**项 目 公 示**

1. **项目名称**

复杂应力环境下硬岩裂纹扩展特性及破坏准则

**二、提名意见**

在国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目等课题的支持下，围绕复杂应力环境下深部硬岩裂纹扩展特性及破坏准则，项目组历经近十年的持续研究，提出了基于最大拉应变理论的岩石板裂破坏判据，构建了基于多维应力环境的硬岩破裂行为仿真模拟系统，获得了复杂应力状态与应力路径下硬岩破裂特征、能量演化规律及强度准则，明确了硬岩板裂化破坏与应变型岩爆间的内在联系与区别，创新了含缺陷硬岩在动、静态加载条件下的测试技术与理论，阐明了不同充填体性状对岩石裂纹扩展的影响机制，为深部复杂应力环境下硬岩裂纹扩展和失稳破坏提供了试验方法和理论依据。该项目成果先后发表在Rock Mech Rock Eng、Int J Rock Mech Min Sci、Eng Geol、Eng Fract Mech、Int J Geomech、岩石力学与工程学报等本领域著名学术期刊上，8篇代表作及论文总被引596次(Scopus数据库)，SCI总被引465次，SCI总他引348次。项目成果得到了包括国内外多位院士在内的同行专家的广泛引用和正面评价。项目组关于含缺陷硬岩动、静态裂纹扩展模式识别技术填补了岩石力学与工程领域的空白，促进了实验岩石力学的发展；复杂应力环境下硬岩板裂破坏理论与试验研究为深部资源的安全高效开采提供了强有力的支撑。经审阅，该项目提名书及附件材料真实有效，相关栏目符合填写要求，经公示无异议。

提名该项目为湖南省自然科学奖二等奖。

**三、项目简介**

深地矿产资源开发是国家战略部署。深部硬岩工程处于复杂应力环境之中，开采诱发围岩板裂、岩爆、冲击地压等岩体灾害事故频发、失稳破坏机理不清、诱因不明，使得深部资源开发和利用成为极具挑战性的世界难题。揭示复杂应力环境下硬岩裂纹扩展特征及破坏机理对于深部地下矿山安全高效开采具有重要的理论和现实意义。项目在充分认识和真实再现深部硬岩受力环境的基础上，针对深部高应力硬岩力学问题开展系统深入的研究，取得创新性科学发现如下：

（1）建立了硬岩板裂破坏起裂应力阈值识别方法，提出了基于最大拉应变理论的岩石板裂破坏判据，构建了基于多维应力场的硬岩裂纹扩展本构模型及仿真模拟系统，实现了硬岩在复杂应力环境破坏过程中的可视化，揭示了围岩应力状态和加卸载应力路径对硬岩板裂化破坏的力学影响机制。

（2）掌握了复杂应力环境下硬岩能量耗散与迁移规律，建立了硬岩真三轴卸载破坏准则，突破了Mohr-Coulomb准则无法揭示深部硬岩三向应力行为的局限，阐明了硬岩板裂化破坏与应变型岩爆之间的互动机制，明确了不同应力环境对于硬岩失稳破裂的定量贡献。

（3）组建了基于缺陷岩体的数字图像相关变形测量系统，创新了含缺陷硬岩在动、静态加载条件下的裂纹扩展理论及测试技术，揭示了含不同缺陷硬岩的动、静态裂纹渐进扩展机制及损伤破裂特征，获得了高应力环境下不同充填体性状和围岩之间的相互作用力学机理。

提出的岩石张拉破坏理论，阐明了硬脆性岩石张拉型破坏的本质；构建的基于多维应力场的硬岩破裂行为仿真模拟系统，深化了人们对于深部高应力硬岩破坏过程的认识，为开展硬岩真三轴破裂特征模拟研究提供了理论和技术保障；获得的硬岩真三轴卸荷破坏准则，揭示了深部硬岩板裂破坏力学机理；提出的含缺陷脆性岩石材料起裂应力测量方法，真实还原深部岩体在动、静态加载条件下的裂纹扩展行为，实现了岩石力学在该领域的技术创新；不同充填体性状与围岩相互作用机理研究为深部高应力硬岩灾害防控提供了理论支撑。

