

# 2018 年度高等学校科学技术进步奖项目公示材料

## 1 项目名称

煤矿固体废弃物充填开采水资源保护关键技术

## 2 推荐单位

中国矿业大学

## 3 项目简介

本项目隶属于能源领域中煤矿开采、岩石力学以及环境工程等交叉学科。

本项目围绕我国煤矿固体废弃物井下大规模科学充填处置与充填开采过程中煤矿水资源保护的难题，从固体废弃物型充填材料自身宏观力学特性、隔水关键层渗流失稳机制与水流场演化规律、充填材料中重金属元素析出与迁移规律等方面开展了系统的基础理论研究，形成了基于充填开采渗流场控制与地下水环境保护的固体废弃物充填材料工程设计方法，构建了充填体对地下水污染风险的评估模型与指标体系，建立了充填体承载压缩率与重金属元素浓度分布的井下监测反馈机制与水环境污染防控技术，可实现多重目标：

(1) 实现了煤矸石等固体废弃物大规模井下处置，缓解矸石地面排放产生的生态环境压力；(2) 有效控制了煤层开采过程上部含水层的稳定性及水资源流失；(3) 有效预防了煤矿固体废弃物大规模井下充填处置对地下水造成的污染，保护了矿井水资源。

项目的主要创新点为：(1) 研制了煤矸石型散体充填材料多向压实试验系统，构建了破碎煤矸石细观结构的表征方法，揭示了其宏观力学响应机制，形成了散体充填材料压实特性测试标准；研究了多场耦合作用下煤矸石型胶结充填材料的水化作用机理，建立了考虑时间效应的胶结充填材料流变和强度模型，为煤矸石型胶结充填材料的输送及长期稳定性提供理论支撑；(2) 建立了煤矿固体废弃物充填防控隔水关键层渗流失稳力学模型，揭示了充填材料承载压缩率对覆岩裂隙场与渗流场的影响机制，研制了充填材料蠕变渗流耦合试验系统，得到了充填材料渗透性的关键影响因素，揭示了隔水关键层长期稳定性控制机理与采空区充填体内水流场的演化规律；(3) 表征了典型矿区煤矸石中铅、汞、镉、砷等重金属元素本底含量水平，得到了多场耦合作用下煤矸石中重金属元素析出规律，揭示了水流场作用下充填采空区重金属元素浓度场的时效特征，构建了充填体对地下水污染风险的评估模型与指标体系；(4) 研制出了以承载强度、压缩率、重金属元素析出率为控制指标的煤矸石型散体和胶结充填材料，提出了基于充填开采裂隙场控制与地下水环境保护的固体废弃物充填材料工程设计方法，建立了充填体承载压缩率与重金属元素浓度分布的井下测试反馈机制与防控技术，实现了煤矿固体废弃物规模化科学处置与水资源保护。

项目经过多年的产学研联合攻关，得到了国家基础研究 973 计划、国家科技支撑计划及国家自然科学基金项目的资助。项目实施期间，申请发明专利 17 件，授权 10 件（美国与南非发明专利各 1 件），受理 7 件，发表学术论文 45 篇（SCI 收录 25 篇，EI 收录 20 篇）。达到的技术经济指标为：（1）煤矿固体废弃物充填材料承载压缩率 10%~20%，煤矸石型胶结充填材料承载压缩率 10%~15%；（2）可根据隔水关键层的稳定性控制覆岩裂隙场与渗流场，实现含水层下煤层地安全开采；（3）煤矿固体废弃物充填开采后采空区地下水环境质量重金属元素含量标准在 IV 类及以上。

研究成果在矿山固体废弃物大规模处理、矿区环境保护等方面具有广阔的应用前景，已在我国 10 多个矿井进行了工程示范与推广应用，实现了井下大规模科学充填处置矸石，节省了煤矿固体废弃物地面排放处理费用、灾害治理费和排水费用，解放了含水层下煤炭资源，取得了显著的经济、社会与环境效益，为我国矿山固体废弃物大规模处置与矿井水资源保护提供了有力的技术支撑。

