项目公示信息（309-4007）

一、项目名称：

煤层压注液态CO_2致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术与装备

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省煤炭学会

提名意见：

本成果聚焦我国煤层透气性差、吸附瓦斯占比高、预抽效率低、达标耗时长等关键问题，率先提出了井下“压注L-CO_2致裂煤岩增透”及“相变气化驱置瓦斯增流”一体化强化抽采方法。按照“理论研究→室内宏细观试验→数值仿真→成套设备研制→工程试验→抽采体系”技术路线开展研究工作。主要创新性工作是：（1）创建了压注L-CO_2致裂增透煤岩及相变驱置CH_4强化瓦斯抽采理论。揭示了L-CO_2 “高压致裂、冷冲扩缝、溶蚀增隙”协同增透煤层多尺度孔裂隙形成演化机制，阐明了L-CO_2气化“相变增压、渗流驱替、置换解吸”协同增流驱置煤层瓦斯作用机制。（2）研发了首台套井下压注L-CO_2致裂增透煤岩及相变驱置瓦斯装备。开发了井下高压L-CO_2致裂煤岩增透和中低压L-CO_2增透煤岩及相变驱置CH_4技术，研制了无级可调压注泵(40MPa，150L/min)、井下低压L-CO_2储运罐(2.3MPa，2m^3)和中压无级可调压注泵(12MPa，50L/min)，开发了预防高压、堵管、窒息、低温风险的安全保障技术，形成了“注气保压-注液增压-换热置气-邻孔抽采”促抽瓦斯工艺。（3）构建了井下压注L-CO_2“注液增透-气化增流”强化瓦斯抽采技术体系。提出了低压间歇式/连续式罐注、中压间歇式泵注、泵注/罐注协同的工艺，形成了L-CO_2“单孔压注-邻孔群抽-压抽协同”分区段促抽瓦斯模式。

本成果对解决我国高瓦斯矿井治理钻孔数量多、瓦斯抽采效率低、抽采达标时间长、工作面采掘抽接续紧张等难题具有重要的理论与实践意义。

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奖提名条件。**特提名为陕西省科技进步奖一等奖**。

三、项目简介

我国70%煤矿为高瓦斯矿井，80%重大事故与瓦斯相关，瓦斯抽采是治理瓦斯灾害最直接的方法，提升瓦斯抽采效率的关键是致裂煤岩增透和驱置瓦斯增流。针对我国煤层透气性差、吸附瓦斯占比高、预抽效率低、达标耗时长等问题，借鉴水力压裂、L-CO_2相变爆破致裂、SC-CO_2压裂破岩驱置油气、注氮驱替瓦斯的成功经验，基于L-CO_2不可压缩、低粘（水的1/10）、低温（-30℃）、相变等特性，率先提出了井下“压注L-CO_2致裂煤岩增透”及“相变气化驱置瓦斯增流”一体化强化抽采方法。

通过低温液体储运罐、压注泵，将L-CO_2以一定压力（高、中、低）和流量注入煤层；在泵注高压、低温冲击、理化溶蚀作用下，重构煤岩孔裂隙，提升煤岩渗透率；在泵注压力和L-CO_2气化相变增压作用下，气态CO_2驱替煤层游离瓦斯；气态CO_2与CH_4在浓度梯度和竞争吸附作用下，置换煤层吸附瓦斯。西安科技大学、淮南矿业、陕煤集团等单位合作，依托国家、部省和企业科研项目开展技术攻关，取得了三个方面的创新性成果。

（1）创建了压注L-CO_2致裂增透煤岩及相变驱置CH_4强化瓦斯抽采理论。通过L-CO_2压裂煤岩造缝导流、低温冲击增强裂隙扩展、理化溶蚀强化孔隙扩大、压注过程相态演化规律，以及L-CO_2相变气化驱置瓦斯、竞争置换吸附瓦斯等方面的研究，明晰了L-CO_2致裂煤岩及驱置CH_4“注液增透-气化增流”特性参数及压注过程相态演化规律，揭示了L-CO_2“高压致裂、冷冲扩缝、溶蚀增隙”协同增透煤层多尺度孔裂隙形成演化机制，阐明了L-CO_2气化“相变增压、渗流驱替、置换解吸”协同增流驱置煤层瓦斯作用机制。

