

# 煤层气不同开发方式的应用现状及适应条件分析

张培河<sup>1</sup>, 张明山<sup>2</sup>

(1.煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西西安710054; 2.东北煤田地质局107队, 辽宁阜新123003)

**摘要:**在对国内外煤层气勘探开发现状调研的基础上,分析了不同煤层气开发方式的技术特点、技术优势和存在问题,以及应用现状和应用效果,并根据不同开发方式的技术、工艺要求,从地质、储层、地形和投资等方面研究了主要开发方式的适应性。基于美国和中国煤层气地质条件的综合对比分析,并针对我国主要煤盆地的地质特征和地形条件等,提出了相应的煤层气开发方式:沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘比较适合地面垂直井和定向井开发方式;其他地区因地质条件大都比较复杂等原因,建议首选直井方式进行煤层气勘探开发。

我国煤层气勘探开发始于20世纪90年代初,至今已有近20a历史。自2005年以来,随着国家相关政策的出台,我国煤层气勘探开发出现了新的高潮,近4a施工的煤层气井超过以往10余a煤层气井的总和。至2008年底,我国实施的各类煤层气井已有3000余口,煤层气勘探开发遍及全国的主要煤盆地,大规模的煤层气勘探开发即将到来。

目前,地面煤层气开发方式主要有地面垂直井、地面采动区井、丛式井、羽状水平井和U型井等方式。这些开发方式可系统地划分为定向井开发方式和直井开发方式两类。其中,地面垂直井和地面采动区井为地面直井开发方式;丛式井、羽状水平井和U型井为定向井开发方式。煤层气开发方式的合理选择是煤层气开发需要重点考虑的内容,也是煤层气勘探开发成功的关键。美国是煤层气开发最成功的国家,由于煤盆地构造简单和煤层渗透率高等特点,不同类型开发方式的气井的产能都普遍较高,且经济效益显著。我国煤盆地的地质条件和水文地质条件复杂,煤层渗透率低,煤层气开发难度大,对开发技术及工艺要求严格,这使煤层气开发方式的选择显得尤为重要。因此,结合我国目前的煤层气勘探开发现状,开展煤层气开发方式适应性研究,对诊断目前勘探开发过程中存在问题,有效指导今后的煤层气勘探开发作业具有重要意义。

## 1 煤层气不同开发方式的应用及效果

### 1.1 国内外煤层气勘探开发现状

美国是世界上煤层气勘探开发最早的国家,也是最成功的国家。美国煤层气工业起步于20世纪70年代,首先在黑勇士盆地和圣胡安盆地取得成功;90年代后,在粉河、犹因塔等盆地也相继取得了成功。至2006年,美国煤层气生产井已达35000口,年产煤层气 $5600 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。美国的煤层气勘探开发主要采用地面垂直井方式,在部分地区实施了数量较少的羽状水平井和地面采动区井。

通过美国的示范作用,澳大利亚、加拿大等国家竞相开展煤层气的勘探开发,并逐步进入工业化开采,煤层气勘探开发也主要采用地面垂直井方式。加拿大的煤层气勘探开发自20世纪80年代开始,主要位于阿尔伯达盆地,2001年之前,仅有70余口煤层气井,近年来煤层气勘探开发有了长足的发展,2003年新增1000口煤层气生产井,2004年又钻井1500口,煤层气产量总计约 $10.22 \times 10^8 \sim 15.33 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ <sup>[1]</sup>。

澳大利亚的煤层气勘探开发始于20世纪70年代末,主要集中在悉尼、冈尼达、鲍恩、加利利等盆地,2004年煤层气产量达 $13.55 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,目前达到 $27 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,昆士兰的鲍恩盆地单井日产气量最高可超过 $28320 \text{m}^3/\text{d}$ 。

