

附件 3:

## 《岩体工程边坡灾害微破裂前兆机制及监测预警关键技术》公示内容 (科技进步奖)

### 一、项目名称

岩体工程边坡灾害微破裂前兆机制及监测预警关键技术

### 二、提名者及提名意见

**提名者:** 中国黄金协会

#### **提名意见:**

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料,确认全部材料真实有效,相关内容符合国家科学技术奖的提名要求。

针对岩体工程边坡灾害微破裂前兆机制及监测预警问题,通过原始创新、集成创新和消化吸收再创新,从理论、技术和应用三方面解决了岩体工程边坡稳定性分析预警的关键问题。首次从理论上全面系统地论证了微震监测方法在高陡岩质边坡稳定性分析中的可行性,建立了边坡稳定性在线远程智能监测系统,实现了微震监测与雷达监测相融合的一体化综合预警系统,构建了亿级自由度的岩石破裂过程并行计算系统,形成了边坡稳定性模拟和监测紧密结合的解决方案,建立了“三个层次、四个等级、六个指标”的重大工程岩体边坡监测综合预警系统。研究成果显著提升了重大岩体工程边坡稳定性监测的技术水平。

经中国岩石力学与工程学会鉴定,该项目成果在岩质边坡稳定性的监测预警领域总体上达到国际领先水平。获得授权发明专利 18 项、授权实用新型专利 25 项、软件版权 15 项,省部级一等奖 2 项。

该项目成果已服务于金川集团石英石矿、长山壕金矿东北坑边坡、临沂会宝岭铁矿、锦屏一级水电站左岸边坡等多个重大工程岩体边坡稳定性研究,保障了施工和运营期工程边坡的稳定性预警,创造了显著的经济效益,确立了我国在工程岩体边坡稳定性分析预警领域的国际领先地位。

对照国家科技进步奖授奖条件,提名该项目为 2019 年度国家科学技术奖科技进步二等奖。

### 三、项目简介

随着金属矿产资源的不断开发利用,越来越多的露天矿转入深部凹陷开采阶段,深凹露天矿成为世界上露天矿山的发展趋势。坡高的增加导致边坡稳定性和安全性越来越差,滑坡事故屡有发生,严重威胁着露天矿山的安全生产。此外,

随着我国西南部水力资源丰富的金沙江、澜沧江、大渡河和雅砻江等地区大规模水电工程建设，许多前所未有的岩石高边坡工程的稳定性对工程建设有着至关重要的作用。高陡工程岩体边坡的稳定性成为制约工程建设的瓶颈。针对此问题，以大连理工大学为首的研究团队经过多年理论研究与技术攻关，通过原始创新、集成创新和消化吸收再创新，建立了高陡岩质边坡稳定性监测分析预警的成套技术和方法，从理论、技术和应用三方面解决了重大岩体工程边坡稳定性分析预警的关键问题，取得如下创新成果：

(1) **首次从理论上系统地论证了微震监测方法在高陡岩质边坡稳定性分析中的可行性。**建立了边坡岩体非均匀性与非线性渐进破坏内在联系的支撑理论，发现了岩质边坡破裂过程中的微震模式，阐明了滑坡灾害孕育过程的岩石微破裂前兆信息的共性特征及时效破裂的触发因素；

(2) **工程岩体边坡微破裂前兆信息监测技术国际领先。**首次提出了基于人工智能的微震信息识别及精确定位，建立基于微震能量密度的边坡潜在危险区域识别方法，研发了边坡稳定性在线远程智能监测系统，实现了微震监测与雷达监测相融合的一体化综合预警系统；

(3) **基于监测的模拟和基于模拟的监测边坡稳定性分析方法国际领先。**提出了基于细观统计损伤力学的边坡岩体破裂及动力灾害数值分析方法，构建了亿级自由度的岩石破裂过程并行计算系统，实现了边坡稳定性模拟和监测一体化解决方案，建立了“三个层次、四个等级、六个指标”的重大工程岩体边坡微震监测综合预警系统。

