

Pore Structure Characteristics and Significance of Development Evaluation of Lei Kou Slope Formation Reservoir in Longmen Mountain Front

Wei Sun

Oil Field Exploration and Development Department of SINOPEC, Beijing
Email: sunwei01@sinopec.com

Received: Apr. 5th, 2018; accepted: Apr. 19th, 2018; published: Apr. 26th, 2018

Abstract

Based on the reservoir characteristics, the paper uses the methods of cast thin section, scanning, CT core mercury injection and gas phase permeability experiment, analyzes pore structure characteristics of different types of reservoir, studies characteristic parameters of pore structure such as unsaturated mercury saturation, pore throat volume ratio, ejection saturation, mercury withdrawal efficiency etc. and application characteristics of two-phase flow in reserve evaluation, and explores the relationship between gas and water and recovery prediction. The research shows that the pore throat ratio is 10:1, the mercury removal degree is 14.1% - 30.6%, the mercury removal efficiency is 30%, the original gas saturation is 72%, the gas reservoir height is 115 - 158 meters, and the phase permeability test predicts the final recovery factor is 40%. In general, the reservoir has larger pore throat, poor micro connectivity, smaller mercury removal saturation and greater difficulty in the utilization of reserves. Meanwhile, gas reservoirs are characterized by edge water and water invasion in the middle and later stages of development.

Keywords

Casting Sheet, Capillary Pressure Curve, Gas Saturation, Difficult and Easy to Use of Reserves, Height of Gas Column

龙门山前雷口坡组储层孔隙结构特征及开发评价意义探讨

孙 伟

中国石油化工股份有限公司油田勘探开发事业部, 北京
Email: sunwei01@sinopec.com

收稿日期：2018年4月5日；录用日期：2018年4月19日；发布日期：2018年4月26日

摘要

基于储层特征，利用铸体薄片、CT扫描、岩心压汞及气水相渗实验等手段，分析不同类型储层的孔隙结构特征，研究未饱和汞饱和度、孔喉体积比、退汞饱和度、退汞效率等参数和两相渗流机理在储量评价中的应用，同时探索气水关系、气藏类型及采收率。研究表明储层孔喉比10:1，退汞饱和度14.1%~30.6%，退汞效率30%，原始含气饱和度72%，气藏高度115~158米，相渗实验预测最终采收率40%。总体上具有孔喉比较大、微观连通性较差、退汞饱和度较小、储量动用难度较大等特点，同时气藏存在边水、开发中后期水侵较活跃的问题。

关键词

铸体薄片，毛细管压力曲线，含气饱和度，储量动用难易程度，气柱高度

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

川西龙门山前构造带三叠系雷口坡组天然气勘探取得重大发现(图1)，前期研究认为，气藏特征表现为：具有大型正向隆起的构造背景，发育一套厚度大、分布广、纵向连续性较好的白云岩储层，烃源岩

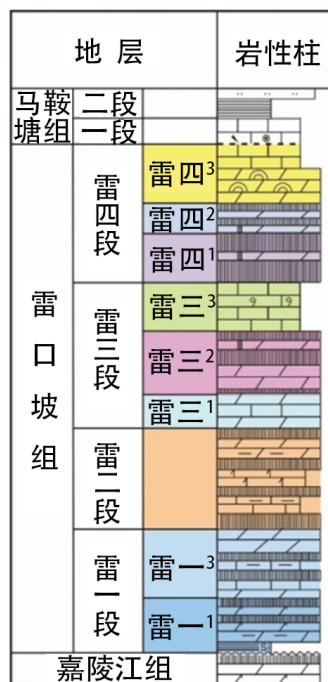


Figure 1. Comprehensive histogram of the three strata of the middle strata in the Sichuan Basin

图1. 四川盆地中三叠统雷口坡组地层综合柱状图

为雷口坡组和下覆的二叠系嘉陵江组，为常温常压、高含硫的酸性气藏[1] [2] [3]。近期研究表明，龙门山前雷口坡组储层为潮坪相沉积环境，岩性组合复杂多样，纵向白云岩与灰岩频繁交互，储层与夹层呈不等厚互层叠置分布，总体上具有低孔、中-低渗特征，储集空间类型多样，以粒间、晶间溶孔及藻格架孔为主，由于局部溶蚀孔洞和微裂缝的发育，造成储层非均质性强，孔隙结构复杂，加之目前气藏井控程度低，导致气水关系不落实，无密闭取芯资料，气藏原始含气饱和度难以准确求取，气藏未投入试采，储量动用难易程度和最终采收率难以客观评价。

前人关于该区的研究主要针对成藏条件、储层基本特征及成岩作用等勘探方面[4] [5] [6]，而对储层孔隙结构特征及其孔隙中流体的渗流机理等开发方面研究几乎处于空白。气藏开发实际上是地下流体在多孔介质渗流的动态过程，而压汞和气水相渗实验是目前能准确表征储层与流体相互作用的有效手段，特别在没有气井试采动态资料的情况下，也是储量评价和开发指标预测的基础。

本研究在前人研究的基础上，通过铸体薄片、CT扫描、岩心压汞及气水相渗实验，深入揭示不同类型储层的孔隙结构特征，研究未饱和汞饱和度、孔喉体积比、退汞饱和度、退汞效率等孔隙结构特征参数在储量评价中的应用，同时初步探索气水分布特征并预测气藏最终采收率，为气藏开发方案编制提供依据。

