

# 低渗砂岩气藏气体特殊渗流机理实验研究与分析

第六图书馆

针对渗透率低于 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 天然低渗透砂岩岩心,在改造的气体渗透率测定仪上进行含水岩样中气体渗流规律的室内实验。实验中运用微波法建立含水饱和度模型,通过在不同孔渗范围内的低渗岩样中进行气体渗流实验以达到研究气体特殊渗流机理的目的。研究发现,气体渗流受渗透率和含水饱和度的控制。在干燥和低含水饱和度状态下,气体渗流曲线呈上凸型,渗透率越小,受滑脱效应的影响越明显。随含水饱和度增大,渗流曲线由上凸型向下凹型转变,滑脱动力影响变小,毛细管力影响变大。复合型渗流曲线则完整反映了气体渗流的整个过程。本研究对制定低渗透气藏相关开发技术对策具有重要的指导意义。针对渗透率低于 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 天然低渗透砂岩岩心,在改造的气体渗透率测定仪上进行含水岩样中气体渗流规律的室内实验。实验中运用微波法建立含水饱和度模型,通过在不同孔渗范围内的低渗岩样中进行气体渗流实验以达到研究气体特殊渗流机理的目的。研究发现,气体渗流受渗透率和含水饱和度的控制。在干燥和低含水饱和度状态下,气体渗流曲线呈上凸型,渗透率越小,受滑脱效应的影响越明显。随含水饱和度增大,渗流曲线由上凸型向下凹型转变,滑脱动力影响变小,毛细管力影响变大。复合型渗流曲线则完整反映了气体渗流的整个过程。本研究对制定低渗透气藏相关开发技术对策具有重要的指导意义。低渗透气藏  
滑脱效应 启动压差 低速非达西渗流 含水饱和度特种油气藏刘晓旭 胡勇 李宁 朱斌中油西南油气田分公司,四川成都6100512007第六图书馆

第六图书馆

[www.6lib.com](http://www.6lib.com)

文章编号: 1006-6535(2007)01-0080-04

## 低渗砂岩气藏气体特殊渗流 机理实验研究与分析

刘晓旭, 胡 勇, 李 宁, 朱 斌

(中油西南油气田分公司, 四川 成都 610051)

**摘要:**针对渗透率低于  $10^{-3} \mu\text{m}^2$  天然低渗透砂岩岩心, 在改造的气体渗透率测定仪上进行含水岩样中气体渗流规律的室内实验。实验中运用微波法建立含水饱和度模型, 通过在不同孔渗范围内的低渗岩样中进行气体渗流实验以达到研究气体特殊渗流机理的目的。研究发现, 气体渗流受渗透率和含水饱和度的控制。在干燥和低含水饱和度状态下, 气体渗流曲线呈上凸型, 渗透率越小, 受滑脱效应的影响越明显。随含水饱和度增大, 渗流曲线由上凸型向下凹型转变, 滑脱动力影响变小, 毛细管力影响变大。复合型渗流曲线则完整反映了气体渗流的整个过程。本研究对制定低渗透气藏相关开发技术对策具有重要的指导意义。

**关键词:**低渗透气藏; 滑脱效应; 启动压差; 低速非达西渗流; 含水饱和度

**中图分类号:** TE135 **文献标识码:** A

### 前 言

在我国已发现的天然气气藏中, 有相当部分属于中、低渗储层, 其中低、特低渗气藏储量占已探明气藏储量的 1/4, 且这个比例正在以更快的速度上升; 另一方面, 随着我国天然气工业管理体制改革的深入, 天然气价格逐渐与世界市场接轨, 该类气藏开发的经济效益十分明显地显现出来。低渗透气藏储层往往是高含水储层, 含水饱和度一般在 40% 以上, 甚至高达 60%, 且孔喉细小, 毛管压力高, 势必造成该类气藏中气体渗流与中、高渗气藏

气体渗流规律不同, 具有独特的特征<sup>[1]</sup>。本文利用天然岩心进行系统的室内实验, 分析了滑脱效应和启动压差产生的条件及变化规律, 以及二者对低渗透气藏气体渗流的影响。

### 1 实验流程及方法

实验装置由气体渗透率测定仪改造而成, 实验采用气体渗透率测定中的经典方法——稳态法。岩样涵盖了不同孔渗范围, 均来自川西北白马场三叠系须家河组低渗透砂岩气藏。实验用水采用蒸馏水, 气体采用氮气, 实验流程见图 1。

