



2021年工学院能源系博士生综合水平考试

于菲

中国石油大学（华东）

本科

2015.09–2019.06

北京大学工学院能源与资源工程系

博士

指导教师：邸元

2019.09–2021.05

指导教师：徐克

2021.05–



北京大学工学院能源系博士生综合考试

近裂缝多孔介质流动传质传热耦合研究

报告人：于菲

指导老师：徐克



2021/09/24

目录:

- 研究背景
- 常温常压微米级近裂缝系统
- 高温高压百纳米近裂缝系统
- 未来工作计划

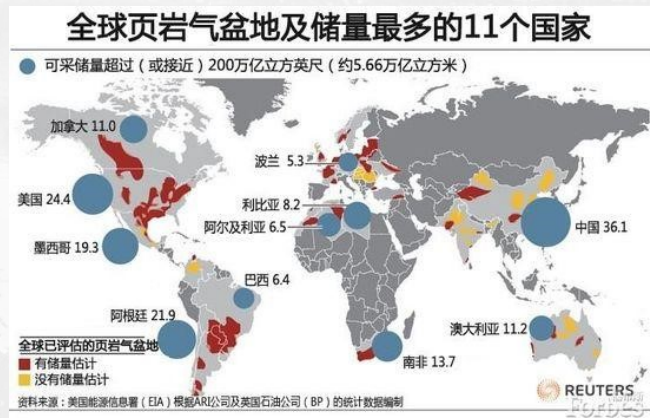
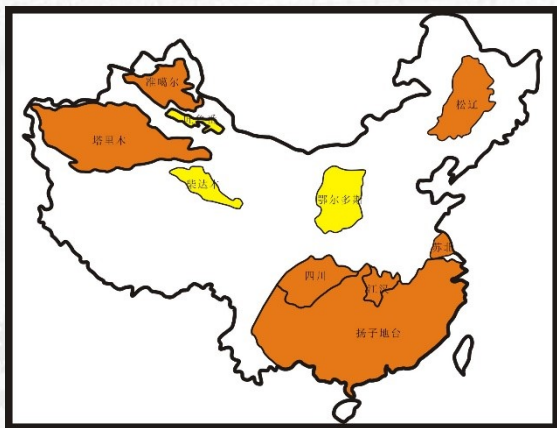
一、我国页岩油气等非常规油气资源十分丰富、开发利用潜力巨大

□ 页岩油开发成为攻关重点

日前，国家能源局在北京召开2021年页岩油勘探开发推进会上要求，将加强页岩油勘探开发列入“十四五”能源、油气发展规划，要聚焦科技创新关键问题，深化地质基础理论研究，攻关适应页岩油勘探开发的新技术新装备，推动页岩油绿色开发。

