

中国工程科技论坛

深部矿产资源 高效开发与利用

● 中國工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

深部矿产资源高效开发与利用

Shenbu Kuangchan Ziyuan Gaoxiao Kaifa Yu Liyong

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是中国工程院“中国工程科技论坛”系列丛书之一。深部开采是我国矿产资源开发面临的迫切问题,也是今后保证我国矿产资源供给的主要途径。深部高地应力、高岩温、高井深和强开采扰动给开采安全与资源回收造成很大困难。为了解决深部开采的一系列关键技术难题,实现深部矿产资源的高效开发和利用,必须广泛吸收各学科的高新技术,开拓先进的、非传统的采矿工艺和技术,创造更高效率、更低成本和全程本质安全的采矿模式。为了推动相关问题的系统、创新研究,并给广大研究者提供一个高层次、高水平的交流、研讨平台,中国工程院主办了第234场中国工程科技论坛,并将论坛的50篇优秀论文收入本书,内容涉及深部高应力条件下开采动力灾害的预测与防控、深井采场高温环境控制与降温治理、深井超大负荷提升技术与装置、适应深部需要的传统采矿模式与技术工艺变革、深井遥控智能化无人采矿等深部开采关键问题和技术创新研究的思路与研究成果。本书将对进一步的战略性、前瞻性和实用性创新研究具有引领作用。

图书在版编目(CIP)数据

深部矿产资源高效开发与利用 / 中国工程院编著.

—北京:高等教育出版社,2017.11

(中国工程科技论坛)

ISBN 978-7-04-048711-4

I. ①深… II. ①中… III. ①矿产资源开发—研究—中国 IV. ①F426.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第249362号

总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖

责任编辑 黄慧靖 张冉

封面设计 顾斌

责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 高教社(天津)印务有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 44

字数 770千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2017年11月第1版

印 次 2017年11月第1次印刷

定 价 60.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 48711-00

编辑委员会

主 任：蔡美峰

副 主 任：康红普 吴爱祥 夏晓鸥 王运敏

委 员：冯夏庭 李夕兵 周爱民 张国建

杨春和 王家臣 乔 兰 纪洪广

刘育民 余 斌

编辑人员：尹升华 任奋华 苗胜军 李 远

郭奇峰 王培涛 陈 昕 闫振雄

目 录

第一部分 综 述

综述	蔡美峰	3
----------	-----	---

第二部分 主题论文

Opportunities and Challenges for Mining Deep Mineral Resources by Block Caving Methods	E. T. Brown	9
Time Dependence Behaviour of Cable Bolt Performance Under Axial Loading Conditions	Danqi Li, et al.	32
Geomechanics of Highly Stressed Rock and Massives—Theory of Hierarchical Cracking Mesostructures	V. V. Makarov	46
Case Studies of Geotechnical Engineering Design and Operation in Mining at Depth and High Stress Environment	Tao Li	55
废石-尾砂配比优化与下向分层进路式充填试验	杨志强 等	84
特厚煤层安全高效开采工程示范	王金华	95
冲击地压与自然发火复合灾害研究	潘一山 等	110
急倾斜地下矿体采场结构优化与稳定时间研究	吴爱祥 等	128
我国金属矿山深部采矿科学技术现状及研究方向	王运敏	139
采选抽充防集成型绿色开采技术	缪协兴 等	149
深部煤炭资源安全高效生态保护性开采工程理论 与技术研究	刘建功 等	168
基于煤柱影响的深部煤层强矿压显现机理及控制技术	于 斌 等	183
地下矿山采选一体化建设的关键技术	路增祥 等	199
金属矿深部开采技术研究与应用	周爱民	210
矿山煤岩动力灾害监测预警物理方法及展望	何学秋 等	223
深部高应力矿山开采技术变革与实践	李夕兵 等	247
矿山热应力指标及深井开采热害控制对策	刘育明 等	255