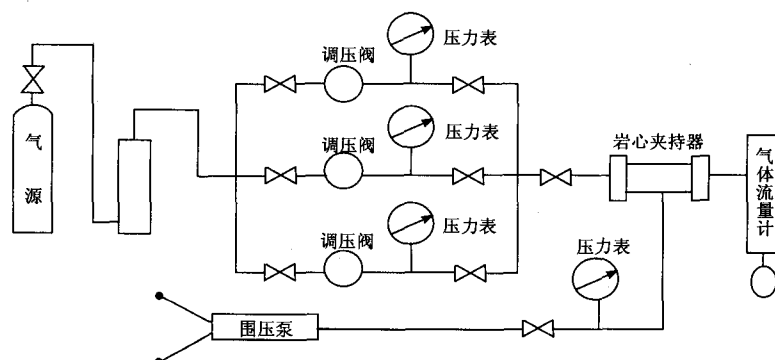


图 1 气体渗流实验流程

实验开始之前选取少量岩样分别运用微波法和气驱法建立岩样含水饱和度, 然后进行气体单相

收稿日期: 2006-03-07; 改回日期: 2006-12-20

基金项目: 本文为中国石油 2005 年重大开发试验项目“四川盆地须家河组重大开发试验方案”子课题部分研究成果 (项目编号: 20050305-17)

作者简介: 刘晓旭 (1976-), 男, 博士, 2005 年毕业于西南石油大学, 现从事油气田开发研究。

渗流实验。实验结果发现2次实验数据基本一致,这说明采用微波法代替气驱水法建立岩样含水饱和度的方法是可行的。由于气驱水法建立岩样含水饱和度花费时间过长,不利于大量实验研究的开展,而微波法能在较短时间内建立岩样含水饱和度,因此实验过程中采用微波法建立岩样含水饱和度。

## 2 实验结果分析

从实验结果中发现:当岩样绝对渗透率  $K > 10^{-2} \mu\text{m}^2$ ,  $S_w < 45\%$  时,气体渗流曲线为直线,符合达西线性渗流规律;当  $K > 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,  $S_w < 30\%$  时,

气体渗流为拟线性渗流,即渗流曲线为不通过坐标原点的直线;当  $K < 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时,含水岩样中的气体低速渗流有3种典型的渗流曲线。下面就  $K < 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时的低渗透砂岩岩样气体渗流实验进行分析研究。

### 2.1 气体单相渗流实验结果对比分析

图2为白马6井14-85/104号岩样在干燥状态( $S_w = 0\%$ )和低含水饱和度( $S_w = 25\%$ )状态下单相气体渗流曲线和克氏回归曲线。该岩样  $\phi$  为4.59%,  $K$  为  $0.00142 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为典型的低孔、低渗砂岩岩样。

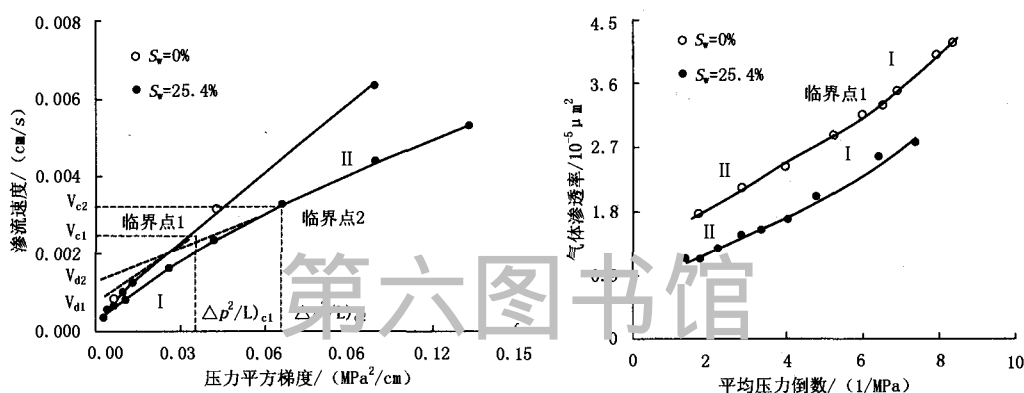


图1 14-85/104号岩样气体渗流曲线及克氏回归曲线

分析图2中的气体渗流曲线,可以发现2种含水饱和度状态下气体渗流都具有非达西渗流特征:

(1) 气体渗流曲线由平缓过渡的2段组成: I为较低渗流速度下的上凸型曲线段; II为较高渗流速度下的拟线性渗流段。

(2) 在上凸型曲线段,随压力平方梯度的减小,曲线斜率逐渐增加,即气体渗透率增加,说明气体渗流受滑脱效应的影响增加,气体分子之间粘滞力的影响逐渐减小。上凸型曲线段与直线段的交点,是上凸型非线性渗流向线性渗流转变的标志,称之为临界点,该点由“临界压力平方梯度( $\Delta p^2/L$ )<sub>c</sub>”和“临界流速  $V_c$ ”共同控制<sup>[4]</sup>。

(3) 直线段向纵轴延伸,在流速轴上都有一正截距,称为“拟初始流速  $V_d$ ”,该值是滑脱动力大小的量度。低含水饱和度状态与干燥状态相比,气体“拟初始流速  $V_d$ ”更大,气体渗流受滑脱效应的影响更大。在低含水饱和度状态下,水膜能够比较均匀的分布,使岩石毛管半径变小。这与文献[2]、[4]中提到的“毛管越小(孔隙喉道越小),滑脱效应越大,气体分子热运动的平均自由程越大,滑脱效

应越大”相一致。

与气体渗流曲线中的 I、II 段相对应,克氏回归曲线同样由低平均压力下的直线段 I 和较高平均压力下的直线段 II 2 段组成。从 2 条克氏回归曲线可以看出,气体在较低速度下与较高速度下的渗流不完全一致,气体在较低压力梯度下作低速非线性渗流的 I 段内,渗透率随压力梯度的下降幅度比气体在较高压力梯度下作拟线性渗流的 II 段内渗透率的下降幅度要大,说明气体在较低速度下的渗流要比在较高速度下的渗流受滑脱效应的影响更加明显。

传统意义上的克氏回归曲线是在线性渗流基础上得到的,是一条直线,它只是克氏回归曲线中的 II 段,没有考虑气体在较低压力梯度下非线性渗流段 I 段的情况,因而不能全面反应气体渗流规律的变化特征。

### 2.2 不同含水饱和度下气体渗流实验结果对比分析

图3是白马6井12-59/116号岩样不同含水饱和度和时气体渗流曲线。该岩样  $\phi$  为4.78%,  $K$  为0.169

$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 实验过程中  $\Delta S_w$  为 1.6% ~ 3.3%。图中

虚线分隔的 2 部分显示出 2 种不同的渗流特征。

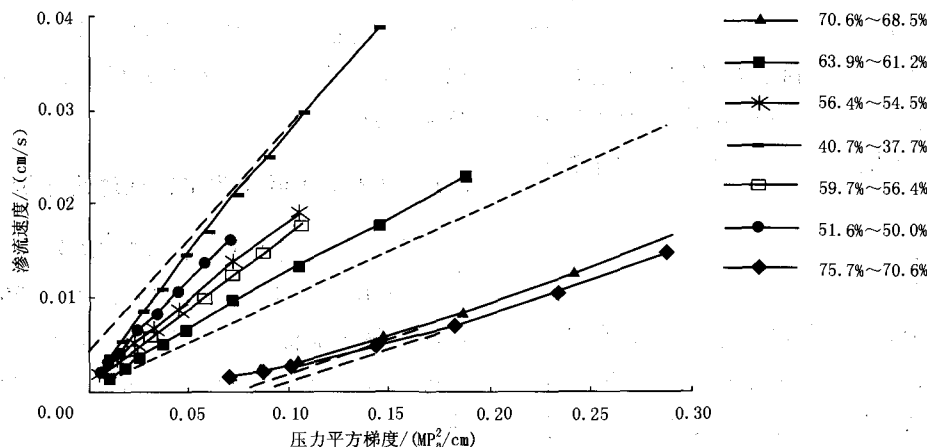


图3 12-59/116号岩样不同含水饱和度下气体渗流曲线

(1) 中虚线上部 I 区为  $S_w < 64.0\%$  时的气体渗流曲线。I 区内渗流曲线形态和趋势都相一致, 在压力平方梯度较小时呈上凸型, 压力平方梯度稍大时逐渐变为拟线性渗流。随含水饱和度的减小, “拟初始流速”减小, 曲线形态向通过原点的直线过渡, 说明受滑脱效应的影响变小, 含水饱和度在一定范围内变化不会影响气体的渗流规律。

