

中国工程院咨询研究项目

金属矿深部开采 创新技术体系战略研究

蔡美峰 谭文辉 任奋华 郭奇峰 等 编著



非
外
借



科学出版社

中国工程院咨询研究项目

金属矿深部开采 创新技术体系战略研究

蔡美峰 谭文辉 任奋华 郭奇峰 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

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。金属矿产资源是金属矿产品和金属材料的最根本来源，对国民经济的发展和社会物质文明与科技进步有举足轻重的作用。经过新中国成立 60 多年来的大规模开采，我国的浅部金属矿产资源逐年减少，有的已近枯竭。据统计，在未来 10 年内，我国 1/3 的地下金属矿山开采深度将达到或超过 1000m，最深的可达 2000~3000m。深部开采是我国金属矿产资源开发面临的迫切问题，也是今后保证我国矿产品供给的最主要途径。我国必须把 5000m 开采深度作为金属矿深部开采中长期战略研究的目标。

本书将深部高地应力条件下开采动力灾害预测与防控、深井高温环境控制与降温治理、深井提升问题、适应深部开采传统采矿模式与工艺的变革、深部智能化无人采矿等 5 个方面的关键技术问题与相关学科的高新理论、高新技术及其发展趋势相对接，通过具有创新性、可行性和实用性相结合的系统研究，从战略性和前瞻性的高度提出应对和解决这些问题的关键工程科技发展战略和对策建议，最终形成金属矿深部开采的创新技术体系。

本书可供矿业研究和设计单位的研究设计人员、矿山企业领导和工程技术人员以及国家矿业管理部门与机构的领导干部参考，也可供高等院校采矿工程专业的教师和研究生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属矿深部开采创新技术体系战略研究/蔡美峰等编著. —北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-056258-6

I. ①金… II. ①蔡… III. ①金属矿开采-地下开采-研究 IV. ①TD853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 006459 号

责任编辑: 窦京涛 / 责任校对: 张凤琴
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 300 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前言

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来自于矿物原料。其中，金属矿产资源是金属矿产品和金属材料的最根本来源，对国民经济发展和社会物质文明与科技进步更有举足轻重的作用。我国矿产资源总量较丰富，目前已探明有储量的矿产资源 168 种，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，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。

金属矿产资源，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。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，某些金属矿产品需要从国外大量进口。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。

对于金属矿产资源，还有一个重要的问题，就是：经过多年开采，我国的浅部资源正逐年减少，有的已近枯竭。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 1000m，其中最深的可达 2000~3000m。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品供给的最主要途径。我国必须把 5000m 开采深度作为金属矿深部开采中长期战略研究的目标。

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，适用于浅部硬岩的传统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、高井温、高井深”开采条件造成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，满足国民经济发展对金属矿产的需求，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, 从具有宏观性、战略性、前瞻性、工程性和应用性的高度, 开展一系列具有针对性的创新研究, 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采矿模式等方面取得重大创新和突破。为此, 中国工程院设立了“我国金属矿深部开采创新技术体系战略研究”咨询研究项目, 对此进行研究。

本书首先采用多种手段进行了大规模、全方位的国内外调研, 调研手段包括: 问卷、电话、电子邮件、国内外访谈; 网络、数据库、图书馆查询; 多人次赴中国科学技术信息研究所、中国钢铁工业协会、中国有色金属协会、中国黄金协会、中国矿山企业协会、国土资源部、中国地质科学院和北京矿冶研究总院、长沙矿山研究院等 20 多个国家级行业协会、科研院所的情报信息部门面谈和收集资料; 百人次赴云南会泽铅锌矿、山东三山岛金矿、甘肃金川镍矿、辽宁红透山铜矿等 50 多个矿山实地考察、调研等。通过调研, 比较系统和准确地掌握了我国铁、铜、铝土、铅、锌、镍、钨、金 8 种主要金属矿产资源的储量及分布, 以及我国大中型地下金属矿山的数量、类型、分布、开采现状(包括储量、开采规模、开采深度); 从科学问题和工程技术两个层面, 系统总结出我国金属矿深部开采面临的关键难题, 为项目研究提供了依据。同时, 对国外开采深度超过 1000m 的深井金属矿山的数量与分布、深部开采的现状和解决深部开采难题采取的技术、方法等, 有了最新的比较准确的了解, 为本项目研究提供了有用的参考依据。

