中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 1 期: 28 ~ 33
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

盖层物性封闭能力与油气流体物理性质关系探讨

张林晔, 包友书*, 刘庆, 张守春, 朱日房, 张蕾

中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院, 东营 257015
* 联系人, E-mail: baoyoushu@126.com

收稿日期: 2008-05-20; 接受日期: 2009-06-07
中国石油化工股份有限公司科技攻关项目(编号: P05070)资助

摘要 建立了包含烃类流体与岩石表面间边界层阻力, 并以启动压力梯度表征的盖层物性封闭能力的力学方程, 该方程表明: 盖层的物性封闭油气能力不仅取决于盖层毛细管力和烃类所受浮力, 而且受烃类流体在盖层内的启动压力梯度和盖层厚度的影响. 烃类密度、黏度和烃-水界面张力的变化分别影响烃柱所受浮力、烃类在该层内的启动压力和盖层对烃类的毛细管力. 并根据实际资料和文献数据分析了烃类流体的密度、黏度和烃-水界面张力变化对盖层封闭能力的影响. 地下条件下, 由于原油的密度、黏度和油-水界面张力这 3 项物理性质的变化可造成封盖层物性封闭能力变化达数十甚至数百倍. 因此评价盖层物性封闭能力时, 要综合考虑烃类流体的物理性质. 深入研究烃类物理性质对盖层封闭能力的影响, 有利于指导类似稠油的特殊油气资源以及特殊温压环境下油气资源的勘探.

关键词
盖层
物性封闭能力
边界层
启动压力梯度
烃类物理性质
非达西渗流
稠油

油气盖层按封闭机理可分为物性封闭盖层、超压封闭盖层、烃浓度封闭盖层以及两种或两种以上封闭机制的复合封闭盖层[1~4]. 然而, 无论是超压封闭、烃浓度封闭还是复合封闭, 均需要一定的物性封盖条件. 目前, 盖层物性封闭能力的评价方法中, 采用了孔隙度、渗透率、密度、比表面积、微孔隙结构、孔喉中值直径、压汞中值压力、变异系数、排替压力、突破压力、泥质含量、碳酸盐含量、盖层单层厚度、累积厚度、沉积环境、成岩程度、岩石力学性质等参数[5~18]. 然而, 以上所有评价盖层物性封闭能力的参数均只考虑了盖层岩石自身性质, 而盖层对油气流体的封盖作用是岩石与流体的相互作用, 盖层的物性封闭性能应取决于岩石性质和流体性能[19,20]. 且现有的盖层物性封闭能力的力学方程仅考虑了烃类所受浮力和盖层毛细管力, 忽略了烃与岩石表面间的边界层阻力. 本文建立了包含边界层阻力的盖层物性封闭能力的力学方程, 就盖层物性封闭能力与油气流体物理性质的关系进行了探讨.

1 盖层物性封闭油气流体的力学关系

以往研究认为, 盖层物性封盖油气的力学平衡式如式(1), 即烃柱浮力等于盖层毛管力时, 烃柱高度即为盖层封盖烃柱的最大高度:

$$P_b=P_c, \tag{1}$$

或

$$(\rho_w-\rho_h)gh=\frac{2\sigma\cos\theta}{r}. \tag{2}$$

因此盖层的封闭油气高度如(3)式:

引用格式: Zhang L Y, Bao Y S, Liu Q, et al. Effects of hydrocarbon physical properties on caprock's capillary sealing ability. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0020-4

$$h=\frac{2\sigma\cos\theta}{r(\rho_w-\rho_h)g}, \tag{3}$$

(1)~(3)式中, P_b 为油气所受浮力, Pa; P_c 为盖层毛细管力, Pa; h 为烃柱高度, m; σ为烃-水界面张力, $N\cdot m^{-1}$; θ为接触角; r 为盖层喉道半径, m; ρ_w 和ρ_h 分别为地层水和烃密度, $kg\cdot m^{-3}$.

以静态下力学平衡关系推导的盖层物性封闭能力公式(3)似乎表明: 盖层封闭烃柱高度与盖层厚度无关, 然而, 勘探实践表明: 已发现的大中型油气田均具有较大的盖层厚度, 蒋有录[21]统计济阳坳陷新近系盖层厚度与封闭的天然气高度关系表明: 盖层所能封住的气藏的最大高度随盖层厚度增加而增大, 吕延防等[20]统计中国 40 个大中型气田盖层厚度与天然气藏储量丰度关系也表明, 天然气的储量丰度总体上随盖层厚度变大而变大, 李剑等[22]研究柴达木盆地第四系生物气盖层封闭机理时, 认为多套储盖组合具有累积封闭效应.