研究成果显著提升了微破裂监测分析预警技术在重大岩体工程边坡应用中的地位，服务于金川集团石英石矿、长山壕金矿东北坑边坡、临沂会宝岭铁矿、锦屏一级水电站左岸边坡等多个重大岩体工程，极大地保障了矿区矿体安全开采和水电工程建设，确立了我国在工程岩体边坡微震监测分析预警领域的国际领先地位。钱七虎院士、王思敬院士、蔡美峰院士、何满潮院士等九位专家组成的鉴定委员会认为，该项目成果对岩质边坡的稳定性分析、监测与预警研究的思路创新、方法先进，为岩土工程行业今后开展类似工程的安全分析与监测、预报预警提供了成功范例，推动了行业技术进步，总体上达到国际领先水平。

## 四、客观评价

### 1、鉴定评价

由中国岩石力学与工程学会组织，包括钱七虎、王思敬、蔡美峰、何满潮 4 位院士在内的九名专家组成的鉴定专家组一致认为：“该项目成果对岩质边坡的稳定性分析、监测与预警研究的思路创新、方法先进，且已经成功应用于锦屏一级水电站边坡稳定性分析与安全预警，对工程的施工安全起到良好的指导作用，产

生了显著的社会经济效益，为水电乃至其它岩土工程行业今后开展类似工程的安全分析与监测、预报预警提供了成功范例，推动了行业技术进步。项目成果在岩质边坡稳定性的监测预警领域总体上达到国际领先水平。”（附件 28）

## 2、知名专家评价

（1）2009 年中国科协主编《岩石力学与岩石工程学科发展报告》：“近年来……唐春安和梁正召的岩石破坏过程精细模拟研究，……体现了近年来我国岩体数值模拟研究主要成果，也反映了主要发展趋势。”

（2）P.K. Kaiser 教授（加拿大工程院院士）的评价是：……recommend that both strength and stiffness be assigned equal homogeneity factors. Therefore, different homogeneity factors were used to determine their corresponding damage initiation stress thresholds.（发表在 Rock Mechanics and Rock Engineering）

（3）中科院武汉岩土所冯夏庭教授（时任国际岩石力学学会主席）等应用是：In situ microseismic monitoring tests revealed that the energy release and microseismic events tended to increase for most of the monitored rockbursts（发表于 Engineering Geology）

（4）中国科学院院士陈祖煜教授在发表综述性文章，报道了本项目锦屏一级水电站（世界最高拱坝 314m）左岸边坡微震监测成果，高度评价了申请者基于微震监测实现了高陡岩质边坡变形分析从“表观到深部”三个层次的研究成果。（2016 年 Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering）

## 五、推广应用情况

1、研究成果已应用于长山壕露天金矿高陡边坡滑坡稳定性分析，解决爆破震动等动力扰动下高陡岩质边坡破裂与滑坡分析预报研究中尚未解决的关键问题。通过微震监测技术、三维建模、实地监测及 RFPA 数值分析研究边坡失稳，预防边坡滑坡、人生安全、设备安全，从而有效提高矿山生产能力。依托该露天矿典型高陡边坡实例，建立基于监测信息反演的边坡岩体稳定性分析方法，揭示边坡岩体损伤演化及其诱致灾变机理，寻求边坡失稳过程岩体损伤劣化的微震活动性、爆破震动参数及岩体参数弱化之间的联系，建立以微震前兆信息、爆破震动参数和边坡岩体参数为关系失稳判据，实现露天矿滑坡灾害分析预测。

2、研究成果应用于金川集团石英石矿边坡的稳定性分析。由于长期爆破振动效应，坡体稳定性极差，极易发生滑坡。在考虑岩石强度非均匀性分布和水解风化强度衰减的基础上，建立基于多相和多层次的边坡安全性模型，快速计算其安全系数和滑动面位置，进行坡体安全状态判定，揭示其变形动态非均匀失稳过程。建立在线远程智能监测预警系统，监测到边坡坡体内毫米级的位移变化，实现石英石露天采场边坡管理的远程监测、智能分析、实时预警、安全评价和科学决策。

