

# 煤层气鱼骨状分支水平井轨道优化设计方法研究

李文飞, 周延军, 陶林, 于承朋

(胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

**摘要:** 鱼骨状水平井能够有效增大煤层气储层裸露面积, 提高单井煤层气的产量。将各个分支拆分成相对独立的待钻轨道与主井眼轨道分别进行设计计算, 拆分后的井眼轨道可以转化为二维轨道来进行设计。结合鱼骨状分支水平井的特点, 建立了分支水平井井眼轨道最优化设计模型, 并对分支井眼与主井眼的关系进行了分析研究。结果表明, 随着井深、造斜率的增加, 分支井眼与主井眼的直线夹角增加, 且分支井眼偏离主井眼的距离是逐渐增大的; 在直线夹角一定的情况下, 造斜率与井深呈反比关系, 即造斜率越高, 所需要的分支井井段越短; 造斜率越低, 所需要的分支井井段越长。

**关键词:** 煤层气; 鱼骨状; 分支水平井; 井眼轨道; 优化设计

**中图分类号:** TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2011)04-0001-05

**Study on Optimization Design of Coalbed Methane Herringbone Multi-branch Horizontal Well**/LI Wen-fei, ZHOU Yan-jun, TAO Lin, YU Cheng-peng (Shengli Drilling Technology Research Institute, Dongying Shandong 257017, China)

**Abstract:** Herringbone horizontal well can increase bare area and output of coalbed methane reservoir. The design calculation is separately made in single awaiting drilling trajectory and main well bore trajectory, the separated well bore trajectory can be transformed into 2D trajectory for design. The optimization design model of multi-branch horizontal well bore trajectory was established according to the characteristics of herringbone multi-branch horizontal well and analysis was made on the relationship between multi-branch well bore and main well bore. The result shows that the distance and the angle between branch well and main well are in direct proportion with depth and dogleg; under the condition of fixed angle between branch well and main well, dogleg is in inverse proportion with depth.

**Key words:** coalbed methane; herringbone well; multi-branch horizontal well; well bore trajectory; optimization design

我国有 30 万亿  $\text{m}^3$  左右的煤层气储量, 煤层渗透率平均为  $(0.1 \sim 0.001) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属于低渗透煤储层, 致使煤层气开采效果难以满足要求<sup>[1,2]</sup>。鱼骨状分支水平井是指在一个主水平井井眼两侧再钻出多个分支井眼作为通道的井眼轨迹形态(如图 1 所示)。由于单支水平井眼的延伸范围有限, 仅依靠增加水平段长度来提高煤层气采收率的优势受到了限制。因此, 作为水平井技术的延伸, 鱼骨状分支井由于在主水平井眼两侧具有多个分支, 能显著增加煤层裸露面积, 提高开发效率, 对于低渗透煤层气的开发具有重要意义。鱼骨状水平井的单个分支井眼的轨道设计与普通定向井、水平井相同, 对于分支水平井轨道的设计, 分支侧钻点与靶点的方向不在一个二维剖面上, 常规二维轨道设计方法难以满足要求, 可根据具体情况选定轨道类型, 但分支井的井眼轨道设计绝不是多个定向井或水平井轨道设计的简单组合。

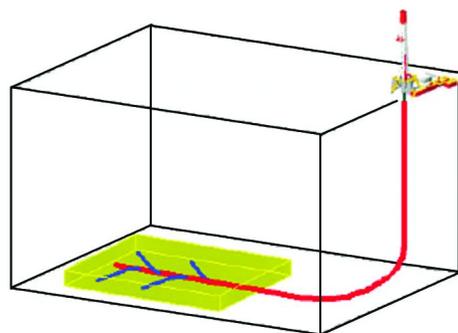


图 1 鱼骨状分支水平井

## 1 鱼骨状分支水平井井眼轨道设计原则

在进行井眼轨道设计<sup>[3]</sup>时, 无论是主井眼还是分支井眼, 首先要考虑的是分支井眼所处的煤层特性。应根据煤层的性质、地应力分布状态和煤层几何形状设计井眼轨道<sup>[4]</sup>, 同时要考虑井下工具和管柱的顺利下入, 确保井眼准确的进入预定靶区。为了便于处理钻井和后续作业过程中出现的复杂问

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2008ZX05022)

