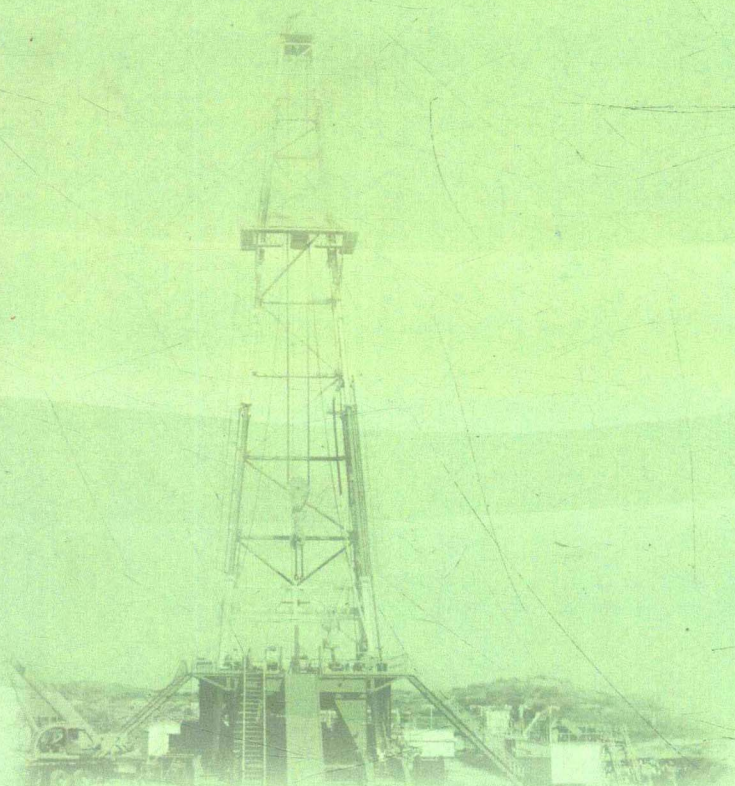




煤层气钻井工程 设计与施工

王怀洪 滕子军 于付国 商敬秋 巩 固 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

煤层气钻井工程设计与施工

王怀洪 滕子军 于付国 商敬秋 巩 固 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

煤层气是赋存在煤层中以甲烷为主要成分的烃类气体,是新型洁净非常规天然气。煤层气开采以多分支水平井和U形井为主要井型,其核心钻井技术是轨迹设计、轨道控制、钻井循环介质优化。本书围绕这三项技术从理论设计到工程实践进行了论述,包括钻井工程整体设计、轨迹设计、井眼轨道控制设计(下部钻具组合设计)、钻井工程质量标准,以及多分支水平井、U形对接井、泡沫及微泡钻井液、绒囊钻井液。

书中技术设计内容包括数学公式与现行规程、规范兼容,工程实践内容来自项目组钻井一线的亲身经历,具有针对性和可操作性,对煤层气、页岩气钻井工程的设计者和施工者均有切实的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气钻井工程设计与施工 / 王怀洪等著. — 徐州 : 中国矿业大学出版社, 2014. 7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2398 - 2

I. ①煤… II. ①王… III. ①煤层—地下气化煤气—钻井工程—设计②煤层—地下气化煤气—钻井工程—工程施工 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 155330 号

书 名 煤层气钻井工程设计与施工
著 者 王怀洪 滕子军 于付国 商敬秋 巩 固
责任编辑 何 戈
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 212 千字
版次印次 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷
定 价 29.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

煤层气,是指赋存在煤层中以甲烷为主要成分、以吸附在煤基质颗粒表面为主、部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体,是煤的伴生矿产资源,属非常规天然气,是洁净、优质能源。开发煤层气,既可预防煤矿瓦斯事故,又可增加清洁能源供应,减少温室气体排放,保护环境。

我国煤层气资源量约为 36.81 万亿 m^3 ,居世界第三位,与陆上常规天然气资源量基本相当。按煤种划分,高、中、低煤阶煤层气资源量分别为 7.80 万亿 m^3 、14.30 万亿 m^3 、14.70 万亿 m^3 。沁水盆地和鄂尔多斯盆地是我国煤层气资源量最大的两大盆地,超过 10 万亿 m^3 ,为规模开发提供了资源条件,山东煤田地质局在这两大盆地均积累了丰富的钻井经验。