我国的煤层气勘探开发起步于20世纪90年代初,首先在沁水盆地的晋城矿区取得了成功,并逐渐扩展到整个沁水盆地。受煤层气产业政策等方面的影响,在本世纪初,我国的煤层气勘探开发规模逐步扩大,勘探足迹遍及鄂尔多斯、阜新、吐哈、准噶尔和鹤岗等多个盆地,已形成了沁水潘庄、潘河、樊庄、成庄、柿庄、阳泉寺家庄、韩城象山和阜新刘家等多处开发区。潘庄、潘河、柿庄、阜新刘家和韩城象山等区已初步进入商业化开发阶段。我国的煤层气勘探开发主要采用地面垂直井方式,并实施了40余口羽状水平井和20余口地面采动区井的勘探开发试验,近年来又进行了少量U型井的煤层气勘探。至2008年底,已施工各类煤层气井3000余口,煤层气产量达到 $3.4 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

### 1.2 不同开发方式的应用效果

#### 1.2.1 地面直井

煤层气勘探开发的地面直井方式包括地面垂直井和地面采动区井。

### a.地面垂直井

地面垂直井方式是在地面打垂直井进入目标煤层，通过采取一系列增产强化措施抽采目标煤层的煤层气。地面垂直井方式是目前国内外煤层气勘探开发广泛应用的方式。受地质条件的影响，垂直井煤层气开发的完井方式不一致，目前主要的完井方式有射孔压裂完井、裸眼完井和洞穴完井等。

在美国犹因塔、黑勇士等盆地，多采用地面垂直井方式进行煤层气勘探开发，使用射孔压裂完井的强化措施提高气井产能。犹因塔盆地的煤层气井产气量平均为 $2800\text{m}^3$

/d，勘探初期3口井压裂后排采1a多时间，单井产气在 $1000\text{m}^3$

/d左右，随后井组逐渐扩大到23

口，连续排采4a以上，单井产气量逐渐增加到 $5000\text{m}^3$

/d以上，在大规模生产阶段，超过 $20000\text{m}^3/\text{d}^{[2]}$

；黑勇士盆地煤层气井产量在 $3000\text{m}^3$

/d左右，在实行优化完井和增产措施的基础上能够

取得超过 $8495\text{m}^3/\text{d}$ 的单井产量<sup>[3]</sup>

。粉河盆

地采用裸眼完井，

产气效果非常好，截止2006年底，煤

层气生产井达到16000口，产量超过 $140 \times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ ，单井产量 $3700\sim 9900\text{m}^3/\text{d}$ ，最高达 $28000\text{m}^3$

/d

；圣胡安

盆地大部分井采用

裸眼洞穴法完井，产气效果也非常好

，煤层气富集区的气井产量为 $57000\sim 85000\text{m}^3$

/d，是采用地面垂直井开发凝胶压裂增产井的7倍，甚至更高，但在煤层气富集区之外，洞穴完井方法增产效果不佳，甚至不如套管压裂增产的煤层气井。目前，洞穴完井方法仅适合于煤层厚度大、硬度大，渗透率和气含量较高的地区。

我国的煤层气勘探开发主要采用地面垂直井方式，采取压裂增产的强化措施，效果比较显著，近年来，地面垂直井数量大增。沁水盆地是我国煤层气勘探开发的最热点地区，煤层气开发效果好，已形成了潘庄、柿庄、樊庄、潘河和阳泉寺家庄等多个煤层气开发区，主要采用地面垂直井、套管完井作业方式进行煤层气开发，单井最高产量达到 $16000\text{m}^3/\text{d}$ ，平均产量为 $2000\text{m}^3$

/d。在沁水南部还进行了裸眼完井试验，试验表明：在地质条件相似，实施的压裂改造效果基本一致的情况下，裸眼完井比套管完井的煤层气井产气效果好，但裸眼完井的煤层气井在排采过程中大都不同程度地出现煤层坍塌、堵塞筛管的情况，而且修井频率高<sup>[4]</sup>。

### b.地面采动区井

地面采动区井是在采煤之前由地面打垂直井进入主采煤层顶板，主要用于抽放煤炭采动影响范围内的不可采煤层及岩层中的煤层气。由于受采动影响，抽放井筒附近煤层及围岩破裂，裂隙增加，而且应力释放，煤储层压力降低，煤层及围岩的甲烷大量解吸，并经岩石冒落带或裂隙带进入井筒产出，因此气井产量通常都比较高。

