

GUOWAI SHENCENG QICANG KAICAI JISHU

国外深层气藏 开采技术

何 鲜 主编

石油工业出版社

国外深层气藏开采技术

何 鲜 主编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是在检索、筛选和研究国外有关深层气藏开采工艺技术文献的基础上,结合我国深层气藏的地质特点编译而成的。该书重点介绍了国外深层气藏的开采方式选择、开采工艺方案、防腐技术和高效压裂酸化技术,附有9个典型实例。

本书可供从事气田开发的管理人员、工程技术人员和现场操作人员,以及石油大专院校相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

国外深层气藏开采技术/何鲜主编.
北京:石油工业出版社,2001.7
ISBN 7-5021-3358-5

I. 国…

II. 何…

III. 天然气开采-技术-世界

IV. TE375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 23619 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 293 千字 印 1—1500
2001 年 9 月北京第 1 版 2001 年 9 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3358-5/TE·2517
定价:24.00 元

编 译 委 员 会

主 编：何 鲜

副主编：赵万优 何军民

委 员：朱维耀 付 超 王绍刚 谢前进

樊友宏 蒋华义 王志国

前 言

天然气既是一种优质、丰富的能源，又是重要的化工原料，开发利用的经济效益、环境效益和社会效益都十分巨大，随着世界各国对能源的进一步需求和对环境问题的日益关注，天然气受到普遍重视，发展天然气已成为当代世界潮流。到 1999 年 1 月，世界探明天然气可采剩余储量 $146 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。天然气产量也大幅度增长，1998 年世界天然气总产量 $2.348 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，储采比 62。1999 年天然气在一次能源消费结构中的比例约 23.2%。

我国是世界上开发利用天然气最早国家之一，但就形成一定规模的天然气工业而言，却只有短短的 30 余年历史。我国天然气工业是新中国成立后伴随着石油工业的发展而成长起来的，随着中下游基础设施的建设，在四川形成初步的现代天然气工业。“七五”以来，我国天然气勘探取得了重大突破，截止到 1999 年底，探明储量突破 $2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。但我国天然气产量仍比较低，1999 年的总产量仍比较低，1999 年的总产量 $243 \times 10^8 \text{m}^3$ ，储采比 56，天然气在一次能源消费结构中的比例仍停留在 2%。

技术对天然气工业发展的影响是巨大的，利用新技术已取得的进步是人们难以想象的。从最近几年世界天然气发展历程看，除了天然气勘探技术不断提高外，天然气钻井、开采技术也取得了长足的进步。主要包括气藏早期精细描述与评价技术、气井现代试井综合解释技术、气藏开发数值模拟技术、提高采收率技术、深层致密低渗透气藏巨型压裂改造技术、水平井技术、非常规气藏开采技术以及气田开发上下游配套建设等技术。

深部致密气藏埋藏深，压实、胶结和成岩作用强烈。从孔隙特征看，基质孔隙主要是微孔隙和溶蚀孔隙，致密砂岩中泥质含量高，岩石颗粒细，孔隙和喉道半径特别小，微孔隙较发育，由于岩石胶结致密，孔隙连通性差，导致渗透低。所有这些特点都要求在水平井固井与射孔、完井与测试中有较高的油层保护技术；在开采工艺上要求对开发层系、开发井网、开发方式、大型水力压裂、深度酸化、防腐防垢等方面有先进卓越的技术。

