

中国气田开发丛书

ZHONGGUO QITIAN KAIFA CONGSHU

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 酸性气田开发

SUANXING QITIAN KAIFA |



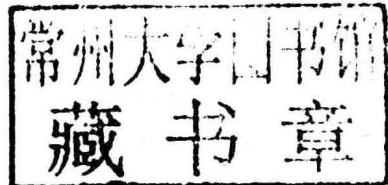
杜志敏 郭 肖 熊建嘉◎等编著

石油工业出版社

中国气田开发丛书

# 酸性气田开发

杜志敏 郭 肖 熊建嘉 等编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书全面系统阐述了酸性气田安全高效开发的重要基础理论、分析与设计方法以及工程技术。

本书可供从事油气田开发研究人员、油藏工程师以及油田开发管理人员参考，同时也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

酸性气田开发 / 杜志敏等编著 .  
北京 : 石油工业出版社, 2016.1  
(中国气田开发丛书)  
ISBN 978-7-5183-0846-0

I . 酸…  
II . 杜…  
III . 酸性气 - 气田开发  
IV . TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 198972 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](http://www.petropub.com)  
编辑部 : (010) 64523562 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 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷  
889 × 1194 毫米 开本 : 1/16 印张 : 15.5  
字数 : 430 千字

---

定价 : 124.00 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

# 《中国气田开发丛书》

## 编委会

顾问：赵政璋 李鹭光 刘振武

主任：马新华

副主任：孟慕尧 张卫国 何江川

委员：（按姓氏笔画排序）

万玉金 马力宁 冉启全 任东

江同文 杜志敏 李保柱 李海平

张明禄 陆家亮 胡勇 胡永乐

贾爱林 廖仕孟 谭健 熊建嘉

主编：马新华 孟慕尧

副主编：张明禄

# 《中国气田开发丛书》

## 专家组

组长：孟慕尧

成员：（按姓氏笔画排序）

冉隆辉 李士伦 岳清山 袁愈久 钱凯

# 《中国气田开发丛书·酸性气田开发》

## 编写组

组 长：杜志敏

副组长：郭 肖 熊建嘉

成 员：施太和 陈 平 王兴志 刘建仪

张 智 郭昭学 杨学锋 张 勇

付德奎 王旭东 冯仁蔚 张 砚

## 序

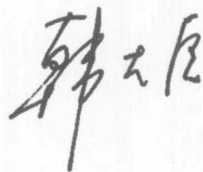
我国常规天然气开发建设发展迅速，主要气田的开发均有新进展，非常规气田开发取得新突破，产量持续增加。2014年全国天然气产量达 $1329 \times 10^8 \text{m}^3$ ，同比增长10.7%。目前，塔里木盆地库车山前带克深和大北气田，鄂尔多斯盆地的苏里格气田和大牛地气田，四川盆地的磨溪—高石梯气田、普光和罗家寨气田等一批大中型气田正处于前期评价或产能建设阶段，未来几年天然气产量将持续保持快速增长。

近年来，中国气田开发进入新的发展阶段。经济发展和环境保护推动了中国气田开发的发展进程；特别是为了满足治理雾霾天气的迫切需要，中国气田开发建设还将进一步加快发展。因此，认真总结以往的经验和技术，站在更高的起点上把中国的气田开发事业带入更高的水平，是一件非常有意义的工作，《中国气田开发丛书》的编写实现了这一愿望。

《中国气田开发丛书》是一套按不同气藏类型编写的丛书，系统总结了国内气田开发的经验和成就，形成了有针对性的气田开发理论和对策。该套丛书分八个分册，包括《总论》《火山岩气田开发》《低渗透致密砂岩气田开发》《多层疏松砂岩气田开发》《凝析气田开发》《酸性气田开发》《碳酸盐岩气田开发》及《异常高压气田开发》。编著者大多是多年从事现场生产和科学研究且有丰富经验的专家、学者，代表了中国气田开发的先进水平。因此，该丛书是一套信息量大、科学实用、可操作性强、有一定理论深度的科技论著。

《中国气田开发丛书》的问世，为进一步发展我国的气田开发事业、提高气田开发效果将起到重要的指导和推动作用，同时也为石油院校师生提供学习和借鉴的样本。因此，我对该丛书的出版发行表示热烈的祝贺，并向在该丛书的编写与出版过程中给予了大力支持与帮助的各界人士，致以衷心的感谢！

