

煤层气井建井工程

The Engineering of CMB Well Construction

方世跃 主编



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

煤层气井建井工程

主编 方世跃

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书从煤层气钻井、固井和完井三个方面详细介绍了煤层气井建井工程的基本理论和技术方法,全书共分9章,分别为煤层气井建井的工程地质条件、钻井设备与工具、井身结构、钻井液、钻进工艺、固井、完井、储层保护与QHSE体系等方面的基本概念、理论及设计以及一般问题的分析处理方法。本书资料数据翔实,内容丰富,具有很强的科学性、创新性、资料性和实用性。

本书为高等院校地质类资源勘查工程(煤层气方向)专业的教学用书,亦可作为相关培训的教材,还可供从事煤层气地质及勘探开发的科技人员,煤炭、石油、地质工作者参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气井建井工程/方世跃主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015. 1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2614 - 3

I. ①煤… II. ①方… III. ①煤层—气井—井巷工程 IV. ①TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 015763 号

书 名 煤层气井建井工程

主 编 方世跃

责任编辑 黄本斌

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 16.75 字数 418 千字

版次印次 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤层气是一种新型的洁净能源与优质化工原料,是我国 21 世纪重要接替能源之一。高效开发利用煤层气,对于缓解我国常规油气供应紧张,改善煤矿安全生产条件,促进矿区生态文明建设,保护大气环境等多方面具有重要意义。而高效开发利用煤层气的关键步骤之一就是建立高质量的煤层气井,煤层气井建井工程实际就是钻井、固井和完井工程的合称,煤层气钻井、固井、完井是煤层气勘探开发的重要组成部分,钻井、固井、完井后,勘探可以有效确定煤层气含气面积和储量,就可以根据勘探结果部署煤层气开发方案。通过煤层气井将煤层气开采出来,钻井和固井与完井虽属不同范畴,但互为因果,只有好的钻井质量,才会有好的固井、完井结果;有了好的钻井质量,若没有好的固井、完井效果,煤层气井应有的功效也得不到充分的发挥。

近些年来,油气井建井工程从设备、工具到技术和软件设计都有较大的进步和发展,正是由于油气井建井工程的技术进步,催生了煤层气建井工程的发展。但是由于煤层气储层的特殊性,致使煤层气钻井、固井、完井技术与常规油气的钻井、固井、完井技术既有相同点又有很大的区别,因此煤层气井可以参经常规油气钻井、固井、完井技术和方法,但绝对不能照搬。目前,还没有一本正式出版的煤层气井建井工程方面的书籍,希望该书的面世能起到抛砖引玉的作用,为煤层气勘探开发事业贡献绵薄之力。

该书是在西安科技大学煤及煤层气专业的《煤层气钻井与完井工程讲义》的基础上修改编撰而成。在编写过程中,唐胜利教授、马东民教授和孙学阳副教授审阅了书稿,得到了王念秦教授、陈练武教授、薛喜成教授的指导和帮助,徐峰、李志斌、苏唱、贺俊、姬海民等研究生做了大量的资料整理工作,在此一并表示感谢。

由于作者知识水平所限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者和专家批评指正,并提出宝贵意见。

作 者

2014 年 5 月于西安

目 录	
第一章 绪论	1
第二章 煤层气井钻井工程地质条件	13
第一节 煤层气井钻遇的主要岩石	13
第二节 煤层气井钻遇的非储层岩石力学性质	14
第三节 煤层气储层岩石物理、力学性质	21
第四节 地下各种压力的计算与预测	29
第三章 煤层气井钻井设备与工具	39
第一节 煤层气井钻机的类型	39
第二节 石油钻机及其他钻进技术专用工具	45
第三节 钻头	70
第四节 钻柱	81
第四章 煤层气井井身结构设计	89
第一节 井眼轨道(迹)的基本概念	89
第二节 井眼轨道设计	96
第三节 井身结构设计	99
第五章 钻井液	105
第一节 钻井液的功能、组成及类型	105
第二节 钻井液的工艺性能及测定	108
第三节 钻井液常用原材料及处理剂	118
第四节 钻井液固相控制	130
第五节 钻井液的计算与设计	131
第六章 钻进工艺	134
第一节 影响钻进的主要因素	134
第二节 钻井设备工具选择	138
第三节 钻进参数优选	146
第四节 井眼轨迹控制	151
第五节 压力控制	159

第六节 钻进过程中的测试	162
第七章 煤层气井固井	165
第一节 煤层气井固井概述	165
第二节 固井设备、工具及材料	168
第三节 下套管	186
第四节 注水泥	194
第五节 固井质量评价	214
第八章 煤层气井完井	222
第一节 煤层气井完井类型及选择	222
第二节 煤层气井射孔工艺	229
第三节 井口装置与完井管柱	234
第四节 投产措施	239
第九章 储层保护与 QHSE 体系	242
第一节 钻井过程中的储层保护	242
第二节 固井过程中的储层保护	247
第三节 煤层气井完井过程中的储层保护	250
第四节 建井过程中的 QHSE 管理	251
参考文献	257

第一章 绪 论

一、煤层气井建井工程在煤层气勘探开发中的地位

煤层气,甲烷含量大于 90%,因此被称为煤层甲烷,在煤矿中又俗称煤矿瓦斯,是一种主要以吸附状态赋存于煤层中的非常规天然气,是天然气最现实的接替能源之一,开发利用煤层气不仅有利于煤矿安全生产,而且还能有效减少大气环境污染,改善我国能源结构。

我国煤层气资源较丰富,埋深 2 000 m 以内的资源量为 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截至 2012 年年底,我国年产煤层气 $125 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计到 2015 年,年产量可以达到 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。开发煤层气的方式主要有两种:一是基于煤矿安全的井下瓦斯抽采系统抽出;二是地面钻井开采,地面钻井开采的第一步就是要建立沟通地面与地下煤层之间的通道,即煤层气井(CBM well),使煤层气能被举升到地面,供人们利用。

