

# 背斜—水动力复合油(气)藏油(气)水界面产状

陈振林, 许浚远

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 基于 Hubbert 的油(气)等势面坡度与水头关系的公式和达西定律, 推出了油(气)等势面坡度与水流的渗滤速度的关系式。根据此关系式, 讨论了各种情形水流速度与油气等势面坡度的关系。以此为基础, 认为未被油气充满转折端的背斜—水动力油气藏平面的油水界面由于水流速度大小和方向变化通常应该为曲面; 对被油气充满转折端的背斜—水动力油气藏倾斜的油水界面在不同方向剖面上倾斜不同; 圆柱状背斜横剖面油水界线水平, 斜向剖面界线倾向相反, 倾伏背斜的横剖面可能同向倾斜但通常不在同一条倾斜的直线上。

**关键词:** 背斜—水动力油气藏; 油(气)—水界面; 等势面; 坡度; 渗滤速度; 达西定律。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2007)01-0089-04

收稿日期: 2006-07-31

## Dip of the Oil (Gas)-Water Interfaces in Anticline-Hydrodynamic Oil (Gas) Pools

CHEN Zhen-lin, XU Jun-yuan

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** On the basis of the Darcy Law and the formulae proposed by Hubbert (1953) for the relationship between dips of oil-water and gas-water contacts in the oil and gas pools under hydrodynamic conditions and hydrodynamic heads, this paper proposes formulae of the relationship between dips of contacts and the waterflow seepage velocity. With the formulae, the paper discusses the possible relationship between the water seepage flow velocity and the slopes of oil (gas) equipotential surfaces. Based on the discussion, the paper concludes that the oil-water contacts in the hydrodynamic-anticline pools where hinge zones are not full of oil commonly are curve surfaces. For hydrodynamic-anticline pools where hinge zones of anticlines are full of oil, their oil-water contact lines in two limbs along cross sections of the cylinder anticlines are horizontal. Those along oblique sections of the cylinder anticlines are reverse; those along cross sections of the plunge anticlines might have the same dips but the two lines usually are not located in the same tilt straight line.

**Key words:** anticline-hydrodynamic oil (gas) pools; oil (gas)-water interfaces; equipotential surfaces; seepage velocity; Darcy Law.

### 1 研究现状

Hubbert(1953)通过等势面作图分析和数学分析两种方法, 给出在地下水二维流动条件下, 油(气)的等势面倾角正切(坡度大小)与水头的关系:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{\partial h_w}{\partial x}}{\rho_w - \rho_i - \frac{\partial h_w}{\partial z}}, i = o, g. \quad (1)$$

上式中  $h_w$  为水头,  $\rho_w, \rho_o, \rho_g$  分别为水、油和气的密度。

Hubbert(1953)进一步指出, 当水流沿倾斜地层向下流动, 油(气)的等势面(或等头面)坡度(绝对值)小于地层坡度(绝对值)时, 油气向上运移, 存在一个“临界值”, 该临界值等于地层倾角的负值(即临界油(气)的等势面与地层面平行); 等势面的坡度大于或小于该临界值, 油气会向下或向上运移。Hubbert(1953)认为在油气聚集体下的水流动主要

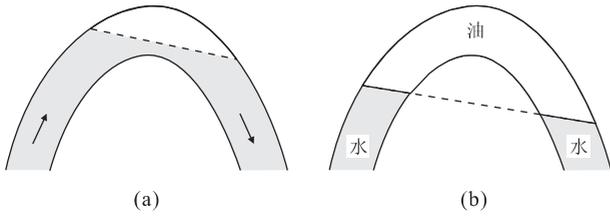


图 1 油水界面产状的两种常见认识

Fig. 1 Two common misconceptions of the occurrences of oil-water interfaces

a. 转折端没有被油充满,水可以从转折端流过(Levorsen, 1954); b. 油充满转折端,水不能在该横剖面上从转折端流过(李明诚, 1994; 张金亮和常象春, 2004)

表现为这种情形,换言之,油(气)一水界面就是油(气)的“临界”等势面(或等油头面、等气头面). 进而,他推导出二维流动的临界情形下,油水界面倾角( $\theta_{o/w}$ )、气水界面倾角( $\theta_{g/w}$ )(或者说,界面的坡度)和沿水流线方向的水头测势面坡度( $dh_w/dx$ )之间的关系(不考虑毛管压力):

$$\tan\theta_{i/w} = \frac{dz}{dx} = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_o} \frac{dh_w}{dx}, i = o, g. \quad (2)$$

上式界面倾角( $\theta_{o/w}$ 和 $\theta_{g/w}$ )是指与 $ox$ 轴正方向夹角.