□ 古龙页岩油取得重大突破

大庆油田古龙页岩油勘探取得重大战略性突破，探区面积达1.46万平方千米，2021年落实含油面积1413平方千米，新增石油预测地质储量12.68亿吨。



□ 页岩油开发存在的问题

1. 百纳米孔隙流动规律尚不清晰

一般来说，微纳尺度流动比表面积大，流体间界面现象及流固间界面问题复杂。界面张力、静电力、吸附作用等在小尺度下影响显著。

2. 多裂缝地质构造复杂

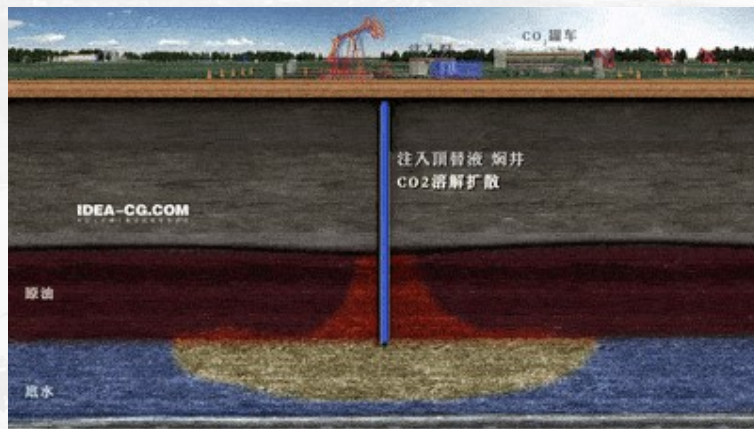
页岩油储层裂缝发育，开采阻力大。

3. 高压条件下提高页岩油采收率机理匮乏

高压条件下，页岩油提高采收率机理还未得到研究。

二、CO₂吞吐技术能够显著提高页岩油藏采收率

- ❑ CO₂吞吐是指向生产井中注入一定数量的二氧化碳，然后关井一段时间，使注入的二氧化碳溶于井底附近原油中，以降低原油粘度，然后开井生产，从而提高油井产量。
- ❑ 机理：降低原油粘度，增大原油膨胀系数，与原油混相提高了油水流动度比。超临界CO₂能够较好地渗入到微、纳米孔隙介质中与原油相互作用，具有降低原油界面张力和黏度、扩大原油体积、萃取原油轻质组分的能力。



三、国内外研究现状

- 1985年, Hsu和Brugman对 CO_2 吞吐进行首次研究。他们发现影响原油采收率的最重要参数是注入溶剂的数量。
- 2010年, Torabi和Asghari 试图预测压裂介质中二氧化碳吞吐的性能和效率。结果表明, 混相是 CO_2 吞吐提高采收率的最佳条件, 高压下二氧化碳吞吐实验采收率更高。
- Hawthorne 等人报道了轻质原油开采过程主要不是由于 CO_2 向原油中的溶解, 而是原油向 CO_2 中的运动。
- Alharthy 等人研究了页岩裂缝中 CO_2 驱油过程发现分子扩散和 CO_2 与原油之间的传质行为是 CO_2 驱替页岩油的主要机制。

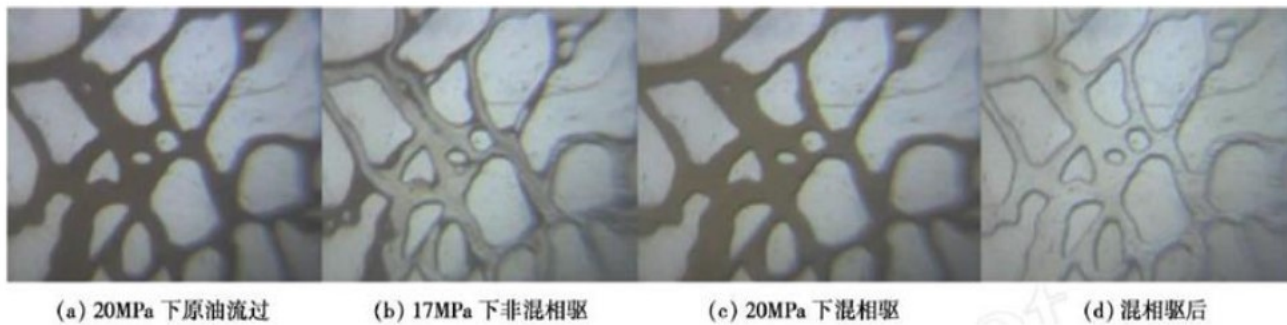


图 1-2 CO_2 非混相驱和混相驱原油流动对比图

四、页岩油储层特点——“基质孔隙-页理缝”构造

- 微裂缝大量发育以未充填的水平层理缝为主

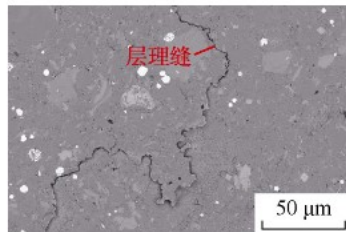
古龙页岩具有受页理控制的缝孔储集体系，主要由基质孔隙-页理缝组成。岩心精描显示有机成因和无机成因的水平页理缝极为发育（1 000~3 000条/m）总面孔率占比达22%~79%。