(2) 中虚线下部 II 区为  $S_w > 68.5\%$  时的气体渗流曲线。II 区内渗流规律明显与 I 区不同, 曲线在较低压力梯度时呈下凹型, 压力梯度较高时呈线性, 存在“启动压差”。随含水饱和度的增大, “启动压差”增大。此时微小的含水饱和度变化会改变气体渗流, 这显然是气、水两相流动造成的<sup>[6]</sup>。

(3) 从图 3 中还可以发现, 对于不同含水饱和度和状态下的低渗岩样, 线性渗流只适用于很小的含水饱和度范围内。

气液两相共存而产生的毛细管力会导致喉道控制作用, 靠附着力或毛细管力滞留在孔隙中的薄膜水增加了气体渗流阻力<sup>[7]</sup>。虽然气体滑脱效应提供了气体渗流的附加动力, 但当束缚水饱和度较高时, 气体滑脱动力小于附加的气体渗流阻力, 导致气体渗流曲线与液体渗流曲线相似。

### 2.3 特殊岩样气体渗流实验结果分析

实验数据分析过程中发现了一种结合上凸型和下凹型 2 类渗流特征的特殊渗流曲线, 称之为气体复合型渗流曲线。图 4 为白马 6 井 12-37/116 号岩样的渗流曲线和克氏回归曲线。岩样  $S_w$  为 47.2% ~ 48.4%,  $\Delta S_w$  为 1.2%,  $\phi$  为 3.02%,  $K$  为  $0.00856 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

由图 4 可以看出该岩样的气体渗流具有以下特征:

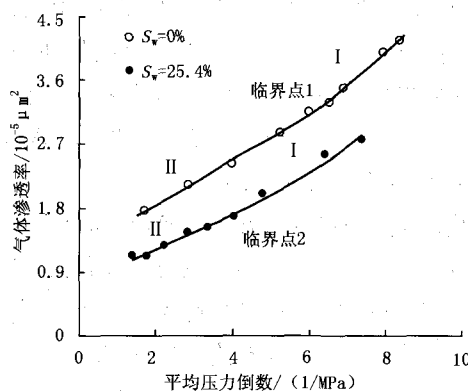
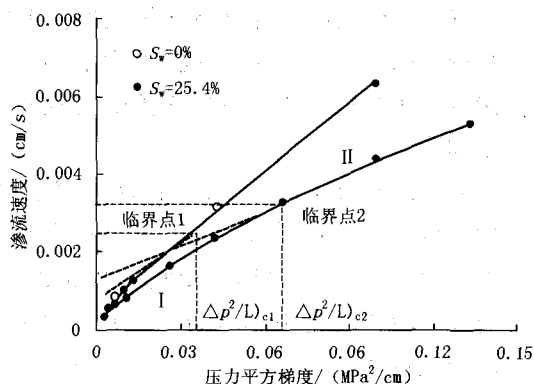


图4 12-37/116号岩样渗流曲线及克氏回归曲线

(1) 气体渗流曲线具有非达西渗流特征, 由 3 段组成: I 段为低速渗流时的曲线段, 大致呈下凹

型, II 为稍高流速渗流时的曲线段, 大致呈上凸型, III 为较高渗流速度下的拟线性渗流段。I、II 段之

间存在一个气体渗流的突变点,而Ⅱ、Ⅲ段曲线之间存在临界点。

(2) 在克氏回归曲线上可以清楚地看出,该曲线也表现了气体渗流的非达西渗流特征,曲线分为三段:Ⅰ段气体渗透率随压力的增大而增大,对应气体渗流曲线中的下凹型段;Ⅱ段随压力的增大,气体渗透率迅速下降,对应气体渗流曲线的Ⅱ段,表明受滑脱效应的影响明显;Ⅲ段表明气体渗透率随压力的增大下降幅度减缓,对应气体渗流曲线的Ⅲ段。克氏回归曲线中Ⅰ、Ⅱ段之间的突变点和Ⅱ、Ⅲ段之间的临界点表现的更加明显。