世界黄金深井开采技术现状与启示	韦华南 等	268
深部盐矿采空区利用及研究进展	杨春和 等	274
工作面围岩控制理论及综采系统集成创新	王国法 等	286
基于射频和视觉图像处理技术的矿用无人驾驶设备		
自主定位研究	甘德清 等	301
深部软弱围岩地应力测试的流变应力恢复法原理与技术	刘泉声 等	309
急倾斜深部煤岩体应力状态定量化表征	来兴平等	362
深埋“两硬”煤层冲击机制及治理技术研究	樊少武	374
煤矿开采巷道围岩结构与采动应力场的透明		
可视化方法研究	鞠 杨 等	385
补偿收缩钢纤维混凝土支护技术应用与监测分析	马芹永 等	401
冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法	窦林名 等	414
特大采空区稳定性分析及安全技术体系研究	张 飞 等	425
煤岩瓦斯复合动力灾害分类及机理探讨	王 凯 等	435
高应力下深部巷道锚固效应的物理模型试验技术	张强勇 等	447
浅谈金属矿产资源深部勘查与开发	毛景文 等	460
倾斜矿体分区崩落法高效开采技术研究	任凤玉 等	468
深部矿井煤炭资源开采下的土地复垦与生态修复战略及技术	胡振琪	481
深部两次条带全柱开采技术及其应用	胡炳南	490
内聚力与尾砂自重压力的影响关系研究	李广涛 等	497
峰峰矿区某矿建筑物下深部压煤开采方案设计研究	戴华阳 等	506
沿空巷道顶板非对称应力场数值模拟研究	何富连 等	517
赤铁矿浮选过程中粒度效应的研究	牛福生 等	530
基于微震活动性的深部金属矿山回采过程围岩稳定性分析	李元辉 等	539
基于地应力测试及其反演的煤矿冲击地压灾害防治技术	欧阳振华 等	559
深部开采中强扰动和强时效基本特征初探	周宏伟 等	571
深部破碎岩层巷道大变形控制技术研究及应用	曹 平 等	581
深井高应力软岩巷道稳定性控制	杨仁树 等	605
断层岩石滑移变形的实验和理论模型研究	王 涛	614
深部含水层下连续采矿渗流损伤特性研究	雷 涛 等	624
束状孔高效采矿方法及其在深井开采中的应用前景	陈 何	635
深部条件下巷道开挖对围岩稳定性的影响	朱君星 等	642
多绳摩擦轮无平衡锤深井提升系统设计	陈 兴	651
金属矿山地压监测技术现状及发展方向	汪为平等	659

矿山深井开采热环境控制技术现状分析	贾敏涛 等	665
义马矿区典型冲击地压事故分析	胡 勇 等	672
深井煤岩储层微观孔隙结构表征	彭 磊 等	681
附录 主要参会人员名单		689
后记		695

第一部分

综 述

综 述

矿产资源是人类赖以生存、社会赖以发展的物质基础,是生产力构成的主要因素。据统计,世界上 95% 的能源、80% 的工业原料、70% 以上的农业生产资料均来自于矿物原料。我国矿产资源总量较丰富。目前,我国已发现 171 种矿产资源,探明有储量的矿产资源 168 种,已探明的矿产资源储量潜在价值约占世界矿产资源总价值的 14.6%,居世界第三位。然而,我国矿产资源人均占有量远远低于世界平均水平,仅为世界平均水平的 58%。45 种主要矿产资源中,目前能满足生产需要的不到 20 种,后备资源不足或严重不足,缺口较大。

金属矿资源(包括铁矿、锰矿、铜矿、铝土矿、金矿、铬矿等)不但储量严重不足,而且贫矿、小矿多,富矿、大型、特大型矿很少。据统计,我国 86% 的铁矿、70% 的铜矿和铝土矿、50% 的锰矿储量均为贫矿。我国铁矿石的平均品位只有 33%,比世界平均品位(45%)低 12 个百分点;铜矿的平均品位只有 0.87%,且大型铜矿中,品位大于 1% 的铜矿储量只占 13.2%;锰矿平均品位 22%,距世界商业矿石工业品位(48%)相差甚远;铝土矿几乎全为一水硬铝石,分离提取难度很大。

