

多孔介质科学问题研究进展

刘曰武^{1,2}, 丁玖阁¹, 崔春雪¹

1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 从多孔介质科学问题的新发展角度, 探讨了非常规能源开发中的热点问题。重点突出2个方面的内容: 非常规石化能源中多尺度问题、与非常规能源发展相关的多孔介质中的多场耦合理论和应用问题。综述了多孔介质多场耦合理论和应用的发展历程、目前的研究热点和研究趋势; 同时探讨了多孔介质科学中的多尺度问题目前的热点、难点, 讨论了需要深入研究的各尺度条件下的特征及跃迁方法和发展趋势。

关键词 多孔介质; 多尺度; 多场耦合; 非常规能源; 渗流

国家能源安全是国民经济可持续发展的重要保障, 为实现国家“双碳”目标, 从多孔介质科学问题的新发展角度, 探索非常规能源开发中的热点问题。多孔介质科学发展源远流长, 从1856年Darcy定律的提出到当今国内外的不同尺度的问题研究和技术应用^[1-42], 多孔介质科学的发展主要经历了4个阶段: (1) 多孔介质科学的形成阶段, 主要是在水文地质领域的发展, 包括Darcy定律和裘布依公式的提出和应用; (2) 经典多孔介质科学的发展阶段, 建立了不同的多孔介质流动模型, 形成了不同的分析方法, 如引入了Laplace变换方法、Hankel变换方法、Fourier变换方法、Green源函数方法、特征方法等, 用解析法以及半解析方法来求解所建立的多孔介质科学中的数学问题, 并在工程上进行应用; (3) 近代多孔介质科学的建立和发展阶段, 随

着计算机技术的发展, 数值方法被引入多孔介质科学中, 有限差分、有限元、边界元、有限体积及无网格方法等, 在多孔介质科学中广泛应用, 同时在实验模拟技术上出现了微观刻蚀模型, 并且从蜡刻模型、玻璃微珠模型逐步发展到光刻模型以及后来的微观孔隙尺度的数值模型; (4) 现代多孔介质科学的发展阶段, 从孔隙尺度多孔介质科学向微纳尺度多孔介质科学发展, 出现了微纳尺度的蒙特卡罗直接模拟、分子动力学模拟、LB(Lattice Boltzmann)模拟等数值模拟技术在多孔介质科学上的应用和发展。鉴于研究热点的探讨, 本文聚焦目前多孔介质科学理论及其在非常规能源开发应用的2个热点问题。在多孔介质多尺度研究方面, 主要分析多孔介质多尺度问题研究的必要性, 包括页岩油气藏和裂缝性油气藏开发的多尺度研究的必要性。分析

收稿日期: 2024-01-06; 修回日期: 2024-02-10

作者简介: 刘曰武, 研究员, 研究方向为渗流力学与能源工程, 电子信箱: lywu@imech.ac.cn

引用格式: 刘曰武, 丁玖阁, 崔春雪. 多孔介质科学问题研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(12): 143-156;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.00056

多孔介质中的多尺度问题研究方法的发展状况,叙述集中多尺度的研究方法,明确目前多孔介质中的多尺度问题研究的主要难点。在多孔介质科学的多场耦合研究方面,从3个方面阐明多孔介质科学中多场耦合理论的发展,指出了目前多孔介质多场耦合问题研究的主要难点。

1 多孔介质中的多尺度跃迁理论的发展和需求

多尺度问题在自然界是普遍存在的,从分子原子的大小到浩瀚的宇宙,空间尺寸的度量从埃到光年跨越的尺度巨大,描述规律从量子力学到天体力学范围广阔,不同的尺度之间有不同的力学规律,描述了不同的物体的质量守恒、动量守恒及能量守恒等客观规律。对于多孔介质材料及与多孔介质材料相互作用的相关理论和实际问题也包括多尺度效应和尺度跃迁方法的研究。

多尺度问题广泛存在于非常规油气藏中的流动过程,通常包含多个尺度空间,一般分为孔隙尺度、表征单元体(representative element volume, REV)尺度/小尺度和宏观尺度,其中非常规油气藏具有非均质性,描述储层属性的参数,如孔隙度、渗透率等,在空间上就有着显著的多尺度非均质特征,如图1所示。

为了对目前多孔介质多尺度科学问题研究成果进行总结分析和为未来深入研究多孔介质多尺度科学问题指明研究方向,本文从5个方面对多孔

介质中的多尺度理论的发展进行回顾。(1) 多尺度问题的提出和多孔介质多尺度科学问题研究的必要性;(2) 多孔介质中的多尺度问题的描述;(3) 多孔介质中的多尺度问题研究方法;(4) 目前多孔介质中的多尺度问题研究的主要难点;(5) 目前多孔介质中的多尺度问题的发展趋势。

1.1 多孔介质多尺度问题研究的必要性

非常规能源的开发急需发展多孔介质多尺度理论的研究,尤其是天然气工业中页岩气藏、页岩油藏、缝洞型油气藏和裂缝性油气藏4类特殊油气藏流动机理不清楚,严重影响了这些油气藏的合理开发。根据这些油气藏的特点,分别对其多尺度问题研究的必要性如下。

1.1.1 页岩油气藏多尺度问题研究的必要性

页岩气是非常规天然气的主力军之一,美国凭借页岩气的开发,2005年起超越俄罗斯,一举成为世界第一大天然气生产国,不仅满足了国内的天然气需求,而且还有出口和存储的能力。天然气资源开发的巨大发展,不仅促进了经济的发展,而且影响了地缘政治。其主要技术包括2个方面:(1) 水平井钻完井技术;(2) 滑溜水压裂,综合形成体积及压裂技术。这些技术极大促进了非常规天然气资源的发展,一般称为“页岩气革命”。中国也在页岩气开发方面取得了巨大的成功,2014年投入开发的涪陵焦石坝页岩气田成为世界上第一大整装页岩气田,威远页岩气田等也有巨大发展。但是页岩气藏中由基质孔隙到微裂缝,再到人工裂缝,然后进入水平井井筒的流动机理始终没有明确的规律描述,只能根据生产的数据区推测,无法预测未来的生产状况。

中国新疆吉木萨尔页岩油藏、华北港东页岩油藏、大庆古龙页岩油藏等也将成为非常规页岩油的重要发展基地。页岩油气藏的主要储集空间是页岩中的有机孔和无机孔及储层中的微裂缝,通过实验可以确定这些初级空间的尺寸大小主要分布在2~20 nm,虽然国内外对围观流动机理进行了众多的研究,但是,其中的流动机理目前没有合理的确定方法。页岩气藏孔隙及其孔隙分布如图2、图3所示。页岩气藏主要流动规律如图4所示。