建立沟通地面与地下煤层通道的过程就是一口煤层气井的建设过程,包括钻井、固井和完井三个基本程序,其在煤层气勘探开发过程中起到承上启下的作用,是煤层气勘探开发的基础和重要环节,可以为后续工作提供可靠的依据,如通过参数井钻井取芯可以获得直接的煤层气储层参数,是煤层气藏规模开发的重要前提条件。

煤层气井数量的增加是煤层气开发企业发展的有效推动手段,也是更新钻井设备与工具、研发高效钻井技术的有效手段;建井技术的进步还可以引起煤层气开发方式的显著变化,建井技术一旦取得巨大进步则影响深远,如近年来国内外正积极开展应用的多分支水平井、欠平衡钻井技术能显著提高低压低渗储层的煤层气采收率,代表着煤层气高效开发的发展趋势,也使煤层气抽采从当前的以井下抽放为主逐步过渡到以地面开发为主,并从当前以直井开发为主过渡到多分支水平井开发为主。

建井质量的好坏直接关系到煤层气开发经济效益的高低,如果建井质量不合格,对后续排采极为不利,可能造成很难补救的后果,严重影响最终的采收率。如井底水平位移过大,会打乱煤层气藏开发的布井方案;煤层段扩孔太大,射孔不穿,压裂不能压开;井斜太大,排采井容易磨油管和套管,排不出水,产不出气,并且使抽水机负荷大,容易烧电机。

总之,高效快速地建立合格的煤层气井是保障合理开发煤层气的重要前提条件,是煤层气勘探开发过程中最重要的工作程序与工作手段。

二、煤层气井分类

煤层气勘探开发过程是由许多不同性质、不同任务的阶段组成的,在不同的阶段,建井的目的任务也不一样,所建煤层气井的种类也不同,为取全、取准各项地质资料,评价煤田煤层的煤厚、煤质、盖层及含气性,了解工业产能,进一步评价煤层气勘探前景,为试采和开发试验提供地质数据而建设的煤层气井称为煤层气参数井(parametric borehole);在进行煤层

气开发时,为开采煤层气而钻的井称为煤层气生产井(production well);通过排水降压试采而获取煤层气藏排采动态资料,评价煤层气工业性开采价值而建的井,则称为生产试验井(production testing well)。

根据煤层气埋藏深度可分为浅煤层气井和深煤层气井,目前国内煤层气井的井深一般都在 300~2 000 m 之间,一般把井深在 300~1 500 m 的煤层气井称为浅煤层气井(shallow coal-bed gas well),把井深在 1 500~2 000 m 的煤层气井称为深煤层气井(deep coalbed gas well)。

按照煤层气井的井眼轨迹形状,可以将煤层气井分为直井(straight hole)和定向井(directional well)两大类。直井是按钻井设计规定,控制井斜在规定要求的范围内所钻的井,直井又可以根据钻开煤层的层数,可以分为单煤层井和多煤层井;定向井则是采取特殊的工艺手段,使井斜、井眼形状按预定的方位和水平距离所钻的井,它的特点是井眼轨迹是倾斜的,水平井(horizontal well)则是定向井的特殊情形,其在钻到目的层位时,井段斜度超过 85° ,水平距离超过目的层厚度 10 倍(图 1-1)。水平井又可以分两种情况:一是在巷道打的水平抽放瓦斯井;另一种是从地面先打直井再造斜,沿煤层钻的水平井(排泄井)。近些年来,又将超短半径水平井(URRS, ultra-short radius radial well, 图 1-2)、多分支水平井(multilateral wells, 图 1-3)、羽状水平井(pinnate horizontal multilateral well)、远端连接水平井(U 形井, remote concatenate well, 图 1-4)、丛式井(cluster well, 图 1-5)应用于煤层气开发中,对煤层气提高产能有着重要的意义。

