

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

煤矿井下煤岩层裸眼智能加砂分段压裂关键技术装备及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科技厅

提名意见：

针对我国煤炭安全高效开采重大需求，聚焦瓦斯、冲击地压等煤岩动力灾害区域化、精准化治理难题，由中煤科工西安研究院（集团）有限公司牵头，联合陕西彬长矿业集团有限公司和陕西黄陵二号煤矿有限公司以井下定向长钻孔水力压裂为核心技术路径，历经 8 年产学研用联合攻关，系统突破了井下煤岩层裸眼智能加砂分段水力压裂的理论、工具、装备与工艺技术瓶颈。形成了煤矿井下裸眼钻孔分段压裂区域防灾理论、钻孔智能分段与精准控向造缝装备、低压端一体化智能液力驱动成套装备、煤矿井下裸眼加砂分段压裂技术模式等成套装备与技术体系；填补了煤矿井下裸眼智能加砂分段压裂领域技术装备空白，解决了行业重大技术短板与产业刚需难题。

研究成果已在陕西省陕北侏罗纪煤田坚硬顶板强矿压与冲击地压、黄陇侏罗纪煤田高瓦斯、冲击地压与围岩油型气、渭北石炭二叠纪煤田煤与瓦斯突出矿井中广泛应用，为我省能源安全和煤炭安全高效开采提供了有力支撑。同时，研究成果亦在内蒙古、山西、新疆、安徽、山东、贵州等典型煤矿区类似地质条件矿井开展了应用推广，取得了良好应用效果，推动了煤岩动力灾害区域化、精准化、智能化防治技术装备升级，促进了煤炭工业高质量发展。

项目获授权发明专利 25 项，发表高水平论文 40 篇，制定标准 7 项，软件著作权 2 项。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖 二 等奖。

三、项目简介

“煤矿井下煤岩层裸眼智能加砂分段压裂关键技术装备及应用”成果主体来源于中煤科工西安研究院（集团）有限公司科技创新基金项目“煤矿井下煤层水力加砂压裂技术及装备研究（2017XAYZD06）”、“煤矿井下瓦斯钻孔加砂压裂高效抽采技术研究及工程试验（2018XAYZD10）”研究成果。

煤炭是我国主体能源和兜底保障资源，伴随着开采中心向西向深转移，开采面临冲击地压、矿震、煤与瓦斯突出等动力灾害日趋严重。现有密集钻孔抽采、松动爆破等局部措施治理范围小、效率低，难以满足区域化、超前化、精准化治理需求。水力压裂是实现增透促抽、卸压防冲和顶板弱化的有效手段，但常规井下短钻孔压裂覆盖范围有限，且缺乏适应裸眼长钻孔工况的分段压裂工具、加砂装备及裂缝扩展理论支撑，工艺体系亦不完善。项目团队历经 8 年产学研用联合

攻关，突破了井下定向长钻孔水力加砂分段压裂的理论、工具、装备、工艺四大瓶颈，形成成套技术装备体系，实现煤岩动力灾害由“局部点式治理”向“区域精准治理”的跨越。主要创新成果如下：

1.创立了厚硬顶板结构调控减能、碎软煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝的区域压裂防灾理论

①揭示了西部侏罗纪煤田厚硬顶板“分流河道横向迁移叠置成岩”的沉积成因及其低孔超低渗致密特征（孔隙度 $<14\%$ 、渗透率 $<0.2\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ），阐明了大面积悬顶—联动破断诱发强矿压的演化规律；提出了“垮落填充+煤柱+承重岩层”协同支撑的单一厚硬顶板防治机制，建立了“低位降来压步距—高位增破断频次—高低位减叠加效应”的复合关键层协同分区减能理论。②揭示了原生—碎裂结构煤层裂隙网络扩展规律和碎软煤层“颗粒逐级封堵—次级裂缝萌生—贯通成网”的增透机理，阐明了水分子通过与煤表面含氧官能团形成氢键而优先占据吸附位、促进甲烷解吸的微观竞争吸附机制。③建立了非均质煤岩体裂缝扩展的层理转向判据（临界转向角 45° ），提出了紧邻煤层顶板长钻孔分段压裂的裂隙立体穿层演化模式，为精准控缝提供了理论依据。