以式(3)计算盖层的物性封闭油气最大高度, 实际上忽略了流体流动中的阻力, 当烃类流体进入或通过盖层时, 不仅受到由于烃-水界面张力引起的毛细管力, 还要受到孔喉表面对流体的阻力, 这种阻力只有在流动时才会发生. 若按达西定律考虑, 在地质体内, 流体流动速度极低时, 其所需压差可以近似于 0, 即流动阻力近似于 0. 然而, 越来越多的研究资料表明: 在低渗透介质内, 流体的低速渗流不符合达西渗流规律[23~26]. 图 1 为岩石内单相流体渗流流速与压力梯度关系示意图(由于为单相流动, 不存在两相流体界面张力引起的毛细管力), 压力梯度较高时(图 1 中压力梯度大于 d 点的压力梯度时), 流体流速与压力梯度呈线性关系, 压力梯度较低时, 流速与压力梯度不再为线性关系(ad 段), 当压力梯度小于 a 点的压力梯度时, 流体不会发生流动, a 点也称为启动压力梯度(有文献称启动阻力[26]). 因此若使流体在低渗透岩石介质中流动, 压力梯度必须大于启动压力梯度.

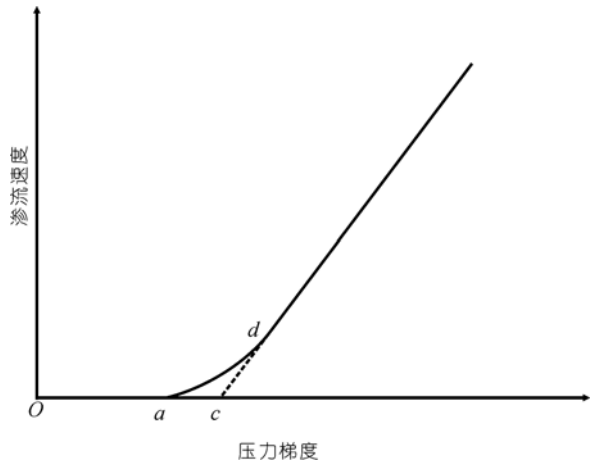

图 1　低渗透岩石中渗流速度与压力梯度关系示意图

启动压力梯度产生的原因一般解释为: 在流体与孔隙表面之间存在边界层, 边界层流体性质与体相流体的性质显著不同. 边界层阻力主要包括两个方面: 即吸附分子与固体表面分子的相互作用, 以及吸附分子之间的作用. 边界层厚度占毛细管半径的比例越大, 边界层流体对渗流特性的影响越显著, 所需启动压力梯度越大.

图 2 为盖层吼道内烃类流体受力示意图. 烃柱浮力小于毛管力时, 烃仅受到毛管力(P_c)和浮力(P_b)的作用(图 2(a)), 边界层不会对烃柱产生作用力; 而当浮力大于毛管力时, 烃类具备运移趋势, 因此边界层会对烃类流体产生边界层阻力(图 2(b)中 F_v). 只有当浮力足够大, 并能够克服毛管力(P_c)和边界层阻力(F_v)时, 烃类才能运动. 所以, 考虑边界层作用力, 并以启动压力梯度表征, 则烃类流体能够通过盖层的力学条件则应为

$$P_b=P_c+J\cdot H_c, \tag{4}$$

而盖层封闭烃柱的最大高度则应为

$$h=\left(\frac{2\sigma\cos\theta}{r}+J\cdot H_c\right)/(\rho_w-\rho_h)g, \tag{5}$$

