

深部开采

# 深部厚大矿体高效开采技术与应用

Efficient Mining Technologies and Their Application in Deep Thick Massive Ore Bodies

刘育明<sup>1,2</sup>, 张少杰<sup>1,2</sup>, 张爱民<sup>1,2</sup>, 吴昊燕<sup>1,2</sup>, 李文<sup>1,2</sup>, 杨志国<sup>1,2</sup>,  
吴世剑<sup>1,2</sup>, 王志远<sup>1,2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**深部安全高效开采是我国金属矿产资源开发面临的迫切问题。尽管近些年来我国深部金属资源开采技术进步很快,但由于起步较晚,相比矿业发达国家仍存在一定差距。本文通过对国内外深部金属厚大矿体开采工艺和技术现状的全面调研,总结了我国深部厚大矿体开采的特点,介绍了国际上深部厚大矿体开采案例,详细阐述了国内深部厚大矿体充填法开采实践,以期创新形成以安全保障为前提、绿色低碳为要求的千米以深千万吨级金属矿开采新模式,为我国正在面临深部厚大矿体开采的矿山提供指导和借鉴。

**关键词:**特厚大矿体; 高效开采; 采矿方法; 充填

**中图分类号:** TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0001-09

**Abstract:** Safe and efficient deep mining is an urgent problem facing the development of metal mineral resources in China. In recent years, remarkable progress has been made in China's mining technology. However, owing to a relatively late start, there remains a certain gap compared to mining-developed countries. Through a comprehensive investigation of the current state of deep thick massive ore body mining technologies at home and abroad, this paper summarizes the characteristics of deep thick massive ore body mining in China. It introduces international case studies of deep thick massive ore body mining, and elaborates in detail on China's practical experiences with backfill mining of these deposits. The aim is to innovate and establish a new mining model for mines of ultra-deep (exceeding 1 000 meters) and 10 million tonnes per year production rate, prioritizing safety and green, low-carbon requirements, thereby providing guidance and reference for mines in China currently confronting the challenges of deep thick massive ore body extraction.

**Key words:** thick massive orebody; high-efficiency mining; mining method; backfilling

## 1 前言

面向我国战略矿产资源保供需求,立足我国深部矿产资源的显著特征,针对千米以深厚大矿体年千万吨级超大规模绿色开采面临的问题<sup>[1-5]</sup>,本文从深部厚大矿体开采的特点、国际上深部厚大矿体开采案例、国内深部厚大矿体充填法开采实践三方

面展开论述,以期创新形成以安全保障为前提、绿色低碳为要求的千米以深年千万吨级金属矿开采新模式,创建新理论、新技术,形成可推广的深部厚大矿体高效绿色开采技术体系,全面提升我国深部矿产资源大规模绿色开发能力。

## 2 深部厚大矿体开采的特点

我国矿产资源开发的趋势和特点,主要有:

(1)深:深部矿床(开采深度>1 000 m)。随着浅地表矿产资源开采殆尽,向地球深部索取资源已成为必然发展趋势,未来10年我国约1/3的地下金属矿山将转为深部开采阶段。如金川镍矿、冬瓜山铜矿、三山岛北部海域金矿、三山岛西岭矿区、水旺庄金矿、贵州开阳磷矿深部、大坪磷矿、高地锰矿等。

[作者简介] 刘育明(1964—),男,湖南衡山人,正高级工程师,中国恩菲工程技术有限公司副总工程师,主要从事金属矿山设计咨询、技术研究和工程管理工作。

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFC2907201)“金属矿深部大盘区无矿柱连续化开采技术与装备”

[引用格式] 刘育明,张少杰,张爱民,等.深部厚大矿体高效开采技术与应用[J].中国矿山工程,2025,54(4):1-9.

(2)大:需要采用地下开采的大型矿床(资源量在几亿吨~几十亿吨)越来越多,相应的开采规模也越来越大(500万t/a~3000万t/a),如思山岭铁矿、西鞍山铁矿、大台沟铁矿、马城铁矿、济宁铁矿、陈台沟铁矿、沙坪沟钼矿、岔路口钼多金属矿等,资源量均超过十亿吨。

(3)贫:贫矿资源多。如普朗铜矿、紫金罗卜岭铜矿区、金堆城钼矿(深部)、新疆多个铜矿等大型贫矿。

(4)难:复杂难采矿床(高寒高海拔地区、大水矿山、矿岩破碎矿床等),如新疆火烧云铅锌矿(露采)。

(5)海外矿产资源:“一带一路”国家,如非洲(赞比亚、刚果金等)、欧洲(塞尔维亚等)、东南亚、中亚、南美等。

国内部分典型深部厚大矿体的地质剖面如图1~图3所示。

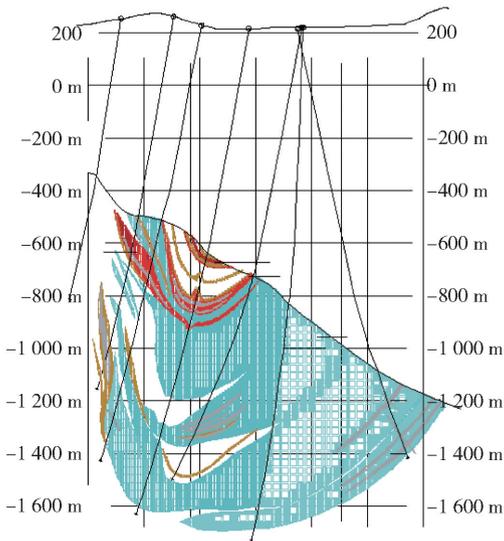


图1 某铁矿1地质剖面图(每大格200m)