在美国的勇士盆地和阿巴拉契亚盆地，地面采动区煤层气开发也已进入了商业化阶段，勇士盆地的吉姆沃尔特(Jim Walter)煤矿是美国最深的高瓦

斯矿井，钻采地面采空区井200余口，单井产量在 $4000\text{m}^3/\text{d}$ 以上，最大超过 $10000\text{m}^3$

/d，甲烷的体积分数在90%以上<sup>[5]</sup>

。我国采动区地面钻孔抽放始于20世纪80年代，曾在阳泉、淮北和铁法矿务局进行过试验，由于种种原因均未形成规

3

/d，取得了较好的产气效果。与此同时，淮北矿务局也开始在桃园、临涣、芦岭等矿进行地面采动区井煤层气勘探试验，芦岭矿1048工作面回采期间，采用井上、下煤层瓦斯综合抽采方式治理瓦斯，地面采动区井最高抽放量达到 $46000\text{m}^3/\text{d}^{[6]}$ 。

### 1.2.2定向煤层气井

定向井煤层气开发是近年来煤层气产业发展研究的新技术或引自石油天然气系统的技术,比较适合低渗透煤储层的煤层气开发。与地面直井比较,定向煤层气井的开发优势是:增加了煤层气产出的有效供给范围;无需压裂增产,减轻了对煤储层伤害;单井产气量高,煤层气采出程度高;减少钻前工程、占地面积、设备搬迁和钻井工作量,节约地面管线等费用;投资回收期短,经济效益好。定向煤层气井开发方式包括丛式井、羽状水平井、水平井和U型井等。羽状水平井、水平井和U型井通常都称为地面水平井。近年来,国内外煤层气开发企业将定向井煤层气开发作为提高煤层气单井产量的重要手段进行试验或推广。

#### a.地面水平井

羽状水平井是由美国CDX公司研发,并在近年来逐步得到推广的一项新兴技术,适合低渗透煤储层的煤层气开发。在美国,该技术已成功应用于西弗吉尼亚、阿巴拉契亚和圣胡安盆地等地区的煤层气开采,单井产量达到20000~80000m<sup>3</sup>/d,是常规井的10~20倍,3~5a采出程度可达70%以上。最近几年,CDX国际公司在阿巴拉契亚盆地钻了近百口定向羽状分支水平井

,在低渗透煤层气开发中取得了显著成效[7],

单井产气34000~56000m<sup>3</sup>

/d,比地面垂直井产量提高20倍以上(直井压裂开采

产气只有1700m<sup>3</sup>/d)[2]

。

羽状

水平井在

圣胡安盆地也得到

应用,在BP公司所属的区块内实施2

口羽状水平井,效果显著,单井产气57000m<sup>3</sup>

/d,而该区垂直井单井产气量仅为2800m<sup>3</sup>

/d。我国于2003年开始进行羽状水平井的煤层气勘探试验,试验区主要集中在沁水盆地,在鄂尔多斯盆地、宁武盆地

<sup>3</sup>/d以上,最高可达到90000m<sup>3</sup>/d,其他地区试验效果差,甚至不成功。

U型井(又称对接井)是国内外岩盐钻井水溶开采比较通行的方法,在我国已开始进行煤层气的应用试验,在钻井和完井技术及工艺方面得到了较大发展,我国首先在山西的保德地区进行勘探试验,施工了4个U型井的井组,气井产水量较大,均在200m<sup>3</sup>/d以上,除1号井外,其余3口井长期水量不减<sup>[8]</sup>

。在山西和顺地区、陕西彬长矿区和宁夏石炭井矿区也正在进行U型井的勘探试验。我国正处于U型井的勘探试验阶段,目前还没有翔实的气井产能资料。

#### b.丛式井

丛式井是近年来引自油气田开发的一套新技术。自20世纪90年代初,我国的长庆、克拉玛依、大庆和青海等油田,都开始采用丛式井进行油气开发。目前,在世界上,煤层气开发丛式井的应用较少,我国的晋城煤业集团公司、中国石油天然气公司在沁水盆地南部施工了100多口丛式井,产量在2500m<sup>3</sup>/d左右,与地面垂直井差别不大。

