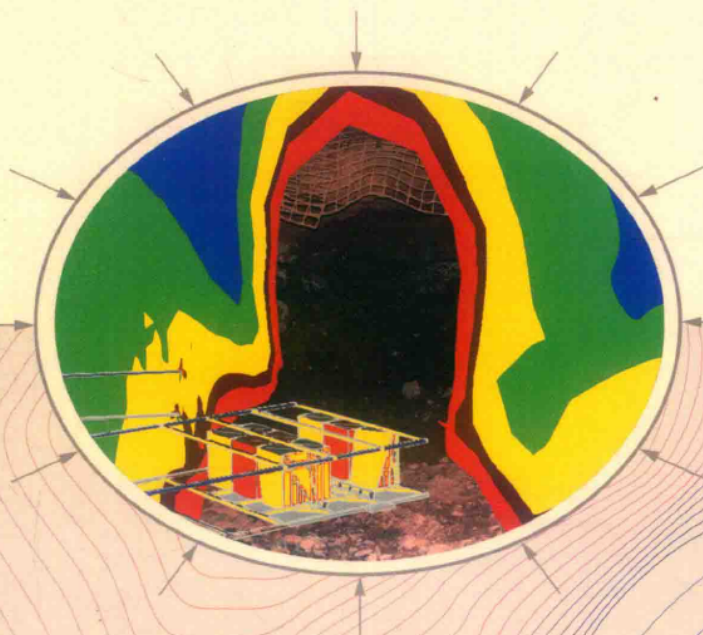


赵兴东 编著

深部硬岩矿床 采动地压与控制

Deep Mining Induced Stress and Controlling Method at
Hard Rock Deposits



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

深部硬岩矿床 采动地压与控制

Deep Mining Induced Stress and Controlling Method at
Hard Rock Deposits

赵兴东 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2019

内 容 提 要

深部采矿已经成为我国采矿工业的重要开采方式。深部开采是处于高井深、高原岩应力、高采动应力、高岩温等特殊条件下的采矿活动,工作研究重点已从浅部岩体结构控制型稳定性研究,转变为深部采动作用下岩体结构失稳与控制研究。

本书概述了深部硬岩矿床采矿发展现状,系统介绍了工程地质、岩体质量分级与岩体力学参数、采动应力原理与分析方法,针对采动作用下岩体破坏特征,详细阐述了深部井巷围岩稳定性分析、深部采场设计与稳定性分析,以及深部采动地压调控理论与方法。

本书可作为高等院校、科研院所采矿工程及其相关专业高年级本科生、研究生的教学用书或教学参考书,也可作为隧道工程、铁路工程、地下工程、水电工程、核废料处置等领域研究人员、技术人员的工作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

深部硬岩矿床采动地压与控制/赵兴东编著. —北京:
冶金工业出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-5024-8063-9

I. ①深… II. ①赵… III. ①硬岩矿山—矿山开采
IV. ①TD8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 038619 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 郑小利 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8063-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019 年 2 月第 1 版, 2019 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.75 印张; 428 千字; 268 页

99.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

本书内容所涉及的研究得到以下基金资助：

国家自然科学基金 NSFC-山东联合基金项目：

胶西北滨海深部含金构造探测与采动灾害防控机理研究（U1806208）

国家重点研发计划：

深部金属矿建井与提升关键技术（2016YFC0600803）

国家自然科学基金面上项目：

基于岩体动力响应特征的岩爆控制方法研究（51474052）

序

随着浅部资源的减少和枯竭,我国金属矿产资源的开采正处于向深部全面推进的阶段。深部矿岩的地质构造、赋存条件以及地应力环境等均与浅部有所不同,深部开采面临高地应力、岩性恶化、高温环境,开采技术条件更加复杂。深部采矿与地压管理必须对已有采矿模式及其工艺技术进行根本变革,优化采矿方法与开采顺序,精准监测开采过程中岩体能量聚集、演化、岩体破裂、损伤和能量动力释放的过程,特别是精准捕捉能量释放的前兆和过程,减少和控制开采开挖引起的扰动能量的聚集,采取能吸收能量的支护措施,阻止和减弱岩爆的冲击破坏作用,减轻和控制岩爆的发生。

