

2026 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

复合地层等厚度水泥土帷幕截流关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科技厅

提名意见：

我国广泛分布第四系-风化岩富水复合地层，煤矿井筒涌水渗漏突出，传统注浆、旋喷桩及地连墙等工法因搭接缝、浆液窜流或槽段接头等原理性缺陷，难以形成连续截水帷幕。本项目将 TRD 工法引入复合地层矿井截水领域，围绕“成墙理论—材料调控—施工控制—效果评价”全环节，取得四项创新成果：

（1）揭示了复合地层切削粒料混合模式与四序成墙机理，创建了基于能量耗散的 TRD 法切削力学模型，提出了切削比参数体系与“施工参数→混合均匀度→成墙性能”定量传递模型，填补了复合地层等厚度水泥土帷幕设计理论空白；

（2）创立了基于“综合水灰比”的复合地层水泥土“水-固-化”多因素耦合性能调控理论与强度、渗透系数预测模型，研发了丙烯酰胺改性粉煤灰聚合增韧浆液材料，破解了地层天然含水率稀释效应导致室内配比与现场效果偏离的难题；（3）发明了“三阶段-五参数”多目标协同施工控制技术，实现了等厚度无接头复合地层连续墙的精细化动态控制；（4）构建了复合地层“水泥土材料—帷幕墙体—截水系统”三层级检验与截水效果四步评价方法，突破了传统单点取芯判定帷幕质量的局限。成果在骆驼山煤矿示范应用，实现了堵水率达 90.51%，井筒周边原渗漏降水漏斗消失。取得了显著的社会、经济和生态效益。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖授奖条件。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

三、项目简介

1.项目背景

我国华北、西北主要产煤区普遍覆盖第四系松散层与基岩风化带，构成“上软下硬”的复合地层，尤其多见以非胶结沙土、砂砾、砾石为骨架的含水层。煤矿井筒穿越此类地层时，渗漏涌水问题突出，“无井不漏”成为区域共性特征。传统疏排水模式不仅造成煤矿企业高昂的排水费用和水资源税负担，更造成地下水资源严重浪费，与生态保护和绿色矿山建设的战略要求之间的矛盾尖锐。长期以来，传统注浆、旋喷桩及地连墙等工法因搭接缝、浆液窜流或槽段接头等原理性缺陷，难以形成连续可靠的截水屏障。将 TRD 工法引入复合地层截水领域，充分利用原地层切削料、构建等厚连续无接头截水帷幕，是突破这一瓶颈的新途径。但复合地层切削能耗规律、多岩性切削粒料混合均质化工艺、复

合地层混合粒料水泥土性能调控方法及多目标协同施工控制理论等方面均属空白，缺乏复合地层连续等厚成墙的科学设计依据和施工控制方法。

2.主要技术内容与技术经济指标

本项目属于矿井水害防治与地下工程截水技术领域，涉及复合地层截水帷幕成墙理论、水泥土材料性能调控、TRD 工法施工控制及截水效果评价等前沿方向，是针对我国西部矿区第四系-风化岩复合地层井筒涌水治理难题的系统性创新与应用；符合陕西省“水和矿产资源”这一重点发展领域。项目完成的主要技术内容如下：

(1) 揭示了复合地层等厚度水泥土帷幕成墙机理，创建了复合地层截水帷幕设计理论，实现了复合地层帷幕结构参数与设备选参的定量设计。针对“松散层—风化带—基岩”复合地层结构，提出了五步综合探查法，精准查明了复合地层空间展布特征及基岩力学参数。揭示了复合地层 TRD 工法“四区循环”粒料混合模式与四序成墙机理，阐明了不同地层粒料打破原始层位、达成均质的内在机制。创建了基于能量耗散的复合地层 TRD 法切削力学模型与总功率方程，提出了切削比参数体系，建立了单次切削深度、刀头数量/间距、链条速度、横向推进速度之间的理论关系；引入信息熵理论建立了混合均匀度演化方程，提出了“施工参数→混合均匀度→成墙性能”定量传递模型，发现了混合均匀度边际效益递减阈值，填补了复合地层等厚度水泥土帷幕设计理论空白。