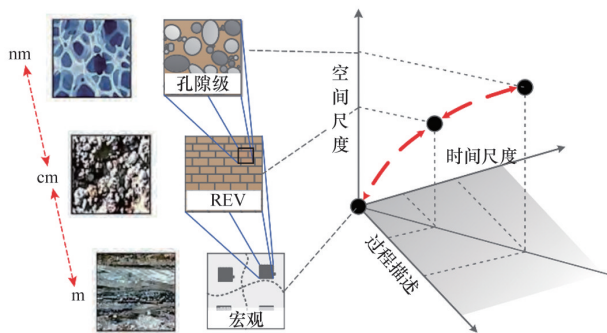


图1 非常规油气藏的多尺度非均质时空特征示意

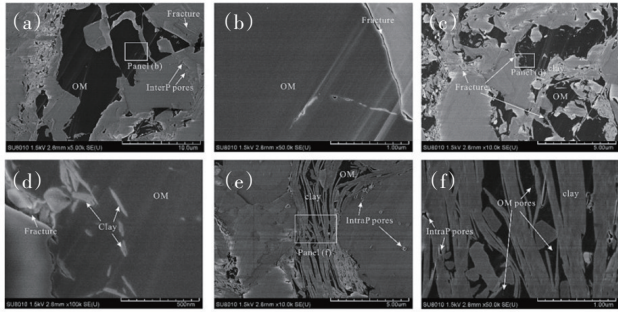


图2 页岩孔隙电镜图

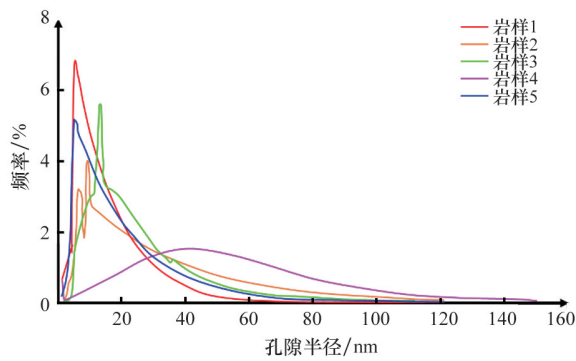


图3 页岩孔隙分布图

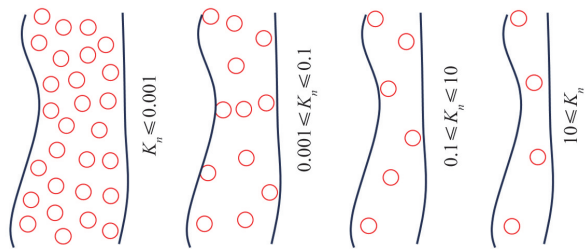
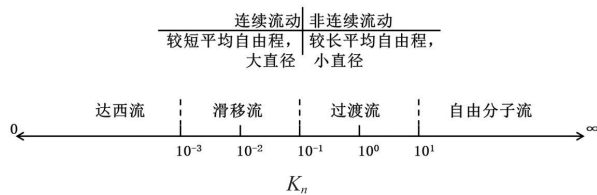


图4 页岩气藏主要流动规律

1.1.2 缝洞型油气藏多尺度问题研究的必要性

缝洞型碳酸盐岩油气藏是可能具有巨大产能的油气藏类型,沙特阿拉伯、伊朗及委内瑞拉等国家大量分布缝洞型碳酸盐岩油气藏。中国华北地区和西北地区也有大量缝洞型碳酸盐岩油气藏,如

塔里木油田的英买、哈拉哈塘、顺北等油气田都是碳酸盐岩的断溶体缝洞型碳酸盐岩油气藏。这些油气田产量大,但递减快,注采关系难以合理设计,主要在于多孔介质多尺度化问题严重,问题集中在2个方面:(1)微观上油藏的多孔介质微观孔隙及裂缝发育导致流动的复杂性,微米及纳米尺度缝中的流动机理复杂;(2)溶洞的尺度大小不一,连续介质的控制体(REV)理论难以在这类问题中有效应用。缝洞型油气藏微观孔缝洞如图5所示。缝洞型油气藏宏观孔缝洞如图6所示。

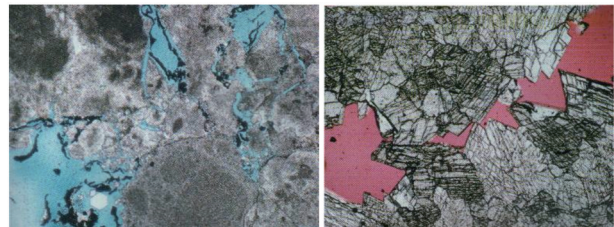


图5 缝洞型油气藏微观孔缝洞

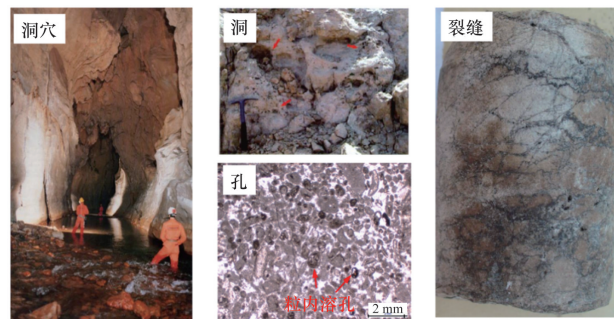


图6 缝洞型油气藏宏观孔缝洞

1.2 多孔介质中的多尺度问题研究方法的发展

自20世纪60年代开始,尺度跃迁方法已得到较大的发展。尺度跃迁方法有多种,目前多孔介质流动中常用的方法为均质化理论和体积平均法。

1.2.1 均质化理论

均质化理论涵盖非常广泛的领域,需要多孔介质的周期性结构来增加参数。考虑宏观结构域,多孔介质可以被描述为由一组圆形的、周期性的微观细胞组成,页岩气藏的多尺度流动空间如图7所示。在周期性介质中,周期大小远小于中等样本。均质化是通过渐近分析描述周期阵列来寻求平均

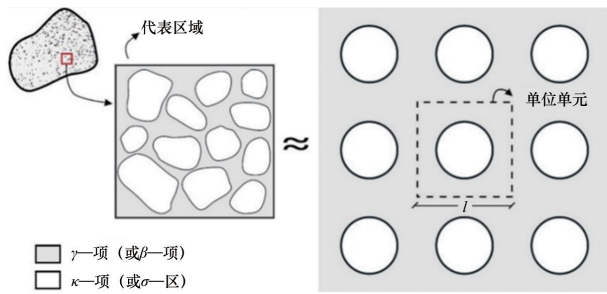


图7 页岩气藏的多尺度流动空间微观细胞

公式的过程。选择适当小的缩放参数是实施该方法的基本要求之一。通常均质化理论适用于在各种尺度上系数快速波动的偏微分方程。

对于多孔介质,微观周期 x 和宏观长度 y 的比值可以表征为空间尺度度量 ε ,其中 $\varepsilon=x/y$ 。从极限理论出发,当 ε 接近零时,均质化升尺度寻求缓慢变化或恒定的系数,以从微观尺度到宏观尺度的渐近过渡方式替代快速振荡系数。粗尺度的放大系数应同时满足初始微分方程。例如,双尺度均质化描述了振荡函数的序列,并证明了均质化过程的收敛性。如果将任何物理量 Q 视为2个空间尺度 x 和 y 的函数,则可以将其形式展开为幂级数,其小的无量纲参数 ε 为

$$Q = Q_0(x, y) + \varepsilon Q_1(x, y) + \varepsilon^2 Q_2(x, y) + O(\varepsilon^3) \quad (1)$$