调研总结出的金属矿深部开采关键技术难题有以下 5 个方面:

(1) 深部高地应力条件与开采动力灾害。地应力值随深度增加而增加, 深部高应力可导致破坏性的地压活动, 包括岩爆、塌方、冒顶、突水等, 其中岩爆最具破坏性; 必须研发精准的岩爆预测、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。岩层温度随深度增加以约 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 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; 传统降温技术效率低、效果差、成本高, 必须研发新型高效降温途径和技术, 才能满足深部降温需要, 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前提条件, 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条件, 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。

本项目将上述 5 个方面的关键技术难题与相关学科的高新理论、高新技术及其发展趋势相对接,通过具有创新性、可行性和实用性相结合的多学科系统研究,从战略性和前瞻性的高度提出了应对和解决这些难题的关键工程科技发展战略和实施路线,最终形成了金属矿深部开采的创新技术体系。

本人为本咨询研究项目的负责人,并负责本书的编著。参与本项目研究和本书编著的主要人员及其分工如下:

第 1 章,蔡美峰;第 2 章,谭文辉、苗胜军、李远、彭超、陈昕;第 3 章,谭卓英、任奋华、李正胜、薛鼎龙、李鹏;第 4 章,纪洪广、李铁、向鹏;第 5 章,谢谟文、璩世杰、张兆财、王培涛;第 6 章,李长洪、毛市龙、魏晓明;第 7 章,乔兰、郭奇峰、李庆文、席迅;第 8 章,孙体昌、寇珏、闫振雄;第 9 章,蔡美峰。

武旭、彭剑文、于江、杜伟嘉、王洋、万思达、王攀、王海信、张政、李振、王宏伟等博士与硕士研究生参与了项目的调研和资料的收集、分析与整理工作。

蔡美峰

2017 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究路线	2
1.3 研究内容	3
1.4 研究目标	6
第 2 章 国外金属矿深部开采现状及其发展趋势	7
2.1 世界有代表性国家金属矿山深部开采现状	7
2.1.1 深部开采概念	7
2.1.2 深部开采特征	8
2.1.3 国外深部开采现状	9
2.2 深部开采的主要技术难题及其对策措施	17
2.2.1 深部采矿方法	17
2.2.2 深部提升技术	18
2.2.3 深部开采动力灾害控制	19
2.2.4 深部开采高温热害治理	20
2.2.5 遥控自动化智能采矿工艺与装备	23
参考文献	25
附录 国外典型深部金属矿山简介	27
第 3 章 我国金属矿深部开采现状及其发展趋势	51
3.1 我国主要地下金属矿山数量、类型、分布及其深部开采现状	51
3.1.1 我国金属矿产资源的分布特点	51
3.1.2 大中型地下金属矿山的数量、类型及分布概述	53
3.2 深部开采面临的主要难题和采取的对策措施	68
3.2.1 我国金属矿深部开采现状	68
3.2.2 我国金属矿深部开采面临的主要难题和采取的对策措施	68
3.3 我国深部开采与矿业发达国家相比的差距和制约条件	71
参考文献	73
附录 国内典型深部金属矿山简介	74