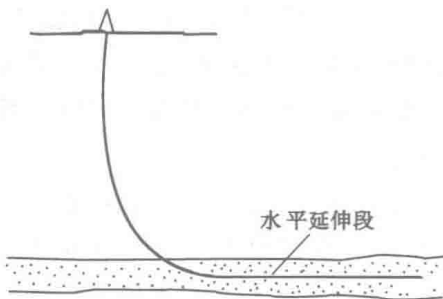


图 1-1 水平井示意图

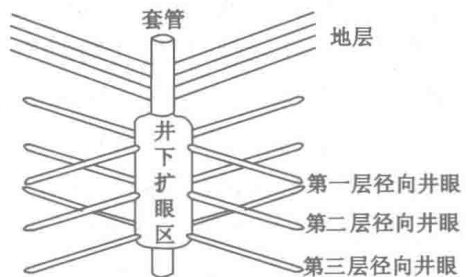


图 1-2 超短半径水平井

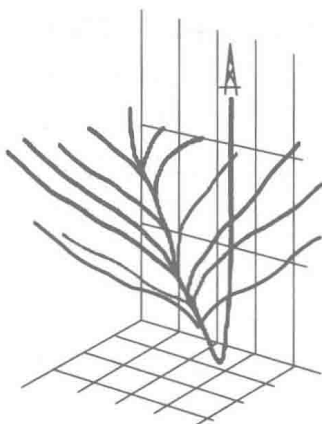


图 1-3 多分支水平井

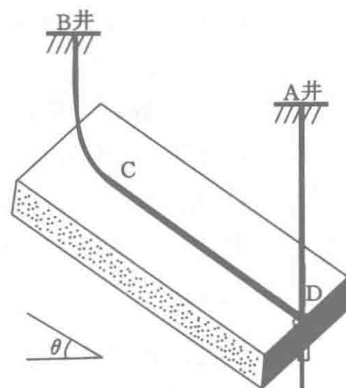


图 1-4 远端对接井

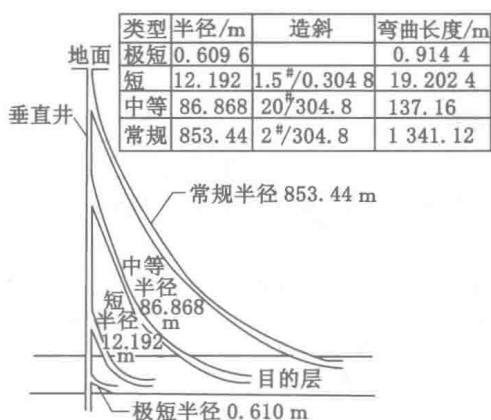


图 1-5 丛式井

三、煤层气井建井过程

我国地面煤层气开发已经从无到有发展到欣欣向荣的局面,目前已累计建成各类煤层气井近 12 000 口,一口煤层气井的建井过程主要包括:利用钻头(bit)、钻具(drilling tool)等工具,按照设计的井眼轨道,利用一定的钻进工艺技术破碎岩石形成井眼后,取芯(core)、下套管、注水泥固井与完井,预防与处理钻井事故等。一口煤层气井的钻井过程从确定井位到最后试井(well testing)、投产,要完成许多作业,其主要流程见图 1-6,分述如下:

1. 钻前准备

在确定井位、完成钻井地质设计与工程设计后,钻前工程(prespud operation)是钻井施工中的第一道工序,其具体要求可以参见《钻前工程及井场布置技术要求》(SY/T 5466—2013),主要包括:

(1) 定井位(determining well location):技术人员根据设计和勘探开发的需要,经现场踏勘后确定钻井井场(well site)位置及井口(well head)坐标,井口通常表示为东经和北纬的交叉数。一般来说,井场应避开水源、坟地、高压线、养殖场、民宅等其他可能影响施工的地方并与之保持规范要求的距离,煤层气井钻井设备较小,但直井井场面积一般不能小于 $60\text{ m} \times 40\text{ m}$,定向井、水平井由于钻井工艺相对复杂一些,井场面积则要大一些,特别是在实施欠平衡钻井工艺时,还应在井场两侧增设面积不小于 $1\,000\text{ m}^2$ 的燃烧池和放喷池,丛式井施工时还应根据设计预留出相应的井场面积。

若现场踏勘后认为原设计井口位置不合适,如修建公路困难或者现场不具备设置井场条件,应及时与甲方或者设计方沟通,更改设计和预算。井口位置待基础施工完成后,还必须进行复测。

(2) 修公路(road building):修建通往井场的运输公路,以便运送钻井设备及器材等。一般来说,在山岭丘陵地区选定井场道路应避免滑坡、泥石流等不良地质地段;修建通往煤层气井钻井井场的运输公路,需考虑钻机、运输车等进场设备的尺寸、质量等,以便设备及器材能够顺利入场,特别需要考虑抢险救援车辆的通行,还要考虑预留会车台,路面铺垫宽度一般不能小于 4 m ,道路遵守弯大坡小的原则以保障施工车辆的通行,道路通过河流及小溪、水沟必须铺设管道;同时路面必须用压路机进行压实处理,至少要能保障 30 t 重的大型车辆通行。

