



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Efficient Exploitation of Deep Mineral Resources—Review

简评深部采矿的机遇与挑战

Pathegama G. Ranjith*, Jian Zhao, Minghe Ju, Radhika V. S. De Silva, Tharaka D. Rathnaweera, Adheesha K. M. S. Bandara

Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, VIC 3800, Australia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 July 2017

Revised 25 July 2017

Accepted 26 July 2017

Available online 23 August 2017

关键词

深部采矿

岩石力学

岩爆

原岩应力

采矿自动化

摘要

随着全球生活水平的提高,更多消费者进入了矿物资源市场,使得矿物资源的消耗正在迅速增长。其结果是,在21世纪为了有效应对矿物资源供应危机,地下采矿持续地向更深的水平推进。然而,深部采矿在一个需要有非常规技术以及有挑战性的环境下进行,为了克服这些挑战和实现可观的经济收益需要重大的创新性解决方案、最佳实践以及实施额外的安全标准。这些挑战包括深部采矿工程常常遇到的灾难性事件:岩爆、瓦斯突出、高的原岩和次生应力、大变形、挤压和流变岩体以及高温。本文回顾了全球深部采矿现状,指出了一些与深部采矿的岩石力学和工程地质相关的技术进展及机遇。在这些技术进展中,基于全自动化的采矿和矿物提取过程的无人工作面和无人矿山已成为21世纪的重要领域。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

地球资源的开采已有一个很长的历史,浅部的煤和矿物资源正在逐渐枯竭,煤和矿物资源的开采不断向地球更深处推进。目前,1000 m的深部采矿是通常现象,煤矿的开采深度已达到1500 m,地热的开发已超过5000 m,有色金属矿山的深度已达到4500 m左右,而油气开采的深度已达约7500 m。将来,深部采矿将变得普遍。早在20世纪80年代,波兰、德国、英国、日本和法国的煤炭开采深度已超过1000 m,中国现在有47座煤矿的开采深度超过1000 m[1,2]。对于金属矿山的情况,据不完全统计,在1996年以前至少有80座矿山超过1000 m深,主要位于南非、加拿大、美国、印度、澳

大利亚、俄罗斯和波兰。南非金属矿山的平均深度达到2000 m,其中,西部深井(Western Deep Level)金矿已达到4800 m[3]。

深部岩体以高原岩应力、高温和高水压力为特征。与浅部资源开采相比较,深部采矿可能涉及的危害有岩爆、大规模崩塌以及煤、瓦斯和水混合体的大规模突出等。这些事件在本质上常常是复杂的,难以预报和控制。深部矿山岩体的特性及边界条件是深部采矿灾害的初始原因[2]。例如,当采矿深度达到约1000 m时,覆盖岩层引起的原岩应力、构造特征以及采矿作业造成的应力集中,可导致围岩的破裂和损坏[4]。在高应力作用下,由于累积的形变能更加明显,事故可能更经常发生。

在高应力、高温和高水压力条件下,采矿作业产生

* Corresponding author.

E-mail address: ranjith.pg@monash.edu

的扰动能导致岩体的突然和无预兆的损坏,表现为大范围的失稳和垮塌[5]。此外,在深度很深时,岩体的变形和破裂特点常常显示出强烈的与时间相关的特征[6]。深部采矿工程所产生的扰动应力和岩体变形与时间相关的特性可能导致非常难以预报的灾害的发生。

深部采矿出现的岩石力学和采矿工程方面的各种新问题已在进行研究。目前大部分研究工作集中于深部围岩的区域破裂[7-10]、大挤压破坏[11]、岩体脆性向塑性的转变[12]、深部采矿动态破坏的能量特征[13]、应力场的可视化[14,15]以及深部采矿引起的岩体变形和位移[1,16]。虽然这些研究工作取得的成果已经揭示了深部采矿的某些力学特征,但一些与深部采矿相关的理论、工艺和方法还一直处于初级阶段。Xie[2]认为这是由于目前岩石力学理论的局限性,这些理论是基于材料力学,而与深部开采问题和工程地质活动的关系不大。因此,对于深部开采,考虑原岩特性以及采矿引起的岩体力学特性的新理论和技术是必须的。