第4章 金属矿深部开采动力灾害预测与防控	86
4.1 开采动力灾害类型和金属矿岩爆研究的主要问题	86
4.1.1 矿山开采动力灾害类型	86
4.1.2 金属矿岩爆研究的主要问题	86
4.2 国内外金属矿岩爆发生的概况和特征	88
4.2.1 工程岩爆的总体特征	88
4.2.2 国外金属矿山岩爆概况	88
4.2.3 我国金属矿山岩爆现状	90
4.3 国内外岩爆预测与防控研究现状	92
4.3.1 岩爆理论预测与防控	92
4.3.2 岩爆现场监测预测	93
4.3.3 岩爆防控技术现状	94
4.4 岩爆预测与防控研究的关键技术难题及其对策思路	96
4.4.1 岩爆预测与防控的关键技术难题	96
4.4.2 岩爆预测与防控的关键技术前瞻	96
参考文献	100
第5章 深井高温环境与热害控制及治理	102
5.1 我国金属矿山高温环境、热害类型、热源分析与高温深井分布	102
5.1.1 国内深部金属矿山的高温环境	102
5.1.2 我国高温深井金属矿山的主要热害类型	102
5.1.3 深部高温金属矿山的热源分析	104
5.1.4 我国深部高温矿井分布	106
5.2 国外深井矿山降温和热害处理的技术和方法	106
5.2.1 国外深井矿山高温及热害情况	106
5.2.2 国外矿井降温技术	107
5.2.3 国内深井矿山热环境研究概况和主要采用的降温措施	112
5.2.4 典型矿山深井降温与热害控制技术	112
5.3 降温与热害处理存在的问题及其新型创新技术研究与发展方向	114
5.3.1 深井降温与热害处理技术研究存在的问题	114
5.3.2 新型降温与热害处理技术研究及发展方向	115
参考文献	116
第6章 深部非传统采矿模式与开采方法和工艺研究	118
6.1 非传统爆破连续破岩切割采矿方法	118
6.1.1 机械切割破岩掘进与采矿技术	118
6.1.2 高压水射流破岩掘进与采矿技术	119
6.1.3 激光破岩掘进与采矿技术	122
6.1.4 诱导致裂破岩采矿技术	124
6.1.5 等离子爆破破岩采矿技术	125

6.2 深部膏体连续充填采矿技术	127
6.2.1 膏体充填技术的发展历史	127
6.2.2 深部膏体连续充填采矿模式	129
6.2.3 废石膏体充填技术	130
6.2.4 膏体充填采矿技术的发展趋势	131
6.3 深井提升技术	132
6.3.1 金属矿山竖井提升技术装备的国内外现状	132
6.3.2 深井提升的关键技术难题	133
6.3.3 适应深井提升的传统提升技术的变革和非传统提升技术	136
6.3.4 我国金属矿山深井提升技术的研究方向	141
参考文献	141
第 7 章 适应深部开采的选矿新工艺与采选一体化技术	144
7.1 适应深部开采的选矿新工艺	145
7.1.1 基于超导磁选的可色金属高效预富集工艺	145
7.1.2 原位浸出工艺	146
7.2 与深部开采有关的选矿新技术	149
7.2.1 井下破碎磨矿	149
7.2.2 井下预选	150
7.2.3 矿浆输送	152
7.2.4 井下选矿厂	154
7.2.5 选矿厂自动化及选矿操作机器人	156
7.3 未来的发展趋势与战略规划	157
7.3.1 井下破碎磨矿工艺与设备	158
7.3.2 井下预选技术	158
7.3.3 矿浆管道垂直输送技术	158
7.3.4 地下选厂设计、建设和运行技术	158
7.3.5 选矿自动化和选矿机器人技术	159
7.3.6 采选结合技术	159
参考文献	159
第 8 章 深井遥控自动化智能采矿	163
8.1 遥控自动化智能采矿技术的发展现状	163
8.1.1 国外金属矿遥控自动化智能采矿发展概况	163
8.1.2 我国金属矿遥控自动化智能采矿发展概况	165
8.2 遥控深井自动化智能采矿的关键技术	166
8.2.1 虚拟现实与可视化技术	166
8.2.2 先进传感及检测监控技术	167
8.2.3 采掘设备遥控及智能化技术	167
8.2.4 井下无轨导航与控制技术	168

