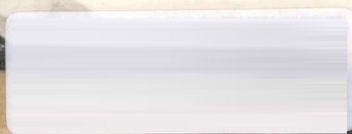


特大型镍矿连续开采地压控制技术

王永前 把多恒 高 谦 / 著
张周平 赵崇武 靳学奇



科学出版社

特大型镍矿充填法开采技术著作丛书

特大型镍矿连续开采 地压控制技术

王永前 把多恒 高 谦 张周平 赵崇武 靳学奇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》第四册,主要介绍金川镍矿多中段大面积连续开采地压规律与控制技术的研究成果。

本书概述了金川镍矿不同采矿方法与地压显现特征。介绍了适用于金川大型复杂难采矿床采场地压控制的采矿方法与控制技术。重点论述了无矿柱大面积连续开采采场地压规律及控制技术的研究成果,特别是双中段连续开采水平矿柱和垂直矿柱的过程中采场地压特征与采场稳定性控制的最新研究成果;同时还重点介绍了采场系统优化理论与方法及大面积采场地压的综合控制技术。最后,简要概述了大面积开采采场围岩变形和地表岩层移动监测技术与结果,并总结出双中段大面积连续充填法开采采场地压规律。

本书可供采矿、水电和土木工程等领域从事采矿设计、生产和科学研究的科研人员及从事采矿教学的大专院校和科研院所的教师与研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

特大型镍矿连续开采地压控制技术/王永前等著. —北京:科学出版社,2013

(特大型镍矿充填法开采技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-036546-0

I. ①特… II. ①王… III. ①超大型矿床-镍矿床-金属矿开采-地压控制-金昌市 IV. ①TD864

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 017274 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 3 月第一次印刷 印张:27 1/2

字数:618 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》编委会

主 编:杨志强

副 主 编:王永前 蔡美峰 姚维信 周爱民 吴爱祥 陈得信

常务副主编:高 谦

编 委:(按姓氏汉语拼音排序)

把多恒	白拴存	包国忠	曹 平	陈永强	陈忠平	陈仲杰
崔继强	邓代强	董 璐	范佩骏	傅 耀	高创州	高建科
高学栋	辜大志	顾金钟	郭慧高	何煦春	吉险峰	江文武
靳学奇	康红普	雷 扬	李 马	李德贤	李国政	李宏业
李向东	李彦龙	李志敏	廖椿庭	刘 剑	刘同有	刘育明
刘增辉	刘洲基	马 龙	马成文	马凤山	孟宪华	莫亚斌
慕青松	穆玉生	乔登攀	乔富贵	侍爱国	束国才	孙亚宁
汪建斌	王 虎	王 朔	王海宁	王红列	王怀勇	王五松
王贤来	王小平	王新民	王永才	王永定	王玉山	王正辉
王正祥	吴满路	武拴军	肖卫国	颀国星	辛西宁	胥耀林
徐国元	许瀛沛	薛立新	薛忠杰	颜立新	杨长祥	杨金维
杨有林	姚中亮	于长春	余伟健	岳 斌	翟淑花	张 忠
张光存	张海军	张建勇	张钦礼	张周平	赵崇武	赵千里
赵兴福	赵迎州	周 桥	邹 龙	左 钰		

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》序一

金川镍矿是一座在世界上都享有盛誉的特大型硫化铜镍矿床。自 1958 年被发现以来,金川资源开发和利用一直受到国内外采矿界的高度关注。由于镍钴金属是一种战略资源,对有色金属工业和国防工程具有举足轻重的作用。因此,加快和扩大金川镍钴矿资源的开发和利用,是金川镍矿设计与生产的战略指导思想。

采矿作业的连续化、自动化和集中化是地下金属矿采矿技术的发展方向。自 20 世纪 80 年代以来,国际矿业界对实现连续强化开采给予高度关注,把它视为扩大矿山生产、提高经济效益最直接和最有效的重要途径。随着高效的采、装、运设备的出现和大量落矿采矿技术的发展,井下生产正朝着大型化和连续化方向发展。金川特大型镍矿的无间柱大面积连续机械化分层充填采矿技术,正是适应了地下金属矿山开采的发展趋势。该技术的应用使得金川镍矿采矿生产能力逐年提高,目前已建成年产 800 万吨的大型坑采矿山。

