

应用 U 型井开采倾斜构造煤层气的钻采技术研究

鲜保安^{1,2}, 夏柏如¹, 张 义², 鲍清英²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 倾斜高陡构造煤层气钻井的共性是井斜难以控制, 而且这类储层分布较广, 潜力巨大。根据霍林河煤层气构造地质条件, 地层倾角较大, 主力煤层厚度大, 渗透率较高, 又属于典型的低煤阶煤层气, 易于实施 U 型斜井钻采工艺。U 型斜井钻采工艺特殊, 利用定向斜井与其远端的直井在井下连通, 建立煤层流体循环系统。为了保护煤层, 煤层钻进过程中要采用环空充气欠平衡钻井工艺。采气时要选用排量范围广、成本低、耐砂能力强的螺杆泵, 提高排采效率; U 型斜井能够充分发挥倾斜地层流体势能和各井的优势, 能够提高排水和采气效率。结合霍林河煤层气钻采, 探讨了 U 型煤层气井钻完井工艺及采气工艺。

关键词: 高陡构造; 煤层气; U 型斜井; 钻采技术

中图分类号: TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2010)08-0001-04

Study on Drilling and Extraction Technologies for High Steep Structure Coalbed Methane with U-shape Slant Well/XIAN Bao-an^{1,2}, XIA Bo-ru¹, ZHANG Yi², BAO Qing-ying² (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development - Langfang, Petrochina, Langfang Hebei 065007, China)

Abstract: The well inclination is difficult to control for high steep structure CBM drilling, and such reservoir spreads extensively and has a huge potential in China. According to the conditions of coal seam structure in Huolinhe basin, coalbed methane with large inclination, large thickness and high permeability is classic low coal rank and is easy to implement the process of drilling and extraction with U-shape slant well. This technology is to build a kind of special fluid circulatory system in coal seam by intersection of directional deviated well and a vertical well. Annular gas under-balanced drilling technology has been adopted in the drilling course in order to protect coal seam. Screw pump with large delivery capacity, low cost and strong sand resisting should be selected to improve production efficiency. U-shape slant well can take full advantages of fluid potential of coal seam and every well and improve efficiency of dewatering and gas producing. The paper discussed the drilling and completing technology of U-shape coalbed methane well and gas production technology according to the drilling and extraction in Huolinhe.

Key words: high steep structure; coalbed methane; U-shape slant well; drilling and extraction technology

0 引言

据 2006 年煤层气资源评价结果, 我国煤层气资源量可靠, 与常规天然气相当。埋深 2000 m 以浅煤层气资源量为 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1-4], 主要分布在华北和西北地区。我国煤层气储层地质构造相对复杂, 进行煤层气勘探与开发时与之相适应的钻完井技术必然思路不同, 优化选择的技术方法也不尽相同。就水平井技术而言, 在地层平坦的地区实施就显得更有优势, 但对于倾角较大的单斜或向斜、背斜相对陡峭的翼部的煤层, 其煤层倾角也比较大, 从钻完井工程角度把这部分煤层气储层化为高陡构造煤层, 普通的水平井技术必然受到限制。为了高效勘探开发部分高陡构造的煤层气资源, 需要对水平井技术加以改进, 最大限度地适应倾斜煤层的构造条件。

1 高陡构造煤层特点

1.1 高陡构造煤层钻井共性难题

我国高陡构造的煤层气资源遍布国内华北、华南、西北煤层气聚集区^[5]。对于钻煤层气井的目的煤层倾角 $> 15^\circ$, 即可认为是高陡煤层。在高陡构造含煤层气区, 钻煤层气直井, 既要节约钻井成本, 还要保证井身质量, 就面临井斜难以控制的难题, 如果遇到软硬交替的软地层, 极易遇到钻井复杂和事故的风险。贵州格目底向斜位于贵州西部六盘水含煤区, 向斜的轴面向北, 倾角达到 $60^\circ \sim 70^\circ$, 两翼沿走向上变化不大, 倾向上北东翼变陡, 南西翼稍缓, 转折端更加平缓, 北以水城-紫云断裂为界, 南以公鸡山背斜为界, 呈 NW 走向的长条带状, 长约 70 km, 宽 7~21 km, 面积 612 km²。含煤地层为晚二叠系

收稿日期: 2010-07-09

作者简介: 鲜保安(1966-), 男(汉族), 陕西户县人, 中国地质大学(北京)博士后, 中国石油勘探开发研究院廊坊分院高级工程师, 钻井工程专业, 从事煤层气钻完井技术研究及现场试验工作, 河北省廊坊市 44 号信箱中石油廊坊分院, xbaiffy@163.com。

