

## 项目公示信息

一、项目名称：煤自燃危险性本质判定方法与三位一体协同防控技术研发及应用

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

提名意见：

该成果以煤自燃危险性判定与三位一体协同防控为目标，基于建立的煤大分子模型阐释了煤氧复合反应过程中氧原子的落位倾向和锚定特征，明确了煤自燃活性基团演变动力学特性，揭示了次生羟基诱导下的煤自燃链式反应机理；结合静态吸氧和交叉点温度法构建了差定温互补的煤自燃危险性双因子综合判定指数；创建了基于非线性动力学的煤自燃转捩态势判定理论，提出了以“转捩温度”为主要判定指标的煤自燃发展态势评估方法；突破了色谱仪分级控温技术，研发了便携式矿用本安型气相色谱仪、矿用激光光谱束管在线监测技术，建立了多源信息融合煤矿火灾监测预警与智能管控平台。研发了兼具“物理绝氧-化学阻断-立体封堵”的煤自燃协同防控技术，包括具备低温直注和汽化远输特性的液态二氧化碳防灭火成套系统、搭载抗氧化剂的纳米复合凝胶煤自燃阻化材料和矿用低热高发泡漏风封堵材料。该成果对保护煤炭资源、减少煤自燃引起的环境污染和保障煤炭安全高效开采都具有重要意义。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技进步奖提名条件。**特提名为陕西省科技进步奖二等奖。**

### 三、项目简介

本项目属于矿山工程技术基础科学及应用领域。

煤炭作为我国主体能源，随着社会经济的快速发展，其需求量持续增长。煤自燃是煤炭生产、储存、运输及使用过程中所面临的重大挑战之一，不仅烧毁大量的煤炭资源、造成严重的环境污染，而且威胁着煤矿井下人员的生命安全。因此，破解煤自燃灾害超前预警与精准防控难题是实现煤矿安全高效开采的重要举措。

本项目聚焦煤自燃反应机理、危险性本质判定、发展态势精准评估和高效协同防控等关键科学问题，通过理论分析、模型构建、实验测试、现场应用等手段开展系统性和创新性研究。针对煤氧复合反应过程机理不明确、自燃危险性评价指标单一、自燃参数监测预警难以实现多源融合、火灾防控缺乏系统性等关键技术难题，提出了基于氧原子落位倾向的羟基自促进氧化煤自燃理论，构建了差定温结合的双因子煤自燃危险性综合判定指数，创建了基于非线性动力学的煤自燃转捩态势判定理论；研发了便携式矿用本安型气相色谱仪、煤矿井下矿用激光光谱束管在线监测技术，建立了多源信息融合煤矿火灾综合监测预警与智能管控平台；开发了具备低温直注和汽化远输特性的液态CO<sub>2</sub>防灭火技术，研制了系列纳米复合协同阻燃凝胶和低热高发泡封堵灭火材料，实现了煤自燃的精准监测和主动防控。项目取得的主要创新成果如下：

1、构建了煤自燃量子力学理论框架和危险性判识体系。①提出了基于氧原子落位倾向的羟基自促进氧化煤自燃理论；②构建了差定温互补的煤自燃双因子危险性本质判定指数，实现了对煤自燃危险性的本质判定；③创建了基于非线性动力学的煤自燃转捩态势判定理论。

2、构建了煤矿火灾高精度多源信息融合监测预警技术体系。①突破了色谱仪分级控温技术，发明了煤矿井下激光光谱束管在线监测技术；②研发了配置微型TCD检测器、窄径毛细管色谱柱的便携式矿用本安型气相色谱仪；③建立了多源信息融合煤矿火灾综合监测预警与智能管控平台。

3、研发了煤自燃“物理绝氧-化学阻断-立体封堵”协同防控技术。①开发了具备低温直注和汽化远输特性的液态二氧化碳防灭火成套技术和装备；②研制了新型煤自燃纳米复合凝胶阻化材料；③研发了矿用TIP-I型低热高发泡树脂泡沫漏风封堵材料。

本项目获陕西省高等学校科学技术二等奖1项，培养了省部级及以上人才10人次，培养博、硕士研究生19名；授权发明专利17件、实用新型专利8件；编制标准2项，正在编写标准1项；发表科技论文52

篇，其中SCI/EI论文42篇；出版专著3部；相关成果鉴定为国际领先2项。技术成果成功应用于陕西陕煤铜川矿业有限公司陈家山煤矿、国家能源乌海市路天矿业有限责任公司、陕西有色金属集团陕西美鑫矿业有限公司冶坪煤矿分公司等多个国有大型煤炭企业，近三年合计新增利润2600余万元，取得了良好的经济和社会效益。

