

一、项目名称

工程扰动岩体灾变精细模拟与智能预警关键技术

二、提名单位意见及提名等级

该项目在科技部 973 项目子课题、国家十二五科技支撑计划课题、国家自然科学基金，以及多项重大岩体工程企业计划项目的支持下，针对工程扰动岩体的动力灾害问题，基于“岩体细观微元体的破裂聚积和演化发展是岩体工程失稳前兆”的学术思想，开展了工程扰动岩体性能劣化机理及灾变智能预警关等研究工作。该项目提出了基于准脆性材料破裂局部化理论的断裂准则，解决了数值模拟方法开展压剪和接触状态下的岩石破裂模拟断裂准则选取难题，实现了断裂路径的精细模拟，形成了理论、模拟一体化的岩体灾害机理研究方法；开发了岩石连续-非连续变形分析的数值模拟系统，实现微震背景应力场亿级自由度的三维高精度分析计算，解决了大规模科学计算的高效求解及模型高速显示的难题；构建了深部岩体工程的微震监测系统，首次提出了“通道”和“空间”双重注意力机制的深度学习微震事件识别方法，提出了适用于超长微震信号序列的“分割整合多头自注意力机制”处理技术，构建了完整的“提取器-编码器-生成器”网络架构，实现微震波到时的智能拾取；通过对微震活动与能量释放率、视体积、能量耗散等破裂指标内在联系的研究，揭示了微破裂信息所蕴含的物理力学特征，揭示了微震过渡期、高峰期、空白期的岩体内部应力调整机制，提出了基于背景应力场的采动岩体微震活动性解译方法，实现了基于人工智能与背景应力场分析的深部岩体灾害预警。项目已获

批授权多项知识产权，发表相关研究论文多篇。研究成果已成功应用于三山岛金矿、青岛地铁、山东临沂会宝岭铁矿等多个重大岩体工程的灾害分析、监测预警中，经济、社会效益显著。研究成果已推广应用到金属矿山、非金属矿山、水利水电、煤矿、硐室开挖等领域，具有极强的推广应用价值。

提名该项目为山东省科学技术奖二等奖。

三、项目简介

本项目属于岩体工程灾害监测预警领域。

“向地球深部进军”、“川藏铁路建设”、“一带一路”、“西部大开发”等国家战略直接关系国民经济的快速可持续发展，而这些战略无不与岩体工程密切相关，其中的重大基础建设和深部矿产资源开发利用都面临着施工扰动诱发的岩体工程灾害问题，是制约工程建设的重要瓶颈。大规模塌方、岩爆、冲击地压等岩体灾害给地下工程的安全造成了严重威胁。项目组在科技部 973 项目子课题、国家十二五科技支撑计划课题、国家自然科学基金及多项重大工程项目资助下，以三山岛海底金矿开采、青岛地铁开挖、临沂会宝岭铁矿开采等工程为依托，通过室内试验、理论研究、数值模拟、现场测试等手段，在扰动岩体的破裂规律及灾害预警等方面开展了系统性的研究和科技攻关，实现了基础理论、分析方法及工程应用等多方面的创新。主要的创新型成果包括：

(1) 创新了岩体破裂的基础理论。推演了高应力状态下岩体裂隙的应力分布状态，提出了具有普适性的裂隙尖端非奇异应力理论计

算方法，解决了国际通用软件无内嵌的闭合、压剪裂隙非奇异应力求解难题，岩石断裂计算精度明显优于传统方法。提出了基于准脆性材料破裂局部化理论的断裂准则，解决了众多数值计算方法开展压剪、接触状态的岩石破裂模拟断裂准则选取难题，提出了岩体连续-非连续破裂全过程的求解方法，实现了断裂路径的精细模拟。研究成果形成了理论、模拟一体化的岩体灾害机理研究方法。

(2) 提升了岩体工程灾害的模拟方法。提出了确定性和非确定性结构面网络的模拟算法，构建了工程扰动环境下岩体背景应力场精细分析的亿级自由度三维高性能并行分析系统，解决了大规模模型破裂过程计算收敛缓慢的难题，提出了大规模模型显示及低延时的人机交互方法。实现了从建模、网格划分、边界条件、计算以及结果显示等全功能覆盖的计算平台的自主研发，为岩体工程灾害分析提供了方法和手段。

(3) 突破了岩体微破裂监测数据处理的关键技术。构建了岩体破裂时空感知的微震监测系统，发明了微震定位校正的浅表及深部声源发射装置，建立了基于微震监测的扰动岩体质量实时评价方法。首次提出了“通道”和“空间”双重注意力机制微震事件识别的深度学习方法，实现了基于层级注意力机制的微震事件分类方法。提出了适用于超长微震信号序列的“分段整合多头自注意力机制”人工智能数据处理技术，构建了“提取器-编码器-生成器”人工智能网络架构的微震到时智能拾取，获得了目前公开算法中最好的拾取效果。

