

页岩气开发动态分析技术及应用

主要内容

一、概况

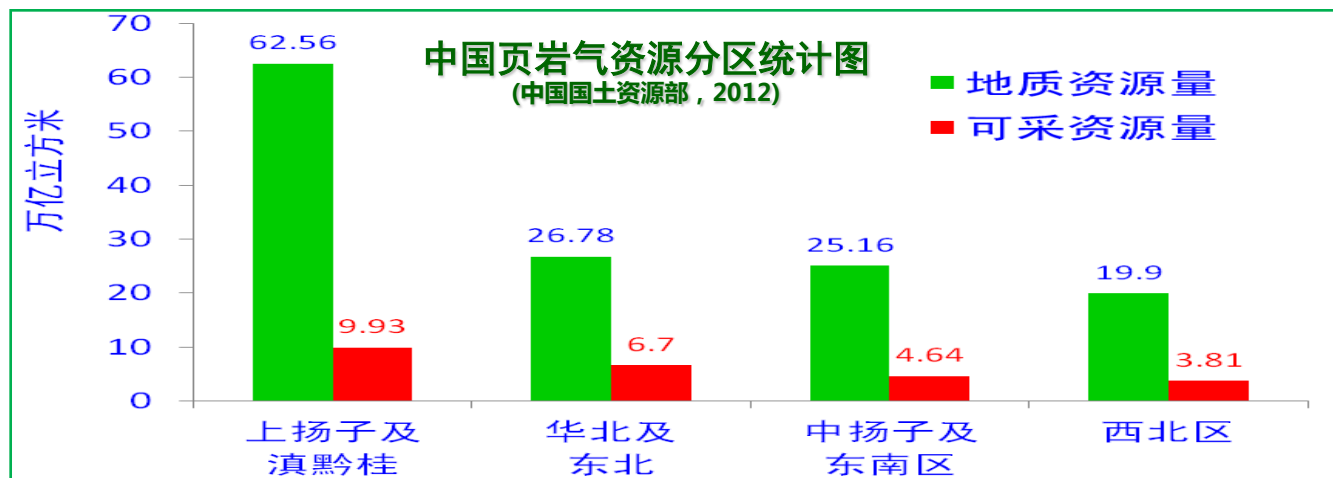
二、页岩气开发动态分析技术进展

三、下步研究方向

一、概况

1、我国页岩气资源丰富，勘探开发潜力大

我国页岩气潜力大，2012年 国土资源部牵头完成了我国页岩气资源评价工作，页岩气资源量达134万亿方，可采资源量25万亿立方米。国家高度重视页岩气资源开发利用工作，将页岩气开发作为国家能源战略，2011年以来相继出台了一系列促进、支持、鼓励页岩气开发的政策，2012年3月，规划提出了2015年我国页岩气产量65亿立方米；2015年，提出十三五末产量达到300亿立方米目标



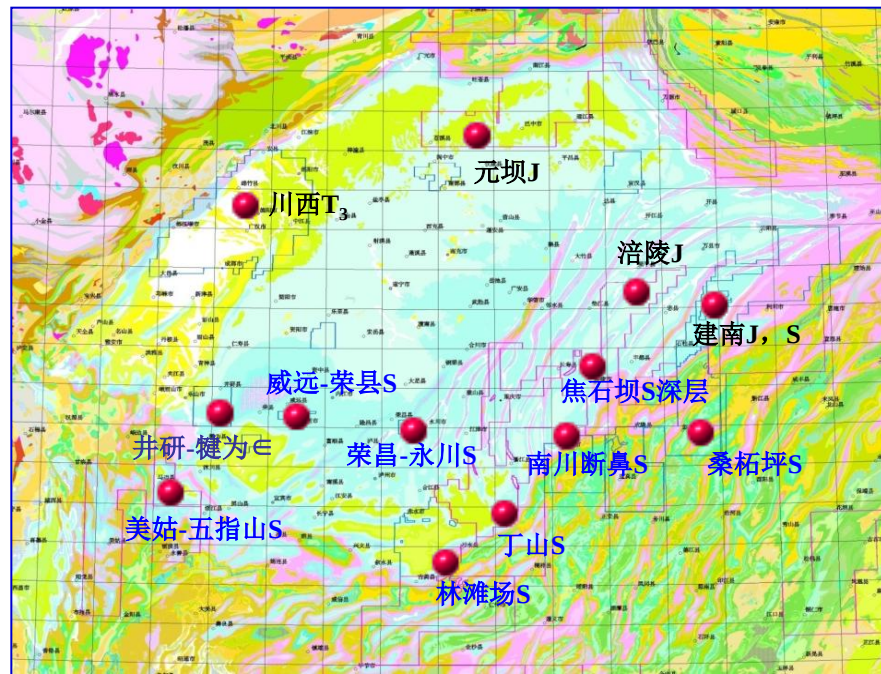
2、中国石化页岩气勘探开发情况

根据最新评价结果，中石化页岩气可采资源量7.23万亿方，其中四川盆地及其周缘占55%。截至2016年底，已建成涪陵页岩气田，发现荣昌-永川、威远-荣县、丁山、井研-犍为、彭水、武隆等多个有利区块。