我国煤层气地面开发始于 1989 年,经过 20 多年的探索与实践,2012 年我国地面煤层气产量为 26.60 亿 m^3 。

山东煤田地质局自 2003 年开始涉足煤层气勘探开发领域,迄今已有十余载。十余年间,煤层气勘探开发队伍得到了迅速壮大,目前拥有包括美国产 T130XD、T685WS、RD20 液压顶驱空气多工艺车载钻机、国产 ZJ-30D 石油钻机、美国产 1150 型、825VH 型移动式压风机、增压机,MWD、LWD 无线及有线随钻测斜定向仪,以及双中子测井仪、综合录井仪、各类固井水泥车等先进的技术装备,能承担各类煤层气钻井工程,建成了一支专业化煤层气钻井队伍。先后在山西、陕西、安徽、河南、云南、内蒙古等地,完成了煤层气直井、丛式井、水平井、多分支水平井、对接井等 800 余口,累计完成钻探进尺 70 余万 m ,积累了丰富、实用的技术方法。

煤层气开发的关键技术是水平井施工,水平井的技术关键是轨迹设计、轨道控制、钻井液设计与应用。课题组立足工程实际,结合行业标准和相关规程规范,总结和解析了煤层气钻井工程技术。本书既是课题组对实际工作的认识

与总结,也是一份煤层气钻井设计者的参考资料和煤层气钻井生产者的培训教材,还可供地质导向技术和钻井液技术实践者借鉴,同时目前页岩气钻井还没有正式出版规范规程,此书还可以为页岩气钻井者提供参考。

煤层气、页岩气产业的快速发展推动了钻井工艺技术快速进步。由于作者技术水平有限,且受工程实践局限,本书疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

著者

2013年12月

目 录

1 煤层气钻井工程设计	1
1.1 煤层气典型钻井类型及适应性	1
1.2 地质设计	4
1.3 井身结构设计	7
1.4 绳索取芯设计	11
1.5 钻井循环介质设计	13
1.6 固井工程设计	15
1.7 完井方式设计	16
1.8 健康、安全与环境管理(HSE)要求	20
2 水平井轨道设计	22
2.1 水平井概述	22
2.2 水平井轨道设计	25
2.3 分支井眼	32
3 井眼轨道控制设计	33
3.1 轨道控制模式	33
3.2 直井下部钻具组合设计方法	35
3.3 定向井下部钻具组合设计方法	39
3.4 钻具稳定器	45
4 钻井工程质量标准	54
4.1 井身质量	54
4.2 固井质量	55
4.3 取芯质量	56
4.4 完井质量	56
4.5 储层保护	57
5 钻进安全技术与事故处理	58
5.1 钻进安全技术	58
5.2 井下钻具打捞	65

6	水平井分支井钻井实践	71
6.1	山西长子 FCC—QN01HR 多分支水平井	71
6.2	陕西韩城 WL02—1 多分支水平井	77
7	对接井钻井实践	85
7.1	山西晋城 SN001—1V 垂直井	85
7.2	山西晋城 SN001—1H 水平井	94
7.3	水平井与垂直井对接连通	102
7.4	对接井施工体会	103
8	泡沫钻井液与微泡钻井液应用	104
8.1	泡沫钻井液应用	104
8.2	微泡钻井液应用	108
9	绒囊钻井液在对接井中的应用	114
9.1	山西吉县 U2—H 水平井基本数据	114
9.2	地质简况	115
9.3	工程简况	115
9.4	钻井液设计	116
9.5	施工难点及对策	116
9.6	钻井液使用情况	117
9.7	原材料及处理剂消耗情况	119
9.8	现场应用效果	120
9.9	应用体会	120
9.10	绒囊钻井液.....	121
	致谢	128

1 煤层气钻井工程设计

1.1 煤层气典型钻井类型及适应性

煤层气钻井工程的全过程如图 1.1 所示。

进行钻井工程设计,既要坚持科学态度,积极采用新工艺、新技术、新设备和新材料,又要制定合理、简单可靠的技术工艺流程,减少投资,降低成本;同时便于生产管理,正确处理技术先进与经济合理的关系。

1.1.1 直井

与水平井、丛式井相比,直井与储层接触的面积最小,要想获得理想的产量,对储层的要求很高,含气量、储层厚度、储层压力以及渗透率必须有 1~2 项达到一定的值。通常需要压裂。