2. 深部矿山的岩体支护

在采矿和其他地下工程中,原岩应力是影响地下岩体变形及破坏的主要因素。随着开采深度的增加,原岩应力对围岩破裂及稳定性的影响变得更为明显,因而选择岩体支护技术至关重要。

He等[4]研发了软岩巷道的非对称耦合支护技术,包括底鼓控制技术、大断面巷道交叉点的锚固双重控制技术、泵站洞室的强化设计技术。这些技术已成功应用于现场支护工作中[17]。根据现场测试结果,Niu等[18]建议,为了抵抗蠕变变形,在早期为稳定破碎的围岩应采用刚性-柔性耦合的动态加固工艺以提供最初的柔性支护,在中期运用预留变形的应对高应力的卸载,在后期对全断面采用高强度和高刚度的支护。He等[17]进一步研发了被称为深部采矿岩爆的试验系统。为了解决大变形围岩的普通支护材料的破坏问题,研发了一种大延伸量、常阻力的吸能式锚杆,如图1(a)和(b)所示[17]。通过自身的大变形,这种锚杆可以抵抗由于遭遇突然产生的形变能而引起的岩体的大挤压。锚杆的拔出力范围通常是120~200 kN,变形量为0.5~1 m。Li等[19]为有岩爆倾向的围岩和挤压围岩研发了一种吸能式岩体支护装置,即D锚杆[图1(c)]。对一个200 mm的D锚杆,其平均冲击荷载为200~300 kN,吸收的累积动能为47 kJ·m⁻¹。

3. 智能采矿

作为信息时代和知识经济的必然产物,数字化采矿起源于矿山或采矿的地质信息系统[20]。数字化采矿的目的是改进矿山信息的交流,支持自动化采矿和智能化采矿,确保采矿的安全、高效、绿色和可持续发展,实现科学采矿。数字化矿山建设是一个渐进过程,是一个复杂系统工程[20]。

自动化采矿技术的研发始于20世纪80年代中期。在加拿大,Noranda Inc.研发了各种自动化设备,包括装运机(LHD)、光导系统、LHD遥控系统等,以满足地下硬岩采矿自动化的需求[21]。在1994年,澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)实施了“采矿机器人研究项目”。CSIRO的研究人员研发了一种露天矿铲斗巡航(bucket cruise)系统、一个准确的卸载模型和一个地下金属矿山LHD自控系统。然后,挪威Dyno Industrier ASA、加拿大INCO有限公司、芬兰Tamrock公司实施了一个投资2270万美元的采矿自动化项目以提高劳动生产率和降低作业成本。再后来,瑞典为矿山自动化实施了“Grountechnik 2000”战略计划。目前,基于全自动化采矿/无人化采矿过程的无人化工作面和无人化矿山已成为重要的研究领域[20]。

据Wu等[20],为了构造一个多维、动态的煤矿虚拟现实系统,数字化煤矿的新任务是建立实时使用数字化矿山集成平台的煤矿。在深部开采的新形势下,数字化采矿有4个主要方向:①数字化矿山集成平台;②采矿模拟系统;③地下定位和导航技术;④采矿环境的智能感知。

4. 强化连续开采和巷道切割机采矿

Gu和Li[22]曾建议,深部金属矿山应采用强化采矿和高原岩应力导致裂岩的技术。然而,对于深部硬岩采矿存在4个关键问题:①深部采矿高应力场和地质结构的特征及其掌握方法;②高原岩应力作用下硬岩方块式破裂(full-block fracturing)的知识;③高温条件下控制岩爆的支护措施;④低品位矿床溶浸采矿的全部固-气-液介质的耦合与流动的知识。

由于目标岩体复杂的各向异性,将巷道切割机(TBM)用于采矿是困难的。在矿山,超过70%的TBM的损坏是由于与地质相关的问题[23]。近年来,硬岩矿山中TBM的使用以及巷道钻进的平均长度已有所增加,