式中, h 为烃柱高度, m; J 为烃类流体在盖层内单相启

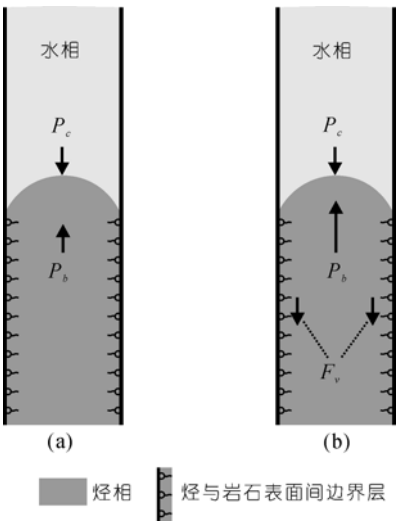

图 2　盖层喉道内烃类流体受力示意图

动压力梯度, Pa·m^{-1}; H_c为盖层厚度, m; r为盖层喉道半径, m; σ为烃-水界面张力, N·m^{-1}; θ为接触角; ρ_w和ρ_h分别为地层水密度和烃密度, kg·m^{-3}.

式(5)表明: 盖层的物性封闭能力不仅与盖层毛管力、烃类所受浮力有关, 而且与盖层厚度和烃类流体在盖层内的启动压力梯度有关.

2 烃类流体物理性质对盖层物性封闭能力的影响

2.1 烃类黏度对盖层物性封闭能力的影响

烃类黏度对盖层物性封闭能力的影响主要表现为影响其在盖层内的启动压力梯度. 低渗透岩石的启动压力梯度(图 1 中 a 点)可以用实验求取. 启动压力梯度除与岩石孔隙表面性质有关外, 还受流体黏度的影响较大, 一般流体黏度越高, 其与岩石表面间的边界层厚度越大, 因此启动压力梯度也越高, 一些文献也对低渗透砂岩中的启动压力梯度与黏度关系进行了总结[27],1).

在低渗透砂岩内, 烃类的启动压力梯度和毛细管力可以通过经验公式计算, 表 1 为根据文献公式计算的渗透率为 1×10^{-3} μm^2 的砂岩内烃类启动压力梯度数据和毛细管力数据. 其中, 平均毛细管半径根据文献[28]公式计算. 按文献 1)公式计算, 在渗透率为 1×10^{-3} μm^{2}砂岩内, 黏度为 50 mPa·s 的原油(地下条件下黏度为 50 mPa·s 时已经为稠油)的启动压力梯度为0.30 MPa·m^{-1}, 原油能够通过2 m厚度的该岩石所需的启动压力为 0.60 MPa, 已经大于毛细管力 0.41 MPa. 100 mPa·s 的原油通过 1 m 厚的该岩石需 0.45 MPa的压差, 也已经大于毛管压力0.41 MPa. 同样, 按文献[27]计算, 黏度为 50 mPa·s 的原油在 2 m 厚该岩石内的启动压力已经大于毛细管力, 黏度为 100 mPa·s 的原油, 在 1 m 厚该岩石内的启动压力就已经大于毛细管力. 表 1 中计算结果也表明: 在同一孔渗特征的岩石内, 高黏度原油与低黏度原油启动压力相差很大, 按文献 1)计算表明, 50 mPa·s 的原油启动压力为 1 mPa·s 的原油启动压力的 10 倍, 100 mPa·s 的原油的启动压力为 1 mPa·s 的原油启动压力的 15 倍. 按文献[27]计算, 50 mPa·s 的原油启动压力为 1 mPa·s 的原油启动压力的 50 倍, 100 mPa·s 的原油的启动压力为 1 mPa·s 的原油启动压力的 100 倍. 据此认为, 原油黏度的变化会对盖层封闭能力造成很大影响, 尤其是较厚的盖层.

2.2 烃类密度对盖层物性封闭能力的影响

烃类密度对盖层物性封闭能力的影响主要表现为烃柱所受浮力的差异, 烃类密度不同, 同样高度烃柱所受浮力不同. 烃类密度越大, 烃水密度差越小, 同样高度的烃柱所受浮力越小, 同样物性条件的盖层闭盖烃柱的高度越大.

以济阳坳陷地下油气密度数据, 分析烃类密度变化对盖层封闭油气高度的影响, 地下原油密度根据油藏初始产出流体高压物性分析确定, 地层天然气密度根据天然气的组分以真实气态状态方程计算[29]. 济阳坳陷气藏天然气密度在 0.0305 g·cm^{-3}(浅层干气)至 0.3770 g·cm^{-3} (深层富油凝析气)之间, 油藏原油密度在 0.4744 g·cm^{-3} (挥发性油)至 0.9581 g·cm^{-3} (重质油)之间(表 2).

