



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Efficient Exploitation of Deep Mineral Resources—Article

金川镍矿床深部资源高效开发与综合利用的关键技术研究

杨志强^{a,b}

^a State Key Laboratory for Comprehensive Utilization of Nickel and Cobalt Resources, Jinchang, Gansu 737100, China

^b Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 April 2017

Revised 1 August 2017

Accepted 2 August 2017

Available online 23 August 2017

关键词

深部开采
高效开发
综合利用
关键技术

摘要

为了掌握金川镍矿床的深部资源特征和地质状况,对困难的开采条件进行了系统分析,包括高应力、碎裂矿岩体、普遍的围岩变形、困难的巷道支护、复杂的岩体力学特征以及低采矿回收率等。为深部、大型和复杂镍钴矿床的安全、高效和连续开采建立了一个集成技术包,其由蜂窝式进路大面积连续采矿方法的发明、地压控制理论以及高应力和碎裂矿岩体技术模块的建立、新型充填胶凝材料的开发、粗骨料高浓度料浆管道输送的深井充填技术等组成。由此,所存在的难题得到了较好的解决,从而确保了金川镍矿床深部资源的高效开采和综合利用。同时,为高应力、碎裂和流变岩体的地下矿山使用下向胶结充填采矿方法展示了一个技术范例。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

金川镍矿是世界著名的多金属伴生硫化矿床,其中,镍和铜为主要金属。1958年发现的该矿床位于龙首山底下,长6.5 km、宽500 m,已证实的储量为 5.6×10^8 t,包括 6.03×10^6 t镍、 3.89×10^6 t铜以及其他20余种有利用价值的元素,如钴、银和铂族金属等。矿床规模居世界第三位。金川镍矿在中国有色金属矿产资源中占有举足轻重的地位,其镍储量占全国储量的79%、钴资源储量居全国第二位、铂族金属资源储量居全国前列。然而,矿山的开采条件非常复杂[1]。矿区经过多次构造运动,岩体节理裂隙十分发育,且矿体埋深大。一系列的不利因素使得该矿床因高应力、大规模和难以开采而不同于一般的矿床,这包括地压大、矿岩破碎、大变形、井巷

难以支护和复杂的岩石力学特征。

目前金川镍矿已进入深部开采,其采矿作业面距地表超过1000 m深。整个开采面积超过570 000 m²。由于开采面积扩大、矿岩更加破碎、节理裂隙更加发育、地压更大、巷道和采场围岩的变形和流变更严重等,使得采矿条件正在进一步恶化,这意味着金川镍矿深部采矿作业面临更大的挑战和地质灾害风险。

国内外深部金属矿山开采的经验表明,由于高地应力、高温、高渗流压力以及复杂地质环境的出现,使得传统的开拓与支护方法、采矿理论与技术不能适合深部开采。与浅部开采相比较,影响深部开采的问题不只是地压大和支护困难,还包括人员和设备的安全、严峻的作业环境、更低的劳动生产率、更高的生产成本以及更大的作业区域[2]。因此,考虑效益、安全和经济的采

E-mail address: yangzq@jnmcc.com

2095-8099/© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2017, 3(4): 559–566

引用本文: Zhiqiang Yang. Key Technology Research on the Efficient Exploitation and Comprehensive Utilization of Resources in the Deep Jinchuan Nickel Deposit. Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ENG.2017.04.021>

矿作业以及矿产资源的全面利用是一个重要的研究课题。

为了解决金川镍矿深部开采所遇到的问题以实现环境友好状态下的安全、高效和经济开采,需要研究金川镍矿的资源特征和性质。同时,需要针对金川镍矿深部连续采矿和充填作业,通过理论探索、技术研究、现场试验、实时改进、系统集成和信息共享等手段开发一个技术集成包,其将对金川镍矿深部资源的开采起非常重要的作用。