中国工程院院士



# 前 言

近年来,随着中国对绿色能源天然气需求的日益增长,酸性气田的勘探开发越来越得到大家的重视。我国在四川盆地川东北地区发现了罗家寨、普光、龙岗、元坝等一大批高含硫气藏。由于酸性气藏地质成因及流体相态变化规律复杂、天然气具有强腐蚀性和剧毒性等特殊性质,导致酸性气藏开发技术难度大,安全条件要求很高。如何保障酸性气藏安全高效勘探开发是当前国内外关注的重大技术难题。

西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室自2004年组建了高含硫气藏安全高效开发研究团队,以国家高技术研究发展计划(863计划)、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国家科技重大专项、国家安全生产监督管理局重大科技攻关等项目为依托,开展了高酸性气藏安全高效开发攻关研究工作。在酸性气藏的地质及开发特征、流体相态、硫沉积机理、气—液—固耦合流动规律、材料腐蚀评价等安全高效开发关键技术等方面,取得了丰硕的研究成果。

本书较为全面系统阐述了酸性气藏安全高效开发领域的重要基础理论、分析与设计方法以及工程技术。全书共分十三章,主要包括酸性气藏开发技术现状、酸性气藏地质特征及成因、酸性气藏流体性质、高含硫混合物气—液和气—液—固相平衡热力学计算、高含硫气藏硫沉积机理、酸性气井产能测试及评价、高含硫气藏气—固耦合渗流综合数学模型、天然气水合物、酸性气井腐蚀、酸性气井腐蚀控制、酸性气井井筒完整性管理与环空带压管理、酸性气井井喷失控后酸性气体扩散机理研究以及酸性气体公共安全等方面内容,具有较强的理论深度和实用性。

本书编写得到孟慕尧、李士伦等专家的指导。编者希望本书能为从事油气田开发工程领域技术人员和大专院校相关专业师生提供帮助和指导。限于编者的水平,本书难免存在不足和疏漏之处,恳请同行专家和读者批评指正。

本书编写组

2015年8月



# 目 录

第一章 绪论	1
第一节 酸性气藏区域分布	1
第二节 酸性气藏开发现状	2
第三节 高含硫气藏开发的特点与难点	4
第四节 高含硫气藏开发技术发展方向	5
参考文献	6
第二章 酸性气藏地质特征及成因	7
第一节 酸性气藏储层特征	7
第二节 酸性气藏酸气成因	7
第三节 酸性气藏成藏机理	12
参考文献	20
第三章 酸性气藏流体性质	21
第一节 $H_2S$ 和 $CO_2$ 气体的物理化学性质	21
第二节 含 $H_2S$ 和 $CO_2$ 天然气的主要性质	22
第三节 元素硫的性质	40
参考文献	42
第四章 高含硫混合物气—液和气—液—固相平衡热力学计算	44
第一节 高含硫混合物气—液相平衡	44
第二节 高含硫混合物气—液—固相平衡	47
第三节 高含硫混合物气—液相和气—液—固相平衡计算方法	50
参考文献	56
第五章 高含硫气藏硫沉积机理	58
第一节 硫的溶解与析出	58
第二节 硫沉积动力学机理	61
第三节 硫析出后在孔隙喉道中的存在方式	70
第四节 硫沉积影响因素	73
第五节 硫沉积对储层的伤害	73
参考文献	79
第六章 酸性气井产能测试及评价	81
第一节 试井测试工艺	81
第二节 测试流程及实施步骤	87
第三节 试井解释数学模型	90
参考文献	101
第七章 高含硫气藏气—固耦合渗流综合数学模型	102
第一节 气—固耦合渗流综合数学模型建立	102



