

气田开发

含水低渗气藏低速非达西渗流 数学模型及产能方程研究

朱维耀¹, 宋洪庆¹, 何东博², 王 明¹, 贾爱林², 胡永乐²

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:在低速非达西渗流实验研究基础上,对含水低渗气藏气体流动特性进行了分析,并建立了含可动水、不动水和束缚水影响下的3类低速非达西渗流数学模型,推导出了气体滑脱效应和启动压力梯度分别存在和同时存在条件下的系列气井产能公式。通过实例计算证明数学模型符合现场实际,气井产能公式可为确定不同含水条件下低渗气藏气井合理的产能提供必要的理论依据。

关键词:含水低渗气藏;低速非达西渗流;启动压力梯度;滑脱效应;数学模型;气井产能

中图分类号:TE312

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2008)05-0685-05

0 引言

含水低渗气藏是一种特殊的气藏类型,其在我国分布广泛,如目前已投入开发中的广安气田须家河气藏等。在含水低渗气藏的实际开发中,生产特征反映出气体渗流具有类似的启动压力现象,表现为低速非达西渗流。那么,气体渗流过程中存在启动压力梯度的条件和因素是什么?滑脱作用如何?含水低渗气藏的气—水分布规律和流体渗流规律是什么?这些是目前我们亟待认识的问题。从现有研究成果来看,国内外部分学者考虑了滑脱效应对低渗气藏气体高速流动的影响,也有学者考虑启动压力梯度的影响^[1-4],但是他们都没有指出什么条件下存在滑脱效应,什么条件下存在启动压力梯度,也没有给出其完整的条件关系和系统完备的渗流数学模型。

因此,笔者针对上述问题,对含水低渗气藏低速非达西流动特性进行分析,建立了3类低渗气藏低速非达西渗流数学模型,推导出适合含水低渗气藏不同条件下的气井产能预测公式。

1 含水低渗透气藏渗流模型

1.1 物理本质和概念模型

对于含水低渗透气藏来说,孔隙喉道狭窄,孔隙连通性差,孔隙表面水膜的运移和喉道处水膜水的

变形、堵塞是产生气体阀压效应(即启动压力)的本质原因,而气体滑脱效应产生的本质原因则是毛细管壁处气体分子的滑流以及毛细管内部气体分子扩散的综合效应。因此,气体流动时滑脱效应和启动压力哪一个占主导地位,主要取决于地层水在孔隙喉道处是否会形成堵塞而阻碍气体流动,以及气体流动时的压力梯度是否会造成水膜水的变形或运移。

早在1941年Klinkenberg就提出气体在不含束缚水的多孔介质中单相渗流时存在滑脱效应^[5]。1948年Rose通过含水情况下的渗流实验研究,指出砂岩岩心气体滑脱效应随着含水饱和度的增加而降低^[6]。1956年Estes和Rushing等的研究也得到同样结论^[7-8]。而启动压力梯度的概念最早是1951年苏联B. A. 弗洛林在研究致密泥岩和硬粘土中的渗流问题时提出来的^[5]。1986年冯文光^[9]教授最早提出了类似于低渗透油藏低速非达西渗流规律的气体低速非达西渗流的观点。近几年国内外学者主要对含水低渗气体低速非达西渗流进行了大量的室内实验研究:吴凡等^[10]认为气体低速流动时的滑脱效应是有条件的,更低速条件下具有启动压力现象。刘晓旭、李宁等^[11]做了大量的室内实验,发现气体渗流受渗透率和含水饱和度的控制。在干燥和低含

水饱和度下,渗透率越小,气体渗流受滑脱效应的影响越明显;随含水饱和度的增加,滑脱动力影响变小,毛细管力影响变大。贺伟等^[12]开展了实际低渗透岩样特殊渗流实验,认识到含水状态下岩样渗流偏离达西定律的现象可以用“启动压差”和“临界压力梯度”2个参数来描述。依呷等^[13]通过一系列实验得出气藏束缚水饱和度低于20%时,不存在启动压力梯度的结论。而任晓娟^[14],李皋^[15],贺伟等^[12]众多学者通过实验发现含水饱和度大于30%时,启动压力梯度影响更加明显。