龙潭组和长兴组,其中龙潭组可采煤层层数多,总厚度大,煤炭资源丰富,煤层气富集成藏条件优越,含气量高成为格目底向斜煤层气开发的一大优势^[6]。内蒙古大青山煤田位于大青山复背斜南侧,该背斜西起包头固阳,东至武川,东西长 90 km,南北宽 40 km,大青山煤田呈 NEE—SWW 向展布,岩层走向以 $N60^{\circ} \sim 80^{\circ}E$ 为主^[7],地层倾角 $>10^{\circ}$ 。四川古蔺地区煤层地层倾角大,一般在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ^[8]。准噶尔盆地埋深 <2000 m 的煤层气资源量为 $2.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$,含气量 $5 \text{ m}^3/\text{t}$,主力煤层有八道湾组和西山窑组,煤层厚度大,经实测其中昌吉地区地层倾角高达 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$,其他地区也有较多的高陡构造^[9,10]。

1.2 霍林河煤层特性

霍林河盆地的含煤层段为下白垩统霍林河组,是一套河湖相沉积,呈北东向分布于断陷盆地内,总厚度达 1700 m。霍林河盆地为半地堑型断陷盆地,是二连盆地群最东端的一个盆地。盆地总体呈 NE 向延伸,局部区段的展布方向稍有变化。北段走向方位角 27° ,中段 50° ,南段 20° 。盆地西北侧边界为 F1 断裂,北端为近东西的断裂所限,东侧和南端为侵蚀边界,总体为半地堑构造。下白垩统地层在盆地的东翼向西北倾斜,一般倾角 $<10^{\circ}$,在盆地中心部位近水平,在盆地西北边缘地层逐渐转为向东南倾斜,倾角 $12^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。轴线偏向西北侧,其走向与盆地展布方向一致,总体为一不对称的宽缓向斜。

盆地主要目的煤层共 2 层:

第一主煤层段:分布在中生界白垩系下统的霍林河组上含煤段(K_1h^5),以浅水湖泊相沉积为主,含薄煤 20 余层,表明该段形成过程中,经常是充填速度小于沉降速度,致使泥炭沼泽环境不能持续。本段厚度变化较大,西南部 12~15 线间明显变薄。岩性由灰色、深灰色粉砂岩、泥质砂岩及煤组成。砂岩发育水平及微波状斜层理。煤层薄,煤质劣,稳定性差,除 8、9 两层局部可采外,其它无工业价值,厚度 120~433 m,与下伏地层整合接触。

第二主煤层段:分布在中生界白垩系下统的霍林河组下含煤段(K_1h^3),是本区煤炭勘探的主要目的层。岩性由灰~深灰色细砂岩、中砂岩、粗砂岩、粉砂岩、泥岩、砾岩和煤组成。含 4 个煤组。煤层沿走向及倾向都有较大变化,表现为分叉变薄。在沉积序列中,砂岩及粉砂岩和煤层交互分布。厚度 290~820 m,二露天区及其西南较薄,约 300 m,东北至 16 线间厚度较大,可达 800 多米,平均厚度 712 m 左右,与下伏地层整合接触。

2 高陡构造煤层气井井身结构优化

鉴于高陡构造煤层倾角大、渗透率偏高的特点,钻煤层气羽状井或多分支水平井意义不大^[11],钻单水平井不利于后期的排水降压作业,可以借鉴 U 型水平井技术^[12],进一步改进 U 型水平井,而设计成延煤层 U 型定向斜井,即延煤层段设计一段平行于煤层的斜直段,简称 U 型斜井(如图 1 所示)。其中 θ 为地层倾角。直井 A 井要在斜井 B 井之前完井,还需要两井在煤层段连通。钻进煤层气斜井时在煤层顶板以上某段设计造斜点 KOP,稳定造斜,陆点设计在煤层顶板下部接近煤层的部位,便于下技术套管固井,也便于后期钻进煤层时实施欠平衡作业。