根据公式(1), Q 可以表示许多流体流动特性,包括速度、扩散系数、物质浓度。均质化方程方法从给定尺度的方程确定更大尺度的方程。参数同时用方程放大,这需要复杂的数学推导。这个过程需要推导出每个特定问题的方程,因此,各种均质化框架被开发出来。这样的框架适用于不同类型的无序介质,而不仅仅是周期性介质。

均质化理论已成功应用于各种地下水流量和溶质输运问题。虽然天然多孔介质不具备真正的周期性,但它们可以通过忽略更大尺度的变化来近似。除了升尺度之外,还适用于求解对流-扩散方程、一般非线性扩散方程,包括时间尺度的两相流、边界传输条件下具有非线性热交换项的多孔介质中的流体流动和吸附-解吸过程。除了尺度分离和几何周期性的要求外,在应用周期性时还提出了另外2个隐含组合的假设:条件的平稳性和局部平

衡。因此,虽然均质化对于恢复渐近静止宏观模型是有效的,但对于具有较长过渡时间或长度的过程并不可靠。

1.2.2 体积平均法

体积平均法是一种升级各种地下水流量和输运参数的方法,包括扩散系数和反应系数。体积平均的基本思想是在闭合体积中放大达西尺度的溶质输运控制方程,页岩气藏的多尺度流动空间如图8所示。这种方法的应用需要做出各种假设。首先,将非均质储层视为多个均质部分的组合。其次,各部分之间的层次结构或关系已经获得,可以为每个均质部分提供常规的质量平衡方程。最后,储层在统计上是平稳的,没有强烈的变化。通过这种方式,层次转移概率理论可用于表达不同尺度下性质结构之间的关系,从而能够将基质扩散系数、裂缝孔径、反应速率系数和分散度等尺度相关参数表示为空间尺度的函数。

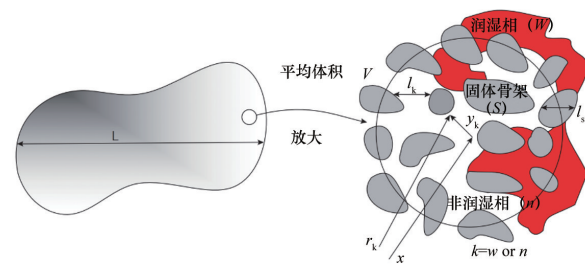


图8 页岩气藏的多尺度流动的相空间分布

Quintard等^[22]基于体积平均法在多孔介质流动方面做了大量的工作:由体积平均法理论推导了达西方程、多相流的传质方程、多孔介质中的传质传热,以及多孔介质和流体间的界面条件等。体积平均法在多孔介质渗流模型的理论推导中有广泛的应用,可通过做一种或多种本征假设来推导得到最终渗流方程的形式。Wang等^[32]采用体积平均法,从孔隙尺度控制方程出发,推导了幂律流体在多孔介质中运输的大尺度连续介质模型。平均过程产生一个动量方程和一个以体积平均压力和速度表示的连续性方程。假设幂律流体流动的封闭问题类似于牛顿流体流动,得到了达西尺度渗流方程的

张量形式,确定了平均速度与平均压力梯度之间的幂律关系。与牛顿流体不同,幂律流体的表观渗透率明显取决于过滤速度方向,数值实验也证实了这一结论。

1.2.3 多孔介质多尺度问题的主要研究方法

1) 多尺度有限差分法。中国石油大学基于模

拟有限差分法建立了一种新的嵌入式离散裂缝数值计算格式,避免了复杂的非结构化网格划分过程,进一步提高了计算效率,并且得益于模拟有限差分法良好的网格适应性,本方法能够处理任何复杂网格,而且适用于全张量渗透率情形。嵌入式离散裂缝模型非匹配网格模拟结果如图9所示。

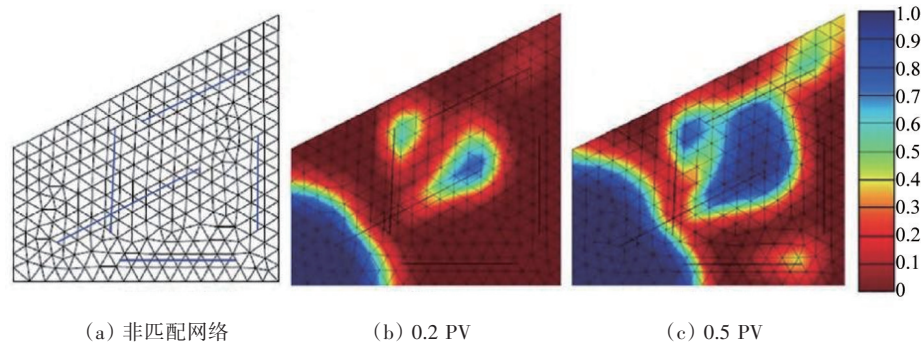


图9 嵌入式离散裂缝模型两相流动模拟

2) 多尺度有限元法。上述尺度升级方法在大尺度上仅保留了升级后的宏观信息,是一个不可逆过程,即只能升尺度(up-scaling),不能降尺度(down-scaling),导致小尺度信息丢失。因此,寻找一种能升可降的表征方法是关键。对此,数学家提出了多种多尺度算法,其中多尺度有限元应用较为广泛。此类方法基于小尺度精细信息来构建大尺度粗网格的多尺度基函数,以此来实现不同尺度信息的能升可降,达到多尺度耦合目的。多尺度有限元法于1997年提出,以均质化理论为基础。其主要思想是用数值求解局部精细尺度问题,以便使用这些局部解来修改粗尺度基函数。与标准有限元方法一样,这种方法的缺点是违反了局部保护属性。因此,在过去10年中,多尺度有限元方法的思想已经转移到混合有限元方法的框架中,页岩气藏的多尺度流动空间如图10所示。这些混合的多尺度有限元方法允许在大尺度上有效地捕获小尺度效应,以及重建质量守恒的精细速度。