通过上述前人的研究,总结发现干燥低渗气藏气体单相渗流明显受滑脱效应的影响,不存在启动压力梯度;而在低渗透气藏含有束缚水和自由水时,气体渗流受滑脱效应和启动压力梯度的共同影响。可适当参考前人实验条件下的临界含水饱和度值(0.3),含水饱和度值大于临界含水饱和度时启动压力影响更加明显,且启动压力梯度的大小与含水饱和度呈幂指数关系。因此可将含水低渗气藏分为3类气体非达西渗流:

I类:可动水影响($S_w = S_d + S_{nd}$),视为气—水两相连续流动区。该区含水饱和度较大,启动压力梯度影响明显,且含可动自由水,即压力梯度既能达到气相启动压力梯度,也能达到液相启动压力梯度。

II类:不动水影响($S_w = S_{nd}$),视为低压状态下气体连续流动区。其中不动水饱和度(S_{nd})既包含了束缚水饱和度(S_{wi})也包含了约束自由水饱和度(S_{fc}),即 $S_{nd} = S_{wi} + S_{fc}$,这部分约束自由水存在启动压力梯度,在低压状态下轻易不动用,因此该区既要考虑滑脱效应也要考虑启动压力梯度对低渗砂岩气藏开采的影响。

III类:束缚水影响($S_w = S_{wi}$),视为低渗砂岩气藏单相气体流动区。该区束缚水占据一定的孔隙,但不气体流动形成阻力,主要考虑滑脱效应对气藏开采的影响。

1.2 可动水影响下气—水两相流动区(I类)

1.2.1 连续性方程

根据物质守恒定律,质量守恒方程为

$$\text{气相} \quad -\nabla \cdot (\rho_g V_g) + q_g = \frac{\partial(\phi \rho_g S_g)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{K \left[1 + \frac{\alpha}{\bar{p}} \left(\frac{K}{1 - S_{wi}} \right)^{-\beta} \right]}{B_g \mu_g} (\nabla p_g - g \rho_g \nabla D - \lambda \cdot S_{nd}^m) \right\} + \frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial[\phi(1 - S_{nd})]}{\partial t} \quad (11)$$

1.4 束缚水影响下气体单相流动区(III类)

该区主要受束缚水饱和度的影响,由于不存在

$$\text{水相} \quad -\nabla \cdot (\rho_w V_w) + q_w = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial t} \quad (2)$$

1.2.2 运动方程

在运动方程中,气相和液相只考虑启动压力梯度的影响即可,方程表示为:

$$\text{气相} \quad V_g = -\frac{KK_{rg}}{\mu_g} (\nabla p_g - g \rho_g \nabla D - \lambda_g) \quad (3)$$

$$\text{水相} \quad V_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w} (\nabla p_w - g \rho_w \nabla D - \lambda_w) \quad (4)$$

1.2.3 气、水两相渗流微分方程

将运动方程式(3)、式(4)和密度项处理分别代入式(1)和式(2),转化为地面标准状况下的物质守恒方程。综上所述I类基本微分控制方程为:

$$\text{气相} \quad \nabla \cdot \left[\frac{KK_{rg}}{B_g \mu_g} (\nabla p_g - g \rho_g \nabla D - \lambda_g) \right] + \frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial(\phi S_g)}{\partial t} \quad (5)$$

$$\text{水相} \quad \nabla \cdot \left[\frac{KK_{rw}}{B_w \mu_w} (\nabla p_w - g \rho_w \nabla D - \lambda_w) \right] + \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial(\phi S_w)}{\partial t} \quad (6)$$

上述的式(5)和式(6)是低渗透砂岩气藏考虑滑脱效应和启动压力梯度的非达西数学模型的渗流微分控制方程。

1.2.4 特殊辅助方程

$$\text{饱和度方程} \quad S_w + S_g = 1 \quad (7)$$

两相流动时液相启动压力梯度

$$\lambda_w = \lambda_w(K, S_w) \quad (8)$$

两相流动时气相启动压力梯度

$$\lambda_g = \lambda_w S_w^m \quad (9)$$

1.3 不动水影响下气体单相流动区(II类)