金川镍矿所固有的矿体厚大、埋藏深、地压大、矿岩破碎和围岩稳定性差等不利因素,使金川镍矿连续开采面临巨大挑战。在探索适合金川镍矿采矿技术条件的采矿方法和回采工艺的过程中,大胆引进国际上最先进的采矿设备,在国内首次应用下向机械化分层胶结充填采矿技术,成功地实现了深埋、厚大矿体的大面积连续开采,为深部矿体的连续安全高效开采奠定了基础。

金川镍矿大面积连续开采获得成功,受益于与国内外高等院校和科研院所合作开展的技术攻关,也依赖于金川人的大胆创新、勇于实践、辛勤劳动和无私奉献。40 多年的科学研究和生产实践,揭示了金川特大型镍矿高地应力难采矿床的地压规律,探索出采场地压控制技术,逐步形成了特大型金属矿床无间柱大面积连续下向分层充填法开采的理论和

技术。该丛书全面系统地总结了金川镍矿采矿生产的实践经验和攻关成果。该丛书的出版为特大型复杂难采矿床的安全高效开采提供了技术和经验,极大地丰富了特大型金属矿床下向分层胶结充填法的开采理论与实践;是我国采矿科技工作者对世界采矿科学发展做出的重要贡献,也是目前国内外并不多见的一套完整的充填法开采技术丛书。

王恩敬

中国科学院地质与地球物理研究所研究员

中国工程院院士

2012 年 6 月

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》序二

金川镍矿是我国最大的硫化铜镍矿床。矿体埋藏较深、地应力高、矿体厚大、矿岩松软破碎,具有蠕变性,很不稳固,且贫矿包裹富矿,给工程设计和采矿生产带来极大困难。

针对金川镍矿复杂的开采技术条件及国家对镍的迫切需求,在二矿区采取“采富保贫”方针。20世纪80年代中期,利用改革开放的有利条件,金川镍矿委托北京有色冶金设计研究总院与瑞典波立登公司和吕律欧大学等单位合作,进行了扩大矿山生产规模的联合设计。在综合引进瑞典矿山7项先进技术的基础上,结合金川的具体条件,在厚大矿体中全面采用了机械化进路式下向充填采矿法,并且在进路式采矿中选用了双机液压凿岩台车和6m³铲运机等大型无轨设备,这在世界上没有先例。这种开发战略为金川镍矿资源的高效开发奠定了坚实基础。

在随后的建设和生产过程中,有当时国务院副总理方毅亲自主持的金川资源综合利用基地建设的指引,金川集团股份有限公司历届领导都非常重视科技攻关工作,长期与国内高等院校和科研院所合作,开展了一系列完善采矿技术的攻关。先后通过长时期试验,确定了巷道开凿的“先柔后刚”的支护系统,并利用喷锚网索相结合的新工艺,使不良岩层中巷道经常垮塌的现象得以控制。开发出棒磨砂高浓度胶结充填技术,改进了频繁施工的充填挡墙技术,提高了充填体强度和充填质量。试验成功全尾砂膏体充填工艺,进一步降低了充填作业成本。优化了下向充填法的通风系统,改善了作业条件。为了有效地控制采场地压,通过采矿系统分析和参数优化,调整了回采顺序,改进了分层道与上下分层进路布置形式,实现了多中段大面积连续开采,并实现了大面积水平矿柱的安全回收。这些科研成果不仅提高了采矿效率和资源回收率,而且还降低了矿石贫化,获得巨大的经济效益和社会效益;同时也极大地提高了企业的竞争力。金川镍矿通过数十年的艰辛努力,将原本属于辅助性的采矿方法发展成为一种适合大规模开采的采矿方法,二矿区年生产能力突破了400万吨;把原本是低效率的采矿方法改造成为高效率的安全的采矿方法,为高应力区矿岩不稳固的金属矿床开采提供了丰富的技术理论和实践经验。对采矿工艺技术的发展做出了可贵的贡献。