作者多年来一直从事采矿地压与控制研究工作,通过对南非、加拿大等国家深井矿山考察、交流,结合我国深井矿山特点,编著了《深部硬岩矿床采动地压与控制》一书。该书针对深部复杂应力环境下采动灾害防控关键问题,从矿山整体含地质构造和岩体质量信息的真实三维建模出发,叠加区域构造应力场,研究深部采动应力理论解算方法;突破传统依据矿床地质与技术经济条件为基础的采矿设计思维,提出采动应力与工程尺度岩体交互作用的采矿设计理论,动态正反演分析包括采动应力的矿山采动岩体多参数响应特征;重点研究局域高采动应力集中致灾机理、发生条件及其影响因素,形成深部采场结构失稳评判准则,分析不同采动条件下深部采场响应特征与表征方法;构建矿山采动灾害风险评估定量矩阵模型,将采动灾害时空位置叠加到三维地质模型中,从

矿山整体掌控采动灾害发生时空位置与概率。基于采动地压与采动灾害时空分布特征,提出采动灾害序次预调控理论,借助宏观采区分布、区域采动顺序、细观采场结构等动态调控并降低深部开采地压集中程度,确保深部采矿活动处于低应力区。针对岩爆等动载作用下采场结构稳定性控制,提出释能支护系统,有效抵抗和控制往复动载作用造成的破坏,为深部采矿设计与灾害防控提供理论与技术支撑。

北京科技大学教授

中国工程院院士



前 言

深部硬岩金属矿床开采已经成为世界矿产资源开发的重要组成部分。对于深部开采，南非、加拿大等国家最具代表性。其中，南非的 South Deep、TauTona、Savuka 等矿开采深度已经达到 3500m，向 4000m 开采深度迈进；加拿大的 Creighton、Kidd Creek、LaRonde 等矿开采深度达到或超过 3000m。南非 South Deep 矿竖井建设深度达到 2990m，美国 Lucky Friday 银铅矿深竖井建设深度达到 2900m。当前，我国深部采矿建设处于加速发展阶段，诸如云南会泽铅锌矿、辽宁思山岭铁矿、山东新城金矿、沙岭金矿、瑞海集团等一批深部开采矿山已经完成或在建 1500m 超深竖井，三山岛金矿、会泽铅锌矿等规划建设 2000m 超深竖井。

与浅部开采相比，深部硬岩矿床开采受高井深（1500~2000m，部分竖井达到 3000m）、高区域构造应力（垂直应力达到 60MPa 以上）、高岩温（40℃ 以上）、高采动应力等特殊开采条件限制，致使深部采矿所处地质构造、区域构造应力场特征、岩体损伤机制以及岩体内能量积聚-迁移-释放规律均发生了显著变化。深部采矿活动打破区域构造应力场平衡，当采场围岩体内累积的采动应力远超其自身岩体强度时，造成采场围岩出现层裂、屈曲、岩爆、脆-延性转化等现象，诱致深部采场产生冒落、垮塌、动力冲击等破坏，矿石损失贫化加剧，严重劣化深部采矿环境，危及生命财产安全，带来重大经济损失，甚至造成矿井停产。例如印度 Kolar 矿开采深度超过 3000m，由于严重的岩爆灾害频繁发生，迫使矿山关闭。因此，对于深部硬岩矿床开采必须充分考虑采动地压对深部采矿的影响，正确认识深部采动地压、系统研究地压活动规律，将是深部采矿必由之路。

自 2009 年以来，作者访问过一些深井矿山、研究机构、大学、咨询

公司等,如南非的 South Deep、Kloof、TauTona、Savuka 矿, Harmony 矿业公司, ISSI 微震监测公司, CSIR、金山大学, SRK 咨询公司等;加拿大 Kidd Creek、Hemlo、Creighton、Coleman 矿,膏体充填公司 (Paste Backfill Company), UBC、多伦多大学, SRK、ESG 咨询公司等;美国科罗拉多矿业学院;俄罗斯乌拉尔矿业公司等。围绕深竖井建设、岩体力学、采矿方法、采矿地压与控制、通风降温等理论与技术难题,进行现场考察、学术交流,深入了解、分析国外深部采矿研究思路、研究方法与发展战略,结合我国深部采矿实际情况开展研究工作。

本书综合国内外深部硬岩金属矿床开采的理论与工程实践,重点阐述深部采动应力分析计算、深部采动岩体破坏特征与分析方法、深部采场设计理论与采动地压调控方法,并按照以下思路展开内容:

(1) 深部硬岩金属矿床开采需从矿山工程地质、岩石力学等基础出发,整体把控区域构造地质、矿区工程地质与矿床地质间的空间结构形态与展布特征;依据工程地质条件、区域构造应力场分布、岩石力学等基础资料,进行岩体质量分级、岩体力学参数计算,构建含工程岩体构造与矿山地质灾害风险等级的矿体三维空间地质模型。

(2) 研究采动应力诱发机理,探讨不同结构形状采场(巷道)的采动应力理论解析与数值计算方法;研究采动岩体损伤、失稳破坏判据,重点分析不同类型采动岩体失稳破坏机理、工程判据、影响因素与触发条件;应用弹性力学、弹塑性力学分析深部井巷受力状态与作用特征,分析深部井巷围岩判定条件、破坏形态、破坏深度、影响因素等,提出深部井巷围岩稳定性评价方法。

(3) 突破依据矿床地质、水文地质、技术经济等影响因素进行的定性采矿设计思想,提出基于深部采动致灾工程岩体响应的采矿动态设计理论与方法,结合深部采矿应力分布规律、作用半径、影响范围及其响应特征;依据深部采动应力与岩体力学特性,构建了深部采场结构设计数学方法,分析、计算深部采场结构参数,定量计算采场结构参数;从

矿山整体出发,叠加矿山地质灾害信息,应用所选的采矿方法与采场结构参数,数值分析不同采动顺序下,深部开拓井巷、采场结构的空问应力状态、采动地压分布规律,研究深部采动致灾机理、发生条件、判别准则与表征方法;借此优化深部井巷开拓系统布局,从矿山整体考虑调整回采顺序。

(4) 根据应力迁移原理,借助矿柱、采场充填、卸压爆破等动态调控深部采动区域应力状态与分布特征,使采矿活动处于低应力区域;在此基础上,基于岩爆、爆破等动力作用下岩体破坏响应特征,提出释能支护系统,研发新型释能锚杆,从而有效控制或减缓深部采动地压危险程度。

在本书的编写过程中,参考了大量国内外相关的研究成果和文献资料,在此谨向这些书籍、报告的作者、出版社致以诚挚的谢意!

感谢博士研究生张姝婧、李怀宾、李洋洋、赵一凡、朱乾坤,硕士研究生郭振鹏、牛佳安、周鑫所做的研究工作;感谢博士研究生曾楠、邓磊,硕士研究生魏慧、黄雪松、郑建新所做的资料整理工作。正是他们的坚持和努力,为本书的成稿奠定了基础。

感谢中国工程院蔡美峰院士在百忙中为本书作序!蔡院士充分肯定了采动地压对深部采矿的重要影响,认为本书的出版对现阶段我国深部采矿地压与防控具有重要的价值,鞭策作者进一步与深部开采矿山生产实践结合,从深部矿床的区域构造应力场与深部岩体工程结构出发,系统深入研究深部采动地压发生过程与致灾机理,对深部采动地压防控提出指导建议。

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评与指正。

赵兴东

2019年元月于东北大学

目 录

1 深部硬岩矿床采矿发展现状	1
1.1 深部硬岩矿床开采现状	1
1.2 深部采矿技术发展现状	4
1.3 深部复杂应力环境下硬岩开采地压研究进展	6
1.3.1 地应力测试及分析	7
1.3.2 深部硬岩采场围岩变形破坏特征	7
1.4 深部硬岩矿床采动应力作用	9
1.5 深部采动地压调控方法	11
1.6 岩爆诱发岩体动力响应特征	12
1.7 矿山释能支护系统	13
1.8 研究内容和方法	15
参考文献	17
2 工程地质	20
2.1 调查内容与方法	20
2.1.1 调查内容	20
2.1.2 调查方法	20
2.2 岩体质量指标 (RQD)	30
2.2.1 RQD 定义	30
2.2.2 测线法确定 RQD 值	32
2.2.3 RQD 值的其他确定方法	34
2.2.4 RQD 的局限性	36
2.3 岩石物理力学性质	36
2.3.1 物理性质	36
2.3.2 力学性质	39
2.4 地应力	40
2.4.1 理论解析法	40
2.4.2 统计回归法	42
2.4.3 地应力现场测量	44
2.5 结构面	45
2.5.1 结构面定义	45
2.5.2 结构面状态	45

