

山东省科学技术奖提名公示内容-自然科学奖

(2022 年度)

一、项目名称

多物理场作用下多孔介质孔-缝结构变形时效性对渗流控制机理与表征方法

二、提名者

(专家提名项目需注明专家的姓名、工作单位、职称职务和学科专业)

何满潮 中国矿业大学(北京)，教授/中国科学院院士，矿业工程/工程地质

三、提名意见

注：不超过 600 字。对科学发现点的原创性、科学价值、国内外自然科学界公认度以及推动学科发展的作用进行概述，并对照山东省自然科学奖授奖条件，填写提名意见和提名等级。

该项目针对地质能源开发工程中多孔介质渗流过程存在的渗透率预测瓶颈，深入研究了孔隙-裂隙非均匀结构中气体吸附/解吸、有效应力传递导致结构变形等因素耦合对渗透率的影响。研制了多尺度流动实验系统，提出一种观测流-固耦合测试方法，揭示了气体流动过程中的异步变形演化机理，阐明了渗流-扩散对储层渗透率的影响规律；建立了多尺度-多时度-多物理场分析方法，揭示裂隙有效应力与基质有效应力对整体变形的影响因素，获取煤中气体渗流与扩散过程所需时间尺度范围；建立了微观煤-气系统多物理场耦合分析方法，揭示了裂隙有效应力与基质非均匀吸附对煤体变形的影响机制，建立了考虑煤-基质多物理场耦合作用的渗透率演化方程。项目研究成果 5 篇代表性论文他引 300 余次，其中 1 篇入高被引论文。该项目技术思路独特新颖，测试手段先进，创新点明确，发展了双重孔隙介质气体动态渗流的分析方法，为我国开发非常规地质能源提供渗流力学基础理论和技术支持。

四、提名等级

自然科学二等奖

五、项目简介

多孔介质渗流力学广泛应用于煤炭开采、油气开发以及二氧化碳地质封存领域。由于煤层气和页岩气储层均是具有复杂孔-缝结构的含气地质体，采用降压采气会打破储层平衡状态，使储层内出现动态分布的多重孔隙压力系统。现有的孔隙介质弹性理论假设岩石孔隙系统处于平衡状态，忽视孔-缝结构异步变形相互作用对渗透性能的影响，导致实测煤和页岩渗透率均偏离传统孔隙介质弹性力学模型的理论值。研究多场作用下孔-缝结构变形时效性是评价其渗透性能的关键问题。本项目基于比奥孔隙介质弹性理论，发展了复杂孔隙介质渗流物理模拟方法，研究孔-缝结构随时间的变化特征，构建了多场耦合作用的介质渗透性演化表征方法与理论模型，取得了以下重要科学发现：

(1) **发现了气体流动诱发孔-缝结构异步变形演化特征。**针对孔-缝系统存在渗透性差异特点，提出了测量多孔介质“孔隙压力梯度+应变”的方法，首次观测到了气体在裂缝-孔隙之间质量传递导致介质从局域变形到整体变形的演化过程，发现了介质骨架变形对边界条件的响应特征。突破了现有研究仅在流-固系统平衡状态下评价多孔介质渗透性的局限，拓展了流体运移导致孔-缝结构变形的基本认识。

(2) **首次提出了基于有效应力传递的孔-缝结构异步变形力学模型。**建立了基于多重孔隙嵌套结构的离散体模型，解决了储气孔隙之间物质传输、应力传递与多尺度变形耦合难题。证实了孔隙压力平衡过程中裂缝-孔隙存在异步变形的观点，划分了不同边界条件下孔-缝结构渗透性变化阈值与演化模式。攻克了拟平衡态假设不能解释多重孔隙压力系统动态分布的难题，发展了多尺度连续介质力学模型。推动了复杂孔隙结构时-空演化研究，为构建多孔介质渗透率模型提

供指导方向和基础。根据该理论模型阐释了考虑气-固耦合的流态转换模式，发现了在孔隙压力梯度控制下气体多流态共存于孔-缝结构，修正了将仅在低压条件下考虑气体滑脱效应的传统认识。

(3) 首次揭示多孔介质在热-力扰动下孔-缝结构异步变形对流体运移的响应特征。提出了液相热挥发-气相热解吸作用下孔隙膨胀引起裂缝闭合-开裂贯通的观点，证实了热膨胀、热挥发、热开裂等因素对渗透性的影响，构建了多孔介质内固相-气相-液相的热力耦合模型，发现了热传导过程中孔-缝结构异步变形进程规律。利用在应力场作用下裂缝变形扩展特征，实现了孔隙结构变化对气体流向的调控，首次观测到了含气多孔骨架从孔隙弹性压密连续排气、到裂缝萌生-贯通-破坏过程中间断排气动态过程，阐释了介质体积扩容影响孔隙压力梯度变化机理，发现了介质体破裂引起气体反向流动规律，解释了矿震诱发瓦斯滞后涌出现象。