本项目得到国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目等课题的支持。8篇代表作成果发表在Rock Mech Rock Eng、Int J Rock Mech Min Sci、Eng Geol、岩石力学与工程学报等采矿与岩石力学领域国内外顶级期刊上，SCI总被引465次、总他引348次，Scopus总被引596次，总他引454次。项目研究成果得到何满潮院士、谢和平院士、冯夏庭院士、杨春和院士、前国际岩石力学与工程学会副主席Stacey T.R.教授、印度工程地质学会主席、印度理工学院Seshagiri K. Rao教授、澳大利亚新南威尔士大学Adrian R. Russell教授等国内外著名学者的正面引用和评价，多次受邀在国内外学术会议作大会报告，项目第一完成人入选2020爱思唯尔“中国高被引学者”榜单。此外，发表在Int J Geomech期刊的代表性论著[3]被国际著名工程学网站Advances in Engineering遴选为对“卓越工程”有突出贡献的科学论文。

**四、客观评价**

该项目的8篇代表性论著被美国、法国、澳大利亚、加拿大、德国、英国、新加坡、瑞典、挪威、俄罗斯、南非、印度等30多个国家的知名高校和科研机构的学者高度认可和正面引用，总被引596次(Scopus数据库)，总他引454次，SCI总被引465次，SCI他引348次。他引来自岩石力学与采矿、隧道与地下空间技术等领域的主流刊物，包括Int J Rock Mech Min Sci、Rock Mech Rock Eng、Eng Geol、Tunn Undergr Sp Tech、Int J Plast、Eng Fract Mech、Int J Geomech等。他引第一作者单位主要有The University of New South Wales、Curtin University、University of Pennsylvania、Colorado School of Mines、University of Western Australia、Indian Institute of Technology Delhi、岩土力学与工程国家重点实验室、武汉大学、四川大学、东北大学、中国矿业大学（北京）等。

主要代表性客观评价情况如下：

提出的基于最大拉应变理论的岩石板裂破坏判据，受到最大拉应变准则提出者、前国际岩石力学学会副主席Stacey T. R.教授的高度评价，他和西澳大学Wesseloo J.在代表性引文[1]中撰文提到：Li et al. (2011)（代表性论著[1]）发现平行于加载方向的板裂裂纹起始于一个临界拉伸应变，该临界拉伸应变约等于巴西试验时试样表面侧向应变计所测得的岩石最大拉伸应变，且所提出的岩石张拉破坏判据可以很好的解释岩石的裂纹起裂和扩展行为；美国科罗拉多矿业大学Walton G.教授和Sinha S.博士以及武汉大学刘泉声教授分别在“Int J Rock Mech Min Sci (2021) 138: 104625”（其他证明[8]）和“Eng Fract Mech (2021) 251: 107793”（其他证明[9]）中肯定了该试验结果的有效性和准确性，并且采用我们的试验数据对各自建立的数值模型进行了详细的比较验证；中国工程院杨春和院士团队在“Rock Mech Rock Eng (2021): 54: 4283–4298”（其他证明[10]）中也指出该成果能够很好的解释实验室与现场尺度条件下板裂强度的差异性。

提出的硬岩在复杂应力路径下的能量迁移规律，得到了学术界的广泛引用和正面评价。前国际岩石力学学会主席、东北大学校长、中国工程院冯夏庭院士在代表性引文[2]中撰文提到代表性论著[2]从能量演化的角度解译了复杂应力路径下岩爆诱发因素，并在硬岩破裂特征研究方面取得了重要突破；中国工程院谢和平院士在“煤炭学报 (2019) 44: 1283-1305”（其他证明[11]）中大篇幅介绍了代表性论著[2]的主要结论，并指出试验结果可真实反映岩石卸荷变形破坏中岩石内部损伤状态。