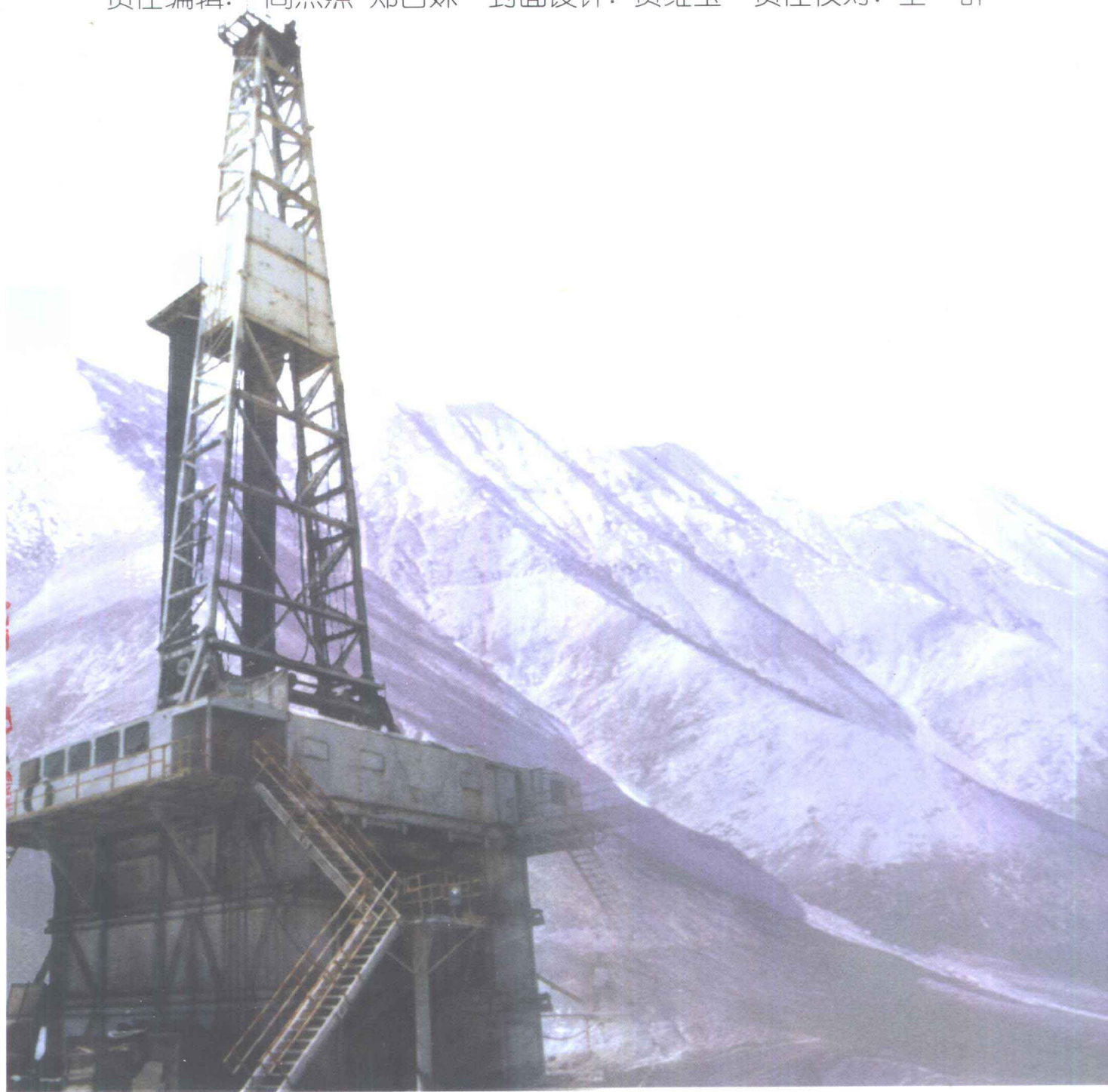
为此，我们通过检索和筛选近年来国外关于深层气藏水平井定向井完井、测试和油层保护，以及深层气藏开采技术等文献，编译成为《国外深层气藏水平井定向井完井技术》、《国外深层气藏开采技术》这两本书，旨在向我国气田开发的管理决策人员、工程技术人员和现场操作人员介绍国外这些方面的发展动态、配套工艺技术和操作管理经验。

应该指出的是，因为涉及这一领域的国外文献不是很多，以及由于时间仓促，编译水平有限，难免有一些不足之处，敬请谅解。

编译者

2001.5

责任编辑：阎熙照 郑吉妹 封面设计：赛维玉 责任校对：王 群



ISBN 7-5021-3358-5



9 787502 133580 >

ISBN 7-5021-3358-5/TE · 2517

定价：24.00 元



目 录

第一章 气井生产系统与采气工艺方式选择	(1)
第一节 气井(气藏)评价.....	(1)
第二节 气井合理产量的确定.....	(3)
第三节 气井工作制度的选择.....	(5)
第二章 增产措施技术	(9)
第一节 主要增产方法	(10)
第二节 储层评价及施工合理性研究评价	(14)
第三节 岩石力学与水力压裂	(18)
第四节 水平井压裂和地层应力	(25)
第五节 水力压裂设备	(32)
第六节 酸液有效作用距离	(36)
第七节 酸蚀裂缝导流能力	(43)
第八节 工作液体系评价	(53)
第九节 水平井酸化	(65)
第十节 酸化实时监测与评价	(74)
第三章 防腐技术	(80)
第一节 CO_2 腐蚀机理及影响因素	(81)
第二节 H_2S 腐蚀	(88)
第三节 腐蚀预测与控制	(92)
第四节 固井水泥环柱的腐蚀	(98)
第五节 实例:深热含硫气井防腐.....	(104)
第四章 应用实例	(114)
第一节 水平井多层酸化压裂处理.....	(114)
第二节 在深水平井中进行多级前置液酸压.....	(121)
第三节 严格控制酸液漏失,延长酸压裂缝长度.....	(129)
第四节 开采深层含硫气藏的现场经验.....	(133)
第五节 亚拉巴马州 Mobile 海上深层酸性 Norphlet 气井的完井设计	(139)
第六节 新的增产技术改善了 Canyon 砂层的气体产量	(145)
第七节 有效的酸化压裂作业提高 Arun 气井的产能	(153)
第八节 在胡果顿气田中处理变化增进压裂施工的设计.....	(160)
第九节 新墨西哥东南部 Morrow 和 Atoka 气层的压裂增产措施	(167)