Hubbert(1953)的理论成果长期以来被人们广泛地应用和推广. 图 1a 是应用该成果解释未被油气充满转折端的背斜—水动力油(气)藏油水界面产状的一种常见认识(Levorsen, 1954; 孙习之和关明义, 1973; 潘钟祥, 1986; 陈荣书和袁炳存, 1986; 陈荣书, 1994; 陈昭年, 2005). 图 1b 是油气充满背斜顶部的背斜—水动力油(气)藏的油水界面产状的另一种常见认识(李明诚, 1994; 张金亮和常象春, 2004).

但是,由于地下水的势或水头略显抽象(或者说不直观),一方面使人们容易误读某些成果(如 Hubbert 的理论成果);另一方面,使用不方便. 事实上,图 1 中的油水界面产状情形十分特殊(概率极低),基本上是误解造成的. 地下水渗滤速度较为直观,讨论其与油气的等势面及其与油气运移方向和油水界面产状关系,有助于理解背斜—水动力油(气)藏油水界面确切产状.

## 2 地下水渗滤速度与油(气)等势面倾角关系

根据达西定律,渗滤速度分量( $V_x$ 、 $V_z$ )满足下列关系:

$$V_x = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P_c}{\partial x}, V_z = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P_c}{\partial z}. \quad (3)$$

上式中  $P_c$ 、 $K$  和  $\mu$  分别为折算压力、渗透率和水的粘度. 而折算压力( $P_c$ )与水头( $h_w$ )之间的关系:

$$P_c = h_w \rho_w g. \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)有:

$$\frac{\partial h_w}{\partial x} = -\frac{\mu}{K\rho_w g} V_x, \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_w}{\partial z} = -\frac{\mu}{K\rho_w g} V_z.$$

将式(5)代入式(1)并整理,有:

$$\tan\theta = \frac{dz}{dx} = -\frac{V_x}{V_f + V_z}. \quad (6)$$

上式中:

$$V_f = \frac{K(\rho_w - \rho(p))g}{\mu}. \quad (7)$$

下面分几种情形讨论渗滤速度与等势面倾角(或坡度)关系.

(1)若  $V_z$  不变,对于  $V_x > 0$ (向  $ox$  轴正方向流动), $V_x$  越大,油等势面坡度的绝对值越大. 对于  $V_x < 0$ (向  $ox$  轴负方向流动), $V_x$  越小,油等势面坡度的绝对值越大.

(2)若  $V_x$  不变,对于  $V_z$  不同的取值区间, $V_z$  与油等势面坡度关系不同:

①当  $V_z > 0$ : $V_z$  越大(向上流动越快),油等势面坡度绝对值越小;②当  $0 > V_z > -V_f$ : $V_z$  越小(向下流动越快),油等势面坡度绝对值越大;③当  $V_z = -V_f$ : $V_z$  正好克服净浮力造成的向上运移速度,油气仅发生水平位移;④当  $V_z < -V_f$ : $V_z$  越小,油等势面坡度绝对值越小,等势面倒转.

(3)若地下水流速  $V$  的大小不变,油等势面坡度与  $V_z$ (或  $V_x$ )关系相当于与等厚储集层中的倾角关系. 该关系略显复杂,为讨论方便,假定  $V_x > 0$ ,则式(6)可以改写成:

$$\tan\theta = \frac{dz}{dx} = -\frac{\sqrt{V^2 - V_z^2}}{V_f + V_z} = -\frac{V\cos\alpha}{V_f + V\sin\alpha}. \quad (8)$$

$\alpha$  是地下水流向与  $ox$  轴正方向的夹角( $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ), $\alpha > 0$  则  $V_z$  向上, $\alpha$  小于零  $V_z$  向下.

①当  $V_z > 0$ , $V_z$  越大(向上流动越快),油等势面坡度绝对值越小;当  $V_z = V$ ,水铅直向上流动,油等势面坡度为零.

②当  $0 > V_z > -V$ ,油等势面坡度与  $V$  的关系,需要对求导后才方便讨论. 对式(8)求  $V_z$  导数有:

$$\frac{d\tan\theta}{dV_z} = -\frac{1}{(V_f + V_z)^2} \left( \frac{V_f V_z + V^2}{\sqrt{V^2 - V_z^2}} \right). \quad (9)$$

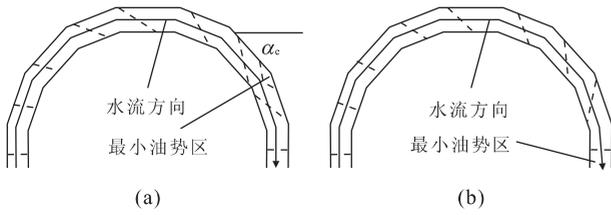


图 2 油等势面(平均)倾角与等厚储层倾角关系示意图

Fig. 2 Schematic sections showing relations of slopes of oil equipotential surfaces to dips of the reservoir layers  
虚线代表油等势面;箭头线代表水流线