所构建的多维应力环境下硬岩破裂行为数值仿真系统，突破了商业数值软件中无法真实重现真三轴应力状态的瓶颈。印度工程地质学会主席、印度理工学院Seshagiri K. Rao教授在代表性引文[3]中对代表性论著[3]进行了正面引用和高度评价，指出该成果建立了更为复杂的塑性理论模型，并将多维强度准则扩展到有限差分数值分析之中，对于实际工程应用具有重要的意义；中国科学院何满潮院士团队在“Geomech Geophys Geo-energ Geo-resour (2020) 6: 36”（其他证明[12]）对代表性论著[3]给予了高度评价，称该成果为岩质边坡稳定性分析和最大安全开采深度的确定奠定了坚实的基础；中国科学院武汉岩土力学研究所周辉研究员在 “Int J Geomech (2020) 20(3): 04020013”（其他证明[13]）中指出，代表性论著[3]揭示了岩石抗压与抗拉强度的差异，为岩石屈服准则的合理评估提供了重要思路和方法。此外，该成果还被全球工程领域著名机构Advances in Engineering遴选为关键科学文章（其他证明[6]），并进行了专题报道。

获得的硬岩真三轴卸载破坏准则对岩体工程稳定性分析与评价至关重要，得到了国际学术界的高度认可和广泛关注。Gheorghe Asachi Technical University of Iasi-Romania的Comanici A. M.和Barsanescu P. D.教授在代表性引文[4]提到：Li et al. (2015)（代表性论著[4]）指出摩尔-库伦准则由于忽略了中间主应力的影响，实际上仅适用于双向应力状态，很难解释岩石材料的三维破坏现象，从而导致了其局限性，而我们的论文很好地反应了中间主应力对三向应力状态下岩石破坏的影响。此外，开展的硬岩板裂化破坏成因及岩爆发生机理研究（代表性论著[5]）也得到了中国工程院冯夏庭院士团队先后多次引用与正面评价，如在代表性引文[5]中指出该研究可真实再现深部地下洞室开挖后真三轴应力重分布过程，认为我们在板裂化破坏和岩爆机理研究方面取得了重要进展和显著成果。

组建的含缺陷岩石三维数字图像相关变形测量系统，实现了含缺陷岩石非均匀变形的非接触全场测量，得到了国内外学者的高度评价和正面引用。澳大利亚新南威尔士大学Adrian R. Russell教授以及天津大学赵高峰教授在代表性引文[6]中指出，Li et al. (2017)（代表性论著6）采用的岩石类脆性材料裂纹扩展测试技术为揭示高应力条件下含缺陷硬岩的裂纹扩展行为以及破坏机理提供了新的视角与重要手段。澳大利亚科廷大学Mostafa Sharifzadeh教授在“Eng Fract Mech (2020) 231: 107019”（其他证明[14]）也高度评价了该成果，指出该研究完整再现了含缺陷硬岩的破坏过程，并系统阐释了其力学特性与损伤行为。印度理工学院Singh T.N.教授在“B Een Geol Environ (2020) 79:4335–4348”（其他证明[15]）高度评价了代表性论著[7]的研究成果，称该研究实现了数字图像处理技术与声发射技术的结合，为揭示岩石断裂损伤行为提供了新的借鉴方法与思路。俄罗斯科学院强度物理与材料科学研究所Mikhail Eremin研究员在代表性引文[7]中正面引用了代表性论著[7]，称该研究阐明了高应力环境下缺陷岩体及充填物界面间的裂纹扩展机制及应力分布特征，为揭示深部围岩失稳机理以及开展高应力硬岩破坏综合防控研究提供理论指导。四川大学朱哲明教授先后多次正面评价了代表性论著[8]的成果，并在代表性引文[8]中采用代表性论著[8]的结论与其试验结果对比验证；西南交通大学朱志武教授在“J Eng Mech (2020) 146(8): 04020085”（其他证明[16]）也高度评价了代表性论著[8]的成果，指出该研究系统揭示了动力冲击作用下含裂隙岩体力学行为与破坏机理，为深部含裂隙岩体的爆破工程参数优化提供了重要理论支撑；代表性论著[8]还入选2020年“领跑者5000-中国精品科技期刊顶尖学术论文”（其他证明[7]）。