直井的结构如图 1.2(a)所示,图 1.2(b)所示为定向井按一个井场或平台的钻井数分类。

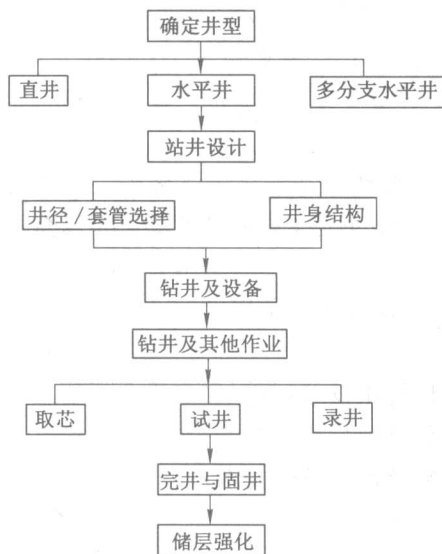


图 1.1 煤层气钻井过程

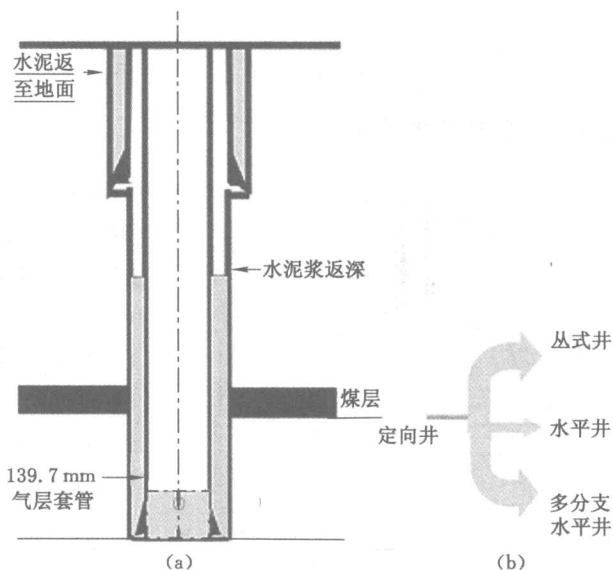


图 1.2 直井结构及定向井的分类

(a) 直井的结构;(b) 定向井的分类

1.1.2 丛式井

如图 1.3 所示,丛式井又称密集井、成组井,在一个位置和限定的井场上向不同方位钻数口至数十口定向井,其中可含 1 口直井,使每口井沿各自的设计井身轴线分别钻达目的层位,通常用于海上平台或城市、良田、沼泽等地区,可节省大量投资,占地少,并便于集中管理,可用于开发渗透率较低或薄煤层的煤层气。

1.1.3 水平井

如图 1.4 所示,水平井是指井斜角大于或等于 86° ,并保持这种角度钻完一定长度水平段的定向井。

适应性:中等物性煤储层。

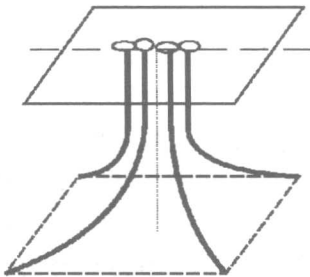


图 1.3 丛式井

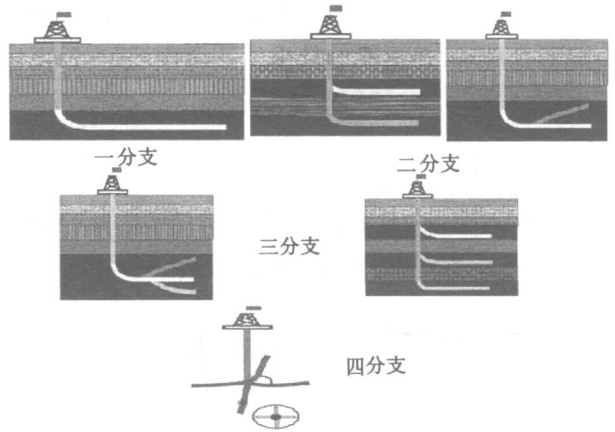


图 1.4 水平井

1.1.4 多分支水平井

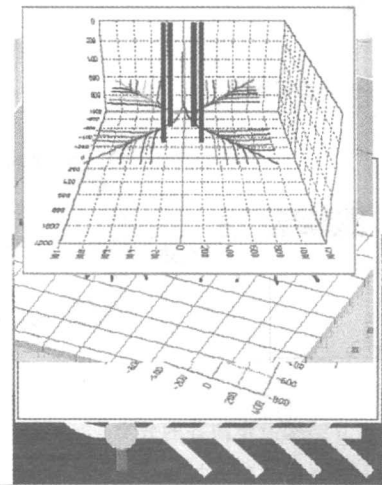


图 1.5 多分支水平井

(1) 概念:多分支水平井是指一个或多个主水平井眼盘侧再侧钻出多个分支井眼,又叫羽状水平井或鱼骨井,如图 1.5 所示。

(2) 煤层气多分支水平井技术要点:

- ① 井位标定技术;
- ② 井身结构模型优化技术;
- ③ 井眼轨迹优化设计与校核技术;
- ④ 井眼轨迹控制及地质导向技术;
- ⑤ 欠平衡钻井工艺技术;
- ⑥ 完井工艺技术。

(3) 煤层气多分支水平井的主要优点:

- ① 增加有效供给范围;
- ② 提高有效导流能力;

- ③ 减少对煤层的损害；
- ④ 单井产量高，经济效益显著；
- ⑤ 占地面积小。

1.1.5 U形井

1.1.5.1 概念

U形井技术也就是水平连通井技术，也有的人称作对接水平井技术。连通井是指两口不同位置的水平井与直井、定向井与水平井、定向井与定向井或水平井与水平井在同一目的层连通。图 1.6 为 U 形对接井示意图。

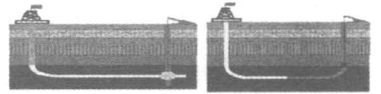
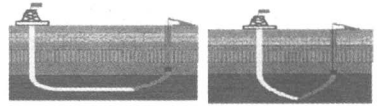


图 1.6 U 形对接井

1.1.5.2 优点

(1) 如图 1.7 所示，U 形井多由水平井与直井构成，兼有单分支水平井沟通割理与直井“点”状排采煤层气的特点。



(2) 作为新型钻井，其为两井连通、地质导向、欠平衡钻井等多种先进技术的综合，钻井难度大。

(3) 具有水平井及直井两个井口，可以实现排水与采气同时进行。

(4) 两个井口可以任意选择，充分依靠倾斜地层的坡度，利用重力作用实现排水采气。

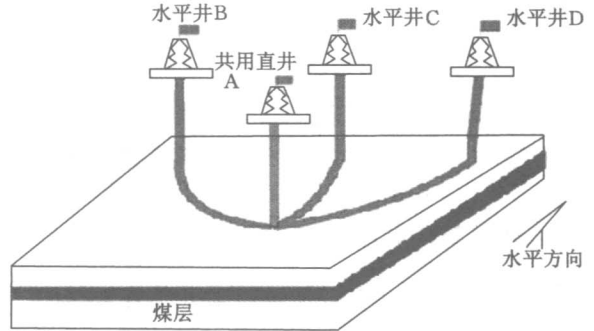
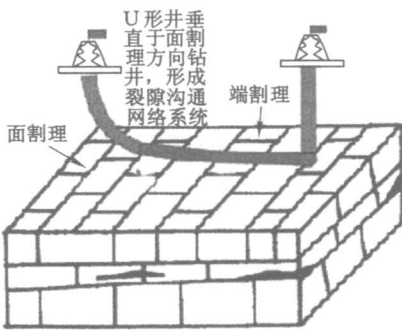


图 1.7 U 形井

1.1.5.3 适用性

该钻井类型适用煤储层如下：

- ① 中高煤阶储层；
- ② 高含水煤层；
- ③ 割理发育煤层；
- ④ 厚煤层；
- ⑤ 倾斜煤层。

1.2 地质设计

1.2.1 完井原则与井深设计

考虑到排采过程中需要留有一定砂袋,因此煤层气井完井基本原则是钻至最下一个目的煤层底界之下 40~60 m 完钻。

1.2.2 钻遇地层预测与故障提示

根据地层条件,煤层气钻井预计钻遇的主要地层如表 1.1 所示。各井预想柱状图另外编制“井身结构与预想柱状图”。

表 1.1 钻遇的主要地层及对钻井的影响

地层			代号	故障提示
系	统	组		
第四系			Q	防塌、防漏、防斜
二叠系	上统	上石盒子组	P _{2s}	防斜、防漏、防涌
	下统	下石盒子组	P _{3s}	
		山西组	P _{1s}	
石炭系	上统	太原组	C _{3t}	防漏、防涌
	中统	本溪组	C _{2b}	
奥陶系	中统	峰峰组	O _{2t}	防漏、防涌