第一章 气井生产系统与采气工艺方式选择

天然气从地下储层流入井底，经过井筒、地面设备及管线不断供给用户的过程是一个完整的系统生产过程。对于不同的气藏、不同的开发阶段、不同的生产方式，生产系统呈现不同的特征，产生不同的技术问题。

研究分析气井生产系统的目的就是按照开发方案的要求，充分而有效地运用人力、物力、财力，通过计划、组织，指导和分析处理气井各不同生产阶段系统出现的技术问题，合理选择采气工艺的方式，使气井在合理产量下保持较长时期相对稳产，使气藏获得较高的最终采收率和良好的经济效益。

气井生产系统与采气工艺方式选择的内容相当丰富，本章将重点介绍气井（气藏）评价、合理产量的确定、工作制度的选择。

第一节 气井（气藏）评价

研究气井生产系统与采气工艺方式的选择，首先要做气井（气藏）评价。

一、储层评价

在气井投产前和投产后，利用已获得的静态、动态地质资料，进行储层评价，不论对完井、增产措施，还是对井的开采都有十分重要的意义。

储层评价的主要任务是认识储层岩性，储层各向非均质程度，主要孔隙结构和孔隙结构类型，孔洞和裂缝发育程度，储层是否含泥质和胶结程度，是否易垮塌、出砂，孔隙度和渗透率在各向变化情况，油气水饱和度，油气水控制因素和分布情况等等，了解这些情况对储层进行分类，可以为完井方法的选择、增产措施和开采工艺的制定与实施提供正确的依据。

储层分类可以根据储层地质特征、钻井显示和电测解释进行判别，也可以根据 r_{50} 、 K 、 ϕ 为主要参数并参考 p_d 、 $\bar{r}$ 进行划分：

其中 r_{50} ——孔喉中值半径， μm ；

K ——渗透率， μm^2 ；

ϕ ——有效孔隙度，%；

p_d ——露点压力，MPa；

$\bar{r}$ ——平均毛管半径， μm 。

二、井身及井口装置质量评价

气井井身及井口质量好坏不仅关系到各种工艺措施能否顺利进行，而且关系到气井自始至终能否安全生产。

井身评价要了解井下是否有落物，井底是否有钻井液伤害。残酸或压井液排净没有、固井试压情况、套管有否窜槽、油套管下入深度合不合适，油套管是否破裂、变形或堵塞等。

井口装置评价应了解井口装置规格是否与井的压力匹配。井口无控制部分有无泄漏、装置阀件是否完好，有无外漏或内漏。

对于含硫气井还需了解井身和井口装置材质是否抗硫。井身和井口装置如果存在上述质

量问题，将对井的安全生产构成威胁，必须在气井交采气部门管理之前由完井单位妥善解决。

三、气井产能和气藏储量评价

通过完井测试、一点法试井、稳定试井和不稳定试井、IPR法（气井流入动态曲线）分析、经验法等可以确定气井产能，了解气藏储量。

气井的产能和气藏的储量是安排气井生产的重要依据，但是仅仅根据产能和储量（或更有甚者仅根据产能）确定气井应该以多大产量来生产是有害的，比如有的井虽然产能较大但边底水活跃，大产量生产会导致气井过早出水或水淹；对储层岩石结构疏松，易出砂、坍塌的井，产量太大也将造成不良后果。气井通过集输气管线与用户相连，天然气用户用气的特点一般要求长时期、连续、稳定供气，因此保持供气平衡是天然气生产有别于其他生产的重要特征。这就是说，在安排气井生产时，除了要考虑上述因素，还要考虑有无新井接替，而保持气井较长时间相对稳产就可以为新井产能接替赢得时间。

四、驱动类型评价

在进行气藏驱动类型评价时，要充分考虑以下情况：

- (1) 气藏各井产量大小；
- (2) 气井生产流动压差变化；
- (3) 气藏各井开采不均衡性在折算地层压力等值图上的反映，了解气藏各部分渗透性变化情况；

- (4) 气井关井压力恢复情况；
- (5) 气井生产时地层水活跃程度。

五、油气水性质评价

在进行油气水性质评价时，应了解：

- (1) 井是否产油、产油量大小、油组分，是否具有凝析气藏的特征。
- (2) 天然气组分。硫化物（硫化氢和有机硫）、二氧化碳的含量等。
- (3) 井是否产地层水。水型，水量大小、水中无可利用的元素，水中硫化物，砷、汞及其他环境污染物的含量。