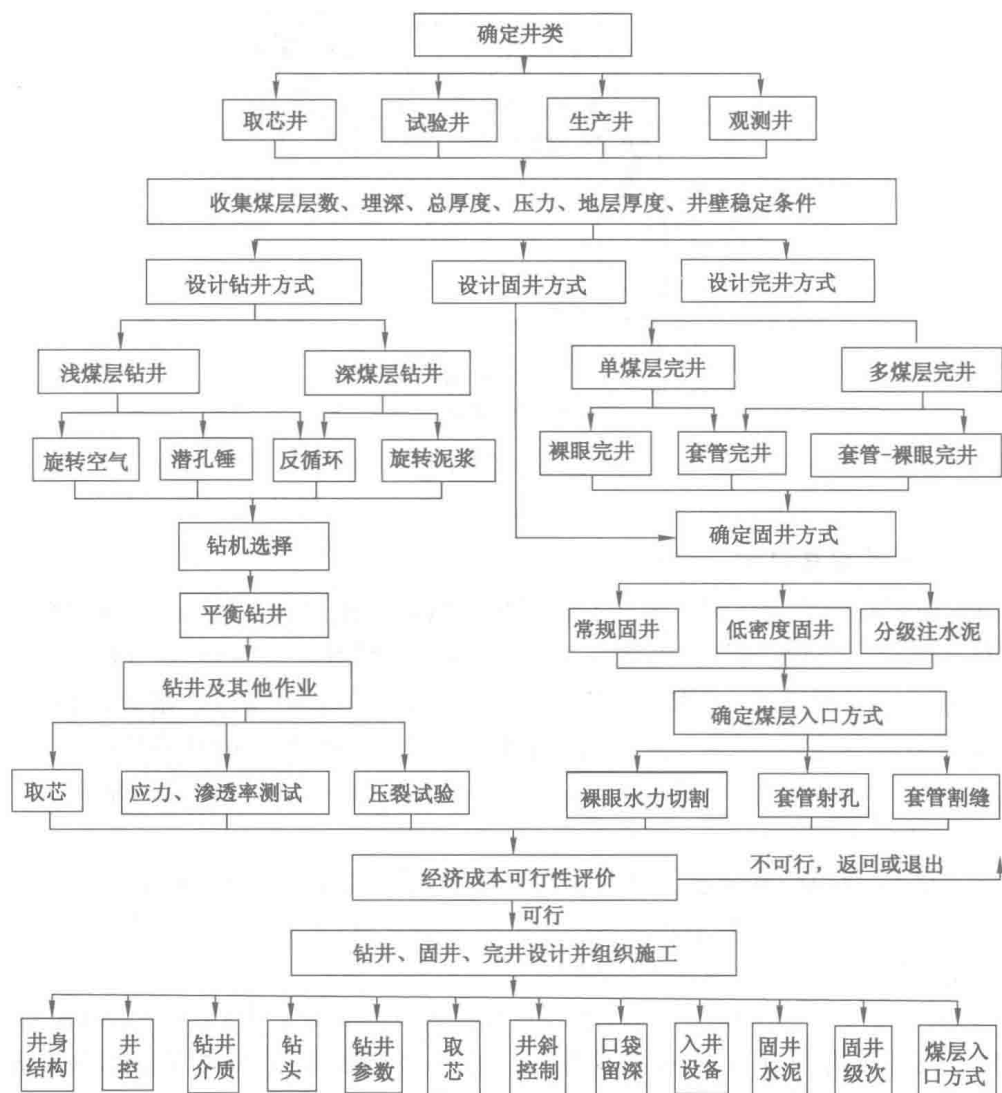


图 1-6 煤层气井建井一般程序流程框图

(3) 井场与设备基础准备:根据井的深浅、设备的类型及设计要求来平整井场,井场应平坦坚实,能承受大型车辆的行驶,满足钻井设备布置及钻井作业要求,井场中部应稍高于四周,以利于排水,要有通向污水池的排水沟,雨季时,四周应挖环形排水沟。设备基础及绷绳墩等施工(包括钻机、井架、钻井泵动力机等的基础)应按照相关说明书执行。

(4) 钻井设备搬运、布置及安装:包括设备搬运、就位、找正、调整、固定,钻井循环管线和气、水、保温管线的安装,设备试运转,安装验收以及安全检查等,钻机安装好后,立轴、钻杆和钻孔三者中心应在同一直线上,钻杆应在卡盘的中心位置。井场一般可按照图 1-7 进行布置。

(5) 井口准备:包括挖圆井(cellar,有的井不挖)、下导管(conductor)并封固、钻大鼠洞(big rathole)与小鼠洞(little rathole)等。

2. 钻进

利用部分钻柱(钻铤, drill collar)的重力产生的一定压力作用在钻头上, 由转盘(rotary

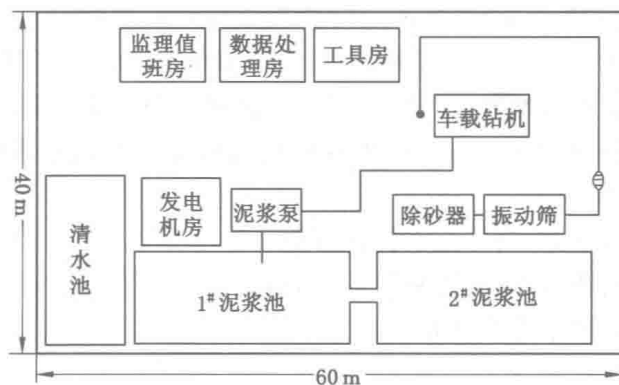


图 1-7 常见煤层气钻井井场布置示意图

table)或顶驱动力水龙头(swivel)带动钻柱旋转[在使用井下动力钻具(motor drilling tool)时,钻柱不旋转,井下动力钻具带动钻头旋转]钻头破碎井底地层岩石,井底岩石被破碎后所产生的岩屑通过不断循环的钻井液被携带到地面上来的过程,就叫钻进。

在钻进过程中,钻头不断破碎岩石,井眼逐渐加深,钻柱也就需要接长,因而需要不断加接钻杆。每钻完方钻杆的有效长度时,将一根钻杆接到井内钻柱上的操作,称为接单根(make a connection)。通常,利用转盘前方的小鼠洞预先存放准备接入的钻杆,提高接单根的速度;配备顶部驱动装置后,改为接由三个单根连接而成的立根(stand)。

由于钻头在井底破碎岩石,钻头会逐渐磨损,机械钻速会下降,当钻头磨损到一定程度时,则需要更换新钻头。为此,需将全部钻柱从井内起出(亦称起钻, pulling out),更换新钻头后再将新钻头与全部钻柱下入井内(亦称下钻, going in),这一过程称为起下钻(make a trip)。有时为了处理事故、测井等也需进行起下钻作业。

在钻进过程中,井眼不断加深,所形成井眼的井壁应当稳定并不发生复杂情况以保证继续钻进。在钻进过程中要钻穿各种地层,而各地层的特点不同,其岩石强度有高有低,有的地层含高压气、水等流体,有的含有盐、石膏、芒硝等成分,这些均对钻井液产生不良影响,强度低的地层会发生坍塌,或被密度大的钻井液压裂而发生井漏等复杂情况,妨碍继续钻进,这就需要下入套管并注入水泥予以封固,然后用较小的钻头继续钻出新的井段。

每改变一次钻头尺寸(井眼尺寸),开始钻新的井段的工艺都叫做开钻(spudding, spud in)。一般情况下,一口井的钻井过程中通常都有几次开钻,井深和地层情况不同,则开钻次数也不同。

第一次开钻(一开):从地面钻出较大井眼,钻到一定设计深度后下表层套管(surface casing)。

第二次开钻(二开):从表层套管内用较小尺寸的钻头继续钻进,若地层不复杂,则可直接钻到目的层后下油层套管(production casing,生产套管)完井。如果遇到很难用钻井液控制的漏、喷同层等复杂地层时,则要下技术套管(intermediate casing)。