该区含水饱和度既包含束缚水饱和度也包含约束自由水饱和度,因为存在约束自由水,所以气体流动时存在启动压力梯度,同时也存在滑脱效应。

气体质量守恒方程同式(1),而运动方程为

$$V_g = -\frac{K \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) K_{rg}}{\mu_g} (\nabla p_g - g \rho_g \nabla D - \lambda_g) \quad (10)$$

克氏系数表达式为 $b = \alpha \left(\frac{K}{1 - S_{wi}} \right)^{-\beta}$, 将式(8)、

式(9)、式(10)代入式(1)得II类控制方程为:

质量守恒方程同式(1),而运动方程为:

$$V_g = -\frac{K\left(1+\frac{b}{p}\right)}{\mu_g}(\nabla p_g - g\rho_g \nabla D) \quad (12)$$

$$\text{特殊辅助方程: } b = \frac{4c\lambda}{r} \bar{p} \quad (13)$$

将式(12)和式(13)代入式(1)得到Ⅲ类控制方程为:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[\frac{K\left(1+\frac{4c\lambda}{r}\right)}{B_g \mu_g}(\nabla p_g - g\rho_g \nabla D) \right] + \frac{q_g}{\rho_{gsc}} \\ = \frac{\partial[\phi(1-S_{nd})]}{\partial t} \end{aligned} \quad (14)$$

2 低速非达西渗流气井产能方程研究

若忽略上述渗流模型中重力的影响,则在流动稳态的假设前提下,可将各种情况气井产能公式推导如下:

2.1 气井稳态达西流动产能公式推导

由气体状态方程 $PV = nZRT$ 和方程 $V = M/\rho$ 得到: $\frac{R}{M} = \frac{P_{sc}}{\rho_{gsc} T_{sc} Z_{sc}}$ (通常 $Z_{sc} = 1$) (15)

$$V_{sc} = \frac{Z_{sc} R T_{sc}}{P_{sc}} \quad (16)$$

则气体在气藏中流动的质量通量为:

$$F = \rho_{gsc} V_{sc} = A \rho V = -2\pi r h \frac{PM}{RTZ} \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (17)$$

令 $m(p) = \int_{p_m}^p \frac{2p}{\mu Z} dp$, 其中 p_m 为任一参考压力

将该式两边同时对 r 微分得:

$$\frac{dm}{dr} = \frac{2p}{\mu Z} \frac{dp}{dr} \quad (18)$$

再将式(15)、式(16)、式(18)代入式(17)得到:

$$\frac{P_{sc} Q_{sc} T}{T_{sc}} \frac{dr}{r} = \pi K dm \quad (19)$$

将式(19)积分整理得:

$$\begin{aligned} Q_{sc} &= \frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi K h (m_e - m_f)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \\ &= \frac{T_{sc}}{P_{sc} T Z} \frac{\pi K h (p_e^2 - p_f^2)}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \end{aligned} \quad (20)$$

2.2 考虑启动压力梯度气井产能公式推导

已知考虑启动压力梯度的运动方程为 $v = -\frac{K}{\mu}$

$\left(\frac{dp}{dr} - \lambda_g\right)$ 。设函数 $\dot{p} = p - \lambda_g r$, 将该式两边微分得:

$\frac{dp}{dr} - \lambda_g = \frac{d\dot{p}}{dr}$, 则原非达西渗流方程变为 $v = -\frac{K}{\mu} \frac{d\dot{p}}{dr}$

(拟达西流动方程), 由前面所述方法得到含启动压力梯度的产能方程为:

$$Q_{sc} = \frac{T_{sc}}{P_{sc} T Z} \frac{\pi K h [(p_e - \lambda_g r_e)^2 - (p_f - \lambda_g r_w)^2]}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (21)$$

2.3 考虑滑脱效应气井产能公式推导

已知考虑滑脱效应的运动方程为 $v = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \left(1 + \frac{b}{p}\right)$, 则由上述方法得产能公式变为:

$$\begin{aligned} Q_{sc} &= \frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi K h (m_e - m_f) \left(1 + \frac{b}{p}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \\ &= \frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi K h (p_e^2 - p_f^2) \left(1 + \frac{b}{p}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \end{aligned} \quad (22)$$