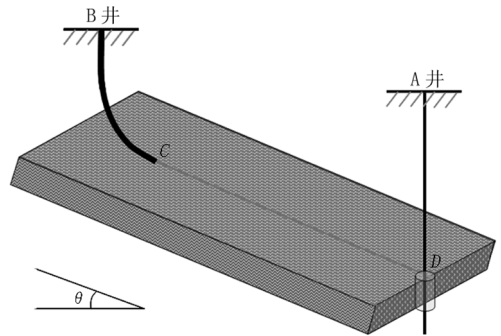


图 1 典型煤层气 U 型斜井井身结构图

由于煤层气 U 型斜井是延煤层倾向从高端向低端钻进,有效排水采气井眼是位于煤层中的斜直井段 CD,生产排水阶段煤层水很容易依靠重力作用排到 A 井的井底,再经过排采设备抽排到地面。煤层气这种 U 型斜井结构,充分利用了倾斜煤层水的重力优势,而且有利于排水和煤粉。

根据煤层储层特性,还可以在条件适应的地区试验 U 型分支井技术,如图 2 所示,在 U 型井的主井眼两侧再钻分支井,各分支最后再与洞穴直井连通,这样可以大大扩大 U 型井的控制面积,又能避免其中任一个水平井眼由于堵塞造成全井无法采气的弊端。

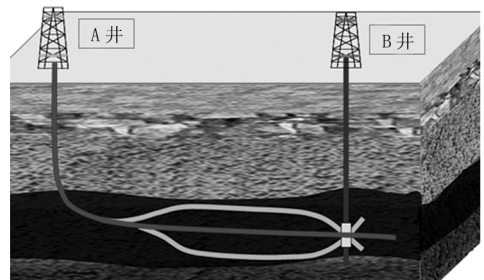


图 2 煤层气 U 型分支水平井井身结构图

3 U 型煤层气井钻完井工艺

U 型煤层气井由一口直井和至少一口斜井组成,斜井在煤层段与直井连通。

3.1 直井钻完井工艺

直井一开井段用 $\varnothing 311.1$ mm 钻头钻进,钻穿基岩风化带 15 m 后,下 $\varnothing 244.5$ mm 表层套管,封固地表疏松地层,下表层套管固井,固井水泥返至地面;二开井段用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻进,钻穿目的煤层底界以下 60 m 完钻,下入 $\varnothing 177.8$ mm 生产套管固井,其中煤层段下玻璃钢套管,注水泥封固至地面。完井时下入专用井下工具在煤层段锻铣玻璃钢套管,然后在煤层扩孔造洞穴,洞穴完井,洞穴直径 0.5 m,洞穴高度与直井的煤层厚度相当。

直井钻井泥浆以安全快速钻井为主要目的,可采用低固相低密度钻井液,或清水作钻井液。

3.2 斜井钻完井工艺

钻进斜井前要对煤层的构造特征进行细致研究,明确煤层展布、强度、硬度、倾向、倾角、断层、褶皱、陷落柱特征,对于含有大断层的煤层或构造粉煤就不能在煤层中钻斜直井段。

斜井一开井段用 $\varnothing 311.1$ mm 牙轮钻头钻进,钻穿基岩风化带 20 m 后,下 $\varnothing 244.5$ mm 表层套管,封固地表疏松层地层,下表层套管固井,固井水泥返至地面;二开井段用 $\varnothing 215.9$ mm 牙轮钻头钻进,钻达造斜点更换井下动力钻具和随钻测量工具,钻达煤层顶板以内接近煤层的着陆点中完,着陆点的井斜角根据地层倾角确定,下入 $\varnothing 177.8$ mm 生产套管固井,注水泥封造斜点以下 50 ~ 100 m;三开阶段用 $\varnothing 152$ mm 牙轮或 PDC 钻头钻完剩余斜直井段的进尺。三开井眼几乎全部在煤层,可以采用裸眼完井或割缝衬管完井。根据煤层机械稳定强度,三开钻头也可以选择 $\varnothing 120$ mm PDC 钻头,以缩小钻头直径,减小井壁坍塌的风险。