## 2煤层气不同开发方式的适应条件

煤层气开发方式受开发目的、所在地区的地形条件、地质条件以及资金等方面影响。在各种影响因素中,地质条件是内在因素,不同开发方式需要有不同的地质条件与之相适应。合理的开发方式不仅影响气井的产能,而且影响到项目的投资。

美国煤层气地质条件简单,煤层气开发方式的选择相对容易,气井产量普遍较高。我国煤田地质条件比较复杂,含煤盆地形成后普遍经历了多期构造运动,致使含煤盆地内构造复杂,褶皱断裂发育,煤层原生结构被破坏,加之我国现今煤田的地应力普遍较高,因此,煤层渗透率普遍较低;同时,受构造作用的强度、部位等影响,我国不同地区煤层气含量、渗透率的分布存在显著差异,从而加大了煤层气勘探开发方式的选择难度。

美国煤层气勘探开发过程中,不同类型储层采用不同的开发技术,对于高煤阶低渗煤层,发展羽状水平井开发技术;中煤阶中低渗煤层采用低成本直井压裂开发技术,通过优化压裂体系与规模,增加有效支撑缝长,提高裂缝导流能力的途径提高气井产量;低煤阶高渗煤层采用洞穴完井技术。我国的地形条件和煤层气地质条件比较复杂,煤层气勘探开发过程中,应依据不同地区的地形、地质和储层条件等,优化选择合理的煤层气开发方式。

不同煤层气开发方式有着不同的开发技术和工艺,对地形、地质和投资等条件的适应性也不一致。在同一地区或相同的开发条件下,采用不同的煤层气开发方式,煤层气井的开发效果会差别很大。因此,研究煤层气不同开发方式适应的地形、地质和资金等条件,针对不同地区选择合理有效的开发方式,对煤层气开发至关重要。结合目前国内外煤层气勘探开发的实践,根据煤层气不同开发方式的技术和工艺,对其适应条件进行分析,结果见表1。

表 1 煤层气不同开发方式的适应条件  
Table 1 Adapting conditions for different methods of CBM development

条件	地面垂直井	地面采动区井	羽状水平井	U型井	丛式井	水平井
地形条件	地形平坦	地形平坦	要求低	要求低	要求低	要求低
占地面积	大	大	小	较小	小	较小
构造条件	较简单-简单	较简单-简单	简单	简单	简单	简单
目标煤层数	1~3	1-数层	1 1		1~3	1
目标煤层发育状况	厚度较大-大,较稳定-稳定	邻近层发育且距离开采层近	厚度大、稳定	厚度大、稳定	厚度大、稳定	厚度大、稳定
埋藏深度/m	300~1 200	300~1 000	400~800	400~800	>1 000	400~800
煤体结构	碎裂 原生结构	碎粒 原生结构	原生结构	原生结构	碎裂 原生结构	原生结构
渗透性	较高-高	较高-高	低-高	较高-高	较高-高	较高-高
气含量	较高-高	较高-高	较高-高	较高-高	较高-高	较高-高
水文地质条件	简单-较复杂	简单-较复杂	简单	简单	简单-较复杂	简单
技术工艺	技术成熟、工艺简单	技术成熟、工艺简单	技术成熟、工艺复杂	技术成熟、工艺复杂	技术成熟、工艺较复杂	技术成熟、工艺复杂
钻井投资成本	低	低	高	较高	低 较高	较高

目前,地面垂直井煤层气开发方式的技术、工艺成熟,但该方式单井控气面积小,适合于地形平坦、交通方便的地区。其对地质条件的要求是:构造简单或相对简单,目标煤层深度300~1200m,厚度大且稳定,目标煤层1~3层,目标煤层以碎裂-原生结构为主,煤层气含量及渗透率相对较高。该开发方式工艺简单、技术成熟,投资成本低,但单井产气量低、煤层气采收率低,由于需要施工的煤层气井数量多,因此管理成本高,集输管路复杂,集输投入高。