1.2.3 地质录井设计

地质录井执行《煤层气地质录井作业规程》。煤层气井钻井过程中的地质录井应包括以下几个方面:

(1) 岩屑录井

非煤系地层每 2~4 m 捞取 1 包;煤系地层每 1~2 m 捞取 1 包;目的层段(煤层)每 0.5 m 捞取 1 包。

(2) 钻时录井

非煤系地层每 1~2 m 记录 1 个点;煤系地层每 0.5~1 m 记录 1 个点;目的层井段每 0.1 m 记录 1 个点。

(3) 钻井循环介质录井

准确记录测点井深的钻井循环介质性能资料,如钻井循环介质的类型、密度、黏度、失水量、泥饼、切力、pH 值、含砂量、氯离子含量等。

1.2.4 地球物理测井设计

地球物理测井执行《煤层气测井作业规程》。煤层气井测井包括裸眼标准测井、裸眼综

合测井、固井质量检查测井等。

1.2.4.1 裸眼标准测井

裸眼标准测井是对全井进行测井(深度比例为1:500),用以划分地层,判别岩性。裸眼标准测井的测井项目有:

双侧向(DLL)	单位: $\Omega \cdot m$
自然电位(SP)	单位:mV
自然伽马(GR)	单位:API
双井径(CAL)	单位:cm

1.2.4.2 裸眼综合测井

裸眼综合测井是对煤系地层和认为有必要的其他井段进行更细致的测井,用以进行岩性分析、划分煤层及夹矸、划分和判断含水层等。裸眼综合测井的测井项目有:

双侧向(DLL)	单位: $\Omega \cdot m$
微球形聚焦(MSFL)	单位: $\Omega \cdot m$
自然伽马(GR)	单位:API
自然电位(SP)	单位:mV
双井径(CAL1)(CAL2)	单位:cm
补偿密度(DEN)	单位: g/cm^3
补偿中子(CNL)	单位:P. U.
补偿声波(AC)	单位: $\mu s/m$
井温(TEMP)(连续曲线)	单位: $^{\circ}C$

1.2.4.3 固井质量检查测井

固井质量检查测井是在固井后进行的全井段地球物理测井,测井的主要项目为声幅、自然伽马、套管接箍测井、声波变密度测井。

1.2.5 取芯与分析测试样品设计

煤层气参数井的工程目的主要是通过取芯分析和测试,取全取准煤层厚度、煤层埋藏深度、煤岩煤质、煤层气含量、煤的吸附常数与等温吸附曲线、煤及其顶底板的力学性质、储层压力、煤层渗透率、原地应力等主要煤储层参数,为开发项目提供储层资料。

1.2.5.1 取芯设计与岩、煤芯录井

岩、煤芯录井是对取芯钻进中钻取的岩、煤芯进行分层、鉴定、描述,达到建立岩性剖面目的。煤芯到达井口后的出筒、丈量、拍照、装罐等时间不大于10 min。

1.2.5.2 测试分析样品设计

根据煤层气参数井的工程目的,煤芯样主要测试项目有:煤层含气量测定(直接法)及气组分析;工业分析、固定碳、真密度、视密度、元素分析等煤质分析;煤岩显微组分和矿物含量测定、镜质体反射率测定煤岩分析;等温吸附实验;抗压强度、剪切模量、杨氏模量、泊松比等力学性质等。根据测试需要,煤样的采集一般每0.5 m采集1个煤层气含量测定样品,每层煤采集1~3个等温吸附样品和其他测试分析样品。单井样品采集数量及分析项目计算表如表1.2所示。

表 1.2

单井样品采集数量及分析项目计算表

序号	分析测试项目	样品数		合计
		**号煤层	**号煤层	
1	煤层气含量测定			
2	气体成分分析			
3	等温吸附试验(平衡水条件下)			
4	煤的工业分析			
5	煤岩显微组分定量分析			
6	镜质组反射率测定			
7	煤的真密度、视密度			
8	煤的元素分析			
9	煤的岩力学性质			
10	煤层顶板孔隙度			
11	煤层顶板渗透率			
12	煤层顶板岩力学性质			
13	煤层底板孔隙度			
14	煤层底板渗透率			
15	煤层底板岩力学性质			

1.2.6 煤层气试井设计

1.2.6.1 工程目的

- (1) 了解主要煤层的裂隙发育情况和煤层渗透率；
- (2) 了解钻井过程中钻井液对煤层的伤害程度；
- (3) 了解主要煤层的地层压力及其边界；
- (4) 了解主要煤层的原地应力状况。