斜井的一开、二开井段使用普通聚合物泥浆,只要求满足安全快速钻进为目的;三开主要使用充气清水作为钻井液,实现欠平衡钻进以保护煤层。

煤层的倾角直接影响定向钻井的工具和工艺参数,可以根据煤层倾角大小和设计造斜段长预测煤层的平均井斜角变化率,进而确定定向工具弯接头的弯角和造斜钻具结构及钻进参数。

3.3 U 型斜井欠平衡钻井工艺

为保护煤层储层,在井壁稳定的前提下,煤层气水平井或沿煤层钻进的斜井最好采用欠平衡钻井方式。煤层气 U 型斜井可以采用寄生管注气欠平衡

钻井工艺^[13],便于准确计算注气量,达到控制较低范围的欠压值,最大限度地保护煤层。根据霍林河煤层地质参数,对该地区 U 型斜井注气欠平衡钻井优化,图 3 反映了在不同注气压力条件下井底欠压值绝对值 Δp 与环空注气量 Q_g 、钻井液排量 Q_w 之间的关系曲线,由图 3 曲线可以看出,当注气压力一定时,井底欠压值随钻井液排量的增大呈单调递增变化关系,且环空注气量越大,井底欠压值绝对值越大,欠压程度越高;不同注气压力条件下,在井底形成的欠平衡效果差异较大,当环空注气量 Q_g 一定时,在给定计算条件下,注气压力越高、越接近煤储层压力(在井例中煤储层压力 $P = 9.72$ MPa),注气效果越好,在储层中越能实现欠压值较小的欠平衡钻进。结合图 3 曲线及现场欠平衡钻井工程技术要求,即欠压值绝对值 Δp 达到 0.6 ~ 1.0 MPa 时,图中虚线框部分可以得出,注气压力控制在 9.0 ~ 9.5 MPa 范围内注气效果较好,形成的井底欠平衡效果较佳,最佳环空注气压力为稳定在 9.5 MPa 左右。

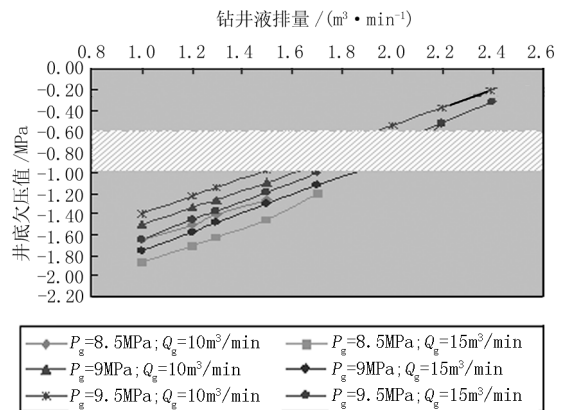


图 3 不同注气压力条件下井底欠压值与环空注气量、钻井液排量关系曲线

图 4 为最佳环空注气压力($P_g = 9.5$ MPa)条件下不同钻井液排量下井底欠压值与环空注气量关系曲线,由图 4 曲线可以看出,当钻井液排量 Q_w 一定时,井底欠压值绝对值 Δp 随着环空注气量 Q_g 的增大而单调递增。不同钻井液排量下,井底欠压值绝对值随环空注气量的变化规律基本一致;在同一环空注气量下,钻井液排量越大,井底欠压值绝对值越小,欠压程度越低;对于不同的钻井液排量,存在不同的环空注气量合理取值区间,使得欠平衡钻井工程的井底欠压值绝对值 Δp 达到 0.2 ~ 0.5 MPa,图中虚线框部分。为了有效实现 U 型斜井在钻进时井底为欠平衡状态,结合图中曲线及钻井液环空返速最低排量要求,钻井液排量应控制在 1.3 ~ 2.0

m^3/min 范围内。根据计算,环空注气量在 $5 \sim 20 \text{ m}^3/\text{min}$ 范围内能满足储层欠平衡钻进。

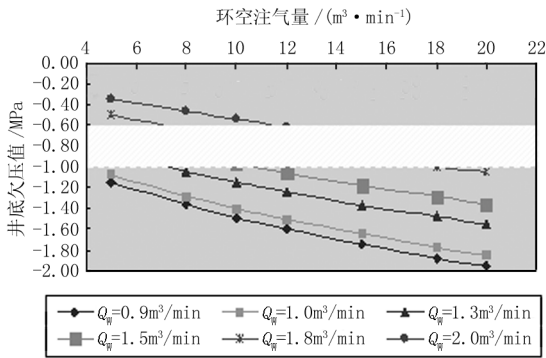


图4 不同钻井液排量下井底欠压值随环空注气量关系曲线
(最佳环空注气压力 9.5 MPa)