掌握上述资料，就为油气水的处理、利用和井的生产管理提供了依据。比如天然气含硫量高，就要考虑抗硫材质的选用，是否下封隔器保护套，加注缓蚀剂，选用何种方法进行含硫气处理、防止硫化氢应力腐蚀等。

六、地面工程环境评价

地面工程环境评价需要了解：

- (1) 气井附近地面管网、场站现状。
- (2) 周围用户情况，用气性质、压力、气量、气质等要求。
- (3) 邻井情况。本井与邻井是否同层、同层是否连通，本井可不可以作为邻近低压气井增压或气水井气举排水采气的气源井。
- (4) 本井附近供电、供水、通讯等情况。
- (5) 地面有否排污系统。
- (6) 公路交通等其他情况。

详细了解这些情况可以为确定气体流向、优化产能建设方案和搞好气井生产系统管理和选择采气工艺方式提供依据。

第二节 气井合理产量的确定

在组织新井投产时，首先要确定气井的合理产量。保持合理产量不仅可以使气井在较低投入下较长时期稳产，而且可以使气藏能在合理的采气速度下获得较高的采收率，从而获得最好的经济效益。

气井的合理产量必须在充分掌握气井地下、地面有关资料的基础上编制出气藏开发方案（或试采方案）来确定。

确定气井合理产量有如下具体要求。

一、气藏保持合理采气速度

气藏的采气速度要合理应满足的条件是：

(1) 气藏能保持较长时间稳产。稳产时间的长短不仅与气藏储量和产量的大小有关，还与气藏是否有边底水、边底水活跃与否等其他因素有关。

(2) 气藏压力均衡下降。气藏压力均衡下降可以避免边底水舌进、锥进，这对有水气藏的开采十分重要。

(3) 气井无水采气期长，此阶段采气量高，气井无水采气期长，资金投入相对少，管理方便，采气成本低。

(4) 气藏开采时间相对较快，采收率高。

(5) 所需井数少，投资省，经济效益好。

对于地下情况清楚、储量丰度高、储层较均质的气藏，在确定了合理采气速度后，采取稀井高产的方针，可以节约投资，获得良好的经济效益。

气藏类型不同，其采气速度也不相同。对于均质水驱气藏，较高的采气速度有利于提高采收率。这类气田只要措施得当，采气速度对采收率无明显的不利影响。对于非均质弹性水驱气藏，由于地质条件千差万别，故应根据气藏的具体情况确定采气速度。前苏联有人对在水驱方式下开采非均质气藏，为获得最高天然气采收率的最佳采气速度进行了数值模拟研究。他们采用层状模型描述储层非均质程度，渗透率分布不均的气藏，用水的弹性系数描述边外地层水对天然气采收率的影响。模拟输入的主要参数是：

K ——层状气藏的非均质程度，它是各分层总厚度与纯产层厚度比值的加权平均值，

$$K = 4 \sim 19;$$

K_{ave} ——气藏加权平均渗透率， $K_{ave} = 0.1 \sim 0.2 \mu m^2$;

p_{ro} ——原始地层压力，MPa；

p_r ——目前地层压力，MPa；

S_g ——含气饱和度；

S_w ——含水饱和度；

ϕ ——孔隙度；

β_w^* ——地层水弹性系数，取为 $25.5 \times 10^{-5} \sim 50.99 \times 10^{-5} MPa^{-1}$ 。

模拟结果表示在图 1-1 和图 1-2 上。从图可以看出该类气藏采气速度与采收率之间重要的规律：

(1) 不同类型的气藏，在长期稳定开采情况下，始终存在着符合实际条件的最佳采气速

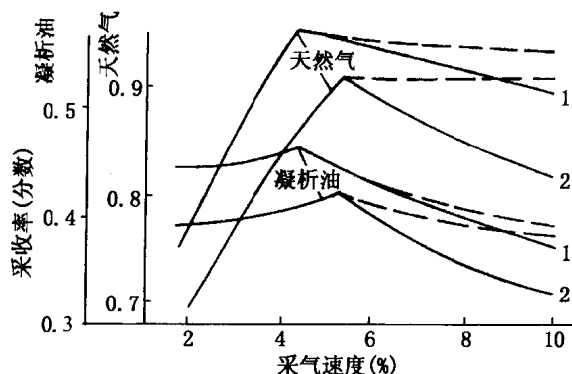


图 1-1 气藏平均渗透率 K_{ave} 为 $0.1\mu m^2$ 和 $0.2\mu m^2$ (线 1, 2) 水驱气藏采气速度与采收率的关系
图中虚线为开采后期

