

硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题

李夕兵^{1,2}, 姚金蕊¹, 宫凤强^{1,2}

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;
2. 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 从深部开采环境阐述了金属矿硬岩在高地应力作用下的储能特征, 并从深部开采工艺方面分析了随着金属矿山开采深度的不断增加, 连续采矿方法已经成为未来深部开采的必然趋势。通过分析, 认为处于高应力下的硬岩矿体在承受连续采矿法带来的动力扰动时, 可以认为是岩石动静组合的受力问题。在此基础上, 利用岩石动静组合加载理论分析了硬岩矿山在深部开采中的几个关键动力学问题, 主要包括: 硬岩矿山深部开采中的系统扰动和岩爆、深部开采中爆破引发的矿震及巷道失稳现象、深部硬岩开采中的能量释放与有序调控。理论分析和工程实践证明, 硬岩金属矿山深部开采中存在的很多动力学问题可以利用岩石动静组合加载理论进行科学论证和分析, 这对深部采矿的工程实践有较好的指导意义。

关键词: 硬岩; 金属矿山; 深部开采; 动力学问题; 岩爆; 诱导崩落; 非爆开采

中图分类号: TD87

文献标志码: A

Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines

LI Xi-bing^{1,2}, YAO Jin-rui¹, GONG Feng-qiang^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Key Lab of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China)

Abstract: The energy storage characteristics of hard rock in metal mines under high stress was described from the deep mining environment. And the inevitable trend of continuous mining methods in the future with the increase of exploitation depth of metal mines was also analyzed. For hard rock in metal mines under high stress, the dynamic disturbance caused by continuous mining was conducted on it, which can be considered as a mechanical problem coupled static and dynamic loads. On this basis, three key dynamics problems were analyzed by using the theory of coupled loads as follows: the system disturbance and rock burst in deep metal mines exploitation, mine earthquake and drift instability caused by blasting in deep mines, energy release and orderly regulation in deep metal mines exploitation. Theoretical analysis and engineering practice proved that several dynamics problems in deep metal mines can be explained by using the theory of coupled static and dynamic loads, which will provide some engineering practice guidance for deep exploitation.

Key words: hard rock; metal mines; deep exploitation; dynamics problems; rock burst; induced caving; non-blasting exploitation

随着对矿产资源需求量的增加和浅部资源的不断消耗, 国内外越来越多的金属矿山进入深部或更深的

开采状态。据不完全统计^[1], 国外开采深度超千米的金属矿山已经有 80 多座。南非 Witwatersrand 地区的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB732004); 国家自然科学基金资助项目(50934006, 41102170); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QNZT090); 中南大学前沿研究计划资助项目(2010QZZD001)

收稿日期: 2011-07-30; 修订日期: 2011-09-20

通信作者: 李夕兵, 教授, 博士; 电话: 0731-88879612; E-mail: xbli@mail.csu.edu.cn

TauTona 金矿在 2008 年开采至地下 3 900 m，超过了南非 3 585 m 的 East Rand 金矿^[2]。TauTona 金矿在 2009 年开采深度达到 3 910 m，成为目前世界上开采深度最深的矿山^[3]，而且计划对在同一地区的 Mponeng 金矿在未来拓展到 4 500 m^[4]。北美最深的硬岩矿山是加拿大魁北克省 Rouyn-Noranda 东部的 Agnico-Eagle's LaRonde，其中 3 号矿井已经达到 3 000 m 以下，目前也是西半球最深的矿井^[3]；澳大利亚昆士兰州 Mount Isa 的硬岩矿山最深达到 1 800 m^[3]；最深的铂钯矿位于南非的 Merensky Reef 地区，深度达到 2 200 m^[3]。印度 Kolar 金矿开采至地下 3 200 m^[5]；瑞典 Kristineberg 矿开采深度已达 1 100 m^[6]。虽然和国外的众多深部金属矿山相比，中国的金属矿开采深度较浅，但是一大批金属矿山也已进入深部开采行列。例如辽宁省抚顺的红透山铜矿开拓深度已经达到 1 357 m，开采深度达到 1 197 m^[7-8]。安徽安庆冬瓜山铜矿主井井深 1 120 m，副井井深 1 023 m，辅助井深 1 101.5 m^[9]。在黄金矿山中，吉林夹皮沟金矿一段盲竖井 240~690 m，二段盲竖井 690~1 320 m，该矿的二段盲竖井将来还要延深至 1 635 m^[10]。河南灵宝金鑫金矿竖井掘进深度已达 1 500 m^[11-12]。此外，山东招远玲珑金矿、云南会泽铅锌矿、广东韶关凡口铅锌矿、湖北鄂州程潮铁矿等都基本已进入深部开采^[8, 13-14]。

从 20 世纪 90 年代中期至今，国内外众多专家学者就开始关注金属矿山深部开采未来的发展趋势，作了很多前瞻性的展望和研究，提出了许多很好的建议^[15-30]。例如韩志型和王维德^[15]主要结合加拿大硬岩矿山深部开采情形分别从深部开采方法、采矿诱发地震、采矿的遥控和自动化、岩石力学与信息自动化技术的相互作用等方面进行了论述；孙宏华^[17]阐述了对我国金属矿床深部开采进行研究的必要性和迫切性，并介绍了对金属矿床深部开采需要研究的主要内容，而且认为深部矿体开采技术是一项综合技术，是一项系统工程项目，需由国家组织攻关；李夕兵等^[18]首先阐述了中国有色金属工业的现状，而后分析了金属矿开采所面临的困难和问题，提出为了保持我国有色金属采矿业的可持续健康发展，必须对以深部矿床为对象的深部开采技术等关键问题进行研究。在此基础上基于矿业可持续发展战略观，提出了地下金属矿山阶段开采的新模式——上行阶段开采模式^[21]。这些研究论文主要从宏观方面，包括采矿现状、采矿环境、采矿方法和工艺、采矿装备及技术等方面综述了金属矿山深部开采所面临的问题，专门从力学的角度讨论金属矿山深部开采的论文还不多见。

进入深部开采环境的矿山，将面临高应力、高温

度、高井深的问题，目前所采用的采矿方法是否适用以后的深部开采，特别是随着这些矿山后期的大规模动力开采，如果不采取与高应力环境相适应的采矿技术与工艺，势必发生较大的地压灾害，也会严重地阻碍矿山的规模化生产。据国内外现有资料显示，很多金属矿山在深部开采中都遇到了岩爆、岩体冒落以及硐室失稳现象等动力灾害问题，有的灾害还造成了很大的人员伤亡和损失。因此，必须积极地探索和研究深部高应力区的采矿技术与灾害预测、控制理论。

但是另外一方面，如参考文献[22]中所阐述的：在深井开采的科学的研究中，人们的注意力多集中在高应力矿岩的岩爆机理与预测预报方面，立足于高应力所诱发工程灾害的防治。然而，事物都有两面性，深井高应力既有诱发灾害的不利方面，又有可利用的方面。在矿床开采过程中，落矿作为主要采矿工艺也可以利用高应力所具有的碎裂诱变特性，来能动地控制矿石块度、改善破碎质量。这是因为在深井开采中，坚硬矿岩出现的“好凿好爆”现象给人们重要启示，这种现象就是高应力所致。人们有理由对这一新的思路给予重视，并开展高应力条件下坚硬矿岩的碎裂诱变机理研究，通过工程布置优化，达到合理利用岩体储能的目的，以更好地实现安全、高效、经济回收深部矿产资源。要针对金属矿硬岩深部开采引起的动力灾害或动力学问题进行研究，必须从硬岩深部开采的环境和工艺两个主要方面入手进行分析，了解这些动力学问题发生的主要影响因素。

1 硬岩深部开采环境和工艺引起的动力学问题

开采环境主要指深部开采的天然因素，也可称之为内在因素；开采工艺是指深部开采的人工因素，也可称之为外在因素。综合来讲，首先要了解硬岩深部的岩性特征和受力特征与浅部的区别，进而明确适用于硬岩深部开采的采矿技术和方法，并在两者基础上对深部硬岩开采引起的动力学问题进行科学的归纳和定义，并通过理论基础研究，最后为硬岩深部开采的工程实践提供工程指导和技术保障。

