

渗流介质对渗透率测试结果的影响

车廷信^{1,2}, 王学武³, 田文博¹, 战剑飞⁴, 韩雪⁴

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 北京中安盛泰科技有限公司, 北京 100083
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
4. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

摘要 分别利用氮气与氦气, 采用不同的驱替压差对不同渗透率级别的特低渗岩心进行渗透率测试, 并且分析了不同渗流介质的滑脱效应对渗透率测试结果的影响。实验结果表明: 利用氦气和氮气测试岩石渗透率, 均存在滑脱效应; 相同孔隙压力下利用氦气测得的渗透率均大于氮气测得的渗透率, 二者之间具有较为明显的差别, 岩心孔隙压力越小, 两种气体测试的渗透率差别越大, 这表明在低压测试渗透率时, 氦气由于分子直径较小, 自由程大, 引起的滑脱效应对渗透率的贡献较大; 岩心渗透率越低, 渗透率受滑脱效应的影响越显著。

关键词 滑脱效应; 氦气; 克氏渗透率; 驱替压力; 渗流

中图分类号 TE312

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.35.002

Effect of Different Types of Seepage Fluid on Permeability

CHE Tingxin^{1,2}, WANG Xuewu³, TIAN Wenbo¹, ZHAN Jianfei⁴, HAN Xue⁴

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Beijing Zhonganshengtai Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei province, China
4. Exploration and Development Research Institution, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, Heilongjiang Province, China

Abstract Permeability is a crucial parameter to evaluate the ultra-low permeability reservoir. The permeability of ultra-low permeability core samples was tested by using both nitrogen and helium. The factors affecting permeability were analyzed, including fluid types, displacement pressure, slippage effect, and their interaction. The research indicates that slippage effect exists, when the permeability is tested by either nitrogen or helium, however, there are differences in the results. With the same displacement pressure, the permeability tested by helium is bigger than that tested by nitrogen, and the differences are even more significant for the lower pore pressure. It is indicated that when helium at low pore pressure is used for the test, the slippage effect makes a bigger contribution to the permeability, since the diameter of helium molecules are smaller, and the molecular free length is longer. Slippage effect is stronger, especially for the lower permeability core samples.

Keywords slippage effect; helium; Klinkenberg permeability; displacement pressure; seepage

0 引言

单相气体在致密储层中低压渗流时存在滑脱效应, 岩心孔隙压力越小、岩心孔喉越细微, 则滑脱效应越强, 即岩心的

渗透率大小是与测试压力密切相关的, 其随测试压力的增大而减小。一般认为当岩心孔隙压力趋近于无穷大时, 气体分子的自由运动受到强烈限制, 其在岩心孔隙中的表现和液体

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-15

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-006); 中石油重点科技攻关项目(2011-13)

作者简介: 车廷信, 博士研究生, 研究方向为渗流机理、储层精细描述及地震解释, 电子邮箱: chetingxin@hotmail.com

类似,则滑脱效应的影响可以忽略不计,此时测试的渗透率即可认为是岩石的内在渗透率,即克氏渗透率^[1-2]。

根据单相气体在致密岩石中的渗流机制及滑脱效应理论,单相气体在岩心中渗流时测试的渗透率除了与岩心孔隙结构、孔隙压力有关外,还与渗流介质有关^[3-5],本文采用氮气和氦气对7块不同渗透率级别的致密储层岩心分别进行渗透率测试实验,分析不同介质测试渗透率的差异及滑脱效应的影响。

1 Klinkenberg 滑脱效应理论

1941年,Klinkenberg利用Warburg的滑脱理论,并将多孔介质的孔隙空间假设为毛管束模型,结合岩心实验得出了气测渗透率 K_g 与绝对渗透率 K_∞ 的关系式^[1]:

$$K_g = K_\infty \left(1 + \frac{b}{p_m} \right) \quad (1)$$

其中, K_g 为视渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; K_∞ 为克氏渗透率或绝对渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; b 为滑脱因子,也称为克氏系数,MPa; p_m 为平均孔隙压力,MPa,等于岩心入口压力与出口压力的平均值。

