

一、项目名称

近海水封液化石油气储库水幕密闭性与精准渗控关键技术

二、申报奖种及等级

山东省科技进步奖 二等奖

三、提名者及提名意见

提名者：郑颖人教授 中国工程院院士 中国人民解放军陆军勤务学院 土木工程

提名意见：

本人认真审阅了提名书材料，确认提名材料真实有效，完成人及完成单位排序无异议，相关栏目符合填写要求。

近海硇室群、海岛储气库、海底隧道等重大海工建设是复杂的综合性工程，如何确保近海工岩土工程结构及基础设施建设过程中工程岩体稳定性是当前亟待解决的关键问题。

聚焦山东省军民融合工程与“双碳”战略引领下的能源结构优化，响应国家军用洞库战场建设战略、国家战略储备以及青岛西海岸新区千万吨级商储建设需求，围绕洞库工程建设中工程与水文地质问题，形成系列性、实用性的动态设计-施工关键技术。

该项目获得 2 项 PCT 专利、45 项国家发明专利授权、15 项实用新型专利、5 项软件著作权，发表论文 56 篇，1 项团体标准，1 项国家标准，7 项技术规定，2 项技术秘密。项目成果成功应用于黄岛金能洞库、宁波百地年洞库、温州小门岛洞库等 5 个洞库，在中石油华东设计院有限公司、中铁隧道局一处有限公司、中铁十六局集团有限

公司得到了广泛的推广应用，为贯彻山东省新旧动能转换，支持和保障基础设施建设、能源资源基地建设，做出了重大贡献，具有广阔的应用前景和重要的推广价值。

参照山东省科学技术奖推荐条件，推荐该项目申报 2024 年度山东省科学技术进步奖二等奖。

四、项目简介

4.1 主要技术内容

海工硐室群区别于盐岩储气库、CO₂ 封存、水利水电等深部岩土工程问题，其围岩体多建于近海地下水位以下，海平面长期变化呈上升趋势，第四系水位波动复杂，严重影响近海工程岩体渗流应力状态及稳定性。尤其在海岛条件下，海岛四周被海水包围，地下硐室开挖会破坏海岛原有的地下水平衡，使得地下水向硐室渗流导致海水-淡水界面向岛内推进，严重时海水会侵入地下硐室，从而影响地下硐室的安全性和使用寿命。

(1) 依据近海水封气库硐室群工程实例，基于半迹长测线法结构面生成模式，开展洞库岩体随机结构面分组、产状纠偏、直径估算和体密度估算研究；分析不同质量等级围岩的 RQD、J_n、J_r、J_a、J_w 和 SRF 等参数的典型组合特征，实现基于 SRF 的洞库区非连续介质岩体模型建立，构建起不同 Q 值等级的围岩典型非连续介质模型，优化实际可用的 Q 值围岩分级方法。

(2) 通过复杂卸荷路径下岩石（真）三轴加卸荷渗流-应力耦合破坏试验，系统揭示水力耦合状态下岩石渗透率与变形的关联性，提

出了基于多源信息分析的岩石失稳综合判断方法，揭示了控制性结构面与填充物对洞室群变形失稳区域放大效应的作用机理，开发双向受压动力冲击模型系统实施高动能冲击破坏试验，建立分维值或拓扑特征、卸荷应力路径、应力-应变、声发射特征间的函数关系。

(3) 提出了近海水幕系统结构动态设计方法，全面水力效率试验查明水幕巷道与水幕孔整体的水力传导效率，基于水幕效率试验结果对水幕系统结构进行调整与优化；提出了单水幕孔水力效率试验应采用注水-回落试验，分析了天然阶段、注水阶段与回落阶段的试验目标与关键内容；提出采用改进的 Moya 公式确定垂直水幕孔渗透系数、Horner 方法确定水平水幕孔渗透系数，提出了评判水幕孔水力效率高低的三类评价指标。