8.2.5 高速数字通信网络技术·····	169
8.2.6 适应遥控自动化智能采矿的开采模式及技术工艺变更·····	169
8.3 加速我国深井遥控自动化采矿研究和推广的对策措施·····	170
8.3.1 我国现阶段遥控自动化智能采矿存在的问题·····	170
8.3.2 我国现阶段遥控自动化智能采矿的政策推动·····	171
8.3.3 我国现阶段遥控自动化智能采矿的发展路径·····	173
参考文献·····	174
第9章 讨论、结论和建议·····	177
9.1 国内外金属矿山深部开采现状·····	177
9.2 深部开采条件及其导致的主要工程技术难题·····	179
9.3 解决深部开采难题的关键工程科技战略思想、战略举措与战略建议·····	183

第1章 概 论

1.1 研究背景

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之一。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来自于矿物原料。其中，金属矿产资源是金属矿产品和金属材料的最根本来源，对国民经济的发展和社会物质文明与科技进步更是有举足轻重的作用。我国矿产资源总量较丰富。目前已发现 171 种矿产资源，探明有储量的矿产资源 168 种，已探明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 3 位。然而我国矿产资源人均占有量远远低于世界平均占有量。在 45 种主要矿产资源中，我国人均储量居世界第 80 位，仅为世界平均水平的 58%。45 种主要矿产资源，目前能满足生产需要的不到 20 种，到 2020 年将只剩下 6 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，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% 的铁矿储量，70% 的铜矿和铝土矿储量及 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。81.2% 的铁矿资源品位在 25%~40%；品位大于 48% 的较富的铁矿资源只占 1.9%。铜矿的平均品位只有 0.87%；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%，离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。我国金属矿数量大，有 9000 多座，但绝大多数为小型矿山。如铁矿，大型矿仅占 5.5%，中小型矿占 94.5%；在探明的铜矿资源中，大型、超大型矿仅占 3%，中型占 9%，小型占 88%。

我国金属矿产资源的另一个特点是单一矿种的矿床少，共生矿床多。据统计，我国共、伴生矿床约占已探明矿产资源储量的 80%。目前，全国开发利用的 139 个矿种，有 87 种部分或全部来源于共、伴生矿产资源。在 900 多个已探明的铜矿床中，单一矿种仅占 27.1%，共生矿占 72.9%，具有较大综合利用价值。

与此同时，我国矿山企业的开采技术和设备水平总体上也比较落后，采矿损失率、贫化率高，劳动生产率低，资源浪费的现象相当突出，导致我国金属矿产资源储量回收率仅为 30% 左右，比国外低 10~20 个百分点。不仅如此，我国的金属矿产资源以贫、细、杂为特征，选矿难度大、成本高，选矿回收率和资源综合利用率低；有一批金属矿产资源，由于缺少有效选矿技术而失去开采价值，成为“呆矿”。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,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的。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,其中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。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。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直铜矿均超过1500m。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。如目前正在建的辽宁本溪大台沟铁矿,矿石储量53亿t,矿体埋深1057~1461m,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404~1934m,矿石储量25亿t,开采设计规模一期1500万t/a,二期(8年后)1500万t/a,最终生产规模3000万t/a;首钢河北马城铁矿,矿石储量12亿t,矿体埋深180~1200m,开采设计规模2200万t/a。2017年内即将投入建设的山东济宁铁矿和五矿集团鞍山陈台沟铁矿,设计采矿规模分别为3000万t/a和2000万t/a。预期在近期,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2000m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,金金属储量达到550t,矿体埋深在1600~2600m。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1000m,其中最大的开采深度可达到2000~3000m。

截至20世纪末,我国地下金属矿的开采深度达到1000m的还只有很少几个矿山,最大开采规模也只有300万~400万t/a。而目前面临的是1500~2000m或更大的开采深度、2000万~3000万t/a的开采规模,形势的变化和发展速度之快是前所未有的。高地应力、高井温、高井深条件下的大规模开采面对一系列的重大工程技术难题。进入深部开采后,矿床地质构造和矿体赋存条件恶化、破碎岩体增多、地应力增大、涌水量加大、井温升高、开采技术条件和环境条件严重恶化,矿石各种物料提升高度增加,导致开采难度加大、劳动生产率下降、成本急剧增加,正常生产难以为继。为了解决深部开采的一系列关键技术难题,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、最少环境污染和最好安全条件的采矿模式;在深部开采动力灾害防控、连续化高效率采矿、无废采矿、生态采矿、智能采矿、全程本质安全采矿等方面取得重大突破,最终建成高度智能化和开采效率最大化的无人矿山。