2.6 地下水	48
参考文献	49
附表 2.1 工程岩体地质调查表	51
3 岩体质量分级与岩体力学参数	53
3.1 岩体地质力学 (RMR) 分级	53
3.2 修正的采矿岩体地质力学 (MRMR) 分级	56
3.3 巴顿岩体质量分类 (Q)	57
3.4 地质强度指标 GSI	65
3.5 BQ 工程岩体分级	66
3.5.1 分级因素的定性划分	66
3.5.2 分级因素的定量指标	67
3.6 岩体结构分级 (RSR)	69
3.7 R _{Mi} 岩体分级	71
3.8 岩体力学参数	76
3.8.1 Hoek-Brown 强度准则	76
3.8.2 基于岩体质量评价的强度估算	80
参考文献	81
4 采动应力原理与分析方法	83
4.1 采动应力定义	83
4.2 采动应力状态分析	85
4.3 理论解析法计算采动应力	86
4.3.1 圆形开挖结构应力解析	86
4.3.2 椭圆形开挖结构应力解析	92
4.3.3 矩形开挖结构应力解析	97
4.3.4 其他形状开挖形状应力解析	98
4.4 采动应力数值计算方法	98
参考文献	99
5 采动作用下岩体破坏特征	102
5.1 采动作用下岩体破坏类型	102
5.2 层裂	105
5.2.1 层裂破坏形式	105
5.2.2 层裂破坏机理	106
5.2.3 层裂破坏工程判据	108
5.2.4 层裂破坏影响因素	110
5.3 岩爆	111
5.3.1 岩爆定义及分类	112

5.3.2 岩爆发生原因	112
5.3.3 岩爆损伤机理	113
5.3.4 岩爆发生判据	115
5.3.5 岩爆诱发岩块弹射	119
5.3.6 岩爆发生的影响因素	123
5.4 挤压大变形	125
5.4.1 挤压大变形表现与分类	126
5.4.2 挤压大变形发生原因	126
5.4.3 挤压变形判断准则	127
5.4.4 挤压大变形的破坏机理	128
5.4.5 挤压大变形分级标准	129
5.5 结构控制型破坏	134
5.5.1 潜在楔形体识别	135
5.5.2 楔形体稳定性分析方法	137
参考文献	140
6 深部井巷围岩稳定性分析	144
6.1 深竖井围岩应力弹塑性分析	144
6.1.1 深竖井围岩应力弹性分析	144
6.1.2 深部竖井围岩应力弹塑性分析	145
6.1.3 深部竖井开挖扰动应力演化机制	146
6.2 超深井筒受力状态与作用特征	150
6.2.1 超深井筒受力状态	150
6.2.2 超深井筒及其围岩相互作用特征	153
6.3 深竖井围岩破坏类型	153
6.3.1 深部竖井围岩破坏类型	153
6.3.2 竖井围岩失稳类型划分	155
6.4 深部井巷围岩破坏形态	157
6.5 竖井围岩破坏深度	160
6.6 深部巷道围岩应力分析	163
6.6.1 线弹性理论平面应变问题的复变函数解	163
6.6.2 半圆直墙拱形巷道围岩应力弹性分析	164
6.7 深部巷道破坏类型与影响因素	166
6.7.1 结构面控制型	166
6.7.2 应力控制型	168
6.8 收敛-约束理论	170
6.8.1 竖井横剖面变形特性曲线	173
6.8.2 竖井纵剖面变形特性曲线	175
6.8.3 支护特性曲线	176

6.8.4 支护时机选择	179
6.8.5 收敛-约束理论的优点与局限性	180
6.9 井巷围岩稳定性评价	181
参考文献	182
7 深部采场设计方法与稳定性分析	184
7.1 稳定性图表	184
7.1.1 稳定性指数 N'	185
7.1.2 水力半径 HR	188
7.1.3 稳定性图表	191
7.2 深部采场结构尺寸计算	192
7.2.1 理论解析法计算采场尺寸	192
7.2.2 采场跨度设计	196
7.2.3 点柱设计	203
7.2.4 顶柱设计	205
7.2.5 充填设计	208
7.3 矿石贫化及控制措施	211
7.3.1 矿石贫化影响因素	211
7.3.2 矿石贫化计算方法	212
7.3.3 矿石贫化控制措施	213
7.4 采动应力作用下采场顶板破坏	213
参考文献	215
8 深部采动地压防控理论与方法	217
8.1 深部采动地压风险评估	218
8.1.1 地质灾害风险评估	219
8.1.2 矿山地质灾害风险评估流程和内容	220
8.2 深部采动地压调控机理	222
8.3 深部采动地压控制方法	225
8.3.1 采矿顺序	225
8.3.2 隔离矿柱	233
8.3.3 采场充填作用	234
8.3.4 卸压爆破	235
8.4 深部采场(巷道)支护	238
8.4.1 支护原理	238
8.4.2 锚索支护	239
8.4.3 巷道支护	244
8.5 释能支护	252
8.5.1 释能支护原理	253