3) 多尺度有限体积法。多尺度有限体积法动机是地下(多孔介质)流动的多尺度性质。其基本思想是构建粗尺度透射率,以解释精细尺度效应,

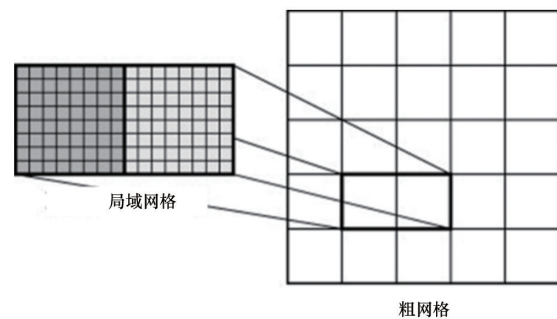


图10 页岩气藏的多尺度流动空间的网络空间

并导致有限体积解算法的多点近似。为了构建传递性,必须根据与双粗网格单元相关的精细尺度问题的局部数值解计算基函数集,多尺度有限体积方法如图11所示。深入研究可能需要进一步的局部基函数集,例如,从粗尺度压力解重建保守的精细尺度速度场,该方法已经能够处理越来越复杂的方程。此外,该方法已被应用于椭圆(抛物线)压力方程及双曲饱和(输运)方程。与许多其他多尺度方法一样,多尺度结果的质量在很大程度上取决于用于解决局部精细尺度问题的局部条件(通常是局部边界条件)。

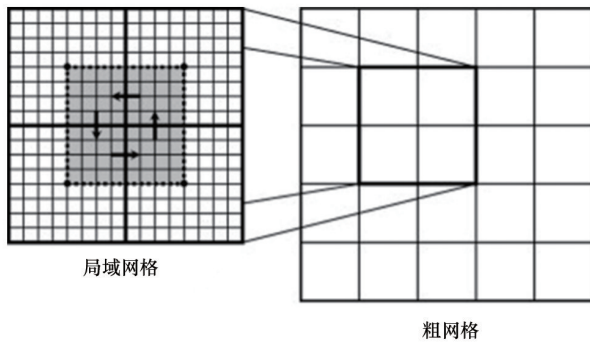


图11 多尺度有限体积方法

4) 自适应升级方法。根据经典的升尺度策略在放大步骤中所做的假设,在放大方程中会出现不同类型的新粗尺度参数或函数。这些参数隐式包括由于平均而丢失的精细尺度信息。数值升尺度方法提供了一种计算粗尺度函数或参数的工具。该方法求解具有代表性的精细尺度(流动或运输)问题,以计算平均量(如渗透率、透射率、近似函数等)。自适应升级方法有局部方法和全局方法。局部方法选择大小远小于全局尺度的子域(如一个粗网格块的大小),并为每个子域局部计算有效参数,局部数值升尺度方法的工作流程如图12所示。

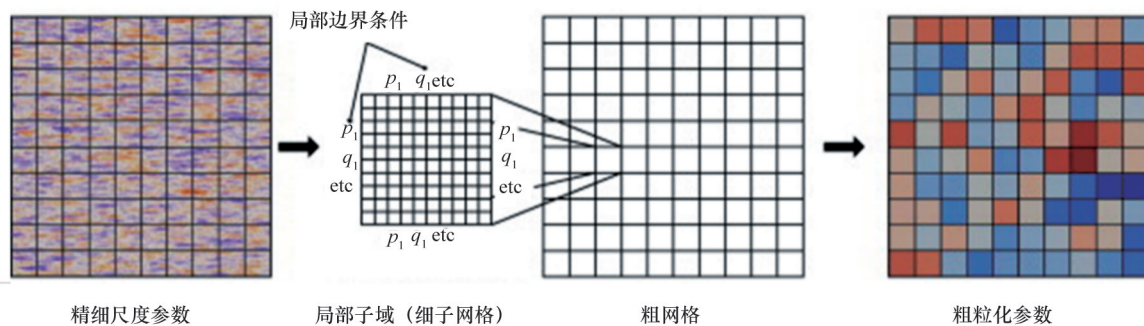


图12 局部数值升尺度方法的工作流程

全局方法解决全球范围内具有代表性的精细尺度问题。局部方法可以进一步扩展到(自适应)局部—全局方法。在这种情况下,在方法中添加了一个降尺度步骤,以近似全局粗尺度解中的局部精细尺度边界条件。根据所需的精度,每次全局解发生明显变化时,都必须重新计算有效粗尺度参数。结合数值放大和缩小,(自适应)局部—全局方法也可以被视为多尺度方法。

1.3 多孔介质中多尺度问题研究的主要难点

目前研究的理论难点,包括3个方面:(1) 实验缺乏纳米级的有效观察手段;(2) 数值模拟缺少建立模型的基础资料和对验证的室内实验数据及对应的野外现场数据;(3) 不同流动阶段划分依据不充分。

1) 实验研究难以观察。实验观察为微米量

级,设备最大精度为10 nm,微观技术图像识别能力对比如图13所示。室内实验难以模拟地下状况,尤其非常规油气藏中的页岩油气的开发对于微纳尺度的油气流动规律的研究更为重要。页岩气藏的主要孔隙为气、页岩油。

2) 数值模拟没有基础模型。难以建立数值多孔介质模型,没有理论数值模型则难以进行相应计算。同样,在某种假设的模型上计算得到的结果难以进行验证对比,实际的数据来源过于复杂,实验缺乏相应的观察手段。

3) 理论研究缺乏尺度跃迁划分依据。不同尺度孔隙中的流动规律难以确定,主要是纳米尺度的规律难以总结和确定;同时缝洞体尺度的判断及离散缝洞与缝洞性油气藏连续体之间关系的处理也是难点;跃迁改变的尺度拐点在哪里仍难以确定。

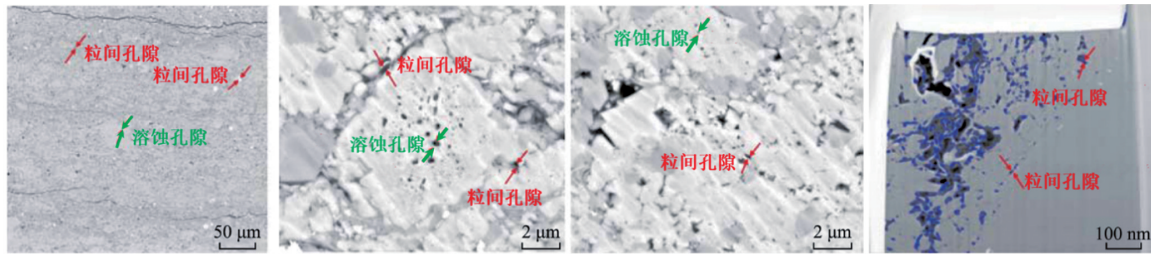


图13 微观技术图像识别能力对比

2 多孔介质多场耦合理论的发展和需求(H-M-C-T)

在能源开发过程中,对于非常规能源多场耦合理论和应用问题可以高度集中的概括“流动—材料变形—化学反应—热场”(hydraulic-material/Mechanics-chemical-thermal),简称为“多孔介质中的H-M-C-T”。

2.1 多孔介质多场耦合问题及其进展

2.1.1 多孔介质中最简单的多场耦合问题—流固耦合问题(H-M问题)