式(1)解释了在相同孔隙压力条件下岩心气测渗透率大于液测渗透率原因,即气体低压下在岩心中渗流时滑脱效应对渗透率提供了一个附加贡献,从式(1)可以看出滑脱效应对渗透率的贡献率为 $\frac{b}{p_m}$ 。显然,在低压下,平均孔隙压力 p_m 相对较小,则滑脱效应对渗透率的贡献相对较大,即视渗透率与克氏渗透率差异较明显。但在高压下,岩心孔隙压力 p_m

很大,则滑脱效应对渗透率的贡献率 $\frac{b}{p_m}$ 就变得很小,岩心的视渗透率与克氏渗透率就较接近。因此,基于Klinkenberg方程,就可以通过测试不同孔隙压力下的视渗透率拟合岩心的克氏渗透率(绝对渗透率),获得与孔隙压力无关的岩石物性参数。

式(1)中滑脱因子 b 反映了单相气体在岩心中渗流时滑脱效应的强弱。滑脱因子越大,则表明岩心中的滑脱效应越显著,滑脱效应对渗透率的贡献越大,否则滑脱效应对渗透率的贡献较小。根据毛管束假设及热力学理论,滑脱因子 b 与相关参数的关系式为

$$b = \frac{4c\lambda}{r} p_m \quad (2)$$

其中, c 为比例因子,一般认为是一个常数,对测试结果不产生影响; λ 为气体分子的平均自由程, μm ; r 为岩心孔隙半径, μm 。

2 实验材料和方法

为了分析不同测试介质对渗透率的影响,选取了7块不同渗透率级别的低渗、特低渗致密储层岩心,分别进行常规气测渗透率、氮气克氏渗透率和氦气克氏渗透率测试。表1为7块岩心的常规物性资料,其中常规气测渗透率为净围压2MPa条件下使用氮气测试的常规渗透率,氮气与氦气克氏渗透率为分别使用氮气和氦气在不同孔隙压力下测试的视渗透率与平均孔隙压力倒数拟合的渗透率。

表1 实验岩心的常规物性资料

Table 1 Conventional physical properties for the laboratory core samples

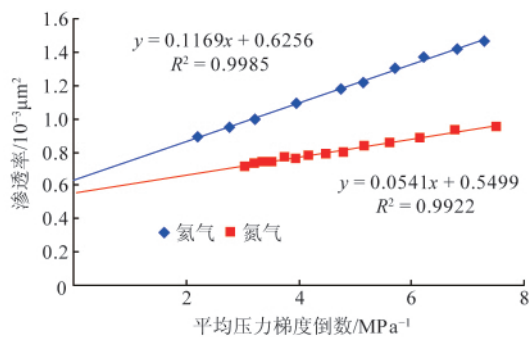
岩心号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	常规气测渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	氮气克氏渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	氦气克氏渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
C1	5.060	2.539	16.55	1.540	1.1841	1.2902
C2	5.040	2.544	16.64	0.754	0.5499	0.6256
C3	5.033	2.537	15.43	0.567	0.4098	0.4827
C4	5.020	2.537	15.29	0.428	0.0677	0.084
C5	5.025	2.539	10.45	0.171	0.1043	0.1121
C6	4.468	2.519	11.29	0.334	0.1327	0.1546
C7	4.843	2.511	8.63	0.040	0.0095	0.0116

渗透率测试在连接有电子流量计和高精度压力控制系统的仪器上进行,岩样入口压力调节系统安装有电子传感器,可精确显示入口压力数据,电子传感器测量精度为0.001MPa,流量计测量范围为0—600mL/min,精度为0.01mL/min。按照岩样克氏渗透率测试行业标准SY/T 5336—2006岩心分析方法^[6]的要求,对岩心施加一定围压后测量不同入口压力下的渗透率,渗透率测试过程中始终保持岩样承受的净围压为2MPa。实验过程中,为了提高实验精度,并且准确界定滑脱段对应的渗透率与平均孔隙压力倒数的线性函数段压力范围,对每块岩心进行10—15个点的渗透率测试。