1.1 深部金属矿岩的高地应力赋存条件

深部采矿工程必须查明地壳中的地应力方向和大小，这是开采设计的基础。根据现有的地应力测量数据，垂直的应力一般随着深度的增加而线性增大，而水平应力的变化规律比较复杂。图 1 所示为 Brady 和 Brown 给出的各国垂直和水平地应力随深度增加的变

化规律^[31]。从图1可以看出, 随着埋深的增加, 垂直应力的变化为每1 km大约增加26 MPa。

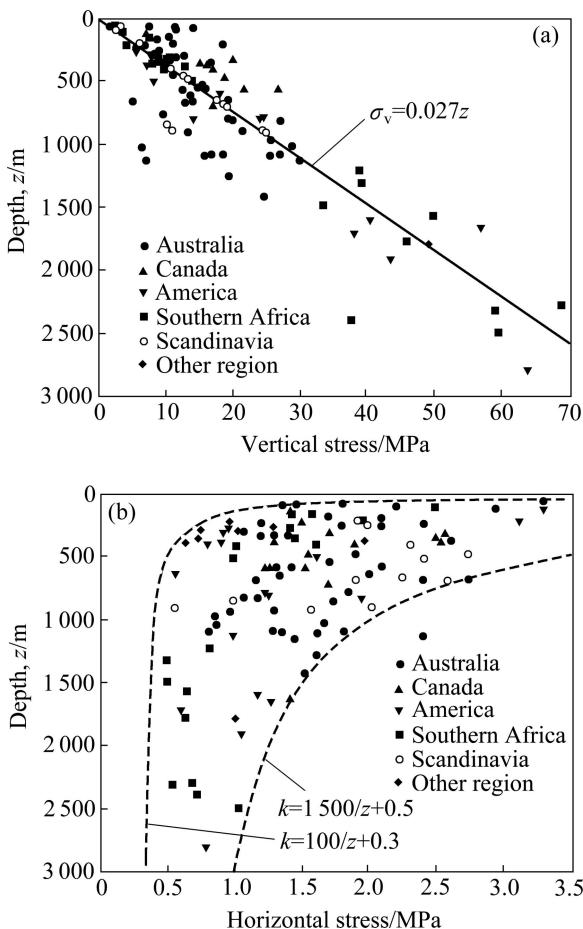


图1 各国地应力测量结果^[31]

Fig.1 Stress measurement results from many countries^[31]: (a) Curves of depth vs vertical stress; (b) Curves of depth vs horizontal stress

目前, 国内外深部金属矿山基本都处于地表以下500 m甚至几千米, 在此深度下, 矿体受到高应力的作用。图2所示为安徽铜陵冬瓜山铜矿矿体赋存位置示意图^[32]。整个矿体大约在地表下-600到-1 000 m。图3所示为冬瓜山铜矿的应力实测数据图^[33]。由图3可以看出, 最大主应力随着深度的增加而线性增加, 在-730 m处大约为35~40 MPa。高应力的存在是造成深部采矿和浅部采矿最大区别之一。

1.2 深部金属矿山的硬岩岩性和储能特征

从岩石特性来讲, 金属矿山和煤矿以及其他部分非煤矿山相比, 最显著的区别之一是金属矿山的矿岩基本都属于硬岩岩性。金属矿床属于硬岩是由金属矿生成的天然条件决定的。当深部探矿进入第二深度空

间(地下500~2 000 m)范围内, 金属矿床, 特别是大型、超大型矿床和矿集区的形成均必然源于壳、慢深处, 即在热动力作用下, 岩浆活动、上涌, 并强烈分异并调整。在这样的物质与能量强烈交换下, 在运移过程

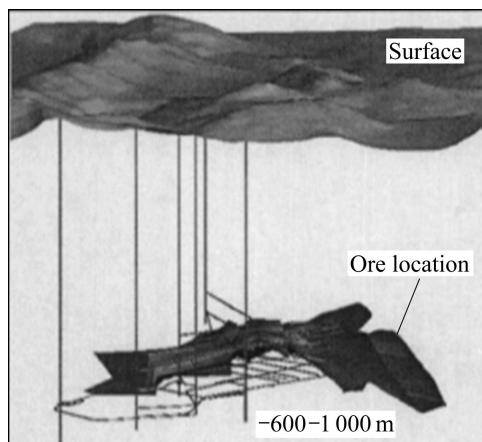


图2 安徽冬瓜山铜矿矿体赋存位置^[32]

Fig.2 Ore location of Dongguashan Copper Mine^[32]

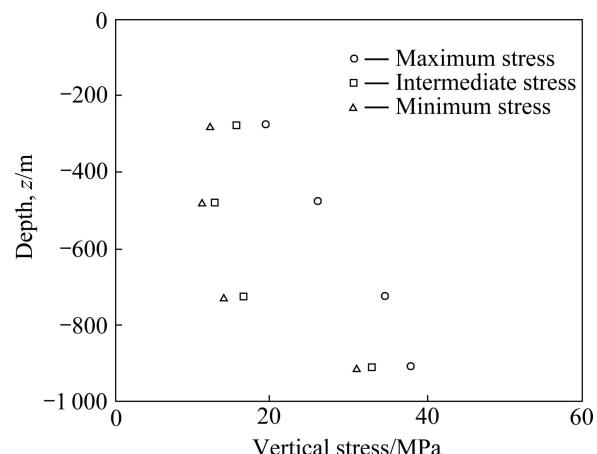


图3 冬瓜山铜矿地应力随深度变化图^[33]

Fig.3 Stress change with depth in Dongguashan Copper Mine^[33]

中促使含矿元素不断聚集, 进而形成大型、超大型矿床和多金属共生的矿集区^[34]。即对于大部分金属矿床而言, 大型岩浆岩基体是构造大型、超大型金属矿床的源地, 是物源也是母岩体^[34]。此外, 变质岩基体也是形成金属矿床的源地之一。岩浆岩和变质岩的岩基体主要包括花岗岩、石英岩、大理岩等, 这类岩石的硬度基本都很高。例如, 加拿大 Sudbury 铜、镍矿区岩体围岩为元古代的砂岩、石英岩、角闪岩和凝灰岩, 岩盆中岩相由边缘向中心为苏长岩、辉长岩和花岗斑^[35]; 我国铜陵冬瓜山铜矿矿体主要由含铜矽卡岩、含铜黄铁矿、含铜磁黄铁矿和含铜蛇纹岩等构成。

矿体底盘直接围岩为石炭系下统高丽山组岩石和石英闪长岩,以角岩化粉砂岩为主。矿体直接顶盘岩石为黄龙组大理岩,上部为栖霞组大理岩等岩石。1992年,北京有色冶金设计研究总院对冬瓜山矿石和顶底板6种岩石进行了物理力学实验工作,得到各类岩石单轴抗压强度参数,如表1所列^[32]。从表1可以看出,单轴抗压强度最低的黄龙组大理岩的强度也达到了50.38 MPa,按照《工程岩体分级标准》单轴抗压强度小于30 MPa的岩石为软岩,黄龙组大理岩也属于较硬岩石,其他6种岩石明显属于硬岩。

表1 冬瓜山铜矿各类岩石抗压强度数据^[32]

Table 1 Uniaxial compressive strength of several rocks in Dongguashan copper mine^[32]

Rock type	Uniaxial compressive strength/MPa
Qixia marble	74.04
Huanglong marble	50.38
Siltstone	187.17
Quartz diorite	306.58
Skarn	190.30
Garnet skarn	170.28
Copper-magnetite	304.00

对于硬岩,虽然在深部岩性会发生脆-岩转变,但这是一种出于高围压条件下表现出来的特殊变形性质。当采掘进行到深部时,各种巷道、采空区对处于高围压下岩石形成临空面,此时硬岩仍然表现出很明显的弹脆性。具有弹脆性的岩石在承受载荷时,如果施加的荷载大小处于岩石的弹性阶段内,那么,所施加的应变能基本都储存在岩石内,即硬岩具有高储能的特性。