2. 压汞实验与镜下薄片相结合研究储层孔隙结构特征

龙门山前雷口坡组储层总体上储集空间由不同尺度的溶孔、溶洞及微裂缝构成(图 2)，由于各种储集



Figure 2. Reservoir space characteristics

图 2. 储集空间特征

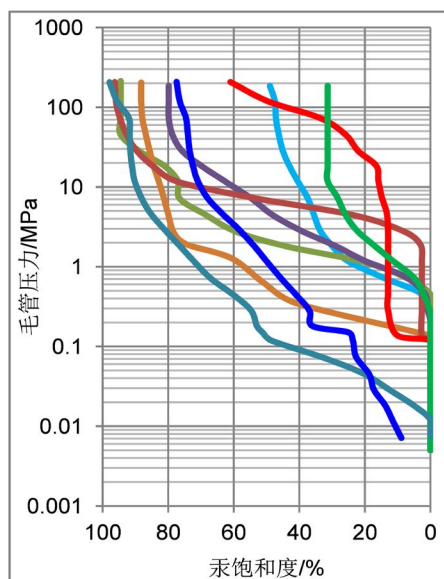


Figure 3. Summary of capillary pressure curve

图 3. 毛管压力曲线汇总图

空间的组合关系多样, 即有孔隙型、孔洞型、也有裂缝-孔隙型, 储层微观孔隙结构复杂, 非均质性强, 导致毛管压力曲线形态呈复杂多样(图 3)。

2.1. I 类储层

岩性主要为藻粘结白云岩、微-粉晶白云岩, 属于高孔, 中-高渗储层, 物性最好, 储集空间以藻间不规则溶孔、晶间溶孔、晶间孔等孔隙型为主(图 4), 镜下溶孔发育, 连通性较好, 分布均匀。

平均排驱压力 0.17 MPa, 最大孔喉半径 4.18 μm , 中值压力 1.95 MPa, 中值半径 0.38 μm , 进汞饱和度 91%, 分选系数 2.8。毛管压力曲线总体表现为“排驱压力低, 中值喉道半径大, 曲线平台特征明显, 分选性好, 进汞饱和度高, 有效连通孔隙体积占比较大”等特征(图 5)。

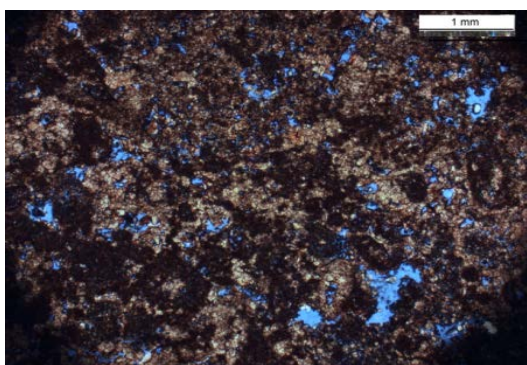


Figure 4. YaS1, 5785 m, bright algal dolomite
图 4. 亮晶藻粘结白云岩, 蓝色铸体, YaS1 井 5785 m

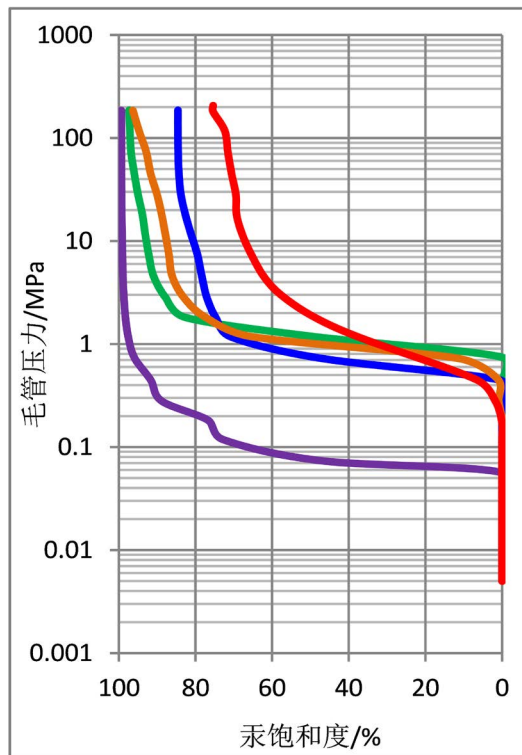


Figure 5. Typical capillary pressure curve of type I
图 5. I 类储层典型毛管压力曲线图

根据岩心 CT 扫描, I 类储层孔隙半径一般较大, 峰值只要集中 80~110 μm , 孔喉连通性较好, 渗透率较高, 其中 YS1 井, 6219 m, 藻纹层白云岩, 孔隙度 11.6%, 藻格架孔顺层发育(图 6 左), 同一连通孔喉系统用同一颜色表示, 配位数较高, 微观连通性好, 渗透率高达 127 mD。YaS1 井 5785 m, 微-粉晶白云岩, 溶蚀孔隙发育, 但岩心上下部非均质性较强(图 6 右), 孔隙度 18%, 渗透率 3 mD。