该岩样气体含水状态下气体渗流规律表明:地层水的存在使得地层中的气、水接触关系变得复杂,气体不仅与固体孔道壁接触,同时也与孔隙中的地层水接触<sup>[7]</sup>。在压力平方梯度较低时,气体必须克服束缚水所产生的毛管阻力才能保持连续流动,在渗流曲线上表现为启动压差,在气体渗流曲线上表现为Ⅰ段的下凹型,对应克氏回归线上的Ⅰ段则表现为随实验压力的增加,气体(视)有效渗透率增大。当实验压差高于突变点压差时,气、水两相接触状态发生变化,分布在较大喉道处封闭孔隙中气体的地层水逐渐变少,这部分地层水以水膜水的形式分布在孔隙壁上,或者以毛细管水状态充填那些更细小的毛细管中。此时,较大喉道中的气体渗流变得通畅。当相接触状态稳定以后,气体渗流受滑脱效应的影响,对应气体渗流曲线和克氏回归线上的Ⅱ段,表现为随实验压力的增加,气体(视)渗透率急剧减小。随着实验压力的不断升高,滑脱效应影响减弱,气体(视)渗透率的下降幅度变缓,对应气体渗流曲线和克氏回归线上的Ⅲ段,此时,气体分子之间的粘滞力的影响变得明显,其分界点就是临界点。因此,突变点的存在表征了孔隙中地层水的微观分布状态发生了细微变化,而临界点则区分了滑脱动力和气体分子之间粘滞力2种不同作用机制对气体(视)渗透率的影响,临界压力的高低反映了2种作用机制对气体渗流的影响程度。因此,该类气体渗流曲线(复合型曲线)真实反映了含水状态下低渗透砂岩气藏储层气体低速渗流的完整过程。

### 3 结论与认识

(1) 低渗透砂岩气藏中气体渗流特征与储层

渗透率、含水饱和度以及地层压力梯度大小密切相关,气体渗流曲线类型基本上可分为上凸型、下凹型和复合型。

(2) 在干燥状态和低含水状态下,岩样中气体渗流受滑脱效应的影响,呈上凸型,表现为存在“临界点”和“拟初始流速”,含水状态下气体渗流受滑脱效应的影响更加明显。

(3) 同一岩样在不同含水饱和度状态下气体渗流规律不同。在低含水饱和度下气体渗流曲线表现为受滑脱效应影响的上凸型特征,随压力平方梯度的增加,逐渐向拟线性渗流转变;在较高含水饱和度状态下表现为受启动压差影响的下凹型特征,随压力平方梯度的增加,也逐渐向拟线性渗流转变。因此,对于不同含水饱和度状态下的低渗透岩样,达西定律只适用于很小的含水饱和度范围内。

(4) 复合型气体渗流曲线中突变点的存在,表征了孔隙中含水的微观分布状态发生了细小变化,而临界点则区分了滑脱动力和气体分子之间粘滞力2种不同作用机制对气体(视)渗透率的影响,临界压力的高低反映了2种作用机制对气体渗流的影响程度。该类型的渗流曲线(复合型)更能够真实地反映含水状态下低渗透砂岩储层中气体低速渗流的完整过程。

### 参考文献:

- [1] 冯文光,葛家理. 凹型压力恢复曲线导数图版及其在致密气藏中的应用[J]. 天然气工业,1992,12(3):29~34.
- [2] 何更生. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社,1994:34~38.
- [3] 王炯,等. 基于稳定流法的低渗透储层渗流规律实验研究[J]. 特种油气藏,2005,12(5):93~98.
- [4] 王勇杰,等. 低渗透多孔介质中气体滑脱行为研究[J]. 石油学报,1995,16(3):101~105.
- [5] 李中锋,何顺利. 低渗透储层非达西渗流机理探讨[J]. 特种油气藏,2005,12(2):35~38.
- [6] 周小平,孙雷,等. 低渗透气藏水锁效应研究[J]. 特种油气藏,2005,12(5):52~55.
- [7] 吴英,宁正福,等. 低渗气藏非达西渗流实验及影响因素分析[J]. 西南石油学院学报,2004,26(6):35~39.

编辑 方 赞