该丛书全面论述了金川特大型镍矿在设计和采矿生产中所取得的技术成果和工程经验,内容涉及工程地质、采矿设计、地压控制、充填工艺、矿井通风和安全管理等多专业门类,是目前国内外并不多见的充填法,特别是下向充填法采矿的技术丛书。该丛书中的很多成果出自于产、学、研结合创新与矿山在长期生产实践中宝贵经验的总结,凝结了矿山工程技术人员们的聪明智慧,具有非常鲜明的实用性。该丛书的出版不仅方便读者及相关工程技术人员了解金川镍矿充填法开采的理论与实践,也为国内外特大型金属矿床,特别是高应力区矿岩不稳固矿床的充填法开采设计和规模化生产提供了难得的珍贵技术参考文献。



中国恩菲工程技术有限公司研究员

中国工程院院士

2012年7月

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》序三

近 20 年来,地下采矿装备正朝着大型化、无轨化、液压化和智能化方向发展,它推动着采矿工艺技术逐步走向连续化和智能化。在采掘机械化、自动化基础上发展起来的地下矿连续开采技术,推动着地下金属矿山的作业机械化、工艺连续化、生产集中化和科学化的进程,大大促进了矿山生产现代化,并从根本上解决了两步回采留下的大量矿柱所带来的资源损失,它是地下金属矿山采矿工艺技术的一项重大变革,它代表着采矿工艺技术的变革方向,是采矿技术发展的必然。

金川镍矿是我国最大的硫化铜镍矿床,矿床埋藏深、地应力高、矿岩稳定性差。针对这一采矿技术条件,金川镍矿与国内外科研院所和高等院校合作,采用大型无轨设备的下向分层胶结充填采矿方法,开展了一系列采矿技术攻关。通过“强采、强出、强充”的强化开采工艺,使采场围岩暴露时间缩短,有利于采场地压控制和安全,实现了安全高效的多中段无矿柱大面积连续回采。在采矿方法与回采工艺、充填系统与充填工艺、采场地压优化控制及采矿生产管理等关键技术方面,取得了一系列重大成果,揭示了大面积连续开采采场地压规律,探索出有利于控制地压的回采顺序与采矿工艺。在科研实践中,对采矿生产系统、破碎运输系统、提升系统、膏体充填系统,进行了优化与技术改造,扩大了矿山产能,降低了损失与贫化,提高了矿山经济效益,为金川集团股份有限公司的高速发展提供了重大技术支撑。

该丛书全面系统地介绍了金川镍矿在采矿技术攻关和生产实践中所获得的研究成果和实践经验,是一套理论性强、实践性鲜明的充填采矿技术丛书。该丛书体现了金川工程技术人员的聪明才智,展现了我国采矿界的研究成果和工程经验,是国内外不可多得的一套完整的特大型矿床充填法开采技术丛书。



中南大学教授
中国工程院院士
2012 年 8 月

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》编者的话

金川镍矿是我国最大的硫化铜镍矿床,已探明矿石储量 5.2 亿吨,含有镍、铜等 23 种有价稀贵金属。矿区经历了多次地质构造运动,断裂构造纵横交错,节理裂隙十分发育。矿区地应力高,矿体埋藏深、规模大、品位高,是目前国内外罕见的高地应力特大型难采金属矿床。不利的采矿技术条件使采矿工程面临严峻挑战。剧烈的采场地压活动,导致巷道掘支困难。大面积开采潜在着采场整体灾变失稳风险,尤其在水平矿柱和垂直矿柱的回采过程中面临极大困难。巷道剧烈变形,竖井开裂和垮冒,使“两柱”开采存在重大安全隐患,采场地压与岩移得不到有效控制,不仅造成两柱富矿永久丢失,而且将破坏上盘保留的贫矿,使其无法开采,造成更大的矿产资源损失。

众所周知,高地应力、深埋、厚大不稳固矿床的安全高效开采,关键在于采场地压控制。金川镍矿的工程技术人员以揭示矿床采矿技术条件为基础,以安全开采为前提,以控制采场地压为策略,以提高资源回收和降低贫化为目标,综合运用了理论分析、室内实验、数值模拟和现场监测等综合技术手段,研究解决了高应力特大型金属矿床安全高效开采中的关键技术。