**五、代表作及论文目录（不超过8篇，其中代表作不超过5篇）**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 代表作及论文名称/刊名 | 影响  因子 | 年卷  页码 | 作者 |
| 1 | Influence of sample height-to-width ratios on failure mode for rectangular prism samples of hard rock loaded in uniaxial compression/Rock Mechanics and Rock Engineering | 6.73 | 2011年44卷253-267页 | Diyuan Li, Charlie C. Li, Xibing Li |
| 2 | Energy evolution characteristics of hard rock during triaxial failure with different loading and unloading paths/Engineering Geology | 6.755 | 2017年228卷270-281页 | Diyuan Li, Zhi Sun, Tao Xie, Xibing Li, P.G. Ranjith |
| 3 | Numerical investigation of hard rock strength and fracturing under polyaxial compression based on Mogi-Coulomb failure criterion/International Journal of Geomechanics | 3.819 | 2019年19卷04019005-1-19 | Fan Feng, Xibing Li, Jamal Rostami, Dingxiao Peng, Diyuan Li, Kun Du |
| 4 | True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress/Rock Mechanics and Rock Engineering | 6.73 | 2015年48卷2185-2196页 | Xibing Li, Kun Du, Diyuan Li |
| 5 | Failure characteristics of granite influenced by sample height-to-width ratios and intermediate principal stress under true-triaxial unloading conditions/Rock Mechanics and Rock Engineering | 6.73 | 2018年51卷1321-1345页 | Xibing Li, Fan Feng, Diyuan Li, Kun Du, P. G. Ranjith, Jamal Rostami |
| 6 | Fracture analysis of marble specimens with a hole under uniaxial compression by digital image correlation/Engineering Fracture Mechanics | 4.406 | 2017年183卷109-124页 | Diyuan Li, Quanqi Zhu, Zilong Zhou, Xibing Li, P. G. Ranjith |
| 7 | Mechanical properties and fracture evolution of sandstone specimens containing different inclusions under uniaxial compression/ International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences | 7.135 | 2019年115卷33-47页 | Quanqi Zhu, Diyuan Li, Zhenyu Han, Xibing Li, Zilong Zhou |
| 8 | 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究/岩石力学与工程学报 |  | 2015年34卷249-260页 | 李地元，成腾蛟，周韬，李夕兵 |

**六、主要完成人情况**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 主要完成单位 | 对本项目的贡献 |
| 李地元 | 1 | 副院长 | 教授 | 中南大学 | 中南大学 | 该项目负责人，是项目整体研究计划、方案具体实施、理论和试验工作的提出者与指导者。对科学发现1、2、3均做出了创造性贡献，是科学发现1的主要完成者，同时是科学发现2、3思想的提出者与指导者。提出了基于最大拉应变理论的岩石板裂破坏判据，揭示了复杂应力环境下硬岩能量耗散与迁移规律，获得了硬岩真三轴卸载破坏准则，创新了动静态加载下含缺陷硬岩的裂纹扩展理论及测试技术和方法。是8篇代表性论著的第一作者或通讯作者。 |
| 冯帆 | 2 | 学院学科办主任 | 讲师 | 山东科技大学 | 山东科技大学 | 本项目主要完成人之一，对科学发现1和2做出了创造性贡献。获得了不同应力状态及路径下硬岩板裂化破坏成因及岩爆发生机理，构建了多维应力环境下硬岩破裂行为数值仿真系统，开展了大量硬岩真三轴加、卸载破坏特性试验及强度准则的理论分析工作，揭示了板裂化破坏与应变型岩爆之间的互动机制。是代表性论著3的第一作者和代表性论著5的通讯作者。 |
| 朱泉企 | 3 | 无 | 无 | 中南大学 | 中南大学 | 本项目主要完成人之一，对科学发现3做出了重要贡献，提出了含缺陷岩石类脆性材料起裂应力和动态裂纹扩展速度测试方法，探明了高静应力下含缺陷硬岩力学行为及破裂特征，揭示了不同充填体性状与围岩相互作用机理。是代表性论著6的主要完成人，是代表性论著7的第一作者。 |
| 周韬 | 4 | 无 | 副研究员 | 深圳大学 | 中南大学 | 本项目主要完成人之一，对科学发现3做出了重要贡献，开展了大量含缺陷硬岩动态冲击破坏特性试验研究及理论分析，揭示了高应变率下预制缺陷硬岩动态裂纹萌生、起裂、扩展及贯通机理，提出了有利于动态破岩的诱导致裂条件。是代表性论著8的主要完成人。 |