图4所示是某种单轴抗压强度90 MPa以上的砂岩在预静载(1 kN)和循环压缩下(加载速率4 kN/s)的试验曲线^[36]。

另一方面,进入深部开采后,重力引起的垂直原岩应力通常超过工程岩体的抗压强度(>20 MPa),而由于工程开挖所引起的应力集中水平则更是远大于工程岩体的强度(>40 MPa),同时,岩石在构造运动过程中仍存有部分构造应力,二者叠加共同累积为高应力^[24]。深部岩体在高地应力的作用下相当于在岩石内部施加了部分预应力,使深部硬岩成为储能体。可以说深部岩体具有能量源和能量汇的特性,在一定条件下,岩体内积蓄的变形能会释放出来,转变为动能^[37]。

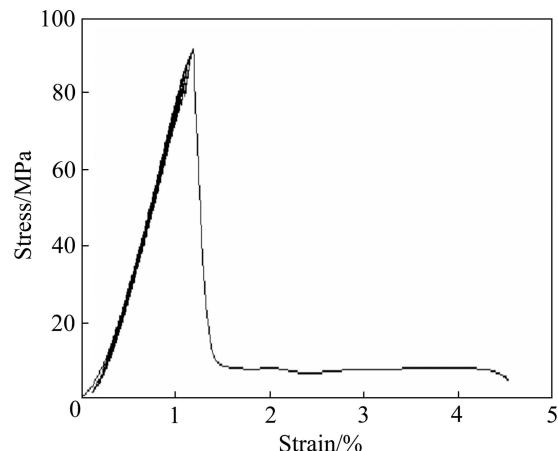


图4 预静载和动载循环加载下砂岩的全应力—应变曲线^[36]

Fig.4 Stress—strain curve of sandstone under pre-static loads and cycle dynamic loads^[36]

1.3 硬岩深部开采工艺的发展趋势

在金属矿床开采中,传统的房式采矿法把阶段分为矿房和矿柱,先回采矿房,后再回收矿柱。对于浅部矿山,这种方法留下大量矿柱可以支撑围岩,控制地压活动。但是把该方法用于深部采矿时,矿柱承受很大的静压力,开采过程中,矿柱还会承受来自其它采场的动应力和由于复杂开采应力调整产生的应力扰动。矿柱在承受静压下的动力扰动变化,有可能会导致严重的岩爆问题^[32]。另外,矿柱回采过程还会带来回收率低、作业成本高、影响经济效益等方面的弊端。为了变革传统开采方法,中南大学在“七五”、“八五”、“九五”期间,先后在冬瓜山铜矿和凤凰山铜矿承担了国家科技攻关项目“地下金属矿采矿连续工艺技术与装备的研究”、“地下金属矿无间柱连续采矿工艺技术研究”和“深井硬岩连续开采技术”。实践证明,连续采矿方法适用于深部矿山的开采,是金属矿地下开采技术的一个重大变革,也是金属矿深部开采发展的一大趋势。

目前,地下金属矿山的连续采矿模式可分为如下两类:

- 1) 采装运机组的连续采矿。这是基于爆破破岩广义的连续采矿理念。该方法主要适用于厚大矿体,它是一步骤回采的采矿方法和高效率的采、装、运设备组成的采矿系统。即大矿段回采过程中,采、装、运工艺在不同空间平行连续进行,采用阶段连续推进(不留间柱)的回采顺序。图5所示为一高阶段连续采矿的概念图^[22]。该方案的基本含义是以大矿段为回采单元,采用一步骤回采、连续推进的阶段矿房法,在回采过程中,爆破崩矿、振动出矿、运矿和充填(废石)4个工序在不同的空间平行进行。

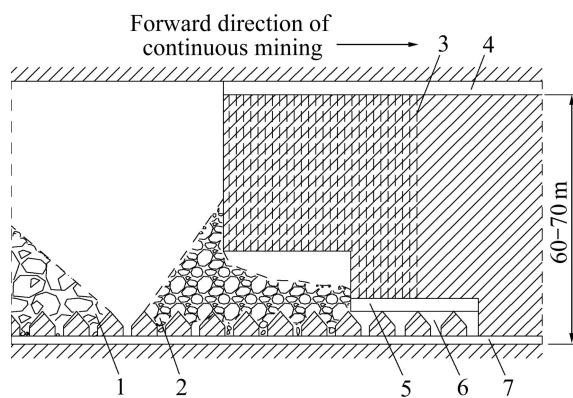


图5一步骤回采的连续采矿概念方案图^[22]

Fig.5 Continuous mining concept map of one-step actual mining^[22]. 1—Waste rock filled; 2—Caving of ore; 3—Blast hole; 4—Drilling horizontal layer; 5—Pulling bottom horizontal layer; 6—Mine level by level; 7—Mine transportation Lane

2) 单一采矿机的连续采矿。这是基于无爆破(非爆破)破岩的狭义的连续采矿理念,是指在矿房回采过程中,不是用凿岩、装药、爆破的方法崩落矿石,而是用其它手段如切割、冲切、涨裂等方法来崩落矿石的一种新型方法。与传统的采矿方法相比,由于无爆破采矿法取消了凿岩—装药—爆破的循环作业方式,可实现机械化连续开采,所以劳动强度低,劳动生产率高。同时还因为无爆破震动,减轻了回采对矿体及围岩的破坏,这对加强采场地压管理及降低损失贫化都具有显著的作用。从该技术在历史上应用情况来看,对地下硬岩无爆破采矿技术的研究主要着眼于薄至极薄矿脉的开采^[38]。南非、澳大利亚、美国及欧洲许多国家先后利用非爆采矿对薄矿脉矿床进行了开采试验和应用。中国也对该类方法进行了系统研究。例如,1969年,南非采矿研究院利用刮刀钻头对地下深2 500 m的金矿进行了采矿试验,该方法显著改善了上盘围岩的条件;1983年,美国矿务局也进行过类似试验研究,试验表明该方法可用于地下薄矿脉的回采,估算生产率为27.5 t/h左右^[39]。1989~1991年期间,北京矿冶研究总院利用劈裂机劈岩法在山东招远金矿进行了薄矿脉无爆采矿法的探索试验。结果表明:对薄与极薄矿脉,劈裂法可以有效地进行矿岩粉采与选别回采,矿石贫化率极小,经济效益明显^[38]。

对于无爆破采矿技术,在此介绍两种典型的破岩方法^[38~39]:

1) 第一种是凿岩劈裂采矿法。该方法由美国矿业局研究发明。该方法可用于开采厚度为0.6~1.2 m的急倾斜薄矿脉。利用凿岩劈裂机首先在矿石内钻凿

0.3 m深的浅孔,然后再在钻孔深处施加径向和切向力,以剪切和拉伸的破坏形式使矿石呈锥型破裂,如图6所示。

2) 第二种是冲击破裂采矿方法。由于很多深水平采场工作面岩石承受了很大应力,往往产生裂缝,因此,利用高能量液压冲击锤通过冲击和撬的作用完全可以破碎岩石^[39]。该方法采用冲击碎裂采矿机进行回采,这种采矿机由一个高度灵活的高能量冲击锤、托架、导向牵引装置(可使机器沿着工作面来回移动)以及往复式刮板运输机构成。

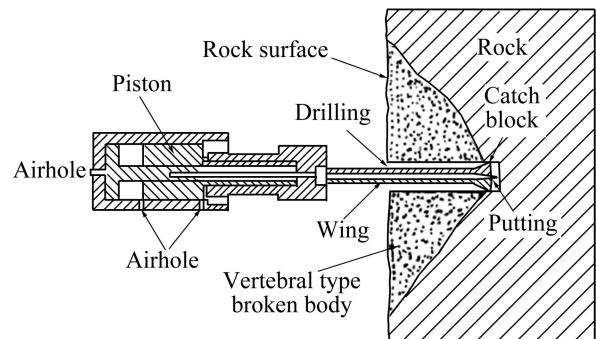


图6 凿岩劈裂器破岩示意图^[38]

Fig.6 Schematic splitting rock-drilling device^[22]