本丛书揭示了高地应力复杂构造地应力的分布规律,探索出工程围岩特性随时空变化的工程地质分区分级方法,实现了对高应力采场围岩分区研究和定量评价;探索出与采矿条件相适应的大断面六角形双穿脉循环下向分层胶结充填回采工艺,实现了安全高效机械化盘区开采;采用系统分析方法进行了采矿生产系统分析,实现了对采场地压的优化控制;建立了矿区变形监测与灾变预测预报系统;完善了高浓度尾砂浆充填理论,解决了深井高浓度大流量管道输送的技术难题,形成了高地应力特大型金属矿床连续开采的理论体系与支撑技术,成功地实践了 10 万平方米的大面积连续开采。矿山以每年 10% 的产能递增,矿石回采率 $\geq 95\%$,贫化率 $\leq 4.2\%$;建成了我国年产 800 万吨的下向分层胶结充填法矿山,丰富了特大型金属矿床安全高效开采理论与技术。

本丛书是金川镍矿几十年来采矿技术攻关和采矿生产实践的系统总结。内容涉及矿山工程地质、采矿设计、充填工艺、地压控制、巷道支护、矿井通风、生产管理、数字化矿山、产能提升和深井开采 10 个方面。本丛书不仅全面反映了国内外科研院所和高等院校在金川镍矿的科研成果,而且更详细地总结了金川矿山工程技术人员的采矿实践经验,是一套内容丰富和实践性强的特大型复杂难采矿床下向分层充填法开采技术丛书。

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》编委会

2012 年 9 月于甘肃金昌

前 言

无间柱大面积连续开采是大型矿床开采的发展趋势,但对于矿体埋藏深、地压大和矿岩不稳固的金川大型有色金属矿床的开采,采场地压控制是矿山安全高效开采的关键技术。为此,本书针对金川镍矿的采矿技术条件,开展了不同采矿方法采场地压规律的研究,并进行对比分析和稳定性评价,最终探索出了多中段下向分层胶结充填的大面积连续开采的采矿方法和工艺。

本书全面介绍了金川镍矿在采矿方法研究和生产实践中取得的地压规律与控制技术的研究成果,涉及采矿过程的数值仿真分析、现场采矿方法试验及现场监测等各个方面。采用综合研究技术,全面揭示了金川镍矿双中段大面积连续开采采场地压显现规律及潜在的安全隐患,提出了控制采场地压和实现安全高效开采的地压控制技术,成功实现了金川大型矿床无间柱大面积连续开采。

金川镍矿是目前国内外不多见的大型难采矿床之一,对其采场地压控制技术的研究采用了数值分析、现场监测和工程实践等多种手段。在不同采矿阶段先后建立了大型三维有限元和三维离散元数值模型,进行了不同采矿方法、回采工艺及控制技术的数值仿真分析,全面揭示了矿床在开采过程中采场地压的变化规律及存在的安全隐患,并提出了控制采场地压的技术措施和回采方案。

随着中段连续回采和厚度逐渐变薄,水平矿柱的应力高度集中,采场地压剧烈显现,由此给水平矿柱回采带来很大困难。据此本书重点介绍了水平矿柱灾变失稳的理论分析方法及矿岩体损伤演化的监测技术和成果,特别是矿柱回采过程的强采强充与充填体强度优化匹配的安全措施与回采工艺。

金川镍矿在采场地压控制研究中首次采用了采场系统分析方法和控制理论。基于系统工程理念和系统分析方法,提出采矿系统由工程地质、采矿工艺和充填支护三个子系统组成,并将影响采场地压显现和采场稳定性的因素分为可控制、不可控制和可适应三类,从而提出评价采场稳定性的技术指标;并采用正交数值分析方法,建立采矿系统优化数值模型,从而进行采场生产系统可控因素的优化、可适应因素的调控和整体系统决策,实现对采矿系统的优化控制。同时,还采用基于 GPS 技术的地表沉降监测技术及基于监测信息的岩移规律研究成果,全面揭示了大型充填法矿山的岩层移动规律。