(4) 突破了岩体工程灾害预警的关键技术。揭示了微震活动性

破裂指标之间的内在联系，提出了基于能量密度的岩体灾害风险等级划分指标，建立了基于微震监测的扰动岩体质量实时评价方法，实现了基于大规模科学计算的微震活动性解译，解决了自动化灾害前兆信息、指标数据分析及提取的难题，构建了岩爆灾害人工智能预警模型，实现了 86.2% 的岩爆高精度灾害预测。

项目获批授权发明专利多项，软件版权多项，多篇论文被 SCI、EI 收录。项目已成功应用于三山岛金矿、青岛地铁等多个重大岩体工程的灾害分析、监测预警，降低了重大岩体工程的灾害风险，减轻了施工人员的心理障碍，经济、社会效益显著，具有极强的行业推广应用价值。

四、主要知识产权和标准规范等目录

1、唐世斌、于超云，发明专利，持续水环境与可变温度共同作用下的岩石时效变形试验系统，专利号：ZL201611219584.7，证书号：第 3748789 号，专利权人：大连理工大学，授权公告日：2020 年 4 月 10 日。

2、马天辉、唐春安、梁正召、朱旭、李迎春，发明专利，一种微震事件精确定位的动态参数方法，专利号：ZL201611024834.1，证书号：第 3011294 号，专利权人：大连理工大学，授权公告日：2018 年 7 月 24 日。

3、李文光、华海洋、张小刚、王善飞、李文萍、叶立生，发明专利，特大提升机硐室的三层联合掘进施工方法，专利号：ZL201410202678.8，证书号：第 1837224 号，专利权人：山东黄金矿

业（莱州）有限公司三山岛金矿，授权公告日：2015年11月11日

4、唐世斌、陈培钊，发明专利，一种含微小闭合裂隙的岩石试样制备方法，专利号 ZL201710999066.X，证书号：第 3633247 号，专利权人：大连理工大学，授权公告日：2019年12月13日

5、张拥军、刘思佳、杨登峰、王文、李文韬、马强强、包放歌，发明专利，一种矿山边坡滑移稳定性监测预警方法，专利号：ZL201810871259.1，证书号：第 3634605 号，专利权人：青岛理工大学，授权公告日：2019年12月17日

6、张永亮、路成刚、黄萍，发明专利，矿井暗道或地下管廊布线或撤线方法，专利号：ZL201910194737.4，证书号：第 3870896 号，专利权人：青岛理工大学，授权公告日：2020年7月3日

7、杜明庆、王旭春、张素磊、李永宽、袁德浩、冯磊、管晓明、张鹏、于云龙、朱既贤，一种抗底鼓的隧道仰拱结构，专利号：ZL201910057608.0，证书号：第 3790556 号，专利权人：青岛理工大学，授权公告日：2020年5月12日

8、杜明庆、王旭春、冯磊、管晓明、张鹏、王癸、薛善斌、于云龙、朱既贤，发明专利，一种主动泄水抗浮管片及衬砌结构，专利号：ZL201910060778.4，证书号：第 4154813 号，专利权人：青岛理工大学，授权公告日：2020年12月15日

9、马天辉、唐春安、蔡明，岩爆分析、监测与控制，专著，大连理工大学出版社，2014。

10、唐世斌、唐春安、张拥军、张永亮、王嘉戎，软件著作权，

岩体微震监测数据人工智能识别系统，登记号：2020SR0643287，证书号：软著登字第 5521983 号，著作权人：大连理工大学。

五、主要完成人情况

1、姓名：唐世斌，排序：1/9，职务：副所长，职称：教授，工作单位：大连理工大学，完成单位：大连理工大学，对本项目主要学术贡献：对项目进行总体指导，协调项目组成员及单位有序开展研究工作，研发岩体破裂计算分析平台，开展基于人工智能的岩体微破裂监测及分析研究、构建岩爆灾害预警的人工智能模型。

2、姓名：张拥军，排序：2/9，职务：无，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学，对本项目主要学术贡献：负责项目在多个工程中的实际应用，构建了岩体微震监测系统，研究了微震活动与能量释放率、视体积、能量耗散等破裂指标的内在联系，获得了微破裂信息所蕴含的物理力学特征。