1.4 硬岩深部开采的动静组合受力特征及其力学解释

如上述所述,深部硬岩处于高应力状态,无论是已有的传统开采方案,还是深井开采的新方案,都无可避免地受到其开采中较为频繁的爆破崩矿、高阶段落矿、机械凿岩等引发的动力扰动。动力扰动从性质上可分为两大类:1) 开采系统带来的扰动。多阶段多矿房开采导致应力调整而产生的岩体内的应力变化,即 $\Delta\sigma$ 随时间变化。2) 动力扰动是由外界动载荷作用带来的动力扰动。因此,深部硬岩实际上处于“高应力+动力扰动”的受力状态。图7所示为深部采矿示意图。如图所示,深部矿体和围岩在遭受炸药爆破、开挖与崩矿扰动、机械钻掘等动载荷作用前,已经承受了来自地应力、自重应力和构造应力等高静应力作用,处于一维或三维受力状态,是典型的岩石动静组合加载作用问题^[1]。显然,研究预静应力条件下岩石动静组合强度和变形性质,比单纯研究静载荷或者动载荷对岩石的影响要更加合理,对科学认识深部岩石的力学特性并保证工程结构的安全也有一定的工程意义。进行具体的科学研究时,对岩石受高地应力和动载荷作用下的受力状况进行提升和简化,图7(a)中A、B两点的受力状态可简化为如图7(b)和(c)所示。图7(b)可以认为是一维动静组合受力状态,图7(c)则可以认为是三维动静组合受力状态。

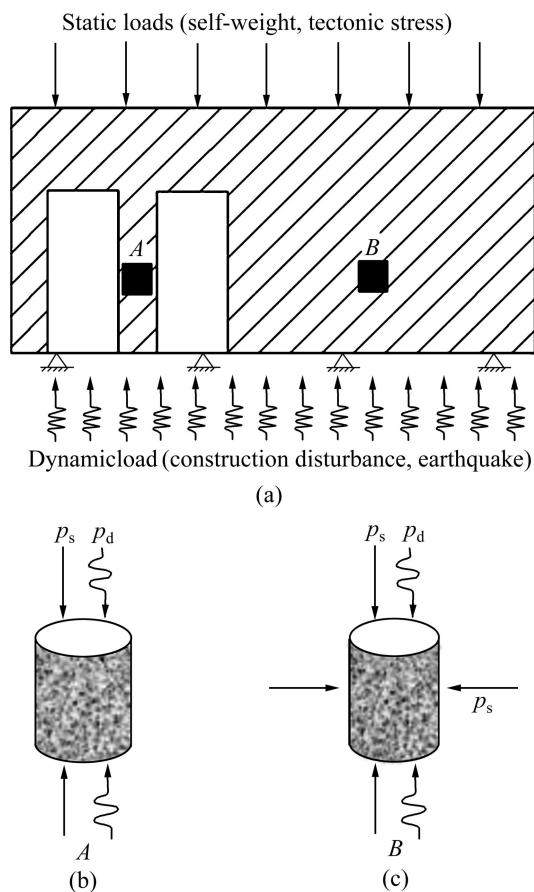


图7 深部岩石受力模式示意图^[1]

Fig.7 Stress modes of rock in projects at deep level^[1] (p_s —Static loads; p_d —Dynamic load): (a) One-dimensional coupled static and dynamic load; (b) Three-dimensional coupled static and dynamic load

岩石动静组合加载问题作为一个崭新的研究课题,自香山175次科学会议首次被提出的^[40]。目前已经利用动静耦合凿岩机、基于INSTRON试验机和SHPB装置的动静组合加载设备,开展了一系列探索性的研究^[41-47]。通过研究发现,深部岩石开采过程中承受动静组合加载的科学认识对于更好的观测、理解和控制深部岩石的动力学问题有非常大的指导意义。

2 硬岩深部开采中的动力学问题及其分析

2.1 硬岩深部开采中的岩爆与开采系统扰动

深部矿体开采过程中,岩爆加剧并频发是广大岩石力学与工程专家和学者共同认可的一个重大工程灾害问题。关于岩爆与采深的关系,尽管在极浅的岩层中(深度小于100 m)也有岩爆的记录,但目前的统计资

料显示随着开采深度的增加,岩爆发生的次数及强度也会随着上升。图8所示为南非金矿岩爆次数与采深之间的统计关系图,图中显示岩爆发生次数与采深之间存在明显的线性关系^[48]。

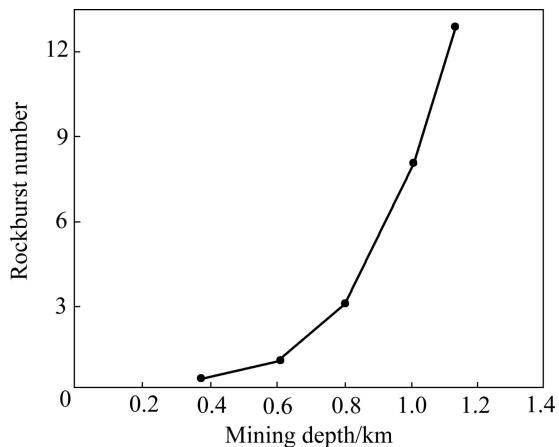


图8 岩爆与采深的对应关系^[48]

Fig.8 Relation between rockburst number and mining depth^[48]

关于岩爆发生的机理,陶振宇教授认为,岩石内部积聚了很大的弹性应变能,一旦遇到机械冲击作用或爆破动力扰动就会突然的释放出来,形成岩爆^[49]。王贤能等^[49]认为岩体内弹性应变能的积聚是产生岩爆的内因,但岩爆的发生往往具有外界因素的扰动;同时,许多大型地下隧道工程的岩爆实录表明,岩爆与爆破具有密切关系^[50-51],徐则民等^[52]认为,单纯利用静载荷理论分析岩爆有一定的局限性;有关统计资料也显示,矿山岩爆的2/3发生在生产爆破之后^[53]。

根据冬瓜山铜矿的岩爆实录资料^[32],发现从时间和地点上来看,有的岩爆发生在刚放炮后的撑子面附近,发生时间多在放炮后不超过一个班的时间内,地点距离掌子面约2~3 m。这可能是由于岩体开挖,岩体中应力发生突然变化,进行重新分布,并很快积聚能量,这些能量达到一定限度时得以突然释放,形成岩爆。有的岩爆发生于原有未支护和已支护的巷道围岩,而此时在其他地方通常有开采活动和巷道爆破作业,这可能是因开采活动导致应力增加或爆破形成的应力波促使或引导附近巷道围岩能量增加而导致岩石破裂与能量突然释放,为岩爆创造了条件。

值得注意的是,金属矿开采中,为了保证开采产量,通常有很多的矿房在回采作业,一些矿房在采准作业,地下矿房层层叠叠,各类出矿、采掘、爆破作业连续不断。这一过程也是地下空间的应力不断调整扰动的过程,这一调整可能会使得有些矿房和矿柱岩

体的大量贮能在小扰动下猛烈释放。

综上所述可知, 深部岩石的岩爆现象可以利用动静组合加载理论进行解释: 即深部硬岩由于弹性范围大, 处于一定的高地应力作用下, 岩体中储存大量弹性变形能。当开采扰动迫使某一临空面的岩体应力超过其对应条件下的强度时, 岩体破裂消耗的能量远小于储存的能量与外界施加的能量之和, 因而释放出大量储存的能量, 导致岩石以动能形式飞出, 形成岩爆。根据这种思想, LI 等基于 SHPB 装置的一维动静组合加载设备, 进行了相关的验证试验。图 9 所示为自行研制的基于 SHPB 装置的一维动静组合加载试验系统示意图^[42-43]。宫凤强等^[46]选取单轴抗压强度为 115 MPa 的硬质砂岩, 在轴向预先施加 60 MPa、80 MPa(轴压比分别为 0.52 和 0.70)的轴压, 再进行冲击, 实验结果如图 10 所示。

实验过程中, 轴压施加到 60 MPa(52% σ_c)时, 计算所得岩石单位体积吸收能为负值, 出现了“负能量”, 意味着破坏岩石本身不吸收扰动能量而是释放出弹性能, 发生“岩爆”, 而且释放的弹性能要远远超过动态扰动带给试样的动能。发生“岩爆”时, 剥落的岩块弹射出去, 但整体不失稳, 这一点与很多深部矿山或隧道现场观测到的岩爆现象类似。