2.创制了具备单孔 360° 全方位定点精准造缝能力的孔内“智慧感知—无限级定点压裂—双模精准控向”成套装备体系

①针对压裂过程实时感知与智能决策需求，研制了孔内智能感知与决策控制系统，集成多参数传感短节与智能控制模块，形成“压裂信息实时感知—压裂参数动态调优—全参数实时动态大数据健康分析”智能决策闭环，为裸眼分段压裂植入“智慧大脑”。②首创拖动式无限级裸眼分段压裂成套装备，集成输送导向器、正反洗控制器、定压释放器与可分离安全装置，实现统径输送 1000m 以上、裸眼密封 85MPa 、孔内正反洗与遇阻自分离，突破裸眼长钻孔“封不住、送不远、级受限、不安全”瓶颈，实现单孔任意位置无限级精准定点压裂。③发明了机械自重与电子陀螺双模式控向造缝装置，以重力定向和电控定向双路径协同，实现 360° 全方位水力喷砂射孔造缝，定向精度分别优于 3° 和 1° ，工作压力达 70MPa ，从根本上破解“造缝方向不可控”行业难题，推动压裂由“全孔大面积粗放”向“定点定向精准”升级。

3.创制了具备大排量注入、远程精准混砂、全链智能调控能力的远程电控输混砂与压裂泵一体化智能液力驱动成套装备

①针对井下狭小空间大排量高砂比压裂动力不足的瓶颈，首创大排量变频加砂压裂泵组，单泵排量由 $0.2\text{ m}^3/\text{min}$ 跃升至 $1.5\text{ m}^3/\text{min}$ ，工作压力达 70MPa ，砂比 $\geq 20\%$ ，具备清水/加砂双模式切换能力，突破大流量区域压裂动力瓶颈。②针对远距离精准输砂混砂难题，发明远程电控“加—混—注”双绞笼稳定混砂装备，井下遥控距离达 3 km ，最大供砂速率 $0.45\text{ m}^3/\text{min}$ ，砂比达 30% ，实现压裂液与支撑剂远程精准配比、连续稳定输送。③开发水力加砂压裂智能集控系统，实现泵组、混砂、供液多模块联动启停、运行监控、安全预警与参数可视化，构建“远端操控—精准混砂—大排量注入”全链条智能驱动体系，支撑井下定向长钻孔压

裂由“小排量清水压裂”向“大排量远程加砂压裂”能级跃升。

4.构建了差异化区域压裂技术体系并实现规模化工程应用

形成了覆盖典型灾害场景的成套技术工艺，包括单一厚硬顶板超前致裂弱化、复合坚硬顶板高低位错步分层分段压裂、中硬煤层顺层长钻孔分段水力压裂、碎软煤层顶板长钻孔水力喷砂预制导向缝分段压裂、底板（顶板）梳状长钻孔分段水力压裂防控技术。成果在陕西、内蒙古、山西、安徽、新疆、山东等主要产煤区 30 余个大型矿区规模化应用，累计实施 2000 余孔、2.5 万段压裂。工程验证表明：矿压类灾害周期来压步距降低 25%~35%，微震总能量降低 40%~70%，能量释放模式由“低频高能”转为“高频低能”；瓦斯抽采效率提升数倍至数十倍，压裂孔较普通孔甲烷体积分数提高 10~20 倍，百米钻孔纯量提高 5~45 倍。实现了“以压代爆”的根本性转变，显著缓解了采掘接替紧张。

项目获授权发明专利 25 项，发表高水平论文 40 篇，制定标准 7 项，软件著作权 2 项。经中国煤炭工业协会等鉴定，成果整体达到国际领先水平。项目成果累计服务 30 多个矿井 150 余个采掘工作面，治理区域超过 $7.5 \times 10^8 \text{m}^2$ ，新增经济效益逾 40 亿元。项目填补了井下裸眼智能加砂分段压裂领域技术装备空白，为深部煤岩动力灾害区域精准治理提供了可复制、可推广的工程范式，对推动煤矿智能化建设和实现灾害“区域精准”防治具有重大战略意义，经济、安全和社会效益显著。