#### 4 主要完成单位及创新推广贡献

**主要完成单位：**中国矿业大学、中国矿业大学（北京）、东北大学、江苏师范大学

**创新推广贡献：**

##### （1）中国矿业大学

中国矿业大学作为第一完成单位，对该项目的研究起主导作用。对本项目的创新点一、二、三和四均有重要贡献，具体体现如下：（1）研制了煤矸石型散体充填材料多向压实试验系统，构建了破碎煤矸石细观结构的表征方法，揭示了其宏细观力学响应机制，形成了散体充填材料压实特性测试标准；（2）建立了煤矿固体废弃物充填防控隔水关键层渗流失稳力学模型，揭示了充填材料承载压缩率对覆岩裂隙场与渗流场的影响机制，揭示了隔水关键层长期稳定性控制机理；（3）表征了典型矿区煤矸石中铅、汞、镉、砷等重金属元素本底含量水平，得到了多场耦合作用下煤矸石中重金属元素析出规律，揭示了水流场作用下充填采空区重金属元素浓度场的时效特征，阐明了充填体内重金属对地下水资源污染的作用机理；（4）研制出了以承载强度、压缩率、重金属元素析出率为控制指标的煤矸石型散体充填材料，提出了基于充填开采裂隙场控制与地下水环境保护的固体废弃物充填材料工程设计方法，建立了充填体承载压缩率与重金属元素浓度分布的井下测试方法及反馈机制，构建了充填体对地下水污染的防控体系。

##### （2）中国矿业大学（北京）

中国矿业大学（北京）作为第二完成单位，是该项目第一完成单位的长期合作单位，对本项目的创新点一、二和四均有贡献，具体体现如下：（1）研究了煤矸石型胶结充填材

料的力学和流变特性，建立了时间相关的充填材料流变和强度模型；（2）研究了含水层下充填开采覆岩裂隙场发育规律，建立了含水层下充填开采效果评价及监控体系；（3）设计了安徽五沟煤矿含水层下煤矸石型散体充填开采、内蒙古公格营子煤矿和古山镇第一煤矿含水层下煤矸石型胶结充填开采实施方案，并提出了工程应用效果具体监测方法。

### （3）东北大学

东北大学作为第三完成单位，与第一完成单位长期合作进行多场耦合作用下煤矸石型充填材料力学特性的相关基础理论研究，对本项目的创新点一和四均有贡献，具体体现如下：（1）研究了温度场、渗流场、应力场、化学场等多场耦合作用下材料的水化作用机理；

（2）测试了多场耦合作用下煤矸石型充填材料的流变与力学特征，建立了考虑时间效应的胶结充填材料流变和强度模型；（3）参与提出了以煤矿固体废弃物为原料的充填材料配比优化与工程设计方法，分别针对散体充填材料和胶结充填材料，设计了材料的粒径级配、承载压缩率、配比、力学和流变性能以及重金属析出率。

### （4）江苏师范大学

江苏师范大学作为第四完成单位，是该项目第一完成单位的长期合作单位，对项目的创新点二有重要贡献，具体表现如下：（1）基于模块化设计理念，设计了破碎岩石蠕变-渗流试验系统；（2）制定充填散体材料的蠕变-渗流试验方案并开展试验，获得了破碎煤矸石充填材料渗透率及其关键影响因素。

## 5 推广应用情况

本项技术是解决我国煤矿固体废弃物井下科学的大规模充填处置与充填开采过程中煤矿水资源保护的有效途径之一，其社会和环境效益体现为：（1）实现了煤矸石等固体废弃物大规模井下处置，缓解矸石地面排放产生的生态环境压力；（2）有效控制了煤层开采过程上部含水层的稳定性及水资源流失；（3）有效预防了煤矿固体废弃物大规模井下充填处置对地下水造成的污染，保护了矿井水资源。研究成果在矿山固体废弃物大规模处理、矿区环境保护等方面具有广阔的应用前景，已在我国五沟煤矿、公格营子煤矿和古山镇第一煤矿等 10 多个矿井进行了工程示范与推广应用，主要应用单位近三年来新增销售额 16.71 亿元，新增利润 6.45 亿元，实现了煤矿固体废弃物规模化科学处置与水资源保护，取得了显著的经济、社会和环境效益。