1.2 研究路线

(1) 通过问卷、电话、电子邮件、下载资料和现场调研、考察等方式,对我国大中型地下金属矿山的数量、类型、分布、开采深度现状及其发展趋势进行调查、统计和分

析,系统掌握我国地下金属矿山及其深部开采状况的准确资料。

(2) 通过系统地调查、统计分析我国各种类型金属矿山深部开采中已经出现的和将要出现的具有共性的关键技术难题和各自特殊的技术难题,以及针对相关问题已经或准备采取的一些技术、方法和措施,为本项目研究提供依据。

(3) 对国外有代表性国家(瑞典、加拿大、南非、芬兰、俄罗斯等)金属矿深部开采的现状和解决深部开采难题采取的技术、方法,及其研究进展和应用情况,进行系统地统计、分析和研究,为确定本项目的研究提供参考依据。

(4) 从科学问题和工程技术两个层面,系统总结出我国金属矿深部开采面临的关键难题;将所有关键难题与相关学科的高新理论、高新技术及其发展趋势相对接,通过具有创新性、可行性和实用性相结合的多学科系统研究,从战略性和前瞻性的高度提出应对和解决这些难题的关键工程科技发展战略、实施路线和对策建议,最终形成金属矿深部开采的新技术体系。

1.3 研究内容

针对金属矿深部开采需要面对和解决的关键技术难题和相关问题,主要开展以下 6 个方面的系统研究:

(1) 深部高地应力场条件及其引起的岩爆、塌方、冒顶、突水等深部开采动力灾害,以及其他严重威胁深部开采安全的问题。

地应力是存在于地层中的天然应力,主要由水平构造应力和垂直自重应力两部分组成,其中以地球板块推挤为主的水平构造应力,在现今地应力场中起主导作用。太平洋板块和印度板块对中国大陆的挤压与菲律宾板块和欧亚板块的阻挡,造成了中国大陆的高应力场。在高应力场条件下采矿面临许多世界性的难题,如岩爆的预测与防治是全世界至今没有解决的问题。地应力的大小随深度的增加呈近似线性增长的关系,因此深部必然存在高应力环境,从而为采矿开挖诱发岩爆等动力灾害创造了条件。据统计资料,20 世纪 80 年代以来,全世界深部开采的事故频频发生,最严重的是南非。因为南非是最早进入深部开采的国家。1984~1993 年,南非金矿有 3275 名工人在地下采矿事故中丧生;1994~1998 年有 126130 人严重受伤、1634 人死亡。导致南非金矿伤亡严重的主要原因是,在 2000m 以下采矿,未能研究和采用与高应力环境相适应的、有利于控制岩爆与岩石冒落等的采矿方法、工艺和措施。实际上,世界上对岩爆的研究也已有较长的历史,但研究的成果还远不能满足深部资源安全开采的要求。为此,应在现有工作积累的基础上,将研究重点从岩爆的判据研究转移到岩爆的预测与防控上来。

(2) 深井开采中的高温环境与控制。

地下岩层温度随着深度的增加而增加。据统计,常温带以下,深度每增加 100m,岩层温度将提高 3.0℃左右。通常情况下,千米以上的深井,岩层温度将超过人体温度。如南非西部矿井,在深部 3000m 处,岩层温度高达 80℃;我国安徽罗河铁矿 700m 深度,岩温达到 42℃。深井开采工作面气温的升高导致工作面条件的严重恶化。在持续的高