近三年共新增矿产产量 140.1 万吨，新增经济效益 19614 万元；同时，该成果的成功运用极大的减少了经济损失和人员伤亡，也取得了显著的社会效益和环境效益。

3、研究成果应用于会宝岭铁矿地面沉陷控制和边坡稳定性分析。采用远程智能监测控制技术，对监测数据进行科学分析，提出和确定了滑塌及塌陷沉降的安全预警值，构建安全预警系统，达到对其进行自动化实时、动态监测，全面、准确地反映开采滑塌沉降量，及时发现了异常迹象，并采用防治技术对存在滑塌安全隐患边坡进行治理，一方面提升了矿体开采量，另一方面有效保证了矿区人员与设备的安全，取得了显著的社会效益和环境效益。

4、研究成果已成功应用于锦屏一级水电站边坡稳定性分析与安全预警，对工程的施工安全起到良好的指导作用，产生了显著的社会经济效益，为水电乃至其它岩土工程行业今后开展类似工程的安全分析与监测、预报预警提供了成功范例，推动了行业技术进步。

…等等。

## 六、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
发明专利	传感器的固定装置、安装装置以及安装方法	中国	ZL 2009 1 0207955.3	2013.7.10	1234195	大连理工大学	唐春安、袁亮、方良才、薛俊华、柏发松、刘超、余国锋、党保全、赵福坤、罗勇	有效
发明专利	一种复杂模型完全六面体建模及几何体重塑加密方法	中国	ZL 2013 1 071919.X	2013.12.20	2378772	大连理工大学	马天辉、唐春安	有效
发明专利	一种微震事件精确定位的动态参数方法	中国	ZL 2016 1 1024834.1	2016.11.17	3011294	大连理工大学	马天辉、唐春安、梁正召、朱旭、李迎春	有效
发明专利	岩质边坡开挖扰动作用下的微震监测预警分析系统及方法	中国	ZL 2016 1 0505807.X	2018.6.12	2957207	大连理工大学	马克、庄端阳、唐春安	有效
发明专利	一种基于微震视应力的岩质边坡变形预警方法	中国	ZL 2017 1 09794105.2	2018.12.25	N/A	四川大学	徐奴文、张敏、戴峰、蒋雄	有效

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
发明专利	具有复杂速度分布的区域岩体微震震源定位方法	中国	ZL 2016 1 0343681.0	2017.12.26	2752884	四川大学	徐奴文、郭亮、戴峰、赵涛、李韬、姜鹏	有效
发明专利	一种边坡岩体监测系统及监测方法	中国	ZL 2015 1 0579347.0	2015.9.11	2987329	中铁十九局集团矿业投资有限公司	赵鑫、王挥云、王博、李凤龙、秦俊峰、赵海欧、阚玉达、刘馨泽	有效
发明专利	利用边坡位移监测数据检测和确定滑坡剪出口的方法	中国	ZL 2013 1 0398333.X	2016.4.20	2034952	青岛理工大学	贺可强、郭栋、张拥军、徐吉业、李增涛	有效
软件版权	大型岩体工程灾害并行模拟系统	中国	2017SR686081	2017-9-1	2271365	大连理工大学	梁正召、唐春安、白红梅、张永彬、唐世斌、李根、李迎春	有效
软件版权	微震监测可视化软件	中国	2011SR011199	2007-8-1	0274873	大连力震科技有限公司	张永彬、白红梅、李楠	有效

**承诺：**上述知识产权和标准规范等用于提名国家技术发明奖的情况，已征得未列入项目主要完成人的权利人（发明专利指发明人）的同意。

### 七、主要完成人情况表

排名	姓名	工作单位	完成单位	职务	职称	对本项目贡献
1	唐春安	大连理工大学	大连理工大学	无	教授	统筹协调本项目的实施、管理。揭示了岩体在破裂过程中含有微破裂前兆信息这一重要特征，建立了岩石破裂过程声发射率与损伤变量的定量关系，提出了基于应力积累、应力释放和应力转移等背景应力场分析(3S原理)的边坡监测预警新方法，为边坡预警提供了理论支持；揭示了基于微震监测的岩质边坡滑坡的基本原理，统筹协调项目各单位构建了水电工程边坡的微震监测与大规模科学计算互馈的分析系统。