2.2. II 类储层

属于中孔、中-低渗储层, 物性中等, 岩性主要为藻粘结亮晶白云岩、微粉晶白云岩、含灰云岩等, 由三种储集空间组合形式(图 7), 储集空间类型以孔隙型为主, 裂缝-孔隙型储层和孔洞型储层次之。

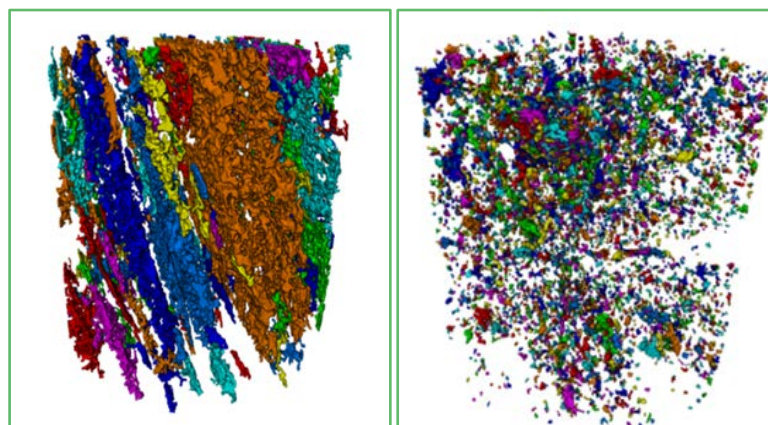


Figure 6. Typical capillary pressure curve of type I
图 6. I 类储层典型毛管压力曲线图

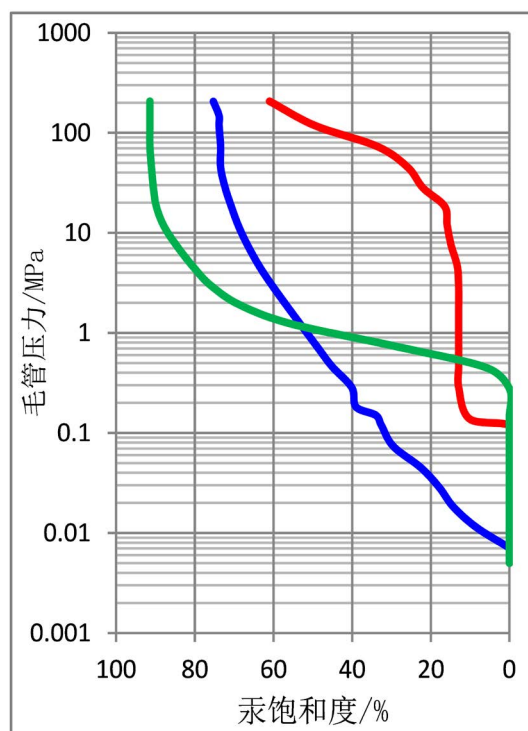


Figure 7. Typical capillary pressure curve of type II
图 7. II 类储层典型毛管压力曲线图

平均排驱压力 0.32 MPa, 最大孔喉半径 6.23 μm , 中值压力 19.7 MPa, 中值半径 0.42 μm , 最大进汞饱和度 80%, 分选系数 3.5。该类储层样品毛管压力曲线总体表现为“排驱压力差异较大, 中值喉道半径较小, 分选性中等 - 差, 歪度偏细, 进汞饱和度中等 - 好”特征, 毛管压力曲线明显分为三类, 其中绿色曲线代表孔隙型储层、蓝色曲线代表孔隙(洞)型储层、红色曲线代表裂缝 - 孔隙型储层。

孔隙型储层因其针孔状溶孔发育, 分布较均匀(图 8), 毛管压力曲线总体表现为“中歪度、分选性较好”特征, 曲线平台特征较明显, 虽然排驱压力相对较高, 但是中值喉道半径较大、进汞饱和度较高。

孔隙(洞)型储层因其溶蚀孔隙、孔洞较发育, 孔径大小不一(图 9), 毛管压力曲线总体表现为“中歪度、分选性较差”特征, 不具有曲线平台特征, 排驱压力非常低、中值喉道半径较大、进汞饱和度较高。

裂缝 - 孔隙型储层因其孔隙分布非均质强, 局部有孔洞和裂缝分布(图 10), 毛管压力曲线总体表现为“细歪度、分选性差”的特征, 不具有曲线平台特征, 排驱压力较高、中值喉道半径较小、进汞饱和度