## 6 主要知识产权证明目录

知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号/申请号	授权/申请日期	证书编号	权利人	发明人	发明专利有效状态
发明专利	油囊式固体充填采煤三维物理相似模拟实验装置及方法	中国	ZL201610257972.8	2017.12.26	2755590	中国矿业大学	黄艳利, 齐文跃, 李俊孟, 张吉雄, 宋天奇, 孔国强, 王军	有效
发明专利	一种充填再造护巷煤柱条带回收房式遗留煤柱的方法	中国	ZL201510770668.9	2017.09.15	2607103	中国矿业大学	黄艳利, 李俊孟, 宋天奇, 张吉雄, 齐文跃, 孔国强, 王枫晚	有效
发明专利	利用电泳原理控制采空区充填体重金属元素迁移的系统	中国	201810114022.9	2018.02.05		中国矿业大学	黄艳利, 高华东, 张吉雄, 李俊孟, 韩震, 宋天奇, 孔国强, 王枫晚	有效
发明专利	一种煤矸石充填煤矿采空区重金属离子检测取样系统	中国	201810109458.9	2018.02.05		中国矿业大学	黄艳利, 韩震, 张吉雄, 李俊孟, 高华东, 宋天奇, 孔国强, 王枫晚	有效
发明专利	用于煤矸石充填采空区重金属离子检测取样的收集装置	中国	201810109654.6	2018.02.05		中国矿业大学	黄艳利, 韩震, 张吉雄, 李俊孟, 高华东, 宋天奇, 孔国强, 王枫晚	有效
发明专利	多场耦合作用下煤矸石淋溶浸泡试验装置	中国	201810109946.X	2018.02.05		中国矿业大学	黄艳利, 王枫晚, 李俊孟, 张吉雄, 高华东, 宋天奇, 孔国强, 韩震	有效
发明专利	一种固体充填采煤工作面分层保留伪顶方法	中国	ZL201410483835.7	2016.04.13	2022648	中国矿业大学	周楠, 武浩, 张吉雄, 郭帅, 朱同功, 郝德永	有效
发明专利	Inclined layered solid-filling mining method in ultrathick coal layer	美国	9,494,037	2016.11.15	8586	中国矿业大学	张吉雄, 周楠, 张强, 郭记伟, 沈晓明, 巨峰, 姜海强	有效
发明专利	Solid-filling coal mining method with two pre-excavated tunnels for advancing	南非	2014/07093	2015.11.25	2014/07093	中国矿业大学	张吉雄, 张强, 邓雪杰, 周楠, 姜海强, 汪贺	有效
发明专利	固体充填采煤覆岩导水裂隙带发育高度预计方法	中国	ZL201310503632.5	2015.12.02	1871415	中国矿业大学	张吉雄, 李猛, 张强, 邓雪杰, 黄艳利, 曹远威	有效
发明专利	充填材料力学特性测试辅助装置	中国	ZL201410215863.0	2016.09.28	2252570	中国矿业大学	张吉雄, 李猛, 张强, 高瑞, 周楠, 闫浩	有效
发明专利	一种测试破碎岩体侧向夯实效果的试验装置	中国	ZL201110328863.8	2017.01.11	2337458	江苏师范大学	刘玉, 张吉雄, 李顺才, 韩继光, 陈占清, 蒋红旗	有效

发明专利	一种测试三轴压力的渗透性试验系统	中国	201710997902.0	2017.10.24		江苏师范大学	刘玉, 潘永康, 张磊, 马立强, 李木兰, 刘子奇, 宋谦, 袁吕浩, 王义赛, 钟钊飞	有效
发明专利	一种破碎岩石扰动渗流测试用渗流仪及测试系统	中国	201710998151.4	2017.10.24		江苏师范大学	刘玉, 马立强, 潘永康, 张帅芳, 宋谦, 袁吕浩, 王义赛, 钟钊飞	有效
发明专利	一种破裂岩体水沙混合物渗流实验系统	中国	201610808171.6	2016.09.07		江苏师范大学	刘玉, 李顺才, 邢邦圣, 张潇, 许天啸, 司振华, 蔡小莉, 白静	有效

## 7 主要完成人情况

黄艳利, 排名第1, 教授, 工作单位: 中国矿业大学, 完成单位: 中国矿业大学。项目第一完成人, 项目总体策划与组织者, 负责了本项目的总体规划、具体研究及组织实施, 对本项目的创新点一、二、三和四均做出了创造性贡献, 具体体现为: 提出破碎矸石大型多向压实试验平台的总体思路, 研究了矸石充填材料的承载特性和宏观力学响应机制, 建立了充填防控隔水关键层的理论框架, 研究了覆岩裂隙场和渗流场的时空演化机理, 提出了基于充填开采渗流场控制的固体废弃物充填材料工程设计方法, 建立了充填体内重金属对地下水资源污染的风险评价与防控体系。参与本项目研究的工作量占本人工作量的65%。

周楠, 排名第2, 副教授, 工作单位: 中国矿业大学, 完成单位: 中国矿业大学。项目主要完成人与研究工作组织者, 负责了本项目具体研究计划的制定和组织, 对本项目的创新点一、二和四均做出了创造性贡献, 具体体现为: 设计了破碎矸石大型多向压实试验平台的具体方案, 测试了散体矸石充填材料的承载特性并制定了测试标准, 建立了充填防控隔水关键层渗流失稳模型, 研究了覆岩裂隙场和渗流场的时空演化机理, 将煤矿固体废弃物充填材料工程设计方法进行了工程应用, 并提出了工程应用效果监测方法。参与本项目研究的工作量占本人工作量的60%。