四、客观评价

（一）项目成果鉴定评价

1. 2020 年 5 月 14 日，中国煤炭工业协会组织专家对“煤矿井下坚硬顶板强矿压灾害定向长钻孔分段水力压裂超前防治技术及装备”项目进行了成果鉴定。鉴定意见如下：①首创了煤矿坚硬顶板定向长钻孔裸眼分段水力压裂技术，开展了顶板压裂目标层优选、定向长钻孔布置方式和压裂参数的研究，建立了井下超长综采工作面强矿压超前治理新模式。②研发了煤矿井下水平定向长钻孔的多点拖动式裸眼分段压裂成套装备，包括裸眼钻孔密封、定压压裂、可控安全分离和裸眼钻孔清洗等适用于坚硬顶板分段水力压裂的关键装置。③研发了煤层坚硬顶板分段水力压裂效果立体综合监测技术，实现了多方位监测压裂裂缝在目标层中的展布方位和形态等特征，为煤矿井下水力压裂效果评价、钻孔在平面或空间布置和压裂参数优化提供了监测评价新方法。④项目成果已在布尔台、保德、榆家梁和石圪台等特大型煤矿成功应用，有效缓解和控制了综采工作面强矿压显现，取得了良好效果，经济和社会效益显著。⑤项目成果在煤矿井下坚硬顶板强矿压灾害防治领域达到国际领先水平。

2. 2022 年 4 月 14 日，中国煤炭工业协会组织专家对“复合坚硬顶板冲击地压定向长钻孔分段压裂区域防治技术”项目进行了成果鉴定。鉴定意见如下：①建立了复合坚硬顶板覆岩运移力学模型，揭示了复合坚硬顶板地质成因和致灾机理，提出了复合坚硬顶板高低位错步短距破断冲击防治机制，形成了“低位降来压步距-高位增破断频次-高低位减叠加效应”的复合坚硬顶板冲击地压区域

防治技术模式。②研制了复合坚硬顶板井下定向长钻孔分段压裂成套装备，开发了“高-低”位复合坚硬顶板快速、精准定向成孔工艺，建立了压裂关键层选取和裸眼分段压裂关键技术参数优化方法。③研发了多参量动-静结合的“时空”响应综合监测技术，建立了能量、应力、矿压及变形等多数据源融合的防冲效果定量评价方法，为煤矿井下定向长钻孔分段压裂防冲优化设计及区域防冲效果监测评价提供了方法手段。④项目成果达到国际领先水平。

3. 2024年4月15日，中国煤炭工业协会组织王双明院士、张建国教授级高工等行业权威专家对“煤矿井下瓦斯抽采水力加骨料压裂强化增透关键技术及装备”项目进行了成果鉴定。鉴定意见如下：①研发了煤矿井下电控与气动双模式远程自动、均匀混骨料装置，电控混骨料装置加骨料比可达30%，输送距离达3km以上，输送量达2.7m³/h，气动混骨料装置额定耐压68MPa。②开发了远程加骨料压裂泵组，排量达1.5m³/min，输出最大压力50MPa。研制了水力驱动加骨料定向造缝和长钻孔裸眼防堵分段压裂成套装置。③优化了喷枪直径、喷射角度和压力、压裂液排量、骨料类型和粒度等关键技术参数，形成了顶板长钻孔低压端加骨料压裂增透强化瓦斯抽采工艺技术。④在山西阳泉、安徽淮南等矿井开展工程应用，瓦斯抽采量和持续时间较清水压裂提高了2倍以上，经济和社会效益显著。⑤项目成果达到国际领先水平。

（二）科技查新报告

中煤科工西安研究院（集团）有限公司委托一级查新资质单位陕西省科学技术情报研究所对项目所列创新点进行了查新，报告检索了国内外相关数据，查新结论为：在国内外公开发表的中外文文献中，除本项目成员发表的论文和申请的专利以外，未见与煤矿井下定向长钻孔裸眼水力加砂分段压裂的裂缝扩展理论、智能分段压裂工具与加砂装备及技术应用成效等查新点完全相同的报道。

（三）社会评价

1. 煤矿井下水平定向长钻孔多点拖动式裸眼分段压裂技术入选国家矿山安全监察局矿山安全先进适用技术及装备推广目录（2024），井下定向长钻孔水力压裂顶板防冲技术被纳入《煤矿安全规程》（2025）和《防治煤矿冲击地压细则》（矿安〔2026〕82号）。

2. 中国煤炭报、中国化工报、国际煤炭网、中央企业学习平台、陕西日报、新浪网、东方财富网等主流新闻期刊、媒体及公众号对该技术研究成果进行了报道和关注，报道称：中国煤科西安研究院创新性地提出了煤矿井下定向长钻孔分段水力压裂技术，研发了煤矿井下分段压裂装备，实现了煤层瓦斯高效抽采和坚硬顶板区域超前治理，有效地破解了行业难题。创造了煤矿井下分段水力压裂定向钻孔长度800米、单孔20段压裂的施工纪录；碎软煤层中实现了单孔瓦斯日抽采纯量超3000m³；坚硬顶板采用分段水力压裂措施后，顶板来压步距、动载系数和最高压力值均显著下降，有效防控了矿压动力灾害。