8.5.2 释能锚杆	253
8.5.3 释能支护设计方法	255
8.5.4 释能支护设计安全标准	256
8.5.5 释能支护设计	257
8.6 挤压大变形巷道支护	262
8.6.1 岩体发生挤压大变形判据	263
8.6.2 岩体发生挤压大变形支护方法	265
参考文献	266

1 深部硬岩矿床采矿发展现状

1.1 深部硬岩矿床开采现状

随着地下浅部矿产资源日趋枯竭,深部采矿已经成为世界采矿的重要组成部分。国外开采深度超千米的金属矿山有 100 余座,主要集中在南非、加拿大、美国、澳大利亚、俄罗斯、赞比亚等国家。

世界上开采深度超过 2000m 的矿山主要集中在南非、加拿大等国家,其中南非有 14 个矿区开采深度超过 2000m,部分矿山开采深度超过 3000m^[1];2015 年,南非大约 40% 的黄金开采在 3000m 以下。世界上开采最深的矿山是位于南非金山盆地西部金矿田的 Tau Tona (Western Deep No. 3 shaft) 金矿 (3900m)、Savuka 金矿 (3900m) 和 Mponeng 金矿 (4500m);1957 年, Tau Tona 金矿开凿 2000m 超深竖井,于 1962 年投产,井下原岩温度达到 60℃。世界上开采深度超过 3500m 的矿山,主要有南非 Kloof 金矿、Western Deep Levels 金矿、East Rand Proprietary 金矿 (3585m) 和 Driefontein 金矿等^[2];2012 年,在南非豪登省的 South Deep 金矿花费 7 年时间,投资 50 亿美元,开凿了世界上最深的竖井 (2991.45m),将开采大约 4.5 亿吨金矿石。在北美,加拿大 Falconbridge 公司的 Kidd Creek 铜金矿开采深度 3120m,采用下向深孔和下向充填采矿,日产矿石量约 7000t;加拿大 Goldcorp 的 Red Lake 开凿 2195m 深竖井;加拿大 Creighton 矿开拓深度达 2550m,采用下向深孔和上向水平充填采矿,日产矿石量 6000~7500t^[3];加拿大 Agnico-Eagle's 公司的 La Rond 金矿开采深度 3048m,其新 4#竖井井底深度超过 3000m,是世界上采用下向深孔空场嗣后充填法开采最深的矿山。美国北爱达荷的 Hecla Lucky Friday 铅锌矿,开凿直径 5.5m、深达 2900m 的深竖井。在欧洲,芬兰开采最深的矿为 Pyhäsalmi 矿,开采深度 1444m;俄罗斯开采最深的矿山为 Skalistaja (BC10) 矿,其竖井提升深度为 2100m;俄罗斯乌拉尔铜矿开凿竖井深度为 1720m,采用 8 绳落地摩擦式提升系统。在亚洲,印度的 Kolar 金矿区有 3 座金矿井采深超过 2400m,其中 Champion Reef 金矿开拓 112 个中段,开采深度达到 3260m,开采诱发严重岩爆灾害,致使该矿已停产关闭^[4]。在澳洲,开采最深的矿山为昆士兰的 Mount Isa 矿,开采深度 1800m。

在国内,金属非金属矿山在建和拟建矿井深度超过 1000m 达到 45 条,主要有辽宁抚顺红透山铜矿 (1600m)、本溪思山岭铁矿 (1506m)、本溪大台沟铁矿 (1500m)、鞍山陈台沟铁矿 (1300m)、辽阳弓长岭铁矿;山东济宁铁矿、新城金矿 (1527m)、三山岛金矿西岭矿区 (1800m?)、中金山东沙岭金矿 (1633m)、莱州招金瑞海矿业 (1500m)、金青顶矿区 (1260m);云南会泽铅锌矿 (1526m)、大红山铁矿;吉林夹皮沟金矿 (1500m);安徽冬瓜山铜矿、泥河铁矿;湖北程潮铁矿 (1160m);湖南湘西金矿;贵州道坨锰矿 (1500m);新疆阿舍勒铜矿 (1424m) 等。

