

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	动力作用下岩石细微观异质结构损伤-渗流特性演变规律
主要完成人	黄晓林、祁生文、孙中豪、丁栋、郑博文、陆世锋
主要完成单位	西安交通大学、中国科学院地质与地球物理研究所、西安煤科地热能开发有限公司

二、提名意见

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>该项目系统研究了动力作用下岩石细微观异质结构损伤及其渗流特性演变规律，解决了地下核废料处置库灾害防控、深部能源开采等涉及的系列关键理论难题，具有重要的学术价值和理论意义。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”</p> <p>评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

三、项目简介

该项目属于地球科学领域，旨在为深地能源高效开发及核废料地质屏障的安全性评价提供关键科学依据与重要支撑。

为服务国家“西部大开发”和“一带一路”能源战略，保障能源安全并促进核能可持续利用，我国正积极推进干热岩地热开发、页岩油气商业化开采及高放核废料地质处置等重大地下工程，这些工程共同面临一个核心岩石力学挑战——动力扰动作用下岩石损伤演化与渗流响应之间的互馈机制尚不明确，严重制约工程安全性与资源采出效率。无论是干热岩压裂中的裂隙扩展、页岩储层在重复加卸载中的渗流通道演变，还是高放核废料处置库在地震等动力荷载长期作用下的渗透屏障完整性，均集中表现为对“动力作用—结构损伤—渗流特性”互馈机制的系统性认知缺失，导致数值预测可靠性不足、工程调控缺乏理论依据，已成为提升能源采收率和保障核废料处置安全的关键瓶颈。因此，开展岩石在动力作用下结构损伤—渗流协同演化机制研究，发展多场耦合本构理论与预测方法，不仅具有重要科学价值，更对实现国家能源战略目标和推动重大地下工程高质量发展具有深远意义。

本项目围绕动力作用下岩石细微观结构损伤—渗流特性演变规律开展了系统性研究。力求从应力波传播规律出发，揭示岩石细微观结构损伤的动力条件—动载传递规律；从多因素扰动作用下岩石细微观结构的渐进破裂过程阐明动力损伤机制；从流体在损伤岩石结构中跨尺度运移过程系统揭示渗流演变规律。主要发现点如下：

(1) 发现低幅值动力作用下岩石充填结构面呈现“压缩硬化记忆”与“卸荷致刚度跃升”现象，而高幅值动力作用下则呈现“颗粒破碎软化”现象，并揭示了其对应力波传播的调控效应；提出了充填结构面动力本构模型，构建了结构面与波互馈作用理论，阐明了岩石细微观结构损伤的动力条件—动载传递规律；该项成果有力推动了岩石动力学、地球物理学等理论的集成创新，为岩石动力损伤增渗研究奠定了动力学基础。

(2) 首次建立了考虑矿物结晶习性的岩石异质结构模拟与定量刻画方法，构建了多因素扰动下的岩石细微观损伤力学分析模型；揭示了控制岩石动力损伤演化的“拉应力集中效应”与“晶界互锁效应”，以及二者随矿物结晶习性演变的竞争作用机制；阐明了热损伤结晶岩负泊松比效应的微观机理，揭示了其与加载速率在岩石损伤演化中的协同作用；该成果揭示了岩石动力增渗的微观力学过程与机制，为该难题的破解提供了关键科学依据。

(3) 针对动力作用下岩石细微观结构损伤引发的孔隙结构非均质化与渗流特性演变机制不清的问题，本研究发展了嵌入电极的微流控芯片技术，实现了动力损伤岩石中复杂渗流过程的可视

化表征。通过该技术，系统探究了不同孔隙结构对岩石电阻率与渗透率的影响，揭示了动力作用导致的孔隙结构演变对岩体导电性与渗流行为的控制规律。在此基础上，发展了考虑双峰孔隙结构的孔隙网络模拟技术，提出了储层导电与渗流特性精准评价的新方法。