五、应用情况

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	国能神东煤炭布尔台煤矿	厚硬顶板结构调控减能区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、单一厚硬顶板超前致裂弱化区域压裂技术	已在 12 上 302、42203 等 6 个工作面开展了坚硬顶板致裂弱化技术应用并全面推广，累计压裂钻孔 148 个、工程量 36489 m、压裂 1546 段。	2018~2025	关丙火 15209128080
2	国能神东煤炭哈拉沟煤矿	厚硬顶板结构调控减能区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、单一厚硬顶板超前致裂弱化区域压裂技术	已在 22522、31201 等 4 个工作面开展了顶板致裂弱化技术应用并全面推广，累计压裂钻孔 30 个、工程量 13955 m、压裂 348 段。	2023~2025	关丙火 15209128080
3	内蒙古丹蒙得煤业有限公司鑫臻煤矿	厚硬顶板结构调控减能区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、复合坚硬顶板高低位错步分层分段压裂技术	已 6 个综采工作面开展坚硬顶板致裂弱化技术应用并全面推广，累计压裂钻孔 50 余个、工程量 43000 余米、压裂 1130 余段。	2022~2025	李建辉 15147737015
4	陕西黄陵二号煤矿有限公司	煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、中硬煤层顺层长钻孔分段水力压裂技术	已在 5 个采掘工作面开展了瓦斯与油型气高效治理、强矿压防控，累计压裂钻孔 75 个、工程量 41400m、压裂 1200 段。	2019~2025	李晓辉 15991910652
5	陕西彬长孟村矿业有限公司	厚硬顶板结构调控减能区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、中硬煤层顺层长钻孔分段水力压裂技术、复合坚硬顶板高低位错步分层分段压裂技术	在瓦斯高效治理与冲击地压防控方面实现规模化应用，累计服务于 4 个采掘工作面，压裂钻孔 30 个、工程量 13768m、压裂 376 段	2020~2025	何伟 18691085756

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
6	陕西彬长小庄矿业有限公司	厚硬顶板结构调控减能区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、中硬煤层顺层长钻孔分段水力压裂技术、复合坚硬顶板高低位错步分层分段压裂技术	在瓦斯高效治理与冲击地压防控方面实现实现规模化应用，服务于 3 个采掘工作面以及对应的大巷区域，累计压裂钻孔 56 个、工程量 33200m、压裂 963 段。	2022~2025	张亚朝 18991008052
7	富县矿业有限公司芦村二号煤矿分公司	非均质穿层精准控缝区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、底板（顶板）梳状长钻孔分段水力压裂技术	在油型气防治方面实现实现规模化应用，已累计服务于 3 个采掘工作面，累计压裂 43 段	2024~2025	李博 19929738888
8	陕西陕煤韩城矿业有限公司桑树坪二号井	碎软煤层增透促抽区域压裂防灾理论、智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、底板（顶板）梳状长钻孔分段水力压裂技术	在煤与瓦斯突出矿井区域瓦斯超前抽采中进行技术试验与应用，累计压裂 3 孔	2023~2025	王辉 13892507507
9	山西新景矿煤业有限责任公司	碎软煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝的区域压裂防灾理论，智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、底板（顶板）梳状长钻孔分段水力压裂技术	服务于煤与瓦斯突出矿井区域瓦斯超前高效抽采，开展了 5 孔次的分段水力压裂技术试验与应用	2023~2025	范毅伟 18634255066
10	淮北矿业有限公司	碎软煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝的区域压裂防灾理论，智能压裂工具与精准造缝成套装备、智能液力驱动成套装备、顶板长钻孔分段水力压裂技术	在芦岭煤矿开展了 1 孔次的碎软强突煤层顶板定向长钻孔套管固孔分段加砂压裂区域超前抽采卸压技术试验与应用	2023~2024	王浩然 13521954398