- 扩散速度大于流动速度

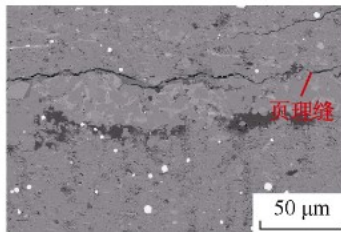
古龙页岩储层裂缝发育，平均裂缝间距0.3mm，这种多裂缝系统使得**基质无法独立于裂缝研究**，裂缝、基质流动传热、传质过程相互影响，扩散特征时间小于流动特征时间。

$$t_{diffusion} = \frac{L^2}{D} = \frac{0.00015^2}{1.2 \times 10^{-9}} = 18.75s$$
$$t_{flow} = \frac{L}{v} = \frac{0.0003}{1.67 \times 10^{-6}} = 179.64s$$

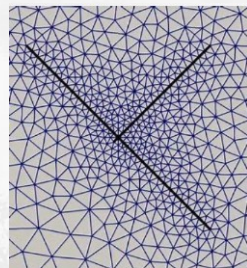
页岩油储层结构：**近裂缝多孔介质系统**



(a) 平行层理方向

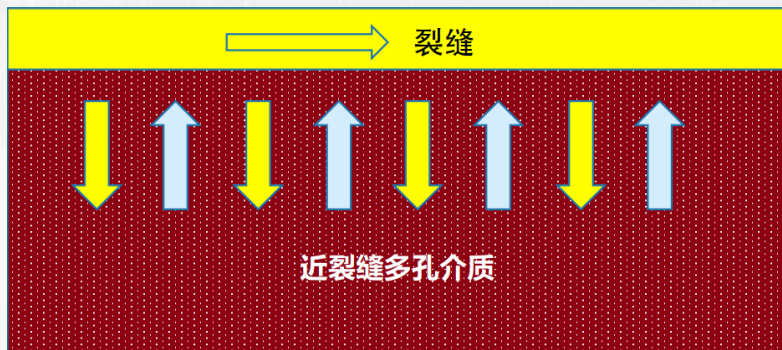


(b) 垂直层理方向



页岩油储层结构：近裂缝多孔介质系统特征

- 结构特点：裂缝流动方向与基质向裂缝的传质方向垂直，注入流体引发基质在垂直裂缝方向上的剧烈传质。
- 物理机理：裂缝和基质中的主驱动力相互垂直互相耦合，产生流动与跨界面剧烈传质传热强耦合机制。



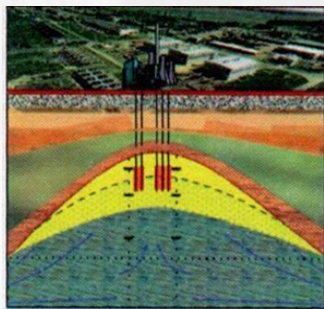
五、CCUS（碳捕集、利用与封存）是化石能源实现碳中和的“兜底”技术

□ 近裂缝多孔介质系统在CCUS技术应用广泛

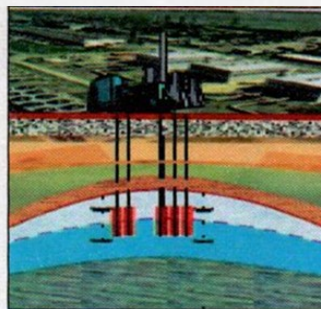
□ CO₂地质封存是指通过工程技术手段将捕集的CO₂储存于地质构造中，实现与大气长期隔绝的过程，主要分为陆上咸水层和枯竭油气藏封存。