基于以上创新工作，2 篇代表性论文发表在 Nature Index 期刊《Journal of Geophysical Research: Solid Earth》上，其余 3 篇代表性论文分别发表在《Engineering Geology》《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》《Journal of Applied Geophysics》本领域专业权威期刊上。Web of Science（WOS）核心合集数据库他引总次数 78 次，得到了包括中国工程院院士、中国科学院院士、国际岩石力学学会前副主席、美国材料与试验学会（ASTM）Hogentogler 奖获得者等国内外知名学者的积极评价。

项目第一完成人黄晓林副教授入选陕西省三秦英才引进计划—优秀青年工程技术人才、中国科学院青年创新促进会成员、陕西省秦创原引用高层次创新创业人才、西安交通大学青年人才支持计划，并获陕西省秦岭生态环保青年学者称号。曾获得中国岩石力学与工程学会自然科学一等奖（R2）、陕西高等学校科学研究优秀成果一等奖（R1）、中国科学院院长优秀奖、陕西省土木建筑学会青年科技奖、中国科学院优秀博士论文等多项奖励。担任中国岩石力学与工程学会黄土力学与工程分会副秘书长、工程地质力学分会理事、岩石动力学专业委员会委员、地面工程专业委员会委员，同时担任《Scientific Reports》和《Geoenvironmental Disasters》等期刊编委。受邀在第十四届国际工程地质与环境大会、第二届黄土力学与工程防灾减灾学术研讨会、第 19 届岩石力学学术会议、CHINA ROCK 2018、CHINA ROCK 2024 等国内外重要学术会议上作邀请报告。第二完成人祁生文为中国科学院地质与地球物理研究所研究员，是国家杰出青年科学基金、国家优秀青年科学基金获得者。担任国际工程地质与环境协会副主席、国际地质灾害与减灾协会副理事长、中国岩石力学与工程学会副理事长、中国地质学会会士等重要学术职务。曾获中国公路学会科技进步一等奖（R1）、中国岩石力学与工程学会自然科学一等奖（R1）、国际工程地质与环境协会 Richard Wolters Prize、国际地质灾害与减灾协会科学成就奖、中国科学院卢嘉锡青年科技奖、中国岩石力学与工程学会青年科技奖、中国地质学会第 11 届青年地质科技奖“金锤奖”等重要奖项。担任《Engineering Geology》《Bulletin of Engineering Geology and the Environment》《Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》等本领域权威学术期刊编委。

四、客观评价

该项目成果发表在包括《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》《Engineering Geology》《Journal of Applied Geophysics》《Journal of Geophysical Research: Solid Earth》等在内的本领域专业权威期刊上，5 篇代表性英文论文 WOS 核心合集数据库他引总次数 78 次。项目得到了包括中国工程院院士、中国科学院院士、国际岩石力学学会前副主席、美国材料与试验学会（ASTM）Hogentogler 奖获得者等国内外知名学者的积极评价。