作者简介: 李文飞(1978-), 男(汉族), 山东菏泽人, 胜利石油管理局钻井工艺研究院工程师, 油气井工程专业, 博士, 主要从事钻井工程设计研究工作, 山东省东营市东营区北一路 827 号胜利石油管理局钻井工艺研究院设计所, liwenfei\_slyt@sinopec.com。

题,主井眼轨道应尽量简单,分支井眼的尺寸尽量大。为了获得最大产能,应使主井眼和分支井眼联接处的过流压差保持最低。

## 2 鱼骨状分支水平井井眼轨道优化设计

鱼骨状分支水平井的轨道设计不同于一般的水平井轨道设计,其空间三维特性<sup>[5]</sup>较为复杂,常规井眼轨道设计方法难以满足要求。因此应先按照煤层地质的要求设计出靶区轨迹,根据靶区的情况选择分支井眼回接<sup>[6]</sup>主井眼轨道,虽然分支水平井设计是三维的,但可将每个分支拆分成独立的待钻轨道和主井眼轨道进行设计计算,即将三维轨道转化为二维轨道进行设计,从而降低了复杂分支水平井轨道的设计难度。

### 2.1 主井眼轨道设计

由于主井眼水平段井斜角接近 $90^\circ$ ,根据现场施工工具的造斜能力<sup>[7]</sup>,水平主井眼一般采用“直—增—稳—增—平”类型(图2),通过两次增斜钻井施工达到设计要求。主井眼优化设计时已知参数:(1)造斜点垂深 $D_a$ ;(2)造斜率 $K$ ;(3)入靶点方位 $\varphi$ 。施工约束条件:(1)设计造斜率必须小于现场工具的最大造斜能力;(2)造斜点必须在比较稳定的地层;(3)造斜段终点所处层位必须有利于下入套管。

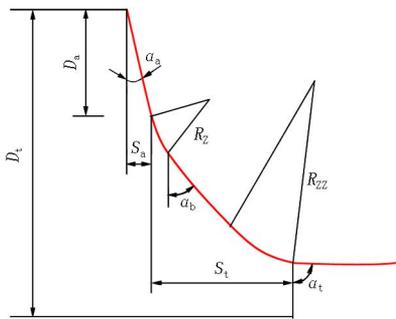


图2 主井眼轨道设计剖面

在进行主井眼轨道设计时,稳斜段的井斜角 $\alpha_b$ 是一个关键参数,可通过下式进行计算分析:

$$\tan\alpha_b = \frac{S_t - S_a - R_z \cos\alpha_a + R_{zz} \cos\alpha_t + (R_z - R_n) \cos\alpha_b}{D_t - D_a + R_z \sin\alpha_a - R_{zz} \sin\alpha_t - (R_z - R_n) \sin\alpha_b} \quad (1)$$

式中: $D_t$ ——靶点垂深,m; $S_t$ ——靶点水平位移,m; $S_a$ ——造斜点水平位移,m; $D_a$ ——造斜点垂深,m; $R_z$ 、 $R_{zz}$ ——分别为造斜段的曲率半径,m; $\alpha_a$ ——造斜点井斜角, $(^\circ)$ ; $\alpha_t$ ——目标段井斜角, $(^\circ)$ 。

### 2.2 分支井眼轨道设计

分支井眼轨道类型主要是“增—降—平”(图

3)。采用这种轨道类型设计出的分支井眼先上翘,然后水平前进<sup>[8]</sup>。优点在于防止钻主井眼时岩屑进入分支井眼,确保后续作业管柱顺利进入主井眼。

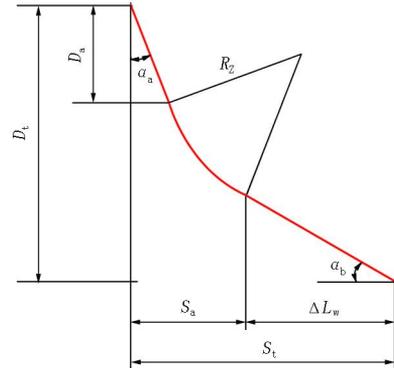


图3 分支井井眼轨道设计剖面

分支井眼优化设计的关键参数:(1)侧钻点位置;(2)造斜率 $K$ ;(3)分支角度 $\beta$ ;(4)分支井眼长度 $L_i$ 。施工约束条件:(1)造斜点必须在比较稳定的地层,同时侧钻点的位置在水平井眼轨道上;(2)设计造斜率小于现场工具的最大造斜能力;(3)造斜段终点所处层位必须有利于下入套管;(4)入靶点方位角符合现场技术要求;(5)分支角度 $\beta \leq 30^\circ$ 。