(2) 创立了基于“综合水灰比”的复合地层水泥土多因素耦合性能调控方法，研发了聚合增韧浆液材料，破解了复合地层天然含水率稀释效应导致室内配比与现场效果偏离的核心难题。针对复合地层天然含水率对实际水灰比的稀释效应导致室内配比与现场效果偏离的核心难题，将地层天然含水率、挖掘液含水量与水泥浆水灰比统一量化并纳入配比设计；建立了涵盖水泥掺量、综合水灰比、均匀系数、养护温度、龄期等全参数的墙体强度与渗透系数预测模型，形成了“水-固-化”多因素耦合性能调控理论框架，明确了各因素对墙体强度和渗透性的影响排序；研发了丙烯酰胺改性粉煤灰聚合增韧浆液材料与浆液稳定性测试方法，确定了复合地层最优配比，实现了墙体 28d 留置试样无侧限抗压强度、取芯抗压强度、渗透系数等参数全面优于《渠式切割水泥土连续墙技术规范》（JGJ/T303-2013）要求。

(3) 发明了“三阶段-五参数”复合地层等厚水泥土帷幕多目标协同施工控制技术，实现了帷幕等厚连续精细化动态控制。将 TRD 工法施工过程解构为“先行切削破碎、回撤搅拌混匀、正向水泥拌合”三个核心阶段，识别并优化了五大关键参数：先行挖掘速度、回撤搅拌速度、成墙搅拌速度、水泥浆液注入量、墙体垂直度等。提出了效率优化评估、刀具磨损/寿命预测等多参数科学设计计算方法，实现了对复合地层切削与拌合成墙过程的精细化动态控制。示范工程实现了墙体厚度稳定 0.6m、垂直度偏差 $\leq 1/250$ 、平均日成墙 16.6 延米，从工艺层面消除了传统工法难以避免的质量通病，构建了真正意义上的无接头连续防渗墙帷幕截水屏障。

(4) 研发了复合地层等厚度水泥土帷幕墙质量检验与效果评价技术, 实现了截水帷幕效果由“单点取样判定”向“多层级系统确证”的跨越。针对传统帷幕质量评价仅依赖钻孔取芯单点强度与渗透系数的局限, 综合运用留置试样测试、钻孔取芯与墙体开挖检验、井筒涌水量监测与水位观测三种手段, 形成了“材料性能—墙体质量—系统截水”三层级检验技术, 三层级数据相互印证, 以多维证据链替代单点数据作为质量评定依据。建立了复合地层无接头连续防渗墙截水效果四步评价方法, 实现了从“材料达标”到“系统可靠”的评价范式跃升。

3. 知识产权情况

项目获授权发明专利 8 项、实用新型专利 5 项, 发表学术论文 10 篇 (SCI/EI 收录 7 篇), 相关技术被 2023 年国家矿山安全监察局《全国煤矿防治水典型经验汇编》收录。

4. 应用推广及效益情况

成果在国能乌海能源骆驼山煤矿缓坡斜井完成示范应用, 达到了 16.6 延米/天的高效施工速率, 治理段井筒堵水率达 90.51%, 帷幕内外水位差 2.18m, 区域降落漏斗消失。2023 至 2025 年累计减少疏排水量 271.37 万 m^3 , 减少疏排水费用 4070.51 万元, 减少水资源税 2713.66 万元, 累计节支 6784.18 万元。同时, 成果应用产生了显著的企业新增经济效益: 2025 年新解放煤炭资源 150 万吨, 新增销售额超 6.0 亿元, 新增利润 2.7 亿元, 新增税收 6000 万元。项目成果实现了工作面的安全回采, 斜井涌水量明显减少, 有效保护了地下水资源, 实现了煤炭资源安全绿色高效开采; 形成了可复制、可推广的复合地层无接头连续防渗墙帷幕截水技术方案, 为我国富水复合地层矿井水害治理提供了可靠的技术支撑, 对保障矿区生产安全、保护地下水资源具有重要的推广价值。