排名	姓名	工作单位	完成单位	职务	职称	对本项目贡献
2	张拥军	青岛理工大学	青岛理工大学	无	教授	研究了边坡复合动力损伤与开采卸荷动力变化下边坡岩体的破裂特征，开展了开采卸荷动力作用与边坡复合动力损伤位移响应及其稳定性变化的耦合分析；建立了金川石英石矿边坡稳定性分析系统。
3	郭绪元	雅砻江流域水电开发有限公司	雅砻江流域水电开发有限公司	基建总工程师	教高	提出了基于最优化方法的岩质边坡微震监测传感器空间阵列的网络优化方法，保障了数据采集的连续性。参与制定监测方案与技术路线，统筹协调该研究成果在锦屏一级水电站左岸边坡的应用，建立了重大工程岩体边坡微震监测综合预警系统及分析平台。
4	唐世斌	大连理工大学	大连理工大学	无	副教授	提出了基于小变形与大位移相结合的岩体工程边坡稳定性分析方法，建立了考虑流变效应的边坡破裂过程作用数值模型，建立了岩石变形破坏过程中宏观损伤断裂与能量耗散之间的联系，提出了微破裂与损伤之间的定量关系，发现了与实验尺度和工程尺度微震活动性演化规律的基本模式。
5	唐忠敏	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司	副处长	教高	主持并负责锦屏一级水电站左岸边坡微震监测项目技术方案构架总体设计。应用项目成果并结合锦屏一级水电站左岸边坡工程，提出了基于微震监测、微震损伤效应的边坡安全系数和常规监测等多元信息融合的岩石高边坡稳定性预警方法，协助建立了国内首套岩石高边坡微震监测综合预警系统。
6	梁正召	大连理工大学	大连理工大学	无	教授	提出了基于超级计算机系统的高性能并行算法，开发了亿级自由度的大型边坡岩体工程结构灾害模拟的集成化软件，实现了计算程序的前处理、并行计算程序调度、后处理等核心问题的解决方案，解决了大型岩体工程数值计算网格划分的技术“瓶颈”，建立了微震监测方法背景应力场分析平台，实现了目前岩石破裂过程模拟最大规模的计算。

排名	姓名	工作单位	完成单位	职务	职称	对本项目贡献
7	王挥云	中铁十九局集团矿业投资有限公司	中铁十九局集团矿业投资有限公司	工程部长	教高	负责金属矿山边坡微震分析预警研究工作。通过微震监测技术、三维建模、实地监测及 RFPA 数值分析等方法，建立基于监测信息反演的边坡岩体稳定性分析方法，揭示边坡岩体损伤演化及其诱致灾变机理，探讨了边坡失稳过程岩体损伤劣化的微震活动性、爆破震动参数及岩体参数弱化之间的联系，建立以微震前兆信息、爆破震动参数和边坡岩体参数为关系失稳判据，实现露天矿滑坡灾害分析预测。
8	徐奴文	四川大学	四川大学	无	副研究员	负责边坡微震监测系统设计方案的部分工作，以及微震监测数据的整合、分析；基于微震监测与数值模拟，研究了边坡开挖卸荷扰动影响及整体稳定性；负责项目成果现场应用情况的研究分析以及相应的报告编写，作为主要骨干负责建立了我国第一套水电边坡微震监测系统。
9	马天辉	大连理工大学	大连理工大学	无	副教授	基于应力场演化的 3S 原理研究微震监测技术及预警方法，优化了微震监测系统和传感器安装方案，实现了远程无线数据传输，为隧洞岩爆的实时连续微震监测提供保证，揭示边坡滞后型滑坡的围岩时效变形诱发机理。从外力触发作用、材料本身的时效性以及环境因素三种因素探讨了迟滞型滑坡灾害的机理。
10	张永彬	大连力震科技有限公司	大连力震科技有限公司	无	高工	构建了亿级自由度的岩石破裂过程并行计算系统，提出了计算程序的前后处理等核心问题的解决方案，研发了基于离心机方法的边坡岩体破裂分析软件系统，发展了数值离心机加载法。

