**青岛市科学技术奖提名公示内容-自然科学奖**

（2022年度）

**一、项目名称**

能源地质体孔-缝结构变形时效性对流体渗流调控的机理与表征

**二、推荐单位（专家）及推荐意见**

（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）

注：不超过600字。对照青岛市自然科学奖授奖条件，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。

地质能源开发工程中油气的运移、地热能的提取均依托于岩石多孔介质的渗透特性，该项目针对岩体孔-缝结构渗流过程中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，提出一种观测热-流-固耦合测试方法，揭示了流体流动过程中的异步变形演化机理，阐明了渗流-扩散-温度应力对储层基质与裂缝渗透率的影响规律；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，获取煤岩体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。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流体动态渗流的分析方法。

1. **推荐等级**

自然科学二等奖

1. **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、地热开发以及二氧化碳地质封存领域。对于具有孔-缝结构的能源地质体，在开发过程中必将对岩体结构产生扰动，对于储气地质体采用降压采气会打破储层平衡状态，出现动态分布的多重孔隙压力系统。对于地热储层当注入低温携热流体与储层换热后将打破储层热平衡状态，在储层失去温度平衡后产生的温度应力将进一步影响储层应力场。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，导致实测岩体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。该项目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）构建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）揭示了在热-流-力扰动下多孔介质孔-缝结构异步变形对流体运移的响应特征。提出了流体孔隙压力与温差导致的热应力作用下孔隙结构膨胀-收缩引起的裂缝闭合-张开观点，证实了热膨胀、热开裂、孔隙压力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，发现了热传导导致的孔-缝结构异步变形进程规律。利用在应力场作用下裂缝变形与扩展特征，实现了孔隙结构变化对气体流向的调控。首次揭示了热-流-力耦合作用下不同注采井网、裂缝形态对地热系统采热效果的影响。首次观测到含气多孔骨架从孔隙弹性压密连续排气、到裂缝萌生-贯通-破坏过程中间歇性排气过程。

该项目5篇代表论文先后被中国科学技术大学、同济大学、中国矿业大学、重庆大学、辽宁工程技术大学、法国国立路桥大学Navier实验室、美国宾夕法尼亚州立大学、俄亥俄大学、密西西比科技大学、澳大利亚CSIRO能源中心的学者引正面评价引用。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。

**五、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 |
| 1 | Effects of gas diffusion from fractures to coal matrix on the evolution of coal strains: Experimental observations | International Journal of Coal Geology | doi.org/10.1016/j.coal.2016.05.012 | 2016-05-25 | 王春光，刘继山，冯吉利，魏明尧，王长胜，  蒋宇静 | 王春光 | 王春光 | 36 | Scopus |
| 2 | Why shale permeability changes under variable effective stresses: New insights | Fuel | doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.068 | 2017-10-31 | 崔光磊，刘继山，魏明尧，  史锐，Derek Elsworth | 刘继山 | 崔光磊 | 62 | Scopus |
| 3 | Reassessment of coal permeability evolution using steady-state flow methods: The role of flow methods: The role of flow regime transition | International Journal of Coal Geology | doi.org/10.1016/j.coal.2019.103210 | 2019-05-30 | 王林森，陈中伟，王春光，  Derek Elsworth，刘伟韬 | 王春光 | 王林森 | 46 | Scopus |
| 4 | A thermally sensitive permeability  model for coal-gas interactions  including thermal fracturing and  volatilization | Journal of Natural Gas Science and Engineering | doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.034 | 2016-04-14 | 滕腾，  王建国，高峰，  鞠杨，  蒋长宝 | 王建国 | 滕腾 | 46 | Scopus |
| 5 | Study of the enhanced geothermal system (EGS) heat mining from  variably fractured hot dry rock under thermal stress | Renewable Energy | doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.054 | 2019-05-17 | 张伟，  曲占庆，郭天魁，王志远 | 张伟，曲占庆 | 张伟 | 50 | Scopus |

**六、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 | 提出测量裂隙-基质相互作用的实验方法，发展了非均质孔隙结构内气体多流态分析方法 |
| 张伟 | 2 | 无 | 讲师 | 山东科技大学 | 中国石油大学（华东） | 发现了热-流-力作用下孔隙-裂隙结构变形对流体渗流的响应机制 |
| 郭天魁 | 3 | 副所长 | 教授 | 中国石油大学（华东） | 中国石油大学（华东） | 建立了温度-渗流-应力耦合模型，探索了注采井网、裂缝特征对采热效果的影响 |
| 崔光磊 | 4 | 无 | 副教授 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 | 揭示了孔隙压力动态分布导致的裂隙与基质相互作用的力学机制 |
| 王建国 | 5 | 无 | 教授 | 中国矿业大学 | 中国矿业大学 | 建立了固体热膨胀与开裂、水分热挥发、气体热吸附的多场耦合模型 |

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。

**七、主要完成单位情况**

山东科技大学；中国石油大学（华东）；中国科学院武汉岩土力学研究所；中国矿业大学