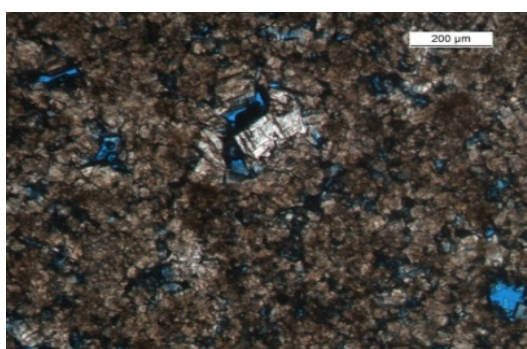


Figure 8. YaS1, 5775.74 m, Algal dolomite
图 8. YaS1 井, 5775.74 m, 含藻粉晶白云岩

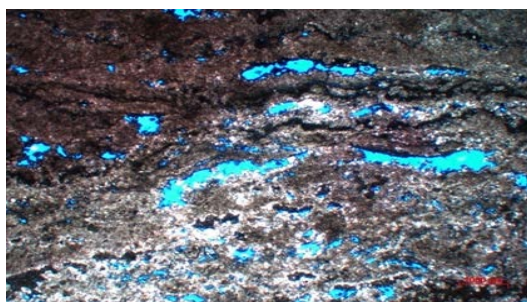


Figure 9. YS1, 6191.4 m, laminated dolomite
图 9. YS1 井, 6191.4 m, 纹层状粉晶白云岩

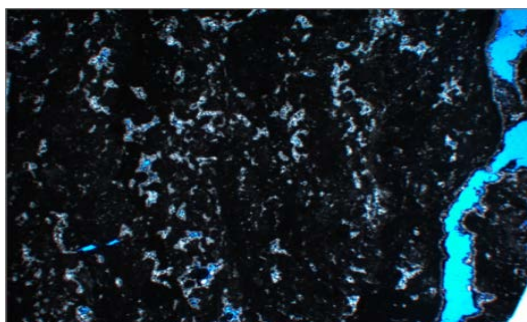


Figure 10. YaS1, 5779.92 m, algal dolomite
图 10. YaS1 井, 5779.92 m, 藻粘结白云岩

相对较低。

根据岩心 CT 扫描, II 类储层孔隙半径较小, 峰值主要集中在 30~70 μm , 孔喉连通性较差。其中 YaS1 井, 5768.6 m, 藻粘结白云岩, 孔隙度 6.14%, 溶蚀孔隙发育, 配位数较少, 局部发育的微裂缝改善了微观的连通性, 渗透率达到 3.39 mD (图 11)。

2.3. III 类储层

岩性主要为微晶白云岩、含灰云岩, 属于低孔、低渗储层, 储层类型以孔隙型为主, 其次裂缝-孔隙型储层也较发育。储集空间以晶间溶孔、晶间孔和微孔隙为主。

平均排驱压力 1.48 MPa, 最大孔喉半径 1.9 μm , 中值压力 23.1 MPa, 中值半径 0.056 μm , 最大进汞饱和度 68%, 分选系数 3.1。该类储层样品毛管压力曲线总体表现为“排驱压力高, 分选性中等-差, 歪度细, 进汞饱和度差异较大”特征, 曲线明显分为两类(图 12), 其中绿色曲线代表孔隙型储层、红色曲线代表裂缝-孔隙型储层。

孔隙型储层因其晶间孔、溶孔较发育, 孔径较均匀(图 13), 该类储层样品毛管压力曲线总体表现为“中-细歪度、分选性较好”特征, 曲线平台特征较明显。排驱压力较高, 中值喉道半径较小, 进汞饱和度较高。

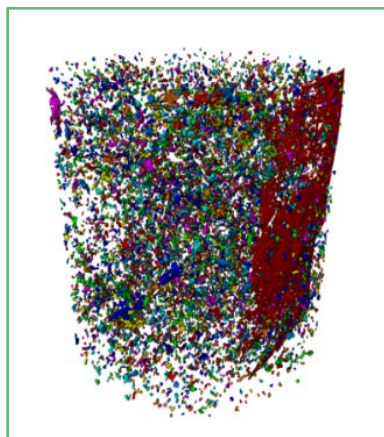


Figure 11. CT scan three-dimensional hole and throat connected graph of type II
图 11. II 类储层 CT 扫描三维孔喉连通图

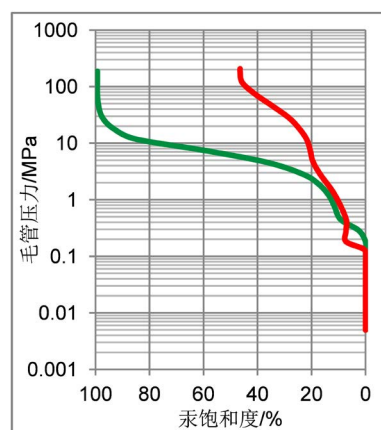


Figure 12. Typical capillary pressure curve of type III
图 12. III 类储层压汞曲线

裂缝 - 孔隙型储层因其孔隙分布非均质性较强, 局部有裂缝分布(图 14), 该类储层样品毛管压力曲线总体表现为“中 - 细歪度、分选性差”特征, 不具有曲线平台特征。排驱压力较高, 中值喉道半径较小, 进汞饱和度中 - 低。

根据岩心 CT 扫描, III 类储层孔隙半径较小, 峰值主要集中在 30~70 μm , 孔喉连通性较差, 其中 YaS1 井, 5768.5 m, 孔隙度 5.91%, 渗透率 0.053 mD (图 15)。