（2）研发了首台套井下压注L-CO_2致裂增透煤岩及相变驱置瓦斯装备。开发了井下高压L-CO_2致裂煤岩增透技术，研制了无级可调压注泵(40MPa，150L/min)，开发了储运罐、压注泵、调节阀、保压注液和回流管网监控平台，实现了温度、压力、流量、浓度的智能监测与调控。开发了中低压L-CO_2增透煤岩及相变驱置CH_4技术，研制了井下低压L-CO_2储运罐(2.3MPa，2m^3)和中压无级可调压注泵(12MPa，50L/min)，开发了预防高压、堵管、窒息、低温风险的安全保障技术，

形成了“注气保压-注液增压-换热置气-邻孔抽采”促抽瓦斯工艺。

（3）构建了井下压注L-CO_2“注液增透-气化增流”强化瓦斯抽采技术体系。基于提高L-CO_2注入压力、流量、总量均有利于驱置CH_4，结合“注液增透-气化增流”促抽瓦斯效率，提出了低压间歇式/连续式罐注、中压间歇式泵注、泵注/罐注协同的工艺。结合煤层瓦斯赋存条件、抽采难易程度、抽采达标时间，基于L-CO_2压裂半径和气态CO_2渗流半径，提出了L-CO_2“单孔压注-邻孔群抽-压抽协同”分区段促抽瓦斯模式。构建了L-CO_2“布孔-压注”参数分级指标体系，确定了压注孔、抽采孔间距等现场布孔参数，以及L-CO_2注入压力、流量、总量等参数。

研究成果出版专著1部，授权专利23项，软著2项，发表论文34篇，煤安认证8项，经中国煤炭工业协会鉴定达到国际领先水平。研发的技术装备在淮南矿业、陕西煤业、平煤集团等企业所属高瓦斯矿井应用，提升了瓦斯抽采技术水平，新增产值21.76亿元，利润8.8亿元，经济和社会效益显著。

四、客观评价

（1）2026 年 7 月 27 日，中国煤炭工业协会组织专家对“液态 CO_2 压裂增透煤岩及相变驱置 CH_4 关键技术及应用”项目进行鉴定，研究成果达到**国际领先水平**。鉴定意见：研发了井下液态 CO_2 压裂增透煤岩及相变驱置 CH_4 成套装备及施工工艺；构建了液态 CO_2 压裂多重效应增透煤岩及驱置瓦斯强化抽采理论体系；确定了液态 CO_2 “渗流驱替-置换解吸”主导过程动态转换的临界压力；形成了“液气平衡-注液增压-停泵闷孔-合闸抽采”的压注抽采工艺与安全保障技术体系。

（2）2021 年 7 月 11 日，中国煤炭工业协会组织专家对“低透煤层液态二氧化碳压裂增透及驱替瓦斯技术研究”项目进行鉴定，研究成果达到**国际先进水平**。鉴定意见：研发了国内首套井下高压液态 CO_2 压裂增透系统装备及工艺；研究了液态 CO_2 致裂增透煤层“动态补压、气液平衡”的保压供输系统，确保储罐内液态 CO_2 持续输出，维持低温泵正常运行。

（3）2020 年 4 月 27 日，中国煤炭工业协会组织专家对“高瓦斯

低透气性强冲击煤层增透卸压新工艺研究”项目进行鉴定，研究成果达到**国际先进水平**。鉴定意见：研发了首套井下中-低压液态CO_2相变驱替瓦斯系统与装备，保证了泵注作用下液态CO_2向煤层恒压稳流输送；确定了液态CO_2损伤煤体孔隙结构、孔隙率、透气性系数演化及CO_2/CH_4气体组分竞争吸附时效特性，并在工程实践中得到验证。

（4）2025 年 12 月 26 日，陕西陕煤黄陵矿业有限公司组织专家对“复杂构造高应力区气相压裂卸压增透关键技术研究与应用”项目进行验收，同意通过验收。验收意见：研发了适合黄陵二号矿 2#煤层的液态CO_2相变致裂卸压增透与驱替置换煤层瓦斯的装备及工艺技术体系；瓦斯抽采浓度是原始抽采浓度的 2.25-2.96 倍，瓦斯抽采纯量是原始抽采纯量的 5.20-6.36 倍。

（5）2021 年 12 月 13 日，陕西陕煤黄陵矿业有限公司组织专家对“瓦斯抽采超声波增透与二氧化碳驱替技术研究与应用”项目进行验收，同意通过验收。验收意见：成功开展了超声波增透与液态CO_2驱替单孔联合促抽煤层瓦斯试验，研发了适合双龙煤矿顺层钻孔超声波增透与液态CO_2驱替煤层CH_4系统装备，完善了工艺技术体系。