国内深部开采起步较晚,但发展迅速。目前最大开采深度约1600m。深部厚大矿体,这里特指水平厚度大致在100m以上的矿体,如冬瓜山铜矿、金川二矿区等。

国内深井超大规模矿山(包括在建或准备建设)主要有:思山岭铁矿(超深超大,1500万t/a)、西鞍山铁矿(超大,3000万t/a)、陈台沟铁矿(超深超大,1100万t/a)、马城铁矿(超大,2200万t/a)、大台沟铁矿(超深超大,1500万t/a以上)、济宁铁矿(超深超大,2000万t/a~3000万t/a)、罗河铁矿

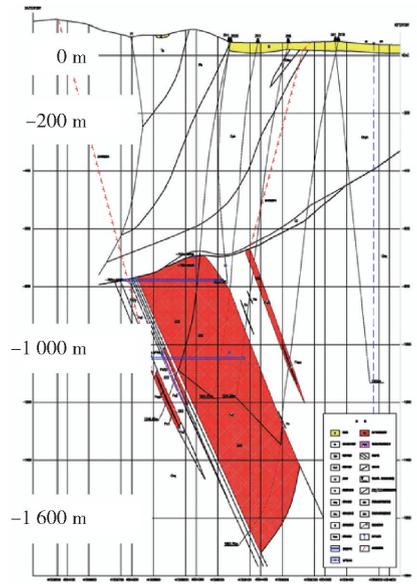


图2 某铁矿2地质剖面图(每大格200m)

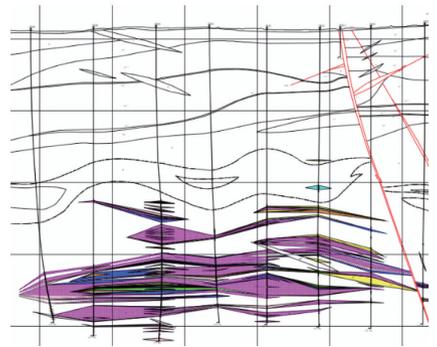


图3 某铁矿3地质剖面图(每大格200m)

(未来深井超大,1000万t/a)、马坑铁矿(深井超大,1000万t/a)、岔路口钼矿(超深超大,1650万t/a)、沙坪沟钼矿(深井超大,1000万t/a)。上述矿山的显著特点是:矿体特别厚大,水平厚度在100m到几百米厚。这些矿山采用的采矿方法主要为大直径深孔(或分段)空场嗣后充填法。

深部厚大矿体充填法开采,由于矿床埋藏深带来了高地压、高地温、高渗透水压、大提升高度等条件,加上矿体特别厚大(大于100m),结合大规模大面积开采对岩体产生的强扰动,多重因素叠加,使深部厚大矿体开采的难度较浅部和一般厚度矿体开采的难度要大很多,形成了深部厚大矿体充填法开采的技术难题和技术要求,具体如图4所示。规避动力灾害和高效顺畅组织生产是深部厚大矿体充填法开采的核心,本文后续重点围绕这个方面进行探讨。

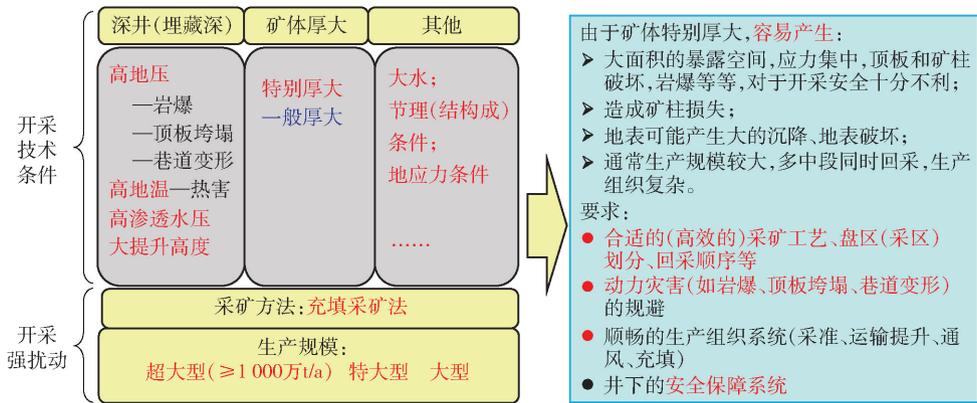


图4 深部厚大矿体充填法开采的技术难题和技术要求

### 3 国际上深部特厚大矿体开采案例

国外在深部矿产资源开发方面起步早,超千米深井矿山主要分布在南非、加拿大、美国、澳大利亚、俄罗斯等国家。国际上深部厚大矿体主要以自然崩落法开采为主,主要的矿山有智利 El Teniente 铜矿<sup>[6]</sup>、智利 Chuquicamata 铜矿<sup>[7]</sup>、南非 Palabora 铜矿<sup>[8]</sup>(采深超过 1 500 m)、印尼 Grasberg 铜矿<sup>[9]</sup>,最大规模达 16 万 t/d(即 5 000 多万 t/a)。瑞典的 Kiruna 铁矿采用无底柱崩落法,开采深度已达 1 400 m。

国际上深部厚大矿体(指厚度特别大的)采用充填法开采的矿山相对比较少,主要有澳大利亚 Mount Isa 矿<sup>[10]</sup>、澳大利亚 Olympic Dam 矿<sup>[11]</sup>、芬兰 Pyhasalmi 矿<sup>[12]</sup>、加拿大 LaRonde 矿<sup>[13]</sup>等,但生产规模相对国内的超大型矿山来说要小很多,且基本上没有在铁矿采用充填法开采的。采矿方法主要采用人员不需直接进入采场的采矿方法,如大直径深孔空场嗣后充填采矿法、分段空场嗣后充填采矿法等。在地压控制方面,在安排采矿方法和回采顺序时充分考虑各主应力的方向,使应力得以分散,减小集中应力,趋利避害,图 5 所示为金字塔式无矿柱连续回采采矿法和回采顺序。