温条件下,人员的健康和工作能力将会受到很大的损伤,使劳动生产率大大下降。据统计资料,井下环境温度超标 1°C ,工人的劳动生产率将降低 $7\%\sim 10\%$ 。采取经济和有效的措施,解决深井的高温环境和降温问题,使深井开采工作面保持人员和设备所能承受的温度和湿度,对保证深部地下开采的正常开展具有重要意义。

由于我国进入深井开采的时间较短,对热环境问题的研究起步晚,工作做得甚少。直到20世纪80年代,我国才逐步开展矿井热害治理的研究。目前国内深井降温系统,基本上是引进德国等国外的制冷设备或技术,系统实施后虽工作面温度能基本满足要求,但能耗大、运行费用高,而且现有的降温技术和设备解决的是只有1000m左右深度的降温问题。随着我国深部开采的速度和规模的迅速扩大,研究和开发适合我国国情和矿情的具有自主知识产权的深井降温和热害控制与治理技术和设备系统,大幅度降低降温成本,满足大规模深井降温的要求,就成为一个非常迫切的问题。

(3) 深井提升技术。

开采深度增大,首先碰到的就是矿井的提升能力问题。提升高度的成倍增加,不但使生产效率大幅下降、生产成本大幅增加,而且对生产安全构成严重威胁。目前国内外广泛采用的摩擦轮多绳提升机技术,当井深超过1800m后,就会在设备能力、安全性和运行成本方面遇到许多困难。主要问题在于:在深井中使用时,由于钢丝绳加长,不仅加大提升负荷,而且钢丝绳因张力变化过大,导致断丝较早且不均匀,钢丝绳有效金属截面减小,抗拉强度降低,钢丝绳寿命急剧下降,这成为制约该技术提升安全与效率的主要因素。为此,英国的布雷尔提出了多绳缠绕式提升技术,并在南非的金矿得到较广泛的应用。多绳缠绕式提升机具有提升能力大、卷筒直径较小、不需要尾绳和钢丝绳张紧平衡装置、运行平稳等优点,适用于特深井提升。但缠绕式提升机到更大深度后,同样存在钢丝绳加长、加粗带来的一系列问题。因此,缠绕式提升机在大型地下矿山应用时,单级最大提升高度可能也只有3000m左右。更大的提升高度必须多级提升,从而设备成本大大增加,提升效率大大降低,失去它的使用优势。单级提升高度超过3000m后,有绳提升由于钢丝绳造成的大负荷、大惯量、大扭矩将是无法解决的问题。为此,必须研发无绳垂直提升技术,如直线电机驱动、磁悬浮驱动提升技术等。无绳提升是一种无高度限制的全新提升技术。

同时,除上述机械式提升技术外,研究和开发非机械式提升技术,如水力提升技术也是解决问题的途径。采用水力提升技术,矿石在地下进行破碎和磨矿,然后泵送到地面选矿场。与机械提升运输相比,非机械提升的综合费用较低。同时,由于不需要开挖新竖井,不但大大减少了井巷工程的投资,而且使采矿工程的安全性得到很大的提高。

(4) 深井采矿模式及其工艺技术变革。

进入深部开采后,地应力增大,矿床地质构造、矿体赋存条件和岩体物理力学特性出现弱化、恶化,浅部的硬岩到深部可能变成软岩、弹性体变成塑性体或潜塑性体,开采技术条件和环境条件发生重大变化。适应于浅部开采条件的传统采矿工艺、技术用于深部采矿将会出现一系列问题和错误。同时,为了适应金属矿深部自动化智能化高效开采的发展趋势,也必须对传统的采矿模式及其工艺技术进行根本变革。

传统的钻爆法(打眼放炮)采矿方法,在采出矿石的同时,还会采出相邻的废石,并

混在一起提升出井,从而加大了提升量。从长远目标出发,采用机械掘进、机械凿岩、高压水射流、激光破岩等方法,以连续切割设备取代传统爆破采矿工艺进行开采是一个重要方向,这涉及传统采矿工艺技术的大规模变革问题,是采矿方法和工艺的战略性的转变。采用机械切割采矿时切割空间无须实施爆破而明显提高其稳固性,同时机械切割能准确地开采目标矿石,使废石混入率降到最低,从而大幅度减少提升量。传统采矿工艺技术的大规模变革不但可以大幅度减少提升量,同时也是实施遥控智能化采矿、建设无人矿山的必然需要。