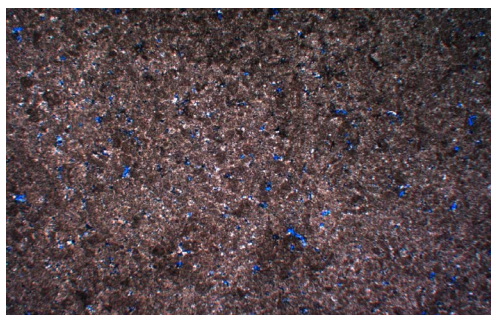


Figure 13. YaS1, 5778.22 m, porosity = 4.62%, permeability = 0.03 mD

图 13. YaS1 井, 5778.22 m, $\phi = 4.62\%$, $k = 0.03$ mD

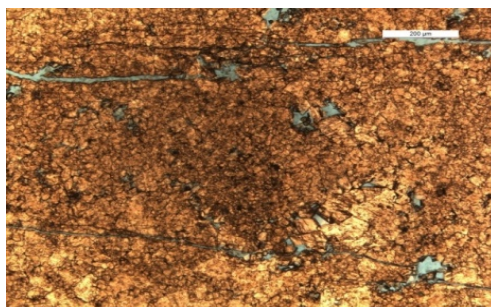


Figure 14. YaS1, 5795.7 m, porosity = 3.32%, permeability = 14.1 mD

图 14. YaS1 井, 5795.7 m, $\phi = 3.32\%$, $k = 14.1$ mD

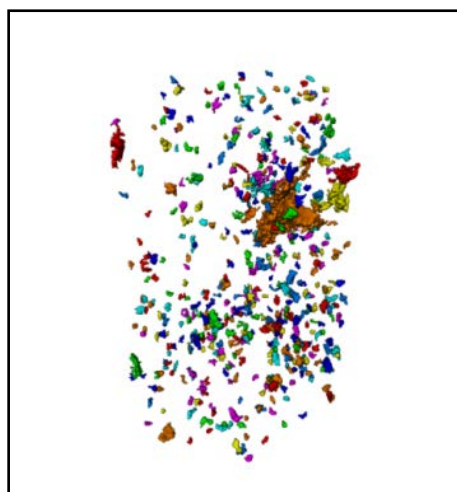


Figure 15. CT scan three-dimensional hole and throat connected graph of type III

图 15. III 类储层 CT 扫描三维孔喉连通图

3. 开发评价意义探讨

孔隙结构的性质对孔隙中流体的渗流特征具有重要的影响和控制作用，而压汞特征参数反映了岩石孔隙结构和渗流能力，相渗曲线的形态反映了气水两相的微观渗流机理。

3.1. 确定气藏原始含气饱和度

气藏原始含气饱和度是储量计算的重要基础参数。目前，国内外确定含气饱和度的方法主要有：① 利用油基泥浆或密闭取心直接测定岩心含气饱和度；② 用毛管压力曲线解释；③ 利用测井资料解释。其中第一种方法所获得的结果是现场第一手直接资料，第二种方法是通过确定束缚水饱和度间接求含气饱和度，前两种方法可作为第三种方法的解释依据，其中第一种方法成本较高，实施较少；而第二种方法是目前较为简易且较准确的方法。

根据 31 块岩心气水两相渗流实验统计表明，等渗点平均含水饱和度 86%，总体上岩心润湿性为强水湿。III 类储层等渗点含水饱和度 91.13%，II 类储层等渗点含水饱和度 82.27%，I 类储层等渗点含水饱和度 80.8%，说明随着孔隙度增大，等渗点含水饱和度减小。

在压汞实验中，对于岩石而言，水银为非润湿相，给一定的外加压力将水银注入岩样，当压力达到一定高度后，压力再继续升高，非润湿相饱和度增加很小或者不再增加，毛管压力曲线与纵轴近乎平行，此时岩样中的剩余润湿相饱和度，一般认为相当于油气层岩石的束缚水饱和度[7]。根据压汞实验数据统计可知，未饱和度分布范围较广，从 5%~70% 均有分布，呈单峰态，主要集中在 20%~30% (图 16)，I、II、III 类储层的岩心样品加权平均未饱和汞饱和度，即束缚水饱和度 28%，推算原始平均含气饱和度 72%，其中孔隙型储层含气饱和度最高，孔洞型、裂缝-孔隙型次之。

不同岩性未饱和汞饱和度，即束缚水饱和度存在一定差异，即使同属于白云岩大类也存在较大差异。根据 72 块岩心压汞实验统计表明，藻粘结白云岩未饱和汞饱和度相对较高(图 17)，在 2.09~74.89 之间，平均 33.76%，其次晶粒白云岩未饱和汞饱和度在 0.71%~53.58% 之间，平均 28.26%，含灰云岩未饱和汞饱和度在 1.88%~72.79% 之间，平均 22.98%，灰质云岩未饱和汞饱和度在 8.74%~98.97% 之间，平均 19.79%，云质灰岩未饱和汞饱和度最低，仅有 7.71%。