1. 中国工程院院士，国际工程地质与环境协会理事长，《工程地质学报》主编，清华大学王思敬教授发表在岩石力学领域内权威期刊《Rock Mechanics and Rock Engineering》上的论文中肯定了申请人利用金属 SHPB 装置研究了高振幅应力波在人工充填结构面中传播的研究工作。（代表性论文 1）（代表性引文 1）
2. 中国工程院院士，浙江大学建筑工程学院龚晓南教授，发表在岩石力学领域内权威期刊《ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING》上的论文中对申请人提到的利用 GBM 研究结晶习性对岩石力学特性的影响的研究工作表示肯定。（代表性论文 4）（代表性引文 2）
3. 中国科学院院士、浙江大学建筑工程学院陈云敏教授在文章中对申请人提出的孔隙几何形状对多孔介质电阻率影响的研究表示肯定，相关文章发表在期刊《Fuel》上。（代表性论文 3）（代表性引文 3）
4. 国际岩石力学学会（ISRM）前副主席，《International Journal of Rock Mechanics and Mining Science》主编，澳大利亚莫纳什大学 Jian Zhao 教授发表在期刊《Géotechnique Letters》上的论文评价了申请人在模拟地震冲击作用下充填材料动力响应的研究，该过程揭示了颗粒破碎引起的非线性行为，并因此影响了应力波的传播特征。（代表性论文 1）（代表性引文 4）
5. 法国国家科学研究中心（CNRS）高级科学家，美国科罗拉多矿业学院 André Revil 副教授在文章中对申请人提出的孔隙特征对多孔介质电导率的影响的研究表示肯定，相关文章发表在期刊《Journal of Geophysical Research: Solid Earth》上。（代表性论文 3）（代表性引文 5）
6. 国际知名工程力学专家，澳大利亚悉尼大学 Luming Shen 教授发表在期刊《International Journal of Impact Engineering》上的论文中正面评价和引用了申请人所揭示的颗粒破碎效应，总结归纳出了初始压密、颗粒破碎和二次压密三个变形损伤阶段，并刻画了不同阶段对应力波传播的影响。（代表性论文 1）（代表性引文 6）
7. 国务院政府特殊津贴专家，北京市教学名师，宝钢教育基金优秀教师，北科鼎新学者，北京科技大学李长洪教授。在其发表的论文中正面评价了申请人所观测和数值模拟复现的高温损伤岩石表现出的负泊松比效应。（代表性论文 5）（代表性引文 7）
8. 美国材料与试验学会（ASTM）Hogentogler 奖获得者，台湾阳明交通大学 Chih-Ping Lin 教授在文章中对申请人提出的有效介质理论和微流控芯片的研究表示肯定，相关文章发表在期刊《ACS Measurement Science Au》上。（代表性论文 2）（代表性引文 8）

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年 卷 页 码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间	通 讯 作 者	第 一 作 者	国内作 者	他 引 总 次 数	检 索 数 据 库	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	Propagation of high amplitude stress waves through a filled artificial joint: An experimental study	Journal of Applied Geophysics	Xiaolin Huang, Shengwen Qi, Kaiwen Xia, Hong Zheng, Bowen Zheng	2016, 130, 1-7	2016 年 4 月 12 日	Kaiwen Xia	Xiaolin Huang	Xiaolin Huang, Shengwen Qi, Hong Zheng, Bowen Zheng	30	SC I	是
2	Pore-scale investigation of the electrical resistivity of saturated porous media: Flow patterns and porosity efficiency	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	Zhonghao Sun, Ayaz Mehmani, Carlos Torres-Verdin	2021, 126 (12)	2021 年 12 月 10 日	Zhonghao Sun	Zhonghao Sun	Zhonghao Sun	13	SC I	是
3	The role of pore-shape and pore-space heterogeneity in non-archae behavior of resistivity index curves	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	Zhonghao Sun, Carlos Torres-Verdin	2022, 127 (9)	2022 年 9 月 16 日	Zhonghao Sun	Zhonghao Sun	Zhonghao Sun	7	SC I	是
4	Effect of the crystal habit on micromechanical extensile	Engineering Geology	Xiaolin Huang, Shengwen Qi, Songfeng Guo,	2022, 310, 106874	2022 年 10 月 5 日	Xiaolin Huang, Shengwen	Xiaolin Huang	Xiaolin Huang, Shengwen Qi, Songfeng Guo,	15	SC I	是

	behaviors of the crystalline rock during compression		Bowen Zheng, Qi Zhao, Peng Sha, Tianzuo Wang, Xianglong Yao, Ning Liang, Jinyuan Chang, Xiaoyang Rong			wen Qi		Bowen Zheng, Qi Zhao, Peng Sha, Tianzuo Wang, Xianglong Yao, Ning Liang, Jinyuan Chang, Xiaoyang Rong			
5	Characterization of the negative Poisson's ratio effect of the thermal-damaged crystalline rock by the grain-based model	International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	Xiaolin Huang, Ling Xu, Tengyuan Zhao, Shifeng Lu, Zhonghao Sun, Dong Ding	2023, 170, 105553	2023年7月26日	Ling Xu	Xiaolin Huang	Xiaolin Huang, Ling Xu, Tengyuan Zhao, Shifeng Lu, Zhonghao Sun, Dong Ding	13	SCI	是
合 计									78	SCI	是
补充说明（视情填写）：											