地下金属矿山有3类采矿方法,即空场法、崩落法、充填法。按照通常的做法,除金矿和少数重要的有色矿山采用充填法外,其他矿山,特别是铁矿,一般都采用空场法和崩落法进行开采。然而进入超1500m深部开采后,面对很高的开采地压,空场法和崩落法均不能保证开采的安全,充填法将是必须采用的开采方法。这也是传统采矿模式的一个重要变革。面对这一变革,我国地下矿山应对各种充填工艺和充填材料进行系统创新研究,形成充填成本低、充填体强度高、充填材料来源广的充填技术,以便为深部开采广泛推广充填采矿方法创造条件。

(5) 为了更好地应对不断恶化的深部开采条件和环境条件,从根本上保证深部开采的安全、提高采矿效率,必须发展高度自动化的遥控智能无人采矿技术。

自动化智能采矿利用先进的信息及通信技术、遥感控制技术等,形成以先进传感器及检测监控系统、智能采矿设备、高速数字通信网络、新型采矿工艺过程等集成化为特征的自动化智能采矿系统,以“机器人”取代自然人完成各种采矿作业。它不但从根本上解决了深井高温环境和深部高应力诱导的各种灾害事故等对以人为主体的采矿安全的威胁,而且使采矿的效率,包括矿石回收率得到最大的提高。因为有了安全的保障,各种复杂和恶劣条件下的有用矿石都可以开采出来。

瑞典、加拿大的几个矿山,20世纪80年代初即开始通过自动化遥控完成主要的采矿作业。加拿大计划2050年在该国北部边远地区建一个无人矿井,从萨德伯里(Sudbury)通过卫星遥控操纵矿山的所有设备。而目前我国不少矿山就连全盘机械化作业都做不到。因此现在我国全面推开搞遥控智能化无人采矿作业的条件还不成熟,必须结合我国国情,研究适合的研究路线。首先,从总体上来看,我国的采矿技术在许多方面已经接近或达到了国际先进水平,矿山整体差距主要体现在大量矿山的采矿设备比较落后,先进采矿设备主要从国外进口,价格昂贵,这是制约我国采矿进步的关键问题。为了解决上述问题,我国必须加大科技投入,以引进—消化吸收—再创新为基础,立足自主创新,充分利用后发优势,首先在自动化采矿装备的研制方面取得突破,在较短的时间内实现大型自动化采矿设备的国产化。这就为加速我国自动化、智能化采矿技术的推广应用创造了可靠的条件。同时,对一批新建的大型地下金属矿山,从设计一开始就高起点投入,投产后就能实现自动化遥控智能化采矿作业。这批矿山建成后,产量会占我国地下金属矿山产量很大一部分,可以从整体上带动我国自动化、遥控智能化采矿水平上一个台阶。

(6) 为了开发深部大量存在的低品位和贫细杂、难选金属矿产资源,必须研究和开发有特殊效果、低成本的采矿方法和新型高效的选矿工艺、技术和设备。

我国在深部和中深部存在大量的低品位金属矿床。鉴于我国主要金属矿产资源天然

不足,在全世界矿产资源开发利用竞争和制约形势日益激烈的情况下,为了保证国家资源供给的安全,从技术和方法上做好开发这批金属矿床的准备是十分必要的。采用传统的采矿方法和工艺进行这批矿床的开采是完全不可行的。因为采用传统的采矿方法,首先就要从深部开挖矿石并提升出井,然后再经破碎、选矿,将矿石中的有价金属元素回收出来。由于品位低,相比于开挖、提升和破碎、处理的巨大工程量,最终回收得到的金属量太少,金属回收成本非常高,经济上不可行。为此,必须研究和开发具有特殊效果的低成本采矿方法,如原地破碎溶浸和生物回收等采矿技术。由于不需要开挖和提升矿石,不需要破碎、磨矿,成本就会低得多。原地溶浸和生物回收等采矿技术在我国刚刚起步,适用的金属矿种也很少,需要做大量系统性的开拓研究,才能到达大规模推广应用的阶段。