若  $V_f > V$  (图 2a), 油水界面坡度存在关于  $V_z$  的极值。当  $V_z = -\frac{V^2}{V_f}$  或  $\sin\alpha_c = -\frac{V}{V_f}$ , 油等势面坡度就取极值, 极值为  $-\frac{V}{\sqrt{V_f^2 - V^2}}$ ; 当  $V_z > -\frac{V^2}{V_f}$  或  $\sin\alpha > -\frac{V}{V_f}$ , 油等势面坡度随  $V_z$  减小而减小; 当  $V_z < -\frac{V^2}{V_f}$  或  $\sin\alpha < -\frac{V}{V_f}$ , 油水界面坡度随  $V_z$  减小而增大; 当  $V_z = -V$ , 水铅直向下流动, 油等势面坡度为零。

若  $V_f < V$  (图 2b), 油等势坡度不存在极值, 式(9)总小于零, 油等势面坡度为  $V_z$  单调衰减函数。当  $V_z < -V_f$ , 等势面倒转; 当  $V_z = -V$ , 水和油都铅直向下流动, 油水界面坡度为零。

(4) 若  $\alpha$  大小不变, 相当于  $V_x/V_z$  的比值不变(也相当于水流方向一定, 如: 在一定的倾角的地层中), 讨论  $V$  对等势面倾角的影响。对式(9)求  $V$  的导数, 有:

$$\frac{d \tan \theta}{dV} = -\frac{V_f \cos \alpha}{(V_f + V \sin \alpha)^2} < 0. \quad (10)$$

- ① 当  $\alpha \geq 0$ :  $V$  越大, 油水界面坡度绝对值越大;
- ② 当  $\alpha < 0$ , 若等势面没有倒转, 坡度绝对值随  $V$  的增大而增大; 若等势面倒转, 坡度绝对值随  $V$  的增大而减小。等势面倒转的条件是:  $\sin\alpha < -\frac{V}{V_f}$ 。当  $V$  趋向无穷大, 油气等势面与地层面垂直, 等势面必然倒转。图 2a 和图 2b 相同  $\alpha$  角的层段油等势面倾角不同显示了  $V$  的变化引起等势面倾角的变化。

### 3 水渗滤速度与油气藏油(气)水界面产状的关系

背斜—水动力复合油(气)藏是在水动力不强的

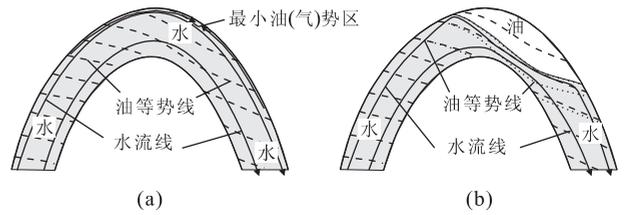


图 3 未被油充满转折端的背斜—水动力油藏横剖面上油水等势线分布和油水界面产状

Fig. 3 Oil equipotential lines and the occurrence of oil-water contact in the hydrodynamic-anticline oil pool where the hinge zone is not full of oil

a. 没有油气聚集条件下油等势线(虚线)分布和油气运移方向; b. 油聚集稳定成为背斜—水动力油藏后油水界面产状; 油水界面虽然是油等势线, 但由于油气聚集后, 水流方向和水流速度大小发生局部变化, 导致油等势线发生局部改变, 油水界面是在新的油势(点线)分布中一个等势线

条件下形成的(若水动力很强, 油(气)藏将被冲走), 相当于图 3a 所示的地下水流动情形。

在没有聚集油气时, 两翼与转折端的水流速度大小基本上相等, 根据前文的讨论, 背斜的油气等势面产状可以表示为图 2a, 左翼的等势面缓, 右翼陡, 在两者之间应该有最陡的部分, 最小油气势区偏左。油气垂直等势面运移。随油气聚集成藏, 水流速度大小和方向都发生变化, 局部的油气势分布也随之发生变化。因为油水界面(以油为例说明之)是油的等势面, 同时又是水流线面, 因此水流方向局部发生了变化; 另一方面, 由于油藏形成, 转折端附近过水面积减小, 水的渗滤速度加大, 油的等势面倾角加大, 并可能达到最大, 向两翼水的渗滤速度减小, 油的等势面倾角也可能减小。从而, 造成油水界面弯曲(图 2b)。以 Levorsen(1954)为代表的背斜—水动力复合油(气)藏油水界面平面的产状(图 1a)概率极小, 因为这要求油(气)藏之下水流速度大小和方向都相同。