在进行分支井眼轨道设计时,造斜段的曲率半径 $R_z$ 和长度 $\Delta L_w$ 是关键参数,可通过下式进行计算分析:

$$R_z = \frac{(D_t - D_a) \sin\alpha_b - (S_t - S_a) \cos\alpha_b}{1 - \cos(\alpha_b - \alpha_a)} \quad (2)$$

$$\Delta L_w = \frac{D_t - D_a - R_z (\sin\alpha_b - \sin\alpha_a)}{\cos\alpha_b} \quad (3)$$

根据分支井井眼轨道优化设计的要求可提出其设计限制条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\max} - \alpha \geq 0 \\ \alpha - \alpha_{\min} \geq 0 \\ \varphi_{\max} - \varphi \geq 0 \\ \varphi - \varphi_{\min} \geq 0 \\ K_{b\max} - K_1 \geq 0 \\ K_{b\max} - K_2 \geq 0 \\ H_{kop} - H_{kop\min} \geq 0 \\ H_{kop\max} - H_{kop} \geq 0 \\ \beta - 30^\circ \leq 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: $\alpha$ ——稳斜角; $\beta$ ——分支的角度; $\varphi$ ——方位角; $K$ ——造斜率; $K_b$ ——工具造斜率; $H_{kop}$ ——侧钻点深度。

### 2.3 分支井轨道设计优化模型

根据不同的主井眼类型选用不同的井深计算方法和限制条件<sup>[9]</sup>,联合不同的分支井眼井深计算和限制条件就可以组合为分支水平井轨道优化的数学模型,由此能够建立出目标函数<sup>[10]</sup>即使得整个轨道长度最小。分支水平井设计优化模型为:

$$\begin{cases} \min L_{T\text{muti}} \\ L_{T\text{muti}} = L_{\text{main}} + \sum_{i=1}^n L_{\text{muti},i} \\ L_{\text{main}} = \sum_{j=1}^m L_j \\ L_{\text{muti},i} = \sum_{k=1}^m L_{\text{muti},i,k} \\ \text{st. } f(k, \alpha, \beta, \text{TVD}, \Lambda) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_{T\text{muti}}$ ——井眼总长度; $L_{\text{main}}$ ——主井眼长度; $L_{\text{muti},i}$ ——分支井井眼长度, $i$ 对应每一个分支; $L_j$ ——主井眼每段长度; $L_{\text{muti},i,k}$ ——分支井井眼每段长度。

优化设计模型较为复杂,按常规方法进行逐步搜索求解,运算周期长,因此可采用非线性数学规划问题的不等式约束乘子法<sup>[11]</sup>对每一个分支和主井眼的轨道进行优化求解,运算过程收敛快,输出结果准确。

### 3 鱼骨状分支水平井轨道设计影响因素分析

#### 3.1 分支井眼与主井眼夹角分析

分支井眼与主井眼夹角是分支井眼的侧钻点与分支井眼终点的连线与主井眼的直线夹角(图4),而不是侧钻点方位与分支井眼终点方位的差值。设侧钻点  $A(A_N, A_E, A_H)$ , 分支井眼终点  $B(B_N, B_E, B_H)$ ,  $B$  点至主井眼的垂线落点  $C(C_N, C_E, C_H)$ , 则

$$L_{BC} = \sqrt{(B_N - C_N)^2 + (B_E - C_E)^2 + (B_H - C_H)^2} \quad (6)$$

$$L_{AB} = \sqrt{(A_N - B_N)^2 + (A_E - B_E)^2 + (A_H - B_H)^2} \quad (7)$$

$$\sin \alpha = \frac{L_{BC}}{L_{AB}} \quad (8)$$

式中: $A_N, A_E, A_H, B_N, B_E, B_H, C_N, C_E, C_H$ ——分别是  $A, B, C$  三点在三维空间坐标系内的坐标; $L_{BC}$ —— $B$  点到  $C$  点的长度; $L_{AB}$ —— $A$  点到  $B$  点的长度; $\alpha$ ——分支井眼的侧钻点与分支井眼终点的连线与主井眼的直线夹角。