2. 金川镍矿的资源特征和地质条件

金川镍矿位于阿拉善板块边缘的隆起带中,即龙首山的隆起带中,介于一个潮水盆地的南部和祁连山地槽的北部之间。龙首山隆起带的两侧赋存有大且深的断裂,其北边的断裂被称为F1。构造的标志是明显的,主要以断裂的形式出现,自吕梁造山运动以来就存在的构造运动使得高度发育的断裂带横切整个矿山[2]。

金川镍矿床的含矿岩体长6.5 km、宽20~527 m,埋深从数百米到超过1000 m,最大深度超过1100 m(图1)。矿床的东西两侧由第四系岩土覆盖,中部有矿体裸露地表且顶部被剥蚀。含矿岩体走向西北50°,倾向西南50°~80°,由西到东分为4个矿区:3矿区、1矿区、2矿区和4矿区。

金川镍矿床露头的岩层简单,主要由前震旦纪白家嘴子组的中深变质岩组成,包括条带状混合岩、绿泥石石英片岩、蛇纹石大理岩、大理石角砾岩、石榴云母片麻岩、黑云斜长片麻岩等,岩层倾向西南。除了超基性

岩外,也有桃红色花岗岩和白花岗岩。超基性岩脉有细晶岩、辉绿岩、煌斑岩、细粒闪长岩等。

含矿超基性岩体作为不规则岩脉侵入了大理岩和混合岩中,主要岩相是纯橄榄石、辉石橄榄石、二辉橄榄石、斜长岩以及辉石。其中,前三者是主要的含矿岩相。岩体的分布具有明显的控制矿化作用。矿床的特征描述如下。

(1) 矿区存在复杂的构造运动和大的构造应力。自吕梁造山运动以来,矿区地层经历了多次地质构造运动、变质作用和岩浆的重复侵入。矿区下部的原生变质岩体显示经受了多期变形、变质和强烈的构造位移,表明了地层的剧烈变化和相互叠加。岩浆岩包括含矿超基性岩,在岩浆期之后经历了一系列的变形和变质,普遍地受强力作用变成透镜状结构,导致了构造断裂和节理超常发育。由于遭受地质构造弱面的不断切割,包括断层面、断层间的挤压面、节理、复杂的岩体构成等,以及软构造面(如断层面、断层间的挤压面、节理)的不断切割,矿岩的稳定性很差。在矿石和围岩接触地段,由于存在蛇纹石、透闪石、绿泥石片麻岩带,加上岩体破碎、泥浆、隆起、膨胀以及蠕变等,使得矿岩的稳定性进一步变差[3]。

由于反复的构造叠加、拖拽和变形,金川镍矿的构造应力是大的、复杂的和多样化的。在金川镍矿深部,水平构造应力占优并随着深度增加而线性增大,一般达到30 MPa至50多兆帕,即进入了中高应力或超高应力范畴,与构造剥蚀密切相关。在矿山深部中段,重力引起的原岩垂直应力和由于开挖引起的水平应力都剧烈增大。根据深部现场地应力测量数据,表明深部岩体具有明显