3.2. 评价储量动用难易程度

根据 71 块岩心压汞实验统计表明，不同类型储层孔喉体积比差异较大，孔喉体积比较大，微观连通

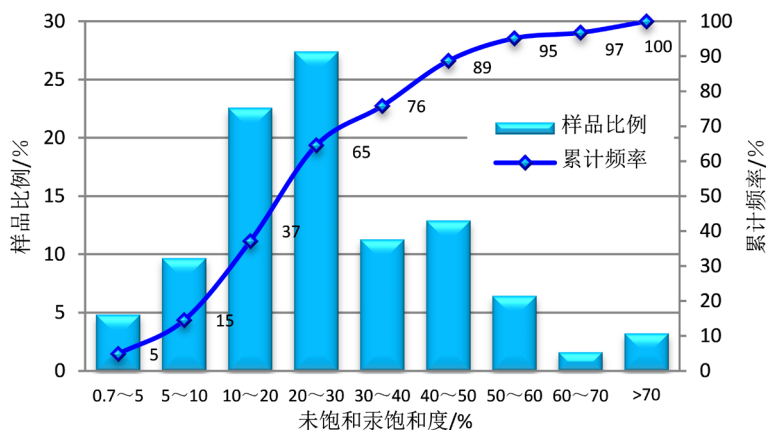


Figure 16. Non saturation distribution

图 16. 未饱和度汞饱和度分布图

性较差, 渗流阻力较大。平均孔喉体积比 10:1, 其中 I 类储层孔喉体积比相对较小, 仅有 6:1, II 类储层孔喉体积比在 0.04~68.24 之间, 平均 12:1, III 类储层孔喉体积比在 0.1~27.62 之间, 平均 8:1, 孔喉组合类型统计表明, 储层孔喉组合类型多样(图 18), 以中孔细喉型组合为主, 大孔中喉、中孔微喉、小孔细喉、大孔细喉、小孔微喉和微孔微喉次之。

退汞饱和度是喉道特征的直接反映, 而喉道控制微观孔隙之间的连通性和渗流能力, 对应的是可动用储量和产能。根据 78 块岩心压汞实验统计表明, 退汞饱和度整体偏低, 表明储量动用难度较大。I 类储层退汞饱和度相对较高, 达到 30.6%, 而储层以 II、III 类为主, 占样品总数的 90.6%, II 类储层退汞饱和度在 0.02%~94.5%之间, 平均 14.1%, III 类储层退汞饱和度在 0%~68.1%之间, 平均 18.4%, 微观非均质性强, 汞的连续性被破坏, 退出较少, 更多形成孤立状态的残余汞。

退汞效率对应毛细管效应的采收率, 根据 59 块岩心的退汞效率统计表明, 退汞效率分布范围较广, 但整体偏低, 表明储量动用程度低。退汞效率从 0%~99%均有分布, 小于 20%的样品占 67%, I、II、III 类储层加权平均退汞效率 30% (图 19), 总体偏低。不同岩性的退汞效率差异较大(图 20), 藻粘结白云岩退汞效率介于 0%~96.5%之间, 平均 27.9%, 含灰云岩退汞效率介于 0%~83%之间, 平均 28.5%, 晶粒白

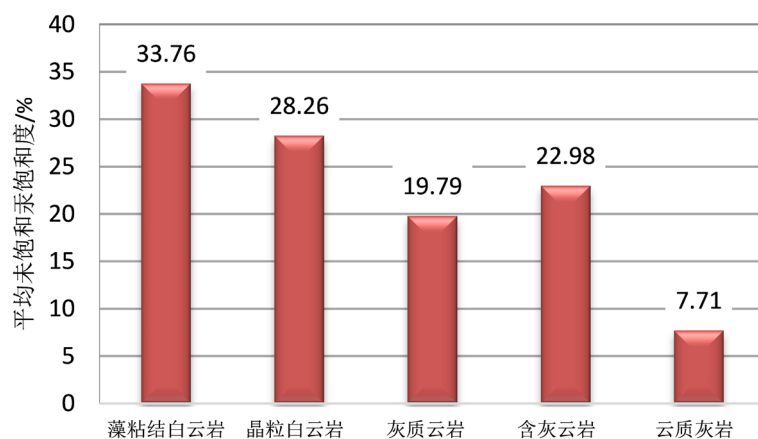


Figure 17. Histogram of average unsaturation mercury saturation of different lithology

图 17. 不同岩性平均束缚水饱和度直方图

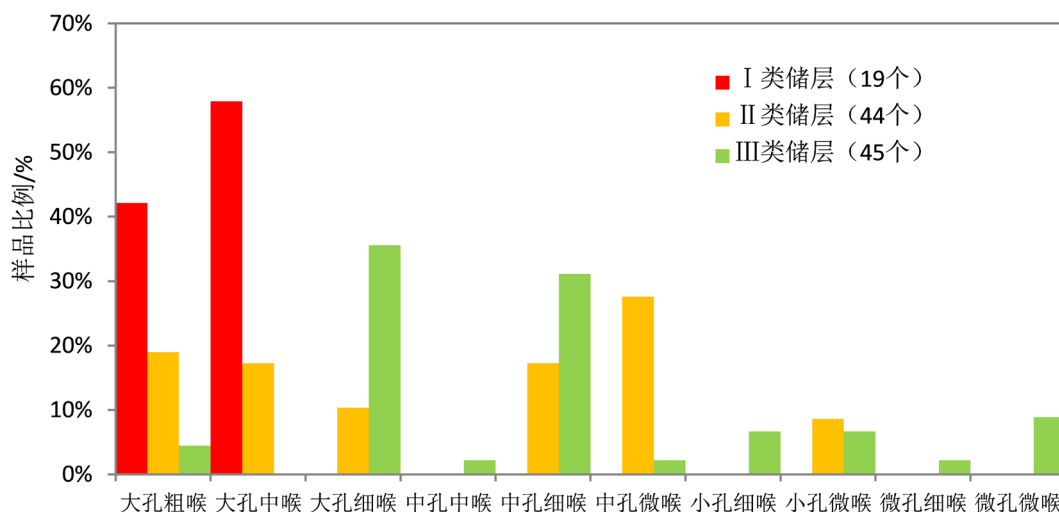


Figure 18. Composite distribution map of pore throat structure of different types of reservoirs