如果假设地下水密度近似等于 1.0000 g·cm^{-3}, 则在地下条件下, 济阳坳陷水油密度差在 0.0419~

表 1 根据文献计算渗透率为 1×10^{-3} μm^2 砂岩启动压力梯度与毛管力数据表

岩石渗透率 (10^{-3} μm^2)	启动压力梯度计算			毛细管力计算		
	原油黏度/ mPa·s	启动压力梯度/ MPa·m^{-1}	文献及公式	平均毛管半径 /μm	平均毛管力 /MPa	备注
1	1	0.03	文献 1) $J=0.0003\left(\frac{K}{\mu}\right)^{-0.5895}$	0.11	0.41	平均毛管半径根据文献[28]公式计算, 即: $r=0.35\sqrt{K}$, r 为毛管半径, μm, K 为渗透率, 10^{-3} μm^2, 油-水界面张力取 28 mM·m^{-1}, 接触角取值 35°
	50	0.30				
	100	0.45				
	1	0.0046	文献[27] $J=\frac{K^{-0.7467}}{21980}\mu$			
	50	0.23				
	100	0.46				

1) 胜利油田低渗透砂岩油藏开发研究. 胜利油田内部资料, 2005

表 2　济阳坳陷部分油藏和天然气藏地层条件下烃类流体密度表

井号	层位	中部深度/m	地下密度/g·cm^{-3}	油气藏类型
埕 118-x3	明化镇组	780	0.0305	干气藏
气东 9	明化镇组	1000	0.0761	干气藏
丰气 1	沙二段	1640	0.1138	干气藏
沾 38-35	沙一段	2160	0.1500	干气藏
丰深 3	沙四段	4700	0.3764	干气藏
丰深 1	沙四段	4330	0.3770	凝析气藏
渤深 6	奥陶系	4206	0.4744	挥发性油藏
桩海 10	下古生界	4318	0.4990	挥发性油藏
滨 363	沙二段	1935	0.7683	常规油藏
滨 5	沙四段	2564	0.7526	常规油藏
沾 188	馆陶组	1296	0.9517	重质油藏
埕北 251	馆陶组	1292	0.9581	重质油藏

0.5256 g·cm^{-3}之间. 最大密度差和最小密度差相差达 10 倍以上. 根据公式(5)可以计算出, 在不考虑毛细管力和启动压力变化的情况下, 同样物性的盖层, 对最大密度的原油的封闭高度是对最小密度原油封闭高度的 10 倍以上; 而对于天然气, 水气密度差在 0.6230~0.9695 g·cm^{-3} 之间, 最大密度差和最小密度差相差 1.5 倍以上, 在不考虑毛细管力和启动压力变化的情况下, 同样物性的盖层, 对最大密度的天然气的封盖高度是对最小密度天然气封闭高度的 1.5 倍以上.

2.3　烃-水界面张力对盖层物性封闭能力的影响

烃-水界面张力的变化直接影响盖层对烃的毛细管力, 进而影响盖层对烃类的封闭能力. 地下状态下油-水界面张力和气-水界面张力变化较大, 影响因素较多, 油水界面张力在 3~35 mN·m^{-1}之间, 气水界面张力在 25~70 mN·m^{-1}之间[30~32], 对同一盖层, 由于烃-水界面张力的变化, 使盖层对烃类的最大封闭高度发生很大变化, 在不考虑烃类密度、烃-水接触角和启动压力变化的情况下, 通过(5)式可计算出, 原油最大相差近 10 倍以上, 天然气最大相差近 3 倍.

2.4　烃类密度、烃类黏度和烃-水界面张力相关性

地层烃类密度、黏度和烃-水界面张力受烃类组成、温度和压力等诸多因素的影响, 各项物理性质变化较为复杂[30~33]. 但统计资料表明: 在地下条件下, 烃类密度、烃类黏度和烃-水界面张力这 3 项参数变化具有一定的相关性, 各参数并非单独变化, 某一项物理性质发生变化的同时, 其他两项参数也会发生改变.

在济阳坳陷, 地层条件下, 原油密度与原油黏度总体上具有正相关关系, 即原油密度越大, 原油黏度越大(图 3 和 4); 并且, 地层原油密度和油-水界面张力也具有正相关关系, 即油-水界面张力随地层原油密度的增加而增加(图 4), 因此, 随着埋深变浅, 温度降低, 压力变小, 其原油密度、原油黏度和油-水界面张力总体上同时变大, 其变化剖面如图 4 所示.