当轴压加大时 80 MPa(70% σ_c), 如果入射能较低, 岩石破坏仍然释放出能量, 发生“岩爆”。入射能较大时, 岩石整体发生失稳, 入射能转化为岩石破坏能和破碎后碎块飞出去的动能。此时, 整个岩石系统又转化为吸能状态。

2.2 深部开采中爆破引发的矿震及巷道失稳现象

深部开采中, 由于爆破采动引发的矿震现象也是一个很明显的动力学问题。很多矿山为了监测岩爆和大的矿山地震现象, 分别布置了微震监测系统, 获得了很多宝贵的现场资料。根据冬瓜山铜矿某区域相同时段内的爆破次数和每天地震事件的统计资料^[32], 地震事件的峰值所在的时间段与爆破是对应的, 说明爆破与矿山地震之间存在着直接联系, 并且爆破是矿山地震的主要诱导因素之一。

从采场爆破即较大的爆破与地震事件之间关系还得到^[32], 采场爆破引起的较大的地震事件都在一天之内产生, 而之后的震级较小的地震事件数虽然减少, 但仍保持较高水平, 即产生持续较长时间的余震。这可以理解为, 由于采场爆破突然产生较大的自由空间, 首先使岩体内的部分弹性变形能得到很快释放并产生较大的地震事件, 之后, 由于应力重新分布、弹性能

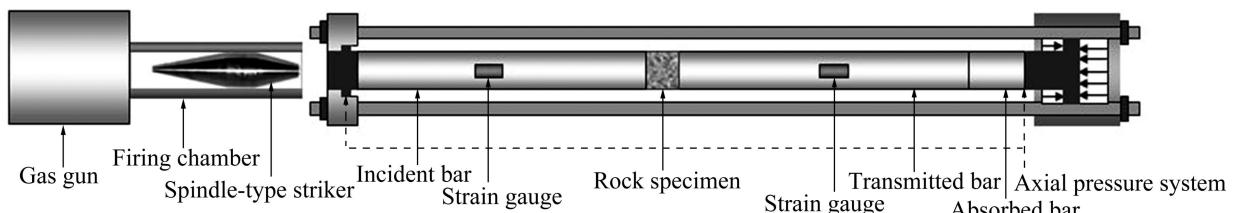


图 9 基于 SHPB 装置的一维动静组合加载试验系统示意图^[44]

Fig.9 Device with combined static load and disturbance based on SHPB system^[44]

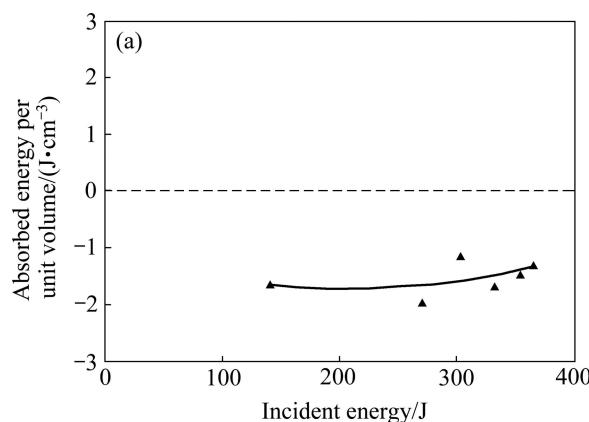


图 10 一维动静组合加载下砂岩的试验结果^[46]

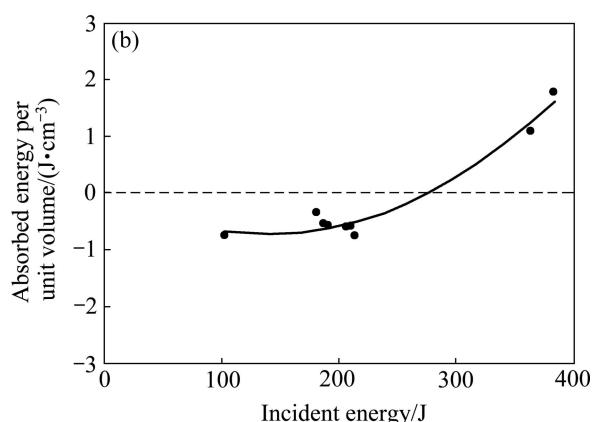


Fig.10 Relation between incident energy and absorbed energy per unit volume^[46]: (a) Axial static pre-stress of 60 MPa; (b) Axial static pre-stress of 80 MPa

的重新积聚和岩体结构重新调整，在新的应力和变形状态下，岩体又开始新的变形过程，从而又开始产生地震活动。

关于爆破引发的深部采空区顶板大面积冒落和矿柱失稳现象，多集中在深部煤矿中^[54-56]。但是这种动力学现象也存在于深部硬岩金属矿中。辽宁红透山铜矿的地压监测系统显示，深部矿岩处于高应力下环境中，以应力为控制的地压显现日见明显。地压资料显示，-527 m 以上各中段地压显现形式主要是采场顶板冒落；-647 m 以下各中段主要是巷道剥落、矿柱爆裂并有响声和岩屑射出等岩爆现象^[57]。工程实践也表明^[41, 58-59]，在高地应力下的矿产开采过程中，不同阶段的爆破作业对上一阶段或下一阶段采场中矿柱的承载强度及巷道顶板围岩的稳定性会有较大影响，自然地震或崩矿过程中产生的人工地震也会使巷道和矿柱突然失稳。李夕兵等^[60]对深部矿柱在承受高静载应力时的动力扰动力学模型进行应力波传播力学响应分析，分析结果表明：承受高应力的岩体，随着所受初始静载应力的增大，外界的动力扰动对其影响就越明显；承受高静载应力的矿柱，较小的动力扰动可能会使其发生塑性破坏而导致深部开采时的“多米诺骨牌”效应^[60]。左宇军等^[61]结合某巷道工程实例，利用新开发的动态版岩石破裂过程分析系统 RFPA2D 分析了动力扰动对深部岩巷破坏过程的影响，从细观角度分析了不同深度或受不同静压力的岩石巷道在动力扰动下的破坏规律。研究结果表明，当巷道埋深较大时，越来越接近临界稳定状态，较小的扰动便可以导致裂纹的大规模瞬时动力扩展，诱发巷道的失稳破坏，并伴随着应变能的高速释放。深部巷道所受静压较大，在动力扰动下比浅部巷道更易发生失稳破坏。

2.3 高应力硬岩开挖中的能量释放与有序调控

岩石作为地质运动的产物，内部存在大量的晶界、位错、孔洞和微裂隙等裂纹源。当高应力作用于岩石上，将会产生两种效应，一是提高了扰动能量利用率；二是材料刚度的劣化^[62-64]。因此，岩体开挖时会引起原岩应力状态变化、转移和重新分布过程，实质上即原岩体中已聚集能量的变化、转移和重新分布过程。这种原岩体贮存能量的变化，将导致岩体能量经历释放、吸收和重新贮存转移等过程^[65]。地下工程的开挖，使围岩的最小主应力降低，围岩允许储存的能量也随之降低。因此，能量集聚是有条件的，集聚的能量不能超过新应力状态下的极限储存能。地下工程围岩各点的应力状态各不相同，围岩各点的允许储存能也互

不相同。愈是接近地下工程边缘，围岩的最小主应力降低得愈多，允许储存的能量(即极限储存能)也愈少。如果集聚的能量大于该点的极限储存能，多余的能量将释放。因此，原先高于围岩极限储存能部分，一部分释放，另一部分向深部转移。在远离地下工程边缘时，围岩储存能又恢复到原岩储存能。释放的能量和转移的能量将造成围岩塑性变形或破裂。如果这些能量超过围岩塑性变形或破裂时消耗的能量，还可能将破碎岩石推移或抛出。