第三次开钻(三开):从技术套管内再用小一点尺寸的钻头往下钻进。若地层不妨碍继续钻进,可一直钻达目的层;若地层妨碍继续钻进,可再下第二层、第三层技术套管,再进行第四次、第五次开钻(二开或三开、四开、五开进尺钻完时间称为中期完钻,中期完钻后的电测、下套管、注水泥等施工称为中期完井施工,简称中完, intermediate completion)直到最后

钻到目的层深度后完钻(finishing drilling)。

每一次开钻前必须对钻机进行下列检查工作,确认完善后方可开钻:

① 各部位螺丝、水龙头丝紧固、机身平稳、机械移动刹车装置完好;

② 将各操纵挡位放在不同位置,油压调到最大限度检查油路系统是否正常,并按规定对各部位加注润滑油脂;

③ 各操作手把、离合器、刹车是否灵活可靠;

④ 传动机构正常、转向正确、防护设施牢固;

⑤ 动力系统正常,线路绝缘良好;

⑥ 清除机身、机旁异物,运转无阻;

⑦ 卡盘在松开状态,机上钻杆能滑动自然,有异常进行修理。

3. 固井和完井

固井(well cementation)是在已钻成的井眼内下入套管,然后在套管与井壁之间的环形空间(环空,annular space)内注入水泥浆(cement slurry,在套管的下段部分或全部环空)将套管和地层固结在一起的工艺过程。固井可以保证安全地继续钻进下一段井眼(对于表层、技术套管而言)或保证顺利开采煤层气(对于生产套管而言)。套管柱的上部在地面用套管头予以固定。

完井(well completion)工程主要包括钻开煤储层,进行煤储层和井眼的连通,安装完井的井口装置等。完井作业还包括下油管(run tubing)、装油管头(tubing head)和采油树(christmas tree),然后进行替喷(displacing)、诱导气流使气流进入井眼,流出地面进行计量,进而进行采气生产等工序。另外,在整个煤层气井的建井过程中还可能需要进行岩屑录井(cutting log)、测斜(inclination survey)、电测(electric log, electrical survey)、气测(gas logging)等施工,必要时要进行取芯(core)施工。

上述作业全部完成并合格后,便可进行移交工作(交井,hand over well),最后对该井进行成本核算,同时进行拆卸设备与下口井的准备工作。

四、煤层气井建井工程的特点

由于煤层气储层特殊的物理力学性质,致使煤层气井建井工程也有其特殊性:

(1) 煤层气井产气周期长,对井的寿命和质量要求高

一般来说,煤层气直井要求最大井斜角不大于 3° ,100 m增斜率小于 1° ,井底水平位移小于20 m,且要求建立合理的井身结构,加快钻井速度,减少煤层浸泡时间,防止煤层伤害而影响排采产量。

(2) 钻井设备类型多,钻进工艺多样化

目前,由于参与煤层气地面抽采的公司类型多样,既有煤炭企业,也有地质矿产部门,还有三大石油公司,因此使用的钻井设备也呈现多样化,有车载液压钻机、国产3 000 m之内的石油钻机、水源钻机和煤田钻机等。钻进工艺多种多样,目前除了常规钻进工艺外,已经成功使用了泡沫钻进、空气钻进等欠平衡钻进工艺。

(3) 煤层气井建井过程储层保护问题突出

我国大部分煤层气储层具有含气饱和度低、渗透率低以及压力低的“三低”特性,同时具有较强的吸附能力,钻井液、完井液和水泥浆很容易造成储层的污染,如钻井液中的液体和高分子聚合物会吸附在煤层上,一方面会诱发煤基质膨胀使煤层基质渗透率下降,同时由于

聚合物在煤表面多点吸附而形成胶凝层堵塞煤层的裂缝和割理,还如高 pH 值的外来液侵入煤层中,与煤中可溶性腐殖酸发生反应,形成沉淀,同时甲烷气和低表面张力的外来液发生反应,可促成有机垢的形成,这种沉淀和有机垢一旦形成,就易使煤层受到伤害,因此煤层气建井过程中要特别注意储层保护问题。

(4) 井壁稳定性问题突出,容易发生井下复杂事故

由于煤岩的机械强度低,易压缩,孔隙和割理发育,被破碎后,煤层难以支撑上覆地层的压力而易于坍塌,钻开后的煤层在钻井液滤失液的浸泡下更易垮塌,因此,煤层气井钻进中经常会遇到井壁稳定性差的问题,易发生井壁坍塌、井漏、起下钻遇卡甚至埋掉井眼等复杂事故。

(5) 煤层破碎、含游离气多,取芯困难

煤层机械强度低,用常规钻井取芯工艺取芯,取芯率低,岩芯破碎,一般没有完整煤芯出筒,提芯时间长,而且煤层气井都是选择在含气量较高的地区,割芯后,随着取芯筒与井口距离的缩短,煤芯中气体不断解吸出来,当达到一定程度时可能将煤芯冲出取芯筒,因此,必须要用专用的煤层取芯工具。

(6) 水泥浆体系不完善,新型固井施工工艺技术仍在试验过程中

煤层气井浅,井底温度低(一般在 $25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间),上部地层的温度更低,低温下水泥特别是低密度水泥的水化速度慢,水泥石早期强度和后期强度低,低温下和降失水剂配伍的早强剂及促凝剂少;煤层段地层孔隙压力梯度较低,即使用清水钻进,煤层段漏失现象也时有发生,而水泥浆密度比钻井液密度高得多,更容易导致水泥浆体漏失,尽管空心微珠水泥浆、粉煤灰水泥浆、泡沫水泥浆和充气水泥浆四种类型的低密度水泥浆已经在部分煤层气井固井当中成功应用,但仍有缺点,如稳定性差、普适性差,因此,设计合适的低密度水泥浆体系还存在不小的难度。