多孔介质中流体的流动问题(hydrodynamics in porous media)广泛地应用于水力学、地下水动力学、水工工程、石油天然气开发、生物工程等多个领域。这类流固耦合问题是最简单的多场耦合问题,其流固耦合的明显特点表现在4个方面。(1)当多孔介质孔隙半径较大时,多孔介质中牛顿流体的流动为线性流动;(2)当多孔介质孔隙半径小到一定程度时,尤其是在特低渗透多孔介质和超低渗孔介质中多孔介质中牛顿流体的流动为非线性流动,如石油天然气行业中常说的“流动存在启动压力梯度现象”;(3)当多孔介质孔隙半径较大时,多孔介质中高速气体的流动为非线性流动;(4)当非牛顿流体在多孔介质中流动时,流动表现出非线性流动特征。这些特征都是流体在多孔介质中流动所表现出的多场耦合特征。

1) 常规条件下多孔介质流固耦合的线性流动特征。1856年亨利·达西为解决法国第戎市的城市供水问题,首次通过实验解决了多孔介质中的水动力学问题,确定了城市供水流量与水力坡度的正

比关系。后来达西公式不断发展,逐步形成了现在所使用的达西公式

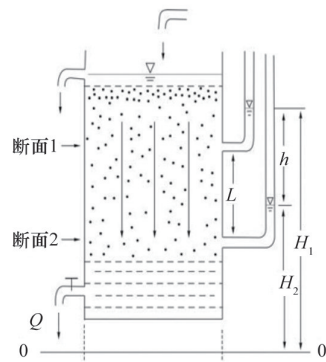
$$Q = \frac{kA}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2)$$

其代表的意义是:通过多孔介质某一截面的流量 Q ,与截面积 A 成正比,与渗透率 k 成正比,与通过截面的流体黏度系数 μ 成反比,与截面的法向压力梯度 $\frac{\partial p}{\partial n}$ 成正比。

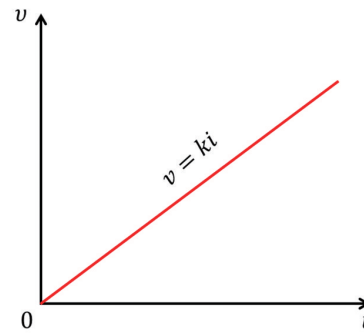
从此第1个流固耦合的流体通过多孔介质的基本原理公式就诞生了。达西公式完全反映了流体在多孔介质中的流固耦合特征,成为现代多孔介质渗流力学的基本原理。从式(2)可以看出:(1)代表多孔介质固体材料的渗透特性参数是渗透率 k ,其与流量 Q 成正比,多孔介质的渗透率越大,流量 Q 越大;(2)代表多孔介质中流动流体性质的参数是流体黏度系数 μ ,其与流量 Q 成反比,流体黏度系数 μ 越大,流量 Q 越小。这一关系极其明显地反映了多孔介质中流体流动的流固耦合特性,表明了最简单的多场耦合特征。

达西所做的水渗流实验的实验装置图及水在实验砂中流动的线性渗流规律如图14所示。

2) 低渗透条件下多孔介质流固耦合的非线性流动特征。低渗透条件下多孔介质流固耦合的非线性流动特征主要表现在流体,尤其是液体如水、矿化液、原油等在通过低渗透多孔介质时会表现出额外的流动阻力,其理论和实验首先被中国的科学家所证明和验证应用,如西安石油大学的闫庆来教授^[43]、中国科学院渗流流体力学研究所黄延章研究员^[44]等。低渗透流固耦合启动压力梯度非线性流动特征如图15所示。



(a) 达西实验装置图



(b) 水在实验砂中流动的线性渗流规律

图 14 达西渗流实验的实验装置及线性渗流规律

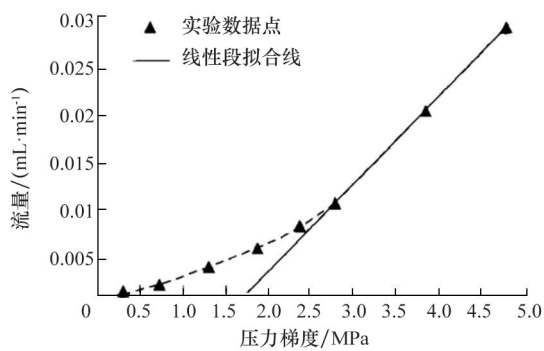
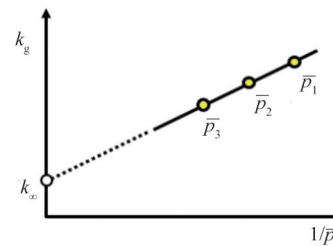


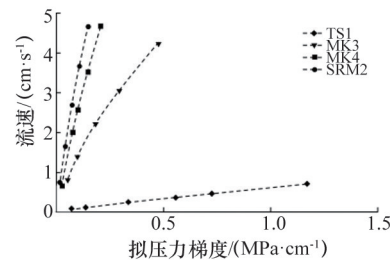
图 15 低渗透流固耦合启动压力梯度非线性流动特征图

3) 多孔介质流固耦合的气体非线性流动特征。(1) 低速气体流动的流固耦合非线性特征。气体滑脱效应是指气体在压力作用下流动时会发生的一种现象。它是一种物理现象,由于气体之间的内部黏性作用,气体在流动过程中会发生滑脱现象。当一种气体以某个特定速度流动时,它的表面会受到一种外加的拉力,通常称为滑脱力。这种滑脱力导致气体的表面就像在一层润滑油中流动一样,不会与管壁紧密接触,而是在管壁上形成一层黏性气流层。当气体经过管道而不会凝固,这是气体滑脱效应的主要表现。对于低速气体在多孔介质中的流动存在 Klinken-berg 气体滑脱效应,滑脱效应公式如式(3)所示。低渗透流固耦合气体滑脱非线性流动特征如图 16 所示。

$$k_g = k_0 \left(1 + \frac{b}{p} \right) \quad (3)$$



(a) 理论关系



(b) 实验测试数据

图 16 低渗透流固耦合气体滑脱非线性流动特征图

式中, k_g 为气体渗透率, k_0 为气体渗透率, b 为气体滑脱常数, p 为压力。(2) 高速气体流动的流固耦合非线性特征。当气体在多孔介质中高速流动时,也可以表现出非线性流固耦合特征,这与多孔介质性质密切相关,只要渗透率大到一定的高限值,流体的流动规律就是非线性的。1901年海希福默对这一规律进行了描述。一般称为海希福默公式,如式(4)所示,该公式广泛应用于天然气开采原理的讨论中。

$$J = av + bv^2 \quad (4)$$

式中, J 是压力梯度, a, b 为常数, v 为流速。

4) 多孔介质中非牛顿流体的非线性流固耦合流动特征。非牛顿流体在部分稠油油田开发及聚合物 3 次采油技术等方面有广泛应用。非牛顿流体在多孔介质中的流动基本是非线性的, 是多孔介质流体流动的流固耦合的一种类型。一般的非牛顿流体包括塑性流体、假塑性流体和膨胀性流体等, 另外还有时变性非牛顿流体, 其主要流动特征如图 17 所示。