3、姓名：芦睿泉，排序：3/9，职务：主任，职称：高级工程师，工作单位：青岛地铁集团有限公司，完成单位：青岛地铁集团有限公司，对本项目主要学术贡献：负责项目成果在青岛地铁隧道开挖中的实际应用，统筹协调项目与施工之间的关系，并运用项目组完成的数值计算方法开展隧道稳定性研究，提出合理的开挖、支护方案等。

4、姓名：张永亮，排序：4/9，职务：无，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学，对本项目主要学术贡献：负责项目成果再深部矿山灾害预警中的应用，建立岩体灾害监测的数据实时传输系统，提出巷道灾害治理方案。

5、姓名：吴克新，排序：5/9，职务：副院长，职称：高级工程师，工作单位：青岛市工程咨询院，完成单位：青岛市工程咨询院，对本项目主要学术贡献：负责项目成果在青岛地铁施工中的应用，完成地铁开挖的稳定性分析和评估，获得了高应力富集区域，提出了相应的防治措施。

6、姓名：马天辉，排序：6/9，职务：无，职称：副教授，工作单位：大连理工大学，完成单位：大连理工大学，对本项目主要学术贡献：完成微震监测系统的构建，揭示微震事件数量和能量与采场开采活动的相关性，完成扰动岩体危险区域划分，提出基于微震监测的井下救援方案，完成了井下救援的微震系统测试。

7、姓名：左世晓，排序：7/9，职务：无，职称：高级工程师，工作单位：临沂会宝岭铁矿有限公司，完成单位：临沂会宝岭铁矿有限公司，对本项目主要学术贡献：负责项目成果在会宝岭铁矿的应用，协调解决科研所需的资源分配，运用岩石连续-非连续变形破坏全过程的数值模拟方法揭示了深部岩体采动破裂局部化时间与空间效应特征。

8、姓名：李文光，排序：8/9，职务：主任，职称：高级工程师，工作单位：山东黄金矿业（莱州）有限公司三山岛金矿，完成单位：负责项目成果再山东黄金矿业（莱州）有限公司三山岛金矿中的应用，构建深部矿井微震监测系统，运用项目组实现的岩爆灾害预警人工智能模型开展工程灾害预警的研究，揭示了采动影响的断层活动规律，建立深部采矿诱发的基本波形数据库。

9、姓名：杜明庆，排序：9/9，职务：无，职称：讲师，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学，对本项目主要学术贡献：揭示深部岩体岩桥断裂的内在力学机理，运用室内声发射实验揭示了岩石内微破裂前兆信息特征，开展深部矿井采动稳定性的大规模数值模拟研究。

六、主要完成单位情况

青岛理工大学：负责该项目的组织、协调等。完成工程现场的勘察、测试和项目实施，开展了大量的模拟试验，揭示了岩体破裂特征及灾变机理，配合项目其他单位完成了微震系统的现场构建。组织专家对项目的实施、成果报告进行论证、审查，对项目实施过程和完成质量进行检查和监督。联系国内外知名专家对项目进行指导，开展项目成果在相关领域的推广。

大连理工大学：负责岩体破裂的理论、大规模数值模型构建、人工智能的微震数据处理方法及灾害预警技术等研究，形成了理论、模拟一体化的岩体灾害机理研究方法，建立灾害预警的人工智能分析平台。对项目进行全程的技术指导，提供项目实施的分析方法。协调项目组不断完善工作方案、挖掘创新内容，为岩体工程灾害监测预警做出了巨大贡献。

青岛地铁集团有限公司：负责项目成果在青岛地铁中的应用，提供项目所需的研究场地、资料、资金支持，统筹协调项目与施工之间的关系，运用项目组完成的数值分析等方法开展隧道稳定性研究，提出合理的开挖、支护方案等，配合青岛理工大学完成地铁施工中微破

裂监测系统的构建。

山东黄金矿业（莱州）有限公司三山岛金矿：提供深部采矿活动岩体稳定性监测的试验场地及项目所需的地勘资料、生产计划、历史监测数据等重要资料，完成深部采动岩体微震监测系统的构建及系统的调试、定位等研究工作，实现对采场爆破施工、岩体破裂等活动的连续性监测。

青岛市工程咨询院：提供项目研究所需的青岛地铁地勘资料、生产计划、历史监测数据等重要资料，完成了开挖扰动对隧道岩体破裂全过程的分析，并以此为依据从设计的角度优化施工方案，实现模拟与设计的有机结合。

临沂会宝岭铁矿有限公司：提供项目科研成果的应用基地，配合项目组完成现场取样、现场实验等，提供地勘资料以及施工组织等资料。负责深部岩体开采扰动稳定性的分析研究，并配合项目组完成相关的岩体稳定性大规模数值模拟研究，对岩体灾害影响因素及发生机理进行研究，协助项目组不断完善工作方案、挖掘创新内容。