第二节	数值模型 .....	107
第三节	计算实例 .....	114
	参考文献 .....	117
<b>第八章</b>	<b>天然气水合物</b> .....	<b>118</b>
第一节	水合物形成机理 .....	118
第二节	高温高压高含H <sub>2</sub> S或CO <sub>2</sub> 气井水合物实验 .....	119
第三节	水合物预测模型 .....	122
第四节	防止水合物堵塞的方法 .....	129
	参考文献 .....	131
<b>第九章</b>	<b>酸性气井腐蚀</b> .....	<b>133</b>
第一节	酸性气井腐蚀环境 .....	133
第二节	酸性气井的电化学腐蚀 .....	140
第三节	酸性气井中材料的局部腐蚀 .....	148
第四节	湿硫化氢中的环境断裂行为 .....	152
第五节	橡胶密封材料腐蚀 .....	154
第六节	酸性气井腐蚀环境模拟 .....	158
	参考文献 .....	171
<b>第十章</b>	<b>酸性气井腐蚀控制</b> .....	<b>172</b>
第一节	酸性气井油套管材料选用与评价 .....	172
第二节	酸性气井非金属材料选用与评价 .....	179
第三节	酸性气井的防腐措施 .....	179
	参考文献 .....	183
<b>第十一章</b>	<b>酸性气井井筒完整性管理与环空带压管理</b> .....	<b>184</b>
第一节	井筒完整性管理的理念及流程 .....	184
第二节	酸性气井井口和采气树设备防腐 .....	185
第三节	酸性气井井下装置失效分析 .....	187
第四节	降低应力水平的井身结构设计 .....	188
第五节	套管强度设计 .....	194
第六节	酸性气井环空带压与安全评价 .....	195
	参考文献 .....	205
<b>第十二章</b>	<b>酸性气井井喷失控后酸性气体扩散机理</b> .....	<b>206</b>
第一节	井喷失控后井口流场 .....	206
第二节	井喷失控后酸性气体扩散模型 .....	213
第三节	模型数值计算方法 .....	215
第四节	计算实例 .....	224
	参考文献 .....	226
<b>第十三章</b>	<b>酸性气体公众安全</b> .....	<b>228</b>
第一节	H <sub>2</sub> S的理化性质及毒害 .....	228

第二节	SO <sub>2</sub> 的理化性质及毒害 .....	229
第三节	硫化亚铁有关的安全问题 .....	230
第四节	H <sub>2</sub> S溢出后扩散行为及安全半径 .....	230
第五节	H <sub>2</sub> S和CO <sub>2</sub> 废气液注入井 .....	231
第六节	酸性气井安全开发相关法律法规 .....	233
参考文献	.....	235

# 第一章 绪 论

天然气是一种高效、清洁、安全的能源，目前在世界一次能源消费结构中已占到23.8%，而中国仅占5.7%，结构极不合理。酸性天然气在天然气“增储上产”中具有重要的地位和作用。由于 $H_2S$ 具有强腐蚀性和剧毒性<sup>[1]</sup>，使得安全清洁经济开发酸性天然气变得技术要求高、开发难度大。

酸性气体 (Sour Gas, Acid Gas, 简称酸气) 是相对于“甜”气 (Sweet Gas) 而言，是含一定量 $H_2S$ 和 $CO_2$ 的混合气体。由于酸性气体溶于水呈弱酸性，故得此名。含有酸性气体的天然气气藏，称为酸性气藏。

不同研究机构对酸性气体定义有所区别。例如美国石油学会 (American Petroleum Institute) 认为凡含有 $H_2S$ 的气体就是酸性气体。API RP 49建议 $H_2S$ 浓度超过 $14.14\text{mg}/\text{m}^3$ (20ppm)的气体定义为酸性气体。美国和加拿大允许工作环境的含硫浓度的上限是 $7.07\text{mg}/\text{m}^3$ (10ppm)。美国防腐工程师协会 (NACE) 从材料的观点定义酸性气体，认为 $H_2S$ 分压等于或大于0.05psi (0.34kPa) 就属于酸性气体。在中国，由于对 $CO_2$ 的净化要求不严格，而一般将硫含量 $20\text{mg}/\text{m}^3$  (CHN) 作为界定指标，硫含量高于 $20\text{mg}/\text{m}^3$  (CHN) 的天然气称为酸性天然气，硫含量低于 $20\text{mg}/\text{m}^3$  (CHN) 的称为洁气。本书涉及的酸性气藏主要是指含硫气藏，即指产出的天然气中含有硫化氢以及硫醇、硫醚等含硫物质的气藏。偶尔还会有单质硫出现在产出的天然气中。一旦产生的天然气中出现单质硫，将在生产和输送过程中造成硫堵塞和腐蚀。

## 第一节 酸性气藏区域分布

酸性气藏分布广泛，目前全球已发现400多个具有商业价值的高含 $H_2S$ 和 $CO_2$ 气藏，主要分布在加拿大、美国、法国、德国、俄罗斯、中国和中东地区<sup>[2]</sup>。