（6）2023 年 2 月 10 日，“高瓦斯低透性煤层液态CO_2相变脉动驱替CH_4强化抽采技术”入选国家矿山安全监察局推广应用项目。

五、代表性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	授权公告日	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	井下煤层液态二氧化碳致裂增渗系统及方法	中国	ZL20181067981.X	2023.06.06	第 6027129 号	西安科技大学；西安天河矿业科技有限责任公司	文虎;樊世星;马砺;金永飞;郭军;李珍宝;于志金;郝健池
2	发明专利	井下高压液态 CO_2 压裂增透煤岩成套装备设计方法	中国	ZL202010510972.0	2022.12.20	第 5658570 号	西安科技大学	文虎;樊世星;程小蛟;刘名阳;翟小伟;张铎;魏高明;费金彪;王虎
3	发明专利	基于液态 CO_2 致裂增透和相变驱置瓦斯抽采达标等效量化评估方法	中国	ZL202010234776.5	2023.02.28	第 5753766 号	西安科技大学	文虎;程小蛟;樊世星;郭慧敏;金永飞;费金彪;于志金;郭军;张铎
4	发明专利	一种液态 CO_2 相变水力切割装置	中国	ZL201911120496.5	2024.09.27	第 7413330 号	西安科技大学	文虎;王虎;樊世星;刘名阳;魏高明;郝健池
5	发明专利	基于固态 CO_2 相变致裂煤层及驱替瓦斯装置及工艺	中国	ZL202110710002.X	2024.08.06	第 7264277 号	西安科技大学	文虎;郭曦蔓;程小蛟;张铎;魏高明;刘名阳;王振平;王虎
6	发明专利	顺层钻孔液态二氧化碳相变压力脉动变化模拟实验装置及设计方法	中国	ZL202411519293.4	2025.12.30	第 8612485 号	西安科技大学	米万升;文虎;樊世星;程小蛟;李日军;柳博聪;金霏阳
7	发明专利	液态二氧化碳相变驱置煤层瓦斯合理注入压力的确定方法	中国	ZL202410468580.0	2025.12.06	第 8579329 号	西安科技大学	樊世星;宋金锁;程小蛟;刘名阳;武伟;柳博聪;李日军
8	计算机软件著作权	煤矿液态二氧化碳相变驱替瓦斯安全预警管理系统 V1.0	中国	2024SR1977824	2024.12.04	第 14381697 号	西安科技大学	文虎;樊世星;程小蛟;刘文永;刘名阳;金霏阳;柳博聪
9	论文	Determining the reasonable volume required to inject liquid CO_2 into a single hole and displace CH_4 within the coal seam in bedding boreholes: case study of SangShuPing coal mine	中国	2023 年 266 卷 126522 页	2022.12.22	Energy	西安科技大学	文虎;米万升;樊世星;刘名阳;程小蛟;王虎

10	论文	穿层钻孔液态 CO_2 压裂煤层起裂压力模型探究和工程验证	中国	2021 年 40 卷 703 页	2021.04.01	岩石力学与工程学报	西安科技大学；淮南矿业（集团）有限责任公司 陕西煤业股份有限公司	樊世星;文虎;金永飞;陈建;童校长;程小蛟;于志金

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
文　虎	1	副校长	教授	西安科技大学	西安科技大学	项目总负责人、总体技术负责
徐景果	2	副主任	高工	陕西煤业股份有限公司	陕西煤业股份有限公司	组织煤层压注 L-CO_2 致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术原位试验
樊世星	3	/	副教授	西安科技大学	西安科技大学	研发煤层压注 L-CO_2 致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术与装备
陈　建	4	副总经理	正高工	淮南矿业(集团)有限责任公司	淮南矿业(集团)有限责任公司	组织煤层压注 L-CO_2 致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术原位试验
程小蛟	5	/	副教授	西安科技大学	西安科技大学	研究压注 L-CO_2 致裂增透煤岩及相变驱置 CH_4 强化瓦斯抽采理论
王世斌	6	原总经理	正高工	陕西煤业股份有限公司	陕西煤业股份有限公司	组织煤层压注 L-CO_2 致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术原位试验
费金彪	7	副总经理	高工	西安天河矿业科技有限责任公司	西安天河矿业科技有限责任公司	研发井下压注 L-CO_2 致裂增透煤岩及相变驱置瓦斯装备
王　宁	8	生产技术部主任师	高工	陕西煤业股份有限公司	陕西煤业股份有限公司	组织煤层压注 L-CO_2 致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术原位试验
张　维	9	总工程师	高工	陕西煤业股份有限公司	陕西煤业股份有限公司	组织煤层压注 L-CO_2 致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术原位试验
刘文永	10	/	高工	西安科技大学	西安科技大学	研发井下压注 L-CO_2 致裂增透煤岩及相变驱置瓦斯装备