◆涪陵页岩气田2014年启动产能建设工作，2015年底建成50亿方产能，累计建成产能70亿方，投产200多口井，累产气90多亿方；

◆四川盆地及彭水区块多口探井获突破，正对威远、永川、丁山等区块探井进行试采及开发早期评价；

◆中石化“十三五”期间在四川盆地及其周缘规划建产能100-150亿方。

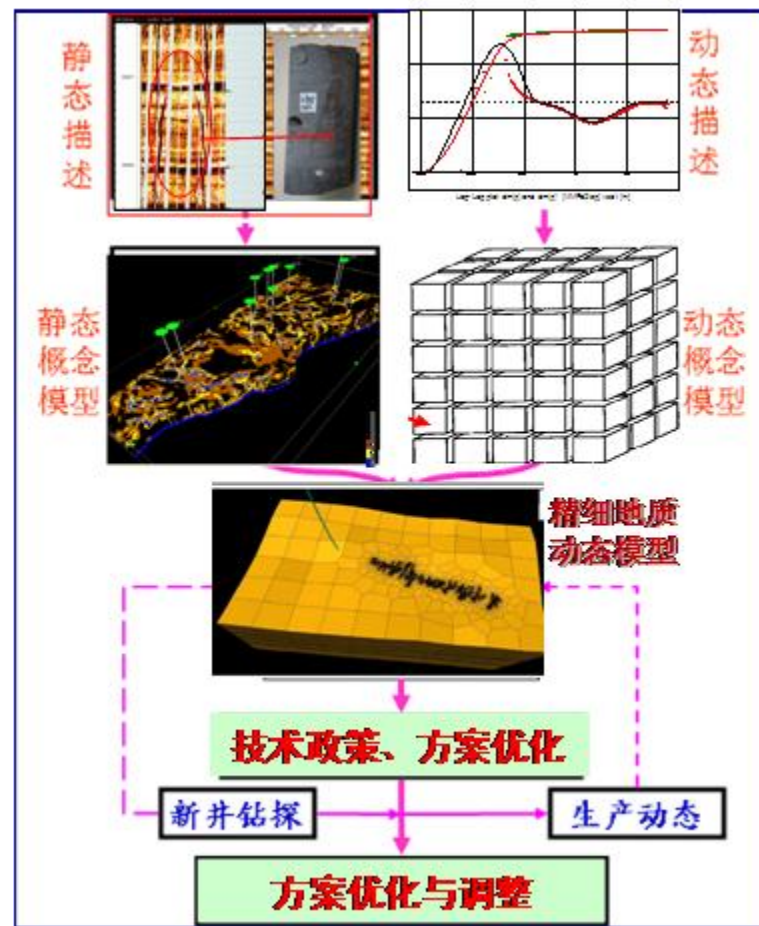


中石化页岩气矿权分布情况

3、气藏开发动态分析的主要任务和作用

依据单井测试及生产数据资料，应用动态分析技术，分析气藏的开采动态特点，研究不同开发阶段的主要矛盾，不断深化对气藏特征及其内在规律的认识；

实现气井/气藏开发动态可靠预测，同时为气田开发技术政策确定、开发方案的编制及后期调整提供依据。



多学科综合应用的油气藏分析和描述研究，是实现开发效益最大化的重要途径。

动态分析的具体内容

核心：准确认识地质与工程因素对气井产能及稳产能力的影响程度（**储层参数与类型，完井效果，井控范围与形态，气藏压力系统**）

➤单井分析

➤任务：影响气井产能主控因素+供气区形态特征

- ✓产能与稳产能力评价（**产能试井**）
- ✓完井措施效果评价（**压恢试井**）
- ✓提高产能潜力分析（**压恢试井**）
- ✓储层渗流及边界特征（**试井与生产分析**）
- ✓井控制储量评价（**试井与生产分析**）
- ✓纵向流体分布（**地层测试**）
- ✓产气剖面特征（**生产测井**）

➤气藏分析（多井分析对比）

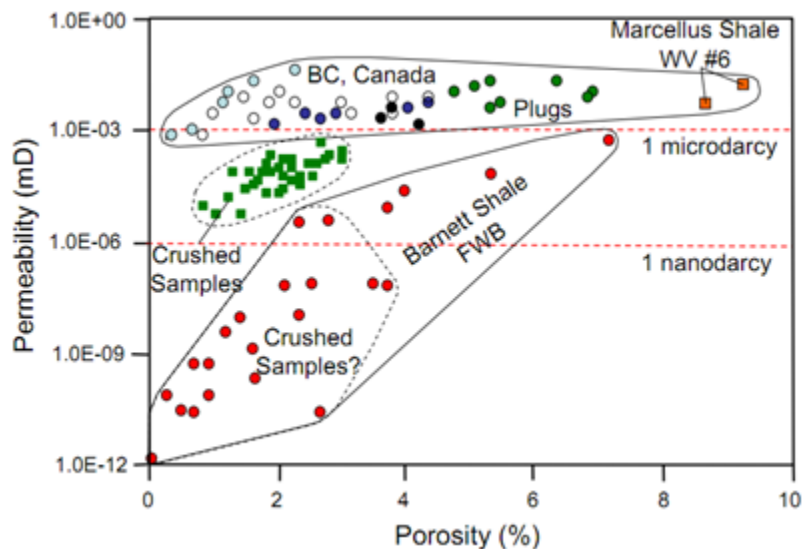
主要内容：有效储层连通性及展布特征

- 温压系统评价（**地层测试**）
- 气水界面确定（**地层测试**）
- 驱动类型分析（**地层测试、生产分析**）
- 储层连通性评价（**多井干扰试井**）
- 储量动用评价（**试井、生产分析**）
- 井型、井网适应性（**数值试井、数值模拟**）

4、页岩气藏地质与开发特征

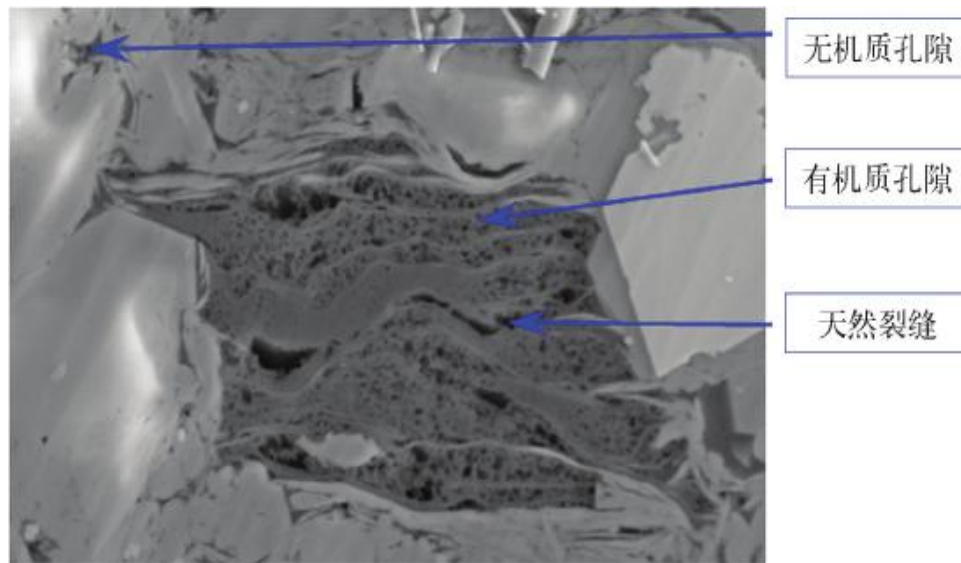
◆地质特征

- “生—储—盖”三位一体，无气水界面、大面积连续成藏
- 赋存状态：游离气、吸附气并存，游离气（~50%）；吸附气（~50%）
- 页岩储集空间复杂：存在有机孔、粒间孔、粒内孔和微裂缝
- 储集空间具有多尺度性质：存在纳米孔隙、微米孔隙、微裂隙、裂缝等
- 超低孔超低渗：渗透率在 10^{-9} – 10^{-3} md之间，孔隙度一般在1–6%