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	一种智能无限级分段水力压裂系统	中国	ZL 2021 1 0654589.7	2023-04-07	5846594	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	郑凯歌；张俭；陈冬冬；赵继展等
2	发明专利	一种煤矿井下车载串式双路加砂压裂成套装备	中国	ZL2021 1 1354545.9	2023-08-15	6235274	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	赵继展；张俭；孙四清；王晨阳；刘乐等
3	发明专利	一种井地联合煤矿井下定向长钻孔水力压裂方法	中国	ZL 2023 1 0980408.9	2023-11-17	6496036	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	孙四清;李浩哲;范耀;庞涛等
4	发明专利	煤矿井下长钻孔水力压裂封隔器解卡方法	中国	ZL 2021 1 0428683.0	2023-05-09	5958309	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	陈冬冬；张俭；郑凯歌等
5	发明专利	一种双螺旋槽外覆光纤钻杆及通讯钻机	中国	ZL 2022 1 0470253.X	2024-10-18	7451654	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	赵继展；张俭；龙威成；陈志胜等
6	发明专利	一种单通道多级控向喷射器、压裂装置及压裂方法	中国	ZL 2022 1 490462.7	2025-04-25	7897662	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	杨欢；郑凯歌；杨森；王泽阳等
7	发明专利	一种煤矿井下定向压裂射孔装置及其定位方法	中国	Z2020 1 0630402.5	2022-06-14	5228743	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	张俭;王晨阳;赵继展;孙四清;郑凯歌;陈冬冬等
8	发明专利	一种煤矿井下加砂压裂控制系统及其控制方法	中国	ZL2018 1 1421241.8	2021-08-10	4603131	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	赵继展；孙四清；陈冬冬等
9	行业标准	煤矿井下煤层分段水力压裂技术规范	中国	NB/T 11749-2024	2024-12-25		中煤科工西安研究院（集团）有限公司、淮河能源控股集团有限责任公司等	孙四清；郑凯歌；陈冬冬；张俭；赵继展等
10	行业标准	煤矿区井地联合水力压裂技术规范	中国	NB/T 11936-2025	2025-12-18		中煤科工西安研究院（集团）有限公司、淮河能源控股集团有限责任公司等	孙四清；郑凯歌；陈冬冬；赵继展；张俭等

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
孙四清	1	书记、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	项目总负责，对创新成果 1、2、3、4 均有重要贡献。具体包括：确定项目的总体技术方案并组织实施；总体把关煤矿井下煤岩层裸眼智能加砂分段压裂装备研发与技术开发，发明了煤矿井下定向长钻孔水力压裂方法。
郑凯歌	2	副院长	副研究员	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	项目主要参与人，对创新成果 1、2、3、4 均有重要贡献。具体包括：创立了厚硬顶板结构调控减能区域压裂强矿压与冲击地压防治理论，发明了无限级分段压裂系统，具体负责压裂装备研发与技术开发工作，对项目成果转化与推广有重要贡献。
陈冬冬	3	/	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	项目主要参与人，对创新成果 1、2、3、4 均有重要贡献。具体包括：创立了碎软煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝的区域压裂防灾理论，发明了井下长钻孔水力压裂封隔器解卡方法，全程参与负责压裂装备研发与技术开发，推动项目成果转化与推广。
张 俭	4	所长	高级工程师	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	项目主要参与人，对创新成果 2、3、4 有重要贡献。具体包括：发明煤矿井下定向压裂射孔装置及其定位方法，全程参与负责压裂装备研发与技术开发，推动项目成果转化与推广。
邹 磊	5	部长	高级工程师	陕西彬长矿业集团有限公司	陕西彬长矿业集团有限公司	项目主要参与人，对创新成果 3、4 有重要贡献。具体包括：提供项目工程验证矿井，组织完成了现场工业性试验与效果考察，反馈工程与设备问题并参与工艺迭代优化。
赵继展	6	/	副研究员	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	项目主要参与人，对创新成果 2、3 有重要贡献。具体包括：主导发明了井下智能压裂工具、压裂泵组与智能集控系统。

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
戴楠	7	副所长	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	项目主要参与人，对创新成果 2、4 有重要贡献。具体包括：参与井下智能压裂工具开发，推动项目成果转化与推广。
李晓辉	8	副总经理	高级工程师	陕西黄陵二号煤矿有限公司	陕西黄陵二号煤矿有限公司	项目主要参与人，对创新成果 3、4 有重要贡献。具体包括：提供项目工程验证矿井，组织完成了现场工业性试验与效果考察，反馈工程与设备问题并参与工艺迭代优化。
王晨阳	9	副所长	工程师	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	项目主要参与人，对创新成果 2、4 有重要贡献。具体包括：参与煤矿井下重力定向造缝装置开发，推动项目成果转化与推广。
刘乐	10	/	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	项目主要参与人，对创新成果 2、4 有重要贡献。具体包括：参与煤矿井下电子陀螺控向造缝装置开发，推动项目成果转化与推广。

