

文章编号: 0253-2697(2008)01-0104-05

# 水平井蒸汽吞吐加热半径和地层参数计算模型

刘春泽<sup>1,2</sup> 程林松<sup>2</sup> 刘洋<sup>3</sup> 庞占喜<sup>2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油大学石油天然气工程学院 北京 102249;  
3. 中国石油天然气勘探开发公司 北京 100034)

**摘要:** 蒸汽吞吐水平井加热半径和焖井后地层温度和压力的计算是水平井产能评价和动态预测的基础。由于蒸汽沿着水平段流动有摩擦损失,因而蒸汽的压力、温度和干度沿着水平段的分布是不均匀的。根据水平井变质量流和传热学原理,基于质量守恒、动量定理和能量守恒及镜像反映和势叠加原理,建立了水平井蒸汽吞吐加热半径和焖井后温度压力计算模型。以某油藏参数为基础,对该模型计算结果与数值模拟结果进行的比较发现,二者基本吻合,从而验证了模型的正确性。

**关键词:** 水平井; 蒸汽吞吐; 加热半径; 地层温度; 地层压力; 计算模型

中图分类号: TE319

文献标识码: A

## Calculating models for heating radius of cyclic steam stimulation and formation parameters in horizontal well after soaking

LIU Chunze<sup>1,2</sup> CHENG Linsong<sup>2</sup> LIU Yang<sup>3</sup> PANG Zhanxi<sup>2</sup>

(1. Petrochina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China)

**Abstract:** The calculations of heating radius and the pressure and temperature of formation in horizontal well during cyclic steam stimulation after soaking are the bases for the evaluation of productivity and forecast of dynamic performance of horizontal well. The distribution of steam pressure, temperature and quality along the horizontal sections of wellbore are uneven, because of friction loss of steam. The new calculation models for heating radius and distribution of pressure and temperature in horizontal well after soaking were established on the basis of the variable-mass flow theory and the principle of heat conduction by the use of mass conservation theorem, momentum theorem and energy conservation theorem. The calculation result of the new model is in good agreement with that of the numerical simulation for the same parameters from the same reservoir.

**Key words:** horizontal well; cyclic steam stimulation; heating radius; formation temperature; formation pressure; calculation model

目前计算水平井加热半径最常用的方法是用直井的加热模式进行转换<sup>[1]</sup>,沿用直井的计算参数进行改进<sup>[2]</sup>,而不是从水平井的加热机理出发。由于蒸汽沿着水平段流动有摩擦损失,蒸汽的压力越来越小,因此蒸汽沿着水平段不是均匀地进入油层。随着蒸汽不断地被注入油层,蒸汽沿着水平段的质量流量变得越来越小;同时沿着水平段注入油层的蒸汽也越来越少,而且蒸汽不断给油层传递热量,蒸汽沿着水平段流动的干度也越来越小。沿着水平段注入油层中蒸汽的质量流量、温度、干度的变化,使油层中沿水平段方向的速度、压力也不是均匀分布,因此有必要对水平井的加热过程进行研究,重新计算其加热半径和焖井后地层的压力、温度。

## 1 水平井蒸汽吞吐加热模型

基本假设: ①饱和蒸汽注入油层后全部变成热水; ②油层均质,注入流体在油层中沿水平井进行径向一维流动; ③在油层中,垂直水平段方向的热传导系数为无限大,而平行水平段方向的热传导系数为零; ④假定油砂在加热范围内处于蒸汽温度下,而在加热范围外处于原始油层温度; ⑤岩石和流体的物性为常量; ⑥水平段均匀分成  $N$  个微元段,在同一个微元段上蒸汽被均匀注入油层,而每个微元段的注汽量  $q_i$  不等,与蒸汽压力有关。

### 1.1 饱和蒸汽沿水平段的注入方程

对于上、下边界封闭及四周无限大油藏中间的一

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50276040)“稠油热力泡沫复合驱的耦合作用和耦合模型”资助。

作者简介: 刘春泽,女,1978年4月生,2007年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油勘探开发研究院热采所工程师,主要从事油气田开发研究工作。E-mail: liuchunze@126.com