其中,本溪思山岭铁矿矿体埋深达到 2000m 以上,其铁矿石储量 24.87 亿吨,平均

品位 TFe31.19%, MFe19.05%; 为有效开采深部矿体, 共设计 7 条竖井开拓, 包含 2 条主井 (1505m)、1 条副井 (1503m)、1 条进风井 (1150m)、1 条措施井 (1320m)、2 条回风井 (1 条 1400m、1 条 1120m)^[5]; 辽宁大台沟铁矿在 8~23 线地段进行钻探, 共施工 35 个钻孔, 见矿深度一般在 1100~1400m, 终孔深度在 1701~2465m, 探明铁矿石资源储量 52 亿吨, 远景储量在 100 亿吨以上, 目前在 1 号坑建 1250m 深探矿井^[6]; 云南会泽铅锌矿探矿 3#明竖井, 井口地平基准标高 2380m, 井底标高 854m, 井深 1526m, 井筒断面直径为 6.5m, 井下设 4 个马头门, 井口段采用钢筋混凝土支护, 厚度 1000mm, 井筒基岩采用混凝土砌衬, 井壁厚度 400mm, 在竖井开凿至 1400 余米时, 井筒出现岩爆、大量涌水, 严重影响井筒正常施工。提升选用 1 台摩擦式提升机, 14m³底卸式箕斗和 4800mm×1800mm 罐笼^[7]; 辽宁抚顺红透山铜矿七系统探矿工程, 由 -827m 中段以下新开拓至 -1253m 中段, 盲竖井井底深度已达 1600m, 在该盲竖井施工深至 1400 余米 (-1137m) 时, 井筒围岩产生岩爆现象; 山东黄金集团新城金矿在建 1527m 深竖井, 井筒穿过断层、含水岩层, 施工困难; 三山岛金矿西岭矿区勘探出矿体多赋存于 -700m 以下, 在 -1800m 深时矿体仍未封闭, 其赋存深度达到 2060.5m, 估算金属储量近 200t, 拟建 2000m 超深竖井; 贵州道地锰矿拟建 1500m 深竖井; 会泽铅锌矿拟建 2000m 超深竖井; 中金集团沙岭金矿主井设计深度 1598.5m, 副井设计深度 1633.5m。河北邯郸磁西、万东和史村煤矿煤层埋深 900~1800m, 在磁西煤矿 1#井建成 1320m 深竖井^[8]。由此可见, 在我国未来的 5~10 年之内, 拟建或在建 1500~2000m 深竖井将达到 10 条以上。

综上分析, 南非在 1952 年开始建设 2000m 深竖井, 当前国外竖井建设深度近 3000m; 南非矿体薄、缓倾斜, 主要采用竖井和平巷开拓, 采用充填法与长壁法开采; 加拿大矿体厚大、倾角较陡, 多采用竖井和斜坡道联合开拓, 机械化程度高, 采用空场嗣后充填采矿、下向充填采矿与进路式采矿方法。当前, 我国竖井建设深度达到 1500m, 未来 5~10 年, 我国将建设 2000m 超深竖井; 南非深井采矿主要开采黄金、钻石和铀矿; 加拿大主要开采镍、铜、金等贵金属, 且其矿石品位高, 矿山开采规模在 8000t/d 左右; 我国深井开采矿种为铁矿、铜矿、锌矿、金矿、锰矿等, 相比矿石品位低, 需要规模化开采来保证矿山企业经济效益^[9]。

对于深部矿产资源的开采和研究工作, 南非一直走在世界的前列。在 1998~2002 年, 南非开展深部采矿计划 (Deep Mine Programme), 研究金山矿田 3000~5000m 金矿安全高效开采, 主要围绕高原岩应力及其开采诱发的岩爆、高温、通风制冷技术、高垂深及长水平距离人、材料及岩石运输等技术开展研究^[10]; 2001~2004 年, 南非开展未来采矿计划 (Future Mine Programme), 主要针对矿产资源管理、开采技术、工作组织培训、职业环境、通信技术等开展研究。南非深井开采研究计划及超深开采研究成果已经成为未来深井采矿设计准则及实践基础。加拿大政府通过与矿业公司联合, 成立了采矿革新研究中心 (CEMI), 主要致力于地质勘探、深部采矿、原岩应力、岩温、采矿自动化以及矿山环境、可持续发展研究。