北美页岩气藏孔渗分布

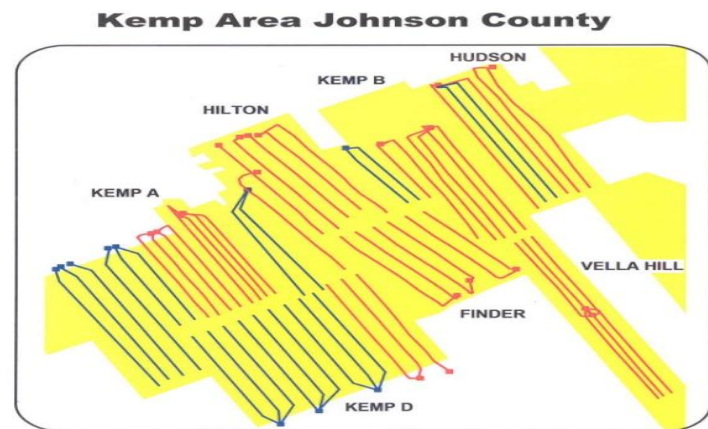
●微孔隙、裂缝：游离气； ●有机质：吸附气



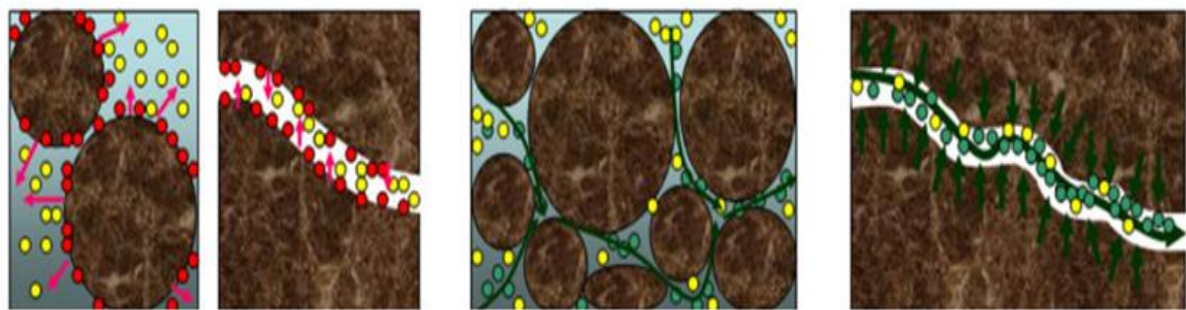
扫描电镜下的页岩储层微观孔隙结构

开发特征

- 流体运移机制复杂，解吸、扩散、线性渗流、非线性渗流共存。
- 无自然产能，多采用水平井+分段压裂方式开采
- 气井产量递减迅速，第一年50-80%；2-5年20%~40%，10年后年递减率小于5%，长期低产生产，生产周期长，可达30~50年。



页岩气开发“井工厂”模式

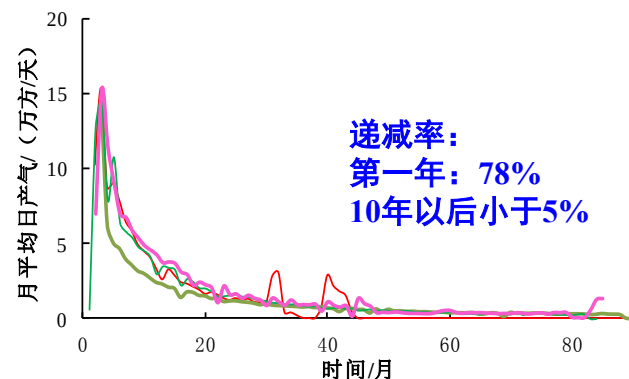


气体在基质裂缝和孔隙中解吸

解吸气和游离气在基质孔隙中流动

解吸气和游离气在裂缝中流动

● 吸附气 ● 游离气 ● 解吸气 → 解吸作用 → 游离气



Haynesville页岩气田气井生产特征

页岩气藏的特殊性决定了其认识和开发难度远高于常规气藏。

5、页岩气开发动态分析面临的主要难点

(1) 传统气藏工程方法以达西渗流为基础，页岩气不适用；

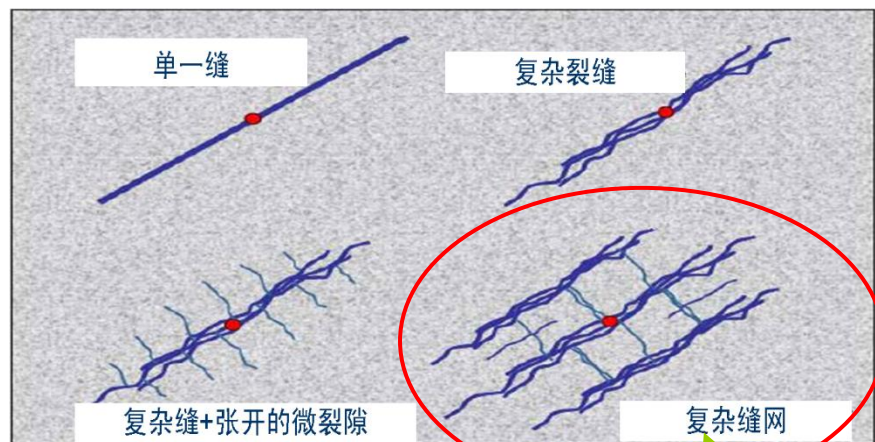
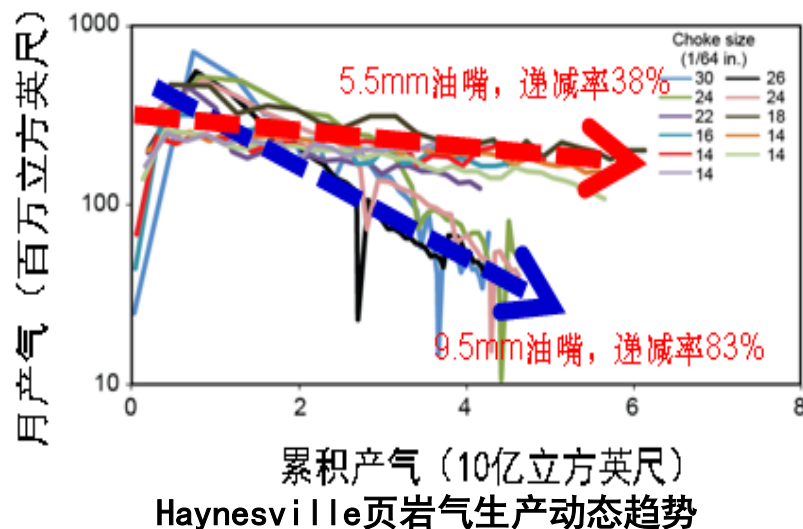
(2) 国内页岩开发刚起步，认识动态特征及开采规律存在技术瓶颈：

◆ 页岩气储集层多尺度孔缝介质描述及定量表征难度大；

◆ 目前对开采机理和流动规律认识不完全清楚，影响产能评价结果；

◆ 现有方法不完善，缺乏适应国内页岩气井生产方式的动态分析技术；

◆ 分段压裂水平井产能影响因素复杂，动态分析多解性强，难度大。



压裂后不同效果

人工控制实现

主要内容

一、概况

二、页岩气开发生态分析技术进展

三、下步研究方向

二、页岩气开发生态分析技术进展

涪陵页岩气的成功开发带动了国内页岩气开发研究的快速发展。中石化研究院依托科技部和生产项目，围绕页岩气开发基础理论、应用技术和涪陵页岩气产能建设，开展攻关研究，初步形成了动态分析技术。

动态分析技术：

- ◆页岩气特殊渗流实验评价技术
- ◆页岩气井关井压复试井和生产试井分析技术
- ◆页岩气多段压裂水平井产能评价和预测技术
- ◆页岩气井动态储量评价技术

解决：

- ◆页岩气吸附解吸、扩散、渗流特征和参数实验评价
- ◆页岩气储层和改造参数评价
- ◆页岩气井产能评价和动态特征分析
- ◆页岩气井压裂有效改造体积
- ◆页岩气开发生态指标预测