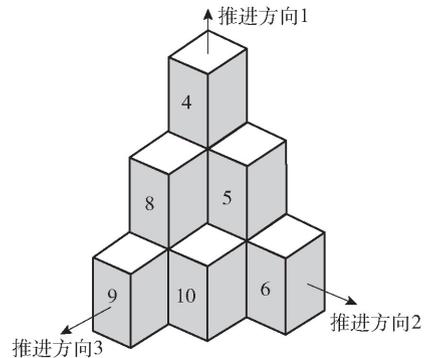


图5 金字塔式无矿柱连续回采采矿法和回采顺序

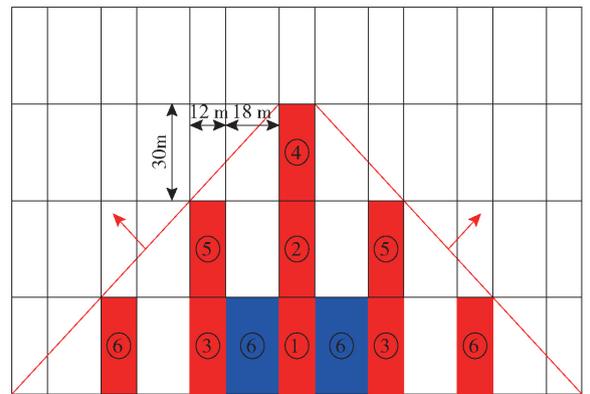


图6 加拿大 LaRonde 矿开采顺序纵剖面示意图

矿体高度从 30 m 到最大超过 250 m。采矿方法为分段空场法(嗣后充填)。采场主要参数:平面尺寸 40 m × 40 m,高为矿体高度,最大达 250 m;深部采场平面尺寸改为 25 m × 25 m。采矿顺序:从北向南进行,中间留下了垂直走向布置的矿柱(40 m 宽),但矿柱也最终回采。充填:膏体充填。平面图如图 7 所示。

芬兰 Pyhasalmi 矿位于芬兰中部,Outokumpu Mining Ltd 在 1958 年发现了这个锌铜矿床,矿石储

加拿大 LaRonde 矿,产量 7 200 t/d,是以金为主的多金属矿。采深在 2 000 ~ 3 000 m。采用垂直走向或沿走向的深孔空场嗣后充填法开采。参数:采场宽 13.6 ~ 16.5 m,长 30 m,高 30 m。采矿顺序:金字塔式采矿顺序(第一和第二步骤),具体如图 6 所示。充填:膏体充填,胶结块石充填(第一步骤);不加水泥的块石充填(第二步骤)。

澳大利亚 Mount Isa 矿,生产规模 600 万 t/a。铜矿体从南到北长近 3 000 m,东西最大长约 500 m,

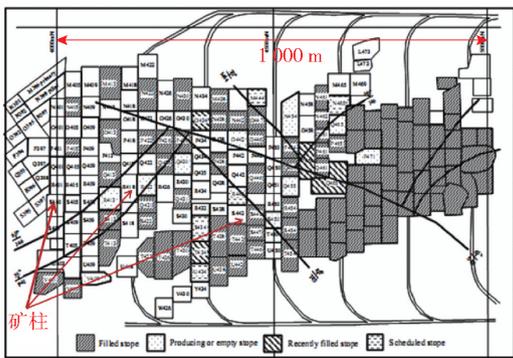


图7 Mount Isa 矿 1 100 m 中段平面图

量超过 3 000 万 t。1962 年开始采用露天开采,直到 1976 年之后转为地下开采。20 世纪 90 年代初发现了深部 1 000 ~ 1 410 m 矿床。深部工程于 2001 年投产。2013 年被加拿大公司 First Quantum Minerals Ltd 收购。Cu-Zn 硫化矿床,矿体倾角 70°,从地面延伸到地下 1 400 m。最大矿体长度 650 m,宽度达到 100 m。最大主应力随深度增加而增加,400 m 水平约 45 MPa,1 125 m 水平 66 MPa,在矿山最深处将超过 80 MPa。在 1 125 m 水平主应力方向是 308°。2016 年矿山的产量是 138 万 t, Cu1.10%, Zn1.61%, S41.41%。矿石通常是非常坚固的黄铁矿,单轴抗压强度为 92 ~ 202 MPa。上盘和下盘岩石主要是长石火山岩,带有窄的铁镁质夹层和铁镁质火山岩。火山岩的单轴抗压强度大约是 180 MPa。滑石片岩出现在下盘接触带附近,单轴抗压强度为 62 MPa。原岩  $Q'$  值为好到非常好, RQD 值约为 90%。1 050 m 以下矿体厚大,深部矿体水平投影长 422 m,宽 202 m,总高度 371 m。平面上,矿体在每个水平的实际长度有 200 ~ 250 m,宽 100 ~ 200 m。深部主要采用垂直走向布置的分段空场法(嗣后充填)。采场布置长轴方向平行最大主应力方向,以避免大的应力破坏。采场尺寸:第一步骤宽 15 ~ 18 m,第二步骤采场宽 20 ~ 25 m,采场长 30 ~ 80 m,长轴方向基本上和主应力方向一致,采场高 25 m。采矿顺序是从矿体的一侧(即上盘)向另一侧推进,从下水平向上水平推进。采场打下向中深孔,凿岩巷道和出矿巷道均位于采场的中央。采用 AutoMine-Lite 系统,遥控铲运机出矿。