近年来，深部硬岩开采中出现了一些现有理论无法很好解释、严重影响工程施工和资源高效回收的灾害现象：1) 在深部巷道和采场等工程开挖后，掌子面附近围岩中出现了大范围岩体分区破裂化，致使工作面推进中岩体出现大规模冒落^[66-68]；2) 岩爆事故随着开挖深度的增加呈指数关系增加，造成大量人员和设备损失^[69-71]。近年来的研究初步认为：这些灾害与深部高应力硬岩在开挖和卸荷扰动下岩体中的能量转移和释放密切相关。由于目前对其中内部机理缺乏透彻认识，无法对这些能量进行利用和控制，致使它们以灾害的形式表现出来。事实上，已有实验研究表明：在受压状态下的脆性岩石，加入特定幅值和持续时间的应力脉冲，能够有效地促进裂纹的扩展。适当的冲击和压入组合载荷条件能够明显提高岩石的破裂效果^[72-73]。特别地，在深部开采实践中发现：与浅部具有相同施工参数(巷道断面、炮孔布置、装药参数)的巷道掘进中，深部巷道表现出更好的进尺和岩石破碎效果^[74]。这使我们坚信：深部高应力硬岩存在着更利于岩石破碎的倾向，只要找到适当的诱导破裂方法和途径，其内部储能就会变成有效破岩的有用动力源，在不用炸药或少用炸药的情况下实现深部矿床的高效连续开采。

众所周知，在矿床连续开采过程中，随着回采矿段的不断推进，采场顶板中积聚的能量越来越大，应力集中现象也越来越明显，处于临界平衡或临界滑动状态的顶板，在外界的微扰作用下会诱发系统失稳。因此，为了防止这些系统失稳给矿山安全生产带来的不利影响，通过人为干预、干扰、控制等活动，来诱导顶板产生一个不可逆的力学失稳发生、发展的过程，从而达到处理采空区的目的。将这种人为超前扰动诱发顶板失稳的空区处理技术称为诱导崩落技术。基于连续采矿的顶板诱导崩落技术既可避免造成重大灾害，又可保证连续采矿工艺的顺利进行，同时，为矿山地压灾害的防治提供了一条新的途径。连续采矿顶板诱导崩落技术示意图如图 11 所示^[75]。

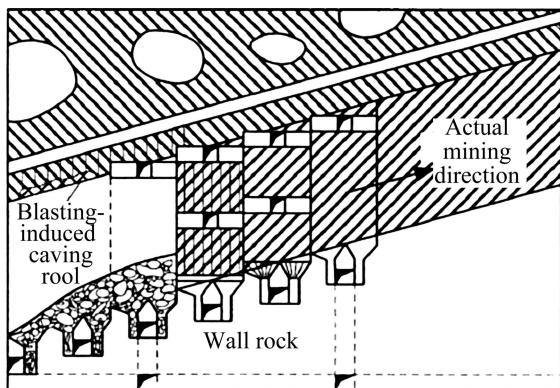


图 11 连续采矿顶板诱导崩落技术示意图^[75]

Fig.11 Diagram of roof induced caving technology in continuous mining^[75]

在国外,如澳大利亚诺斯帕克斯矿 Endeavour26号矿体的围岩系中等节理到节理发育的岩体,其特征是夹有石膏页脉,岩体强度随深度而减弱^[76]。该矿体上段 480 m 目前正采用矿块崩落法开采,拉底范围长为 196 m、宽 180 m。拉底工作完成后,从未达到过连续崩落。因此,需要采取诱导崩落的措施,来保持安全的崩落,以维持矿山生产。为此该矿利用原先钻在所采矿块中部的勘探孔进行水力碎裂以诱发崩落,试验取得了成功,产出的矿石超过了 700 万 t,而且费用大大低于常用的各种崩落方法。

除上述诱导崩落技术外,还可以根据高应力硬岩开挖过程中出现的好凿好爆、开挖卸荷后的围岩碎裂化及小扰动后岩石易于自裂的特点,从高应力硬岩的受力特征入手,在深入揭示高应力硬岩在动态扰动作用下的岩体结构与本构特征的基础上,利用机械或相关扰动技术实现高应力硬岩原始储能的激发释放和可控利用,探索高应力硬岩矿床合理的破岩方式、采矿技术与系统模式,继而形成高应力硬岩矿床的非爆连续开采理论与技术体系。

3 结论

深部开采将会是金属矿山实现可持续发展的未来趋势。本文作者分析了深部开采中矿岩的赋存条件、岩性特征和开采工艺。在此基础上明确提出金属矿硬岩深部开采的力学特征属于动静组合作用模式。并根据动静组合作用的力学模式,通过室内动静组合加载试验验证了深部硬岩的岩爆发生机制,并对深部开采中爆破引发的矿震及巷道失稳现象、高应力硬岩开挖

能量释放与有序调控进行了详细分析。理论分析、实验验证以及工程实践证明,硬岩金属矿山深部开采中存在的很多动力学问题可以利用岩石动静组合加载理论进行科学论证和分析,这对深部采矿的工程实践有较好的指导意义。

致谢:

感谢中南大学董陇军、周健等研究生在资料收集方面提供的帮助!

REFERENCES

- [1] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [2] GU De-sheng, LI Xi-bing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2006.
- [3] TauTona Anglo Gold. South Africa[EB/OL]. http://www.mining-technology.com/projects/tautona_goldmine/.
- [4] Underground mining (hard rock) [EB/OL]. [http://www.worldingo.com/ma/enwiki/en/Underground_mining_\(hard_rock\).](http://www.worldingo.com/ma/enwiki/en/Underground_mining_(hard_rock).)
- [5] World's new deepest mine 'safe, cheap' - AngloGold[EB/OL]. <http://www.miningweekly.com/print-version/worlds-new-deepest-mine-safe-cheap-anglogold.> 2009-02-09.
- [6] Another Gold Rush to Start in India? <http://mining.about.com/od/MiningCommodities/a/Another-Gold-Rush-To-Start-In-India.htm>.
- [7] 张合君, 王洪勇, 赵伟. 红透山矿地压监测的实践[J]. 化工矿物与加工, 2008(6): 22-24.
- [8] ZHANG He-jun, WANG Hong-yong, ZHAO Wei. Application of test technique for ground pressure in Hongtoushan Copper Mine[J]. Chemical Mineral and Processing, 2008(6): 22-24.
- [9] 杨志国, 赵少儒, 汪令辉. 基于微震监测技术的深部采场采动规律研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(2): 107-110.
- [10] YANG Zhi-guo, ZHAO Shao-ru, WANG Ling-hui. Study on rule of mining based on microseismic monitoring in deep stope[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(2): 107-110.
- [11] 走进“铜都”访安徽铜陵有色金属集团控股公司冬瓜山铜矿[EB/OL]. <http://www.m-equip.com/zjyxxia/html/?527.html>, 2010. Entering to the “Copper Capital” to visit Tongling Nonferrous Metals Group Holdings Dongguashan Copper [EB/OL]. <http://www.m-equip.com/zjyxxia/html/?527.html>, 2010.
- [12] 宫志新, 许卫军, 李强, 任国义, 田凤楼, 姚香, 郭树林. 深井岩爆与采矿方法关系之研究初探[J]. 黄金, 2010, 31(2): 23-27.