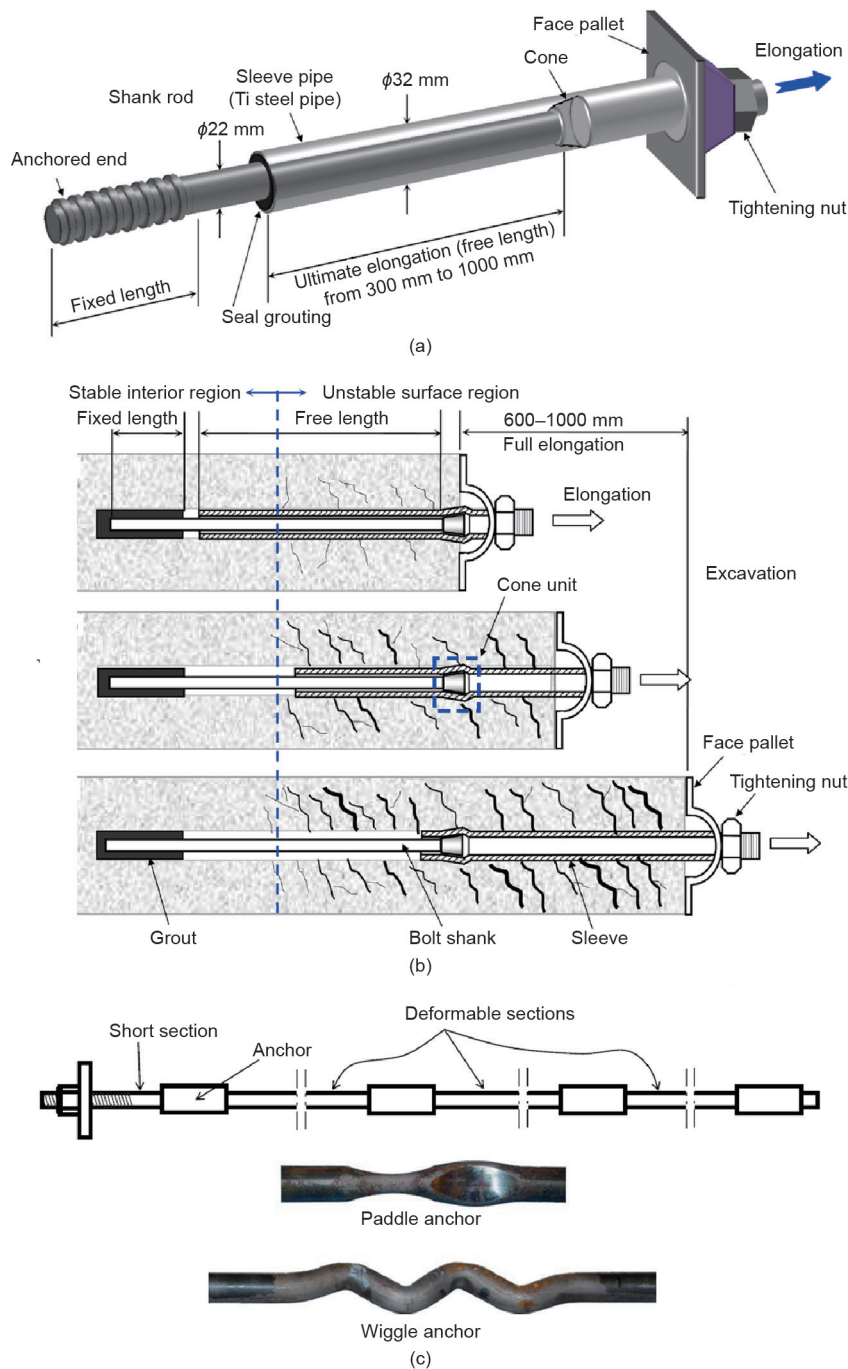


图1. (a)、(b) 大延伸量、常阻力的吸能式锚杆及其工作原理[17]; (c) 吸能式D锚杆[19]。

但几个局限性仍然限制了TBM在矿山的使用。在硬岩矿山, 当用TBM进行切割时, 由于高应力岩体的应力重新分布而引起的岩爆和片帮是一个主要缺点, 会影响作业安全和巷道支护的安装。在新近的锦屏 (Jinping) 水电站二期项目中, 通过监测微震活动和巷道变形以有效地预测和避免巷道掘进时的岩爆, 这个问题已得到缓解。高度破碎和块式的岩体是抑制TBM切割机在采矿中应用的另一个因素。众所周知, 松散的大块岩石会堵塞和损坏转换漏斗和切割机装岩斗。因此, 为了扩大