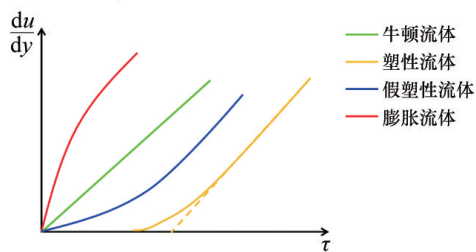


图 17 非牛顿流体的流动特征

2.1.2 多孔介质中非等温条件下多场耦合问题

在蒸汽驱油、热水驱油、火烧油层、蒸汽驱等油气田开发过程中存在大量的“热场—流场—固体变形场”, 这类问题通常被简称为多孔介质多场耦合的 H-M-T 问题。

蒸汽驱油的热力场分布如图 18 所示。

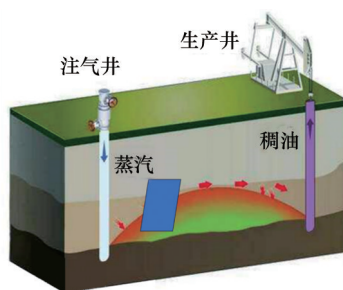


图 18 蒸汽驱油的热力场分布

2.1.3 多孔介质中存在化学反应的多场耦合问题

多孔介质材料等温场中的化学流动问题, 涉及化学反应、材料性质变化及多孔介质中流体流动问题, 称为“多孔介质中的流动—材料性质变化—化学反应”(H-M-C) 问题。最基础的化学反应是已

有石油天然气工业中的酸化、酸化压裂及表面活性剂驱替技术, 以及核工业中铀矿的地下开采问题等。

酸化是一种使油气井增产的有效方法, 是通过井眼向地层注入工作酸液, 利用酸与地层中可反应的矿物的化学反应, 溶蚀储层中的连通孔隙或天然(水力)裂缝壁面岩石, 增加孔隙、裂缝的流动能力, 从而使油气井增产或注水井增注的一种工艺措施。

酸化压裂是在高于地层破裂压力下用酸液作为压裂液, 进行不加支撑剂的压裂。酸压过程中靠酸液的溶蚀作用将裂缝的壁面溶蚀成凹凸不平的表面, 以使停泵卸压后, 裂缝壁面不会完全闭合。因此, 具有较高的导流能力, 对恢复和提高油井生产能力效果明显。此法不仅适合于砂岩油藏, 也适合于碳酸盐岩油藏。酸化压裂的某地面施工现场、施工压裂曲线, 以及酸化压裂后裂缝形态的示意图如图 19、图 20、图 21 所示。

酸化及酸化压裂技术目的是在其作业过程中改造多孔介质的通道, 形成更大的孔隙和人工裂缝, 这些人工裂缝相当于在储层中修建的高速通道。对于页岩油气藏, 压裂除了制造形成大的人工裂缝外, 更多的效果是沟通了天然裂缝、层理结构, 以及各种微小的储集空间。

这类问题中, 在多场耦合方面需要研究的主要问题包括 3 个方面: (1) 酸对多孔介质孔道的作用及控制方法, 该方向的基础理论和技术的研究已在国内外形成较强的研究力量, 而国内刚起步; (2) 酸化及酸化压裂后多孔介质渗透性质变化及对多孔介质中流动规律的影响; (3) 压裂过程中压力、压



图 19 酸化压裂过程中地面管汇装置

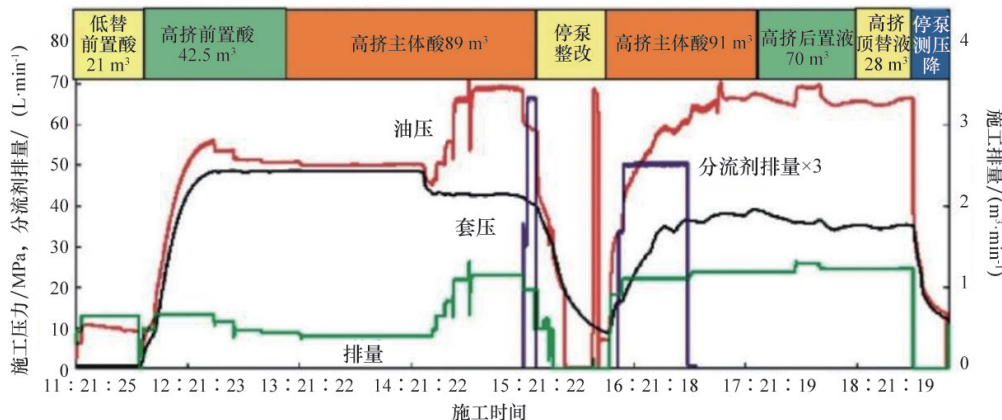


图20 酸化压裂过程中施工曲线

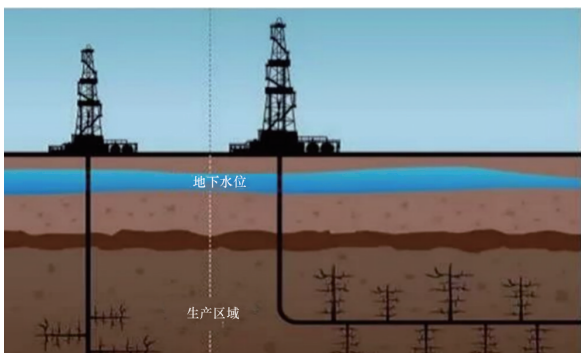


图21 酸化压裂后储层中产生的裂缝形态示意

裂液、支撑剂及施工工艺对裂缝的起裂、延伸、转向及稳定支撑等规律的影响,形成的多场耦合变化条件和规律,如何利用这些多场耦合规律指导现场作业工艺。酸化压裂室内实验效果如图22所示。

2.1.4 多孔介质中存在化学反应非等温多场耦合问题

多孔介质材料非等温场中的化学流动问题,涉及化学反应、材料性质变化及多孔介质中流体流动问题,可简单记作“多孔介质中的流动—热动力学—材料性质变化—化学反应”(H-T-M-C)问题。

煤炭地下气化是煤炭清洁利用的重要技术手段,也是中国实现“双碳”目标和进行能源结构调整的重要技术支撑,煤炭地下气化,尤其是深层煤炭地下气化,对中国国民经济的长期可持续发展有着积极意义。煤炭地下气化工艺过程如图23所示。

煤炭地下气化理论是早在1868年由德国科学家西蒙提出的^[1],在1888年由俄罗斯科学家门捷列夫进一步发展。1933年,苏联成功实施化学采煤技术,其特点在于“三传一反”,包括了质量传输、动