从济阳坳陷天然气密度、黏度和气-水界面张力剖面(图 5)可以看出: 天然气的密度、黏度和气-水界面张力变化情况与原油不同, 天然气密度和天然气黏度具有正相关关系, 但天然气密度与气-水界面张力却具有负相关关系. 随埋深变浅, 温度和压力降低, 天然气的密度、黏度变低, 但气-水界面张力却增大. 和原油相比, 气-水界面张力变化趋势一致, 但密度和黏度的变化趋势却相反.

由于烃类密度、烃类黏度和烃-水界面张力随环境和组成变化而同时变化, 盖层对烃类的物性封闭能力会产生巨大变化, 尤其是对于原油, 在盖层物性条件不变的情况下, 由于密度、黏度和油-水界面张力

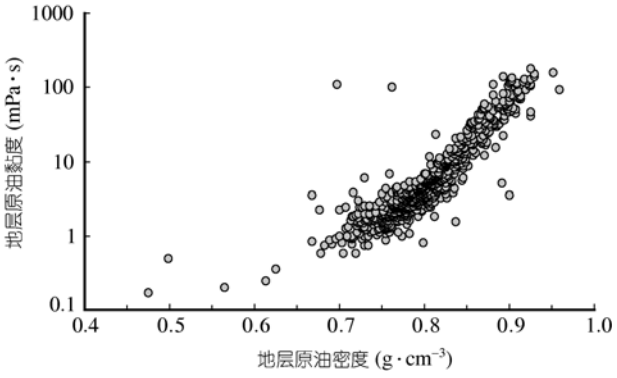

图 3　济阳坳陷地层原油密度与地层原油黏度关系图

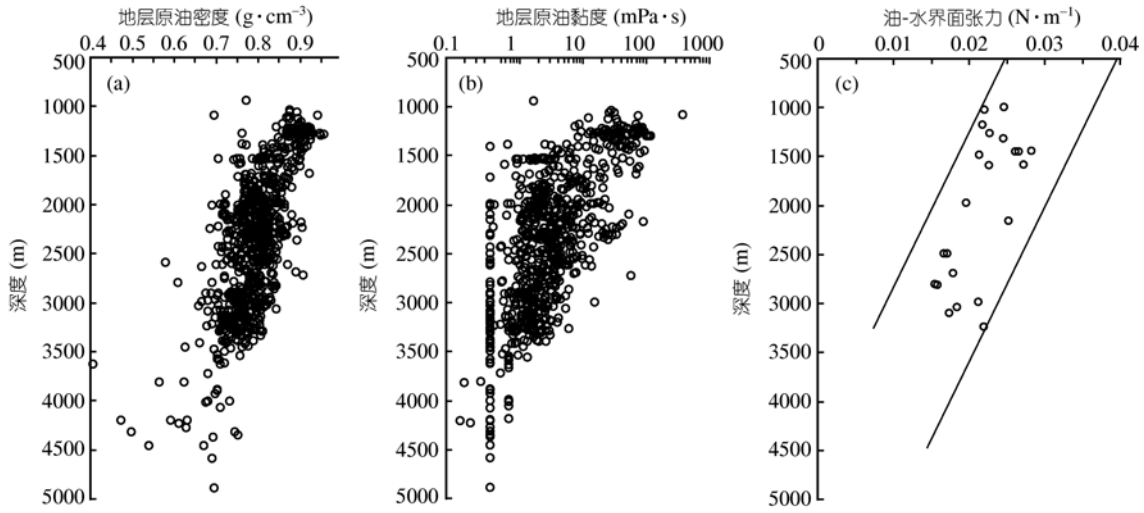

图 4　济阳坳陷地层原油密度、黏度和油水界面张力与深度关系

(c)中包络线根据 Schowalter 的油-水界面张力诺模图绘制[30~33]