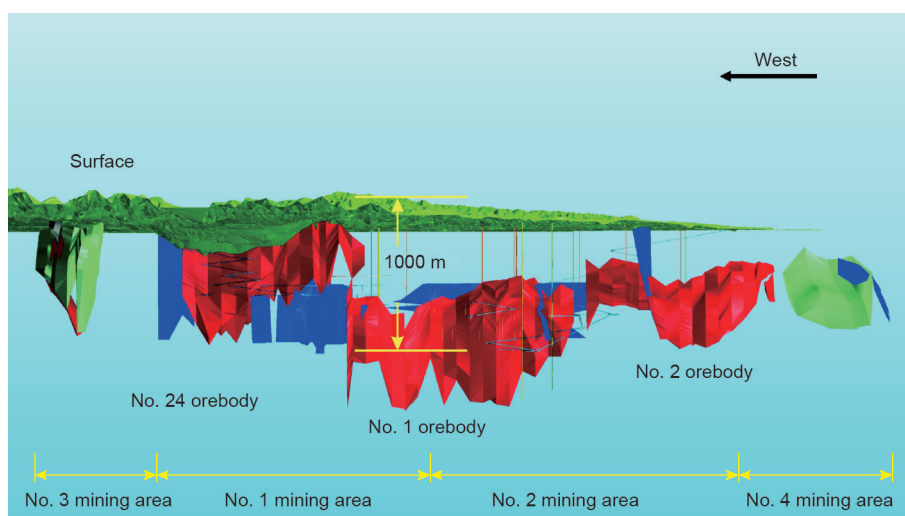


图1. 使用SURPAC绘制的金川镍矿矿体模型。

的古代构造运动痕迹。一致的构造应力场和残余的构造应力场导致了深部岩体地应力场的各向异性和不均匀性。与矿山靠近地表的区域相比较,深部的最大主应力发生了偏转,其与水平线间的夹角有一个增大的趋势,使得深部的采场及采场围岩处于不利的应力环境中[4]。

(2) 金川镍矿床的资源储量巨大,矿石品位低,平均镍品位为0.96%;同时含有很多值得提取的伴生元素。然而,由于低品位的矿石占比很大,目前所剩余的资源需要深度选矿富集,这对资源的全面利用带来了困难。

(3) 金川镍矿是深埋的大型矿床。以前所采用的大面积无矿柱连续开采和机械化下向胶结分层充填采矿法,遗留下570 000 m²的超大开采面积。巨大的开采面积和爆破是采场稳定的主要挑战。因开采深度在增加、开采面积在扩大,采矿作业由于改变采场围岩的应力状态和固有性质而对围岩产生的冲击作用越来越大。另外,多中段采矿模型表明,大面积开采使得地应力更加活跃,引起岩石应力沿各种开挖空间周边几倍甚至多达10倍的增加,而这些地方本已处于高地压之下,从而导致采矿条件恶化。

3. 金川镍矿深部开采的关键技术问题

因其复杂的地质环境、独特的资源特征、特别的工程条件、碎胀和蠕变的岩石力学特点、高地应力、埋深大以及矿体不稳定,金川镍矿是世界闻名的大型难采矿山。因此,金川镍矿吸引了国内外采矿和岩石力学专家的高度关注。紧迫地需要研究处理一些技术难题,以确保矿山深部资源的高效开采[5]。

(1) 高应力条件下碎胀岩体的控制。由于金川镍矿的高地应力,深部井巷的围岩表现出各种裂隙膨胀式蠕变,地压活动时时有发生。在进行深部采矿工程设计时,基础工作是决定复杂地应力的分布规律及其如何发生、基于其稳定性对岩体进行科学分类并进行质量评估。岩体稳定性控制的主要理论基础是掌握深部围岩变形和破裂的力学机理、明了采矿作业对岩体破裂的冲击力学机理。为了确保高效和安全采矿作业,必须建立一个动态监测系统以监控全矿的岩体变形和设立采场灾害预警系统。

(2) 厚大倾斜矿体的高生产率和高回收率的高强度开采。金川镍矿床矿体的特点是厚大、倾斜、深埋。矿山以碎裂矿岩体、节理十分发育、复杂地应力而闻名。

需要开发出创新性的、高效的采矿方法,以实现厚大倾斜矿体的无矿柱连续大面积采矿、实现深部矿体的连续回采、平衡多中段作业的下降。同时,也需要维持采矿和充填作业的平衡,为了获得更高的回采率和更低的贫化率而增加机械化和自动化程度,在低成本下实现高效采矿。

(3) 大面积的连续回采。金川镍矿一直使用下向胶结分层充填采矿法。由于采矿作业进入深部,金川已形成了世界上金属矿山最大的连续充填体,但充填体的变形和稳定性的缺失使充填体成为一个深部采矿地质灾害的可能风险。另外,由于深部采矿所使用的高浓度料浆充填技术错综复杂,产生了一系列问题,如高浓度料浆难以输送、系统稳定性差、管道系统布置复杂、充填钻孔和管道磨损严重等。金川深部高效采矿还带来一些技术挑战,如高浓度充填料浆组分的优化,如何实现充填系统的稳定性,如何使充填体的强度与厚大矿体的连续开采相匹配等。