采用单因素法对分支井眼与主井眼夹角关系进行了分析计算。从表1可以看出,随着分支井眼与

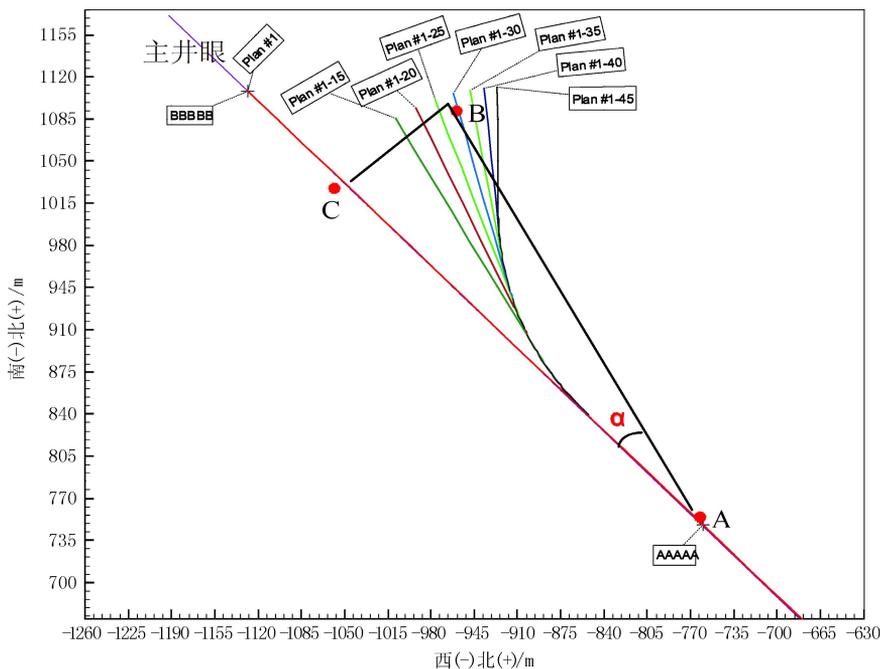


图4 分支井眼与主井眼的夹角

主井眼方位夹角的增大,分支井眼终点与主井眼距离增加,分支井眼终点与主井眼的直线夹角增加,但从钻井工程的角度来讲,施工时井内钻具与井眼摩擦程度也在增加,钻进的风险增大。同时发现随着

直线夹角的增大,分支井眼与主井眼间距离的增大幅度是在逐渐变缓的,因此没有必要追求较大的直线夹角。

表1 鱼骨状水平井分支井眼与主井眼夹角计算结果

与主井眼最大 夹角方位/ $(^\circ)$	井眼最大造斜率 $/[(^\circ) \cdot (100 \text{ m})^{-1}]$	弯曲井段长 /m	弯曲井段终点与 主井眼的距离/m	稳斜段长 /m	分支井眼 总长/m	与主井眼 距离/m	分支井眼终点与主 井眼直线夹角/ $(^\circ)$
15	25	73.38	8.39	226.62	300	67.28	13.00
20	25	93.41	14.42	206.59	300	85.32	16.62
25	25	113.35	22.05	186.65	300	101.11	19.90
30	25	133.30	31.28	166.70	300	114.75	22.86
35	25	153.27	42.01	146.73	300	126.26	25.49
40	25	173.29	54.20	126.71	300	135.73	27.79
45	25	193.23	67.67	106.77	300	143.22	29.74

### 3.2 造斜率、井深影响分支井眼与主井眼夹角变化规律

在向外分布井眼轨道的时候常采用三维设计,计算较为繁琐,可根据前面优化设计理论,进行拆分计算分析。从图5可以看出,在造斜率一定的情况下,随着井深的增加,分支井眼与主井眼的直线夹角

增加;在井深一定的情况下,随着造斜率的增加,分支井眼与主井眼的直线夹角也在增加,二者均呈正比关系。在一定直线夹角情况下,造斜率与井深则呈反比关系,即造斜率越高,所需要的分支井井段越短,造斜率越低,所需要的分支井井段越长。