#### 四、客观评价

本项目主要应用于煤矿安全领域，对深入揭示煤自燃机理、准确预测煤自燃危险性和指导煤自燃防控都具有重要意义。依托国家自然科学基金项目“煤自燃过程非线性动力学特性及其“滞后”效应机理研究（51404192）”、“煤自燃活性结构超声萃取及其氧化特性研究（51604218）”、陕西省自然科学基金基础研究计划项目“煤自燃灾害过程滞后效应机理研究（2015JQ5174）”、“基于超声萃取技术的煤自燃机理研究（2015JM5121）”和企业合作项目“液态CO<sub>2</sub>（液N<sub>2</sub>）防灭火技术及装备研究（YM18008）”等项目开展了系统性研究。

相关研究成果“基于煤自燃非线性动力学特性的高效阻化防灭火技术研究与应用”和“煤自燃危险性双因子本质判定方法与协同防控关键技术研发及应用”由中国煤炭工业协会聘请专家进行了科技成果鉴定。鉴定专家一致认为项目创新性强、可行性高、应用性好，均达到了国际领先水平。

项目针对煤自燃机理研究中存在的难题，通过构建煤微观结构大分子模型，系统解析了煤分子三维结构特征，量化了活性基团演变动力学特性，揭示了次生羟基诱导的煤氧化链式反应机理，突破了传统理论将煤分子结构与氧化过程割裂研究的局限。在此基础上，提出了可表征煤自燃全过程的定温吸氧和动态升温互补的自燃危险性双因子判定指数 $DFI_{CSC}$ ，确定了煤自燃活性基团丰度与双因子判定指数间的定量耦合关系，创建了煤自燃本质判定准则与预测方法；建立了基于非线性动力学的煤自燃转捩态势判定理论，提出以“转捩温度”（包括征兆温度和灭控温度）为关键指标的煤自燃发展态势精准判定方法，解决了煤自燃危险性评价体系单一及热力失控临界点预判滞后的难题，实现了煤自燃从被动治理到主动防控的根本性转变。

针对煤自燃精准监测与智能预警需求，项目研发了配置微型TCD检测器、窄径毛细管色谱柱的便携式矿用本安型气相色谱仪，发明了煤矿井下激光光谱束管在线监测技术，实现了CO、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>等关键煤自燃标志气体组分的高精度同步监测。建立了火灾监测预警与智能管控平台，通过多参数联合监测技术，构建了煤矿火灾风险判识模型，可对气体浓度突变、温度异常等早期特征进行识别预警，为火灾防控提供了实时而精准的数据支撑，显著提升了煤矿火灾防控能力。

项目开发了具备低温直注和汽化远输特性的液态CO<sub>2</sub>防灭火技术，研制了系列纳米复合协同阻燃凝胶和低热高发泡漏风封堵灭火材料，三者可根据煤自燃发展态势进行针对性优化配合使用，满足了对煤自燃“物理绝氧、化学阻断、立体封堵”的协同防控体系需求。目前相关技术已在陕煤集团、国家能源集团、陕西有色等旗下大型煤炭企业进行了应用和推广，大大提升了矿井在煤自燃方面的防控能力，有效保障了煤矿的安全生产和井下作业人员的生命安全，创造了显著的经济和社会效益。

本项目成果先后在《Energy》、《Fuel》、《Process Safety and Environmental Protection》、《煤炭学报》、《中国矿业大学学报》等国内、外知名学术期刊发表代表性论文52篇，其中SCI、EI收录42篇；获批中国和美国发明专利17项，出版专著3部，编修订行业标准2项，正撰写行业标准1项，为深入揭示煤自燃机理、精准预测煤自燃危险性和指导煤自燃防控等奠定了基础。

本项目研究成果得到多个本领域顶尖专家的高度评价，并受到了陕西省教育厅、西安科技大学、陕西省民进委员会等官方媒体报道。此外，成果依托西安科技大学，联合大不里士大学（University of Tabriz）等单位共同建设的“能源安全‘一带一路’联合实验室”走向国门，推向“一带一路”国家，相关成果得到了伊朗国家通讯社（IRNA）、新闻社（Mehr）和学生通讯社（ISNA）的大力宣传报道与关注。