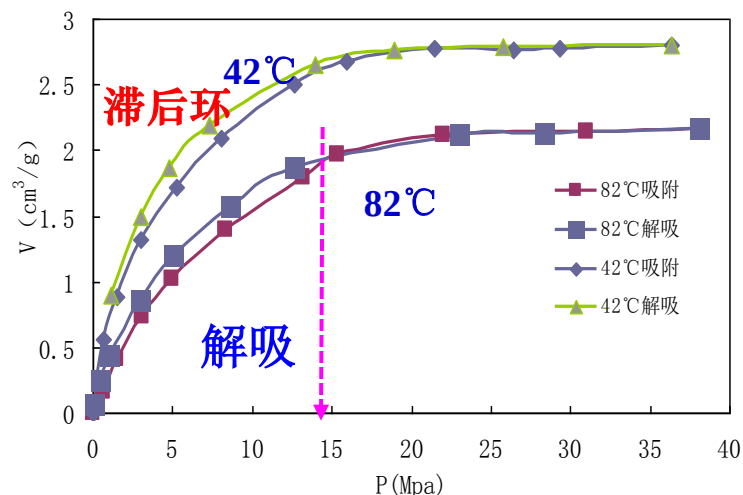
(一) 页岩气特殊流动机理实验分析及理论研究

1、 研制页岩气开发物理模拟实验装置，研究页岩气解吸、扩散、流动机理，为动态分析奠定理论基础。

◆全直径岩心模拟储层条件下吸附/解吸特征实验

➤地层条件测试的等温吸附曲线与常温条件下的差异较大，吸附解吸曲线基本符合兰格缪尔方程

➤温度越高，吸附量越低



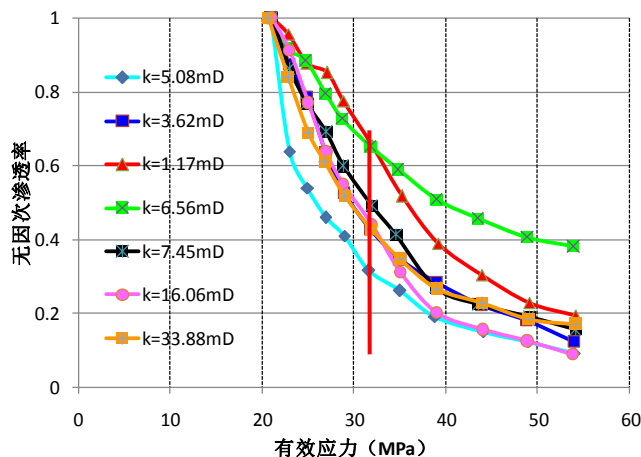
地层与常温等温吸附解吸曲线对比

◆单相气体低速渗流实验

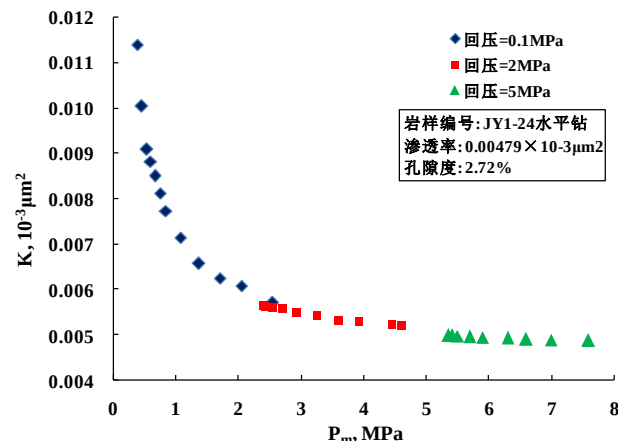
甲烷气体在低速渗流时表现出滑脱效应。

◆储层条件裂缝岩样应力敏感实验

页岩储层压裂缝应力敏感性较强，渗透率下降40-80%，开发过程中应合理控制生产压差。



压裂裂缝岩心渗透率变化曲线



渗透率随孔隙压力变化

◆页岩气扩散特征

气体在纳米级孔隙中主要：

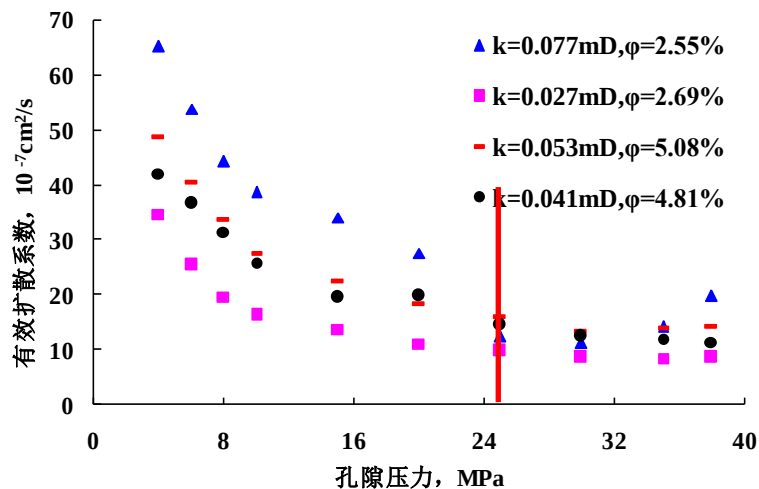
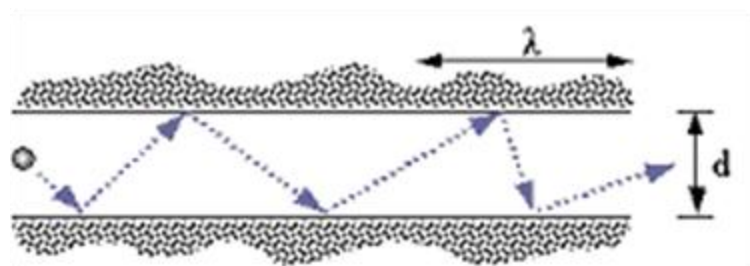
- Knudsen扩散：当孔隙直径很小时，气体的平均自由程与孔隙直径相近，分子碰撞孔壁产生的流动；
- 分子扩散：浓度差产生的扩散。
- 表面扩散：吸附气沿岩石表面扩散

Fick扩散定律：
$$N_k = -\frac{\rho_m D_m (\nabla \cdot p_m)}{p_m}$$

➤扩散实验

模拟地层条件，开展不同温度、压力和含水饱和度条件下的扩散实验。

- 扩散系数随孔隙压力增大而减小。
- 扩散系数随含水饱和度增加而降低
- 扩散系数随渗透率、温度的增加而增加



不同孔隙压力下的扩散系数图

2、页岩气在多尺度储层中的流动特征

Kn 范围	<0.001	$0.001 < Kn < 0.1$	$0.1 < Kn < 10$	$Kn > 10$
气体流态	达西流	滑脱流	过渡流	自由分子流 (努森扩散)

克努森数:

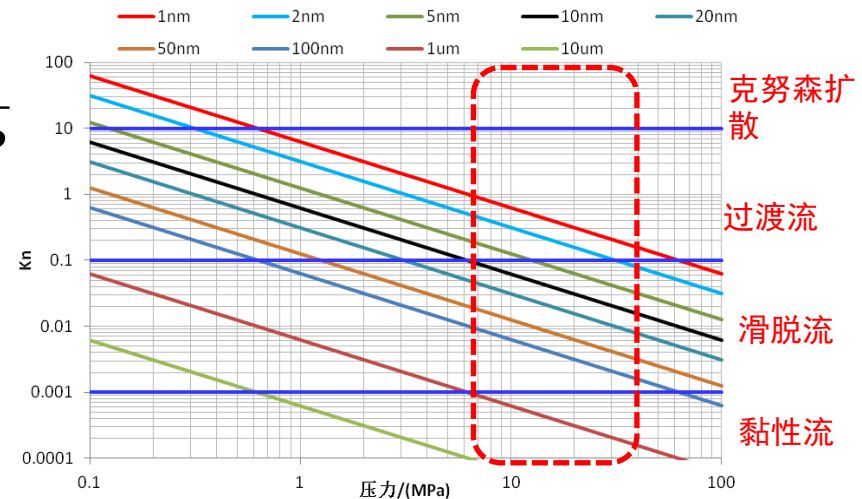
$$Kn = \frac{\lambda}{d} \quad \lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \delta^2 P}$$

理论计算表明:

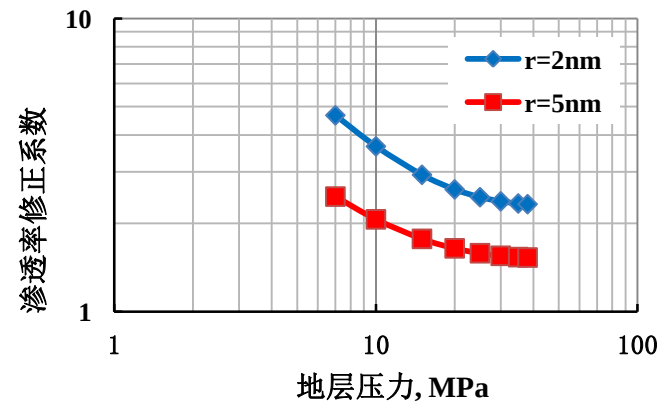
- ◆ 页岩气在大于1 μm 的孔径中, 为达西流
- ◆ $d > 100\text{nm}$ 的孔径, 主要是达西流, 存在滑脱
- ◆ $20\text{nm} < d < 100\text{nm}$, 以滑脱流为主
- ◆ $1\text{nm} < d < 20\text{nm}$, 处于滑脱及过渡流

扩散、滑脱导致表观渗透率增大, 渗透率模型:

$$K_g = K_\infty + \beta \frac{K_\infty \mu Z C}{0.70427 P \sqrt{K_\infty / \phi}} \sqrt{\frac{\pi R T}{2 M}}$$



不同孔径下Kn随压力变化图版



压力越低, 孔径越小, 克努森扩散引起的滑脱越明显, 对渗透率贡献越大。

3、建立页岩气在孔-缝介质中的耦合流动数学模型

考虑页岩气具有解吸、不稳态扩散和达西流等流动形式，建立了反应页岩气多种流动形式、在基质-裂缝双重介质下的流-固耦合数学模型，为页岩气动态分析方法研究奠定理论基础。

◆ 有机质表面解吸模型

$$V = V_L \frac{p}{p_L + p} \quad \text{兰格缪尔方程}$$

◆ 基质中不稳态扩散模型

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{1}{r_m^2} \frac{\partial}{\partial r_m} \left(D r_m^2 \frac{\partial C_m}{\partial r_m} \right)$$

➤ 基质中气体以粘性流和扩散运动进入裂缝：

$$V_m = V_m^p + V_m^c \quad V_m^c = -\frac{MD}{\rho_m} \frac{\partial C_m}{\partial r_m}$$

➤ 裂缝内气体在压力差驱动下流入井筒产出

$$V_m^p = -\frac{k_m}{\mu} \frac{\partial p_m}{\partial r_m}$$

◆ 基质系统不稳态解吸+扩散+达西渗流流动方程

$$\frac{1}{r_m^2} \frac{\partial}{\partial r_m} \left(r_m^2 \rho_m (V_m^p + V_m^c) \right) = \frac{\partial (\rho_m \phi_m)}{\partial t} + \rho_{sc} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{V_L p_m}{p_L + p_m} \right)$$

◆ 裂缝系统渗流方程

达西流

扩散

解吸

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{fh} \frac{p_f}{\mu Z} \frac{\partial p_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{fh} \frac{p_f}{\mu Z} \frac{\partial p_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{fv} \frac{p_f}{\mu Z} \frac{\partial p_f}{\partial z} \right) - \frac{3k_m \beta_m}{R} \frac{p_f}{\mu Z} \frac{\partial p_m}{\partial r_m} \Big|_{r_m=R} = \phi_f c_{gf} \frac{p_f}{Z} \frac{\partial p_f}{\partial t}$$