由于作者水平和能力有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》序一

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》序二

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》序三

《特大型镍矿充填法开采技术著作丛书》编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 矿山情况简介	1
1.2 矿床开采技术条件	1
1.2.1 矿山资源与特征	1
1.2.2 矿区主要构造	2
1.2.3 矿区地应力	3
1.2.4 矿岩条件与特征	3
1.3 采矿方法演化与发展	4
1.3.1 龙首矿采矿方法试验	4
1.3.2 二矿区采矿方法试验	5
1.3.3 金川镍矿开采存在的问题	7
1.4 二矿区 1 号矿体二期回采方案与实施	8
1.4.1 二期工程回采方案	8
1.4.2 二矿区二期工程开采现状	8
1.4.3 二矿区深部开采面临的主要问题	11
1.5 采场地压控制技术攻关成果概述	14
1.5.1 采矿方法选择与工艺优化	14
1.5.2 大面积开采稳定性优化控制技术研究	15
1.5.3 水平矿柱回采地压与岩移控制技术研究	16
1.6 采场地压控制技术综合研究概述	17
1.6.1 复杂矿山工程地质研究总结	18
1.6.2 大面积连续开采技术研究总结	19
1.6.3 水平矿柱稳定性分析与控制技术	20
1.6.4 采矿稳定性分析与失稳预测研究	20
1.6.5 充填法采矿岩移规律与预测研究	21
1.6.6 竖井工程稳定性控制技术研究	22
1.6.7 深部矿体大面积连续开采技术问题	22

1.7 本章小结·····	23
第2章 采矿方法选择与地压控制分析 ·····	24
2.1 矿床开采特点与采矿设计要求·····	24
2.1.1 矿山工程地质条件·····	24
2.1.2 矿区构造应力·····	24
2.1.3 矿床规模与储量·····	24
2.1.4 矿床开采的指导原则·····	24
2.1.5 采矿方法选择的基本要求·····	25
2.2 采矿方法的选择与可行性分析·····	25
2.2.1 充填采矿法·····	25
2.2.2 自然崩落采矿法·····	26
2.3 下向分层充填采矿法和稳定性·····	27
2.3.1 概述·····	27
2.3.2 单阶段回采过程数值模拟·····	29
2.3.3 多阶段回采过程数值模拟·····	33
2.4 上向分层充填采矿法和贫矿影响分析·····	35
2.4.1 数值模拟的工况与计算参数·····	35
2.4.2 数值模拟结果与分析·····	35
2.5 阶段嗣后充填采矿法与稳定性·····	38
2.5.1 概述·····	38
2.5.2 采场侧壁和充填体的稳定性·····	39
2.5.3 分条参数·····	44
2.5.4 回采顺序和回采方向·····	45
2.5.5 盘区矿柱的稳定性分析·····	46
2.5.6 主要结论与建议·····	47
2.6 回采方案与采场稳定性·····	51
2.6.1 厚大矿体开采的岩石力学问题·····	51
2.6.2 留间隔矿柱回采方案与应力分析·····	51
2.6.3 无矿柱连续开采的安全对策·····	55
2.6.4 无矿柱连续开采地压规律与充填力学效应·····	56
2.7 本章小结·····	62
第3章 下向高进路连续开采稳定性分析与工艺优化 ·····	64
3.1 矿山地质条件与矿岩体参数·····	64
3.1.1 矿山地质与地应力·····	64
3.1.2 采矿方法简介与采场结构参数·····	64
3.1.3 基本假设与破坏系数定义·····	65
3.2 高进路下向胶结充填采矿数值模拟与稳定性分析·····	66

3.2.1 进路稳定性随采充深度的变化	67
3.2.2 混凝土假顶随采充深度的变化	68
3.2.3 盘区稳定性随采充深度的变化	71
3.2.4 小结	75
3.3 采矿工艺顺序优化分析与决策	76
3.3.1 可行待选回采顺序技术方案	76
3.3.2 方案优化方法与力学判据	79
3.3.3 不同回采方案的优化决策	79
3.3.4 回采顺序的优化决策	83
3.4 本章小结	84
第4章 下向胶结充填大面积开采现场监测与稳定性分析	86
4.1 概述	86
4.2 大面积充填采场充填作用机理的监测与分析	86
4.2.1 研究工作	86
4.2.2 现场观测设计与仪器布设	87
4.2.3 观测数据分析与主要结果	88
4.2.4 充填体作用机理探讨	99
4.3 大面积充填采场稳定性数值分析与综合评价	100
4.3.1 有限元分析的数值模型建立	100
4.3.2 有限元数值分析结果	102
4.3.3 小结	105
4.4 本章小结	106
4.4.1 实际观测结果与结论	106
4.4.2 有限元数值模拟结果与结论	107
4.4.3 实测数据与数值分析结果对比	107
4.4.4 现场宏观调查分析	108
4.4.5 小结	109
第5章 二期工程大面积连续胶结充填采场稳定性控制	110
5.1 概述	110
5.2 大面积连续充填采场稳定性监测与分析	111
5.2.1 监测方案设计与仪器埋设	111
5.2.2 现场观测数据与处理	118
5.2.3 小结	132
5.3 大面积连续充填法开采稳定性三维有限元分析	134
5.3.1 概述	134
5.3.2 大面积充填开采有限元数值模型	134
5.3.3 三维有限元数值计算结果与分析	138