## 4 国内深部厚大矿体充填法开采实践

### 4.1 冬瓜山铜矿

冬瓜山铜矿的地表和矿体的三维模型如图 8 所示。冬瓜山铜矿矿床具有埋藏深、高应力

(38 MPa)、高温(39 °C)、高硫、有岩爆倾向等特点。矿山建设规模 13 000 t/d,2004 年底建成。主要开采 60 线以南 -850 m 水平以上主矿体及 60 线以北深部矿体。60 线以南设有 -670 m、-730 m、-790 m、-850 m、-875 m 中段,最低开采中段为 -850 m,有轨运输中段为 -875 m,采用主井-副井-辅助井开拓。60 线以北设有 -730 m、-790 m、-850 m、-910 m、-980 m、-1 000 m 中段,最低开采中段为 -980 m,有轨运输中段为 -1 000 m,采用胶带斜井开拓,与 60 线以南主井相衔接。冬瓜山铜矿开拓系统纵投影如图 9 所示。

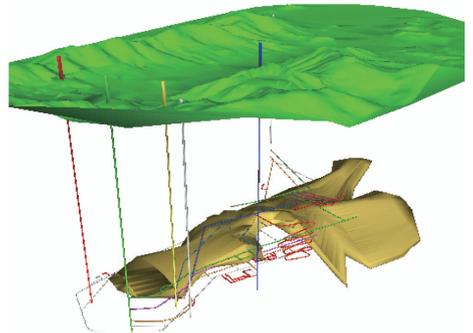


图8 冬瓜山铜矿三维模型图

盘区布置:沿走向划分盘区,宽度 100 m,盘区长度为矿体水平厚度,开采平面如图 10 所示。盘区之间暂留隔离矿柱(宽 18 m),后续回收。采场方向沿矿体走向,长度为 78 m(尾砂充填采场)或 82 m(胶结充填采场),宽度 18 m。

采矿方法及装备:采用“隔一采一”的回采顺序,即先采矿房,回采结束后用胶结充填,再采矿柱,回采结束后用尾砂充填,充填示意图如图 11 所示。采准拉底采用 Simba H1354 凿岩台车向上打扇形孔。回采采用 Simba 261 潜孔凿岩台车,在凿岩硐室内按网度要求凿下向平行孔。出矿采 LH514E 电动铲运机将崩落的矿石装卸入盘区溜井,废石采用 MT2010 卡车运输至井下采空区回填。目前 60 线以南 -850 中段以上主矿体一、二步骤采场已开采完毕,目前正在回采隔离矿柱,局部矿岩分界处地压显著,有开裂、垮塌发生。

### 4.2 金川二矿区

金川镍矿位于甘肃省金昌市,是我国重要的镍生产基地。金川二矿区矿体埋藏深、地应力高、矿体厚大、矿岩松软破碎且具有蠕变性,极不稳定,以“富、大、深、碎”而闻名,是目前国内外罕见的高应力特大型难采金属矿床。金川矿区的地质构造如图