在深部开采条件下, 原岩应力达到 95~135MPa, 达到或远超过岩体强度, 在深部采动条件下无疑使深部矿体安全、高效开采面临更多挑战^[11]。深部采矿将导致井下岩爆灾害频发, 严重的岩爆冲击常造成井下作业人员伤亡、矿石损失贫化严重、井巷开拓系统破坏、支护困难; 对于深部硬岩开采另外一个难题是高岩温, 例如: 南非金山区域深部井下

开采原岩温度高达 45℃ 以上，应用大功率制冷站使井温度降低到 28℃，确保工人能够在井下工作^[12]。高井深提升装备，囿于钢丝绳自重，目前最长提升钢丝绳长度约为 3km，钢丝绳自重 70t，而罐笼能够运输有效荷载为 10t。由于矿井开采深度限制，井下开拓系统受矿体形态影响，长距离运输人员、材料、岩石非常耗时、耗能，需要快速转运（送）工人、材料等到采场工作面。快速开凿超深竖井、开拓平巷是加快矿山投产的重要保证。深井开采有两个要求，即：深部矿体回采能力（在深部能够回采）和快速到达采场能力。对于深井开采而言，最终（后）的限制是开采深度；随矿井开采深度的增加，原岩应力不断增加，但最终限制人类开采的最严重问题是热害。在深井开采中涉及十项关键技术，即：深竖井设计、长钢丝绳选择、深竖井开凿、提升设备选择、通风降温技术、开拓、回采方法、采场支护、微震管理及三维地下成像。

“深部（井）开采”和“深竖井”两个词应用非常广泛。深井开采主要与岩石类型、原岩应力和岩温等条件直接相关，判断是否进入深井开采，通常考虑勘探、采矿、支护以及监测的岩体力学性质、岩温条件、开采方法和破岩以及人员、材料和岩石转运等因素的特殊性，尤其是工程地质条件、采掘技术、地压控制和矿井通风等差异性变化。在南非，深井开采指矿山开采深度超过 2300m，原岩温度超过 38℃ 的矿山；超深井开采指其开采深度超过 3500m 的矿山。加拿大定义超深井开采指开采深度超过 2500m 以下，既能保证人员和设备安全，同时矿山能获得经济效益的矿山。德国将埋深超过 800~1000m 的矿井称为深井，将埋深超过 1200m 的矿井称为超深井开采；日本把深井的“临界深度”界定为 600m，而英国和波兰则将其界定为 750m^[13]。我国深部开采指开采深度超过 800m 的矿山；深竖井指矿井建设深度在 800~1200m 之间的竖井；超深井指矿井建设深度超过 1200m 深的竖井。国外对采矿深度定义见表 1.1。

表 1.1 矿山开采深度划分及其特征

序号	深度	深度等级	评 价
1	<500m	非常浅	硬岩开采矿山，主要以结构面控制型破坏为主
2	500~1000m	浅部	一些露天开采矿山属于深部开采；对于此深度的地下硬岩矿，将会产生一定应力破坏问题
3	1000~1500m	中等深度	对于采煤而言，该采煤深度为最深开采深度，属于兆深开采；对于硬岩金属矿山，属于应力和结构面控制型破坏共同作用区域，造成采场（巷道）发生明显破坏
4	1500~3000m	深部	应力破坏为主，应力量测和分析是最大挑战
5	3000~4000m	超深	逻辑上稳定性问题是最大挑战
6	>4000m	兆深	此深度无开采经验，无水区域

近年来，作者对南非、加拿大、俄罗斯等多个超深井开采矿山考察发现，深部硬岩金属矿床开采矿山岩爆灾害频发、原岩温度高、矿石损失贫化严重，不同深部采场围岩变形破坏表现见图 1.1，不同开采深度采场围岩应力变化特征参数见表 1.2。因此，对于深部开采矿山，应从矿山整体出发，以地质勘探和岩石力学为基础，构建矿山地质风险评估模型，叠加矿山原岩应力信息和岩体力学参数，以采动应力为基础进行采场结构设计和充填材料选择，充分考虑矿山整体开采顺序与地压调控顺序，借助隔离矿柱、充填强度，减缓