在较长一段时间内,我国的金属矿产资源供应不足已经成为影响国民经济发展的一个重要因素。为了解决这一矛盾,某些金属矿产品需从国外大量进口。例如,2010 年后,我国每年消耗的 60% 以上的铁精矿、70% 以上的铜精矿和 50% 左右的铝土矿都是从国外进口。主要金属矿产资源如此高的国外依存度,对我国国民经济发展所需资源保障的可靠性和安全度构成了潜在的严重威胁。

此外,经过多年开采,我国的浅部矿产资源正逐年减少,有的已近枯竭。我国金属矿山 90% 左右为地下矿山,20 世纪 50 年代建成的一批地下金属矿山中,60% 因储量枯竭已经或接近闭坑,其余 40% 的矿山正逐步向深部开采过渡。目前,吉林夹皮沟金矿、河南灵宝崆鑫金矿、云南会泽铅锌矿和六苴铜矿开采深度均超过 1500 m。近几年正在兴建的或计划兴建的一批大中型金属矿山基本上全部为深部地下开采,其中大部分为铁矿。例如辽宁本溪大台沟铁矿,矿石储量 53 亿 t,矿体埋深 1000 m 以下,开采设计规模(矿石)3000 万 t/a;同处本溪地区的思山岭铁矿,矿体埋深 800~1600 m,矿石储量 25 亿 t,开采设计规模 1500 万 t/a;位于鞍山地区的西鞍山铁矿,矿石储量 17 亿 t,开采规模也将达到 3000 万 t/a;位于河北唐山地区的首钢马城铁矿,矿石储量 12 亿 t,矿体埋深 180~1200 m,

开采设计规模 2200 万 t/a。所以,在较近的未来,我国将有好几个地下金属矿山的开采规模达到世界最高水平。同时,我国在 2000 m 以下深部还发现了一批大型金矿床,如山东三山岛西岭金矿床,金金属储量达到 400 t 以上,矿体埋深在 1600~2600 m 之间。随着勘探技术和装备的进步,未来我国在 5000 m 深度发现一批大型金属矿床是完全可能的。

据统计,在未来 10 年时间内,我国 1/3 的地下金属矿山开采深度将达到或超过 1000 m,其中最大的开采深度可达到 2000~3000 m。深部开采是我国金属矿产资源开发面临的迫切问题,也是今后保证我国金属矿产资源供给的最主要途径。我们必须把 5000 m 开采深度作为金属矿深部开采战略研究的目标。

进入深部开采后,地应力增大、地温升高;矿床地质构造和矿体赋存条件恶化;岩体结构及其力学特性发生重大变化,浅部的硬岩到深部可能变成软岩,弹性体可能变成塑性体或潜塑性体,给支护和采矿安全造成很大负担,适用于浅部硬岩的采矿和支护设计理论用于深部将可能出现一系列的严重问题;随着开采深度的增加,矿石和各种物料的提升高度显著增加,提升难度和提升成本大大增加,并对生产安全构成威胁;等等。为了解决深部“高地应力、高岩温、高井深和强开采扰动”给开采安全和效率带来的一系列难题,实现深部矿产资源的高效开发和利用,必须广泛吸收各学科的高新技术,开拓先进的、非传统的采矿工艺和技术,创造更高效率、更低成本、最少环境污染和全程本质安全的采矿模式,在解决如下五个关键问题方面取得重大创新和突破。

1) 深部高地应力条件与开采动力灾害。地应力值随深度的增加而增加,深部高应力会导致破坏性的地压活动,包括岩爆、矿震、突水等由采矿引起的动力灾害,金属矿山主要是岩爆。因此,必须研发精准的岩爆、矿震的预测、预报与防控技术,以保证开采安全。

2) 深井采场高温环境与控制。岩层温度随深度以约 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的梯度增加。深井高温环境严重影响工人劳动生产率和设备作业效率,而传统降温技术效率低、效果差、成本高,因此必须研发新型高效降温技术,以满足深部降温需要,保证生产正常进行。

3) 深井提升问题。随着开采深度的增加,人员、设备、矿石和其他物料提升高度显著增加,提升难度和提升成本大大增加,并对生产安全构成威胁。目前国内外通用的有绳提升技术不适应深井提升要求,必须研发新型提升技术,以从根本上解决这一问题。