六、主要完成人情况表

姓 名	黄晓林	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 作为本项目第 1 完成人，是本项目的组织、设计、指导与直接参与者，是代表性论著 1、4、5 的唯一第一作者，科学发现点 1、2 的主要贡献者。发现了动力加载下岩石充填结构面的“颗粒破碎效应”、“压缩硬化记忆效应”，提出了结构面与应力波互馈作用理论，构建了岩石细观异质结构动力学响应透明化表征模型。			

姓 名	祁生文	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	研究员		
工作单位	中国科学院地质与地球物理研究所		
完成单位	中国科学院地质与地球物理研究所		
对本项目主要学术贡献： 作为本项目第 2 完成人，是代表性论著 1、4 的第二作者，科学发现点 1、2 的主要贡献者。对动力加载下岩石充填结构面的“颗粒破碎效应”、“压缩硬化记忆效应”等科学发现有重要贡献，对岩石细观异质结构动力学响应透明化表征模型有重要贡献。			

姓 名	孙中豪	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目第 3 完成人，是代表性论著 2、3 的唯一第一作者，科学发现点 3 的主要贡献者。揭示了不同地质过程孔隙结构演变对岩体导电和渗流特性的影响规律，发展了考虑双峰孔隙结构的孔隙网络模拟技术，提出了储层导电和渗流特性评价的新方法。</p>			

姓 名	丁栋	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	西安煤科地热能开发有限公司		
完成单位	西安煤科地热能开发有限公司		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目第 4 完成人，对于科学发现点 2 中岩石细观异质结构动力学响应透明化表征模型构建有重要贡献。</p>			

姓 名	郑博文	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国科学院地质与地球物理研究所		
完成单位	中国科学院地质与地球物理研究所		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目第 5 完成人，对于科学发现点 2 中岩石细观异质结构动力学响应透明化表征模型构建有重要贡献。</p>			

姓 名	陆世锋	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目第 6 完成人，对于科学发现点 2 中的热损伤导致岩石负泊松比效应微观力学机制及其对宏观力学行为的影响有重要贡献。</p>			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安交通大学作为本项目第 1 完成单位，从项目策划、组织实施、管理和协调等方面，支撑了动力作用下岩石细微观异质结构损伤—渗流特性演变规律研究，取得了创新性成果，主要贡献包括：建立了考虑矿物结晶习性的岩石宏观力学响应分析模型，发现了控制岩石微观结构损伤及破裂的“矿物边界自锁效应”、“拉应力集中效应”，揭示了高地温环境下结晶岩产生“负泊松比效应”的微观力学机制；揭示了不同地质过程孔隙结构演变对岩体导电和渗流特性的影响规律，发展了考虑双峰孔隙结构的孔隙网络模拟技术，提出了储层导电和渗流特性评价的新方法。</p>	
单位名称	中国科学院地质与地球物理研究所
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>中国科学院地质与地球物理研究所作为本项目第 2 完成单位，对发现点 1、2 做出了重要贡献：发现了岩石软弱充填结构面的“压缩硬化记忆效应”、“卸荷下刚度跳跃现象”以及“颗粒动力破碎效应”等重要科学规律和现象，建立了结构面与应力波互馈作用理论，阐明了其对动载传递的调控效应。</p>	
单位名称	西安煤科地热能开发有限公司
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安煤科地热能开发有限公司作为本项目第 3 完成单位，对发现点 2 做出了重要贡献：与第一完成单位共同揭示了高地温环境下结晶岩产生“负泊松比效应”的微观力学机制。</p>	

完成人合作关系说明

本项目的成员组成为黄晓林、祁生文、孙中豪、丁栋、郑博文、陆世锋，成员之间有实质性的合作关系，具体情况如下：

代表性论文 1：黄晓林是第一作者，祁生文是第二作者，郑博文是共同作者；

代表性论文 4：黄晓林是第一作者，祁生文是通讯作者，郑博文是共同作者；

代表性论文 5：黄晓林是第一作者，孙中豪、丁栋、陆世锋是共同作者。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	黄晓林/第一，祁生文/第二，郑博文/第五	2016 年 4 月 1 日 -2023 年 8 月 1 日	代表性论文 1	见附件 1.1
2	论文合著	黄晓林/第一，祁生文/第二，郑博文/第五	2016 年 4 月 1 日 -2023 年 8 月 1 日	代表性论文 4	见附件 1.4
3	论文合著	黄晓林/第一，孙中豪/第三，丁栋/第四，陆世锋/第六	2016 年 4 月 1 日 -2023 年 8 月 1 日	代表性论文 5	见附件 1.5