TBM在深部采矿中的应用, TBM需要进行改进, 比如冲击杆, 以避免切割机、装岩斗和皮带输送机的损坏。

除了硬岩矿山中遇到的这些问题, 涉及突水和瓦斯爆炸的其他并发问题影响了TBM切割机在煤矿的使用。为了进行煤层气预开采, 在中国的平顶山煤田实施了一项集合钻孔-切槽的新颖工艺, 这项技术强化了煤与瓦斯两者的回收, 并减小了瓦斯爆炸的可能性。存在于不利地质体 (如断层和喀斯特溶洞) 内的地下水会引发煤矿的垮塌。

5. 流态化采矿

Xie等[24,25]曾指出,传统方法存在一个理论上的开采深度极限。理论上估计,一旦地下固体矿物资源的埋深超过6000 m,目前已有的各种采矿方法将变得不可使用。因此,必须认识到更大深度矿物资源的开发和利用亟需理论和技术方面的颠覆性的创新。为此目的,Xie等[25]提出了一个地下深部固体矿物资源的流态化开采的理论和概念(图2)。基于与TBM相似的采矿模式,该思路是通过采、选、冶、充填、发电和固体资源气化,实现地下深部固体矿物资源的原地、实时和集成利用,即将固体资源转换成气体、液体或气、液、固物质的混合物。其结果是,将来的煤矿再也没有工人下到矿山井下、没有煤被采下、没有煤堆积成山、没有粉尘污染空气,取而代之的是以清洁、安全、智能、环境协调和生态友好的方式进行电力和能量输送。

对于采煤,流态化开采概念包括下述5个主要过程:①无人采矿;②自动化选矿;③固体矿物资源的流态化转换;④受控充填;⑤电力输送、智能电力控制和电力存储。对于金属采矿,流态化开采概念包括下述3个步骤:①无人采矿;②固体矿物资源的流态化转换;③受控充填[24]。

有4种技术可以实现深部地下固体矿物资源的流态化开采[24]:①固体矿物资源转换成气体,如煤的地下气化;②固体矿物资源转换成流体燃料,如煤的地下液化以及煤的高温生物和化学转换;③固体矿物资源转换成混合物,如易爆煤尘和水煤浆;④固体矿物资源原地转换成电能,如煤的地下原地发电。流态化开采确实是一种颠覆性的采矿技术创新,特别是对于将来的深部采矿而言。

6. 深部采矿的强化模拟设施

过去20年来,世界各地大量研发了实验室试验设备和数值模拟软件,能够在原岩应力条件下模拟真实岩体的特性。例如,在澳大利亚,CSIRO岩石力学实验室有设备通过使用最新定制的三轴装置、岩芯驱替实验设备和室内数模工具,能够模拟深部采矿的真实岩体特性。在英国,朴茨茅斯大学研发了中尺度的岩石变形机以确定岩体在地震环境中的破坏力学机理;帝国理工学院地球科学和工程系拥有具备储液条件(reservoir-condition)的岩芯驱替实验设备,其具有X射线成像能力、气液质