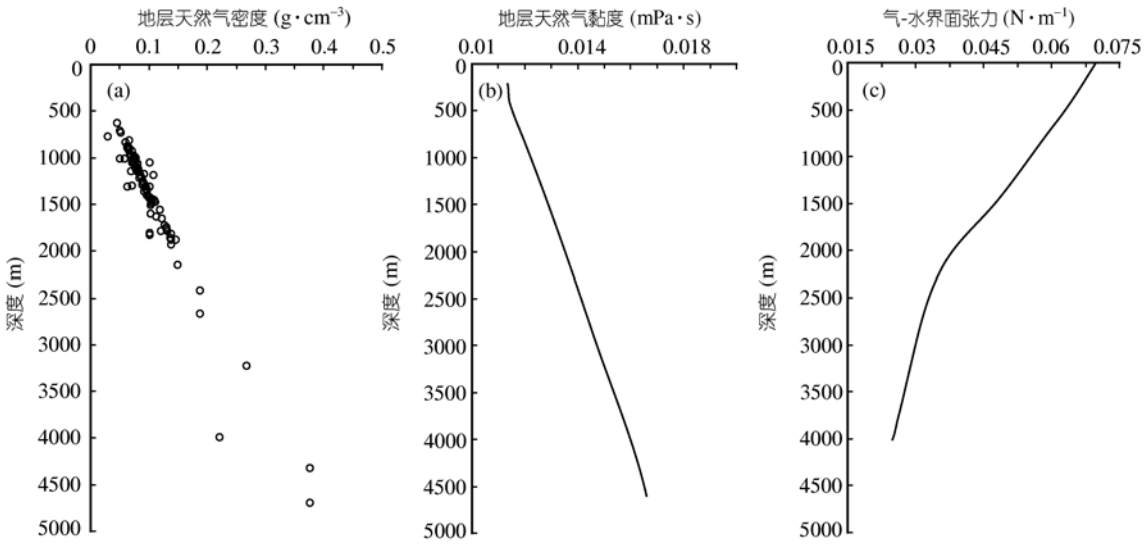

图 5　济阳坳陷地层条件下天然气密度、黏度和气-水界面张力与深度关系图

(b)根据杨通佑等[29]经验公式计算绘制, (c)根据 Schowalter 的气-水界面张力诺模图绘制[30~33]

的同时变化, 会使盖层对其封盖能力变化达到几十倍, 甚至更高.

3　研究意义

地下条件下, 烃类受自身组成和外界环境(如温度、压力和水介质等)的影响, 其密度、黏度和烃-水界面张力变化很大. 而烃类流体的密度、黏度和烃-水界面张力的变化会对盖层的物性封闭能力会产生较大影响. 因此, 深入研究流体性质对盖层封闭能力的影响, 有利于指导类似稠油的特殊物理性质油气资源以及特殊温压环境下表现出特殊物理性质的油气资源的勘探.

对于重质油(或稠油), 由于其高黏度、高密度和高油-水界面张力特点, 决定其在盖层内具有相对较高的启动压力梯度、较低的油水密度差(个别情况下重质油密度接近于地层水密度)和较高的毛细管力, 因此, 不需太高的物性封闭条件也可以大量聚集, 甚

至一般中-低渗透砂岩即可作为其良好盖层.

在某些特定的温压条件, 如在某些高压低温地层中或常压低温地层内, 油气可能表现出较高密度、较高黏度和较高烃-水界面张力的物理性质, 如在深海域的浅埋深地层, 低地温梯度的高海拔地区, 以及高纬度浅部地层等. 在这些特殊温压条件的地层中, 只要具有充足的油气源, 看似较差的封盖层下仍可能聚集大量油气资源.

4 结论

(1) 盖层的物性封闭能力不仅与盖层毛管力、烃类所受浮力有关, 而且与盖层厚度和烃类流体在盖层内的启动压力梯度有关. 而烃类密度、黏度和烃-水界面张力的变化分别影响烃柱所受浮力、烃类在该层内的启动压力和盖层对烃类的毛细管力, 进而影响盖层的封闭能力.

(2) 地下条件下, 原油的密度、黏度和油-水界面张力变化具有正相关性, 一项参数变大, 其他两相参数也同时变大, 而由于流体这 3 项物理性质的变化可造成封盖层物性封闭能力变化达数十甚至数百倍, 因此评价盖层物性封闭能力时, 要综合考虑原油的物理性质.