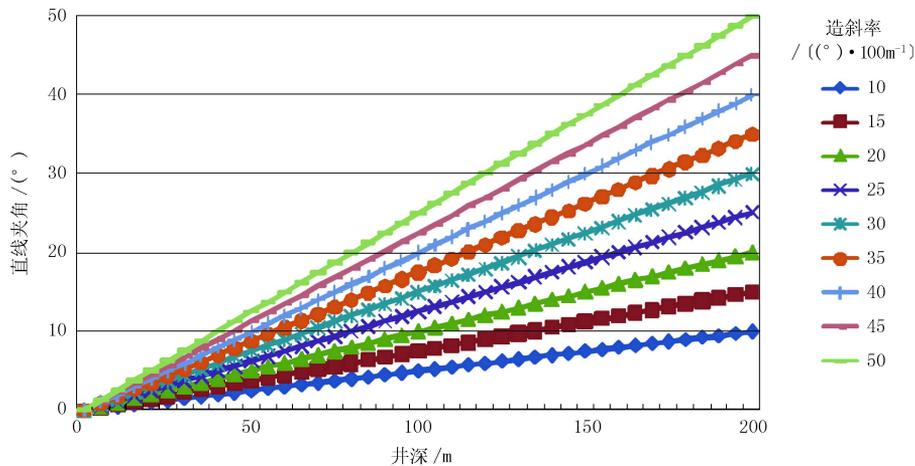


图5 不同造斜率下的分支井眼与主井眼夹角随井深变化趋势

### 3.3 造斜率、井深影响分支井眼与主井眼距离变化规律

由图6可以看出,在造斜率一定的情况下,随井深的增加,分支井眼偏离主井眼的距离增加;在井深一定的情况下,分支井眼与主井眼的距离随造斜率的增加逐渐增大;当分支井眼与主井眼距离一定时,造斜率越高所需的井段越短。

### 3.4 鱼骨状分支水平井钻进可行性分析

在鱼骨状分支水平井设计过程中,分支井眼与主井眼只有达到一定的夹角的情况下才显示出鱼骨状分支水平井的巨大经济效益,但是鉴于现场钻井技术条件,分支井眼与主井眼夹角是有一定限制的,因此分别以 $45^\circ$ 夹角和 $20^\circ$ 夹角两种情况为例进行了计算分析。

从侧钻点开始,分别沿与主井眼成 $45^\circ$ 、 $20^\circ$ 夹角做一条直线,通过计算得出分支井眼钻进时到达

不同深度各点所需要的井段长短、离主井眼的距离、方位变化值及造斜率值,分析其钻进的可行性(见表2)。

表2 不同直线夹角条件下钻进可行性分析

直线 夹角 $/ (^\circ)$	离侧钻 点直线 距离/m	离主井 眼垂直 距离/m	井眼 长度 /m	方位角 变化 $/ (^\circ)$	造斜率 $/ [(^\circ) \cdot 100 \text{ m}^{-1}]$	可 行 性
45	50	35.36	55.54	90	162.06	极小
	100	70.71	111.07	90	81.03	很小
	150	106.07	166.61	90	54.02	很小
	200	141.42	222.14	90	40.51	小
	250	176.78	277.68	90	32.41	小
	300	212.13	333.22	90	27.01	可行
20	50	17.10	51.03	90~50	78.40	小
	100	34.20	102.06	90~50	39.19	可行
	150	51.30	153.09	90~50	26.13	可行
	200	68.40	204.12	90~50	19.60	可行
	250	85.51	255.15	90~50	15.68	可行