全球富含 $H_2S$ 和 $CO_2$ 的酸性气田储量超过 $736320 \times 10^8\text{m}^3$ ，约占世界天然气总储量的40%<sup>[3]</sup>。加拿大是高含 $H_2S$ 气田较多的国家，其储量占全国天然气总储量的1/3左右，主要分布在落基山脉以东的内陆台地。阿尔伯塔省有30余个高含硫气田，天然气中 $H_2S$ 的平均含量约为9%，如卡罗林 (Caroline) 气田， $H_2S$ 和 $CO_2$ 含量分别为35.0%和7.0%；卡布南 (Kaybob South) 气田的 $H_2S$ 和 $CO_2$ 含量分别为17.7%和3.4%；莱曼斯顿 (Limestone) 气田的 $H_2S$ 和 $CO_2$ 含量分别为5%~17%和6.5%~11.7%；沃特堂 (Warterton) 气田的 $H_2S$ 和 $CO_2$ 含量分别为15%和4%。这4个气田是加拿大典型的高含 $H_2S$ 和 $CO_2$ 气田，探明地质储量近 $3000 \times 10^8\text{m}^3$ 。

俄罗斯含 $H_2S$ 天然气储量接近 $5 \times 10^{12}\text{m}^3$ ，主要集中在阿尔汉格尔斯克州，分布于乌拉尔—伏尔加河沿岸地区和滨里海盆地，以奥伦堡 (Orenburg) 气田和阿斯特拉罕 (Astrakhan) 气田为代表。其中，奥伦堡气田是典型的高含硫大型气田，天然气可采储量达到 $18408 \times 10^8\text{m}^3$ ，气体组分中 $H_2S$ 和 $CO_2$

含量分别为24%和14%<sup>[4]</sup>。

此外，美国、法国和德国等都探明有高含硫气田储量，典型的大型高含硫气田有：美国的惠特尼谷—卡特溪（Whitney Canyon—Carter Creek）气田，探明天然气储量 $1500 \times 10^8 \text{m}^3$ ；法国的拉克（Lacq）气田，探明天然气储量 $3226 \times 10^8 \text{m}^3$ ；德国的南沃尔登堡（South Woldenberg）气田，探明天然气储量 $400 \times 10^8 \text{m}^3$ <sup>[4]</sup>。

四川盆地是中国天然气工业的发源地，天然气规模化勘探始于20世纪50年代初，已发现的22个含油气层系中有13个高含 $\text{H}_2\text{S}$ ，近15年发现的众多二叠系、三叠系礁滩气藏均为高含硫气藏<sup>[5]</sup>。中国 $\text{H}_2\text{S}$ 含量超过 $30 \text{g}/\text{m}^3$ 的高含硫气藏中有90%集中在四川盆地<sup>[6]</sup>。四川盆地已探明高含硫天然气储量约 $9200 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占全国天然气探明储量的1/9。已动用高含硫天然气储量 $1402.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占已探明高含硫天然气储量的15%，开采潜力大<sup>[2]</sup>。华北油田赵2井是中国目前已钻遇硫化氢含量最高的井，其硫化氢含量高达92%。四川盆地川东地区飞仙关组硫化氢含量大多为14%~17%，各个气田 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{CO}_2$ 含量差异较大，但目前已发现的气田 $\text{H}_2\text{S}$ 含量一般低于20%， $\text{CO}_2$ 含量在10%以下，气体中基本不含 $\text{C}_7$ 以上烃类组分，部分气田含有有机硫。表1-1为四川盆地高含硫气藏分布情况<sup>[2]</sup>。

表1-1 四川盆地高含硫气藏分布

气田名称	气田所属公司	探明储量 $10^8 \text{m}^3$	最高 $\text{H}_2\text{S}$ 含量 $\text{g}/\text{m}^3$	投产时间
威远	中国 石油	400	45.2	1965.10
卧龙河		189	75.6	1973.8
中坝		86	110.4	1982.3
磨溪		349	44.1	1991.2
黄龙场		33	201.5	2003.4
高峰场		25	105.6	2004.12
罗家寨		797	150.1	未投产
渡口河		359	117.8	未投产
铁山坡		374	204.1	未投产
龙岗		试采区1023	130.3	2009.7
普光	中国 石化	2738	215.8	2009.10
元坝		1592	74.1	未投产

