MPa) 和 60°F (15. 5556℃)。

5. 天然气密度 density of natural gas

单位体积天然气的质量。其单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。

6. 天然气相对密度 relative density of natural gas

在相同温度、压力条件下, 天然气的密度与干燥空气密度之比。

7. 天然气黏度 natural gas viscosity

表征天然气在流动时所产生的内部摩擦阻力系数, 一般情况下, 天然气黏度是指动力黏度, 单位是 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ (cP), 它与压力、温度、相对分子质量有关。在低压条件下, 气体黏度随温度增加而增加, 随气体相对分子质量的增加而减小; 高压条件下, 气体黏度与液体黏度变化趋势相似, 随压力增加而增大, 随温度增加而降低, 随相对分子质量增加而增大。

8. 天然气溶解度 solubility of natural gas

在一定的压力条件下, 单位体积油、水中所溶解的天然气的量, 也称溶解气液比。其单位为 m^3/m^3 。

9. 天然气溶解系数 solubility coefficient of natural gas

在一定温度条件下, 每增加单位压力时, 单位体积油、水中所增加的溶解天然气的量, 其单位

为 $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$ 或 $1/\text{MPa}$ 。

10. 天然气体积系数 volume factor of natural gas

相同质量天然气在地层条件下的体积与标准状况下的体积之比。

11. 天然气膨胀系数 expansion coefficient of natural gas

天然气体积系数的倒数称天然气膨胀系数。

12. 天然气的等温压缩系数 isothermal compressibility coefficient of natural gas

又称天然气压缩率或天然气体积弹性系数,指在等温条件下,天然气单位压力变化(dp)的体积变化率(dV/V),表示为:

$$C_g = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (1-1)$$

13. 蒸气压 vapor pressure

在一定温度下,物质呈气液两相平衡状态下的压力,亦称为饱和蒸气压。

14. 天然气的偏差系数 deviation coefficient of natural gas

又称压缩因子,是指在一定的温度和压力下,实际气体所占体积与同温同压下理想气体所占体积之比。天然气的偏差系数不是恒定的常数,是随着温度、压力变化的参数。

15. 天然气的视临界参数 critical parameter of natural gas

天然气气、液两相平衡共存的极限热力状态,在此状态下,气液两相热力参数相同,界面张力消失,此状态称为临界状态,对应的温度、压力、体积、密度、偏差系数和偏心因子等参数称为视临界参数。

16. 泡点温度 bubble point temperature

在一定压力下,多组分液体混合物加热到开始沸腾,刚出现气泡时的温度。

17. 泡点压力 bubble point pressure

在一定温度下,开始从液相中产生气泡的压力叫泡点压力。

18. 露点温度 dew point temperature

在一定压力下,天然气经冷却到气相中开始析出液滴时的温度。

19. 露点压力 dew point pressure

在一定温度下,开始从气相中析出液滴的压力叫露点压力。

20. 气液平衡常数 gas-liquid equilibrium constant

当流体处于气—液平衡时,某组分 i 在气、液相中的摩尔分数之比。

21. 闪蒸平衡 flash vaporization equilibrium

烃类流体在一定压力与温度下达到气液两相平衡,称为闪蒸平衡。

22. 反凝析现象 retrograde condensate phenomenon

在地层条件下凝析气藏中的烃类体系以气态存在,当地层压力降到露点压力以下时,从气