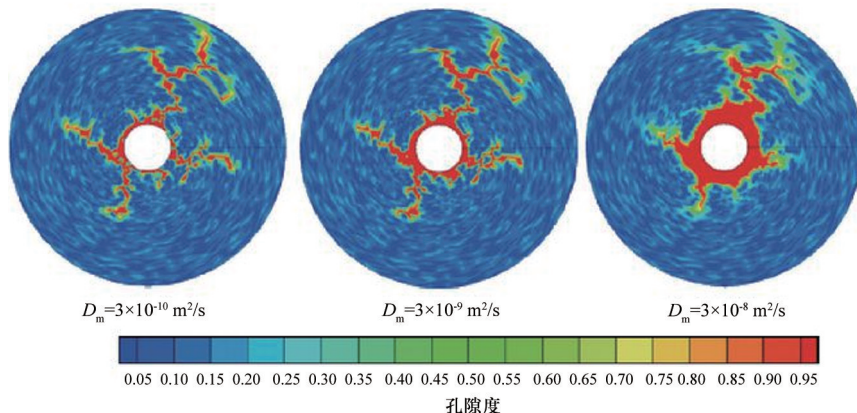


图22 酸化压裂室内实验效果

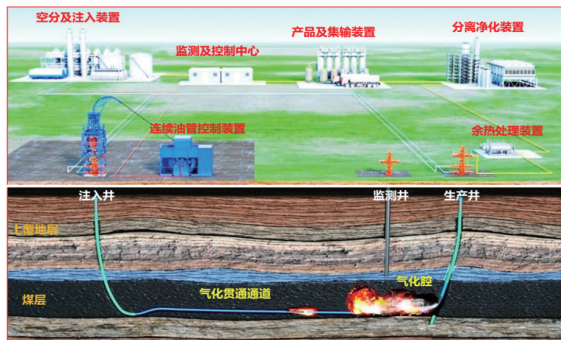


图 23 煤炭地下气化工艺过程图

量传输和能量传输及化学反应。经过国外“四次浪潮”和国内“三次浪潮”的发展,煤炭地下气化理论成为当今全球能源关注的理论和技术发展热点之一。不仅各大大国有企业设立专项课题和先导项目进行研究,而且有许多民营企业进行投资研究。

煤炭地下气化所包含的多孔介质科学的多场耦合的技术问题主要集中在多孔介质中化学反应和多相流动问题。作为煤炭清洁利用的一个新方向“煤炭地下气化工程开发利用”,化学反应起到至关重要的作用,决定了产物的组分——氢气、甲烷、一氧化碳、二氧化碳等及其比例,以及总的热值和产量等关键生产及开发效益等方面。

2.2 多孔介质多场耦合问题研究的主要难点

目前多孔介质多场耦合问题研究的困难主要在于试验和数值模拟2个方面。

1) 实验研究方面存在的问题。(1) 缺乏微观观测手段。如压裂过程中压裂储层中的微观实验探测缺乏手段,难以确定裂缝从比纳米还要小的尺度裂开,2个颗粒在即将分离的时间点,即裂缝真正起始的时间点,以及裂缝开始转向的时间点和转向的机理。(2) 缺乏微观识别技术。难以观察到酸化腐蚀的过程中多孔介质孔道壁面的化学反应引起的孔道尺度在纳米级别上或小于纳米级别的尺度变化。(3) 难以满足实际生产状况下的工况条件,如煤炭地下气化室内模拟实验中,在20 MPa压力下进行1500℃高温条件下的气化模拟,容器的选择和高压密封都是较为困难的问题。

2) 在数值模拟方面存在的主要问题。(1) 微观模型的建构问题,纳米量级及纳米以下量级的微

观数据模型的建立存在缺陷。(2) 多孔介质多场耦合的问题多数情况下难以得到方程的复杂工况的数值解,就像流体力学中的N-S方程求解一样,只能得到问题的特殊解,或者是某些工况条件下的数值解。(3) 因为模拟条件假设较多或忽略了较多的条件,因此数值模拟结果较难得到实验室数据的一致验证和矿场条件下测试结果的验证。

3 结论

非常规能源的开发急需发展多孔介质多尺度理论的研究,尤其是页岩油气开发工程的发展,迫切需要对微纳米尺度的渗流理论进行深入研究。

1) 主要针对页岩油气藏的多尺度跃迁问题,表明了多孔介质科学中的多尺度问题与非常规页岩油气开发技术之间的关系,明确了页岩油气藏进行多孔介质多尺度理论的研究的必要性,概述了多孔介质多尺度理论的研究方法,明确指出了目前多孔介质中的多尺度问题研究的主要难点,确定了微纳尺度流动规律研究以及跨尺度转折点的有效确定是将来深入研究的2个重点方向。

2) 主要针对多孔介质科学的多场耦合研究,从4个方面阐明了多孔介质科学中多场耦合理论的发展。从多孔介质科学中最简单的多场耦合问题—流固耦合问题,到目前非常规能源开发、煤炭地下气化及氢能存储的多场耦合问题角度,明确指出了目前多孔介质多场耦合问题研究的主要难点,指出了多孔介质科学问题及在非常规能源开发应用的发展趋势。

目前多孔介质多尺度问题和多场耦合问题研究的主要发展趋势集中在以下几个方面。(1) 对于多孔介质多尺度研究和多场耦合研究,必须建立和发展微观实验设备提高微观观测手段,使得设备的精度达到分子乃至原子尺度,穷其极限达到埃量级,为数值模拟建模提供基本保障;(2) 对于多孔介质多尺度的研究方面,微纳观规律研究及跨尺度转折点2个方面的工作是将来深入的研究方向;(3) 在缝洞型碳酸盐油气藏的多尺度问题上,保障微观及纳米尺度上的研究,调整对REV的理解,形

成合理的参考单元尺度,用介观等效单元和离散空间相结合的方法寻找问题解决方法;(4) 建立极其简化的数值模型,讨论简化后模型模拟验证的可能性;(5) 在多孔介质多场耦合研究方面,如H-M-C-T多场耦合问题上,一方面,要建立更加接近实际工况的试验设备,另一方面,要通过大量的室内实验模拟,为简化的数值提供更多接近实际工况的实验数据供模拟验证使用。

参考文献(References)