4) 传统采矿模式与采矿工艺的变革。为了适应深部地质条件、岩体结构及其力学特性发生的重大变化,并为深井遥控无人采矿提供充分的条件,必须对只适应浅部地质条件和岩体条件的传统采矿模式及其工艺技术进行根本的重大变

革。

5) 智能化无人采矿技术。为了更好地应对不断恶化的深部开采条件和环境,从根本上保证深部开采的安全,最大限度地提高劳动生产率和采矿效率,必须发展高度自动化的遥控智能无人采矿技术。

综上所述,深部开采已成为采矿工程科技的前沿、热点和难点问题,关乎国家经济安全和国民经济的可持续发展。为了给该领域的工程科技研究和管理人员提供一个高层次、高水平的研讨平台,推动相关问题具有宏观性、战略性、前瞻性、工程性和应用性的创新研究,中国工程院主办了第 234 场中国工程科技论坛——深部矿产资源高效开发与利用。论坛以金属矿为主要对象(并包括煤矿和非金属矿),对深部矿产资源高效开发与利用的关键问题及其应对的战略举措和关键技术开展了广泛、深入的交流和研讨。论坛研讨包括以下 12 个专题:

- 1) 深部矿产资源赋存特征及开采技术条件;
- 2) 深井提升技术与装备;
- 3) 深部岩体力学与地应力测量;
- 4) 深井开采多场扰动致灾机理及预测预警;
- 5) 深部开采岩层控制与支护技术;
- 6) 深部充填采矿技术与装备;
- 7) 深井开采新理论、新模式与开采系统优化;
- 8) 深井安全高效开采理论与技术;
- 9) 深井遥控智能化采矿技术;
- 10) 深井开采高温环境与控制;
- 11) 井下采选一体化与资源综合利用;
- 12) 复杂难处理资源高效分选技术及装备。

论坛由中国工程院能源与矿业工程学部和北京科技大学联合承办,于 2016 年 10 月 13 日至 15 日在北京举行。中国工程院副院长赵宪庚院士出席了论坛开幕式并作主旨发言。中国工程院能源与矿业工程学部 11 位院士,化工、冶金与材料学部 1 位院士,工程管理学部 1 位院士,中国科学院 2 位院士,还有澳大利亚工程院 1 位院士,俄罗斯自然科学院 1 位院士,共 16 位院士出席了此次论坛。其中,10 位院士做了特邀报告。来自全国重点矿山企业、大专院校、科研院所等相关单位的科技管理专家、技术专家、学者、教授、研究生等以及国外专家共 400 多人出席本场论坛。除 10 位院士的特邀报告外,还有 28 人做了专题报告,专题报告人全部为矿山企业、大学和科研院所的中青年学术、业务骨干与领军人才。10 个特邀报告和 28 个专题报告,均反映了国内、国际同类研究的最高水平。例如“深部矿产资源开采的颠覆性技术探索”(谢和平)、“推进深部开采向

高端转型发展”(古德生)、“地下采选一体化战略研究”(孙传尧)、“煤炭精准开采科学构想”(袁亮)、“我国金属矿深部开采创新技术体系研究”(蔡美峰)、“深部煤炭资源无煤柱连续开采创新工法探索”(何满潮)、“金川镍矿深部资源开发与利用创新技术研究进展”(杨志强)、“复杂特厚煤层综放开采安全高效创新工程示范”(王金华)、“深部煤层机器人化开采技术与示范”(葛世荣)等报告,不但立论新颖,前沿性、开拓性、创新性和实用性突出,而且技术保障和实施路线系统、科学,实现突破性、颠覆性重大进展的可预见性极强。因此,这些报告对引导论坛期间和会后广泛、深入的研讨与交流,并通过研讨与交流在创造更高效率、更低成本、最少环境污染和全程本质安全的深部采矿新模式、新技术、新工艺及矿产资源的全产业链最大化综合利用等方面形成一系列战略思想、战略对策和创新的关键技术,具有重要的指导价值。这也是本场论坛预期达到的目标。