图 18. 不同类型储层孔喉结构组合分布图

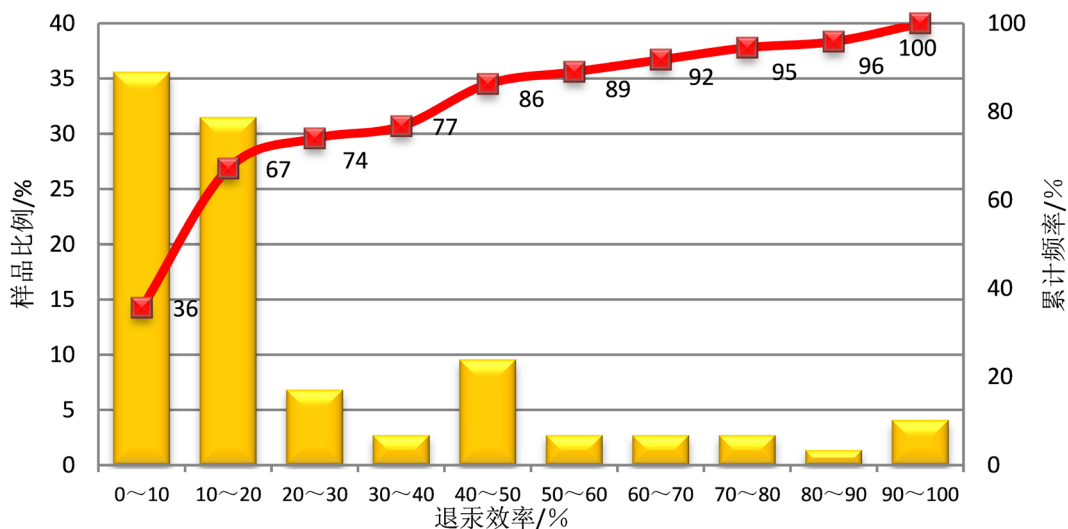


Figure 19. Distribution histogram of the efficiency of mercury regression

图 19. 退汞效率分布直方图

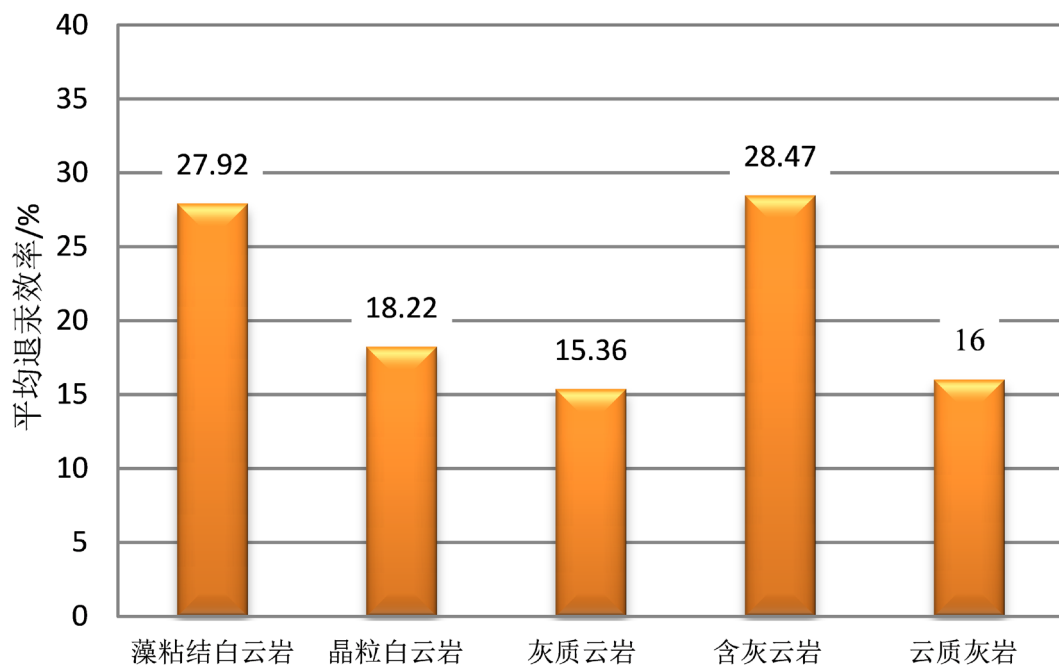


Figure 20. Distribution histogram of different lithologic mercury regression efficiency

图 20. 不同岩性退汞效率分布直方图

云岩退汞效率介于 0%~99%之间，平均 18.2%，灰质白云岩退汞效率介于 9%~26%之间，平均 15.3%。

3.3. 研究气藏类型及采收率

由于实验室测定条件与实际气藏条件存在流体体系、压力、温度等不同，在应用毛管压力曲线资料时，需要将室内压汞实验所测的毛管压力换算为气藏条件下的气-水毛管压力。在气水过渡带内，含水饱和度从浅至深逐渐增大，由束缚水饱和度升至 100%含水为止。将相同深度的相渗曲线与毛管压力曲线在相同流体饱和度条件下进行叠置，得出含气饱和度情况随深度的变化，结合气藏圈闭最高点深度即可计算气柱高度[8]。