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	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种绿色生物阻化防灭火材料及制备方法	中国	ZL201910081485.4	2020.10.02	4012944	西安科技大学	张玉涛，史学强，李亚清，张园勃，李启鹏
2	发明专利	用于井下防灭火/降温的液态CO <sub>2</sub> 实时制备系统及其使用方法	中国	ZL201810505273.X	2020.05.15	3796199	山东科技大学	亓冠圣，陆伟，程卫民，李金亮，路遥，王栋，秦传睿，谢军
3	行业标准	煤矿自然发火束管监测系统通用技术条件	中国	MT/T 757-2019	2019.11.28	无	中煤科工集团沈阳研究院有限公司、大同煤矿集团有限责任公司、淄博祥龙测控技术有限公司	梁运涛、于斌、冯文彬等
4	发明专利	Systems and methods of infrared detection of coal mine polar gas	美国	US9927353B2	2018.03.27		China Coal Technology and Engineering Group Corp	Liang Yuntao; Sun Yong; Luo Haizhu; Zhang Depeng; Feng Wenbin; Fuchao Tian ; Haozhe Dong ; Hongli Fan
5	发明专利	基于13C同位素丰度判定煤自燃区域和发火程度的方法	中国	ZL202310683466.5	2024.09.06	7346460	西安科技大学	李亚清，李灏辰，张玉涛，张园勃，刘可心
6	发明专利	一种无源感温火灾探测及同步报警系统	中国	ZL201810191447.X	2019.03.29	3310840	西安科技大学	张玉涛，史学强，刘宇睿，杨超萍

7	行业标准	煤矿用红外气体分析仪通用技术条件	中国	NB/T 10162-2019	2019.06.04	无	中煤科工集团沈阳研究院有限公司、国家能源投资集团有限责任公司、国家煤矿防爆安全产品质量监督检验中心	梁运涛，杨波，冯文彬等
8	发明专利	一种防止煤自燃的定向阻化技术	中国	ZL201910844253.X	2021.12.10	4840086	西安科技大学	张玉涛，杨超萍，李亚清，张园勃，史学强，张静
9	发明专利	一种基于温敏释放二氧化碳同位素气体定位与抑制采空区隐蔽火源的方法	中国	ZL202211569680.X	2024.08.16	7289717	山东科技大学	亓冠圣，王明君，徐崇博，张茂源，宣豪臻，陈金射，胡相明，孙路路
10	论文	Effect of CO2 injection on the gas desorption and diffusion kinetics: An experimental study	中国	<a href="https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129921">https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129921</a>	2024.02.01	无	College of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University; Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters & Control of Ministry of Education ; China Academy of Safety Science and Technology; Huayang New Material Technology Group Co., Ltd.; Center for Rock Instability and Seismicity Research, School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University; College of Mining, Liaoning Technical University	Bai Gang; Su Jun; Fu Shigen; Li Xueming; Zhou Xihua; Wang Jue; Liu Zhengdong; Zhang Xun

## 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
张玉涛	1	副主任	教授	西安科技大学	西安科技大学	总负责人。负责整个项目的设计和实施
李亚清	2	主任	副教授	西安科技大学	西安科技大学	负责羟基自促进氧化煤自燃理论研究
梁运涛	3	副总经理	教授	中煤科工集团沈阳研究院有限公司	中煤科工集团沈阳研究院有限公司	负责激光光谱监测技术及装备开发
白刚	4	副院长	教授	辽宁工程技术大学	辽宁工程技术大学	负责 CO <sub>2</sub> 防灭火技术及装备开发
亓冠圣	5	无	副教授	山东科技大学	山东科技大学	负责 CO <sub>2</sub> 防灭火技术及装备开发
张园勃	6	无	讲师	西安科技大学	西安科技大学	负责煤自燃危险性双因子评估方法与突变理论研究
肖波	7	董事长	高级工程师	乌海市路天矿业有限责任公司	乌海市路天矿业有限责任公司	负责现场试验研究
赵志安	8	副总经理	讲师	陕西美鑫矿业有限公司冶坪煤矿分公司	陕西美鑫矿业有限公司冶坪煤矿分公司	负责现场试验研究
周西华	9	院长	教授	辽宁工程技术大学	辽宁工程技术大学	负责 CO <sub>2</sub> 防灭火技术及装备开发
黄玮	10	总工	高级工程师	陕西陕煤铜川矿业有限公司陈家山煤矿	陕西陕煤铜川矿业有限公司陈家山煤矿	负责现场试验研究

## 七、主要完成单位情况

### 1.西安科技大学

作为本项目的第一完成单位，西安科技大学为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，表现为：1）组织并完成了项目策划和实施工作；2）开展了基于氧原子落位倾向的羟基自促进氧化煤自燃理论、差定温互补的双因子煤自燃危险性综合指数与煤自燃转捩态势判定理论等内容的研究；3）研发了一种新型兼具物理隔绝与化学淬灭协同效应搭载抗氧化剂的纳米复合凝胶灭火材料；4）共同开发了煤矿火灾综合监测智能预警平台；5）为项目的顺利实施提供了人

力资源与优质的工作环境与场所；6) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源；7) 为本项目提供配套经费支持。