3.4 霍林河盆地煤层气 U 型斜井钻完井工艺

根据霍林河盆地含煤特征,确定该盆地的第二主煤层段白垩系下统的霍林河组下含煤段($K_1 h^3$)作为目的煤层。以霍试 1 井区为目标区,霍林河组下含煤段煤层 R_0 为 $0.3\% \sim 0.4\%$,深度 900 m,其中一个最大单层厚度 20 m,储层压力梯度 $1.08 \text{ MPa}/100 \text{ m}$,渗透率 0.91 毫达西,密度 $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$,倾角 $12^\circ \sim 15^\circ$ 。以这一煤层条件设计出组合 U 型斜井结构,即几口定向斜井可以简化成并联结构再与直井连通(如图 5 所示)。直井和斜井钻井工艺如前所述,关键是在 HS02-V 井洞穴处的连通点需要确定好,可以把 HS02-V 井的 10 m 洞穴段分成三等份,作为 3 口斜井(HS02-X1、HS02-X2、HS02-X3)和直井(HS02-V)连通时确定连通的靶点范围。设 4 口井的海拔和所选钻机的转盘面高度一样,可设计出其中的 3 口 U 型斜井的主要轨迹参数(见表 1)。直井(HS02-V)采用裸眼洞穴完井,3 口斜井采用裸眼完井。

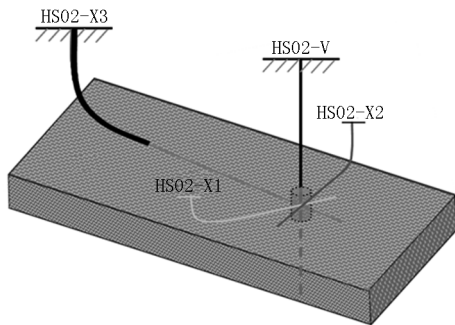


图5 霍林河煤层气组合 U 型斜井井身结构设计方案

4 采气工艺

对于高陡构造煤层钻 U 型斜井,沿煤层的近似

表 1 霍林河盆地 3 口 U 型斜井的主要轨迹参数

井号	造斜点 垂深 /m	着陆点 井斜角 /(°)	着陆点 方位角 /(°)	造斜段井斜角 变化率/[(°)· (30 m^{-1})]	水平 位移 /m	连通点预 计垂深 /m
HS02-X1	660	85	280	10.63	990	903
HS02-X2	630	85	80	10.63	1000	900
HS02-X3	605	80	135	10	1005	897

水平井或斜直井更能发挥倾斜地层流体势能,排水效果好,要比钻直井再水力压裂增产的直井产水量高,但煤粉的产出量会加大,所以在排采阶段选择井下泵时,首先在钻完井时就要留足井底“口袋”,以备沉沙;其次要选择排量可调、排量相对大、耐煤粉强的泵型,可以选用螺杆泵,并配备强度大的空心抽油杆,同时还要配备完善的泵、杆故障诊断系统。另外根据情况也可以选择电动潜油单螺杆泵,实现了无驱动杆排水采气方式,排除了驱动杆扭断的风险,还保留螺杆泵的优势^[14,15]。对于煤层含水很少,煤层坚硬、出沙很少的储层,可以选择管式泵。排水降液面速度应充分考虑煤岩的应力敏感性和速敏效应的影响,严密准确地监测液面变化,保持液面慢速稳定下降,严禁液面上下频繁波动,导致煤岩块体局部屈服变形破坏,引起煤粉的大量排出,既堵塞泵体,又可能瞬间堵塞煤层内裂隙,导致产水量和产气量的突然降低。

5 结论及建议

(1) U 型斜井是水平井与直井组合发展而来,霍林河盆地煤层气地质条件属于典型的低煤阶类型,而且地层倾角较大,构造条件优越,经井身结构优化设计,钻 U 型斜井可以充分利用高陡构造煤层液体势能原理,易于实施 U 型斜井,钻完井工艺可行。根据霍林河盆地煤层压力系统对 U 型斜井进行欠平衡钻井优化设计,得到煤层气欠平衡钻井的欠压值、注气排量、注气压力和泥浆排量值,可以指导欠平衡钻进施工。

(2) U 型斜井采气工艺设计考虑了煤层地质特性和流体势能原理,充分利用直井和定向斜井的优势,实现煤层的排水降压采气。组合 U 型斜井结构更能节约地面资源,发挥一井多用的作用。排水采气泵型可以选择螺杆泵或潜油螺杆泵,排水采气制度与常规的措施基本一致,仍然要坚持“稳定、慢速、均匀”的原则。

(3) U 型斜井井组是进行高陡构造煤层气资源开采的一种新型模式,可以实现陡峭储层煤层气的

(下转第 9 页)