四、客观评价

1. 国内外同类技术比较

在成墙理论与设计方法方面, 国内外现有 TRD 工法理论均基于均质地层假设, 未涉及链锯式刀具穿越软硬悬殊地层的切削力学行为。本成果创建了基于能量耗散的复合地层 TRD 切削力学模型与总功率方程, 提出了切削比参数体系, 建立了单次切削深度、刀头数量/间距、链条速度、横向推进速度之间的理论关系; 引入信息熵理论建立了混合均匀度演化方程, 提出了“施工参数→混合均匀度→成墙性能”定量传递模型, 揭示了混合均匀度边际效益递减阈值, 填补了复合地层等厚度水泥土帷幕设计理论空白。

在墙体材料性能调控方面, 传统水泥土配比设计仅考虑室内标准条件, 无法量化复合地层天然含水率对实际水灰比的稀释效应, 导致室内配比与现场效果严重偏离。本成果创立了基于“综合水灰比”的“水-固-化”多因素耦合性能调控理论, 建立了涵盖水泥掺量、综合水灰比、均匀系数、养护温度、龄期等全参数的墙体强度与渗透系数预测模型, 研发了丙烯酰胺改性粉煤灰聚合增

初浆液材料。经调控后墙体 28d 无侧限抗压强度、渗透系数，全面优于《渠式切割水泥土连续墙技术规程》（JGJ/T303-2013）要求。

在施工控制技术方面，传统高压旋喷桩帷幕、注浆帷幕浆液、地下连续墙等截水方法各有缺点。本成果发明了“三阶段-五参数”多目标协同施工控制技术，实现了先行挖掘速度、回撤搅拌速度、成墙搅拌速度、水泥浆液注入量等的最优参数组合。示范工程墙体厚度稳定，平均日成墙 16.6 延米，较旋喷桩帷幕提升约 1 倍，较地下连续墙提升约 30%。

在效果评价方面，传统帷幕质量评价仅依赖钻孔取芯单点强度与渗透系数，无法判定墙体全长连续性及整体截流效果。本成果构建了“材料性能—墙体质量—系统截水”三层级检验与“基准测定→过程跟踪→堵水率评估→理论互验”四步评价方法，以多维证据链替代单点判定，实现了从“材料合格”到“系统可靠”的评价跃升。示范工程堵水率达 90.51%，地下水位回升，帷幕内外水位差 2.18m，区域降落漏斗消失。

2. 科技查新与鉴定评价

2026 年 6 月，冶金工业信息标准研究院对项目成果进行国内外科技查新（附件：科技查新报告），查新结论如下：在所查国内外文献中，除本课题相关研究人员成果外，但未见其它与所述“复合地层无接头连续防渗墙帷幕截水关键技术及应用”内容相同的报道。

2026 年 8 月 31 日，中国煤炭工业协会组织专家对项目成果进行科技成果鉴定（中煤科鉴字〔2026〕第 DZ2029 号），鉴定意见认为：研究成果总体达到国际先进水平，其中复合地层无接头连续防渗帷幕设计方法、多因素耦合调控方法等部分核心技术达到国际领先水平。

3. 应用单位评价

国能（乌海）能源有限公司骆驼山煤矿作为成果直接应用单位（附件：应用证明），评价认为：项目研究成果实现了首采工作面的安全回采，斜井涌水量减少 90.51% 以上，显著降低了斜井排水费用，消除了井筒涌水携砂的安全隐患；有效保护了地下水资源，帷幕墙外侧地下水位已恢复至原始水位，生态环境明显改善，实现了煤炭资源安全绿色高效开采。2023 至 2025 年累计减少疏排水量 271.37 万 m³，减少疏排水费用 4070.51 万元，减少水资源税 2713.66 万元，累计节支 6784.18 万元。同时，成果应用产生了显著的企业新增经济效益：2025 年新解放煤炭资源 150 万吨，新增销售额超 6.0 亿元，新增利润 2.7 亿元，新增税收 6000 万元。