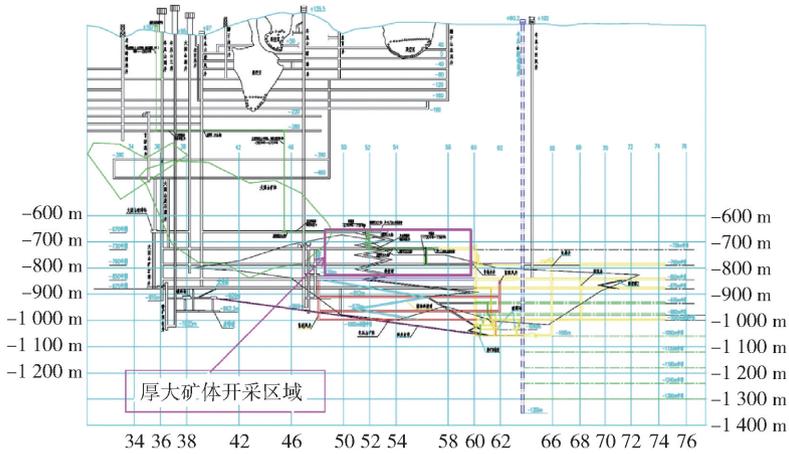


图9 冬瓜山铜矿开拓系统纵投影图

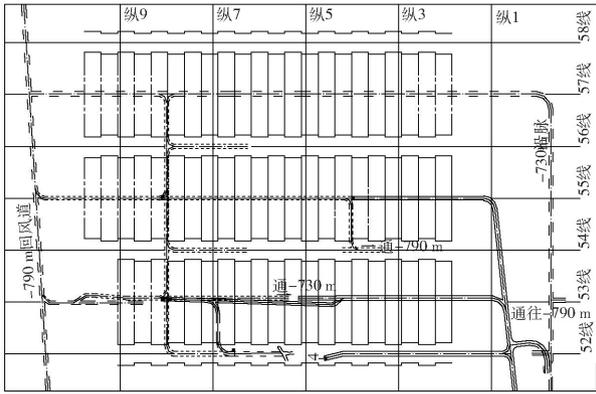


图10 冬瓜山铜矿主矿体开采平面图

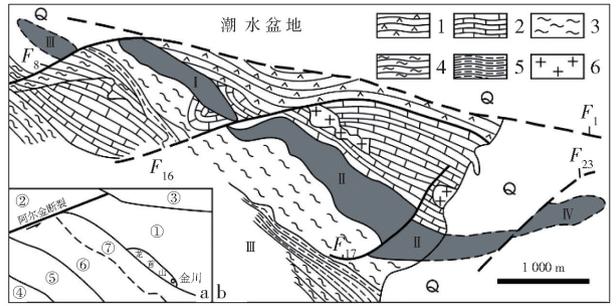


图12 金川矿区地质构造简图

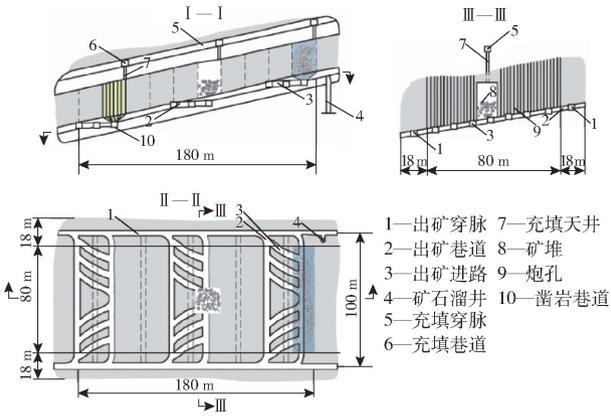


图11 冬瓜山铜矿大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿示意图

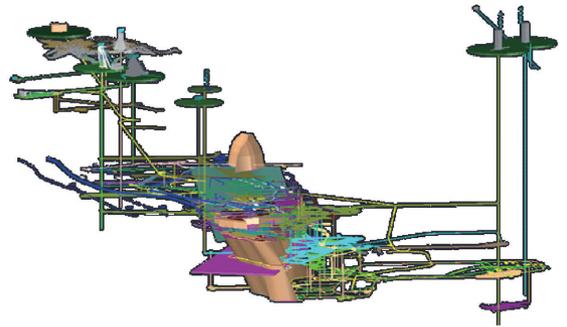


图13 金川二矿区开拓系统与矿体三维模型

12所示,矿区内断层纵横交错。近年来二矿区矿石生产能力为430万t/a,开拓系统与矿体三维模型如图13所示。采矿纵投影如图14所示,目前采深超过1000m,矿体厚度一般大于100m。

二矿区的采矿方法为机械化盘区下向进路式胶结充填采矿法,充填工艺主要为棒磨砂高浓度胶结

充填,上下采区(中段)同时回采。采场结构参数:宽100~120m,长为矿体厚度;进路长50m左右,宽×高为5.0m×4.0m。双臂凿岩台车凿岩,6m<sup>3</sup>柴油铲运机出矿。每个盘区同时3个工作面作业,兼顾转层等时间,盘区生产能力为1000t/d。目前1000m中段和850m中段同时回采。随着上下采区(中段)同时向下回采,中段之间的水平矿柱厚度越来越小(即越来越薄),为此中国恩菲对金川二矿区多中段同时回采的水平矿柱的应力和变形的状态进行了系统的模拟,对应力重分布和塑性区演化进行了详细解析<sup>[14-15]</sup>。模拟出来的结果和实际生产

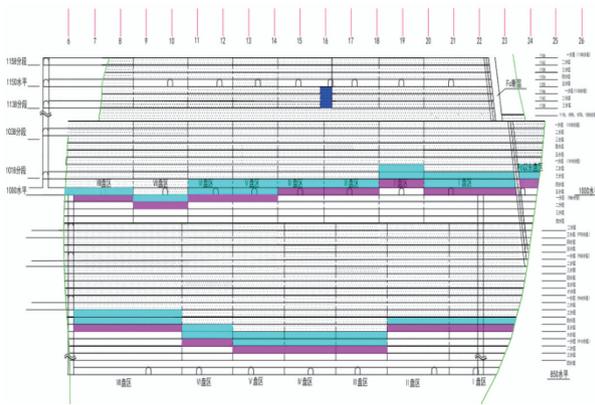


图 14 采矿纵投影图

中的状态现象非常吻合。

金川二矿区 14 行剖面图和开采标高如图 15 所示。

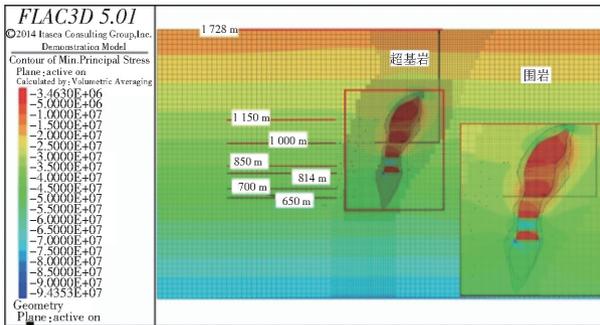


图 15 金川二矿区 14 行剖面图和开采标高示意图

第 36 步回采后的最大主应力场如图 16 所示。第 36 步回采,三个中段对应底板高度为 1 012 m、916 m 和 820 m,此时 1 000 m 水平矿柱高 8 m,850 m 水平矿柱高 64 m。1 000 m 矿柱应力集中不明显;850 m 矿柱应力集中,最大主应力高达 88.62 MPa,塑性区呈 X 型。