口水平注汽井, 根据油层中渗流与水平井筒内流动耦合的流入动态模型<sup>[3]</sup>的研究思想, 并对其方程进行修改后得到考虑水平井筒内饱和蒸汽变质量流且流动遵循达西定律的单相液体由水平井筒注入油藏内的注入方程为

$$Aq = -B$$

$$q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_N)^T \quad (1)$$

式中:  $A$  为与各点间的距离有关的系数矩阵;  $-B$  为与压力有关的矩阵;  $q_i$  为各微元段的注汽量,  $m^3/h$ ;  $q$  为各微元段注汽量组成的列矩阵。

### 1.2 质量流量与体积分量的转换关系

转换关系式为

$$q_i = i_{si} \cdot (1 - x_i) / \rho + i_{si} \cdot x_i / \rho_g \quad (2)$$

式中:  $i_{si}$  为微元段  $i$  蒸汽质量流速,  $kg/s$ ;  $\rho_g$  为水蒸汽中蒸汽的密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho$  为水蒸汽中热水的密度,  $kg/m^3$ ;  $x_i$  为蒸汽干度。

### 1.3 微元段加热半径的计算方程

当蒸汽未到达上下封闭边界时, 水平微元段沿着径向的加热面积如图 1 所示。

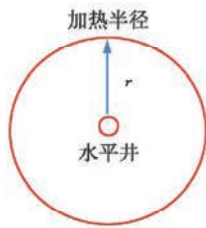


图 1 蒸汽未到达顶底层加热面积

Fig. 1 Heating area before steam arriving at boundary

根据能量守恒方程:

$$i_{si} h_{oi} = 2\pi M_R dl (T_{si} - T_r) r_i dr_i / d\tau$$

对上式两边积分得

$$r_i = \sqrt{\frac{i_{si}(x_i l_v + h_{wi} - h_{rwi})}{\pi M_R dl (T_{si} - T_r)}} t \quad (3)$$

式中:  $h_{oi}$  为单位质量流体可利用的热量,  $kJ/kg$ ;  $i_{si}$  为微元段油层的质量吸汽量,  $kg/s$ ;  $M_R$  为油层热容量,  $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ;  $r_i$  为加热半径,  $m$ ;  $dl$  为微元段长度,  $m$ ;  $t$  为蒸汽加热时间,  $s$ ;  $T_{si}$  为饱和蒸汽温度,  $^\circ C$ ;  $T_r$  为原始油层温度,  $^\circ C$ ;  $h_{rwi}$  为油藏温度下热水的焓,  $kJ/kg$ ;  $h_{wi}$  为水蒸汽中热水的焓,  $kJ/kg$ ;  $l_v$  为汽化潜热,  $kJ/kg$ 。

当蒸汽同时到达上下封闭边界时, 水平微元段沿着径向的加热面积如图 2 所示。

由式(3)知, 当  $r_i = d$  时

$$\tau_{cd} = d^2 / \left\{ i_{si}(x_i l_v + h_{wi} - h_{rwi}) / [\pi M_R dl (T_{si} - T_r)] \right\}$$

当  $t > \tau_{cd}$  时, 由能量守恒得

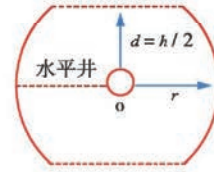


图 2 蒸汽到达顶底层后加热面积

Fig. 2 Heating area after steam arriving at boundary

$$\int_{\tau_{cd}}^i i_{si} h_{oi} d\tau = \int_d^i M_R dl \Delta T_i [2\pi r_i - 4r_i \arccos(d/r_i)] dr_i + 2 \int_{\tau_{cd}}^i \int_d^i \left\{ \lambda \Delta T_i [\pi \alpha (\tau - \tau_{cd})]^{-\frac{1}{2}} 2r_i dr_i dl (r_i^2 - d^2)^{-\frac{1}{2}} \right\} d\tau \quad (4)$$

式中:  $d$  为油层厚度的一半,  $m$ ;  $\tau_{cd}$  为蒸汽到达上下顶底盖层的临界时间,  $s$ ;  $\lambda$  为顶底界面的导热系数,  $kJ/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$ ;  $\alpha$  为顶底界面的热扩散系数,  $m^2/h$ 。