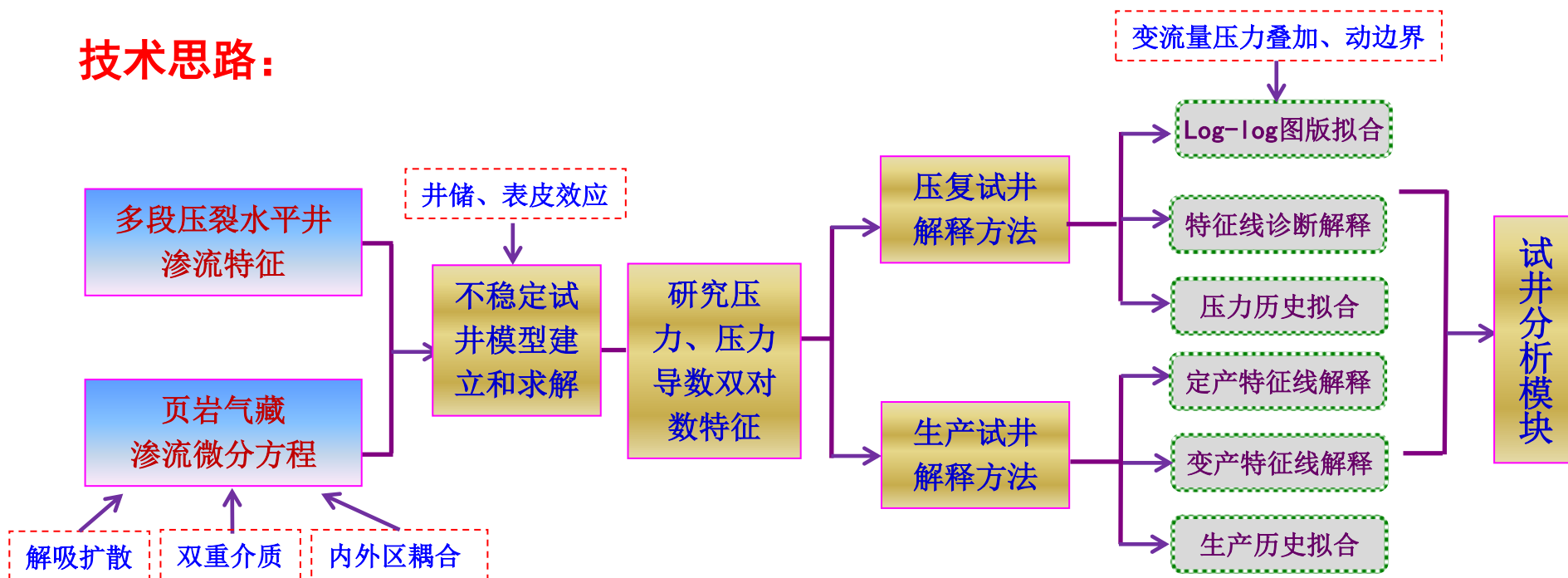
反映页岩气多种流动形式、双重介质下流-固耦合数学模型

(二) 页岩气压裂水平井关井恢复和生产试井分析技术

试井分析技术：基于测试的气井压力、产量等随时间变化关系的资料，运用试井理论方法进行分析，研究认识储层的地层参数、措施效果及生产能力的技术。

目前国内外没有成熟的页岩气多段压裂水平井不稳定试井分析技术。

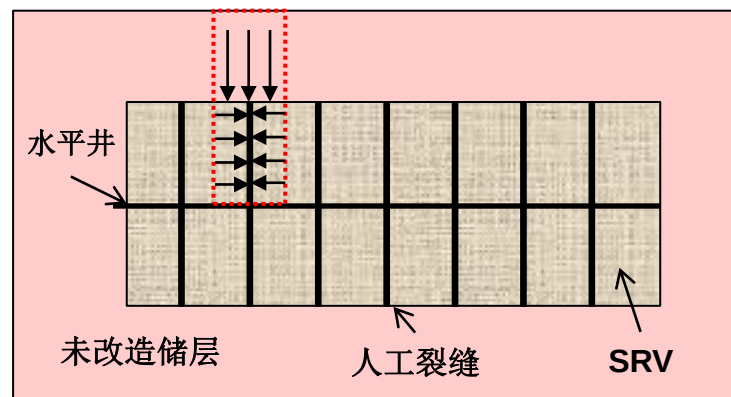
技术思路：



1、页岩气压裂水平井关井恢复不稳定试井分析方法

(1) 页岩气压裂水平井不稳定试井分析模型

模型特点：考虑井储-表皮效应，吸附气解吸、非稳态扩散；内区为裂缝-孔隙双重介质；只有主压裂裂缝与水平井筒沟通，且主裂缝有限导流。



物理模型简化示意图

$$\begin{array}{ll}
 \text{外区} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \bar{\psi}_{2FD}}{\partial x_D^2} = F_2(s) \bar{\psi}_{2FD} \\ \frac{\partial \bar{\psi}_{2FD}(x_{eD}, s)}{\partial x_D} = 0 \\ \bar{\psi}_{2FD}(x_D = 1, s) = \bar{\psi}_{1FD}(x_D = 1, s) \end{array} \right. & \text{内区} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{M_{12}} \frac{\partial \bar{\psi}_{2FD}}{\partial x_D} \Big|_{x_{1D}} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}_{1FD}}{\partial y_D^2} = F_1(s) \bar{\psi} \\ \frac{\partial \bar{\psi}_{1FD}(y_{eD}, s)}{\partial y_D} = 0 \\ \bar{\psi}_{1FD}(y_D = w_{FD}/2, s) = \bar{\psi}_{FD}(y_D = w_{FD}/2, s) \end{array} \right. \\
 \text{主压裂缝区} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \psi_{FD}}{\partial x_D^2} + \frac{2}{F_{CD}} \frac{\partial \psi_{1FD}}{\partial y_D} \Big|_{y_D = w_{FD}/2} = \eta_{1F} \frac{\partial \psi_{FD}}{\partial t_D} \\ \frac{\partial \psi_{FD}(x_D = 1, t_D)}{\partial x_D} = 0 \\ -1 = \frac{F_{CD}}{\pi} \frac{\partial \psi_{FD}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = 0} \end{array} \right. &
 \end{array}$$

得到井底流压解：

$$\bar{\psi}_{wFD} = \frac{\pi}{F_{CD} s \sqrt{f_F(s)}} \frac{1}{\tanh(\sqrt{f_F(s)})}$$

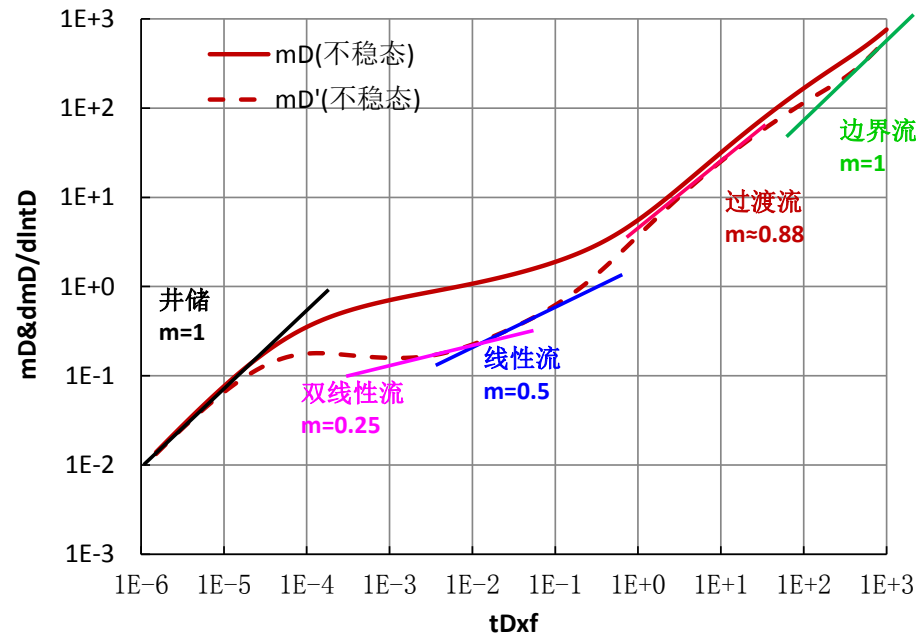
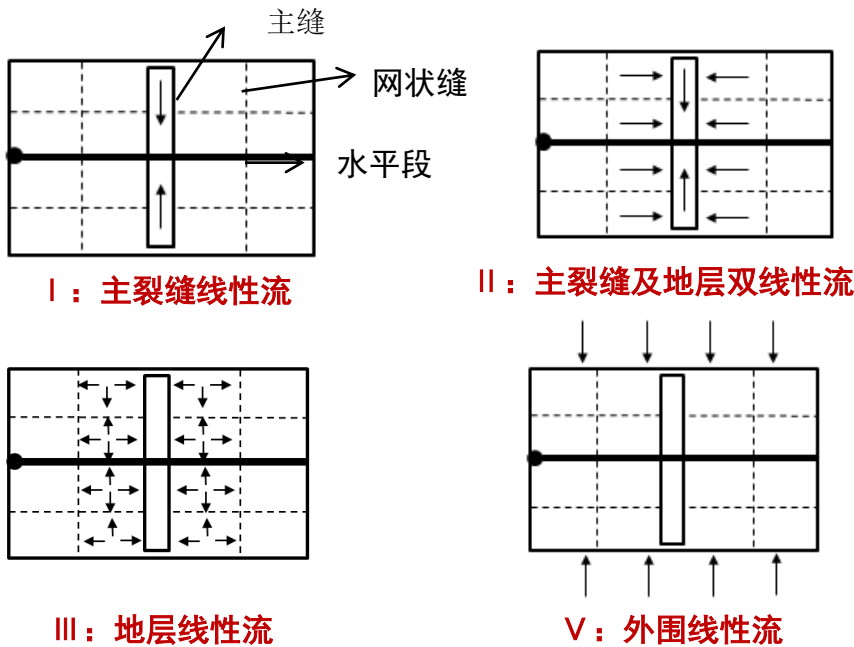
◆ 考虑表皮、井储效应的影响：