5.3.4	平有限元数值模拟结果与分析	148
5.3.5	小结	150
5.4	大面积连续充填法开采稳定性三维离散元分析	151
5.4.1	概述	151
5.4.2	矿山地质与模型建立	152
5.4.3	回采顺序离散单元模拟	161
5.4.4	数值模拟结果与分析	168
5.4.5	分析结果与主要结论	192
5.5	大面积连续充填采场巷道稳定性数值模拟	194
5.5.1	概述	194
5.5.2	数值分析方法与考虑的问题	194
5.5.3	采准巷道稳定性数值分析	196
5.5.4	小结	203
5.6	本章小结	203
第6章	二期大面积开采系统分析与方案优化	205
6.1	概述	205
6.2	二期工程采场稳定性影响因素分析	206
6.2.1	二矿区1号矿体开采技术条件与回采方案	206
6.2.2	二矿区1号矿体二期开采设计策略	206
6.2.3	二矿区1号矿体开采影响因素	207
6.3	大面积连续开采系统分析与评价方法	209
6.3.1	采矿工程特点与系统评价方法	209
6.3.2	采场整体失稳与评价指标	210
6.3.3	进路局部失稳与评价指标	212
6.3.4	连续开采采矿系统分析方法	212
6.4	基于正交数值分析的回采方案评价	214
6.4.1	正交试验设计方法与步骤	215
6.4.2	采场稳定性正交数值试验设计	216
6.4.3	采场系统稳定性评价指标	221
6.4.4	采场稳定性评价指标和回采方案评价	227
6.4.5	采场水平矿柱稳定性影响因素分析	238
6.4.6	开采过程地压显现的影响因素分析	242
6.4.7	开采过程地表岩移影响因素分析	244
6.5	本章小结	246
第7章	二期工程大面积采场稳定性分析与风险评估	248
7.1	大面积采场稳定性影响因素与破坏模式	248
7.1.1	采场整体稳定性影响因素	248

7.1.2 连续开采潜在整体失稳模式	249
7.2 构造块体的稳定性分析与风险评估	251
7.2.1 分析方法与技术路线	251
7.2.2 二矿区1号矿体断裂构造与力学特性	251
7.2.3 大面积采场块体稳定性分析与风险评估	252
7.3 采场能量释放失稳模式分析与风险评估	257
7.3.1 采矿过程能量转化与释放理论分析	257
7.3.2 基于数值分析的采矿能量释放率计算	262
7.3.3 不同评价指标的采矿稳定性分析与风险评估	268
7.3.4 大面积采场整体稳定性可靠性与灾变风险分析	272
7.4 水平矿柱压杆失稳稳定性分析与风险评价	273
7.4.1 问题的提出	273
7.4.2 基于弹性地基梁理论的灾变失稳分析	273
7.4.3 水平矿柱稳定性分析与失稳风险评估	281
7.5 水平矿柱回采前后应力场变化规律与安全评估	285
7.5.1 水平矿柱破坏数值模拟与破坏准则	285
7.5.2 第一方案数值模拟结果与安全评估	287
7.5.3 第二方案数值模拟结果与安全评估	292
7.5.4 第三方案数值模拟结果与安全评估	298
7.5.5 第四方案数值模拟结果与安全评估	303
7.5.6 小结	309
7.6 保安矿柱稳定性分析与回采可行性评价	309
7.6.1 保安矿柱分析的目的与方法	309
7.6.2 保安矿柱的稳定性数值分析	311
7.6.3 保安矿柱的压杆失稳模式分析	319
7.6.4 保安矿柱稳定性的综合评价	321
7.7 多中段采场地压及两柱回采安全性分析	321
7.7.1 概述	321
7.7.2 水平矿柱灾变失稳分析与预测	322
7.7.3 水平矿柱变形破裂的数值模拟研究	324
7.7.4 水平矿柱的地质调查与探测	326
7.7.5 垂直矿柱地质调查和变形监测	328
7.7.6 二期工程多中段开采风险评估	330
7.8 多中段连续开采数值模拟与矿柱稳定性分析	331
7.8.1 概述	331
7.8.2 矿体纵剖面二维数值稳定性分析	333
7.8.3 垂直于矿体走向14行剖面二维数值模拟	341