## 2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司

作为本项目的主要合作完成单位，中煤科工集团沈阳研究院有限公司为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，表现为：1) 研发了矿用本安型气相色谱仪；2) 研发了煤矿井下激光光谱束管在线监测装备；3) 集成开发了分布式光纤测温系统、漏风量在线监测系统、密闭区气体监测系统，开发了集“在线监测、分级预警、专家决策”为一体的火灾综合预警平台；4) 主持制定了煤矿用红外气体分析仪通用技术条件和煤矿自然发火束管监测系统通用技术条件行业标准，为矿井火灾防控提供了坚实的技术支撑和标准依据。。

## 3. 辽宁工程技术大学

作为本项目的主要合作完成单位，辽宁工程技术大学为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，表现为：1) 协助相关课题技术方案的设计与实施方案制定；2) 发明了液态  $\text{CO}_2$  井下分装、储罐增压、输送管路分段压力补偿与保冷技术，研发了分段伸缩节柔性管路连接技术；3) 通过固-液相变潜热吸收与高比表面积界面调控，共同研发了兼具低发热量、高发泡倍数和高稳定性的矿用相变树脂泡沫防灭火材料。

## 4. 山东科技大学

作为本项目的合作完成单位，山东科技大学为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，表现为：1) 协助相关课题技术方案的设计与实施方案制定；2) 共同开发了液态  $\text{CO}_2$  实时制备和井下输送保冷技术；3) 共同开发了新型纳米复合凝胶灭火材料。

## 5. 乌海市路天矿业有限责任公司

作为本项目的合作完成单位和技术推广单位，国家能源集团乌海能源有限责任公司乌海市路天矿业有限责任公司为项目的顺利完成并取得优异成绩做出重要贡献，表现为：1) 负责基于非线性动力学的煤自燃转捩态势判定理论在矿井的现场实践；负责煤矿火灾综合监测智能预警平台和纳米复合水凝胶防灭火材料的现场试验和应用；



2) 矿区提供了项目理论和装备现场验证的所需要的实验场地、实验样本以及相关配套设备，帮助研发团队评估新技术的实际效果，并提供了及时的反馈，为项目的落地和推广提供了资金人员支持。

#### 6. 陕西美鑫矿业有限公司冶坪煤矿分公司

作为本项目的合作完成单位和技术推广单位，陕西美鑫矿业有限公司冶坪煤矿分公司为项目的顺利完成并取得优异成绩做出重要贡献，表现为：1) 负责非线性动力学和转捩态势判定理论在矿井现场的验证。负责 TIP-I 型低发热高发泡封堵泡沫材料的现场试验、应用和推广；2) 矿区提供了项目理论和装备现场验证的所需要的实验场地、实验样本以及相关配套设备，为项目的落地和推广提供了资金人员支持。

#### 7. 陕西陕煤铜川矿业有限公司陈家山煤矿

作为本项目的合作完成单位和技术推广单位，陕西陕煤铜川矿业有限公司陈家山煤矿为项目的顺利完成并取得优异成绩做出重要贡献，表现为：1) 负责煤自燃非线性动力学和转捩态势判定理论在矿井现场的验证，负责液态二氧化碳防灭火技术的现场试验和应用；2) 矿区提供了项目理论和装备现场验证的所需要的实验场地、实验样本以及相关配套设备，为项目的落地和推广提供了资金人员支持。

### 八、完成人合作关系说明

项目实施期间，项目完成人张园勃由主持人张玉涛教授指导攻读博士学位；张玉涛、李亚清、张园勃、白刚合作完成论文和专利，梁运涛、亓冠圣合作发表论文，白刚、周西华合作发表论文，梁运涛、周西华合作完成专著，张玉涛、肖波、赵志安、黄玮合作参与项目的研究工作，主要取得成果如下：

1. 张玉涛/1、李亚清/2、张园勃/6合作申请发明专利“一种绿色生物阻化防灭火材料及其制备方法”。

2. 张玉涛/1、白刚/4合作发表论文“Feasibility assessment of a clean and efficient fire extinguishing system for pottery jar liquor warehouses”。

3. 梁运涛/2、亓冠圣/5合作发表论文“Method of hydrothermal

treatment for coal spontaneous combustion inhibition and its application”。

4. 梁运涛/2、周西华/9合作出版专著“矿井防灭火细则解读”。

5. 白刚/4、周西华/9合作发表论文“Effect of CO<sub>2</sub> injection on the gas desorption and diffusion kinetics: An experimental study”。

6. 张玉涛/1、肖波/7合作完成科研项目鉴定“煤自燃危险性双因子本质判定方法与协同防控关键技术研发及应用”。

7. 张玉涛/1、赵志安/8合作完成科研项目“煤自燃过程非线性动力学特性及其“滞后”效应机理研究”。

8. 张玉涛/1、黄玮/10合作完成科研项目“陈家山煤矿智能控制液态二氧化碳在418综放工作面采空区防灭火技术研究与应用”。