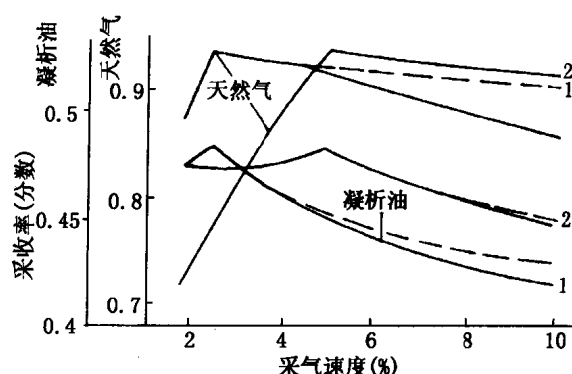


图 1-2 气藏平均渗透率 K_{ave} 为 $0.1\mu m^2$ 和 $0.2\mu m^2$ (线 1, 2) 水驱气藏采气速度与采收率的关系
图中虚线指开采后期

度 (图 1-1 上曲线的最高点), 可保证获得最高的采收率。

(2) 采气速度过高引起高渗透层横向水浸; 开采后期采气速度过低, 不利于释放水封气, 均会降低采收率。

(3) 地层的均质程度和气藏平均渗透率越高, 采气速度可调节的范围越宽, 采气速度对采收率影响不大, 反之, 采气速度对采收率的影响越刁。

气藏经过试采确定合理采气速度之后, 按此速度允许的采气量结合各井的实际情况确定各井的合理产量。

二、气井井身不受破坏

如果气井产量过高, 对于胶结疏松易垮塌的产层, 高速气流冲刷井底会引起气井大量出砂, 井底压差过大可能引起产层垮塌或油、套管变形破裂, 从而增加气流阻力, 降低气井产量, 缩短气井寿命。因此合理产量应低于气井开始出砂, 使气井井身受破坏的产气量。

如果井的产量控制过低, 对于某些高压气井, 井口压力可能上升至超过井口装置的额定工作压力, 危及井口安全; 对于气水井, 产量过低, 气流速度达不到气井自喷带水的最低流速, 会造成井筒积液, 对气井生产不利。

对于产层胶结紧密, 不易垮塌的无水气井, 根据大量的采气资料表明, 合理的产量应控制在气井绝对无阻流量的 15%~20% 以内较好。

三、气井出水期晚, 不造成早期突发性水淹

气井生产压差过大会引起底水锥进或边水舌进。尤其是裂缝性气藏, 地层水将沿裂缝窜进, 引起气井过早出水, 甚至造成早期突发性水淹。气井过早出水, 产层受地层水伤害, 造成不良后果:

(1) 加速产量递减, 气层的一部分渗流通道被水占据, 单相流变为两相流, 使气相渗透率降低, 增大了气体渗流阻力, 使产气量大幅度下降, 递减加快;

(2) 地层水沿裂缝、高渗透带窜进, 气体被水封割、遮挡, 气体流动受阻, 部分区块变成死气区, 使采收率降低;

(3) 气井出水后水气比增加, 造成油管中两相流动, 使压力损失增大, 井口流动压力下降, 严重时会造成井筒积液, 产气量下降, 甚至造成气井过早停喷, 大大缩短了气井寿命。

四、平稳供气、产能接替

连续平稳供气是天然气生产的基本要求。气井在生产过程中随着地层压力下降，产量最终不可避免要下降，产量下降的速度主要与储量和产量的大小有关，确定合理的产量可以使气井产量的下降不至于过大，能保持阶段性相对稳产，既能满足平稳供气的需要，也能为新井产能接替争取时间。

对于储量大小不同的气田或气藏，其采气速度和稳产年限可按下述标准控制：储量 $\geq 50 \times 10^8 \text{m}^3$ ，采气速度为 3%~5%，稳产期要求在 10 年以上；储量为 $(10 \sim 50) \times 10^8 \text{m}^3$ ，采气速度为 5%左右，稳产期要求 5~8 年，储量 $< 10 \times 10^8 \text{m}^3$ ，采气速度为 5%~6%，稳产期 5~8 年。

总之，在确定气井的合理产量时，需要对上述诸因素综合考虑。

第三节 气井工作制度的选择

气井工作制度是指适应气井产层地质特征和满足生产需要时产量和压力应遵循的关系。

气井的工作制度基本上有 5 种，其适用条件如表 1-1。

表 1-1 气井工作制度的运用条件表

序 号	工作制度名称	适用 条件
1	定产量制度 ($q_g = \text{常数}$)	气藏开采初期时常用
2	定井底渗流制度 $C = \text{常数}$	疏松的砂岩地层，防止流速大于某值时砂子从地层中产出
3	定井壁压力梯度制度 $\Delta p = \text{常数}$	气层岩石不紧密，易坍塌的气井
4	定井口（井底）压力制度 $p_{wh} = \text{常数}$ ($p_{wf} = \text{常数}$)	凝析气井，防止井底压力低于某值时油在地层中凝析出来；当输气压力一定时，要求一定的井口压力，以保证输入管网
5	定井底压差制度 $\Delta p = p_r - p_{wf} = \text{常数}$	气层岩石不紧密，易坍塌的井；有边底水的井，防止生产压差过大引起水锥