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

排序	单位名称	创新推广贡献
1	大连理工大学	负责该项目的统筹协调、整体设计、理论分析和应用指导。从震源区、孕育周期、尺度性三方面首次全面系统地论证了岩体工程边坡在开挖扰动等条件下的微震监测可行性。建立了岩石变形破坏过程中宏观损伤断裂与能量耗散之间的联系，提出了微破裂与损伤之间的定量关系，发现了与实验尺度和工程尺度微震活动性演化规律的基本模式，构建了具有力学基础的微震图像动力学模型。提出了岩质边坡微震波形识别技术，揭示了高陡边坡采动、开挖等卸荷和施工过程中的微震活动特征与动力耦合特征，建立了以震级-频率关系 (b 值) 作为评价边坡稳定性的参考

排序	单位名称	创新推广贡献
		指标，首次提出了基于人工智能的微震信息识别及精确定位。提出了基于细观统计损伤力学的边坡岩体破裂及动力灾害数值分析方法，构建了亿级自由度的岩石破裂过程并行计算系统，提出了边坡稳定性模拟和监测一体化解决方案。
2	青岛理工大学	负责高陡边坡位移及发生机理、室内岩体力学参数试验、室内模型试验、灾害防治技术等研究工作。对项目进行全程管理、监督和指导，合理部署工作方案。组织专家对项目的实施设计、项目成果报告进行论证、审查，对项目的实施过程和完成质量进行检查和监督。指导项目组对于高陡边坡稳定性影响因素及发生机理进行了认真的综合分析，协助项目组不断完善工作方案、挖掘创新内容，为高陡边坡多源信息综合集成监测预警方法及防治体系的建立做出了巨大贡献。
3	中铁十九局集团矿业投资有限公司	负责本项目成果在多个金属矿山的运用，成功构建了长山壕东坑北面边坡微震监测系统。通过对微震监测信息的解译，识别和圈定潜在的滑坡区域，并在此集中区域辅以设置雷达监测，构建地表和内部一体化的监测系统。通过微震监测技术、三维建模等方法，建立基于监测信息反演的边坡岩体稳定性分析方法，揭示边坡岩体损伤演化及其诱致灾变机理，建立以微震前兆信息、爆破震动参数和边坡岩体参数为关系失稳判据，实现露天矿滑坡灾害分析预测。
4	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司	负责锦屏一级水电站左岸边坡微震监测项目技术方案构架总体设计，协助大连理工大学和雅砻江流域水电开发有限公司在工程现场建立微震监测系统的施工和运营。完成锦屏一级水电站左岸边坡地质异构体、边坡构造软弱岩带工程地质特性的研究，明确控制开挖过程中边坡稳定的坡体关键结构体。结合锦屏一级水电站左岸边坡工程，提出了基于微震监测、微震损伤效应的边坡安全系数和常规监测等多元信息融合的岩石高边坡稳定性预警方法。负责现场监测系统安装组织、协调，项目进度安排、中间检查，并参与成果应用现场数据采集、分析、成果分析及报告编写。
5	雅砻江流域水电开发有限公司	提供了水电工程高陡边坡的监测、预测、预报的科研实践平台，推动高陡边坡稳定性的微震监测技术的进一步深入研究与实践，保障了本项目研究成果在锦屏一级水电站高陡边坡稳定性分析的顺利实施。为基于微震监测的边坡岩体工程灾害的应用实践做出重要贡献，为类似工程提供了成功的范例。
6	四川大学	负责边坡微震监测系统设计方案的部分工作，以及微震监测数据的整合、分析。提出了基于微震视应力的岩质边坡变形预警方法，实现了具有复杂速度分布的区域岩体微震震源的定位。负责项目成果现场应用情况的研究分析以及相应的报告编写。
7	大连力震科技有限公司	负责微震监测系统的购置、现场安装及调试，以及微震监测系统的日常维护。引进、集成并再创新进口微震监测系统，优化了监测设备和传感器安装方案，在此基础上研发了边坡工程微震监测系统的中文可视化分析软件。实现了亿级自由度的岩石破裂过程并行计算，研发了基于离心机方法的边坡岩体破裂分析软件系统，发展了数值离心机加载法。