(3) 深入研究流体性质对盖层封闭能力的影响, 有利于指导类似稠油的特殊油气资源以及特殊温压环境下表现为特殊物理性质的油气资源的勘探.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 付广, 吕延防. 复合型盖层在我国大中型气田形成中的重要作用. 新疆石油地质, 1999, 20: 18—21
2 付广, 姜振学, 李春. 压力封闭在盖层封闭油气中的应用. 天然气工业, 1995, 15: 12—15
3 付广, 杨勉. 盖层发育特征及其对油气成藏的作用. 天然气地球科学, 2000, 11: 18—24
4 何光玉, 张卫华. 盖层研究现状及发展趋势. 世界地质, 1997, 16: 28—33
5 付广, 姜振学. 影响盖层形成和发育的地质因素分析. 天然气地球科学, 1994, 20: 7—11
6 侯连华, 刘泽容, 王京红. 盖层封闭能力的定量评价方法及其应用. 石油大学学报(自然科学版), 1996, 20: 1—4
7 付广, 陈章明, 万龙贵. 塔中地区石炭系泥岩盖层封闭性能研究. 新疆石油地质, 1996, 17: 380—384
8 邓祖佑, 王少昌, 陈昭年. 天然气封盖层的突破压力. 石油与天然气地质, 2000, 21: 136—138
9 付广, 陈章明, 姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用. 石油勘探与开发, 1995, 22: 46—50
10 陈振岩, 张占文, 张戈, 等. 辽南地区天然气盖层封闭性能探讨. 天然气地球科学, 1955, 6: 18—23
11 付广, 陈章明, 吕延防. 泥岩盖层封盖性能综合评价方法探讨. 石油实验地质, 1998, 20: 80—86
12 石波, 付广, 徐明霞. 我国主要含油气盆地盖层封闭特征. 天然气地球科学, 1999, 10: 49—53
13 刘文彬, 李节通, 伏万军. 陕甘宁盆地上古生界天然气泥岩直接盖层的毛管压力封闭特征. 沉积学报, 1996, 14: 80—84
14 谈玉明, 任来义, 张洪安, 等. 深层气泥岩盖层封闭能力的综合评价. 石油与天然气地质, 2003, 24: 191—195
15 郑德文. 天然气毛细封闭盖层评价标准的建立. 天然气地球科学, 1994, 23: 29—33
16 任培罡, 潘建国, 谭开俊, 等. 准噶尔盆地中拐-五八区天然气盖层评价研究. 新疆石油天然气, 2007, 3: 24—28
17 黄志龙, 郝石生. 盖层突破压力及排替压力的求取方法. 新疆石油地质, 1994, 15: 163—166
18 杨传忠, 张先普. 油气盖层力学性质与封闭性关系. 西南石油学院学报, 1994, 16: 7—13
19 张祥, 纪宗兰. 柴达木盆地第四系泥岩盖层的封盖机理. 天然气工业, 1997, 17: 75—76
20 吕延防, 付广, 于丹. 中国大中型气田盖层封盖能力综合评价及其对成藏的贡献. 石油与天然气地质, 2005, 26: 742—745
21 蒋有录. 渤海湾盆地盖层对天然气富集的影响初探. 地质评论, 1999, 45: 26—31
22 李剑, 严启团, 张英, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气盖层封闭机理的特殊性. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊Ⅱ): 36—42
23 薛芸, 石京平, 贺承祖. 低速非达西流动机理分析. 石油勘探与开发, 2001, 28: 101—104
24 贾振岐, 王延峰, 付俊林, 等. 低渗低速下非达西渗流特征及影响因素. 大庆石油学院学报, 2001, 25: 73—76
25 姚约东, 葛家里. 石油非达西渗流的新模式. 石油钻采工艺, 2003, 25: 40—42
26 吕延防, 于润涛, 王亚春. 低速非达西流动及泥质岩孔隙流体超压的形成. 石油学报, 2004, 25: 53—57
27 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究. 石油勘探与开发, 2002, 29: 86—89
28 李道品, 等. 低渗透砂岩油田开发. 北京: 石油工业出版社, 1997. 120—124
29 杨通佑, 范尚炯, 陈元千, 等. 石油及天然气储量计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1998. 302—303
30 李明诚. 石油与天然气运移. 第三版. 北京: 石油工业出版社, 2004. 38—39
31 包茨. 天然气地质学. 北京: 科学出版社, 1988. 215—217
32 何更生. 油层物理. 北京: 石油工业出版社, 1995. 167—172
33 王允诚, 向阳, 邓礼正, 等. 油层物理学. 成都: 四川科技出版社, 2006. 150—158