丛式井开发方式适应条件与地面垂直井基本一致,由于是在一个井场同时实施多口煤层气井,因此对地形、交通条件的要求较地面垂直井低,其产能状况与地面垂直井基本一致,集输、管理相对简单,且成本较低。丛式井开发的目标煤层一般为1~3层,施工工艺较垂直井复杂。目前地面丛式井在石油、天然气勘探开发作业中应用效果较好,由于石油、天然气井的深度通常都比较大,因此生产作业便于操控;煤层气井一般都比较浅,而且排采作业对井斜的要求高,下泵深度通常要到达目标煤层甚至目标煤层以下位置,因此排采生产容易引起管柱系统与套管磨损等,致使气井管理、维护比较困难。受我国煤层气地质条件的制约,煤层气勘探开发的理想深度是1200m以浅。因此,丛式井方式并不完全适合我国的煤层气地质条件,目前已很少应用。

地面采动区井开发方式技术、工艺简单,但单井控气面积比较小,而且在气井部署、气井产能、产气质量等方面受到煤炭采掘部署及采掘进度的影响。该方式适合在开采煤层上方的邻近煤层发育、气含量较高的地区应用,气井的产气量一般都比较低。钻井深度要求到煤层上方的煤炭采动裂隙带,钻井深度小,同时该方式不需要实施压裂增产等强化措施,投资费用低。由于是在煤炭采掘工作面前方钻井,因此受到煤炭采掘部署等影响显著,适应范围小,而且对地形、交通条件要求高,集输、管理成本高。

羽状水平井、U型井和水平井开发方式的单井控制面积大,煤层气井产能高,采收率高,对地形、交通等适应性强,而且由于单井控制面积大,因此管理成本和集输投入都相对较低。这类煤层气开发方式的缺点是:对地质条件要求高,适合在构造及水文地质条件简单,煤层稳定且厚度大,煤层原生结构发育的地区;这类开发方式的工艺技术复杂,钻井费用较高。

### 3我国主要煤盆地煤层气开发方式探讨

### 3.1地质条件分析

美国煤层气开发成功的关键是美国大陆具有稳定的区域地质构造背景,构造简单,煤层发育,埋藏较浅,且以原生结构为主,煤层渗透率高。

中国大陆则遭受多个板块的碰撞,构造背景复杂。我国南方的主要煤田断裂、褶皱发育,寻找一个构造简单的区域相对困难,多不适合定向井的煤层气勘探开发;新疆的准噶尔煤田,不仅构造发育,而且地层倾角大,局部地区地层直立甚至倒转;黑龙江的鹤岗盆地张性、张扭性构造及层滑构造都比较发育;辽宁的阜新盆地不仅断裂发育,而且火成岩墙分布广泛;山西、陕西等华北地区构造相对简单,但也存在局部复杂区。

中国煤盆地普遍具有煤层发育层数多,煤层厚度大的特点,但多数煤盆地的煤体结构差,构造煤发育,不利于定向井的钻探成孔。我国主要煤田的煤层渗透率普遍较低,注入/压降试井测试渗透率多在1mD以下,按美国的标准均为低渗透储层。我国不同煤田的气含量变化范围大,气含量高值区主要位于中-高变质程度的煤盆地或地区,如六盘水含煤区、川南黔北地区、沁水盆地、鄂尔多斯盆地、淮南煤田、淮北煤田等;低变质煤区的煤层气含量普遍较低,如二连盆地、海拉尔盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地等。我国煤田的水文地质条件差别也非常显著,南方的多数煤田水文地质条件都比较复杂,不适合进行定向井的煤层气勘探开发;华北地区多数煤田含水层不发育,含水层富水性弱;东北及西北地区煤系含水层比较少,含水层富水性弱,水文地质条件简单。