2.4 同时考虑滑脱效应和启动压力梯度气井产能公式推导

已知既考虑滑脱效应又考虑启动压力梯度的运动方程为 $v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - \lambda_g\right) \left(1 + \frac{b}{p}\right)$, 则由上述方法得出的产能公式为:

$$\begin{aligned} Q_{sc} &= \frac{T_{sc}}{P_{sc} T Z} \\ &\frac{\pi K h [(p_e - \lambda_g r_e)^2 - (p_f - \lambda_g r_w)^2] \left(1 + \frac{b}{p}\right)}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \end{aligned} \quad (23)$$

3 实例计算分析

已知我国某含水低渗气藏单井, 气藏的基本参数为: 孔隙度 $\varphi = 0.05$; 标准状态温度 $T_{sc} = 293$ K; 渗透率 $K = 0.94 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 地层温度 $T = 395.6$ K; 含水饱和度 $S_w = 0.496$; 压缩因子 $Z = 0.89$; 粘度 $\mu = 0.027$ mPa·s; 泄压半径 $r_e = 800$ m; 边界压力 $p_e = 30.16$ MPa; 井筒半径 $r_w = 0.1$ m; 井底流压 $P_f = 21.25$ MPa; 气藏厚度 $h = 9.5$ m。

根据该井的含水条件, 选取只考虑启动压力梯度的产能模型计算产量为 $3.24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 该井实际测试日平均产量为 $3.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 误差仅为 3.7% 。若选用其它产能模型计算, 结果均远远大于实测值。由此可见, 有必要根据气藏的各种实际物性情况选取不同的产能公式进行测算。

根据推导出的系列产能公式计算的气井产量结果如图1、图2所示。

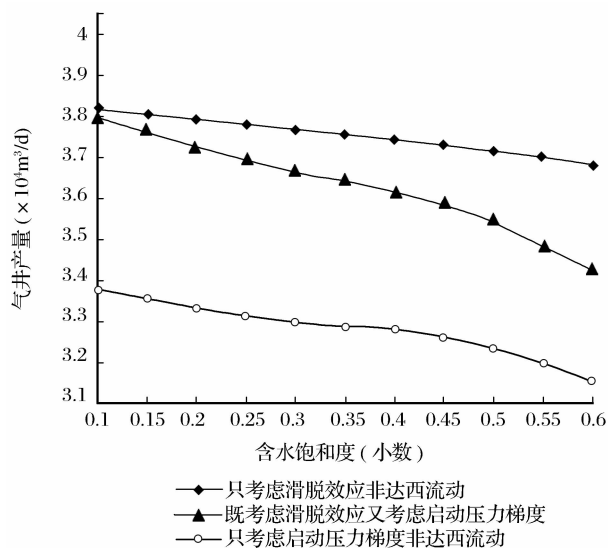


图1 不同流动情况下含水饱和度与气井产量的关系

由图1可知:随着含水饱和度的增加,3种情况下产量都在减小;当含水饱和度大于0.3以后,启动压力梯度的影响大于滑脱效应的影响,产量递减明显,含水饱和度大于0.4以后趋势更加明显。

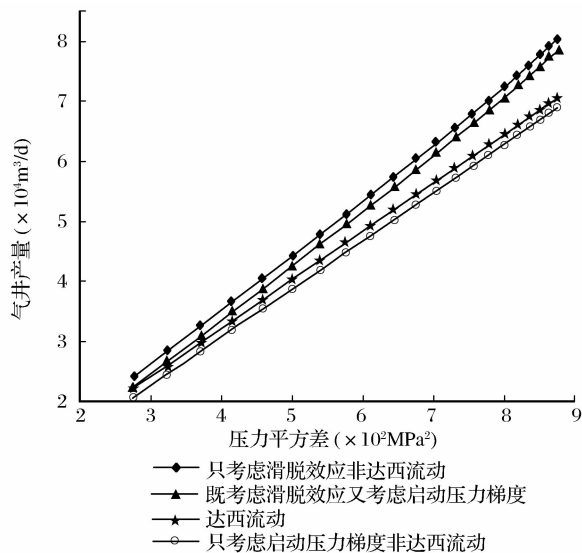


图2 不同流动情况下压力平方差与气井产量的关系

图2表明,无论哪种流动情况,气井产量与静压力平方差之间都具有相同的变化趋势。对应相同的井底流压和地层压力,只考虑滑脱效应时计算产量最大,只考虑启动压力梯度时计算产量最小;二者都考虑的情况下计算产量位于中间,亦大于常规达西流动时的产量。