陆上咸水层：原生裂缝发育，CO₂与水剧烈传质带来能量变化；

枯竭油气藏：由于压裂开采，分布大量不规则微裂缝，CO₂、水、原油相互作用，跨界面剧烈传质。



枯竭油气田封存



咸水层封存

六、研究内容

预实验（微米级3D打印可视化模型）：

常温常压油气藏：
近裂缝混相互溶模式

浅部咸水层：
近裂缝非混相“蒸发”问题



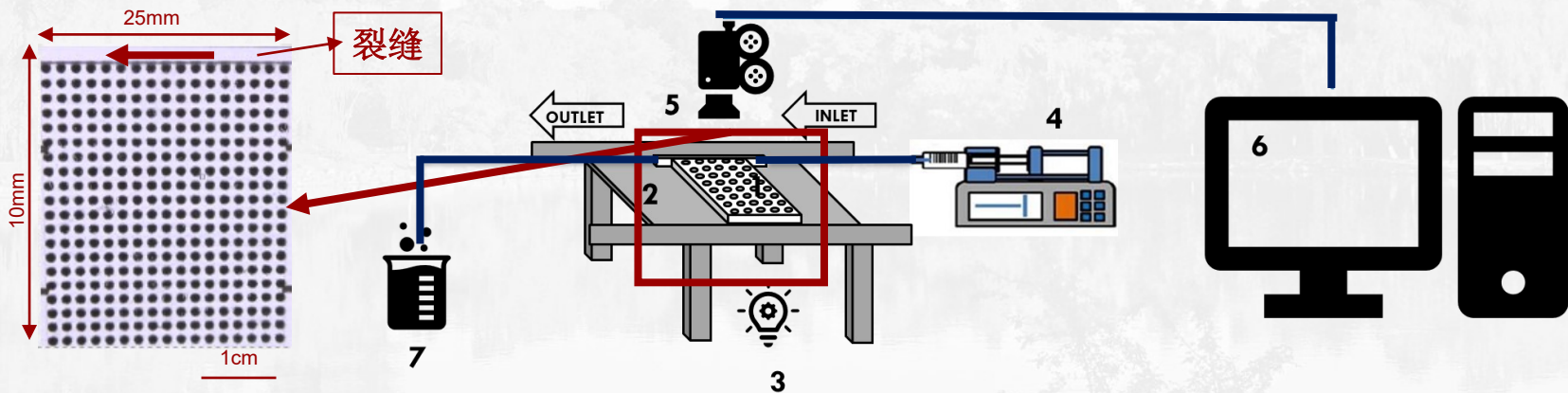
利用可视化实验平台，开展高压纳米尺度裂缝-基质流动传质传热耦合研究



二、常温常压近裂缝系统实验研究

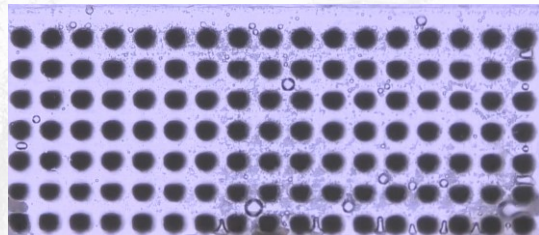
实验装置

- 利用水（甲基蓝染色）-甘油+水混合物体系，在常温常压下进行预实验模拟超临界二氧化碳从裂缝中掠过多孔介质时，近裂缝原油与其混相萃取的情形
- 粘度比：注入：饱和=1:140

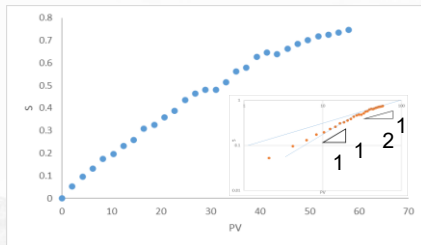


1. Transparent Micromodel; 2. Support Frame; 3. Light Source; 4. Syringe Pump; 5. DV Camera; 6. Data Processing System 7. recovery package