4. 学术评价与论著引用

项目在《煤炭科学技术》《煤矿安全》《Natural Hazards》《Theoretical and Applied Fracture Mechanics》《Materials》等国内外知名学术期刊发表论文 10 篇，其中 SCI/EI 收录 7 篇（附件：论文首页及收录证明）。成果被国内外同行持续关注和引用，《煤炭科学技术》发表的“基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究”一文系统阐述了复合地层等厚度水泥土帷幕截流技术的理

论框架与工程实践，已成为复合地层煤矿斜井截水领域的重要参考文献。《煤矿安全》发表的“煤矿区复合地层等厚度水泥土帷幕截水帷幕性能的影响因素试验研究”一文深入揭示了多因素对水泥土强度和抗渗性的耦合影响规律及敏感性排序。各论文总引用次数超 55 次。

5. 行业标准与知识产权认可

本成果提出的复合地层等厚度水泥土帷幕截流成套技术，被 2023 年国家矿山安全监察局《全国煤矿防治水典型经验汇编》收录（附件：应用证明），标志着该技术获得国家行业主管部门认可，具备了在行业内规模化推广应用的基础条件。

项目获授权发明专利 8 项、实用新型专利 5 项（附件：专利证书），在复合地层 TRD 工法截水帷幕的设计方法、施工工艺、材料配比、效果评价等方面形成了系统的知识产权布局，为技术成果的转化推广提供了知识产权保障。

五、应用情况

本成果针对我国“上软下硬”复合含水地层井筒涌水治理难题，形成了复合地层等厚度水泥土帷幕截流成套技术。成果自 2023 年起在国能乌海能源有限责任公司骆驼山煤矿完成整体技术应用，技术成熟可靠，已实施应用超过 2 年（应用起始时间：2023 年 5 月）。主要应用情况如下：

在国能乌海能源有限责任公司骆驼山煤矿缓坡斜井 TRD 工法帷幕截水工程中，整体应用了本成果的复合地层等厚度水泥土帷幕截流成套技术。工程帷幕墙长 497.46m，墙厚 0.6m，垂直度偏差 $\leq 1/250$ ，仅用 30 天完成，平均日成墙 16.6 延米。工程实施后，治理段井筒涌水量由 16.86m³/h 降至 1.6m³/h，堵水率达 90.51%，帷幕内外水位差 2.18m，区域降落漏斗消失。基于达西定律的理论渗漏量计算值 1.92m³/h 与实测残余涌水量 1.6m³/h 高度吻合，验证了帷幕连续性与截水可靠性。工程实现了首采工作面的安全回采，消除了井筒涌水携砂的安全隐患。

综合而言，本成果应用产生了显著的经济社会效益：2023 至 2025 年累计减少疏排水量 271.37 万 m³，减少疏排水费用 4070.51 万元，减少水资源税 2713.67 万元，累计节支 6784.18 万元；2025 年新解放煤炭资源 150 万吨，新增销售额 6.0 亿元，新增利润 2.7 亿元，新增税收 6000 万元。同时实现了井筒涌水携砂安全隐患的消除、帷幕墙外侧地下水位恢复至原始水位、矿区地下水资源有效保护和煤炭资源安全绿色高效开采的多重目标。（附件：应用证明）

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	国能(乌海)能源有限公司骆驼山煤矿	复合地层等厚度水泥土帷幕截流关键技术，包括创新成果(1)、(2)、(3)、(4)	骆驼山煤矿斜井截水帷幕	2023~2025	李文平 15848089294