4 结论

(1)含可动水、含不可动水和含束缚水流体流动物理本质的渗流数学模型反映了低渗气藏非达西流

动特性。通过考虑滑脱效应和启动压力梯度各自存在和同时存在情况下的低速非达西渗流理论模型,可以推导出滑脱效应和启动压力梯度各自存在和同时存在情况下低速非达西渗流系列产能公式。

(2)只考虑启动压力梯度影响时的气井产量要远小于启动压力梯度和滑脱效应同时存在时的气井产量。而无论采取哪种低速非达西气井产能公式预测的气井产能,都与采用常规达西方法预测的结果相差很多,因此在实际情况中要根据油藏特性采取不同的方法。

符号说明: ρ_g 为气相密度, kg/m^3 ; ρ_w 为液相的密度, kg/m^3 ; ρ_{gsc} 为标准状态下气相密度, kg/m^3 ; ρ_{wsc} 为标准状态下液相密度, kg/m^3 ; V_g 为气相的渗流速率, m/s ; V_w 为液相的渗流速率, m/s ; V_{sc} 为标准状态下气相渗流速率, m/s ; q_g 为标准状况下气相产量, m^3 ; q_w 为标准状况下液相产量, m^3 ; Q_{sc} 为标准状态下渗流流量, m^3 ; S_g 为含气饱和度, 小数; S_w 为含水饱和度, 小数; S_d 为可动水饱和度, 小数; S_{nd} 为不可动水饱和度, 小数; S_{fc} 为约束自由水饱和度, 小数; S_{wi} 为束缚水饱和度, 小数; p_g 为气相压力, MPa ; p_w 为液相压力, MPa ; \bar{p} 为地层平均压力, MPa ; p_e 为边界压力, MPa ; p_i 为井底流压, MPa ; P_{sc} 为标准状态下气相压强, MPa/m^2 ; K 为绝对渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{rg} 为气相相对渗透率, 小数; K_{rw} 为液相相对渗透率, 小数; μ_g 为气相的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_w 为液相的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ 为流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; λ_g 为两相流动时气相启动压力梯度, MPa/m ; λ_w 为两相流动时液相启动压力梯度, MPa/m ; B_g 为天然气的体积系数, 小数; B_w 为液相体积系数, 小数; T 为地层温度, K ; T_{sc} 为标准状态下温度, K ; Z_{sc} 为标准状态下压缩因子, 无量纲; r_e 为泄压半径, m ; r_w 为井筒半径, m ; h 为气层厚度, m ; D 为海拔深度, m ; λ 为气体分子平均自由程, m ; r 为孔喉平均半径, m ; c 为比例因子, 无量纲; b 为气体滑脱因子, MPa ; m, α, ρ 均为方程系数。

参考文献:

- [1] 严文德, 郭肖, 孙雷. 一个新的低渗透气藏气井产能预测公式[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 88-89.
- [2] 苗顺德, 吴英. 考虑气体滑脱效应的低渗透气藏非达西渗流数学模型[J]. 天然气勘探与开发, 2007, 30(3): 45-48.
- [3] 郝斐, 张公社, 程林松, 等. 携液气井产能方程研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 92-94.
- [4] 李治平, 王怡欣, 张喜亭. 低渗透气藏气井产能评价新方法[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 85-87.
- [5] 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982: 29-31.
- [6] Rose W D. Permeability and gas-slippage phenomena[R]// API. Drilling and Production Practice. 1948, (209).
- [7] Estes R K, Fulton P F. Gas slippage and permeability measurements[J]. Trans. AIME, 1956, (207): 338-342.
- [8] Rushing J A. Measurement of the Two-Phase Gas Slippage