李　凯	11	业务主管	高工	陕西煤业股份有限公司	陕西煤业股份有限公司	组织煤层压注L-CO_2致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术原位试验
刘名阳	12	/	高工	西安科技大学	西安科技大学	研究中低压L-CO_2增透煤岩及相变驱置CH_4技术并开展原位实验
金霏阳	13	/	博士	西安科技大学	西安科技大学	研究压注L-CO_2致裂增透煤岩及相变驱置CH_4强化瓦斯抽采理论
童校长	14	资深主管	高工	淮南矿业(集团)有限责任公司	淮南矿业(集团)有限责任公司	研究井下压注L-CO_2“注液增透-气化增流”强化瓦斯抽采技术体系
柳博聪	15	/	讲师	西安科技大学	西安科技大学	研究压注L-CO_2致裂增透煤岩及相变驱置CH_4强化瓦斯抽采理论

七、主要完成单位情况

1. 西安科技大学

西安科技大学全面负责本项目研究方案的制定与组织实施，完成了煤层压注液态CO_2致裂增透及气化增流一体促抽瓦斯技术与装备研究，与陕西煤业股份有限公司、淮南矿业(集团)有限责任公司等合作完成。

2. 陕西煤业股份有限公司

作为该项目的主要参与单位之一，陕西煤业股份有限公司积极推动项目现场应用示范，协助西安科技大学选取了彬长、黄陵、韩城等典型高瓦斯矿区作为试验场景。

3. 淮南矿业(集团)有限责任公司

作为该项目的主要参与单位之一，淮南矿业(集团)有限责任公司推动项目现场应用，协调下属矿井开展原位试验和现场应用推广。

4. 西安天河矿业科技有限责任公司

作为该项目的主要参与单位之一，西安天河矿业科技有限责任公

司积极推广装备应用，在井下压注 L-CO_2 致裂增透煤岩及相变驱置瓦斯装备开展大量研究。

八、完成人合作关系说明

项目实施期间，文虎、樊世星、程小蛟、刘文永、刘名阳、金霏阳、柳博聪为西安科技大学主要完成人；徐景果、王世斌、王宁、张维、李凯为陕西煤业股份有限公司主要完成人；陈建、童校长为淮南矿业(集团)有限责任公司主要完成人；费金彪为西安天河矿业科技有限责任公司主要完成人。具体合作关系如下：

1. 文虎/1、樊世星/3、程小蛟/5、费金彪/7 共同获得发明专利“基于液态 CO_2 致裂增透和相变驱置瓦斯抽采达标等效量化评估方法”。

2. 文虎/1、樊世星/3、程小蛟/5、金霏阳/13、柳博聪/15 共同获得发明专利“顺层钻孔液态二氧化碳相变压力脉动变化模拟实验装置及设计方法”。

3. 文虎/1、樊世星/3、王世斌/6、刘名阳/12、柳博聪/15 共同合作发表论文“Correlation analysis of injection parameters for low-medium pressure injection of liquid CO_2 for CH_4 displacement in coal seams”。

4. 文虎/1、樊世星/3、陈建/4、程小蛟/5、刘名阳/12、童校长/14 共同合作发表论文“井下高压液态 CO_2 压裂增透煤岩成套装备研制与应用”。

5. 文虎/1、樊世星/3、程小蛟/5、王宁/8、刘名阳/12、金霏阳/13、柳博聪/15，共同合作发表论文“液态 CO_2 相变驱替煤层 CH_4 钻孔压力脉动促抽效能中试研究”。

6. 文虎/1、樊世星/3、程小蛟/5、王世斌/6、李凯/11 共同合作完成“韩城矿区 3#松软煤层顺层钻孔液态 CO_2 压裂增透技术研究”科研项目。

7. 文虎/1、徐景果/2、樊世星/3、程小蛟/5、费金彪/7、刘文永/10 共同合作完成“孟村煤矿高瓦斯强冲击煤层液态 CO_2 驱替瓦斯技术研究”科研项目。

8. 文虎/1、樊世星/3、程小蛟/5，王宁/8、张维/9、刘文永 10、

金霏阳/13 共同合作完成“复杂构造高应力区气相压裂立体卸压增透关键技术研究与应用”科研项目。

9. 文虎/1、樊世星/3、陈建/4、程小蛟/5、刘名阳/12、金霏阳/13、童校长/14、柳博聪/15 共同合作完成“潘三矿高瓦斯软煤钻孔 CO_2 致裂增透技术研究”科研项目。