式(4)中等号左边的项表示在  $t$  时间内微元段油层总共吸收的热量, 等号右边的第一项表示油层因升温吸收的热量, 而第二项表示蒸汽推进到达之处顶底盖层的散热量。

上述方程式(1)至式(4), 再结合水平井筒内水平段质量守恒方程、压降方程<sup>[4-5]</sup>、能量守恒方程<sup>[6-7]</sup>、饱和蒸汽温度与压力关系方程<sup>[7]</sup>, 就构成了求解饱和蒸汽沿水平微元段注入油层的加热半径计算模型。模型中水蒸汽物性参数及摩擦系数的计算参考 Beggs-Brill<sup>[8]</sup>气液两相流中计算方法。

### 1.4 微元段加热区的温度 $\bar{T}_i$

根据加热半径到达的范围分以下两种情况考虑, 对文献[9]中的计算进行修改为:

焖井结束时, 加热范围到达顶、底层前

$$\bar{T}_i = T_r + (T_{Ai} - T_r) \bar{V}_{ri} \quad (5)$$

$$T_{Ai} = \frac{G_i (C_w T_{si} + x_i l_v) + \pi r_i^2 dl M_R T_r}{G_i C_w + \pi r_i^2 dl M_R}$$

加热范围到达顶、底层后

$$\bar{T}_i = T_r + (T_{Ai} - T_r) \bar{V}_{ri} \bar{V}_{zi} \quad (6)$$

$$T_{Ai} = \frac{G_i (C_w T_{si} E_h + x_i l_v E_h) + \pi r_i^2 dl M_R T_r}{G_i C_w E_h + \pi r_i^2 dl M_R}$$

式中:  $G_i$  为累计蒸汽注入量(地面水当量),  $m^3$ ;  $C_w$  为水的热容量,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $E_h$  为考虑盖层和底层热损失后的热效率, 无因次;  $\bar{V}_{ri}$  为径向热损失导致加热区温度下降的影响因子;  $\bar{V}_{zi}$  为顶底层热损失导致加热区温度下降的影响因子。

### 1.5 焖井结束时微元段加热区的压力 $\bar{p}_i$

对于超稠油油藏, 在原始地层温度、压力下, 原油不流动; 初始状况下水为束缚水饱和度, 也不流动。因此, 在未加热区油水都不流动, 加热区的边界如同封闭

边界。注入蒸汽以及生产后, 压力波将仅波及到加热区。因此, 对文献[9]中储量等参数进行修改后可得到:

$$\bar{p}_i = p_c + \frac{G_i B_{wi}}{N_{ohi} B_{oi} C_c} + \frac{(\bar{T}_i - T_r) \beta_c}{C_c} \quad (7)$$

式中:  $p_c$  为原始地层压力, MPa;  $C_c$  为综合压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\beta_c$  为热膨胀系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $B_{oi}$ 、 $B_{wi}$  为在  $\bar{p}_i$  和  $\bar{T}_i$  下的油、水体积系数;  $N_{ohi}$  为地质储量和加热区内地质储量,  $\text{m}^3$ 。

## 2 数学模型的求解

计算步骤如下:

(1) 以水平段跟端为起点, 以  $\Delta l$  为步长, 假设  $\Delta l$  内的注汽量为  $i_{isl}$ , 蒸汽干度变化为  $\Delta x$ , 蒸汽压力变化为  $\Delta p$ 。

(2) 计算水和水蒸汽的物性参数和运动参数, 计算摩擦力及其做功、微元段向井筒传递的热量。

(3) 根据水平井筒内压降方程求  $\Delta l$  内水蒸汽的压力变化  $dp$ , 根据饱和蒸汽温度与压力方程求蒸汽温度  $T$ ; 根据能量守恒方程求蒸汽干度变化  $dx$ , 根据式(1)和式(2)求微元段的注汽量  $i_{isl}$ 。

(4) 判断微元段内  $|i_{isl} - i_{isi}| < \varepsilon$ ,  $|dx - \Delta x| < \varepsilon$  和  $|\Delta p - dp| < \varepsilon$  是否成立, 若不成立, 则令  $i_{isl} = i_{isi}$  和  $\Delta x = dx$ ,  $\Delta p = dp$  并转向步骤(2)。