- GONG Zhi-xin, XU Wei-jun, LI Qiang, REN Guo-yi, TIAN Feng-lou, YAO Xiang, GUO Shu-lin. Preliminary study on the relationship between mining method and deep shaft rock burst[J]. Gold, 2010, 31(2): 23–27.
- [11] 王军强. 峨眉金矿岩爆与发生机理初探[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(4): 121–124.
- WANG Jun-qiang. Preliminary Analysis of rockburst and its occurrence mechanism in Yinxin gold mine[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005(4): 121–124.
- [12] 王军强. 金矿岩爆危险程度评估与防治措施[J]. 黄金, 2007, 28(6): 24–28.
- WANG Jun-qiang. Rock bursts criticality evaluation and prevention countermeasures in gold deposits[J]. Gold, 2007, 28(6): 24–28.
- [13] LAI X P, CAI M F, XIE M W. In situ monitoring and analysis of rock mass behavior prior to collapse of the main transport roadway in Linglong Gold Mine, China[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 640–646.
- [14] 许梦国, 杜子建, 姚高辉, 刘振平. 程潮铁矿深部开采岩爆预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2921–2928.
- XU Meng-guo, DU Zi-jian, YAO Gao-hui, LIU Zhen-ping. Rockburst prediction of Chengchao iron mine during deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2921–2928.
- [15] 韩志型, 王维德. 深部硬岩矿山未来采矿工艺的发展[J]. 世界采矿快报, 1995(33): 8–13.
- HAN Zhi-xing, WANG Wei-de. The development of future mining technology in deep hard rock mines[J]. World Mining Letters, 1995(33): 8–13.
- [16] MORRISON D M. Deep hardrock mining: the future[J]. CIM Bulletin, 1996, 89: 46–51.
- [17] 孙宏华. 对我国金属矿床深部开采技术的探讨及展望[J]. 有色金属: 矿山部分, 1996(6): 5–8.
- SUN Hong-hua. Discussion and prospect of deep mining technology in China metal mines[J]. Non-ferrous Metals: Mining Part, 1996(6): 5–8.
- [18] 李夕兵, 古德生, 刘德顺. 促进我国有色金属采矿业持续发展的几点思考[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 63–66.
- LI Xi-bing, GU De-sheng, LIU De-shun. Thinking on sustainable development in China's nonferrous metal mining engineering[J]. World's Scientific-technological Research and Development, 1997, 19(5): 63–66.
- [19] 解世俊, 孙凯年, 郑永学, 李元辉. 金属矿床深部开采的几个技术问题[J]. 金属矿山, 1998(6): 3–6.
- XIE Shi-jun, SUN Kai-nian, ZHENG Yong-xue, LI Yuan-hui. Several technical problems in deep mining of metal deposits[J]. Metal Mine, 1998(6): 3–6.
- [20] 张强, 李夕兵. 中国金属采矿业发展现状[J]. 西部探矿工程, 1999, 11(4): 74–76.
- ZHANG Qiang, LI Xi-bing. The present situation on the development of China's mining industry[J]. West-China Exploration Engineering, 1999, 11(4): 74–76.
- [21] 邓建, 古德生, 李夕兵, 彭怀生. 基于可持续发展观的地下矿山阶段开采新模式[J]. 金属矿山, 2000(3): 17–19.
- DENG Jian, GU De-sheng, LI Xi-bing, PENG Huai-sheng. Sustainable development concept-based new stage mining mode for underground mines[J]. Metal Mine, 2000(3): 17–19.
- [22] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(2): 1–5.
- GU De-sheng, LI Xi-bing. Science problems and research state of deep mining in metal and nonferrous mines[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(2): 1–5.
- [23] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004, 25(1): 18–22.
- GU De-sheng. The development tendency of mining science and technology of underground metal mine[J]. Gold, 2004, 25(1): 18–22.
- [24] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 姜耀东. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803–2813.
- HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, JIANG Yao-dong. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [25] 杨志国, 于润仓, 郭然. 深部高应力区采矿研究综述[J]. 金属矿山, 2007(3): 6–9.
- YANG Zhi-guo, YU Run-cang, GUO Ran. Review on research of mining in high-stress deep zone[J]. Metal Mine, 2007(3): 6–9.
- [26] 冯兴隆, 贾明涛, 王李管, 宋明军, 尚小明. 地下金属矿山开采技术发展趋势[J]. 中国钼业, 2008, 32(2): 9–13.
- FENG Xing-long, JIA Ming-tao, WANG Li-guan, SONG Ming-jun, SHANG Xiao-ming. The development tendency of mining science and technology of underground metal mine[J]. China Molybdenum Industry, 2008, 32(2): 9–13.
- [27] 董陆军, 李夕兵, 李萍萍. 深井开采灾害应对决策技术综述[J]. 有色金属, 2009, 61(1): 116–120.
- DONG Long-jun, LI Xi-bing, LI Ping-ping. Crucial understanding and decision-making technology for deep mining[J]. Nonferrous Metal, 2009, 61(1): 116–120.
- [28] 周爱民. 国内金属矿山地下采矿技术进展[J]. 中国金属通报, 2010, 27: 17–19.
- ZHOU Ai-min. Domestic underground mining technological progress of metal mines[J]. China Metal Bulletin, 2010, 27: 17–19.
- [29] 张海军, 陈宗林, 陈怀利. 深部开采面临的技术问题及对策[J]. 铜业工程, 2010(1): 25–28.
- ZHANG Hai-jun, CHEN Zong-lin, CHEN Huai-li. Technological problems and counter measures in deep mining[J]. Copper Engineering, 2010(1): 25–28.
- [30] 曹殿民, 陈永生. 地下黄金矿山开采技术的发展与展望[J].

- 黄金学报, 1999, 1(3): 183–188.
- CAO Dian-min, CHEN Yong-sheng. Development and prospect of mining technology in underground gold mines[J]. Gold Journal, 1999, 1(3): 183–188.
- [31] BROWN E T, BRADY B H G. Trends in relationships between measured rock in situ stress and depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1978, 15: 211–215.
- [32] 唐礼忠. 深井矿山地震活动与岩爆监测及预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- TANG Li-zhong. Study on monitoring and prediction of seismicity and rockburst in a deep mine[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [33] 李冬青, 王李管. 深井硬岩大规模开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- LI Dong-qing, WANG Li-guan. Large-scale mining theory and technology of deep hard-rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [34] 腾吉文, 姚敬金, 江昌洲, 闫雅芬, 杨辉, 张永谦, 阮小敏. 地壳深部岩浆岩基体与大型—超大型金属矿床的形成及找矿效应[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1009–1038.
- TENG Ji-wen, YAO Jing-jin, JIANG Chang-zhou, YAN Ya-fen, YANG Hui, ZHANG Yong-qian, RUAN Xiao-min. Magmatic rock mass and information for large and superlarge mineral deposits and its ore-prospecting effect in deep crust[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(5): 1009–1038.
- [35] 严加永, 腾吉文, 吕庆田. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 871–891.
- YAN Jia-yong, TENG Ji-wen, LU Qing-tian. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources[J]. Progress In Geophysics, 2008, 23(3): 871–891.
- [36] 刘晨锋. 循环荷载与静载组合加载下岩石的力学特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- LIU Sheng-feng. Study on the rock mechanics characteristic by cyclic load and statics load fit together[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [37] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展—深部岩体力学的若干问题[C]//中国岩石力学与工程学会. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10–17.
- QIAN Qi-hu. The current development of nonlinear rock mechanics: themechanics problems of deep rock mass[C]//Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: Science Press, 2004: 10–17.
- [38] 王合祥. 地下硬岩无爆破采矿技术的研究进展[J]. 新疆有色金属, 1996(4): 13–16.
- WANG He-xiang. Research progress of no-blasting mining technology of underground hard rock [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 1996(4): 13–16.
- [39] 陈永生. 无爆破采矿方法在薄矿脉中的应用与发展[J]. 有色矿山, 1996(1): 14–17.
- CHEN Yong-sheng. Application and development of no-blasting mining methods in thin veins[J]. Nonferrous Mines, 1996(1): 14–17.
- [40] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变[C]//香山第175次科学会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 101–108.
- LI Xi-bing, GU De-sheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[C]//The 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 101–108.
- [41] 左宇军. 动静组合加载下的岩石破坏特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- ZUO Yu-jun. Study on failure and fragmentation characteristics of rock under static-dynamic coupling loading[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [42] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, HONG L, YIN T B. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 739–748.
- [43] 李夕兵, 周子龙, 叶洲元, 马春德, 赵伏军, 左宇军, 洪亮. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387–1395.
- LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YE Zhou-yuan, MA Chun-de, ZHAO Fu-jun, ZUO Yu-jun, HONG Liang. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1387–1395.
- [44] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 高科, 尹士兵. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251–260.
- LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHAO J, GAO Ke, YIN Tu-bing. Impact failure characteristics study of rock subjected to 1D coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 251–260.
- [45] 叶洲元. 动力扰动下高应力岩石力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- YE Zhou-yuan. Study on mechanical characteristics of statically loaded rock under dynamic loads[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [46] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵, ZHAO J. 一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2076–2085.
- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling, ZHAO J. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2076–2085.
- [47] 宫凤强. 动静组合加载下岩石力学特性和动态强度准则的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- GONG Feng-qiang. Experimental study of rock mechanical