上述工作制度中，1、4、5 种最常用，以下主要介绍这 3 种制度。

一、定产量制度

适用于产层岩石胶结紧密的无水气井早期生产，是气井稳产阶段最常用的制度。气井投产早期，地层压力高，井口压力高，采用气井允许的合理产量生产，具有产量高、采气成本低、易于管理的优点。地层压力下降后，可以采取降低井底压力的方法来保持产量一定。

定产量制度下的地层压力、井底压力、井口压力随时间的变化用以下公式计算：

(1) 地层压力：

$$p_r = p_{r0} - \frac{q_g t}{q_{upr}} \quad (1-1)$$

(2) 井底压力：

$$p_{wf} = \sqrt{p_r^2 - (aq_g + bq_g^2)} \quad (1-2)$$

(3) 井口压力:

$$p_{wh} = \sqrt{\frac{100 p_{wf}^2 - \theta q_g^2}{e^{2S}}} \times 10^{-1} \quad (1-3)$$

$$q_{upr} = \frac{R_0 Z_0}{p_{r0}} \quad (1-4)$$

$$S = \frac{0.03415 \gamma_g L}{T \bar{Z}} \quad (1-5)$$

$$\theta = \frac{1.337 f \bar{T}^2 \bar{Z}^2}{D^5} (e^{2S} - 1) \quad (1-6)$$

式中 p_{r0} ——原始地层压力, MPa;
 p_r —— t 时间的地层压力, MPa;
 p_{wf} —— t 时间的井底压力, MPa;
 p_{wh} —— t 时间的井口压力, MPa;
 q_g ——气井产量, $10^3 \text{ m}^3/\text{d}$;
 t ——气藏压力由 p_{r0} 下降的累积生产时间, d;
 a, b ——二项式的系数;
 q_{upr} ——单位压降采气量, $10^3 \text{ m}^3/\text{MPa}$;
 R_0 ——气藏天然气原始储量, 10^3 m^3 ;
 Z_0 —— p_{r0} 、 T_{r0} 下天然气的偏差系数;
 T_{r0} ——产层温度, K;
 γ_g ——天然气对空气的相对密度;
 L ——气层中部深度, m;
 $\bar{T}$ ——井筒气柱平均温度, K;
 $\bar{Z}$ ——井筒气柱平均偏差系数;
 D ——油管内径, cm;
 f ——油管摩阻系数, 可按表 1-2 选择。

表 1-2 油管内径与油管摩阻系数关系表

D (cm)	f
5.03	0.0161
6.20	0.01512
7.59	0.0145

$\bar{T}$ 可由下式确定:

$$\bar{T} = t_0 + \frac{L}{2M_0} + 273 \quad (1-7)$$

式中 t_0 ——静气柱井口温度, $^{\circ}\text{C}$; 此值最好实测, 不能实测时可用气井所在地区常年平均温度值代替;

M_0 ——地热增温率, $m/^{\circ}C$ 。

$$M_0 = \frac{\text{实测井底温度的深度} - \text{常温层深度}}{\text{实测井底温度} - \text{地面常年平均温度}} \quad (1-8)$$

$\bar{Z}$ 可按拟对比压力 p_{pr} 和拟对比温度 T_{pr} 查图或表确定:

$$p_{pr} = \frac{\bar{p}}{p_{pc}} \quad (1-9)$$

$$T_{pr} = \frac{\bar{T}}{T_{pc}} \quad (1-10)$$

式中 $\bar{p}$ ——井筒气柱平均压力, MPa;
 p_{pc} ——天然气拟临界压力, MPa;
 T_{pr} ——天然气拟临界温度, K。

$$\bar{p} = \frac{p'_{wf} + p_{wh}}{2} \quad (1-11)$$

式中 p_{wh} ——井口压力, MPa;
 p'_{wf} ——近似井底压力, MPa。

$$p'_{wf} = p_{wh} \cdot e^{1.251 \times 10^{-4} \gamma_g L} \quad (L > 1680 \text{ m 时}) \quad (1-12)$$

$$p'_{wf} = p_{wh} \cdot e^{1.293 \times 10^{-4} \gamma_g L} \quad (L < 1680 \text{ m 时}) \quad (1-13)$$