(4) 矿产资源的综合利用。金川镍矿床的特点是矿石平均品位低、氧化镁含量高、岩体变化巨大以及伴生许多有用元素。为了开采3号和4号矿区的贫矿,需要整体回收率高的低成本采矿方法,创新采矿和选矿技术,改善提取镍、钴、铜和其他伴生元素的技术经济指标,用经济的和环境友好的方式使尾矿和冶炼炉渣得到全部利用以提高循环经济水平。

(5) 深部开采地质灾害的预防。一般认为,使用充填采矿法的金属矿山其地表的岩层移动不严重,不会导致大规模地质灾害的发生。然而,在金川尽管采用了高浓度胶结充填采矿法,地表仍然出现了岩层移动、变形和破坏。随着金川的采矿进入更深和更大的区域,地面普遍发生了岩层移动、变形和建筑物破坏,对矿山稳定和竖井安全构成了严重威胁。金川矿的开采深度现在已超过1000 m,采矿面积超过570 000 m²。一个GPS观测网提供的岩层变形结果表明,地面的岩层移动基本集中在主要地下采矿区域的中央,岩层移动的速率正在加大,地面的张裂隙在发展。14勘探线通风井位于2号矿区地表沉降盆地的边缘,自从垮塌后在13年前(即2005年)重建,现已垂直沉降1070 mm、水平位移455 mm、三维(3D)移动1185 mm。监测数据表明,地面的大量岩层移动已构成对地下采矿和地面设施的主要威胁。因此,监测围岩和充填体的变形、研究和建立地下采矿强度与地面岩层移动的关系、设立一个采矿灾害和稳定性破坏的预测系统,就成为一个重要的挑战。

4. 深部资源开采的关键技术研究导向和阶段性成果

4.1. 关于碎裂、流变岩体在高应力作用下的理论和技术

4.1.1. 金川镍矿地应力分布规律

金川镍矿高度重视地应力的研究。许多研究单位参与了不同时期、不同开采中段、不同地点、不同方法的地应力测量和观测工作，获得了矿山各个深度和地点的地应力数据。采用统计分析方法得到了地应力分布回归函数，提供了金川镍矿地应力分布规律的初步解答。图2是地应力预测和回归结果。

分析矿山深部的地应力分布得出以下结论：最大水平主应力与最小水平主应力随深度增加以深度3次方的形式变化，垂直主应力随深度增加线性变化；最大与最小水平主应力差值很大；在深部，最大主应力的方向发生偏斜，显示与水平面的夹角增大，表明在深部开采中段存在更大的剪切应力、深部岩体的稳定性更差。

4.1.2. 深部围岩变形和破坏的力学机理

金川镍矿岩体的稳定性主要取决于地应力环境、工程地质条件、岩石力学特性、采矿作业的干扰。多年的岩石力学试验表明，承载裂隙岩体的绝大部分变形包括卸载回弹、膨胀、碎裂蠕变、围岩的吸水扩胀等，具有量大、迅速、长时间变形的特征，压力来自各个方向，