在固井施工时,由于井深浅,替浆量少,井眼多不规则,特别是多煤层井段易形成“糖葫芦”井眼,导致顶替效率低,残留的滤饼和钻井液严重影响煤层的封固质量,同时水泥浆向地层的失水量大,导致性能发生很大变化,也影响对煤层封固质量。

(7) 煤层气井完井方法多样,但必须满足强化和排水降压的需要

为满足各种不同储层物性煤层气经济有效开发的需要,根据煤层顶底板岩层性质(岩性、渗透率、应力和稳定性等)和煤层特性(煤阶、煤层层数、有效厚度和分布、渗透率、含气量、压力、强度和稳定性)等地层学条件试验了多种完井方法,主要有裸眼完井、套管射孔完井、筛管-裸眼完井、裸眼洞穴完井和水平排泄孔衬管完井等完井方法,其中以套管射孔完井和裸眼洞穴完井为主。

部分煤储层渗透性低,必须经过强化才有可能实现工业生产以及需要排水降压使气体解吸才能得以开采。因此,煤层气井完井还必须满足强化和排水降压的需要。

五、煤层气建井工程的主要研究内容

煤层气建井工程是在石油天然气建井工程基础上发展起来的,是由多个子系统综合运行作业而汇集的复杂系统,具有“五多一长”的明显特征,即:多工序的作业环节、多工种的操作配合、多专业的协调管理、多因素的环境影响、多渠道的横向调节,长战线的后勤保障规模;各子系统间的相互作用、约束及各子系统本身的行为构成了系统的整体行为,各子系统的运行是否良好,各子系统之间的相互作用是否正常,对建井过程全局有着直接的、重要

的影响。因此,一方面煤层气井建井工程借鉴石油天然气建井技术需要进一步验证和深入研究,另一方面,煤层气井建井工程系统复杂,需要研究的内容繁多,急需对建井工程技术进行深入系统的研究,把我国的煤层气勘探开发技术推向另一高度,限于篇幅,仅介绍煤层气井建井工程技术中需要研究的几项关键技术内容:

(1) 煤层气井建井工程地质条件

建井的工程地质条件是指与煤层气井建井工程有关的地质因素的综合。地质因素包括组成地层的岩石、土的结构与类型及其工程力学性质、地层中流体情况等等。建井工程是以不断破碎井底岩石而逐渐钻进后经固井、完井而形成的,了解拟建井的地下岩石的工程力学性质,可以为选用合适的钻头和确定最优的钻进参数、确定钻井液、固井水泥浆、完井液工艺性能指标提供直接的设计依据。井眼的形成使地层裸露于井壁上,这又涉及井眼与地层之间的压力平衡问题,对此问题处理不当则会发生井涌、井喷或压裂地层、井壁坍塌等复杂情况或事故,使钻进难以进行,甚至使井眼报废。所以,在一口煤层气井建井之前,充分认识和了解该地区的工程地质资料(包括岩石的工程力学性质、地层压力特性等)是进行建井地质和工程设计的重要基础,对保证煤层气井建井质量尤为重要。

(2) 钻井设备与工具

“工欲善其事,必先利其器”,煤层气井钻井、固井、完井设备及工具问题是煤层气建井工程首要研究的问题之一。

目前,国内用于煤层气开发的钻机主要是进口的车载液压钻机、国产 3 000 m 之内的石油钻机、水源钻机和煤田钻机等。从钻深能力看,均能覆盖煤层气勘探开发和煤矿瓦斯地面抽采对钻深的要求,但各有优缺点,如水源钻机和煤田钻机由于钻台面太低无法安装防喷器和固控设备,不能达到安全环保的要求;石油钻机能够满足安装防喷器的要求,但使用成本太高,搬迁安装时间长,对路面和井场要求高,不能满足煤层气勘探开发对低成本、高效率的要求;车载液压钻机在施工方面能够满足高效、环保的要求,但也存在一次性投资高,备件等待时间长,费用高,不便于维护保养,在施工的过程中的热量不容易散发,车辆自重过大,对道路要求高等问题。因此,急需研究开发体积小、自动化程度高、可运移性好,满足水平井钻井、空气钻井等特殊需求的具有自我知识产权的专门的煤层气井钻机。

煤层气定向井钻井及特殊工艺钻井的关键工具,如随钻测井控制(LWD)和电磁随钻测量(EM-MWD)等测量仪器,远距离穿针工具等还是依赖国外进口,因此煤层气井特殊钻井工艺中的关键工具研究也是煤层气井建井工程亟须研究的重要内容。

钻头是破碎岩石形成井眼的重要工具,直接影响钻井速度、钻井质量和钻井成本,选择适合煤系地层的破碎效率高、使用寿命长的钻头,以及在钻进过程中使用和维护好钻头,就具有特别重要的意义,因此,钻头的选择与利用,改造或者研发新型专门适合于煤系地层的钻头也是煤层气建井工程需要研究的重要内容之一。

钻柱是钻头以上、水龙头以下部分的钢管柱的总称,其在钻井过程中作用重大,钻柱的合理优化设计是保障高效钻进的基本要求,因此,钻柱的优化组合也是煤层气井研究的主要内容。

(3) 煤层气井井身结构优化问题

井身结构设计是钻井工程的基础设计,它不但关系到钻井工程的整体效益,而且还直接影响煤层气井的质量和寿命,特别是对于井壁稳定性差的煤层气井来说,井身结构优化问题

十分突出,其是有效沟通煤层气与井筒的基本保障,研究井眼轨迹优化设计、多分支井分支结构优化、多分支井远距离穿针、小尺寸地质导向等对于煤层气井的井身结构设计与建立具有十分重要的意义。