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	煤矿斜井井筒涌水治理方法	中国	ZL 2023 1 0977300.4	2025.11.14	8476334	国家能源集团乌海能源有限责任公司；中煤科工西安研究院（集团）有限公司	石银斌；杨志斌；李文平；王世东；吕文波；王海；雷占；朱开鹏；惠磐科；牟林
2	发明专利	一种富水地层斜井井筒渗漏水定点治理方法	中国	ZL 2023 1 0004822.6	2025.11.11	8460304	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	王海；王晓东；杨志斌；张跃宏；朱开鹏；王淑璇；惠磐科；朱江涛
3	发明专利	一种地下工程地质灾害注浆效果模拟装置	中国	ZL 2024 11689077.4	2025.12.02	8538216	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	杨志斌；王浩；孙希杰；张艳超；惠磐科
4	发明专利	一种无机有机复合注浆止水材料、制备方法及其应用	中国	ZL 2021 11540968.X	2023.01.31	5717840	中煤科工集团西安研究院有限公司	张跃宏；王海；王晓东；周振方；赵春虎；冯龙飞；苗贺朝；柳昭星
5	发明专利	高韧性、吸水膨胀性复合注浆材料及其制备方法和应用	中国	ZL 2022 1 0986921.4	2023.09.26	6360108	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	张跃宏；王晓东；王海；赵春虎；冯龙飞；苗贺朝；柳昭星；韩乐
6	发明专利	一种常温强悬浮浆稳定性测定装置及方法	中国	ZL 2017 10883390.5	2019.10.18	3559885	中煤科工集团西安研究院有限公司	袁克阔；徐拴海；吴璋；李建文；汪成；曹祖宝；王晓东
7	发明专利	一种煤岩巷道钻孔孔底扩孔装置	中国	ZL 2025 10232267.1	2025.11.04	8430496	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	杨志斌；王浩；孙希杰；张艳超；惠磐科

8	论文	基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究	中文	DOI:10.13199/j.cnki.cst.2023-0313	2023.04.24		煤炭科学技术 (EI)	杨志斌;石银斌;王海;李文平;吕文波;雷占
9	论文	煤矿区复合地层等厚度水泥土截水帷幕性能的影响因素试验研究	中文	DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.20230783	2024.07.20		煤矿安全 (北大核心)	石银斌;杨志斌;李文平;王海;吕文波;惠磐科;雷占
10	实用新型专利	一种工程浆液的测量系统	中国	ZL 2024 21603056.1	2025.05.16	22864125	西京学院	张敏;袁克阔;范中鑫;张爱军;张耀;寇宏刚

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
杨志斌	1	准旗工程所所长	研究员	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	项目总负责人，对创新点 1、3 做出核心贡献。主持“骆驼山煤矿缓坡斜井 TRD 工法帷幕截水综合技术与示范工程”（合同编号：国乌-骆驼山〔2022〕40 号）立项与整体实施，确定项目总体技术方案与研究方法；揭示了富水复合地层煤矿斜井井筒涌水机理，提出了基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术方案（支撑材料：ZL2023100977300.4；《煤炭科学技术》EI 论文）；建立了“横向切削—回撤切削搅拌—喷浆搅拌成墙”三步施工法工艺参数体系与复合地层等厚度水泥土帷幕墙施工动态控制技术（支撑材料：ZL202510232267.1、ZL202411689077.4）；统筹示范工程现场施工组织与效果验证，对本成果技术体系构建与工程落地起主导作用。
王世东	2	副总经理	研究员	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	项目核心完成人，对创新点 1、3 做出重要贡献。参与揭示了富水复合地层煤矿斜井井筒涌水机理，参与提出了基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术方案（支撑材料：ZL2023100977300.4）；主持复合地层精细地质探查方案设计与实施，主导井检孔资料复核、水文地质补充钻探及地层力学参数测试工作，完成了复合地层空间展布特征精准查明与地质模型构建，为帷幕结构参数设计、设备选型及施工参数优化提供了基础地质数据；参与示范工程方案审查与现场技术指导。
袁克阔	3	所长	副研究员	西京学院	西京学院	项目核心完成人，对创新点 2、4 做出重要贡献。主持完成了等厚度水泥土截水帷幕材料性能试验研究工作（支撑材料：技术服务合同〔2022〕-026）；揭示了不同水泥掺量、水灰比和养