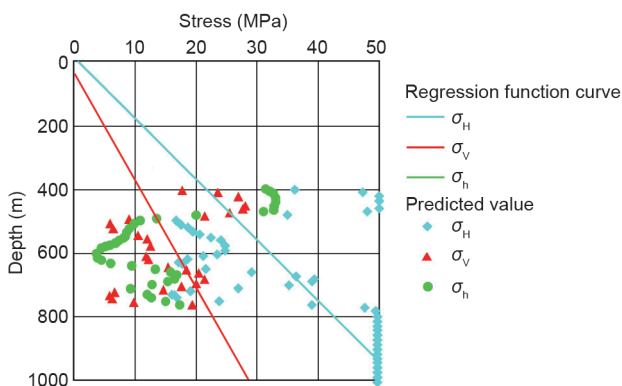


图2. 最大、最小水平主应力(σ_H , σ_h)和垂直主应力(σ_v)与深度的关系。

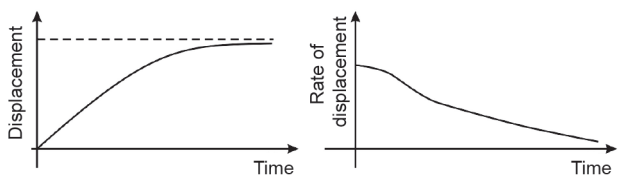


图3. 在非动压力作用下永久的工程变形-时间和变形速率-时间曲线。

以及明显的收缩变形(图3和图4)。围岩的变形取决于采矿次生应力，变形随时间增长而增加，没有收敛的趋向。通常，变形速率以一种波动方式逐渐减小，但决不会达到零。通过分析金川镍矿围岩的流变特性，岩体流变的临界值被确定为3 MPa。当应力超过4.35 MPa时，矿岩的流变会加速。岩体的应力-应变试验表明，随着循环荷载增加，累积的塑性变形急剧增大。当应力为7.16 MPa时，残余变形达到全部变形的三分之二。

4.1.3. 变形监测与灾害预测和预警系统

基于地表GPS观测网(图5)和分布式光纤传感技术，一个贯穿金川镍矿全矿的立体动态变形监测网已建立起来了，并研发了一个灾害预测和预警系统。

金川镍矿采用分布式光纤传感技术进行采场围岩和充填体的位移监测，然后根据监测数据建立起一个等效智能数值模型。这个基于金川镍矿采场围岩等效力学参数的模型的建立过程为：首先，进行3D正交数值实验并采用编程遗传算法建立岩体参数与地表岩层移动间的关系；其次，观察实测数据与计算数据的方差和；最后，通过最小化方差和使模型得到优化：

$$M \text{ in } F(x) = \sum_{i=1}^n [f_i(x) - w_i]^2 \quad (1)$$

式中， $F(x)$ 为模式识别优化函数； $f_i(x)$ 为计算得出的模型中点 i 的移动值； w_i 为实际监测得到的点 i 的移动值。

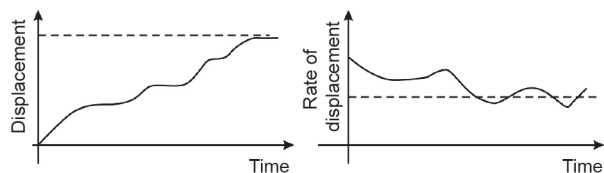


图4. 在动压力作用下巷道的工程变形-时间和变形速率-时间曲线。

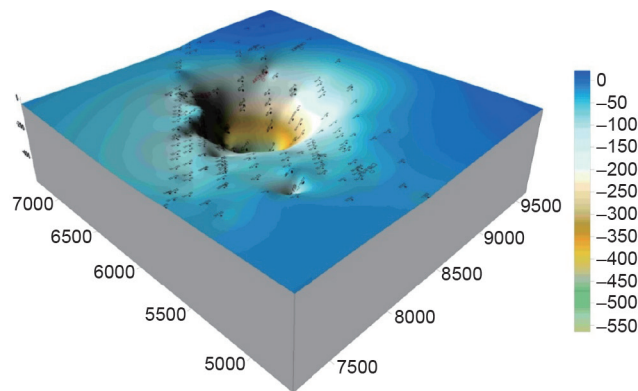


图5. 由GPS测量的地表沉降3D图。

对现时的采矿阶段，通过求解方程（1）而得到岩体力学参数（关联监测变形），然后再进行模型修正和可靠性评价（图6）。最后，完成采场稳定性分析和岩层移动预测。建立了一个系统，用于处理变形监测、岩体稳定性评估、灾害预测和预警等方面的数据，以对采矿设计和安全生产提供技术支持。

4.1.4. 深部巷道围岩的支护技术

通畅和安全的巷道对金川镍矿深部的安全、高效开采是重要的，因此巷道支护是深部开采的基本要求和关键技术。采用理论计算、数值模拟、现场实测等方法对支护技术、设计方法、支护材料、施工工艺、支护效果进行了系统研究。同时，结合岩体变形力学机理、破裂特征、深部巷道围岩失稳模型的综合研究，实现了深部巷道支护技术的新突破。