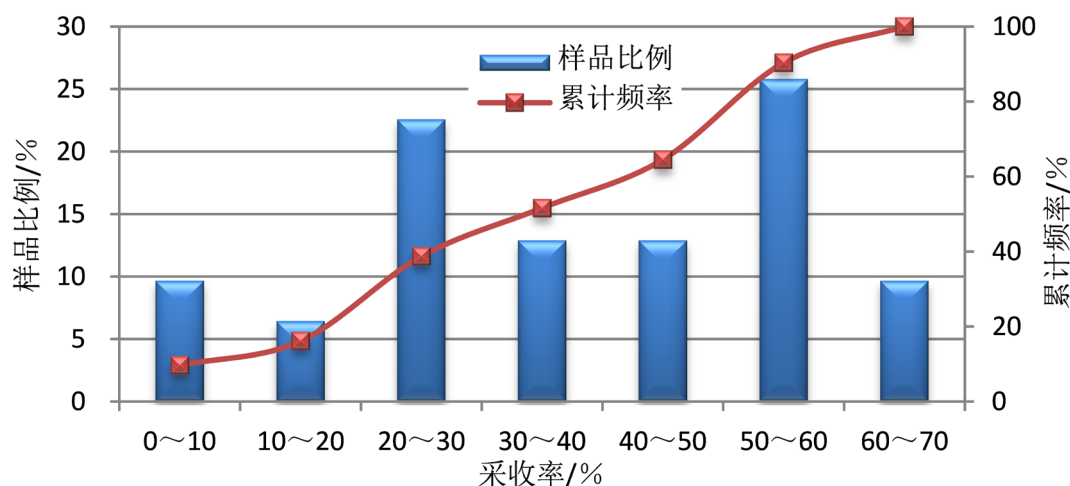


Figure 21. Distribution histogram of core phase permeability experimental recovery
图 21. 岩心相渗实验采收率分布直方图

研究表明该区雷口坡组气藏属于构造气藏, 预测构造低部位存在边水, 气水界面基本统一。南部 SYC 构造平均气柱高度 158 m, 北部 YZH 构造平均气柱高度 115 m, 两个局部构造的气柱高度均大于地层厚度, 但均小于圈闭的闭合幅度。

相渗实验表明气藏开发中后期水侵风险较大。I 类储层的气水流动能力最强, 表现为良好的渗流能力, 两相渗流区间最宽, 反映到开发上表现为气水同产期较长, 采出程度较高, II 类次之, III 类最窄。不同类型储层相渗曲线均表明等渗点后水相快速上升, 最终水相端点相对渗透率较高, 说明水相流动能力强, 局部微裂缝的发育加剧了边水的突进。

岩心相渗实验预测采收率总体较低, 不同储层类型差异较大, 总体上受控于储层物性。采收率介于 5.67%~67.3% 之间, 平均 40%。呈双峰态分布(图 21), 总体上孔隙度与采收率呈正相关关系, 其中 I、II 类储层采收率主要集中在 50%~60%, III 类储层采收率主要集中在 20%~30%。

4. 结论

1) 龙门山前雷口坡组储层的储集空间由不同尺度的溶孔、溶洞及裂缝构成, 由于各种储集空间的组合关系多样, 导致毛管压力曲线形态呈复杂多样, 而且不同储层类型的毛管压力曲线特征差异明显。

2) 储层孔隙结构的性质对孔隙中流体的渗流特征具有重要的影响和控制作用, 应用未饱和汞饱和度和孔喉体积比、退汞饱和度、退汞效率等孔隙结构特征参数, 结合气水相渗实验, 为储量评价、预测气藏高度和最终采收率提供了依据。气藏原始平均含气饱和度 72%, 储层孔喉比较大, 微观连通性较差, 退汞饱和度较小, 储量动用难度较大, 预测采收率 40%, 同时气藏均小于圈闭闭合幅度, 构造低部位存在边水, 开发中后期水侵较活跃。

基金项目

中石化“十条龙”科技攻关项目《龙门山前雷口坡组气藏勘探开发关键技术研究》, 编号 P16111。

参考文献

- [1] 李书兵, 许国明, 宋晓波. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 74-82.
- [2] 张涛. 川西龙门山前中三叠统雷口坡组储层特征[J]. 天然气技术与经济, 2012, 6(5): 15-18.

-
- [3] 罗啸泉. 川西龙门山前缘雷口坡组油气成藏条件[J]. 四川地质学报, 2012, 32(1): 32-35.
- [4] 彭靖淞, 刘树根, 张长俊, 等. 龙门山前缘中三叠统雷口坡组储集层成岩作用差异性[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 790-801.
- [5] 周进高, 辛勇光, 谷明峰, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探方向[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 16-19.
- [6] 汪华, 刘树根, 秦川, 等. 四川盆地中西部雷口坡组油气地质条件及勘探方向探讨[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 669-674.
- [7] 罗蛰潭. 油层物理[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 160-176.
- [8] 崔泽宏, 夏朝辉, 刘玲莉, 等. 应用毛管压力与相渗曲线研究复杂碳酸盐岩储层生产能力——以土库曼阿姆河右岸 M 区块气田为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 89-104.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org