(5) 根据式(3)或式(4)求微元段的加热半径, 根据式(5)或式(6)求焖井结束加热区温度, 根据式(7)求焖井结束热区压力。

## 3 计算结果

以某油藏参数为基础(油藏、流体和水平井基本参数见表1、表2和表3), 应用CMG数值模拟软件模拟

表 1 地下原油黏度与温度的关系  
Table 1 The relation of viscosity-temperature under reservoir condition

温度/ $^\circ\text{C}$	黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$
50	50 000
80	4 742
110	490
150	80
200	16
300	4

表 2 油与水相对渗透率关系

Table 2 The relation of water/oil relative permeability

饱和度/ $S_w$	水相相对渗透率	油相相对渗透率
0.26	0	1.00
0.35	0.003 5	0.73
0.43	0.010 8	0.57
0.46	0.020 9	0.42
0.50	0.033 5	0.35
0.53	0.048 0	0.27
0.57	0.064 0	0.18
0.60	0.080 0	0.10

一口水平井蒸汽吞吐生产情况, 在数值模拟输出结果文件中, 将焖井结束时间, 沿水平井方向的垂直水平井的每列网格点对应平均注入量和沿水平井方向的加热范围内每列网格点对应的平均温度、平均压力值导出, 根据公式

$$Q = \pi r^2 \Delta l \times \phi (1 - S_{or} - S_{wr})$$

求出每列网格点对应的平均加热半径, 作出二维曲线图。

将应用该模型的计算结果与 CMG 数值模拟的计算结果进行的对比如图 3 至图 6 所示。

表 3 油藏参数、水平井参数和流体物性参数

Table 3 Parameters of reservoir, horizontal well and fluid

油藏参数	参数值	水平井参数	参数值	流体物性参数	参数值
油层厚度/m	60.0	水平段长度/m	300.0	水的比热/[ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ]	4.2
油层温度/ $^\circ\text{C}$	45.0	水平微元段长度/m	30.0	水的热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	0.000 006
油层压力/MPa	11.97	水平井筒半径/m	0.11	水的压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	0.000 5
水平渗透率/ $\mu\text{m}^2$	1.9	水平井筒表皮系数	-2.5	水的体积系数	1.01
垂向渗透率/ $\mu\text{m}^2$	1.14	水蒸汽跟端压力/MPa	14.245	油的比热/[ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ]	2.1
含水饱和度/%	36.0	水蒸汽跟端温度/ $^\circ\text{C}$	334.35	油的热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	0.000 01
含油饱和度/%	64.0	水蒸汽跟端干度/%	45.0	油的压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	0.000 7
油层热容量/[ $\text{kJ}\cdot(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ]	2347.0	水蒸汽质量流量/( $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ )	15.0	油的体积系数	1.05
顶底层热扩散系数/( $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )	0.0045	注汽时间/d	14.0	地层原油的密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	976.0
顶底层导热系数/[ $\text{kJ}\cdot(\text{h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ]	6.229	焖井时间/d	3.0	水平井离顶的距离/m	30.0
地层孔隙压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	0.00735	生产时间/d	120.0	油层孔隙度/%	30.0

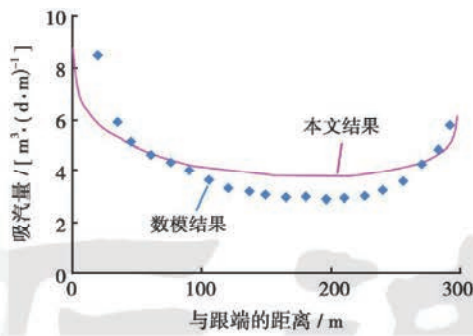


图3 第一周期蒸汽沿着水平段吸汽量分布

Fig. 3 Steam distribution along horizontal section in the first cycle

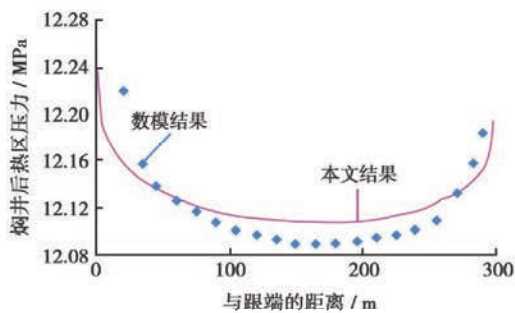


图5 第一周期焖井热区压力沿着水平段分布

Fig. 5 Pressure distribution after soaking along horizontal section in the first cycle