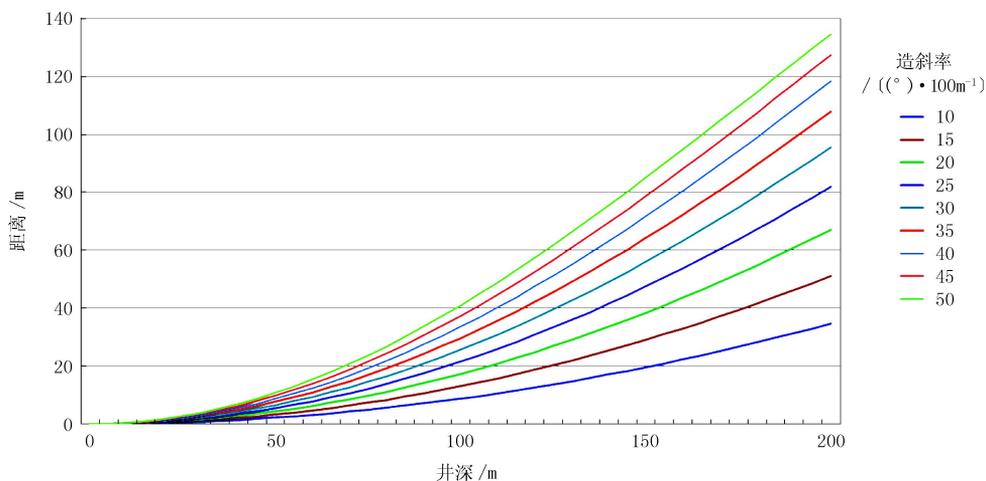


图 6 不同造斜率下分支井眼与主井眼距离随井深的变化趋势

从表 2 可以看出,鉴于目前现场施工所用单弯动力钻具造斜能力的限制,要满足分支井眼与主井眼成  $45^\circ$  直线夹角的要求,只有在离侧钻点直线距离达 200 m 以上时,才具备施工的可行性,而按正常水平井的施工,水平井水平段造斜率不宜太高,应控制在  $30^\circ/100\text{ m}$  以下,这样才有利于水平段井眼轨迹的有效控制。对于分支井眼与主井眼直线夹角  $20^\circ$  条件下,在目前钻井能力控制范围内,分支井眼长度要达到 150 m,甚至更长。

#### 4 结论

(1) 利用乘法来求不等式解约束下的轨道优化问题,能够优化求出鱼骨状分支水平井全井眼轨道最优时的关键参数,也可以用于单一定向井的轨迹优化问题,为分支井井眼轨道优化设计提供了解决方法。

(2) 随着井深、造斜率的增加,分支井眼与主井眼的直线夹角呈正比关系,且分支井眼偏离主井眼的距离是逐渐增大的;在一定直线夹角情况下,造斜率与井深则呈反比关系,即造斜率越高,所需要的分支井井段越短,造斜率越低,所需要的分支井井段越长。

(3) 根据分支井眼与主井眼直线夹角不同条件

下可钻性的分析,考虑现场造斜工具的技术水平,在进行分支井眼设计时不宜采用过高的造斜率,控制在  $30^\circ/100\text{ m}$  以下较为合适,并且设计一定距离的造斜段,满足地质设计和现场施工的要求。

#### 参考文献:

- [1] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458.
- [2] 席长丰,吴晓东,王新海.多分支井注气开发煤层气模型[J].煤炭学报,2007,32(4):402-406.
- [3] 张云连,王正湖,唐志军,等.多底井、分支井工程设计原则及方法[J].石油钻探技术,2000,28(2):4-6.
- [4] 李维,李黔,李生林.鱼骨型分支井井眼轨迹设计方法[J].天然气技术,2009,3(3):45-48.
- [5] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].山东东营:中国石油大学出版社,2007.
- [6] S. Kikuchi. 2-D and 3-D well planning for horizontal wells[J]. SPE,25647.
- [7] Surak Yeten. Optimization of nonconventional well type, location and trajectory[J]. SPE,77565.
- [8] Brister. The optimum junction depth for multilateral well [J]. SPE,64699.
- [9] 刘想平,张兆顺,崔桂香,等.鱼骨型多分支井向井流动态关系[J].石油学报,1998,19(4):69-72.
- [10] 范玉平,韩国庆,杨长春.鱼骨井产能预测及分支井形态优化[J].石油学报,2006,27(4):101-104.
- [11] 解可新,韩立兴,林友联.最优化方法[M].天津:天津大学出版社,2002.

### 中石油煤层气勘探开发提速

国土资源网消息(2011-03-23) 近日,据中国石油天然气集团公司有关负责人介绍,“十二五”期间,中石油对煤层气的勘探开发将全面提速,到2015年达到40亿立方米的规模。2010年中石油煤层气业务新增探明储量首次突破

1000亿立方米,并已经形成了13亿立方米的产能规模。在页岩气方面,2010年中国石油启动了四川、云南等页岩气产业化示范区建设工作。