**七、主要完成单位情况**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 单位名称 | 排名 | 对本项目的贡献 |
| 中南大学 | 1 | 中南大学作为第一完成单位，提出项目整体研究思路，负责项目总体研究方案的制定、可行性分析、试验开展和数据处理分析等工作。提名项目中重要科学发现2、3的全部工作及重要科学发现1的主要工作都在中南大学完成。中南大学矿业工程是“双一流”A类建设学科，拥有国家金属矿山安全科学技术研究中心、深部金属矿产资源开发与灾害控制湖南省重点实验室，拥有一批世界先进水平的岩石力学试验仪器装备，为本项目的顺利开展提供了重要保障，为重要科学发现做出了突出贡献。 |
| 山东科技大学 | 2 | 提名项目中重要科学发现1的部分工作在山东科技大学完成。学校为山东省高水平大学“冲一流”建设高校，采矿工程学科为国家重点学科（培育）。所在的矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地和“矿山灾害预防控制”教育部重点实验室，拥有岩土体动态和静态大型数值模拟分析软件，为本项目的顺利开展提供了重要保障，为重要科学发现的进一步推广应用做出了很大贡献。 |

**八、主要完成人合作关系说明**

本项目主要完成人李地元、冯帆、朱泉企、周韬均师从于中南大学李夕兵教授。“复杂应力环境下硬岩裂纹扩展特性及破坏准则”是在李夕兵教授的支持下，由项目第一完成人李地元教授联合冯帆、朱泉企、周韬等人开展的科学研究。2010年，项目第一完成人李地元在中南大学（项目第一完成单位）完成博士学位论文《高应力硬岩脆性板裂破坏和应变型岩爆机理研究》，为本项目打下了良好的理论和试验研究基础；第二完成人冯帆为李夕兵和李地元教授联合指导博士，2018年博士毕业后赴山东科技大学（项目第二完成单位）能源与矿业工程学院任教，其攻读博士期间及工作以后的主要研究方向就是围绕深部高应力硬岩破裂特性和岩爆机理而开展的；第三完成人朱泉企于2011年进入中南大学学习，至今一直在李地元教授团队从事含缺陷岩石变形破裂特征及强度劣化机理等方面的研究；第四完成人周韬博士自2010年起，在项目第一完成人李地元教授带领和指导下开展高应变率下含预制缺陷硬岩动态力学特性及裂纹扩展机理研究，并与李地元教授共同承担国家自然科学基金项目1项，其博士毕业后赴深圳大学工作。

本项目主要完成人作为一个科研团队历经十余年的努力，在岩石力学领域开展了持续深入的研究，促进了深部岩石力学理论与测试技术的发展，并取得了开创性的成果。在8篇代表作及论文中，李地元与冯帆合作发表论文2篇，李地元与朱泉企合作发表论文2篇，李地元与周韬合作发表论文1篇。

上述发表的学术论文署名，知识产权关系清楚、明确，无异议。项目成果的完成人关系清楚、明确，内容真实，不存在任何异议，特此说明。

**完成人合作关系情况汇总表**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者/排名 | 合作时间 | 合作成果 |
| 1 | 论文合著 | 冯帆/1，李地元/4 | 2019.04 | Numerical investigation of hard rock strength and fracturing under polyaxial compression based on Mogi-Coulomb failure criterion/International Journal of Geomechanics |
| 2 | 论文合著 | 冯帆/2，李地元/3 | 2018.05 | Failure characteristics of granite influenced by sample height-to-width ratios and intermediate principal stress under true-triaxial unloading conditions/Rock Mechanics and Rock Engineering |
| 3 | 论文合著 | 李地元/1，朱泉企/2 | 2017.10 | Fracture analysis of marble specimens with a hole under uniaxial compression by digital image correlation/Engineering Fracture Mechanics |
| 4 | 论文合著 | 朱泉企/1，李地元/2 | 2019.05 | Mechanical properties and fracture evolution of sandstone specimens containing different inclusions under uniaxial compression/International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences |
| 5 | 论文合著 | 李地元/1，周韬/3 | 2015.01 | 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究/岩石力学与工程学报 |