1.4 研究目标

(1) 通过调研,系统掌握我国大中型地下金属矿山的数量、类型、分布及其深部开采的现状、面临的主要技术难题与发展趋势。

(2) 总体掌握国外金属矿深部开采的现状和解决深部开采难题所采取的技术、方法及其研究进展和应用情况,以及我国与之差距和制约条件,为我国开展相关战略研究提供目标和方向。

(3) 系统总结出我国金属矿深部开采面临的关键技术难题,通过具有创新性、可行性和实用性相结合的多学科系统研究,从战略性和前瞻性的高度提出应对和解决这些难题的关键工程科技发展战略、对策建议和实施路线,最终形成满足金属矿深部 5000m 开采要求的创新技术体系,为保证我国深部金属矿产资源的安全高效开采奠定理论基础。

(4) 项目研究成果将为国家相关部门制订产业发展规划和科学研究计划、指南提供参考和依据。

第2章 国外金属矿深部开采现状及其发展趋势

2.1 世界有代表性国家金属矿山深部开采现状

2.1.1 深部开采概念

随着浅部资源的日益枯竭,国内外陆续开始深部资源的开采。21世纪以来,科技部、国家自然科学基金委员会、教育部等机构相继批准了众多关于深部矿床开采基础理论与应用技术的研究项目。国务院批准经费达40亿元的“危机矿山”项目,提出“以矿山外围和深部找矿为主”的原则,显示了对深部资源问题的重视。2009年,中国科学院公布的中国2050年科技发展路线图,提出了“中国地下四千米透明计划”^[1]。

深部矿床开采涉及深部的概念、关键科学理论与技术、发展趋势与远景等一系列问题。对于深部开采的深度界限,迄今为止国内外尚没有统一的标准。

美国西部采矿业以1874年布莱克山金矿的发现为标志,将开采划分为前后两个时期,即浅层开采时期和深层挖掘(即深部开采)时期,也就是说把5000英尺(1524m)定为进入深部开采的深度。南非将1500m的矿井称为深矿井^[2]。俄罗斯学者对于深矿井的划分有两种:一种是两分法,深度为600~1000m的矿井称为深矿井,深度为1000~1500m的矿井称为大深度矿井;另一种是三分法,开采深度超过600m的矿井统称深矿井,其中,第1类矿井深600~800m,第2类矿井深800~1000m,第3类矿井深1000m以上。日本把深部的临界深度定为600m,而英国和波兰为750m^[3],德国为900m。

我国对于深矿井的划分,有多种分类方案:在煤炭系统,有学者依据凿井技术与装备的难易程度将立井井筒深度分为5类,浅井小于300m,中深矿井300~800m,深矿井800~1200m,超深矿井1200~1600m,特深矿井大于1600m^[4];在冶金系统,1990年出版的《采矿手册》第一版将地下金属矿山的开采深度分为:<300m,300~600m,600~900m,1000m左右四挡;<300m为浅部开采,1000m左右为进入深部开采的深度^[5]。2012年9月,国家安全生产监督管理总局启动的“非煤矿山安全科技‘四个一批’项目”,定义800~1200m为深部开采,超过1200m为超深开采^[6]。

谢和平院士认为,深部的概念应该综合反映深部的应力水平、应力状态和围岩属性,深部不是深度,而是一种力学状态。其综合考虑应力状态、应力水平和煤岩体性质三方面因素,提出深部开采的亚临界深度、临界深度和超深部临界深度三个概念^[7],并给出了具体的计算公式。

综上所述,各国对深部矿井的界定深度均有个界定值:日本为600m,德国为900m,