高含 $\text{CO}_2$ 天然气田在全球范围内资源量大、分布广泛。如美国Richland气田、日本Yoshii—Higashi—Kashiwazaki气田、Minami—Nagaoka气田、澳大利亚Scott Reef气田、印度尼西亚Jatibarang气田以及中国松辽盆地火山岩气藏、准噶尔盆地火山岩气藏，其中松辽盆地深层天然气资源量达 $2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 以上。

## 第二节 酸性气藏开发现状

### 一、国外酸性气藏开发现状

国外对酸性气藏的规模勘探始于20世纪50年代初。加拿大和法国是最早发现高含硫气田的国家，

随后美国、德国、苏联和中东等国家与地区也在这方面取得了明显进展,使许多著名的酸气气田陆续投入了开发,如法国的拉克气田、加拿大的卡罗林气田和卡布南气田、俄罗斯的阿斯特拉罕气田以及美国的惠特尼谷—卡特溪气田、布拉迪气田等。

### 1. 拉克气田

拉克气田是法国最大的气田<sup>[7]</sup>,位于阿奎坦盆地南部,法国波尔多市以南160km处。

拉克气田开发经历了4个阶段:第一阶段(1952—1957年)为试采阶段,主要对3口井进行试采,检验井底及井口设备的抗硫防腐性能,同时获取气藏动态参数;第二阶段(1957—1964年)为产能建设阶段,共有26口生产井,气田日产量由 $82 \times 10^4 \text{m}^3$ 上升至 $2156 \times 10^4 \text{m}^3$ ,平均单井产量为 $80 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ,采气速度2.4%;第三阶段(1964—1983年)为稳产阶段,通过在构造高点打10口加密井,气田日产量为 $1906 \times 10^4 \sim 2361 \times 10^4 \text{m}^3$ ,平均单井产量 $50 \times 10^4 \sim 60 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ,采气速度2.6%,稳产期长达19年,稳产期可采储量采出程度为65%左右;第四阶段(1983—2006年)为产量递减阶段,1994年气田日产量递减为 $405 \times 10^4 \text{m}^3$ ,气田累计产气 $2258 \times 10^8 \text{m}^3$ ,地质储量采出程度为70%。

拉克气田自1957年正式投入开发,至今已有50多年的开发历史。由于该气田开发技术政策合理、开采措施得当,稳产时间长达19年,目前仍在开采,取得了很好的开发效果。

### 2. 惠特尼谷—卡特溪气田

美国惠特尼谷—卡特溪气田于1977年发现,为高含硫气藏。在1980年以前,根据最初的地震资料认为惠特尼谷和卡特溪是两个独立的构造,后来发现它们的深层气是连在一起的,遂于1980年将它们联合起来开发。到1983年4月,在联合区内共钻成生产井28口,主要是在麦迪逊层(16口)和大角层(8口)中完井。至1983年4月,累计采气 $24 \times 10^8 \text{m}^3$ ,生产凝析油 $7.7 \times 10^4 \text{t}$ ,其中两个主力产层麦迪逊层和大角层累计产天然气 $7.58 \times 10^8 \text{m}^3$ 和凝析油 $7 \times 10^4 \text{t}$ 。1983年初,联合区内有20口井在生产,平均日产气 $602.3 \times 10^4 \text{m}^3$ 和日产凝析油510t。

### 3. 布拉迪气田

布拉迪气田是美国重要的酸性气田之一,该气田在开发方面有两个难题,一是气候条件不好,二是硫化氢对设备的腐蚀和人身的危害。冬天的冰雪和大雾使钻机搬迁十分困难,集输管线和其他一些设施都有结冰堵塞现象。为了防止天然气水合物的形成,采取了在井口安装加热器。输气管线上敷设绝热层、把管线深埋于泥土以下等措施。在防硫方面采取了如下措施:(1)加强检测,取得可靠的数据。在钻井液车和录井车上均安装有腐蚀检测器和取样器,每天绘制出腐蚀速度曲线。(2)安装净化储备装置。及时处理钻井液,大大减少了地面污染和扩散。(3)使用防硫材料制成的钢管和设备,输气管线用80号无缝钢管,最小强度为317.4MPa,井口采气装置的全部阀门用不锈钢制造。其他一些钻采仪表和设备,都需要经过防硫处理。(4)对现场人员进行安全训练,设置报警系统,改善人体的防护和通风设施。

由于采取了以上措施,连续钻22口气井,没有出现报废井和其他重大的钻井问题,也并未出现硫化氢中毒的事故。气田钻井22口,其中韦伯层11口,福斯福里亚层1口,努格特层5口,达科塔层5口,均采用单层完井。