1.2.6.2 测试项目

- (1) 注入/压降试井；
- (2) 原地应力测试。

1.2.6.3 测试应获取的主要参数

- (1) 煤层渗透率；
- (2) 储层压力及储层压力梯度；
- (3) 原地应力及应力梯度；
- (4) 破裂压力、闭合压力；
- (5) 表皮系数；
- (6) 调查半径；
- (7) 储层温度等。

1.2.6.4 测试方法选择

根据煤层渗透性,采用注入/压降试井方法进行测试是目前最普遍的测试方法。注入/

压降试井的主要优点是:

(1) 流体的注入提高了地层压力,保证了在测试过程中为单相流,它适用于负压、正常压力和超压等各种情况的煤层气井;

(2) 不需要井下机械泵送设备,简化了操作步骤,降低了成本;

(3) 可以用标准试井分析方法来分析,结果比较可靠;

(4) 探测半径较大,时间相对较短。

注入/压降试井也存在不同程度地伤害煤储层和易造成井筒附近煤层出现微破裂问题。造成储层伤害的主要原因是:

(1) 由于注入的流体可能与地层的化学环境不相容,发生反应;

(2) 有可能注入了会堵塞储层孔隙的微粒,因此把取自被测试层位的地层水回注到测试井中是最理想的,至少应当采用与地层和气藏流体相容的淡水。

如果注入过程中排量控制不好,容易使井底压力超过测试层的破裂压力,就可能会压开地层,产生裂缝,这种裂缝的产生被认为是自然渗透率或井筒伤害的假象,使测试结果不可靠。因此,在注入/压降过程中一定要保证井底压力低于地层破裂压力。

1.3 井身结构设计

科学系统地进行钻井工程设计是确保钻成高质量煤层气井的前提,任何煤层气井钻井工程设计必须按照图 1.8 所示的步骤进行。

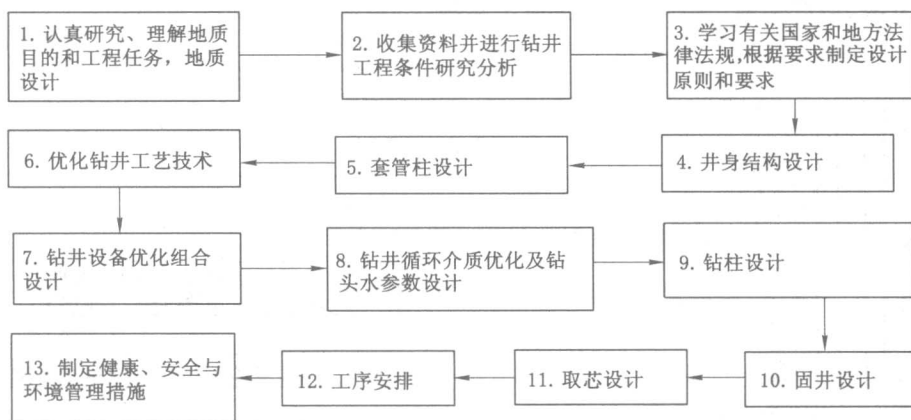


图 1.8 煤层气钻井工程设计步骤示意图

1.3.1 直井

1.3.1.1 井身结构

井身结构是指由直径不同,且均注水泥封固环形空间而形成的轴芯线重合的一组套管与水泥环的组合,主要由表层套管、技术套管、储层套管和各层套管外的水泥环等组成,如图 1.9 所示。

设计井身结构的基本原则是:

(1) 应满足钻井、完井和生产的需要以及获取参数的需要;

(2) 应充分考虑到出现漏、涌、塌、卡等复杂情况的处理作业需要(一般应留有余地);

(3) 能确保钻井施工的安全、优质、快速、低成本。

1.3.1.2 套管的分类及作用

(1) 表层套管。封隔地表浅水层及浅部疏松和复杂层安装井口、悬挂及支撑后续各层套管。

(2) 中间套管。表层和生产套管间因技术要求下套管,可以是一层、两层或更多层。

套管主要用来分隔井下复杂地层,其作用如图 1.10 所示。

(3) 生产套管。钻达目的层后下入的最后一层套管,用以保护生产层,提供煤层气生产通道。

(4) 尾管(衬管)。

1.3.1.3 直井井身结构

(1) 设计依据。井身结构设计的主要依据是地质目的、地质设计要求、地层结构及其特征、地层孔隙压力、地层水文条件、地层破裂压力、完井方法、增产措施、生产方式及生产工具等。