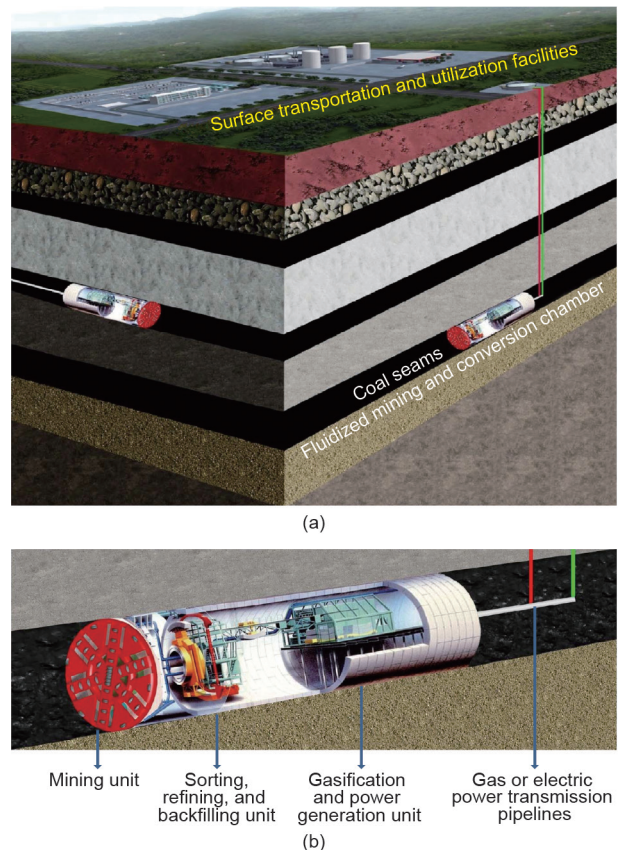


图2. 深部地下固体矿物资源的流态化开采的概念图[25]。(a) 采矿模型; (b) 流态化开采和转换仓。

谱、化学检测设备和先进的从岩体孔隙模拟到超大型模型模拟的室内建模工具;剑桥大学地球科学系拥有能利用光学、电子、红外、核磁共振和X射线衍射(XRD)分析等模拟岩体的微观结构和地球化学特征的设备。在美国,明尼苏达大学拥有各种闭路循环、液压伺服的加载机用于单轴、双轴(平面应变)和传统的三轴压缩试验,以及相关的数字化成像和声发射(AE)试验。在加拿大,多伦多大学的岩体破裂动力学实验室拥有各种先进设备,包括一个多轴的伺服控制岩体变形系统及具有AE和三维(3D)速度的真三轴系统。

世界各地优秀的岩土力学研究中心中,澳大利亚莫纳什大学的深地能量(Deep Earth Energy)实验室拥有各种先进的研究设备,可进行岩体特征化和碎裂化的强化研究(3GDeep; <http://www.3gdeep.com>)。中尺度设备包括定制的高压、高温强化三轴实验机。大型设备以强化的岩芯驱替实验和剪切装置为代表,有一台高压三轴试验机、一个高压的液压-机械式试验仓,以及一个三维压缩和监测的霍普金森杆,用于岩体破裂过程中的岩体性质试验。微观尺度设备包括用于3D反差成像的X

射线显微术、CT扫描、扫描电镜（SEM）以及XRD。

这些试验装置由有限元法（FEM）/有限差分法（FDM）/颗粒流模型（PFC）等基本的模拟工具予以补充。为了理解岩体所处环境下的微观检测结果（包括真实的破裂、浸出、液体流动特性、可视的孔隙区域以及液体通过孔隙结构流动时的弯曲）、矿体/超大型矿岩体的响应特性和与时间相关的对周围环境的冲击，3GDeep采用综合的4阶段试验和数值模拟规则（图3）以研究从微观到超大型尺度规模的整个采矿过程。4种规模尺度的范围为：①微观尺度：0.03 μm~20 mm；②中观尺度：20~100 mm；③宏观尺度：100~1000 mm；④超大型尺度：1000 m。研究这4种规模尺度间的关系将有助于获取基础的地质特征，而这是真实野外条件下综合超大型尺度模型所需要的。

在这些设备中进行可靠的岩体破裂试验，即模拟在高压、高温的典型野外条件下采用非传统的大试样进行更真实的岩体破裂试验，宏观三轴试验机[图4（a）]和真三轴试验机[图4（b）]是特别重要的。宏观三轴试验机能对直径500 mm的岩石试样进行力学试验，这差不多比传统的先进三轴设备的岩石试样大了两个数量级。这台装置也能模拟多相流体（液体和气体）流过岩石试样，使用的流体压力高达25 MPa。为了模拟深度超过2.5 km的地下环境（压力和温度），该试验机能够提供高达70 MPa的围压，试验盒能被密封至温度高达100℃。这台试验机安装有先进的控制及测量仪器，能对轴向荷载和位移、围压和径向变形、试验盒温度以及（气体和流体）注射压力和输出（气体和流体）的流量、P波和S波传输、声能产生等进行监控和测量。

宏观真三轴试验机是澳大利亚（也许是全世界）这类机器中最大的，能进行边长为750 mm的立方体岩样的试验，最大轴向应力为350 MPa，最高温度为400℃，最大流体注射压力为350 MPa。该设备有接口和传感器用于测量注射压力、应变、体积变化、温度、不同流体介质的孔隙压力、P波和S波以及AE。采用不同的中间主压应力、最小主应力和最大主应力来模拟现场实际等效条件而进行的如此大的岩样试验，能够起到把真实现场的岩爆和岩石破裂过程带入实验室的效果。