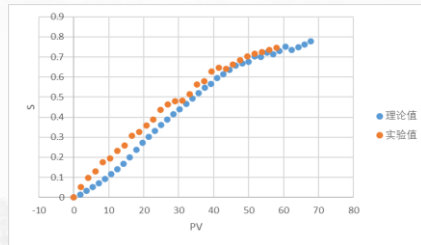
高速萃取问题



速度 $\times 8.3$



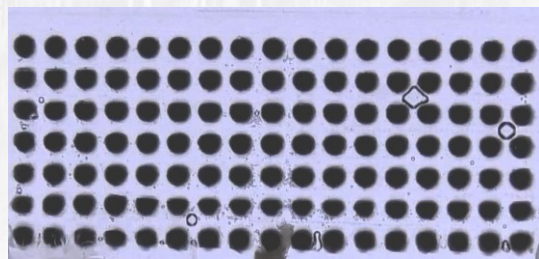
实验数据图



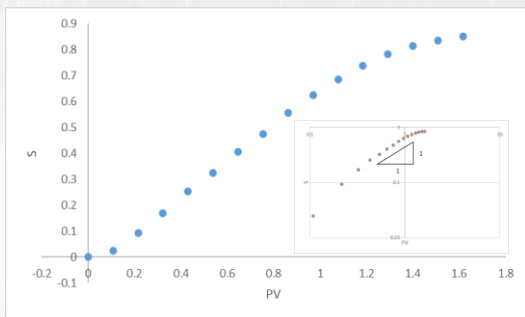
理论计算数据图

- 注入流速为 0.167m/s ,
- $Pe = 3.47 \times 10^6$
- 随PV增大, 饱和度先以线性规律变化后以亚线性变化。

低速萃取问题



速度 $\times 1041$



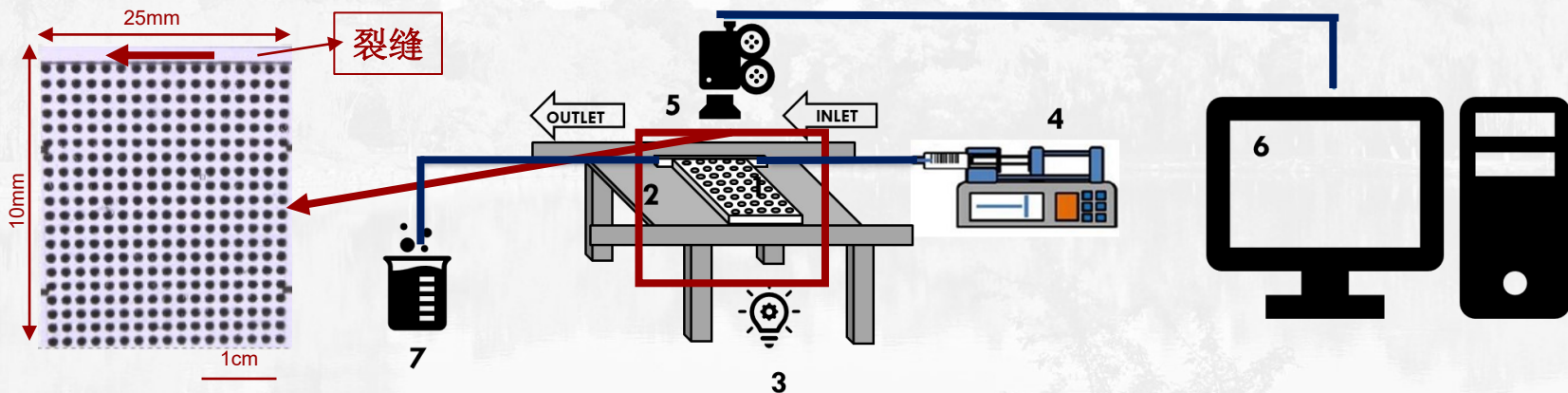
实验数据图

- 注入流速为 $1.67 \times 10^{-5}\text{m/s}$
- $Pe = 347.9$
- 注入相饱和度在很长一段时间内随时间呈线性变化即, $S \sim t$ 。