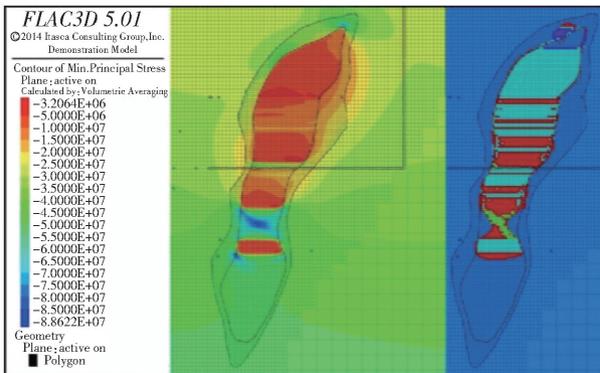


图 16 金川二矿区第 36 步回采后的最大主应力场

第 39 步回采,两个中段对应底板高度为 904 m 和 808 m,此时 850 m 水平矿柱高 52 m。850 m 矿柱应力集中,且对应塑性区尚未贯通。808 m 水平两端下方应力集中最为显著,最大主应力高达 94.35 MPa。

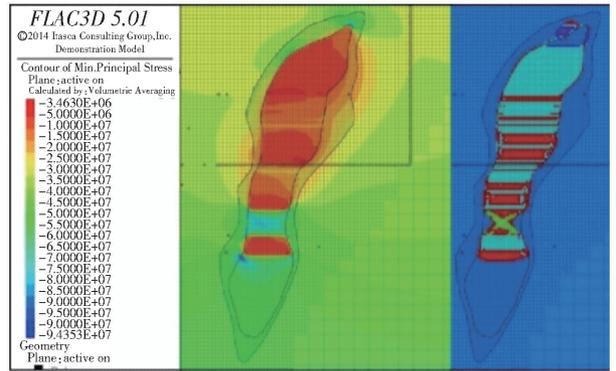


图 17 金川二矿区第 39 步回采后的最大主应力场

第 41 步回采后的最大主应力场如图 18 所示。第 41 步回采,两中段对应底板高度为 896 m 和 800 m,此时 850 m 水平矿柱高 44 m。850 m 矿柱应力集中不再显著,且对应塑性区尚未贯通。808 m 水平两端下方应力集中最为显著,最大主应力高达 100.8 MPa。

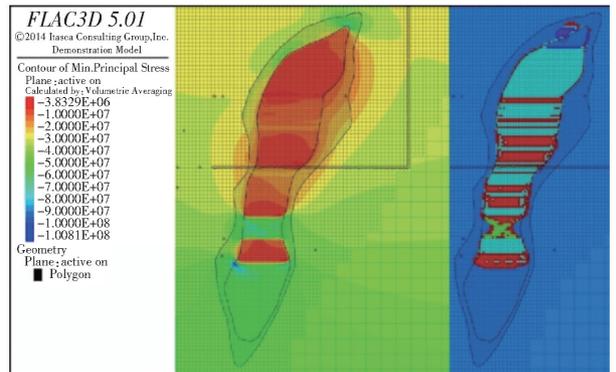


图 18 金川二矿区第 41 步回采后的最大主应力场

第 44 步回采后的最大主应力场如图 19 所示。第 44 步回采,两中段对应底板高度为 884 m 和 788 m,此时 850 m 水平矿柱高 32 m。850 m 矿柱应力集中不显著,且对应塑性区即将贯通。788 m 水平两端下方应力集中最为显著,最大主应力高达 100.66 MPa。

850 中段矿体的开采显示了应力集中不断向下转移的过程,随着 700 m 中段矿体的开采,850 m 矿柱应力集中水平先升高后逐渐降低。当 850 m 水平矿柱厚度达到约 68 m 时应力集中最明显,对应塑性

第 39 步回采后的最大主应力场如图 17 所示。

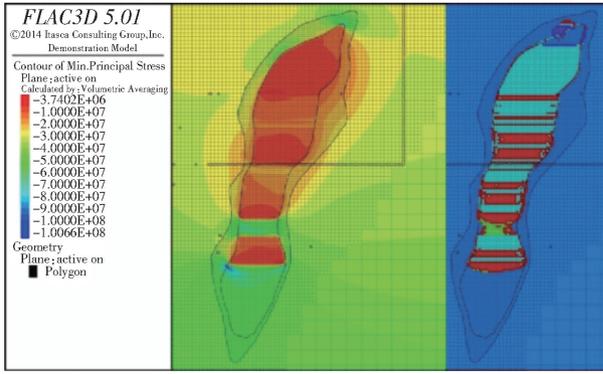


图19 金川二矿区第44步回采后的最大主应力场

区呈漏斗型相接,之后应力集中程度逐渐减弱,700 m中段开采水平左下侧应力集中程度随之增加。当850 m水平矿柱厚40 m左右时,850中段开采水平以上围岩基本进入卸压区,矿柱也逐渐进入卸压区。

纵观双中段或三个中段同时开采,每个开采水平上下均产生一定范围的卸压区,下向凹形卸压区尤为明显,对应曾经发生剪切破坏的塑性区。开采过程中产生的较大的应力集中区仅在矿体内部,对周边围岩及开拓系统影响不大。

将模拟结果与矿山实际情况相对比,发现两者非常吻合。现实中当两个中段开采快接近时,水平矿柱的矿岩比上部各层的岩石更加破碎,但此时基本上不存在大的应力,原因是此处的岩体已经经过塑性破坏,岩体已处于卸压状态。

### 4.3 安徽某铁矿

安徽某铁矿于2014年9月正式投产,2023年扩产至500万t/a。以-620 m标高为界分两期开采。目前一期开采-620 m水平以上矿体。矿床东西方向长2.3 km,南北方向宽1.5 km,厚度1.9~115 m。倾伏角 $3^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 。