由图3至图6可看出,该模型和油藏数值模拟方法的计算结果基本相近,从而可以验证模型的可靠性,而且应用本文模型计算简洁、方便。

由图3和图4可知,由于蒸汽压力和干度沿着水平段是逐步降低的,因此蒸汽注入量和所含热能沿着水平段也是逐渐降低的,而注汽量到指端附近又有所上升,这是因为在端部蒸汽注入油层的方式与其他部位不同,因此蒸汽沿着水平段的加热半径也是先越来越小,到指端又有所上升。又由于第1周期油层处于原始状态下,没有余热,地层压力很大,原油的粘度很大,几乎不流动,因此注汽量少,水平段加热半径很小。

由图5和图6可知,焖井后热区地层压力、温度的分布是不均匀的,而是与注汽量和蒸汽温度、压力和干度有关。

## 4 结论

(1) 建立的蒸汽压力、干度和注汽量沿水平段分布的数学模型反映了蒸汽压力、干度和注汽量沿水平段的实际分布特征;降低的幅度与蒸汽在水平段跟端的物性参数及注入速度有关。

(2) 水平段加热半径模型反映了注入蒸汽在油层中的分布特征和加热过程;其大小取决于注汽速度、注

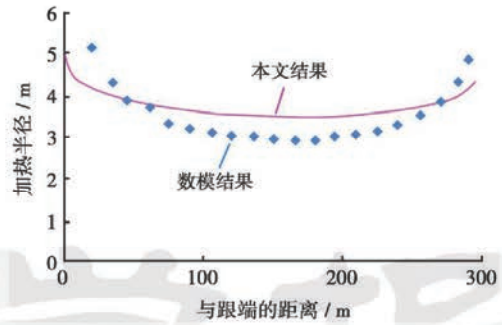


图4 第一周期加热半径沿水平段分布

Fig. 4 Heating radius distribution along horizontal section in the first cycle

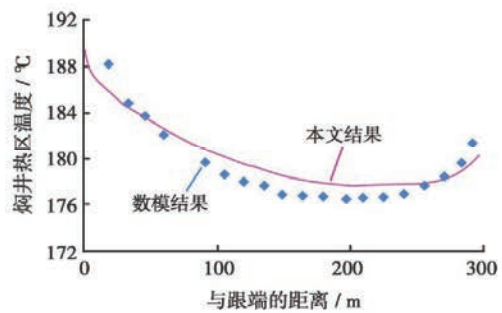


图6 第一周期焖井热区温度沿着水平段分布

Fig. 6 Temperature distribution after soaking along horizontal section in the first cycle

汽干度、注汽压力、注汽温度、油层热容量、油层厚度等。

(3) 注汽后热区温度和压力分布模型反映了注汽后热区温度和压力沿水平段呈不均匀分布的特征,这将对蒸汽吞吐水平井产能研究有重大意义。

(4) 新模型计算结果与油藏数值模拟结果相近。

## 参考文献

- [1] 张明禄,刘洪波,程林松,等.稠油油藏水平井热采非等温流入动态模型[J].石油学报,2004,25(4):62-66.  
Zhang Minglu, Liu Hongbo, Cheng Linsong, et al. Non isothermal inflow performance model for horizontal well in heavy oil reservoir with thermal recovery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25 (4): 62-66.
- [2] 刘想平,郭呈柱,蒋志祥,等.油层中渗流与水平井筒内流动的耦合模型[J].石油学报,1999,20(3):82-86.  
Liu Xiangping, Guo Chengzhu, Jiang Zhixiang, et al. The model coupling fluid flow in the reservoir with flow in the horizontal wellbore [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(3): 82-86.
- [3] 刘想平,张兆顺,刘翔鹏,等.水平井筒内与渗流耦合的流动压降计算模型[J].西南石油学院学报,2000,22(2):36-40.  
Liu Xiangping, Zhang Zhaoshun, Liu Xiang' e, et al. A model to calculate pressure drops of horizontal wellbore variable mass flow coupled with flow in a reservoir [J]. Journal of Southwest Petrole-

um Institute, 2000, 22(2): 36-40.