7. 结论

本文阐述了世界上深部采矿的目前状态，指出了一些最新技术进展和机遇，也谈到了深部采矿的一些技术

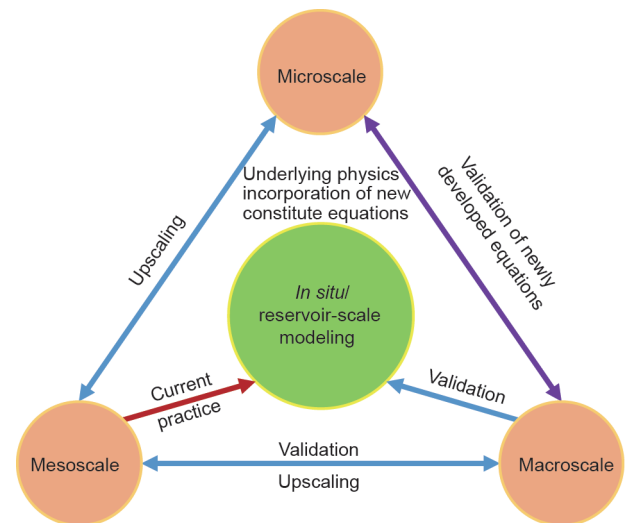


图3. 莫纳什大学3GDeep研发的独特模拟方式。

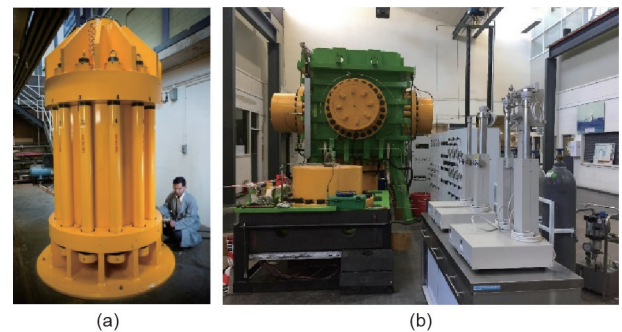


图4. 莫纳什大学3GDeep实验室的宏观三轴试验机（a）和真三轴试验机（b）。

上的和岩土力学方面的问题。

深部采矿目前存在的一些挑战、进展和未来的问题等可以总结如下：

（1）由于地层浅部的煤和其他矿物资源逐步衰竭，未来深部采矿将变得普遍。深部采矿的进展受到岩石力学和机械技术研究的制约和影响。因此，深部采矿必须有新理论和新技术，特别是要考虑到高的原岩应力和由采矿引起的次生应力以及在大深度下遇到的其他边界条件。

（2）对于深部采矿灾害，如围岩变形、岩爆以及煤、瓦斯和水的混合体突出，已经研发和采取了一些控制措施。然而，深部采矿关键工艺的研发，如对采矿引起的岩体变形的监测和控制技术、安全性、深部煤矿的绿色开采、深部金属矿的协同开采等，目前仍在进行中。

（3）随着现代技术的快速发展，制约深部采矿进展的许多关键问题将被克服，独立使用或者联合使用金属矿山的智能采矿、强化连续采矿，以及深部煤矿的流态化开采等，都代表了未来深部采矿的主流方案。深部采

矿正在向全自动化、智能化和机械化转变。

(4) 为了满足全球增长的需求,正在研发一些新的开采技术以确定和开发以前可望而不可及的资源。海底采矿的特殊对象是存在于海床的大量硫化矿床、铁锰结核以及金属结核,其资源回采需要新方案。

