

- gas bearing shale in Wufeng-Longmaxi Formation: a case study of JY11-4 Well[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(5): 1-5.
- [26] Guo T L, Zhang H R. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(1): 31-40.
- [27] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 31-40.
- [28] 庾秀松, 陈孔全, 罗顺社, 等. 渝东大焦石坝地区差异构造变形[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1074-1083.
- Tuo Xiusong, Chen Kongquan, Luo Shunshe, et al. Differential structural deformation of the Dajiaoshiba area, East Chongqing[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1074-1083.
- [29] 田鹤, 曾联波, 徐翔, 等. 四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 474-483.
- Tian He, Zeng Lianbo, Xu Xiang, et al. Characteristics of natural fractures in marine shale in Fuling area, Sichuan Basin, and their influence on shale gas[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 474-483.
- [30] 刘江涛, 李永杰, 张元春, 等. 焦石坝五峰组-龙马溪组页岩硅质生物成因的证据及其地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 34-41.
- Liu Jiangtao, Li Yongjie, Zhang Yuanchun, et al. Evidences of biogenic silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area and its geological significance[J]. Journal of China University of Petroleum( Edition of Natural Science ), 2017, 41(1): 34-41.
- [31] Dong T, Harris N B, Ayranci K et al. Porosity characteristics of the Devonian Horn River shale, Canada: insights from lithofacies classification and shale composition[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 141-142: 74-90.

(编辑 张亚雄)

## 北美页岩油气开发理论新进展

### ——干酪根纳米孔中甲烷运移机制新模型

美国页岩油气开发的最大挑战在于采收率实在太低,页岩油的采收率仅10%,页岩气采收率也不过20%。深入了解油气在页岩纳米孔中的运移机制从而制定出更合理的压裂方案成为提高北美页岩油气采收率的当务之急。

近期的相关研究表明,页岩纳米孔隙吸附气体时存在两种现象:一是被吸附在页岩干酪根纳米孔中的甲烷为多层结构,而不是业界之前普遍认为的遵循朗格缪尔吸附曲线的单层结构;二是其内存在毛管凝聚机制,即孔隙毛管力降低吸附物的蒸汽压力,使其在孔隙内壁形成一层液态膜。学界对这两种现象的物理过程都建立了模型,但直接用实验将之还原却有难度。

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室地球和环境科学部(Los Alamos National Laboratory's Earth and Environmental Sciences Division)的一个研究团队采用小角中子散射仪对马塞勒斯页岩样本中的甲烷运移开展了实验室研究,首次通过实验证实了页岩中纳米尺度孔隙变形的存在,并提出了高压下减压过程中干酪根纳米孔中甲烷的运移机制新模型。根据这个模型,干酪根吸附甲烷后导致孔隙基质膨胀,对其施加3 000 psi及以下压力时,干酪根保持相对机械弹性,孔隙基质发生可逆形变,压力下降时,甲烷可顺利从孔喉流出;但当施加的压力高于3 000 psi时(实验设计为6 000 psi),孔隙基质发生不可逆变形,卸压时孔喉收缩,甲烷被锁死在孔隙中。

这个研究表明,对页岩施压强度与天然气采收率并非正比关系,加压虽可开采出页岩中较大孔隙内的天然气,但对于纳米级孔隙中的天然气,适度的压力更有利于天然气的采出;超过一定压力界线时,高压反而导致孔隙基质发生不可逆形变,孔喉闭锁,大量天然气无法采出,而这类天然气约占页岩纳米孔隙体积的90%。该研究结论对制定更为合理的压裂方案和施压策略具有重要的参考意义。

相关论文2020年11月10日发表于可公开免费访问的《Nature》旗下杂志《Nature Communications》上:<https://www.nature.com/articles/s43247-020-00047-w#code-availability>

(供稿 卢雪梅)