力推钠土泥浆技术应用的重要原因。

(2) 钠土泥浆与无固相冲洗液比较,具有更多的优良性能。其一,体现在钠土胶粒在水溶液中的分散度高,水化膜厚,具有良好的表面吸附能力和离子交换能力。能与极大多数岩粉、化学处理剂、惰性材料等交联成网状结构,既能吸附在岩土表面,形成薄而韧的泥皮,抑制自由水对岩土的水化作用,又能形成絮凝胶团堵塞裂隙水通道,阻止泥浆漏失或被地下水侵害。其二,体现在泥浆密度可调范围大。在泥皮效能作用下,人工调节泥浆密度,使之与地层压力保持动态平衡,能达到稳定孔壁的目的。第三,体现在泥浆触变性能好。当泥浆静止时,交联网状结构好,静切力大,孔内岩粉悬浮在浆中不易沉淀,在较长时间内可保持孔底清洁和预防孔内事故;当泥浆流动时,交联网状结构迅即被破坏,动切力小,流动性能好,携粉能力强,钻进阻力小,有利于提高

金刚石钻进速度。

(3) 应用钠土泥浆技术,解决了锡坑矿区复杂地层钻进中应用传统方法及 PAA 无固相冲洗液护孔技术难以解决的塌、漏、掉等技术难题,保证了后续施工的钻孔质量,提高了钻进效率和经济效益,使我队在治理构造破碎带型复杂地层的技术难关上取得了实质性的突破。

参考文献:

- [1] 曾祥熹,等. 钻孔护壁、堵漏与减阻[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [2] 廖远苏. 西华山钨矿区复杂地层钻进的综合治理措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9).
- [3] 巫相辉,等. 钻井液配制技术及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(5).
- [4] 胡耿寰. 使用 NV-1 人工钠土取得优良效果[J]. 探矿工程,1989,(2).

(上接第4页)

开采,并且可以与羽状分支水平井组合形成新的井组,更好发挥 U 型井与羽状分支水平井各自的优势,可以经过试验完善,逐步推广应用。

参考文献:

- [1] 赵庆波,陈刚,李贵中. 中国煤层气富集高产规律、开采特点及勘探开发适用技术[J]. 天然气工业,2009,29(9):13-19.
- [2] 车长波,杨虎林,李富兵,等. 我国煤层气资源勘探开发前景[J]. 中国矿业,2008,17(5):1-4.
- [3] 饶孟余. 煤层气井排采技术分析[J]. 中国煤层气,2010,7(1):22-25.
- [4] 李景明,巢海燕,李小军,等. 中国煤层气资源特点及开发对策[J]. 天然气工业,2009,29(4):9-13.
- [5] 赵庆波,李五忠,刘洪林,等. 煤层气地质与勘探开发技术(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社,2006. 1-12.
- [6] 傅雪海,秦勇,Geoff G. X. Wang,等. 煤层气储层与开发工程研究进展[M]. 江苏徐州:中国矿业大学出版社,2009. 292-296.
- [7] 周劫,褚开智. 内蒙古自治区大青山煤田煤层气资源概况[J]. 中国煤炭地质,2008,20(2):17-19.

- [8] 尹中山,胡勋茂. 四川煤层气井施工的问题与对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(2):4-8.
- [9] 刘得光,吴晓智,赵铮亚. 准噶尔盆地煤层气资源潜力及勘探选区[J]. 新疆石油地质,2007,28(3):272-274.
- [10] 冯少华,李晓峰. 新疆地区煤层气勘探与开发的认识[J]. 中国煤层气,2008,5(1):44-46.
- [11] 高德利,鲜保安. 煤层气多分支井身结构设计方法研究[J]. 石油学报,2007,28(6):113-116.
- [12] Zhang Y, Xian B. A, Sun F. J, et al. Study on coal bed methane development with low cost drilling and stimulation technologies [A]. Advances on CBM Reservoir and Developing Engineering, 2009 Asia Pacific Coalbed Methane Symposium and 2009 China Coalbed Methane Symposium (Vol. 2) [C]. Xuzhou Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 2009. 503-514.
- [13] 张义. 煤层气羽状水平井环空流动特性研究与应用[D]. 山东东营:中国石油大学(华东),2008. 69-71.
- [14] 陈家庆,周海,王辉. 浅谈电动潜油单螺杆采油系统的研究开发[J]. 石油矿场机械,2002,31(2):1-4.
- [15] 张扬,汪玉华,张忠宝. 大庆机械采油的发展趋势[J]. 石油钻采工艺,1996,18(3):99-100.