同时,论坛1号通告和征文通知于2016年1月4日发布后,至2016年6月底,共收到围绕论坛12个研讨专题撰写的论文60多篇。经评审和修改,最终52篇被收入本书正式出版(包括国外作者撰写的英文论文4篇)。这批论文的理论性和实用性都很强,包含了许多专家学者的创新学术思想和研究成果,具有超前的学术引领作用,对推动“深部矿产资源高效开发和利用”创新性战略研究和实践深入开展均具有重要的借鉴及指导价值。

论坛大会主席

中国工程院能源与矿业工程学部 院士



第二部分

主题论文

Opportunities and Challenges for Mining Deep Mineral Resources by Block Caving Methods

E. T. Brown

Golder Associates Pty Ltd, Brisbane, Australia

Abstract: Exploitable mineral resources exist at depth as a number of orebody types in a range of geological settings and geometrical configurations. Massive, generally lower grade metalliferous deposits have been exploited to depths of more than 2000 m by open stoping, sublevel caving and block caving methods of mining. Currently, such deposits are being exploited in many parts of the world by block and panel caving methods, mining up to in the order of 140 000 tonnes of ore per day or 50 million tonnes per year, with other high production operations being developed or planned. Historically, Tongkuangyu Mine has been the only block caving mine operating in China, but with its relatively small, inclined orebodies, it is not typical of the modern generation of “super caves”. However, there is now interest in applying the method to other deposits, including to Chalco’s Pulang Project in Yunnan Province. Block and panel caving mining methods are simple conceptually, but require much detailed technical knowledge and expertise to implement effectively. Their main advantages compared to other potential mining methods are their low operating costs and high productivities, although the initial capital expenditures required may be relatively high. Nevertheless, it is considered that it would be to China’s benefit to further develop its experience and expertise in this approach to the mining of deep, low-grade metalliferous mineral resources that cannot be exploited economically by other methods. The steps and engineering challenges involved in developing and operating block and panel caving mines at depth are outlined. These engineering challenges include cavability assessment; cave initiation by undercutting, possibly with the aid of pre-conditioning; caving mechanics, cave development and propagation; fragmentation assessment; draw control; extraction level layout and stability; ventilation and cooling; ore handling, crushing and transportation; and the

assessment and control of cave propagation to surface and the associated surface subsidence and environmental impact. The need and opportunity exists for site-specific studies and for broader, generic research on these topics, both in China and internationally.

Keywords: deep mineral resource; block caving method; opportunity and challenge

1 Introduction

This paper is offered as an invited contribution to the Chinese Academy of Engineering and the University of Science & Technology Beijing's Forum of Engineering Science and Technology China—"Effective Development and Utilization of Deep Mineral Resources". To the best of the author's knowledge, there is no universally agreed definition of deep mineral resources, partly because deep for one resource such as coal may not be especially deep for another such as gold. Generally, only metalliferous resources will be considered here and, for present purposes, deep mineral resources and deep mining will be taken to involve depths of greater than 1 km. This has some consistency with a recent trend to adopt the terminology of ultra-deep for mining depths of 3 km and greater (Vieira et al., 2001) and with the terminology used by Kang et al. (2010) for the depths of coal mines in China.

Exploitable metalliferous resources exist at depth as a number of orebody types in a range of geological and geometrical configurations. Seven of the 10 deepest mines in the world are tabular or stratiform gold deposits in the Witwatersrand Basin of South Africa. The deepest of these mines, Mponeng, is now approaching 4 km in depth. These mines are well-known for the impact of rockbursting on their operations, and for the associated studies that have been carried out since 1953 in an effort to develop an understanding of the rock burst phenomenon and methods of alleviating its impact (Cook et al., 1966; Durrheim, 2012; Ryder & Jager, 2002). The deepest mines in the world outside of South Africa are La Ronde which mines gold, silver, copper and zinc to a depth of 3 km in Quebec, Canada (Falmagne, 2016; Karampinos et al., 2015; Mercier-Langevin, 2010), and the Kidd Mine which mines copper and zinc to a depth of approximately 3 km in Ontario, Canada (Counter, 2014). The Creighton Mine currently mines nickel to a depth of 2.5 km also in Ontario, Canada (Walton et al., 2016).