						护龄期对等厚度水泥土截水帷幕强度和抗渗能力的影响机制，建立了强触变性工程浆料流变特性表征模型及其稳定性测定方法（支撑材料：ZL201710883390.5、ZL202421603056.1；SCI 论文 3 篇）；其研究成果为本成果“水-固-化”多因素耦合性能调控理论的建立和材料配比优化提供了核心理论与试验支撑，为三层级检验与防渗效果评价技术中的材料层级评价提供了方法依据。
王海	4	研发中心 主任	研究员	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	项目主要完成人，对创新点 2、3 做出重要贡献。主导研发了无机有机复合注浆止水材料和高韧性吸水膨胀性复合注浆材料，显著提升了复合地层切削粒料水泥土固化效果与复杂地层适应性（支撑材料：ZL202111540968.X、ZL202210986921.4）；参与揭示了富水复合地层煤矿斜井井筒涌水机理，参与提出了基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术方案（支撑材料：ZL2023100977300.4；《煤炭科学技术》EI 论文、《煤矿安全》北大核心论文）；参与三步施工法工艺参数优化与施工动态控制技术研究；组织现场工程实施与材料配制工艺落实，确保示范工程材料与施工参数的准确执行。
李文平	5	防治水副总工	工程师	国能（乌海）能源有限公司骆驼山煤矿	国能（乌海）能源有限公司骆驼山煤矿	项目主要完成人，对创新点 1、3 做出重要贡献。作为委托方技术负责人，参与揭示了富水复合地层煤矿斜井井筒涌水机理，参与提出了基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术方案（支撑材料：ZL2023100977300.4；《煤炭科学技术》EI 论文、《煤矿安全》北大核心论文）；负责落实示范工程试验场地、施工条件与生产组织协调，参与三步施工法工艺参数现场优化与动态控制方案审定；组织井筒涌水量监测、帷幕内外水位观测及堵水率量化评估工作，为三层级检验与防渗效果评价技术的工程验证提供了现场数据支撑。

张跃宏	6	/	助理研究 员	中煤科工西安研 究院（集团）有 限公司	中煤科工西安研 究院（集团）有 限公司	项目主要完成人，对创新点 2 做出重要贡献。主导研发了无机有机复合注浆止水材料和高韧性吸水膨胀性复合注浆材料，揭示了材料组成与注浆性能之间的内在关联及多因素耦合影响规律（支撑材料：ZL202111540968.X、ZL202210986921.4）；参与了丙烯酰胺改性粉煤灰聚合增韧注浆材料的试验研究与性能优化工作，为复合地层水泥土帷幕材料配比设计提供了关键技术支撑。
张雁	7	水文分院副 院长	研究员	中煤科工西安研 究院（集团）有 限公司	中煤科工西安研 究院（集团）有 限公司	项目主要完成人，对创新点 1、4 做出重要贡献。参与依托工程“骆驼山煤矿缓坡斜井 TRD 工法帷幕截水综合技术与示范工程”项目整体技术方案审核与质量把控（支撑材料：科研合同国乌-骆驼山〔2022〕40 号）；主导“复合地层水泥土材料性能—连续墙体质量—帷幕系统截水效果”三层级综合检验与防渗效果评价方法构建，主持了复合地层精细地质探查与岩石力学参数测试成果的质量评定与审核工作；组织示范工程设计审查与验收，确保了成果技术方案的科学性与工程可靠性。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献 (限 600 字)
中煤科工西安研究院(集团)有限公司	1	(1) 负责项目总体技术方案的制定, 负责项目的组织实施; (2) 提出了复合地层等厚度水泥土帷幕截流技术设想和主体路线, 研究创建了复合地层等厚度水泥土帷幕设计理论; (3) 开发了 TRD 多目标协同施工控制技术, 确定先行挖掘速度、回撤搅拌速度、成墙搅拌速度、水泥浆液注入量等最优参数组合; (4) 研发了三层级、四步骤的等厚度水泥土帷幕质量检验与效果评价技术; (5) 将研究成果推广应用至骆驼山煤矿等富水复合地层矿井渗漏灾害防治。
西京学院	2	(1) 负责基础理论分析和室内试验测试工作; (2) 通过系统室内试验, 揭示了不同水泥掺量、水灰比和养护龄期对不同土体等厚度水泥土截水帷幕强度和抗渗能力的影响机制, 获得了缓坡斜井截水帷幕的最优材料配比参数; (3) 建立了强触变性工程浆料流变特性表征模型及其稳定性测定方法。
国能(乌海)能源有限公司	3	(1) 依托公司下属的骆驼山煤矿对本项目现场试验和示范, 立项科研项目和示范工程, 提供工程应用场景与现场试验验证条件; (2) 参与揭示了富水复合地层煤矿斜井井筒涌水机理, 参与提出了基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术方案; (3) 负责落实示范工程试验场地、施工条件与生产组织协调; (4) 组织井筒涌水量监测、帷幕内外水位观测及堵水率量化评估工作。