[4] 李保柱, 宋文杰, 纪淑红, 等. 水平井水平段压力分布研究[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 97-100.  
Li Baozhu, Song Wenjie, Ji Shuhong, et al. Pressure distribution behavior of horizontal section in horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 97-100.

[5] 杨德伟, 黄善波, 马冬岚, 等. 注蒸汽井井筒两相流动模型的选择[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23(2): 44-46.  
Yang Dewei, Huang Shanbo, Ma Donglan, et al. Selection of models for two phase flow in the steam injection well[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1999, 23(2): 44-46.

[6] 倪学锋, 程林松, 李春兰, 等. 注蒸汽井井筒内参数计算新模型[J]. 计算物理, 2005, 22(3): 251-255.  
Ni Xuefeng, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. A new model for the steam properties in steam injection wells[J]. Chinese Journal of Computation Physics, 2005, 22(3): 251-255.

[7] Beggs H D, Brill J P. A study of two-phase flow in inclined pipes[J]. JPT, 1973, (5): 607-617.

[8] 倪学锋, 程林松. 水平井蒸汽吞吐热采过程中水平段加热范围计算模型[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 108-112.  
Ni Xuefeng, Cheng Linsong. Calculating models for heating area of horizontal wellbore in steam stimulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 108-112.

[9] 陈月明. 注蒸汽热力采油[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 64-83.  
Chen Yueming. Steam injection and thermal production[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1996: 64-83.

(收稿日期 2007-04-20 改回日期 2007-03-19 编辑 孟伟铭)

### 《石油学报》2008 年第 2 期部分文章预告

塔里木盆地“多元复合—过程叠加”成藏模式及其应用 .....	庞雄奇等
西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏 .....	李亚林等
中国东部第三系典型断陷盆地幕式构造旋回及层序地层特征 .....	严德天等
鲁西隆起与济阳拗陷箕状断陷形成时代研究 .....	王振兰等
我国东部油田红层沉积特征与油气成藏规律 .....	韦启新等
准噶尔盆地腹部超压层分布与油气成藏的关系 .....	杨智等
惠民凹陷沙一段湖相碳酸盐岩层序地层分析 .....	孙钰等
磨溪气田嘉二段陆表海型台地内沉积微相研究 .....	谭秀成等
塔中地区志留系柯坪塔格组沉积特征与油气分布 .....	赵文光等
鄂尔多斯盆地南部长 6 和长 7 油层浊流事件的沉积特征及发育模式 .....	赵俊兴等
支持向量机在多地质因素分析中的应用 .....	石广仁
鄂尔多斯盆地伊陕斜坡山 2 段包裹体古流体压力分布及演化 .....	刘建章等
高煤价与低煤阶煤层气藏物性差异及其成因 .....	陈振宏等
塔里木盆地海相原油及其沥青质裂解生气动力学模拟研究 .....	王铜山等
基于地震资料的储层流体识别 .....	李景叶等
特低渗透油藏 CO <sub>2</sub> 驱油多相渗流理论模型研究及应用 .....	程杰成等
高分辨率层序地层学在油田深度开发中的应用 .....	孙致学等
聚合物驱全过程调剖技术的矿场应用 .....	孔柏岭等
低渗透含水气藏储层评价参数研究 .....	杨正明等
低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法 .....	计秉玉等
断裂(裂缝)面的开启及闭合压力实验研究 .....	周文等
油气田开发产能建设项目的收益—风险目标优化模型 .....	李丰等
利用遗传算法进行水平井水平段长度优化设计 .....	柳毓松等
三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究 .....	祝效华等
旋转导向钻井工具稳定平台控制功能试验研究 .....	汤楠等
射流式井底增压器水力参数理论模型研究 .....	汪志明等
岩性突变对水力裂缝延伸影响的实验研究 .....	金衍等
水平定向钻技术在管道穿越工程中的理论研究 .....	闫相祯等
基于 EMD 的管道预警系统信号多尺度混沌特性分析方法 .....	曲志刚等
超正压射孔动态模拟数学模型 .....	李海涛等
热油输送管道泄漏点定位算法的改进 .....	柳战良等