### 3.2不同煤盆地的煤层气开发方式

我国的沁水盆地、鄂尔多斯盆地构造简单、煤层埋藏浅、厚度大、渗透性好、气含量高、原生结构煤发育,水文地质条件简单,适合采用地面垂直井、羽状水平井和U型井进行煤层气勘探开发;太行山东麓煤田构造较简单、煤层发育、气含量高,但部分地区水文地质条件复杂,适合采用地面垂直井进行煤层气开发;内蒙古的二连盆地、海拉尔盆地构造较复杂,气含量低,但煤层发育,厚度大且较稳定,适合采用地面垂直井、采动区井方式进行煤层气开发;黑龙江的鸡西、双鸭山和勃利等煤田构造较简单,煤层发育,但厚度普遍较小,而且稳定性差,适合地面垂直井和采动区井进行煤层气开发;鹤岗盆地构造较复杂、气含量低,但煤层发育层数多、稳定且厚度大,适合采用地面垂直井和采动区井煤层气开发;辽宁的阜新盆地煤层发育,气含量较高,但火成岩发育,适合采用地面垂直井和采动区井进行煤层气开发;新疆地区主要煤田构造都比较复杂、气含量低,但煤层发育,厚度大,适合采用地面垂直井和采动区井进行煤层气开发;安徽的淮南、淮北煤田构造复杂,煤体结构破碎,渗透性差,但煤层发育层数多,厚度大,适合采用地面垂直井和地面采动区井煤层气开发;我国南方的六盘水等盆地构造复杂,煤层稳定性差,煤体结构差,地应力高,渗透率低,水文地质条件复杂,而且地形复杂,交通不便,煤层气勘探开发难度大,但煤层发育层数多,间距小,气含量高,在地形、交通等条件合适的地区可采用地面垂直井和地面采动区井方式进行煤层气勘探开发。

值得注意的是,以上认为适合不同盆地的煤层气开发方式,并不是说全区(或全盆地)都适宜用某种方式进行煤层气勘探开发。受我国煤盆地地质条件的影响,适合定向井煤层气勘探开发的地区(或盆地)非常有限。另外,由于定向井煤层气开发方式对地质条件的要求苛刻,而且投资大、风险高,我国已有失败的教训。因此,应慎重采用定向井进行煤层气的勘探开发。

## 4结论

煤层气的不同开发方式适应的条件不同,各类开发方式普遍适合于构造及水文地质条件简单,煤层稳定,厚度大,且原生结构发育的地区。地面垂直井开发方式适合在地形、交通等比较便利的地区,定向井开发方式对地质条件的要求严格,但对地形、交通等地理条件的适应性强。我国华北的沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘比较适合地面垂直井和定向井煤层气开发,东北、西北以及南方的煤盆地在地形、交通方便的情况下,比较适合采用直井方式进行煤层气开发。

## 参考文献

- [1]李旭.世界煤层气开发利用现状[J].煤炭加工与综合利用,2006(6):41-44.
- [2]严绪朝,郝鸿毅.国外煤层气的开发利用状况及其技术水平[J].石油科技论坛,2007(6):24-30.
- [3]杨毅,杨坚,孙茂远.技术进步促进美国煤层气工业发展[J].中国煤炭,1997,23(4):44-48.
- [4]李友谊,王宇红,张利芳,等.裸眼煤层气井在潘庄区块的应用效果评价[G]//中国煤炭学会煤层气专业委员会,

中国石油学会石油地质专业委员会.2008年煤层气学术研讨会论文集.北京：地质出版社，2008：272 - 275.

[5]黄胜初.美国煤层气地面钻井开发技术[J].中国煤层气，1995(2)：25 - 30.

[6]吴建国.芦岭煤矿卸压区瓦斯综合抽采试验及分析[J].煤田地质与勘探，2008，36(1)：27 - 33.

[7]黄洪春，申瑞臣，王玺.利用多分支水平井开发煤层气技术探讨[G]//中国煤炭学会，中国石油学会.21世纪中国煤层气产业发展与展望.北京：煤炭工业出版社，2002：135 - 142.

[8]任光军，王莉，姜建青.柳林地区水文地质特征及其对煤层气生产井的影响[G]//中国煤炭学会煤层气专业委员会，中国石油学会石油地质专业委员会.2008年煤层气学术研讨会论文集.北京：地质出版社，2008：378 - 389.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/90270.html>