九、完成人合作关系说明

项目成果由中煤科工西安研究院(集团)有限公司、西京学院、国能(乌海)能源有限公司联合完成。杨志斌为第 1 完成人, 自 2022 年起作为项目总负责人, 主持“骆驼山煤矿缓坡斜井 TRD 工法帷幕截水综合技术与示范工程”(合同编号: 国乌-骆驼山(2022) 40 号)立项与整体研究工作。完成人之间形成了明确的合研、合作、合著关系, 具体如下:

1. 杨志斌(1)、王世东(2)、王海(4)、李文平(5)共同完成了本成果核心技术创新工作, 对创新点 1、3 做出了重要贡献: 揭示了富水复合地层煤矿斜井井筒涌水机理, 提出了基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术方案; 明

确了“横向切削一回撤切削搅拌一喷浆搅拌成墙”三步施工法工艺参数，建立了复合地层等厚度水泥土帷幕墙施工动态控制技术体系。以上工作形成了共同授权发明专利 1 项（ZL2023100977300.4）和共同发表核心论文 2 篇（《煤炭科学技术》EI 1 篇、《煤矿安全》北大核心 1 篇）。

2. 中煤科工西安研究院（集团）有限公司王海（4）、张跃宏（6）共同完成了新型注浆材料研发工作，对创新点 2 做出了重要贡献：研发了无机有机复合浆液材料，显著提升了复合地层切削粒料水泥土固化效果与复杂地层适应性。以上工作形成了共同授权发明专利 2 项（ZL202111540968.X、ZL202210986921.4）

3. 西京学院袁克阔（3）与中煤科工西安研究院（集团）有限公司杨志斌（1）通过签订《等厚度水泥土截水帷幕材料性能试验研究》技术服务合同（合同编号：（2022）-026）建立合作关系。袁克阔（3）在该合同项下完成了等厚度水泥土截水帷幕材料性能试验研究工作，对创新点 2 做出了重要贡献：通过系统室内试验，揭示了不同水泥掺量、水灰比和养护龄期对不同土体等厚度水泥土截水帷幕强度和抗渗能力的影响机制，获得了缓坡斜井截水帷幕的最优材料配比参数；建立了强触变性工程浆料流变特性表征模型及其稳定性测定方法。以上工作形成了发明专利 1 项（ZL201710883390.5）、实用新型专利 5 项（ZL202421603056.1、ZL202421047928.0、ZL20222695497.6、ZL202223425274.4、ZL20242980076.7）、SCI 论文 3 篇（第一作者，分别为《Natural Hazards》《Theoretical and Applied Fracture Mechanics》《Materials》），为本成果创新点 2 水泥土“水-固-化”多因素耦合性能调控理论的建立和材料配比优化和创新点 4 无接头等厚度连续墙质量与截水效果评价提供了核心理论与试验支撑。

4. 中煤科工西安研究院（集团）有限公司张雁（7）参与了本成果依托工程“骆驼山煤矿缓坡斜井 TRD 工法帷幕截水综合技术与示范工程”项目，对创新点 1、4 做出了重要贡献：负责现场工程方案审核与质量把控，参与“复合地层水泥土材料性能-连续墙体质量-帷幕系统截水效果”三层级综合检验与效果评价方法构建，独立完成了复合地层精细地质探查与岩石力学参数测试的成果审核及质量评定工作，确保了成果技术方案的科学性与可靠性，为复合地层地质模型构建和帷幕设计施工参数优化提供了质量保障。