我们研究了金川镍矿承压裂隙岩体的变形特征和失稳模型，为控制地压活动和巷道变形而开发出了有效技术。

（1）深部巷道修复和支护荷载的联合控制工艺。巷道修复时使用水泥浆进行围岩注浆，水泥浆富集（范围）以及理想的注浆参数：水灰比为1:1，注浆压力为2~3 MPa，每米巷道打一两个壁后注浆孔，围岩中注浆孔的排距为1 m、孔深2 m，注浆量为加固围岩体积的1%~1.5%。工程实践证明，在支护结构后面进行了充填，则注浆层可以均匀地将压力从围岩传递给支护结构，避免了支护结构的应力集中。此外，一个弹性充填层可以释放一定量的变形压力，从而预防围岩的大变形。

（2）钢筋网、锚杆、喷射混凝土柔性支护工艺。在软岩中巷道开挖后，为了防止充填层的被动压力，短时间内必须提供支护阻力。网、锚、喷支护在其变得有刚

性和阻力之前是柔性、柔软的，它能及时封闭围岩、调整并使围岩的自我承载能力最大化，因此，它适用于具有在压力下快速移动、大闭合变形和强流变等特性的围岩。在金川镍矿深部网、锚、喷支护已成为巷道支护的主要形式。网、锚、喷支护的施工过程如下：首先，为进行光面爆破而优化爆破参数，以确保巷道的开挖轮廓线尽量与设计一致；其次，钢筋网被制作成800~1200 mm长进行装设，然后湿喷混凝土；最后，对远离巷道作业面的钢筋网再次喷射混凝土进行加厚。这种施工过程取得的成果是使巷道的返修率从35%下降至20%。

4.2. 采用蜂窝状结构进路的大面积连续开采新工艺

4.2.1. 厚矿体无矿柱大面积连续开采工艺研究

随着金川镍矿开采深度的增加，透镜状厚矿体逐渐导致开采面积增大。如果在盘区间留下间柱，则根据数值模拟分析的结果，随着时间的推移间柱将产生应力集中，峰值应力高达447.94 MPa。这使得间柱变成高应力塑性区并引发严重的破坏，进而在两步骤回采中难以回收这些间柱。

根据得出的深部厚矿体应力分布特征和地层控制技术，研发了无矿柱大面积连续开采工艺，其与传统的两步骤采矿方法有很大的不同（图7）。中段高度为100~150 m，分段高度和分层高度分别为20 m和4 m。中段和分段间用斜坡道联络。沿矿体走向划分采矿盘区，不留盘区矿柱。盘区内的采矿在进路中进行，进路按线状排列由矿岩分隔。一旦采矿作业完成，则一条条进路被充填。进路顶板及围岩由充填体和未被开采的矿体支护，从而达到矿体的连续开采并实现盘区内更高的采矿效率。

4.2.2. 蜂窝状结构的大断面六角形进路高效采矿方法

基于仿生学原理，采场中的进路被布置成蜂窝状结构。科学计算表明，蜂窝状结构在等边六角形之间没有遗留的空间，且六面柱体有最大的容量和最小的外围面积，能承受最大的荷载，因而代表了良好的结构稳定性。

按照仿生学原理，我们尝试了将六角形进路安排成蜂窝状结构，布置进路断面和充填体断面均成为蜂窝状结构，以实现等边六角形间的最紧凑轮廓。其结果是应力集中程度显著减小，围岩的支撑能力得到全面利用，