- Phenomenon and Its Effect on Gas Relative Permeability in Tight Gas Sands[R]. SPE 84297.
- [9] 冯文光. 天然气非达西低速不稳定渗流[J]. 天然气工业, 1986,6(3):29-34.
- [10] 吴凡,孙黎娟,乔国安. 气体渗流特征及启动压力规律的研究[J]. 天然气工业,2001,21(1):82-84.
- [11] 刘晓旭,胡勇,李宁,等. 低渗砂岩气藏气体特殊渗流机理实验研究与分析[J]. 特种油气藏,2007,14(1):80-83.
- [12] 贺伟,冯曦,钟孚勋. 低渗储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨[J]. 天然气工业,2002,22(增刊):91-94.
- [13] 依呷,唐海,吕栋梁. 低渗气藏启动压力梯度研究与分析[J]. 海洋石油,2006,26(3):51-54.
- [14] 任晓娟,阎庆来,何秋轩,等. 低渗气层气体的渗流特征实验研究[J]. 西安石油学院学报,1997,12(3):22-25.
- [15] 李皋,唐洪明,孟英峰,等. 川西侏罗系蓬莱镇组浅层低渗气藏水锁损害研究[J]. 钻采工艺,2004,27(6):47-50.

Low-velocity Non-Darcy Gas Seepage Model and Productivity Equations of Low-permeability Water-bearing Gas Reservoirs

ZHU Wei-yao¹, SONG Hong-qing¹, HE Dong-bo², WANG Ming¹, JIA Ai-lin², HU Yong-le²

(1. *University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*)

Abstract: The flow behaviour of fluids in water-bearing gas reservoirs was analyzed based on the experimental study of low-velocity non-Darcy percolation. Three kinds of mathematical models were established under the influences of movable water, immovable water and combined water. Deliverability equations of gas well were obtained with the gas slippage effect and the threshold pressure gradient existed respectively and simultaneously. The case study proved that the study was applicable and the corresponding equations could provide a necessary theoretical basis for defining reasonable gas-well deliverability under different water conditions.

Key words: Water-bearing gas reservoir; Low-velocity non-Darcy percolation; Threshold pressure gradient; Slippage effect; Mathematical model; Gas well productivity.

(上接第 664 页)

- [7] 黄第藩,华阿新,王铁冠,等. 煤成油地球化学进展[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [8] 刘焕杰. 山西南部煤层气地质[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [9] Baskin D K. 利用干酪根 H /C 比评价烃源岩热成熟度与生烃潜力[J]. 刘全有译. 天然气地球科学,2002,13(5/6):41-49.
- [10] 傅国友,宋岩,赵孟军,等. 烃源岩对大中型气田形成的控制作用——以塔里木盆地喀什凹陷为例[J]. 天然气地球科学,2007,18(1):62-66.
- [11] 张鹏飞,金奎勋,吴涛,等. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油[M]. 北京:煤炭工业出版社,1997.
- [12] 肖贤明. 有机岩石学及其在油气评价中的应用[M]. 广州:广东科技出版社,1992.
- [13] 郑玉柱,李建武,董敏涛. 吐哈盆地煤的生气能力探讨[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(增刊):73-76.
- [14] 李小彦,崔永君,郑玉柱,等. 陕甘宁盆地侏罗纪优质煤资源分类与评价[J]. 北京:地质出版社,2008.
- [15] 李明潮,张五倬. 中国主要煤田的浅层煤成气[M]. 北京:科学出版社,1990.

Contributing Ratio of Yan'an Formation Coal-bed to Conventional Natural Gases, Ordos Basin

JIN Xiang-lan, ZHANG Hong

(*Xian Branch of China Coal Research Institute, Xian 710054, China*)

Abstract: Coal is usually a good hydrocarbon source rock. Its organic matters character and contribution to hydrocarbon-generation are closely related to three maceral groups and metamorphic grade of coal. The gas generating ability of coal of Yan'an Formation is weak to medium according to the gas-generating characteristics of macerals and bi-parameter coordinate. The organic type of the coal is II₂-III according to the index of oil and gas production. Based on the relationship of adsorption quality of coal in isotherm adsorption experiment and the gas-generating quality of macerals in thermal simulation experiment, its contribution ratio to conventional natural gas is 36 to 78 m³/t.

Key words: Ordos Basin; Yan'an Formation coal-bed; Organic matter type; Gas-generating ability; Conventional natural gas; Contribution ratio to Hydrocarbon-generating.