(2) 设计程序如图 1.11 所示。

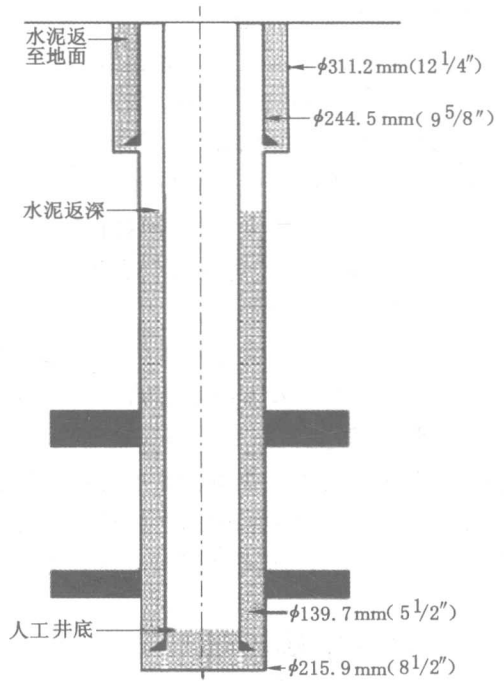


图 1.9 直井井身结构(一)

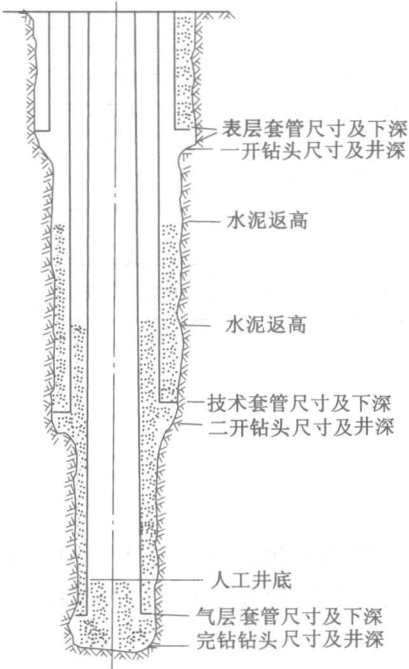


图 1.10 套管的作用

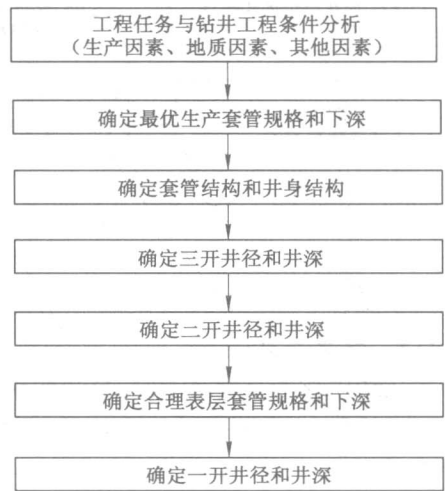


图 1.11 煤层气钻井井身结构设计程序

(3) 设计原则:

① 所设计的井身结构应充分满足钻井、完井生产需要以及获取参数的需要;

② 采用的所有钻井工艺技术应有利于保护煤储层;

③ 充分考虑到出现漏、涌、塌、卡等复杂情况的处理作业需要(一般应留有余地),以实现安全、优质、快速、低成本钻井;

④ 应尽可能地简化井身结构,以降低成本和避免工程失误。

通常情况下,煤层气生产和试验井井身结构宜采用表 1.3 所示结构。根据生产套管尺寸和井身结构设计原则,井身结构设计为:用 $\phi 311.2 \text{ mm}(12\frac{1}{4}'')$ 的钻头一开,钻至基岩风化带 10 m 处,下入 $\phi 244.48 \text{ mm}(9\frac{5}{8}'')$ 表层套管;然后用 $\phi 215.9 \text{ mm}(8\frac{1}{2}'')$ 的钻头二开,钻至目标煤层底界 60 m 完钻,下入 $\phi 139.7 \text{ mm}(5\frac{1}{2}'')$ 生产套管;注水泥封固。

表 1.3 煤层气井常规钻井井身结构表

开钻程序	钻头尺寸/mm	套管类型	套管尺寸/mm
一开	$\phi 311.2$	表层套管	$\phi 244.5$
二开	$\phi 215.9$	生产套管	$\phi 139.7(\phi 177.8)$