矿山采用主井+副井+斜坡道开拓。以8号勘探线为界划分东、西采区;东区设有-620 m、-600 m、-560 m、-540 m和-455 m中段;西区设有-620 m、-600 m和-540 m中段。-540 m中段平面图如图20所示。水平最大主应力方向为NE $38^{\circ}\sim 79^{\circ}$ ,近似矿体走向方向。采矿方法为垂直深孔阶段空场嗣后充填法和分段空场嗣后充填法,充填采矿法如图21所示。盘区尺寸为126 m $\times$ 70 m,分两步聚回采,矿房和矿柱的宽度均为18 m,采场长度为70 m,采场高度最高为85 m。采准拉底采用QZCT90Y型凿岩台车向上打扇形孔。回采采

用Simba 361潜孔凿岩台车,在凿岩硐室内凿下向平行孔或倾斜孔。出矿采用LH514、LH514E、WJ-6等型号铲运机将矿石铲运至盘区溜井,部分铲运机实现远程遥控出矿。坑内矿石采用无人驾驶电机车运输。

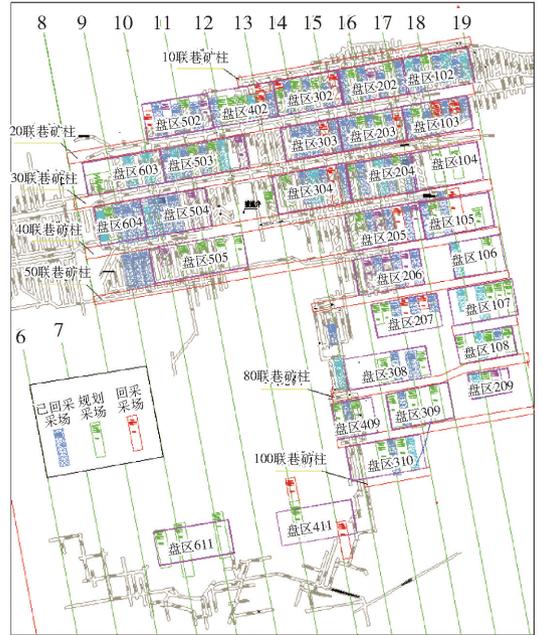


图20 安徽某铁矿-540 m中段平面图

经过多年回采,盘区之间联巷矿柱(矿柱内布置有溜井)大部分基本稳定。局部采场上部凿岩硐室矿柱片帮严重。二步采场底部结构部分出矿穿脉之间的间柱片帮。局部二步采采场采准施工的过程中出现矿岩向外冲击现象。保护出矿穿脉的部分“三角矿柱”出现坍塌现象,大多三角矿柱不具备回收条件。30联巷矿柱属于“脆性”矿岩,地压显现较为明显,矿柱变形如图22所示。目前在40联巷矿柱开展矿柱回收试验,试验很成功。

### 4.4 思山岭铁矿

思山岭铁矿为国内第一个超大规模超深井矿山,探明资源量为24.84亿t,矿体埋深为404~1934 m,工业矿体总厚度为789.29 m。设计矿石生产规模为1500万t/a,分期投产(750万t/a+750万t/a)。下采区(-1020 m中段)750万t/a开采系统于2023年底建成试生产,2024年正式生产。首采中段为-1020 m中段,距地表深为1200~1300 m,根据地应力测量结果,计算在该水平的最大水平主应力约为47~51 MPa,属于“高地应力”矿区。

针对特厚大矿体的特点和大产能的要求,在基

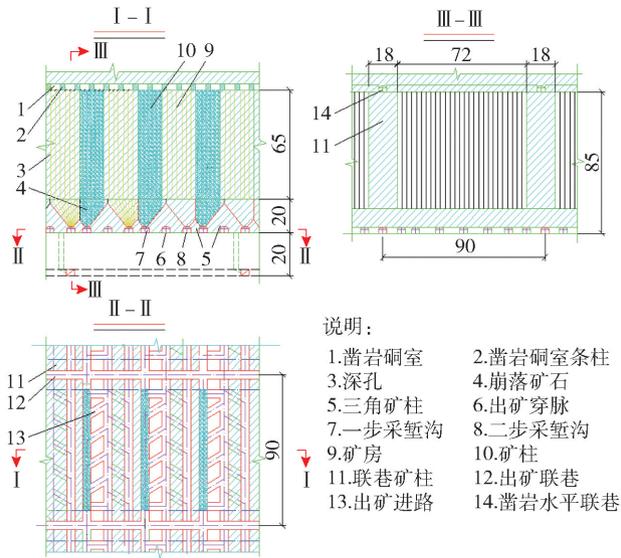


图 21 垂直深孔阶段空场嗣后充填采矿法



图 22 矿柱变形情况

于前期大量岩石力学模拟结果的基础上<sup>[16-17]</sup>,设计采用大盘区、上下采区(中段)同时开采的开采方式,两个大盘区之间留设 60 m 宽的盘区间柱。中段平面图如图 23 所示。根据揭露后岩体的结构面特征和地应力情况,采用以条形为主的大尺寸采场结构参数的大直径深孔空场嗣后充填采矿法和分段空场嗣后充填采矿法,采场宽 20 m、长 60~90 m,采场长度方向垂直一组主要的结构面。该结构面平行于矿体走向,倾角近乎垂直。采场长度方向平行于最大水平主应力的方向。

地压现象。思山岭铁矿在 1 号主井掘进到深部时和 -960 m 水平及以下的一些巷道掘进过程中出现过岩爆现象,但随着开采的展开,未再出现岩爆。目前采场回采均正常,没有出现明显的地压问题。沿矿体走向方向布置的巷道,其稳定性受前面所说的平行于矿体走向、倾角近乎垂直的结构面影响很大,若不及时支护,巷道就容易出现开裂变形,开裂情况如图 24 所示。