Compliance with ethics guidelines

Pathegama G. Ranjith, Jian Zhao, Minghe Ju, Radhika V. S. De Silva, Tharaka D. Rathnaweera, and Adheesha K. M. S. Bandara declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Xie H, Gao F, Ju Y, Gao M, Zhang R, Gao Y, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining. *J China Coal Soc* 2015;40(1):1–10. Chinese.
- [2] Xie H. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory. *Adv Eng Sci* 2017;49(2):1–16. Chinese.
- [3] Hu S, Peng J, Huang C, Chen P, Li M. An overview of current status and progress in coal mining of the deep over a kilometer. *China Min Mag* 2011;20(7):105–10. Chinese.
- [4] He M, Zhang G, Wang G, Xu Y, Wu C, Tang Q. Research on mechanism and application to floor heave control of deep gateway. *Chin J Rock Mech Eng* 2009;28(Suppl 1):2593–8. Chinese.
- [5] Gibowicz SJ, Kijko A. An introduction to mining seismology. Dmowska R, editor. San Diego: Academic Press, Inc.; 1994.
- [6] Wood AMM. Tunnels for roads and motorways. *Q J Eng Geol Hydroge* 1972;5(1–2):111–26.
- [7] Qi C, Qian Q, Wang M. Evolution of the deformation and fracturing in rock masses near deep-level tunnels. *J Min Sci* 2009;45(2):112–9.
- [8] Khandelwal M, Ranjith PG. Correlating index properties of rocks with P-wave measurements. *J Appl Geophys* 2010;71(1):1–5.
- [9] Wasantha PLP, Ranjith PG, Zhang QB, Xu T. Do joint geometrical properties influence the fracturing behaviour of jointed rock? An investigation through joint orientation. *Geomech Geophys Geo-Energy Geo-Resour* 2015;1(1–2):3–14.
- [10] Rathnaweera TD, Ranjith PG, Perera MSA, Bandara KMAS, Wanniarachchi WAM, Ranathunga AS. Investigation of relative flow characteristics of brine-saturated reservoir formation: A numerical study of the Hawkesbury formation. *J Nat Gas Sci Eng* 2017;45:609–24.
- [11] Jiang Y, Zhao Y, Liu W, Li Q. Research on floor heave of roadway in deep mining. *Chin J Rock Mech Eng* 2004;23(14):2396–401. Chinese.
- [12] Singh J, Ramamurthy T, Rao GV. Strength of rocks at depth. In: Maury V, Fourmaintraux D, editors *Rock at great depth, Vol. 1: Rock mechanics and rock physics at great depth*. Rotterdam: A A Balkema; 1989. p. 37–44.
- [13] Jiang Y, Pan Y, Jiang F, Dou L, Ju Y. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China. *J China Coal Soc* 2014;39(2):205–13. Chinese.
- [14] Ju Y, Zheng J, Epstein M, Sudak L, Wang J, Zhao X. 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms. *Comput Method Appl M* 2014;279:212–26.
- [15] Ju Y, Xie H, Zheng Z, Lu J, Mao L, Gao F, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology. *Chinese Sci Bull* 2014;59(36):5354–65.
- [16] Gao M, Jin W, Zhang R, Xie J, Yu B, Duan H. Fracture size estimation using data from multiple boreholes. *Int J Rock Mech Min* 2016;86:29–41.
- [17] He M, Gong W, Wang J, Qi P, Tao Z, Du S, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance. *Int J Rock Mech Min* 2014;67:29–42.
- [18] Niu S, Jing H, Zhang Z, Yang S. Study on control technology of surrounding rocks in deep soft roadway and its application. *J China Coal Soc* 2011;36(6):914–9. Chinese.
- [19] Li CC, Stjern G, Myrvang A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts. *J Rock Mech Geotech Eng* 2014;6(4):315–27.
- [20] Wu L, Wang Y, Ding E, Zhu W, Zhang R, Zhang S, et al. Thirdly study on digital mine: Serve for mine safety and intellimine with support from IoT. *J China Coal Soc* 2012;37(3):357–65. Chinese.
- [21] Scoble M. Canadian mining automation evolution: The digital mine en-route to minewide automation. *CIM Bull* 1995;990(88):30–7.
- [22] Gu D, Li X. Science problems and research state of deep mining in metal and nonferrous mines. *Min Res Dev* 2003;23(Suppl 1):1–5. Chinese.
- [23] Zheng YL, Zhang QB, Zhao J. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunn Undergr Sp Tech* 2016;57:287–99.
- [24] Xie H, Gao F, Ju Y, Ge S, Wang G, Zhang R, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources. *J China Coal Soc* 2017;42(3):547–56. Chinese.
- [25] Xie H, Ju Y, Gao F, Gao M, Zhang R. Groundbreaking theoretical and technical conceptualization of fluidized mining of deep underground solid mineral resources. *Tunn Undergr Sp Tech* 2017;67:68–70.