已知气藏日产量 q_g , 生产时间 t , 原始地层压力 p_{r0} 和单位压降采气量 q_{upr} , 就可以用式 (1-1) 求出地层压力 p_r 。分析式 (1-2), 在定产量生产时, $a q_g$ 项和 $b q_g^2$ 项不变 (认为 a, b 不变时), 井底压力 p_{wf} 随地层压力 p_r 的下降而下降。由于 p_{wf} 值与 $p_r^2 - (a q_g + b q_g^2)$ 成开方关系, p_{wf} 下降速度比 p_r 快。同样, 分析式 (1-3) 井口压力 p_{wh} 的下降速度也比 p_{wf} 快。所以, 定产量生产时, p_r 、 p_{wf} 、 p_{wh} 三个压力之间的差值越来越大, 直到 p_{wh} 降到与输气压力相近时, 气井转入定井口压力生产, 或者在产量降到 q_{gl} 下定产量生产 (图 1-3)。

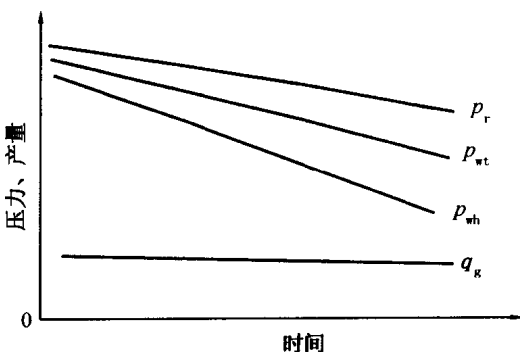


图 1-3 定产量生产时的压力变化

二、定井口 (井底) 压力制度

气井生产到一定时间, 井口压力降低到接近输气压力时, 应转入定井口压力制度生产。定井口压力制度是定井底压力制度的变形, 为简化起见, 可以近似按定井底压力预测产量变化:

$$q_g = \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} - [p_{wf}^2 - (p_{r0} - \frac{q_{gp} t}{10 q_{upr}})^2]} \times \frac{1}{b} - \frac{a}{2b} \quad (1-14)$$

在式 (1-13) 中, $\frac{a^2}{4b^2}$ 项、 p_{wf}^2 项、 p_{r0} 项、 $\frac{1}{q_{upr}}$ 项、 $\frac{a}{b}$ 项都是常数, 只有 $q_{gp} t$ 是变量, 随时间 t 增大而增大, 结果使 q_g 急剧减小, 产量大幅度递减。

三、定井底压差制度

(1) 按照气田或气藏规定的日产量 q_{gp} (为常数) 给定不同的生产时间 t , 确定不同的时间气井产量 q_g :

$$q_g = -\frac{a}{2b} + \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} - \frac{1}{b} \left[(\Delta p)^2 - 2p_{r0}\Delta p + \frac{q_{gp}t}{q_{upr}} 2\Delta p \right]} \quad (1-15)$$

(2) 求不同时间的地层压力:

$$p_r = p_{r0} - \frac{q_{gp}t}{q_{upr}} \quad (1-16)$$

或

$$p_r = \frac{aq_g}{2\Delta p} + \frac{bq_g^2}{2\Delta p} + \frac{\Delta p}{2} \quad (1-17)$$

第二章 增产措施技术

自从 20 世纪 80 年代以来,世界范围迅速发展了水平井技术。据不完全统计,目前全世界已经在各种类型的油气藏中完成了几千口水平井。而且,随着水平井钻进、监控技术的日益完善和钻水平井成本的逐渐降低,今后将钻更多数量的水平井,水平井生产过程中的各种技术的应用也将变得越来越重要。

采用水平井生产技术,可以获得高的最终采收率 and 经济效益。特别是对于非均质、低渗透油气藏的开发效果更好。因而,作为“排液道”的水平井在油气田开发中起着越来越重要的作用。而针对各种不同类型的油气藏来说,以往的竖井增产处理工艺也应用到水平井领域。并且发现,在各种增产措施实施过程中,采用水平井技术可以获得比直井处理更好的效果。

气井增产措施是指向地层中注入一种或几种物质,通过与地层岩石或这些物质本身相互间在某一特定条件下所产生的物理或化学反应,提高或恢复气层的渗透性,从而提高施工井产气能力的工艺措施。

增产措施的方法很多,最常用的就是水力压裂、酸处理和爆炸压裂 3 类。无论应用哪种方法,想获得理想的增产效果就必须研究和认识一系列的地质和工程问题。只有通过多种研究明确准备施工井低产的原因及其潜力所在之后,才有可能进而寻求可望增产的措施类型、工艺规模及实施方法。

为此,首先要进行的是评层选井,通过对储层及其井身条件作出客观、合理的评价,作出是否进行增产改造的决策,如果有必要进行增产措施处理,还需要提出拟施工井的几个增产措施设计方案。

设计是一次施工的指导性文件,是施工的依据。现代设计是采用计算机模拟技术,对施工方案和参数进行优化。一般应包括以下 5 个方面的具体工作:

(1) 确定气藏岩石性质和有关参数,包括全部气藏、气井参数,从而使设计者能在经验(若有可能则在“专家系统”查询)的基础上预选一些可能增产的施工方案。

(2) 在预选方案的基础上结合气井的特定条件定量地认定各方案的参数,包括工艺方法、工作液类型及数量、泵注速度等,形成可供计算并实施的方案。

(3) 利用计算机模拟每种方案的施工结果;获得处理半径(基质酸处理)、动态裂缝几何尺寸、有效裂缝尺寸、裂缝导流能力等施工结果。并预测每种方案的增产效果。

(4) 分别计算出实施每种方案所需投入的全部资金,并使其与施工增产效果列表对比。

(5) 优选最佳施工方案。

本章主要根据这一思路,将针对碳酸盐岩储层,系统介绍主要的增产工艺方法、评层选井的方法及原则、酸化压裂设计所需的地层破裂压力、裂缝延伸压力、泵入速率(排量)、水力裂缝的几何尺寸等参数的计算、酸液在裂缝中的分布状况和有效作用距离的试验和数学模型,裂缝的导流能力的实验室模拟和数学模拟、工作液和添加剂、水平井基质酸化工艺、酸化监测技术、预计的增产效果等有关问题。

第一节 主要增产方法

当前,投入工业应用的增产工艺有三大类,即酸化、压裂、爆炸。在研究和现场试验过程中,每一大类又派生出不同的方法。对碳酸盐岩的增产改造,国际上主要采用基质酸化工艺和压裂酸化工艺,本节将对基质酸化和压裂酸化作简明的介绍。

一、概述

在对不同储层进行酸化增产改造中,主要形成和发展了基质酸化和压裂酸化两大类技术,习惯上用酸化(Acidizing)表示基质酸化,用(Acid-Fracturing)表示压裂酸化。在一般性叙述中,酸化一词常作为不同类型酸液与地层进行化学反应的统称。

1. 基质酸化

也称为常规酸化或解堵酸化,是指在井底施工压力小于储层岩石破裂压力的条件下,将酸液注入地层,解除井筒附近的伤害,恢复储层产能的酸化技术。由于基质酸化中不压开地层,酸液主要在岩石孔隙和天然裂缝内流动,并首先在渗流能力较好的孔洞里反应,当堵塞物和部分岩石与酸液反应较快时,岩石壁面将在深度方向上很快被溶解掉,形成称之为分维(fractal)型酸蚀孔洞,这些孔洞就成为提高渗流能力的主要通道。

在优化设计中推荐采用“最大施工压力法”,即取最大井底施工压力为地层破裂压力的 $9/10$,以最大排量注液;也可采用“恒定排量法”。排量高时易发生“溶蚀孔洞型”酸化,穿透距离长;排量低时易发生“点蚀密集型”酸化,穿透距离短。酸液浓度一般小于 15% ,主要使用普通盐酸或泡沫酸,现场施工较为简单,有效酸蚀半径一般不超过 1m 。目前,国内在生产井上使用相对较少,多用于注水井的解堵增注。

2. 压裂酸化

又简称为酸压,是指在井底施工压力大于地层岩石破裂压力的条件下将酸液注入地层,地层裂开形成人工裂缝,酸液始终在张开的裂缝中流动并与裂缝壁面反应,最终形成具有一定长度和一定酸蚀导流能力的裂缝,以提高储层渗流能力的酸化技术。

酸压施工参数通过模拟计算确定,酸液浓度一般为 $15\% \sim 28\%$,国内较多使用 20% 浓度,基本上采用油管管柱+封隔器高压施工,返排困难时可采用液氮助排。

压裂酸化技术以能否实现滤失控制、延缓酸岩反应速度、形成较长的酸蚀裂缝为划分标准,可以分为普通酸压和深度酸压两大类。

二、普通酸压技术

也称常规酸压技术。它是指只采用牛顿型的普通盐酸对地层进行酸压的工艺技术。施工中既不加砂也不使用前置液,不使用特殊的返排技术。普通盐酸既是压开地层裂缝的液体,又是与地层反应的液体。由于酸液滤失控制差,酸岩反应速度快,有效酸蚀作用距离较短,一般在 $15 \sim 30\text{m}$ 之间($10\text{m} \leq \text{缝高} \leq 30\text{m}$,排量 $2000\text{L}/\text{min}$,其他模拟参数从略,下同),主要适合于伤害严重的高渗储层。

三、深度酸压技术

以获得较长的酸蚀裂缝为目的而采用的不同于普通酸压技术的一切酸压技术都称为深度酸压技术。目前,国内外主要发展和应用了下述七大类深度酸压技术,其中第1、7两项为深度酸压施工中采用的两种工艺技术,第2~6项是使用不同酸液体系的酸压技术,这些酸液也可以在第1、7两项技术中使用。