(4) 引入数字孪生实现近海水封洞库群岩体的透明精细模型，提出了岩体失稳影响区域预测与改进的极点对称模态分解数据处理计算方法，建立了基于多目标和风险链式理论的洞室群致灾影响与损失程度评估理论，研发了基于远程非接触数据获取的大尺度岩体三维变形实时动态监测新技术，构建了洞室群灾害影响的综合风险评估体系，为风险防控与综合治理提供了科学依据。

4.2 授权专利情况

授权 2 项 PCT 专利、15 项国家发明专利授权、10 项实用新型专利、5 项软件著作权，发表论文 50 余篇。

4.3 技术经济指标

综合研究近海海洋环境下储气库洞室群工程开挖方法，有效控制

洞库群覆岩变形，减少开挖期间储气库岩体应力转移过程中微裂隙扩展，解决因爆破开挖诱发的“气-液-固”多相环境损伤；

解决水封气库施工过程中由于围岩分级不准确造成局部顶板冒落、墙体坍塌等问题；

基于水封气库设计-施工过程中气体压力、水幕压力动态变化的“气-液”循环路径，建立洞室群围岩稳定性系统分析评价及动态稳定性监测方法，并据此对围岩支护结构进行动态设计；

基于水力传导效率、水幕孔渗透系数等参数建立了一套适用于近海水封气库的水幕系统结构动态设计方法；

构建了近海洞室群灾害影响的综合风险评估体系，以确保水封气库全寿命周期的安全运营。

4.4 应用推广及效益情况

研究对加深近海水封气库工程岩体成灾机制认识、构建近海水封气库防灾体系等方面具有重要意义；可为类似地多场耦合条件下大型地下洞室群设计、施工及运营提供相应指导；有利于推动近海海洋资源的开发与利用，对加快改造传统动能，培育发展新动能具有重要现实意义。

五、主要知识产权和标准规范等目录

知识产权（标准）类别	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效状态
------------	--------------	--------	-----------	------------	----------------	-------------	------------	--------------

PCT 专利	一种井筒失稳破坏的极限应变判别方法	卢森堡	LU102525	2021.04.27	CN201910847379.2	青岛理工大学	丛宇	有效
PCT 专利	隧道开挖围岩全过程变形曲线先进监测装置及其实现方法	美国	US11236612B2	2022.02.01	US11236612B2	中国水利水电科学研究院	刘立鹏	有效
发明专利权	一种矿井井筒用故障检测系统及方法	中国	ZL20191112552.0	2021.12.28	CN110821566B	青岛理工大学	丛宇	有效
发明专利权	一种隧洞衬砌结构模型试验装置及试验方法	中国	ZL201910386345.8	2020.06.19	CN110082218B	中国水利水电科学研究院	刘立鹏	有效
发明专利权	一种井筒失稳破坏的极限应变判别方法	中国	ZL201910847379.2	2023.4.18	CN110610041B	青岛理工大学	丛宇	有效
发明专利权	一种预应力锚索智能监测装置及其安装方法	中国	ZL20191007364.5	2019.01.04	CN109577389B	中国水利水电科学研究院	刘立鹏	有效
发明专利权	一种张拉力可调锚固体恒载装置	中国	ZL201711048802.X	2017.10.31	CN107975039B	中国水利水电科学研究院	刘立鹏	有效
实用新型专利权	一种用于井筒失稳破坏判别检测的辅助工具	中国	ZL201921500309.1	2020.05.19	CN210564663U	青岛理工大学	丛宇	有效
计算机软件著作权	作业装备智能化安全保障系统 V1.0	中国	2022SR1214717	2022.08.22	软著登字第 10168916 号	青岛理工大学	丛宇	有效

计算机 软件著 作权	智能集成监测 系统	中国	2022SR1 214887	2022. 0 8. 22	软著登字 第 10169086 号	中石油 华东设 计院有 限公司	韩立亮	有效
------------------	--------------	----	-------------------	------------------	----------------------------	--------------------------	-----	----