(4) 煤层气井钻井液技术

我国自 20 世纪 90 年代初开始煤层气开发以来,一直重视煤层气井钻井过程中钻井液的研究工作,但是由于起始阶段的主导思想是以常规油气钻井液为基础进行部分性能改进而形成煤层气井钻井液,一直未收到理想效果。研究煤层气井钻井液的功能、组成及类型,钻井液的工艺性能及测定方法,钻井液的原材料及处理剂,钻井液的固相控制及钻井液的设计与计算,对于保证煤层气井高效钻进具有十分重要的意义,尤其是根据煤储层特性有针对性地配制出煤层气井钻井液,是保护煤储层、提高煤层气井建井质量、降低煤层气井建井成本的基本前提。

(5) 煤层气井钻进技术

研究影响煤层气井钻进的主要因素,研制煤层气井钻井设备及工具选择与优化,进行煤层气井钻进参数(钻压、转速、钻井液性能、泵量、泵压、泵功率及其他水力参数等)优化设计、做好煤层气井井眼轨迹及钻进过程中压力控制是煤层气井钻进的主要研究内容,只有这些工作做足够好,才能保证煤层气井高效钻进。

(6) 煤层气井固井技术

针对煤储层低压、低渗、易伤害、胶结性差等特点,设计适合于煤层固井的工艺技术和水泥浆体系,在保证固井质量的前提下,尽量控制水泥浆液柱压力,实现近平衡压力,达到降低固井作业对煤层的伤害是煤层气井固井的核心。因此,开展低密度水泥浆,如空心微珠水泥浆、粉煤灰水泥浆、泡沫水泥浆、充气水泥浆体系的研究;开展新型施工工艺,如控制水泥返高、分级注水泥、塞流、绕煤层注水泥等技术的研究是煤层气井固井技术重要的研究内容。

(7) 煤层气井完井技术

煤层气井完井技术是煤层气开发中的关键技术之一。目前主要使用的完井技术主要有裸眼完井、裸眼洞穴完井、套管射孔完井、混合完井和水平排孔衬管完井等,根据煤层性质,合理选择完井和井底连通参数是延长煤层气井的生产时间,提高煤层气井产量的基本手段。因此,就目前煤层气井完井技术来说,其主要研究内容是煤层气井完井方式选择、煤层气井射孔工艺与井口装置及完井管柱优化、投产措施选择与完善等。

(8) 煤层气井建井过程的储层保护与 QHSE 体系

钻井完井的目的是为煤层气与地面建立一条安全畅通的通道,然而由于煤岩储层具有低孔、低渗及较低的地层压力、存在敏感性矿物(黏土、碳酸盐、硫化物)、具有亲水性的特征,在建井过程中由于应力变化、入井液体、固相的侵入等会使煤岩储层的渗透率下降,因此,认识和诊断储层损害原因及损害过程,实施有针对性的防止和解除储层损害的技术措施,对于提高煤层气井排采产量,加大煤层气开发利用力度有着十分积极的意义。

煤层气井建井是一项复杂的系统工程,是高投入、高风险和高技术水平的特殊作业,在其不同阶段和不同的环节中,均存在本身建井质量以及对人员身体健康、人员与设施安全和生态环境等不同程度、不同形式的影响和危害,也存在不同程度、形式各异的风险。因此研究建井工程的 QHSE 体系,可以有效控制、预防事故的发生,将风险降低到尽可能低的水平,有利于提高建井质量,有利于保障人员身体健康和设备设施的安全,有利于环境保护。

六、煤层气建井工程的发展

我国煤层气领域的勘探开发研究工作起步较晚,仅有 30 多年的历史,由于前期的钻井完井技术基本沿用常规油气井技术,致使煤层气建井工程技术研究起步更晚,但是随着近年来煤层气开发一直未很好地形成商业性规模化的煤层气田,人们开始思索现有煤层气井钻井、固井、完井工艺技术与我国煤层特性的适应性问题,开始着手研究专属于煤层气井特有的钻井、固井和完井技术。

1. 国外煤层气建井工程技术现状

1920 年和 1931 年,美国在粉河盆地中部的怀俄德克煤层和北阿巴拉契亚盆地比格朗气田的匹兹堡煤层先后无意中打出了三口煤层气自流井,另一个较早生产煤层气的例子是北阿巴拉契亚盆地 Big Run 气田,从 1949 年起生产累计超过 35 年。20 世纪 50 年代以后至 1978 年以前,菲利浦石油公司对圣胡安盆地水果地煤层钻了一批井,大多数井获得了成功,在此期间,美国煤层甲烷钻井活动主要是集中在高压煤层区,采用的建井工程技术主要是常规油气井的钻井与完井工艺,取得了一定的煤层气开采效果。

1978 年以后,在能源危机的大背景和美国能源局相关政策的刺激下,美国矿业局、钢铁公司和一些石油公司先后在亚拉巴马州的黑勇士盆地和位于科罗拉多州与新墨西哥州之间的圣安湖盆地进行了煤层气建井工作,从此,拉开了美国煤层气工业的序幕。