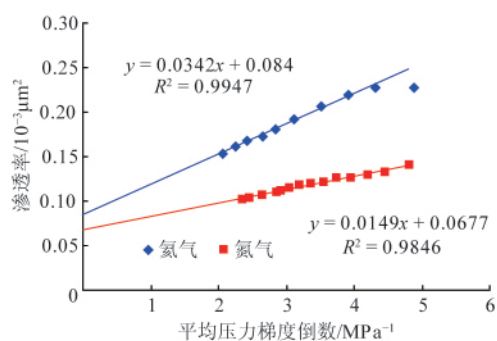
3 实验结果分析与讨论

3.1 不同渗流介质渗透率测试结果差异性

图1为C2、C4两块不同渗透率岩心的氮气与氦气渗透率对比。从图中可以看出,不同渗透率岩心在不同驱替压力范围内测试的氦气渗透率均大于氮气渗透率,驱替压力越小(平均孔隙压力倒数越大)则氦气与氮气渗透率的差别越大,说明在较低的孔隙压力下,由于氦气分子直径较小,引起的滑脱效应对氦气渗透率的贡献较大。当驱替压力增大后(平均孔隙压力较小),氦气与氮气视渗透率的差别减小,说明在孔隙压力增大后气体分子平均自由程均有不同程度的减小,



(a) C2



(b) C4

图 1 岩心氮气与氦气克氏渗透率对比

Fig. 1 Comparison of Klinkenberg permeability between nitrogen and helium of cores

滑脱效应对视渗透率的贡献率减小。拟合克氏渗透率斜率中氦气测试结果的直线斜率大于氮气,即随着孔隙压力的增加(平均孔隙压力倒数减小),氦气测试的渗透率减小幅度大于氮气,表明孔隙压力增大对分子直径较小的氦气渗透率影响更为显著。

3.2 不同渗流介质滑脱效应对比

表 2 所示为实验测得的不同渗流介质的滑脱因子。从图 2 渗透率与滑脱因子关系可以看出,随着渗透率的降低,滑脱因子变大,并且在半对数坐标下具有较好的线性关系。根据

表 2 不同渗流介质滑脱因子测试结果

Table 2 Test results of slippage effect for different seepage fluids

编号	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	$b_{\text{氦气}}$	$b_{\text{氮气}}$	$b_{\text{氦气}}/b_{\text{氮气}}$
C1	16.55	1.540	0.065	0.129	1.980
C2	16.64	0.754	0.099	0.187	1.882
C3	15.43	0.567	0.142	0.237	1.672
C4	15.29	0.428	0.219	0.407	1.860
C5	10.45	0.171	0.268	0.410	1.531
C6	11.29	0.334	0.254	0.386	1.520
C7	8.63	0.040	0.378	0.548	1.450

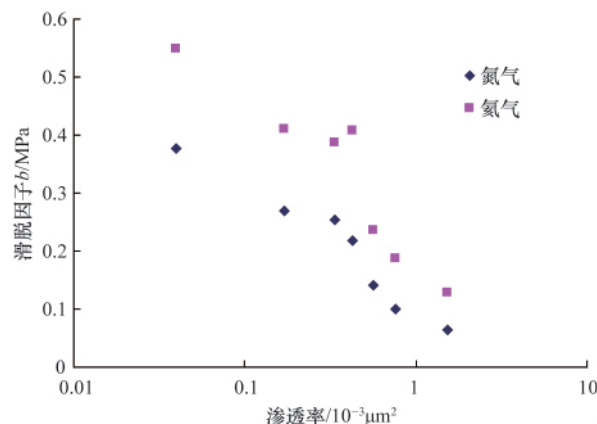


图 2 不同渗流介质滑脱因子

Fig. 2 Slip factors for different seepage fluids

分子自由程的定义^[7-8]可知,当气体分子的自由程小于孔隙直径时,常发生气体分子间的碰撞;而当分子自由程大于孔隙直径时,常发生气体分子与孔隙壁面之间的碰撞,因此渗透率越低的岩心,其孔隙直径越小,自由程大于孔隙直径的分子与岩壁碰撞对渗透率的贡献越大,滑脱现象愈显著。