邓雪杰, 排名第3, 讲师, 工作单位: 中国矿业大学(北京), 完成单位: 中国矿业大学(北京)。项目主要完成人与实施者, 负责了本项目具体研究内容的实施, 对本项目的创新点一、二和四均做出了创造性贡献, 具体体现为: 研究了煤矸石型胶结充填材料的力学和流变特性, 建立了时间相关的充填材料流变和强度模型, 研究了含水层下充填开采覆岩裂隙场发育规律, 设计了安徽五沟煤矿含水层下煤矸石型散体充填开采、内蒙古公格营子煤矿和古山镇第一煤矿含水层下煤矸石型胶结充填开采实施方案, 并提出了工程应用效果具体监测方法。

李猛, 排名第4, 助理研究员, 工作单位: 中国矿业大学, 完成单位: 中国矿业大学。项目主要完成人与实施者, 负责了本项目具体研究内容的实施, 对本项目的创新点一、二和四均做出了创造性贡献, 具体体现为: 参与研发了破碎矸石大型多向压实试验平台, 测试了散体矸石充填材料的承载压缩特性, 参与建立了煤矿固体废弃物充填防控隔水关键层渗流失稳力学模型, 揭示了充填材料承载压缩率对覆岩裂隙场与渗流场的影响机制, 提出

了充填体承载压缩率井下测试方法。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 60%。

姜海强，排名第 5，讲师，工作单位：东北大学，完成单位：东北大学。项目主要完成人与实施者，参与了本项目具体研究内容的实施，对本项目的创新点一和四均做出了创造性贡献，具体体现为：研究了温度场、渗流场、应力场、化学场等多场耦合作用下材料的水化作用机理，测试了多场耦合作用下煤矸石型充填材料的流变与力学特征，建立了考虑时间效应的胶结充填材料流变和强度模型，参与提出了以煤矿固体废弃物为原料的充填材料配比优化与工程设计方法。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 55%。

刘玉，排名第 6，副教授，工作单位：江苏师范大学，完成单位：江苏师范大学。项目主要完成人和实施者，负责了本项目渗流试验仪器的设计及其相关试验方案的确定，对本项目的创新点二做出了创造性贡献，具体体现为：基于模块化方法研制破碎岩体蠕变渗流试验系统，开展了破碎煤矸石、及混合材料（煤矸石、粉煤灰等）的试验，获得不同轴压下的充填材料渗透性。通过试验获得了破碎煤矸石充填材料渗透率、非 Darcy 流  $\beta$  因子的变化规律，分析了充填材料渗透性的关键影响因素及渗透时其内部流体及散体的变化规律，揭示了隔水关键层长期稳定性控制机理与采空区充填体内水流场的演化规律。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 55%。

李俊孟，排名第 7，工作单位：中国矿业大学，完成单位：中国矿业大学。项目主要完成人与实施者，对本项目的创新点一和四均做出了创造性贡献，具体体现为：参与设计了破碎矸石大型多向压实平台，采用 CT 扫描、声发射及颗粒流数值模拟等手段研究了破碎煤矸石细观结构的表征方法及宏细观力学响应机制，研制了以承载强度、压缩率、重金属元素析出率为控制指标的煤矸石型散体充填材料。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 50%。

齐文跃，排名第 8，工作单位：中国矿业大学，完成单位：中国矿业大学。项目主要完成人与实施者，对本项目的创新点三和四均做出了创造性贡献，具体体现为：研究了充填体内水流场演化特征，揭示了水流场作用下充填采空区重金属元素浓度场的时效特征，建立了充填体内重金属对地下水资源污染的风险评价与防控体系。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 50%。

孙强，排名第 9，工作单位：中国矿业大学，完成单位：中国矿业大学。项目主要参与人与实施者，对本项目的创新点二和四做出了创造性贡献，具体体现为：根据所建立的充填防控隔水关键层渗流失稳模型对充填开采隔水关键层稳定性进行了计算求解，基于隔水关键层控制理论，采用模拟研究的方法分析了覆岩裂隙场和渗流场的时空演化特征，为充填开采裂隙场控制与地下水环境保护的固体废弃物充填材料工程设计方法的提出提供了基础依据；参与了工程应用中的现场监测工作，收集了工程应用过程中的基础数据并对其进行了分析和总结。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 50%。

闫浩，排名第 10，工作单位：中国矿业大学，完成单位：中国矿业大学。项目主要完成人及实施者，对本项目的创新点一和四做出了创造性贡献，具体体现为：参与设计了煤矸石型散体充填材料多向压实试验系统，参与了工程应用中的现场监测工作，参与了工程应用过程中基础数据的分析和总结。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 45%。

高华东，排名第 11，工作单位：中国矿业大学，完成单位：中国矿业大学。项目主要完成人及实施者，对本项目的创新点三和四做出了一定的贡献，具体体现为：参与构建了充填体对地下水污染风险的评估模型与指标体系，具体完成了部分实验室试验工作，参与了工程应用中的监测仪器安装与数据采集，并进行了数据的分析和总结。参与本项目研究的工作量占本人工作量的 40%。