7.8.4 垂直于矿体走向 16 行剖面二维数值模拟	346
7.8.5 垂直于矿体走向 20 行剖面二维数值模拟	349
7.8.6 二矿区 14 行、16 行和 20 行数值模拟综合分析	352
7.8.7 多中段大面积连续开采三维数值模拟	352
7.8.8 小结	369
7.9 本章小结	370
第 8 章 二矿区胶结充填法开采岩移监测与评价	372
8.1 概述	372
8.2 地表裂缝现场调查与分析	373
8.2.1 地裂缝分布与延深特征	373
8.2.2 地裂缝变化的监测与分析	375
8.2.3 地表以下不同深度的岩体位移	376
8.3 采场上覆充填体特性及其稳定性分析	378
8.3.1 充填体的形态与体积	378
8.3.2 充填体结构与长期强度	379
8.3.3 充填体变形特征	380
8.4 金川矿区地表岩移 GPS 观测与岩移规律分析	381
8.4.1 二矿区 2001~2002 年地表变形监测结果	381
8.4.2 二矿区 2003~2004 年地表变形监测结果	388
8.4.3 金川矿区地表岩移规律与采空区的关系	396
8.5 二矿区地表裂缝的深部扩展状态监测	403
8.5.1 地表裂缝探测方法简述	403
8.5.2 地裂缝探测结果与分析	404
8.6 本章小结	409
第 9 章 结束语	412
参考文献	415

第 1 章 绪 论

1.1 矿山情况简介

金川镍矿位于甘肃省金昌市,是我国仅有的三大多金属共生矿之一,也是世界上罕见的多金属共生大型硫化铜镍矿床。矿区集中分布在龙首山下长 6.5km、宽 500m 的范围内,已探明矿石储量为 5.2 亿 t,探明的铂族金属储量约占全国总储量的 61%,保有储量约占全国的 59%。矿床的镍金属储量达到 550 万 t,居世界同类矿床的第 3 位,铜金属储量达到 343 万 t,居中国第 2 位,属于特大型有色金属矿床。近年来的地质勘探结果表明,金川镍矿的深部、边部及外围具有良好的找矿前景。

金川镍矿的矿石伴生有钴、铂、钯、金、银、钨、铋、钼、铀、镉、硫、铬、铁、镓、铟、锗、铊、镉等多种元素,其中可供回收利用的有价元素多达 14 种,矿床之大、矿体之集中、可供利用的金属种类之多,在国内外都是罕见的。

金川镍矿 1958 年由甘肃省地质局发现,1974 年完成了矿床的详勘。甘肃省地质局第六地质队在 1968~1974 年提交了矿区的勘探报告,并证明了矿区仍有找矿远景。

金川集团股份有限公司是开发金川镍矿资源的大型国有企业,公司在位于我国西部河西走廊的工业城市——甘肃省金昌市,金川镍矿矿区地势比较平坦,海拔高度为 1500~1800m,属温带大陆性气候。南距欧亚大陆桥——兰新铁路线仅 22km,厂区铁路与之相连,铁路、公路运输便利。

金川集团股份有限公司本着扩大经济总量,提高经济增长质量的宗旨,坚持初级产品总量扩张和新产品开发与生产并重,继续以结构调整为主线,进一步做好镍、铜、钴、稀贵金属和无机化工产品。2010 年有色金属年产量达 60 万 t,其中镍 15 万 t,铜 40 万 t,钴 1 万 t,金 10t,银 260t,硒 120t,铂族金属 8t,其他金属 3 万 t,化工产品 280 万 t,有色金属压延加工材 15 万 t;营业收入过 800 亿元人民币,利税总额过 100 亿元人民币。金川集团股份有限公司计划在“十二五”末,实现有色金属及加工材年产量达 100 万 t,化工产品达 350 万 t,营业收入过 1000 亿元人民币,使金川集团股份有限公司成为具有较强国际竞争力的大型国有企业。