当背斜转折端部位充满油气后, 水不再从转折端直接流过的水动力—背斜复合油气藏, 在褶皱轴近水平的圆柱状背斜部位的横剖面上水平流速(分量)为零, 油水界线在横剖面上应该是水平的(图 4a)。事实上, Hubbert(1953)示意了这种情形油水界线是水平的, 只是没有专门提及原因。但他同时指出这种情形下油水界面空间上是倾斜的, 因为空间上水作三维流动。如果剖面不是横剖面, 而是斜剖面, 油水界面是倾斜的, 对于褶皱轴近水平的圆柱状背斜的斜剖面, 水作三维流动, 两翼油水界线作不同方向倾斜(图 4b), 因为水流深度的水平分量方向相

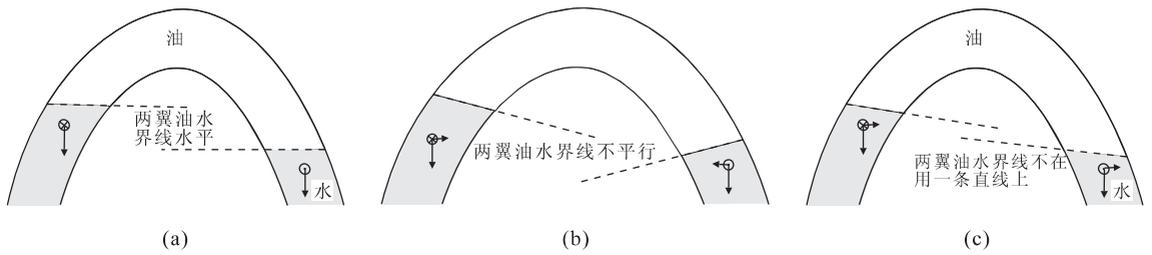


图 4 被油充满转折端的背斜—水动力油气藏油水界面上倾斜

Fig. 4 Dips of oil-water contact in the hydrodynamic-anticline oil pool with the hinge zone full of oil

a. 圆柱状背斜横剖面上油水界线; b. 圆柱状背斜斜剖面上油水界线; c. 倾伏背斜横剖面上油水界线; 箭头示意水流速度剖面分量, 叉圆和点圆分别示意水流速度分量方向向里、向外

反. 如果是对称的倾伏背斜, 而且剖面 (可能是横剖面) 两翼的水流速度水平分量大小、方向相同, 两翼油水界线倾斜可以相同, 但通常并不位于同一倾斜线 (图 4c) (注意: 该倾斜与两翼的水头差并无直接联系, 不能直接用公式 (1) 计算得来, 即使两翼界线巧合位于同一倾斜线)。

## 4 结论

(1) 水二维流动条件下, 油 (气) 等势面坡度与水流的速度关系式:

$$\tan\theta = \frac{dz}{dx} = -\frac{V_x}{V_f + V_z}, V_f = \frac{K(\rho_w - \rho(p))g}{\mu}$$

(2) 未被油气充满的背斜—水动力复合油气藏的油水界面应该为曲面。

(3) 被油气充满的背斜—水动力复合油气藏的油水界面的剖面线分水平、反向倾斜和同向倾斜等多种情形。但两翼油水界线位于同一条倾斜线上的概率极小, 几乎不可能。

## References

Chen, R. S., 1994. Geology of oil and gas, China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).  
Chen, R. S., Yuan B. C., 1986. Geology of natural gas, Wuhan College of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).  
Chen, Z. N., 2005. Geology of oil and gas, Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).  
Hubbert, M. K., 1953. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *AAPG Bulletin*, 37: 1954—2026.

Levorsen, A. I., 1954. Geology of petroleum. W. H. Freeman and Company, San Francisco and London, 724.  
Li, M. C., 1994. Migration of oil and gas (the 2nd edition). Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).  
Li, T. M., 1989. Outline of quantitative study of geological processes of petroleum. Petroleum University Press, Dongying (in Chinese).  
Pan, Z. X., 1986. Geology of petroleum. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).  
Sun, X. Z., Guan M. Y., 1973. Geology of petroleum. China Petroleum Association and Taiwan General Petroleum Exploring Department (Ser. 11), Taipei (in Chinese).  
Zhang, J. L., Chang, X. C., 2004. Geology of petroleum. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

## 附中文参考文献

陈荣书, 1994. 石油与天然气地质学. 武汉: 中国地质大学出版社.  
陈荣书, 袁炳存, 1986. 天然气地质学. 武汉: 武汉地质学院出版社.  
陈昭年, 2005. 石油与天然气地质学. 北京: 地质出版社.  
李明诚, 1994. 石油与天然气运移 (第二版). 北京: 石油工业出版社.  
李泰明, 1989. 石油地质过程定量研究概论. 东营: 石油大学出版社.  
潘钟祥, 1986. 石油地质学. 北京: 地质出版社.  
孙习之, 关明义, 1973. 石油地质学. 台北: 中国石油学会和台湾石油勘探总处 (探采丛书之十一).  
张光亮, 常象春, 2004. 石油地质学. 北京: 石油工业出版社.