## 二、国内酸性气藏开发现状

中国石油西南油气田分公司、中国石化中原油田普光分公司以及西南石油大学油气藏地质及开



发工程国家重点实验室通过自主攻关和国际技术交流，先后解决了中深中小型、超深大型高含硫气藏开发的主要技术难题。通过开展多轮研究和攻关，形成了高含硫气藏评价及开发方式优化、安全钻井及完井、采气工程、地面集输及腐蚀控制、天然气净化和高含硫天然气的绿色环保等特色技术（图1-1）<sup>[7]</sup>。

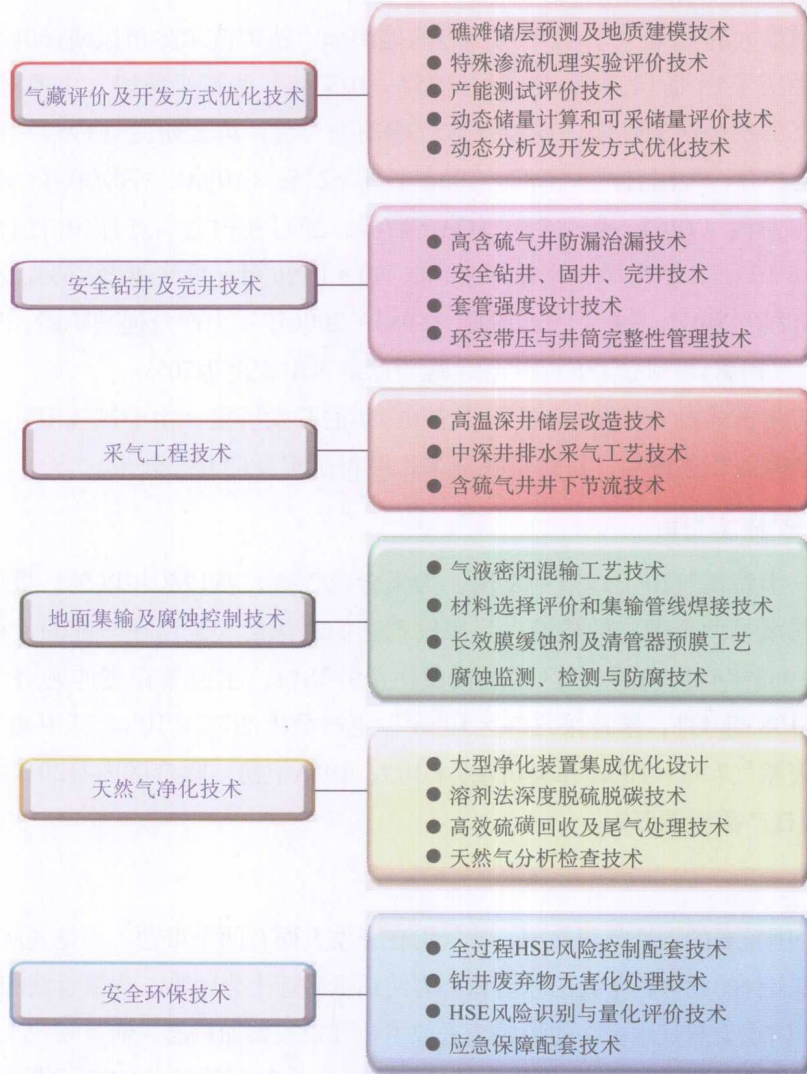


图1-1 高含硫气藏开发特色技术（据李鹭光，2013）

基础理论和技术创新在多个大型高含硫气藏成功应用。2009年7月，中国石油在国内率先实现安全开采大型超深高含硫气藏——龙岗气田，2009年12月14日成功建成中国石油最大规模的海外高含硫气田，日处理能力达 $2000 \times 10^4 \text{m}^3$ 的高含硫天然气净化厂一次投运成功。中国石化普光气田于2009年10月12日开始投产，“十一五”期间普光气田建成天然气产能 $100 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的生产能力，产能规模为世界第二大高含硫气田。