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
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）提出了厚硬顶板结构调控减能、碎软煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝的区域压裂防灾理论； （3）研发了煤矿井下裸眼钻孔智能分段压裂工具与精准控向造缝装备； （4）创制了具备大排量注入、远程精准混砂、全链智能调控能力的远程电控输混砂与压裂泵一体化智能液力驱动成套装备； （5）形成了单一厚层坚硬砂岩顶板分段压裂超前致裂弱化、复合坚硬顶板高低位错步分层分段压裂、中~硬煤层顺层长钻孔分段水力压裂、碎软煤层顶板长钻孔水力喷砂预制导向裂缝分段压裂、煤层底（顶）板梳状长钻孔分段水力压裂等技术体系； （6）将研究成果大规模推广应用至坚硬顶板弱化、冲击地压与矿震、煤层区域增透强化抽采、碎软强突煤层远程抽采卸压等煤岩动力灾害区域防治。
陕西彬长矿业集团有限公司	2	（1）作为项目工程验证与规模化应用的依托单位，提供了大佛寺煤矿、孟村煤矿、胡家河煤矿、小庄煤矿等典型矿井的工程试验条件，组织完成了现场工业性试验与效果考察。 （2）负责成套压裂装备与技术方案在现场的落地实施，反馈工程与设备问题并参与工艺迭代优化。 （3）牵头编制企业应用标准与操作规程，推动了成果在陕西及周边矿区的规模化推广应用
陕西黄陵二号煤矿有限公司	3	（1）作为项目工程验证与规模化应用的依托单位，提供了黄陵二号煤矿工程试验条件，组织完成了现场工业性试验与效果考察。 （2）负责水力压裂装备与技术方案在现场的落地实施，反馈工程与设备问题并参与工艺迭代优化。 （3）推动了成果在陕西及周边矿区的规模化应用。

九、完成人合作关系说明

本项目由中煤科工西安研究院（集团）有限公司牵头，联合陕西彬长矿业集团有限公司和陕西黄陵二号煤矿有限公司共同完成，完成人之间形成了理论创新、工具研发、装备研制、工艺优化与工程应用的全链条协同合作关系。孙四清为成果第1完成人，自2016年开始至今，作为总负责人主持项目立项和整体研究工作，主要完成人在项目中的合作经历如下：

中煤科工西安研究院（集团）有限公司孙四清 1、郑凯歌 2、陈冬冬 3、张俭

4、赵继展 6、戴楠 7、王晨阳 9、刘乐 10 均为本项目研发团队核心成员，合作开展创立了厚硬顶板结构调控减能、碎软煤层增透促抽、非均质穿层精准控缝的区域压裂防灾理论，研制出定点精准造缝成套装备和远程电控输混砂与压裂泵一体化智能液力驱动成套装备，并致力于推动项目成果转化与推广。合作成果：发表《碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践》（煤炭学报）、《煤岩动力灾害井下定向长钻孔区域压裂防治技术与工程实践进展》（煤田地质与勘探）、《碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用》（煤炭科学技术）、《井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践》等学术论文 40 余篇，获授权发明专利“一种智能无限级分段水力压裂系统”、“一种煤矿井下车载串式双路加砂压裂成套装备”、“一种井地联合煤矿井下定向长钻孔水力压裂方法”等 25 项、起草发布《煤矿井下煤岩层分段水力压裂技术规范》等行业标准 7 项。

中煤科工西安研究院（集团）有限公司孙四清 1、郑凯歌 2、陈冬冬 3、张俭 4、王晨阳 9、刘乐 10 和陕西彬长矿业集团有限公司邹磊 5 共同完成成果在彬长矿区的工业性试验与工程应用，推动了成果在陕西及周边矿区的规模化应用。

中煤科工西安研究院（集团）有限公司孙四清 1、郑凯歌 2、陈冬冬 3、赵继展 6 和陕西黄陵二号煤矿有限公司李晓辉 8 共同完成成果在黄陵矿区的工业性试验与工程应用，推动了成果的规模化应用。