本研究5篇代表论文发表在岩石力学与工程学报、International Journal of Coal Geology、Fuel 等地球科学类顶尖期刊，总引用超过300余次，其中ESI高被引论文1篇。提出的学术观点和研究方法得到了国内外学术界积极评价，研究成果曾获得中国岩石力学与工程学会自然科学二等奖、山东省高等学校优秀科研成果一等奖，山东省自然科学学术创新奖。

六、代表性论文专著目录

| 序号 | 论文（专著）名称 | 刊名（出版社） | Doi /ISBN | 发表时间 | 作者（按刊物发表顺序） | 通讯作者（含共同） | 第一作者（含共同） | 他引总次数 | 检索数据库 | 通讯 / 一作是否为第一完成人 | 第一署名单位是否为第一完成单位 |
|----|--|--|---------------------------------|-------------|------------------------------------|-----------|-----------|-------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | Effects of gas diffusion from fractures to coal matrix on the evolution of coal strains: Experimental observations | International Journal of Coal Geology (Elsevier) | DOI: 10.1016/j.coal.2016.05.012 | 25/05 /2016 | 王春光, 刘继山, 冯吉利, 魏明尧, 王长盛, 蒋宇静 | 王春光 | 王春光 | 36 | Web of Science | 是 | 是 |
| 2 | Why shale permeability changes under variable effective stresses: New insights | Fuel (Elsevier) | DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.068 | 31/10 /2017 | 崔光磊, 刘继山, 魏明尧, 史锐, Derek Elsworth | 刘继山 | 崔光磊 | 62 | Web of Science | 否 | 否 |
| 3 | Reassessment of coal permeability evolution using steady-state flow methods: The role of flow regime transition | International Journal of Coal Geology (Elsevier) | DOI: 10.1016/j.coal.2019.103210 | 30/05 /2019 | 王林森, 陈中伟, 王春光, Derek Elsworth, 刘伟韬 | 王春光 | 王林森 | 46 | Web of Science | 是 | 是 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|----------------------------------|------------|------------------------|-----|-----|-----|----------------|---|---|
| 4 | A thermally sensitive permeability model for coal-gas interactions including thermal fracturing and volatilization | Journal of Natural Gas Science and Engineering (Elsevier) | DOI: 10.1016/j.jngse.2016.04.034 | 14/04/2016 | 滕腾, 王建国, 高峰, 鞠杨, 蒋长宝 | 王建国 | 滕腾 | 46 | Web of Science | 否 | 否 |
| 5 | 单轴应力 - 温度作用下煤中吸附瓦斯解吸特征 | 岩石力学与工程学报(中国岩石力学与工程学会) | DOI: 1000-6915(2010)05-0865-08 | 30/05/2010 | 何满潮, 王春光, 李德建, 刘静, 张晓虎 | 何满潮 | 何满潮 | 143 | Scopus 与 CNKI | 否 | 否 |

七、主要完成人情况

| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目贡献 |
|-----|----|------|------|--------|----------------------|--|
| 王春光 | 1 | 无 | 副教授 | 山东科技大学 | 山东科技大学 中国矿业大学(北京) | 项目负责人, 对《重要科学发现 1、2、3》做出了主要贡献。5 篇论文中的 2 篇通讯作者, 1 篇论文第二作者; 旁证材料: 附件 1.1、1.3、1.5 |
| 王建国 | 2 | 无 | 教授 | 中国矿业大学 | 中国矿业大学 | 主要完成人, 对《重要科学发现 3》做出了贡献。旁证材料: 附件 1.4 通讯作者 |
| 崔光磊 | 3 | 无 | 副教授 | 东北大学 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 | 主要完成人, 对《重要科学发现 2》做出重要贡献。旁证材料: 附件 1.2 第一作者 |

注: “主要完成人情况”摘自“主要完成人情况表”中的部分内容, 公示姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献。

八、主要完成单位情况

| 排名 | 完成单位 | 对项目贡献 |
|----|----------------|---|
| 1 | 山东科技大学 | 作为第一完成单位，支持第一完成人进行整体方案设计与项目实施，在科学发现1与2.2中提供硬件平台与研究团队支撑。 |
| 2 | 中国矿业大学 | 作为本项目的合作单位，支持第二完成人进行科学发现3.1的研究工作，提供了实验仪器与研究团队。 |
| 3 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 | 作为本项目的合作单位，支持第三完成人进行科学发现2.1的研究工作。 |
| 4 | 中国矿业大学（北京） | 作为本项目的合作单位，支持第一完成人完成科学发现3.2。 |