### 第三节 高含硫气藏开发的特点与难点

由于硫化氢气体的剧毒性和腐蚀性，安全清洁经济开发高含硫天然气技术要求高、难度大，主要



体现在以下几方面<sup>[7]</sup>：

(1) 气藏复杂特征导致开发技术需求复杂化。

以四川盆地高含硫气藏为例， $H_2S$ 含量最高达 $493g/m^3$ ，最大埋深达7000m，最大地层压力近90MPa，最高温度达 $175^\circ C$ ，包括裂缝—孔洞、裂缝—孔隙等复杂储集类型和不同活跃程度的边、底水，气井产能较高但差异大，难以采用同一技术模式进行开发。

(2) 地理和人居环境对气藏开发提出苛刻要求。

高含硫气藏开发工程量大、成本高；高含硫气藏往往处于多静风环境、人口密度大，高含硫天然气一旦泄漏后果严重；农业经济所占比重较大，环境保护要求高。这些客观条件对高含硫气藏安全清洁开发提出了极高的要求。

(3) 气藏开发前期评价要求高。

大型高含硫气田开发钻井与完井、净化厂和集输系统建设工程量和投资大，产能建设需准确确定产能规模，对气藏早期描述、气井产能快速评价要求高。在高含硫气井资料录取受限的情况下，确保开发前期评价可靠性难度大。

(4) 气藏开发安全保障与成本控制难度大。

高含硫气藏开发所需管材质量等级高、工艺技术复杂，目前国内高含硫气藏开发所需的管材主要依赖进口，导致成本大幅度增加。要兼顾安全生产和效益开发，需研发适应不同工况下的新型抗硫管材、设备与工艺技术，并准确评价安全性。新领域的开发探索工作量大，难度高。

(5) 环境与安全风险实时评价与控制技术要求高。

高含硫气藏开发风险控制涉及钻井与完井、地面集输、净化和气田水及废弃钻井液处理等环节，其核心问题是风险的量化评估难度大，环境保护的关键点是解决针对高含硫气田开发过程中产生的特定污染物的治理技术难题，如含硫有毒气体、废钻井液、含硫化氢气田水等的处理技术及工程化应用。

#### 第四节 高含硫气藏开发技术发展方向

高含硫气藏开发技术的发展是一个持续完善、不断提高的过程。随着高含硫气藏开发对象日益复杂多样，国家安全环保标准的日益严格，对高含硫气藏开发技术提出了更高的要求，还需要在以下6个专业领域方向持续深化和完善<sup>[7]</sup>。

(1) 高含硫气藏地质与气藏工程技术的配套完善。通过开展基于沉积微相格架下的地震储层预测和流体分布预测研究，开展储层中元素硫沉积实验评价和气、液、固三相耦合流动模拟等技术攻关，解决强非均质碳酸盐岩气藏储层预测和流体分布描述、储层元素硫沉积及伤害机理实验评价和动态分析等技术难题。

(2) 高含硫气井钻井完井工具的国产化和工程技术的配套完善。通过改进大温差固井水泥浆体系和工艺，实现耐蚀管材和高抗硫井下工具的国产化，解决困扰 $\phi 177.8mm$ 尾管固井水泥浆体系和工艺、耐蚀合金管材及气密封特殊螺纹研制等技术难题。

(3) 高含硫气田采气工程技术的深化攻关和配套。通过开展超深层低渗透储层压裂和体积改造研究及高抗硫井下节流器工具结构优化设计与材质优选研究，研制高抗硫完井及增产改造井下工具；解

决深层碳酸盐岩低渗透储层有效改造和高温高含硫深井（5000m以上）排水采气工艺等技术难题。

（4）高含硫气田的地面集输及防腐工艺技术的持续攻关和配套。通过开展对元素硫、 $H_2S$ 、 $CO_2$ 共存和大量产水工况下的腐蚀评价、新型缓蚀剂与硫溶剂的研制等持续攻关，解决 $H_2S$ 分压大于1MPa时的材料评价、生物降解类缓蚀剂的研制与评价优选，以及管道的失效分析等技术难题<sup>[8]</sup>。

（5）高含硫天然气净化工艺的深入完善。通过对硫收率大于99.8%的净化工艺包和尾气 $SO_2$ 处理技术升级，解决日益严格的国家标准对天然气总硫含量和装置硫收率提出更高要求的技术难题<sup>[9]</sup>。

（6）高含硫天然气安全环保技术的持续提高。通过加强企业之间、企业与地方政府之间的区域快速应急联动机制，加强温室气体排放监测评估，气田水回注环境风险监测和控制等的技术配套，建立高含硫气田区域性应急管理保障体系，完善配套工业化应用钻井液微生物处理技术，以及气田水回注系统风险监测、评价及控制，温室气体排放评估及减排等技术。