进入 20 世纪 80 年代中后期,随着裸眼洞穴完井技术和空气钻井技术的形成和发展,煤层气建井数量和质量得到了大幅度提升,黑勇士、圣安湖两大盆地迅速形成产业化规模,到 1995 年,生产井数量已经超过 5 000 口,20 世纪 90 年代后期,美国煤层气井数量进入大发展阶段,生产井数量已逾 8 000 口,采用的井型有三种类型:垂直井、煤矿采空区钻井和水平排泄孔钻井(含分枝井),90% 的开发井是用空气或泡沫进行钻井和完井,采用的钻井设备有矿业旋转或冲击式钻机、轻便自行式液压钻机、小型车载钻机和普通石油钻机,并与一种新型空气钻井井下马达配套,效果显著;在 21 世纪初,美国约 10% 的煤层气井都采用了定向钻井技术;羽状分支水平井技术由美国 CDX 国际公司开发,世界上第一口煤层气羽状分支水平井专利技术在美国落基山应用,目前羽状水平井技术已经在阿巴拉契亚、俄克拉荷马州、伊利诺伊州、西弗吉尼亚州成功使用,仅西弗吉尼亚州煤层气开发项目就钻了 69 口羽状水平井;固井工艺开始采用以下几项工艺技术:① 高强度、低密度、低失水水泥浆,在水泥浆中加入固体降重剂(如粉煤灰、空心微珠等)以降低密度(可达 $1\,120\sim 1\,144\text{ g/cm}^3$),全井封固,且强度达到常规水泥浆的强度;② 泡沫水泥浆:在水泥浆中加入氮气,分散成稳定的均匀小气泡,可将水泥浆密度降到 0.80 g/cm^3 左右,且失水少、强度满足要求;③ 双级注水泥:将水泥分两次注入,可降低环空液柱压力,减少注水泥作业井漏的发生;④ 绕煤层固井技术:在煤层部位的套管柱中加装套管外封隔器和特殊接头,注水泥时,水泥浆流到煤层底部后绕过煤层至煤顶部返回环空,即水泥浆不与煤层接触,最大限度地降低对煤层的伤害;试验了多种完井方法,主要有裸眼完井、套管完井、套管/裸眼完井、裸眼洞穴完井和水平排泄孔衬管完井五种完井方法,通过钻井、固井、完井技术方面的完善,建井质量得到了极大改善,目前已经形成了 5 个大规模煤层气开发盆地(黑勇士、圣安湖、尤因塔、粉河、拉顿)。

2001 年,加拿大仅有 250 口煤层气井,主要集中于西加拿大盆地,由于北美地区常规天然气产量下降,价格上升,给煤层气井的发展带来契机,煤层气井发展开始迅速,2003 年煤层气井增加到 1 465 口,2004 年达到了 3 100 口,2006 年已经有 9 200 多口,目前已经达到

了近两万口井。

澳大利亚的煤层气勘探开发始于 1976 年,主要集中在东部的三个含煤盆地(悉尼盆地、苏拉特盆地和鲍恩盆地),2006 年已钻成煤层气井 1 100 口,主要采用定向井开发煤层气,中等半径钻井(MRD)和极短半径钻井(TRD)较多,钻井工艺以欠平衡为主,完井主要采用裸眼、套管和裸眼洞穴 3 种方式。

2. 国内煤层气井建井工程技术现状

我国利用地面钻井开发煤层气始于 20 世纪 80 年代,当时煤炭科学研究总院基于煤炭生产安全考虑,先后在湖南里王庙、河南焦作、山西阳泉、辽宁抚顺等地煤矿采用探矿钻机、ZST-6/600 水源钻机、ZJ10 和 ZJ15 型钻机进行了十几口煤层气井,井深 170~1 500 m,采用直径为 180 mm 或 127 mm 套管完井。

20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期,联合国开发计划署(简称 UNDP)资助我国原地质矿产部在全国各地进行有针对性的煤层气钻探试验,形成了以山西柳林煤层气实验区为代表的煤层气勘探钻井、“MS-215”绳索取煤芯、“LBM”低固相钻井液和完井等工艺。

与此同时,美国的 ICFC、ARI、ARCO、PHILIPS 等公司纷纷加入我国煤层气的勘探开发,其钻井完井技术基本上利用我国现有的技术。

中国石油天然气集团公司(CNPC)于 1992~1994 年投资进行了 5 口井(欧 15 井、沁参 1 井、大参 1 井、曲试 1 井和冷试 1 井)的煤层气勘探试验,除江西曲试 1 井为裸眼洞穴完井外,其余为套管射孔完井,后来又在东北、江南和山西等地区钻了 80 多口试验井,均为套管射孔压裂完井。

1996 年中联煤层气有限责任公司和 CNPC 煤层气勘探项目经理部相继成立,标志着我国煤层气勘探开发第一个高潮的到来。“九五”期间,CNPC 进行了较大规模的煤层气综合研究和工艺性勘探开发试验,先后在华北大城、山西晋城和陕西吴堡地区共钻了 20 口煤层气试验井(包括 2 个井组),除取煤芯技术有发展之外,其余钻井完井技术基本与常规油气井类似。

通过“九五”科技攻关研究和现场试验,开发出了“低温空心微珠低密度水泥浆领浆+常规水泥浆尾浆”体系,结合控制失水、低返速塞流顶替等技术,基本解决了煤层气固井的封固质量,但仍未解决固井对煤层造成的伤害。这是因为煤层属强压力敏感低压低渗储层,现有技术固井的水泥浆液柱压力与煤层静压差达到 3~7 MPa,导致煤层产生不可逆的塑性变形而降低渗透率,使钻井过程中保护煤层的努力失去意义。此外,无法实施近平衡固井也使煤层气空气(泡沫)钻井效果降低。

2003 年,中联煤层气有限责任公司在辽宁沈北地区进行煤层气勘探井作业时,对 SB02 井进行了国内首次空气钻进打开煤层。该井钻井、测井等施工完成后,计划进行小型动力造穴扩孔完井,但在第 11 次扩孔中,因卡钻事故未能达到预期排采目标导致报废。2004 年在新疆顺利完钻我国第一口采用空气雾化钻井技术施工的煤层气井——沙试 4 井。我国第一口煤层气羽状分支水平井是中国石油天然气股份有限公司引进 CDX 国际公司的钻井专利技术在樊庄高煤阶区取得的试验成功,此后多个公司相继都利用多分支水平井钻井技术建立煤层气井,至 2008 年我国已钻多分支水平井 65 口。

截至 2004 年我国施工地面煤层气井 287 口,试验井组 6 个,2005 年增至 615 口,试验井组 8 个,其中多分支水平井 7 口,2006 年煤层气井已经达到了 1 000 多口,试验井组 11