证明材料

1.代表性论文

- 1.1 Huang, X., Qi, S., Xia*, K., Zheng, H., Zheng, B.** 2016. Propagation of high amplitude stress waves through a filled artificial joint: An experimental study. *Journal of Applied Geophysics*. 130: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.04.003>.
- 1.2 Sun*, Z.,** Mehmani, A., Torres-Verdín, C. 2021. Pore-scale investigation of the electrical resistivity of saturated porous media: Flow patterns and porosity efficiency. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 126 (12). <https://doi.org/10.1029/2021JB022608>.
- 1.3 Sun*, Z.,** Torres-Verdín, C. 2022. The role of pore-shape and pore-space heterogeneity in non-archie behavior of resistivity index curves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 127 (9). <https://doi.org/10.1029/2022JB024792>.
- 1.4 Huang*, X., Qi*, S.,** Guo, S., **Zheng, B.,** Zhao, Q., Sha, P., Wang, T., Yao, X., Liang, N., Chang, J., Rong, X. 2022. Effect of the crystal habit on micromechanical extensile behaviors of the crystalline rock during compression. *Engineering Geology*. 310, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106874>.
- 1.5 Huang, X., Xu*, L., Zhao, T., Lu, S., Sun, Z., Ding, D.** 2023. Characterization of the negative Poisson's ratio effect of the thermal-damaged crystalline rock by the grain-based model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 170, 105553. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105553>.

2.代表性引文

- 2.1 Huang, J., Liu*, X., Zhao, J., Wang, E., Wang, S.** 2020. Propagation of stress waves through fully saturated rock joint under undrained conditions and dynamic response characteristics of filling liquid. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 53, 3637-3655. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02126-y>.
- 2.2 Hu, X., Liao*, D., Hu, H., Xie, S., Xie, N., Gong, X.** 2024. The influence of mechanical heterogeneity of grain boundary on mechanical and microcracking behavior of granite under mode I loading using a grain-based model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 57, 3139-3169. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03752-y>.
- 2.3 Chen, K., Liu, P., Wang, W., Wang, L., Wang, Y., Liu, H., Yan, Z., Zhao, Y., Song, K.,**

- Chen*, Y., Bate*, B. 2025. Hypergravity experimental study on immiscible fluid–fluid displacement in micromodels. *Fuel*. 391, 134776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134776>.
- 2.4 Li, X., Li*, H., Li, J., Zhao, J. 2018. Effect of joint thickness on seismic response across a filled rock fracture. *Géotechnique Letters*. 8 (3): 190-194. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00042>.
- 2.5 Qiang, S., Shi*, X., Revil, A., Kang, X., Song, Y., Xing, K. 2024. Quantitative evaluation of the effect of pore fluids distribution on complex conductivity saturation exponents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 129 (8). <https://doi.org/10.1029/2024JB028689>.
- 2.6 Wang, S., Shen*, L., Maggi, F., El-Zein, A., Nguyen, G. D., Zheng, Y., Zhang, H., Chen, Z. 2018. Influence of dry density and confinement environment on the high strain rate response of partially saturated sand. *International Journal of Impact Engineering*. 116: 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.02.006>.
- 2.7 Wu, Y., Song, Z., Wang, Y., Li, P., Zhou, B., Yang, Z., Li*, C. 2024. Behaviors of anthracite under differential cyclic loading (DCL) after wet and dry cycling: Deformability and hysteresis characteristics. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 83, 418. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03927-z>.
- 2.8 Hakiki*, F., Lin, C.-P. 2025. Electrical conductivity and permittivity of porous media: Origin, measurements, and implications. *ACS Measurement Science Au*. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.5c00070>.