### 参 考 文 献

- [1] Stanley D Atherton.  $H_2S$ -A Toxic Gas That Can Kill [C]. SPE 3202, 1971.
- [2] 朱光有, 张水昌, 李剑, 等. 中国高含硫化氢天然气的形成及其分布 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 18-21.
- [3] 叶慧平, 等. 酸性气藏开发面临的技术挑战及相关对策 [J]. 石油科技论坛, 2009(4): 63-65.
- [4] 方义生. 中国天然气开发特征和技术 [A] // 中国工程院—俄罗斯科学院论坛会议论文集 [C]. 北京: 中国工程院, 2005.
- [5] 李鹭光. 高含硫气藏开发技术进展与发展方向 [J]. 天然气工业, 2003, 33(1): 18-24.
- [6] 李景明, 李剑, 谢增业, 等. 中国天然气资源研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 15-18.
- [7] 杜志敏. 国外高含硫气藏开发经验与启示 [J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 35-37.
- [8] 唐威, 等. 油气井中的二氧化碳腐蚀 [J]. 钻采工艺, 2006, 29(5): 107-110.
- [9] 袁士义, 胡永乐, 罗凯. 天然气开发技术现状、挑战及对策 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 32(6): 1-6.

## 第二章 酸性气藏地质特征及成因

### 第一节 酸性气藏储层特征

通常情况下,  $H_2S$ 含量较高的气藏形成于含盐度高的海相沉积环境中, 且常与碳酸盐及其伴生的硫酸盐沉积有关。 $H_2S$ 成因主要来自于硫酸盐的有机与无机还原作用。天然气中 $H_2S$ 含量的高低与气藏储层类型、 $H_2S$ 成因有密切的关系。根据有关中国硫化氢气藏发育地层的认识和研究, 高含硫化氢气藏储层具有以下一些特征。

(1) 储层组合类型主要为碳酸盐岩或碳酸盐岩—硫酸盐岩组合。碳酸盐岩和碳酸盐岩—硫酸盐岩组合是高含硫化氢气藏所在地层组合的主要组成部分, 其中, 在碳酸盐岩—硫酸盐岩组合中, 硫酸盐岩主要有两种赋存形式: 一种是以层状夹于碳酸盐岩之中或与碳酸盐岩互层分布, 如四川盆地的嘉陵江组、雷口坡组、飞仙关组气藏<sup>[1]</sup>和渤海湾盆地孔店组气藏等, 该组合类型特征是硫化氢含量高, 通常属于高含硫或特高含硫气藏; 另一种是以透镜状、团块状、星散状包容于碳酸盐岩中, 如四川盆地东部建南气田长兴组生物礁气藏, 该组合类型特征通常属于低含硫—高含硫气藏。

(2) 储层类型主要为石灰岩和白云岩型储层。石灰岩型储层以石灰岩、白云质灰岩为主体, 储集空间以裂隙为主、基质孔隙为辅; 白云岩型储层以白云岩、灰质白云岩为主体, 储集空间主要是孔隙型(溶孔、溶洞)和裂缝—孔隙型。

(3) 气藏埋深大, 地层温度较高。如川东北部宣汉、开县地区的下三叠统飞仙关组气藏, 埋深3000~4500m, 地层温度大多在100℃以上<sup>[2]</sup>。

(4) 储层物性条件差异大、非均质性强。储层物性表现为低孔隙度、低渗透率或中高孔隙度、中高渗透率特征。如建南气田长二段北高点礁相储层孔隙度最大17.4%, 最小0.11%, 平均1.35%; 渗透率最大16.39mD, 最小0.001mD, 平均0.266mD。长二段南高点生物滩相储层孔隙度最大4.6%, 最小0.26%, 平均0.82%; 渗透率最高7.3mD, 最小0.002mD, 平均0.283mD。而普光飞仙关组气藏鲕粒白云岩孔隙度最大可达21.14%, 最小2.36%, 平均9.73%; 渗透率变化较大, 为0.0163~2823.0015mD, 平均为31.0815mD。

### 第二节 酸性气藏酸气成因

酸性气藏主要是指含有硫化氢或二氧化碳的气藏。目前, 世界范围内酸性气藏硫化氢含量从微量(现有仪器刚能检测到)到96%; 二氧化碳含量从微量到99%。这些气体成因的研究具有重要的理论