$$\bar{\psi}_{wD}(C_D, s) = \frac{\bar{\psi}_{wD}(C_D = 0)}{1 + C_D s^2 \bar{\psi}_{wD}(C_D = 0)}$$

通过Stefhest算法可以将以上拉氏空间解析解数值反演到实空间，得到定生产时井底流压随时间变化的数值解。

◆双重介质复合区域耦合流动压裂水平井渗流特征

根据试井模型压力解及渗流场分析，将压裂水平井流动划分为6个阶段：井储效应段、主裂缝线性流、**双线性流**、**地层线性流**、**外区线性流**和边界流。



◆ 主压裂裂缝线性流：

$$\Delta \psi_{ws} = \frac{0.08562 q_{sc} T}{n \sqrt{k_F} w_F h} \sqrt{\frac{\Delta t}{\mu (\phi c_t)_F}}$$

◆ 主裂缝-地层双线性流模型：

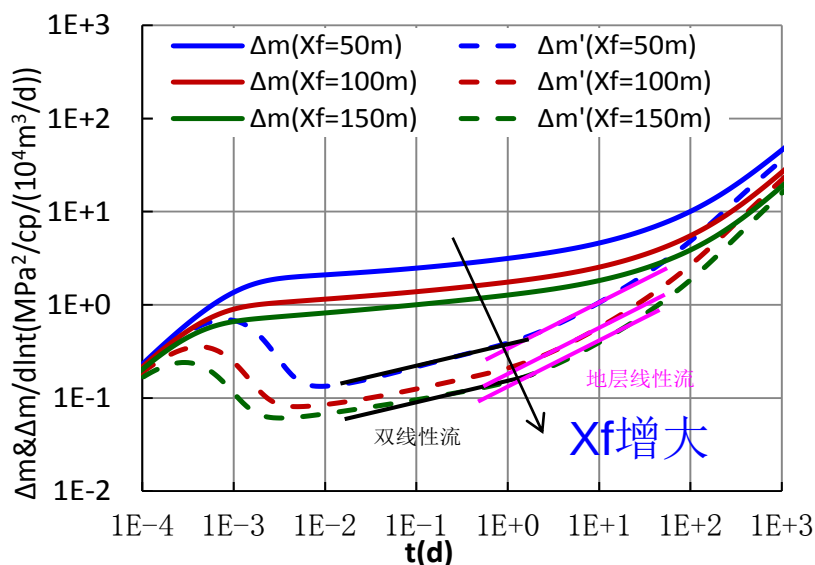
$$\Delta \psi_{ws} = \frac{0.04297 q_{sc} T}{nh \sqrt{k_F} w_F} \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{\mu_i (\phi c_t)_{f+m} k_{fh}}}$$

井储效应、双线性流和地层线性流为主要特征流阶段

◆双重介质复合区域耦合流动压裂水平井渗流特征

□ 主裂缝半长

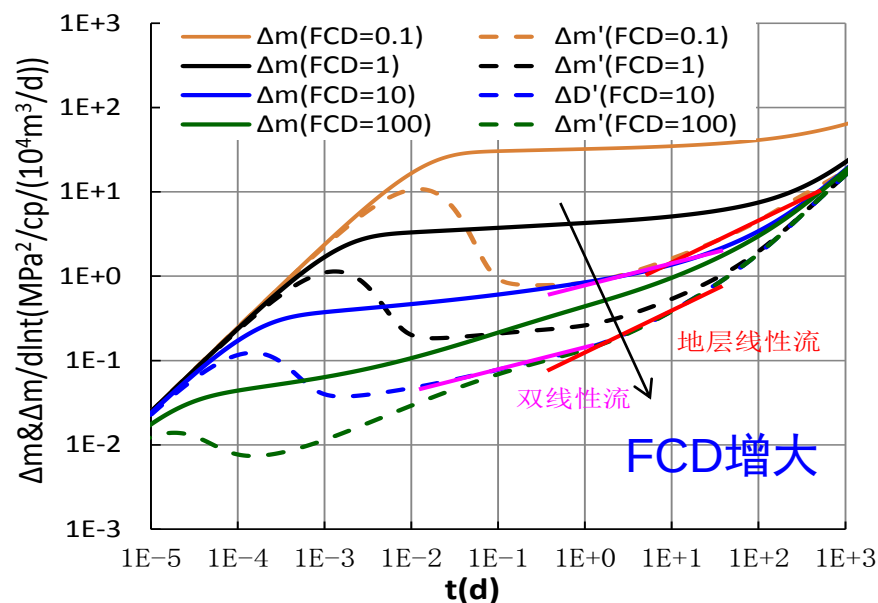
X_f 对试井曲线形态特征影响不明显，主要会使压力、导数曲线上下平移； X_f 增大，**曲线下移**，反映生产压差变小。



主裂缝半长对试井曲线影响

□ 主裂缝导流能力 (FCD)

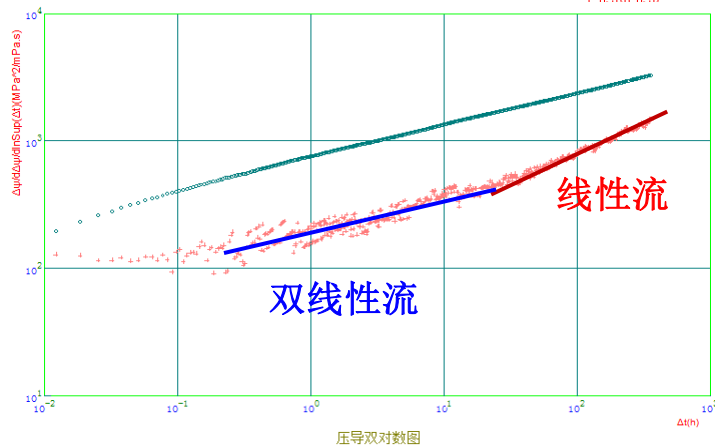
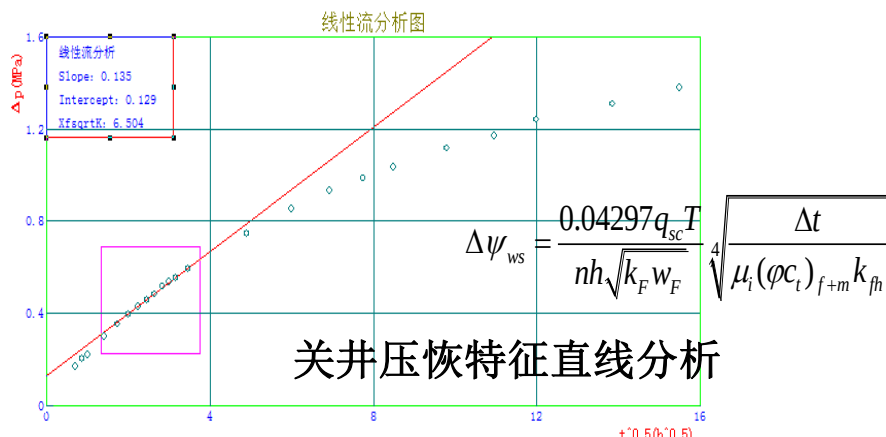
1) FCD对试井曲线影响大，FCD越大压力、导数值越低；2) FCD越大，**地层线性流**出现时间越早，双线性特征变弱。