实验装置

- 利用空气-戊烷体系，在常温常压下进行预实验
模拟二氧化碳从裂缝中掠过多孔介质时，导致近裂缝流体蒸发的情形

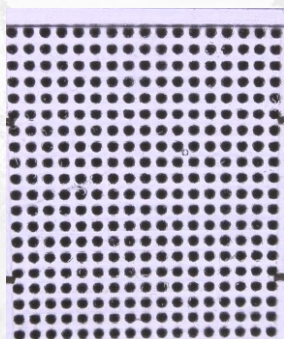
戊烷：
蒸发温度： 36°C
蒸发焓： 196.7kJ/kg



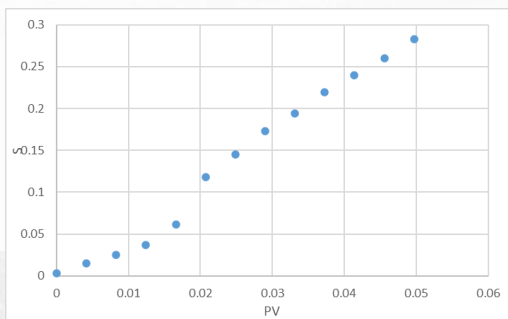
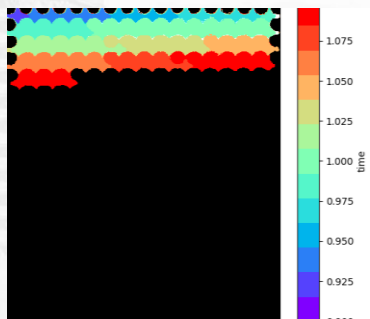
1. Transparent Micromodel; 2. Support Frame; 3. Light Source; 4. Syringe Pump; 5. DV Camera; 6. Data Processing System 7. recovery package

近裂缝系统蒸发问题

低速蒸发问题

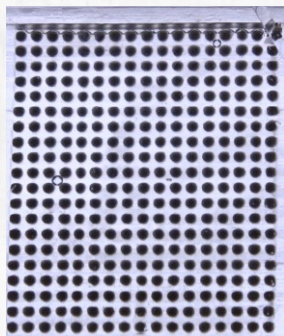


速度 $\times 144.3$

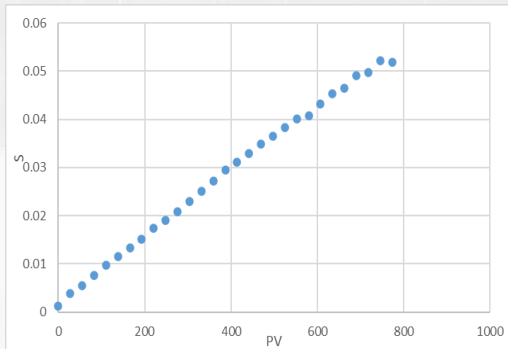
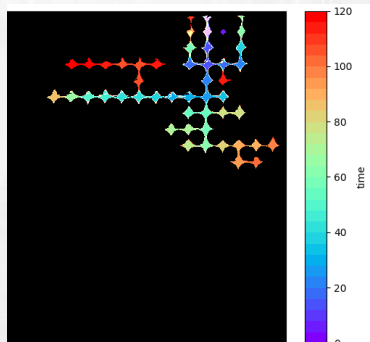


- 注入速率: $5.56 \times 10^{-4} \text{cm/s}$
- 慢速注入时, 气体在均质多孔介质中按层突破。蒸发前缘与驱替前缘基本一致。

高速蒸发问题



速度 $\times 7.7$



- 注入速率: 22.2cm/s
- 快速注入时, 蒸发前缘与驱替前缘分离。
- Marangoni: 由于温度梯度或浓度梯度导致的界面张力梯度从而引发质量传递的效应。



三、高温高压百纳米近裂缝系统研究



未来工作计划:

□ 常温常压微米级实验

2021.9-2021.12:萃取实验混相相界面形状计算

2021.12-2022.6:更换体系, 补充实验

2022.09-2022.12 :蒸发实验临界点求解

□ 高温高压纳米级实验

2022.3-2023.10:高温高压环境下纳米芯片驱替实验

2023.11-2024:高温高压环境及纳米尺度限域对裂缝-基质系统流动传质的影响



谢谢！

请老师批评指正！