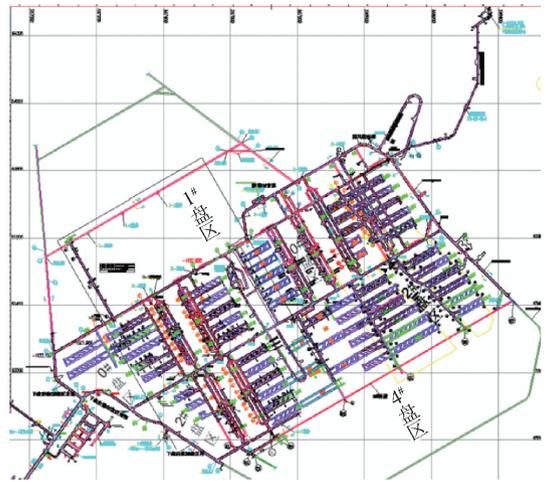


图 23 思山岭铁矿中段平面图



图 24 思山岭铁矿沿走向的巷道开裂情况

### 5 经验总结

通过对国内外深部厚大矿体开采特点的归纳以及开采案例的梳理,可得出如下一些经验:

(1) 深部厚大矿体充填法开采是我国未来金属矿产资源开发的一个显著特点,矿床埋藏深,矿体厚度大,生产规模大,开采扰动强,容易产生大面积的暴露空间、应力集中、顶板和矿柱破坏、岩爆等,造成安全问题、矿柱损失,生产组织复杂,给矿山开采带来了诸多的技术挑战。

(2) 国外深部厚大矿体的充填法开采经验,如品字形和金字塔式的开采方式、开采顺序值得借鉴,这些方式对于减小开采集应力,达到应力分散降低岩爆、采场破坏等风险具有较好的效果,但因其回采顺序受到严格限制,因而生产能力局限性强。

(3) 冬瓜山铜矿、金川二矿区、思山岭铁矿等矿

山是我国深部厚大矿体开采的典型实例。其中金川二矿区使用的机械化盘区下向进路式胶结充填采矿法是深部厚大破碎矿体的理想采矿方法,多年的实践验证了这一点。冬瓜山铜矿、思山岭铁矿等矿山采用空场嗣后充填采矿法,其经验为此类硬岩厚大矿体开采提供了重要的借鉴,开采的布置应充分考虑主应力、主要结构面的方向。但也应看到,开采过程中并不是说一点地压现象都不能产生,而是应使它处于可控范围之内,在不出现安全问题的情况下,高效、充分、低成本地回收矿石资源。

(4)由于我国深部厚大矿体开采的矿山案例还不是很多,开采总体时间不是太长,最大开采深度还只处于1 200 ~ 1 300 m,很多问题可能还没有真正反映出来,所以还应持续开展深部厚大矿体开采的机理和理论研究,特别要及时掌握这些生产矿山开采过程中出现的地压现象,积累更多的经验,为未来我国深部厚大矿体开采提供重要的理论和技术支撑。

#### [参考文献]

- [1] 于润沧. 金属矿山胶结充填理论与工程实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.
- [2] 刘育明. 超大规模深井开采若干技术解决方案探讨[J]. 中国矿山工程,2016,45(6):64-69.
- [3] 刘育明,马俊生,郭雷,等. 国外深井充填法矿山开采技术综述[J]. 中国矿山工程,2018,47(6):1-6.
- [4] 杨小聪,尹升华. 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备研究现状与展望[J]. 工程科学学报,2024,46(12):2147-2158.
- [5] 崔祖霞. 我国战略性矿产资源保供形势分析与思考[J]. 中国矿业,2023,32(7):10-14.
- [6] Cancino C, Álvarez C, Jara R. Subsidence Analysis of the SW Sector at El Teniente Mine[M]. 2024.
- [7] Aguayo A, Uribe G, Pedrero J. Multi-lifts Production scheduling at the Chuquicamata Underground project[J]. Proceedings MassMin, 2012.
- [8] Ngidi S B P. Cave management and secondary breaking practices at Palabora Mining Company[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2007,107(12):783-789.
- [9] Srikant A, Brannon C, Flint D C, et al. Geotechnical characterization and design for the transition from the Grasberg open pit to the Grasberg block cave mine; ARMA Canada-US Rock Mechanics Symposium, 2007 [C]. ARMA.
- [10] Dailey E. Extraction of a highly stressed pillar at Mount Isa; Rockbursts and Seismicity in Mines 93; Proceedings of the 3rd international symposium, Kingston, Ontario, 16-18 August 1993, 2022 [C]. Routledge.
- [11] Potvin Y, Grant D, Mungur G. Towards a practical stope reconciliation process at Olympic Dam[J]. 2012.
- [12] Janiszewski M, Rinne M. Evaluation of Induced Seismicity Risk in the Pyhasalmi Mine[J]. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016, 000 (ISRS16):10.
- [13] Meyer S, Durham C, Falmagne V. Advanced seismological analysis of a complex seismic event at LaRonde mine; Deep Mining 2024; Proceedings of the 10th International Conference on Deep and High Stress Mining, Montreal, 2024 [C]. Australian Centre for Geomechanics, 24-26 September 2024.
- [14] 吴昊燕,张爱民,王志远. 深井大规模进路充填开采扰动效应影响分析[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):33-37.
- [15] 吴昊燕,刘育明,寇永渊,等. 深井矿山下向水平分层充填开采与水平矿柱应力演化研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(6):1-6.
- [16] 张爱民,刘育明,王晓谋,等. 深井大规模盘区回采采场结构参数研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):38-42.
- [17] 张少杰,刘育明,张爱民. 深井超大面积开采盘区矿柱承载作用研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(6):7-10.