- [1] Mondal A, Dubey B K, Arora M, et al. Porous media transport of iron nanoparticles for site remediation application: A review of lab scale column study, transport modeling and field-scale application[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123443.
- [2] Kasaeian A, Daneshzarian R, Mahian O, et al. Nanofluid flow and heat transfer in porous media: A review of the latest developments[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107: 778-791.
- [3] Frippiat C C, Holeyman A E. A comparative review of up-scaling methods for solute transport in heterogeneous porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362(1/2): 150-176.
- [4] Boccardo G, Tosco T, Fujisaki A, et al. A review of transport of nanoparticles in porous media[M]//*Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 351-381.
- [5] Xu H J, Xing Z B, Wang F Q, et al. Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 195: 462-483.
- [6] Liu H J, Yang C H, Liu J J, et al. An overview of underground energy storage in porous media and development in China[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 117: 205079.
- [7] Cheng H, Wang F G, Guan X T, et al. A mathematical model for pre-Darcy flow in low permeability porous media with stress sensitivity and the boundary-layer effect [J]. *Engineering Geology*, 2023, 324: 107257.
- [8] Medved I, Černý R. Osmosis in porous media: A review of recent studies[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2013, 170: 299-317.
- [9] Maggay I V, Chang Y, Venault A, et al. Functionalized porous filtration media for gravity-driven filtration: Reviewing a new emerging approach for oil and water emulsions separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259: 117983.
- [10] Jansen J D. Adjoint-based optimization of multi-phase flow through porous media-A review[J]. *Computers & Fluids*, 2011, 46(1): 40-51.
- [11] Klimenko A Y. Early developments and inventions in underground coal gasification[M]//*Underground Coal Gasification and Combustion*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 11-24.
- [12] Ma J J. Review of permeability evolution model for fractured porous media[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(3): 351-357.
- [13] Abdelgawad K Z, Adebayo A R, Isah A, et al. A literature review of strength and stability of foam and their relationship with the absolute permeability of porous media [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 211: 110195.
- [14] Mujeebu M A, Abdullah M Z, Abu Bakar M Z, et al. A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(2): 216-230.
- [15] Mujeebu M A, Abdullah M Z, Abu Bakar M Z, et al. Applications of porous media combustion technology: A review[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9): 1365-1375.
- [16] Habibishandiz M, Saghir M Z. A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 30: 101267.
- [17] Hashan M, Jahan L N, Tareq-Uz-Zaman, et al. Modeling of fluid flow through porous media using memory approach: A review[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, 177: 643-673.
- [18] Hemmat Esfe M, Bahiraei M, Hajbarati H, et al. A comprehensive review on convective heat transfer of nanofluids in porous media: Energy-related and thermohydraulic characteristics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 178: 115487.
- [19] Ahmadi M, Hou Q F, Wang Y Y, et al. Interfacial and molecular interactions between fractions of heavy oil and surfactants in porous media: Comprehensive review [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 283: 102242.
- [20] Simonov O A, Erina Y Y, Ponomarev A A. Review of

- modern models of porous media for numerical simulation of fluid flows[J]. *Heliyon*, 2023, 9(12): e22292.
- [21] Kumar P, Pandey K M. A review on latest development in heat transfer through porous media in combination with nanofluids and wavy walls[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 7171–7175.
- [22] Quintard M, Kaviany M, Whitaker S. Two-medium treatment of heat transfer in porous media: Numerical results for effective properties[J]. *Advances in Water Resources*, 1997, 20(2/3): 77–94.
- [23] Xiong Q R, Baychev T G, Jivkov A P. Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016, 192: 101–117.
- [24] Esser S, Löwer E, Peuker U A. Network model of porous media – Review of old ideas with new methods[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 257: 117854.
- [25] Hamidi S, Heinze T, Galvan B, et al. Critical review of the local thermal equilibrium assumption in heterogeneous porous media: Dependence on permeability and porosity contrasts[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 962–971.
- [26] Wang S L, Yang Y, Lu T J, et al. Multi-scale simulation of the effect of microbial growth on the permeability of porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2023, 179: 104503.
- [27] Bosu S, Rajamohan N, Rajasimman M. Enhanced remediation of lead (II) and cadmium (II) ions from aqueous media using porous magnetic nanocomposites: A comprehensive review on applications and mechanism [J]. *Environmental Research*, 2022, 213: 113720.
- [28] Pati S, Borah A, Boruah M P, et al. Critical review on local thermal equilibrium and local thermal non-equilibrium approaches for the analysis of forced convective flow through porous media[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 132: 105889.
- [29] Pak T, Archilha N L, Berg S, et al. Design considerations for dynamic fluid flow in porous media experiments using X-ray computed micro tomography—A review[J]. *Tomography of Materials and Structures*, 2023, 3: 100017.
- [30] Ni T, Fan X M, Zhang J, et al. A Peridynamic-enhanced finite element method for Thermo-Hydro-Mechanical coupled problems in saturated porous media involving cracks[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2023, 417: 116376.
- [31] Nagel T, Beckert S, Lehmann C, et al. Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds: A review[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 323–345.
- [32] Wang Y N, Jin Z H. Effect of pore size distribution on hydrocarbon mixtures adsorption in shale nanoporous media from engineering density functional theory[J]. *Fuel*, 2019, 254: 115650.
- [33] Lei W H, Lu X K, Wang M R. Multiphase displacement manipulated by micro/nanoparticle suspensions in porous media via microfluidic experiments: From interface science to multiphase flow patterns[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2023, 311: 102826.
- [34] Xin S, Yanqing W, Xu Z, et al. Experiments and models for contaminant transport in unsaturated and saturated porous media: A review[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 192: 606–621.
- [35] Liu X, Zhou W X, Bian Y Y, et al. Numerical study on the heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel in the cooling channel filled with porous media[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 149: 107074.
- [36] Zhang X M, Yang H J, Huang T T, et al. Research progress of molecular dynamics simulation on the formation-decomposition mechanism and stability of CO₂ hydrate in porous media: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112820.
- [37] Zhang X M, Huang T T, Shan T, et al. Molecular dynamics study of the influence of water molecular phase state on the replacement of CO₂-CH₄ hydrate in porous media [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 391: 123401.
- [38] He Y L, Liu Q, Li Q, et al. Lattice Boltzmann methods for single-phase and solid-liquid phase-change heat transfer in porous media: A review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 160–197.
- [39] Yao J, Song W H, Wang D Y, et al. Multi-scale pore network modelling of fluid mass transfer in nano-micro porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 156–167.
- [40] Shen Y L, Liu S L, Jin H B, et al. Thermal investigation and parametric analysis of cascaded latent heat storage system enhanced by porous media[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 121982.
- [41] Yang Y L, Yuan W F, Hou J R, et al. Review on physical and chemical factors affecting fines migration in po-

- rous media[J]. Water Research, 2022, 214: 118172.
- [42] Liu Z B, Huang S M, Wang C H, et al. A review on non-Newtonian effects and structure-activity relationship of nanoparticles enhanced phase change materials in porous media[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107221.
- [43] 闫庆来, 何秋轩, 尉立岗, 等. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J]. 西安石油学院学报, 1990(2): 1-6.
- [44] 黄延章, 于大森. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.

Research progress on the hotspots of porous media science

LIU Yuewu^{1,2}, DING Jiuge¹, CUI Chunxue¹

1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract National energy security is an important guarantee to the sustainable development of national economy. In order to achieve China's carbon peaking and carbon neutrality goals, this article explores hotspot issues in the development of unconventional energy with a new development perspective of porous media science. In the paper, two aspects of porous media science are highlighted: (1) Multi-scale issues in unconventional petrochemical energy; (2) Multi field coupling theory and application issues related to the development of unconventional energy in porous media. The article reviews the development of the theory and application of multi-field coupling in porous media, as well as the current research hotspots and study trends; It also explores the current hotspots, difficulties, characteristics, transition methods, and development trends of multi-scale problems in porous media science which requires further in-depth research.

Keywords porous media; multiscale; multi-field coupling; unconventional energy; porous flow ●



(责任编辑 王微)