从岩心利用不同渗流介质测得的滑脱因子来看,氦气的滑脱因子明显大于氮气的滑脱因子。根据实验数据,氦气的滑脱因子为氮气滑脱因子的 1.45—1.98 倍,平均为 1.70,并且其倍数与岩心渗透率没有相关关系。根据分子自由程理论,在相同的条件下,不同气体的分子自由程,主要取决于气体分子的直径,氦气分子直径小于氮气分子,因此其分子自由程大,滑脱效应也愈显著。

4 结论

(1) 相同净围压条件下,不同渗透率岩心氦气测试的渗透率均明显大于氮气渗透率,岩心孔隙压力越小,两种气体测试的渗透率差别越大,反之,则差别越小。

(2) 岩心渗透率越低,驱替压力对渗透率的影响越大,其滑脱效应越显著,并且滑脱因子与渗透率在半对数坐标下具有较好的线性关系。

(3) 氦气分子直径小于氮气分子,因此其分子自由程大,滑脱效应也愈显著,氦气的滑脱因子明显大于氮气的滑脱因子,氮气的滑脱因子为氦气滑脱因子的 1.45—1.98 倍,平均为 1.70 倍。

参考文献 (References)

[1] 何更生. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 34-38.
He Gengsheng. Petrophysics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 34-38.

[2] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学 [M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 105-108.
Qin Jishun, Li Aifen. Petrophysics[M]. Dongying: University of Petroleum

- Press, 2001: 105-108.
- [3] 薛定谔 A E. 多孔介质中的渗流物理[M] 王鸿勋, 张朝深, 孙书深, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982: 43-44.
Scheidegger A E. The physics of flow through porous media [M]. Wang Hongxun, Zhang Chaochen, Sun Shuchen, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 43-44.
- [4] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44-47.
Zhu Guangya, Liu Xiangui, Li Shutie, et al. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(5):44-47.
- [5] 罗瑞兰, 程林松, 朱华银, 等. 研究低渗气藏气体滑脱效应需注意的问题[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 92-94.
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Zhu Huayin, et al. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(4): 92-94.
- [6] 国家发展和改革委员会. SY/T 5336—2006 岩心分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
National Development and Reform Commission. SY/T 5336—2006 Practices for core analysis[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [7] 陈代询, 王章瑞, 高家碧. 渗流气体滑脱现象与渗透率变化的关系[J]. 力学学报, 2002, 34(1): 96-100.
Chen Daixun, Wang Zhangrui, Gao Jiabi. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(1): 96-100.
- [8] 霍凌婧, 杨正明, 张亚蒲, 等. 火山岩气藏滑脱效应影响因素研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 147-150.
Huo Lingjing, Yang Zhengming, Zhang Yapu, et al. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(1): 147-150. (责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“第四届全国岩土与工程学术大会”征文

中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和中国地质学会工程地质专业委员会将于2013年11月1日在杭州召开“第四届全国岩土与工程学术大会”。

征稿范围:岩土的基本性质与本构关系;岩土工程数值分析与仿真;边坡、基坑与地下工程典型案例;岩土力学实验研究方法;软土地基处理的新概念、新技术、新工艺;复杂地质条件下施工安全和工程稳定问题;岩土工程的加固与防护新理念、新方法、新技术;重大地质灾害形成机理预警与防治;环境友好的岩土工程技术;岩土文物的勘察与保护技术;岩土与工程技术应用的新领域;岩土工程风险评价与管理;其他。

全文截稿日期:2013年4月30日。

联系电话:0571-56738228。

通信地址:杭州市湖王路22号 国水电研网集团华东勘测设计研究院科技信息部(310014)。

电子邮箱:chen_p@ecidi.com。

大会网站:www.csrme.com/CN/News/2012-09/EnableSite_ReadNews36812321347897600.html。



《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。