地层条件复杂情况下,可采用表 1.4 及图 1.2 所示的井身结构设计。

表 1.4 复杂地层条件下煤层气井井身结构表

开钻程序	钻头尺寸/mm	套管类型	套管尺寸/mm
一开	$\phi 444.5$	表层套管	$\phi 339.7$
二开	$\phi 311.2$	技术套管	$\phi 244.5$
三开	$\phi 215.9$	生产套管	$\phi 139.7(\phi 177.8)$

风险勘探所施工的参数井,可采用小井眼钻井(二开井径小于 $\phi 118 \text{ mm}$)。

1.3.1.4 套管设计

套管的设计参数如表 1.5 所示。

表 1.5 套管设计参数一览表

井深 /m	规格 钢级	壁厚 /mm	扣型	每米质量 /(kg/m)	抗外挤			抗内压		抗拉	
					理论强度 /(kg/cm ²)	最大外挤 /(kg/cm ²)	安全 系数	理论强度 /(kg/cm ²)	安全 系数	理论强度 /t	安全 系数
0~500	244.5 J55	8.94	长圆	53.57							
0~1 200	139.7 N80	7.72	长圆	25.3	441.5	102.6	4.3	544.2	5.30	157.9	6.5

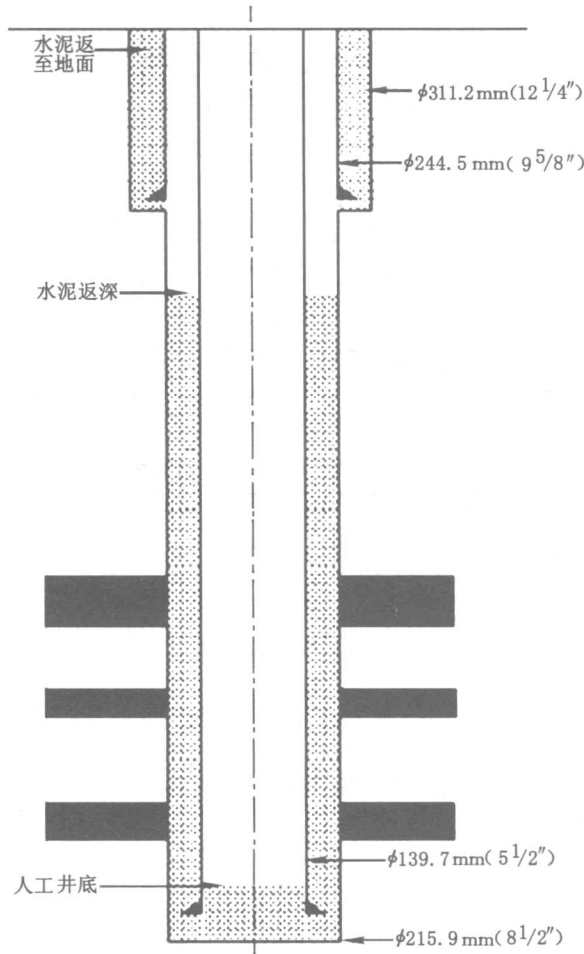


图 1.12 直井井身结构(二)

1.3.2 多分支水平井

水平井的轨道设计详见第 2 章,轨道控制设计详见第 3 章。

1.3.2.1 多分支水平井井身结构设计原则

造斜位置原则上最下一个造斜点应在煤层之上 20 m 左右,并尽可能地在砂岩段施工,不可在泥岩段。

造斜点应呈 90° 相位螺旋状分布,造斜点之间高差应尽量大于 20 m。造斜井段的增斜率应控制在 $8^\circ/30 \text{ m} \sim 10^\circ/30 \text{ m}$ 之间。

主水平井长度应控制在 800~1 000 m。

各翼水平分支总数应为 10~12 个,各分支间距 300 m,分支长度依次为 700 m、600 m、500 m、400 m、300 m、200 m,各分支井采用大曲率半径造斜($5^\circ/30 \text{ m} \sim 9^\circ/30 \text{ m}$)。

1.3.2.2 生产井施工顺序与井身结构

探采洞穴直井如图 1.13 所示。

一开:用 $\phi 311.2 \text{ mm}$ 钻头,用泥浆钻进,钻入基岩 10 m,下入 $\phi 244.5 \text{ mm}$ 表套,并用优