- properties under coupled static-dynamic loads and dynamic strength criterion[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [48] BRAUNER G. Rockbursts in Coal Mines and Their Prevention[M]. Rotterdam: A.A.Balkema, 1994, 7-15.
- [49] 王贤能, 黄润秋. 动力扰动对岩爆的影响分析[J]. 山地研究, 1998, 16(3): 188-192.
WANG Xian-neng, HUANG Run-qiu. Analysis of the influence of the dynamic disturbance on rock burst[J]. Mountain Research, 1998, 16(3): 188-192.
- [50] 徐则民, 黄润秋. 岩爆与爆破的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 414-419.
XU Ze-min, HUANG Run-qiu. Relationship between rock burst and blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 414-419.
- [51] 谢勇谋, 李天斌. 爆破对岩爆产生作用的初步探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 61-64.
XIE Yong-mou, LI Tian-bin. Primary discussion on blast's affection on rockburst[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 61-64.
- [52] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 李睿, 孙静怡. 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机理的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1255-1262.
XU Ze-min, HUANG Run-qiu, LUO Xing-chun, LI Rui, SUN Jing-yi. Limitations of static load theory in rockburst research and preliminary analysis on dynamic mechanism of rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2003, 22(8): 1255-1262.
- [53] 郭然, 潘长良, 于润沧. 有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
GUO Ran, PAN Chang-liang, YU Run-cang. Mining theory and technology in hard rock deposit with rock burst tendency[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [54] 姜耀东, 赵毅鑫, 宋彦琦, 刘文岗, 朱道建. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3131-3136.
JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, SONG Yan-qi, LIU Wen-gang, ZHU Dao-jian. Analysis of blasting tremor impact on roadway stability in coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2005, 24 (17): 3131-3136.
- [55] 张晓春, 卢爱红, 王军强. 动力扰动导致巷道围岩层裂结构及冲击矿压的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3110-3114.
ZHANG Xiao-chun, LU Ai-hong, WANG Jun-qiang. Numerical simulation of layer-crack structure of surround rock and rockburst in roadway under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2006, 25(S1): 3110-3114.
- [56] 卢爱红, 茅献彪, 赵玉成. 动力扰动诱发巷道围岩冲击失稳的能量密度判据[J]. 应用力学学报, 2008, 25(4): 602-606.
LU Ai-hong, MAO Xian-biao, ZHAO Yu-cheng. Criterion of impactive instability of laneway under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(4): 602-606.
- [57] 刘景山, 王洪勇, 郑飞. 红透山铜矿深部地压监测方法研究[J]. 有色矿冶, 2010, 26(5): 10-12.
LIU Jing-shan, WANG Hong-yong, ZHENG Fei. Research of the ground pressure's test technique in hongtoushan copper mine[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2010, 26(5): 10-12.
- [58] 徐曾和, 徐小荷. 柱式开采岩爆发生条件与时间效应的尖点突变[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 17-23.
XU Zeng-he, XU Xiao-he. Cusp catastrophe of occurrence condition and hysteresis of rockbursts in pillar workings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1997, 7(2): 17-23.
- [59] 王学滨. 届服矿柱渐进破坏及应力分布数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 50-56.
WANG Xue-bin. Numerical simulation of progressive failure and stress distribution of yield pillars[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 50-56.
- [60] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 叶洲元. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922-928.
LI Xi-bing, LI Di-yuan, GUO Lei, YE Zhou-yuan. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2007, 26(5): 922-928.
- [61] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 谭志宏. 深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 742-746.
ZUO Yu-jun, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, TAN Zhi-hong. Mechanical analysis on failure of deep rock laneway under dynamic disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 742-746.
- [62] 周子龙, 李夕兵, 刘希灵. 深部岩石破碎方法[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(13): 63-65.
ZHOU Zi-long, LI Xi-bing, LIU Xi-ling. Rock fragmentation method in deep level[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005(13): 63-65.
- [63] 胡建华, 周科平, 李夕兵, 杨念哥, 苏家红. 顶板诱导崩落及应用的数值分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(3): 68-70.
HU Jian-hua, ZHOU Ke-ping, LI Xi-bing, YANG Nian-ge, SU Jia-hong. Numerical analysis of roof induction caving and application[J]. Mining Pressure and Roof Management, 2005, 22(3): 68-70.
- [64] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的FLAC3D分析[J]. 岩石力学和工程学报, 2005, 24(16): 2894-2900.
YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2894-2900.

- [65] 华安增. 地下工程周围岩体能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1054–1059.
- HUA An-zeng. Energy analysis of surrounding rocks in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1054–1059.
- [66] 中国科协学会学术部. 深部岩石工程围岩分区破裂化效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- Academic Society of China Association for Science Department. Zonal disintegration effect of wall rock in deep rock engineerings[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2008.
- [67] MALAN D F, BASSON F R. Ultra-deep mining: the increased potential for squeezing conditions[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1998, 98(11/12): 353–363.
- [68] GURTUNCA R G. Mining below 3 000 m and challenges for the South African gold mining industry[C]//Proc Mech of Jointed and Fractured Rock. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998: 3–10.
- [69] DIERING D H. The deepmine programme in south Africa[EB/OL]. <http://deepmine.csir.co.za>, 1999.
- [70] KAISER P K, MCCREATH D R, TANNANT D D. Canadian rockburst support handbook[M]. Sudbury, Ontario, Canada: Geomechanics Research Centre, 1996.
- [71] DURRHEIM R J. Rock engineering at ultra-depth: First results of the deepmine programme[C]//Proc SARE99' 2nd SA Rock Eng Symp, Johannesburg, 1999.
- [72] ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, MA Chun-de. Damage and failure rule of rock undergoing uniaxial compressive load and dynamic load[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(6): 742–748.
- [73] ZHAO Fu-jun, LI Xi-bing, FENG Tao. Experimental study of a new multifunctional device for rock fragmentation[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2004, 10(1): 29–32.
- [74] 中南大学资源与安全工程学院, 铜都铜业股份有限公司. 深部及难采矿床强化开采综合技术[R]. 2007.
- Central South University-School of Resources and Safety Engineering, Tongdu Copper Co., Ltd.. Enhanced exploitation technology of deep and difficult mining ore[R]. 2007.
- [75] 古德生, 周科平, 李夕兵, 罗周全, 徐国元. 顶底柱超前回采深孔落矿连续采矿法. 中国发明专利, ZL03124493.9[P]. 2006-06-21.
- GU De-sheng, ZHOU Ke-ping, LI Xi-bing, LUO Zhou-quan, XU Guo-yuan. Cap & drift pillar advance actual mining deep hole falling ore continuous mining method. China Patent, ZL03124493.9[P]. 2006-06-21.
- [76] VINK D M. From green field site to block cave mine - results of Northparke's drill and blast design process[J]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 1998(3): 149–161.

(编辑 龙怀中)

李夕兵教授简介

李夕兵, 1962年出生, 湖南宁乡人。中南大学教授、博士生导师, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授, 湖南省首批科技领军人才, 兼任中国岩石力学与工程学会常务理事、岩石破碎工程专业委员会主任, 中国工程爆破协会常务理事, 教育部高等学校地矿学科教指委矿物资源分委会副主任, 中国有色金属学会采矿学术委员会副主任, 湖南省岩石力学与工程学会理事长。多年来一直从事非煤矿山开采与破碎方面的教学与科研工作, 曾在美国密苏里大学和新加坡南洋理工大学从事访问合作研究。承担了国家“973”课题、国家自然科学基金重点项目、“863”课题等研究, 提出了高应力诱导致裂、动静组合加载等原创性学术思想。获得国家杰出青年科学基金(1996)、中国青年科技奖(1997)、中国图书奖(1995)和湖南省优秀专家(2005)等称号。主持完成30多项国家及省部级科研项目, 并以第1排名获得3项国家科技进步二等奖和中国高校自然科学一等奖、湖南省科技进步(自然科学)一等奖在内的20余项奖励。出版学术著作8部, 发表论文460多篇, 其中被SCI收录60多篇、EI收录230多篇。已培养毕业博士32名, 硕士40多名。