## 九、完成人合作关系说明

大连理工大学作为本项目的牵头单位，与青岛理工大学、中铁十九局集团矿业投资有限公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司、四川大学、大连力震科技有限公司联合申报国家科技进步奖，完成人合作关系说明如下：

1、合作项目为“岩体工程边坡灾害微破裂前兆机制及监测预警关键技术”；

2、完成人分别为大连理工大学唐春安项目组（唐春安、唐世斌、梁正召、马天辉）、青岛理工大学张拥军、中铁十九局集团矿业投资有限公司王挥云、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司唐忠敏、雅砻江流域水电开发有限公司郭绪元、四川大学徐奴文以及大连力震科技有限公司张永彬；

3、研究过程中，各方发挥各自优势：（1）大连理工大学完成人唐春安、唐世斌、梁正召、马天辉主要负责本项目总体研究方案与思路的设计，微震监测分析系统在岩体工程边坡稳定性研究中的可行性论证，采动或开挖引起坡体破裂与变形的内在机制和联系，监测预警系统相关参数与方法研究；（2）青岛理工大学张拥军负责研究了边坡复合动力损伤与开采卸荷动力变化下边坡岩体的破裂特征，开采卸荷动力作用与边坡复合动力损伤位移响应及其稳定性变化的耦合分析，建立了以金川石英石矿边坡稳定性监测为背景的边坡稳定性在线远程智能监测系统。（3）雅砻江流域水电开发有限公司郭绪元负责本研究成果在水电高陡边坡稳定性监测分析的研究基地建设，保障项目实施所需的软硬件条件以及施工现场的协调与组织，并提出基于最优化方法的岩质边坡微震监测传感器空间阵列的网络优化方法。（4）中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司唐忠敏主持并负责本项目在锦屏一级水电站左岸边坡微震监测项目技术方案构架总体设计，提出了基于微震监测、微震损伤效应的边坡安全系数和常规监测等多元信息融合的岩石高边坡稳定性预警方法，协助建立了国内首套岩石高边坡微震监测综合预警系统；

（5）中铁十九局集团矿业投资有限公司王挥云负责本项目成果在金属矿山中的应用，并建立以微震前兆信息、爆破震动参数和边坡岩体参数为关系失稳判据，实现露天矿滑坡灾害分析预测。（6）四川大学徐奴文负责本项目微震监测的基础理论以及基于微震监测与数值模拟研究工作，完成项目成果现场应用的研究分析报告，作为主要骨干负责建立了我国第一套水电边坡微震监测系统；（7）大连力震科技有限公司张永彬负责构建本项目中亿级自由度的岩石破裂过程并行计算系统，提出了计算程序的前后处理等核心问题的解决方案，研发了基于离心机方法的边坡岩体破裂分析软件系统，发展了数值离心机加载法。

4、提交总报告成果及验收事宜，有大连理工大学总体负责，青岛理工大学、雅砻江流域水电开发有限公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、中铁十九局集团矿业投资有限公司、四川大学、大连力震科技有限公司协助完成；所得数据各方共享。各单位在自己的研究方面，利用成果数据发表文章，去的知识产权等则为各单位独自享有。申报奖项时，各方写上联合申请。

多年来，在第一完成人领导下，课题组成员通力合作，依托国家 973 计划课题、国家自然科学基金重点项目，以及金川石英石矿、长山壕金矿东北坑边坡、临沂会宝岭铁矿、锦屏一级水电站左岸边坡等多个重大岩体工程的灾害问题为背景，围绕边坡的滑坡灾害问题，提出岩体微破裂是工程灾害前兆信息的基本思路，系统地构建基于微震监测与模拟计算的工程岩体边坡灾害监测与安全预警成套技术和方法体系，在岩体工程边坡灾害前兆规律、监测技术与预警方法方面取得了

突破性进展，提出了基于模拟与监测相结合的岩体工程灾害分析预警新方法。创造了显著的经济效益，确立了我国在工程岩体边坡微震监测分析预警领域的国际领先地位。