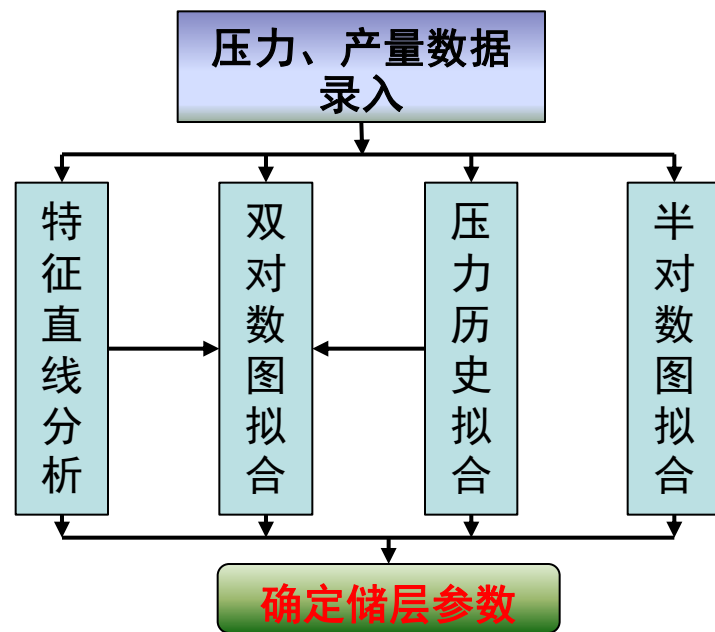
主裂缝导流能力对试井曲线影响

(2) 关井压力恢复试井分析方法

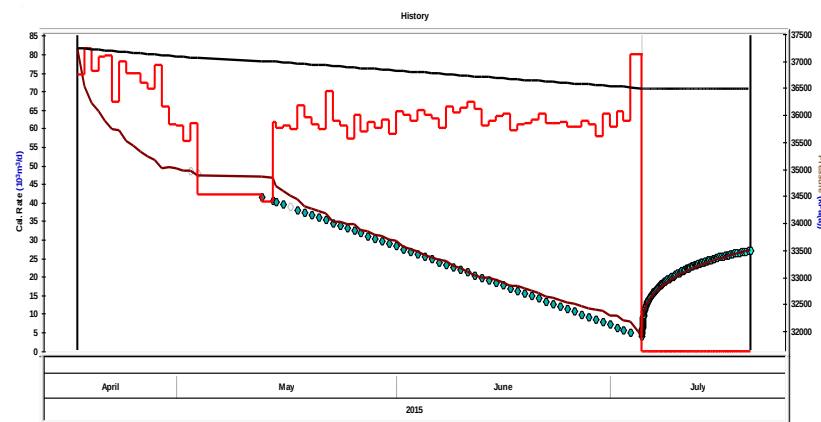
分析思路：通过特征直线分析、双对数图版拟合辅助压力史拟合、半对数图拟合确定储层和压裂参数。



压力、压力导数双对数曲线拟合



不稳定试井分析具体技术思路



压力历史拟合曲线

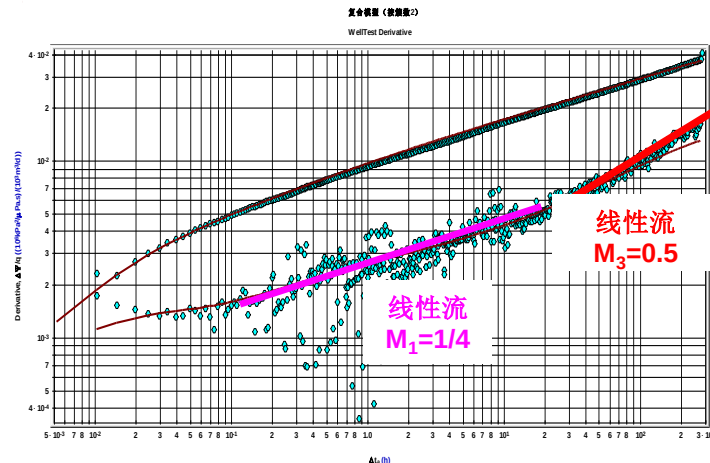
实例应用

■涪陵页岩气井关井曲线出现压裂水平井线性流特征，表明压裂改造形成了主缝；先出现0.25斜率双线性流特征，再过渡至斜率0.5线性流特征；

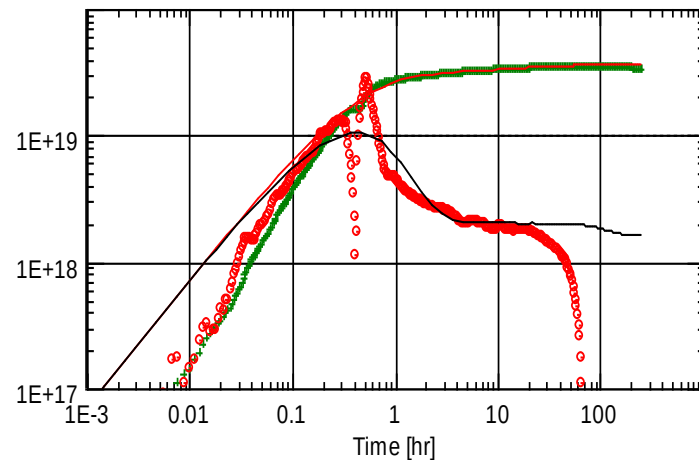
■涪陵页岩气井压裂改造后，采用水平井多段压裂、双孔复合模型，解释有效裂缝渗透率为0.014mD；裂缝半长90m，窜流系数 $7.0e-7$

焦页XX井压裂完即关井资料

模型	渗透率 mD	裂缝半长 m	导流能力 md. m
水平井	0.14		
压裂水平井	$4.7e-3$	110	0.42



焦页X气井双对数曲线



Log-Log plot: $m(p)-m(p@dt=0)$ and derivative [Pa/sec] vs dt [hr]

焦页XX井双对数曲线拟合图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/457014050143010032>