1.2 矿床开采技术条件

1.2.1 矿山资源与特征

金川矿区广泛出露下元古界古老深变质岩系,被称为“龙首山群”的主体经历了高级变质的复杂错动杂岩。龙首山群形成了金川含矿超基性围岩,主要为混合岩、大理岩、片麻岩及片岩等。

地层走向为北西,倾向南西,倾角在 45°以上,有多种不同时期和规模的岩浆岩侵入,

如肉红色正长花岗岩体、超基性岩体及斜长角闪岩、白岗岩、细晶岩、花岗闪长斑岩、辉岩和煌斑岩等岩脉。含矿超基性岩体(VI)被一组近东西向的断层错为4段,相对划分为4个矿区。矿区全长6.5km,自西向东依次为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ,如图1.1所示。

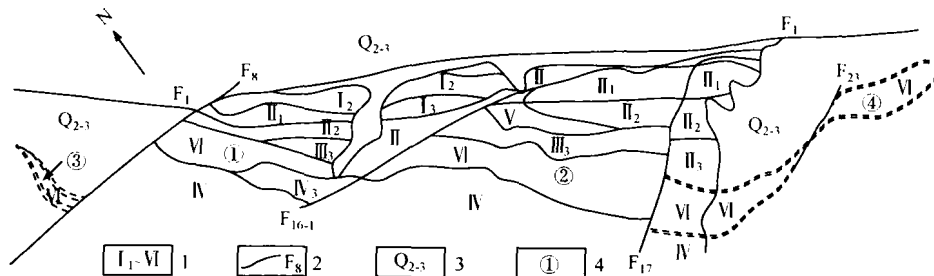


图 1.1 金川矿区地质略图

矿床按其成因可分为4种类型,即熔离型、岩浆深熔贯入型、接触交代型和晚期贯入型。主要矿石类型有海绵晶铁状富矿石、星点状贫矿石、浸染状矿石和块状特富矿石等。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ矿区目前正在开发,Ⅳ矿区仍在详勘之中。

二矿区是金川镍矿床的主要矿区,有2个可采主矿体,分别是西部的1号矿体和东部的2号矿体。1号矿体长约1600m、厚10~200m、延展深度230~905m,地表以下228~380m可见矿,以富矿为主,是金川镍矿正在开采的主要对象。2号矿体长约1300m、平均厚度118m、延深350~550m,见矿标高在地表以下200m左右,以贫矿为主。

二矿区1号矿体位于该矿区西部的300m以下。矿体北侧有断层 F_1 与断层 F_{16} 等。 F_1 断层倾向南西,倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$,长约200km,断层带宽数十米到百余米,是潮水盆地与龙首山区的分界线。矿区内与其平行的断层较多,如 F_{16} 和 F_8 等断层,与 F_1 斜交的断层有 F_8 、 F_{16-1} 等,与 F_1 正交且规模较大的断层有 F_{12} 等。这些断层带、破碎带较宽,一般未胶结。矿区小断层和层间挤压带及节理十分发育。据统计,矿区总体上分布有4组断裂:一组压性断裂,规模较大,为矿区主断裂;两组扭性断裂,近南北方向,规模小、数量较大,近东西方向规模大、数量较小;一组横向张扭性断裂,规模小,数量较大。

矿床所揭露的地层主要为前震旦纪白家嘴子组中的深变质岩。主要岩石有条带状混合岩、绿泥石石英片岩、蛇纹石化大理岩、角砾混合岩夹大理岩、云母片麻岩、黑云母斜长片麻岩等,岩层倾向南西。

由于金川镍矿地处河西走廊,是大地构造单元的接合部,构造运动剧烈,地质构造复杂,水平构造应力较高,矿岩破碎,稳定性极差。

1.2.2 矿区主要构造

1. F_1 断层

F_1 断层位于矿区北部,走向长200km、北西 $295^\circ \sim 310^\circ$,倾向南西 $50^\circ \sim 70^\circ$,宽数十米到百余米,是龙首山和北部潮水盆地的分界线。上盘前震旦系逆冲于第四系之上。根据龙首矿区的钻孔勘察,在井下1000m的范围内,仍然可见第四系砂砾石层。该断层属