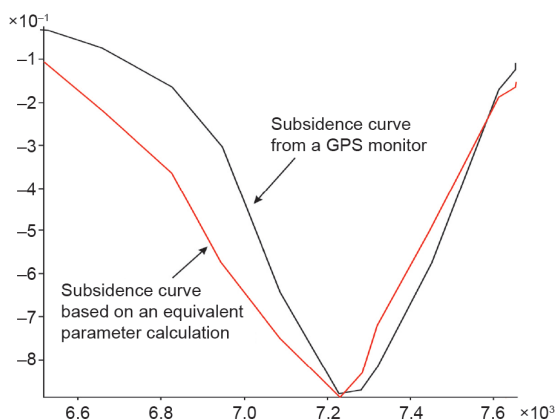


图6. 等效参数计算和GPS监测的岩层位移比较。

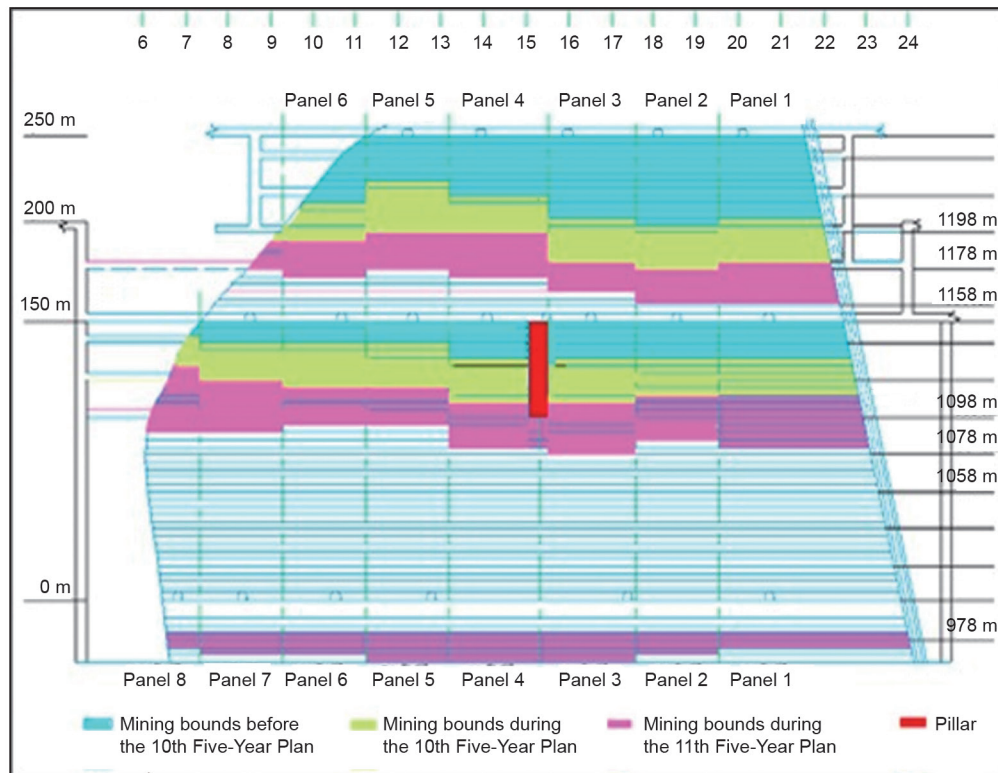


图7. 无矿柱大面积连续开采方法。

因而导致了良好的岩体稳定性。然而，蜂窝状结构参数、六角形进路的设计参数以及爆破工艺制约了采场的生产能力。基于3D有限元（3D- σ ）模型的计算，按照应力分布状况分析了充填体的稳定性、变形速率、塑性区分布，后来创新了蜂窝状结构的大断面六角形进路采矿方法（图8）。此外，六角形大断面蜂窝状结构的参数优化为：底边宽3.5 m，腰宽7 m，断面高6 m，断面面积31.5 m²。这比原来的采场尺寸增加了40%，因此采场生产能力得以增加。采场周边的应力状况显著改善，最大主应力从93.48 MPa减小至47.19 MPa，根据数值模拟计算，应力集中系数比四角形进路降低50%。进路顶板和边墙的破坏戏剧性地大幅度减少，采场维护费用减少了30%~50%。

4.2.3. 大直径空孔螺旋状掏槽爆破

在金川镍矿，碎裂矿岩体和节理裂隙发育的地质特征对凿岩爆破是一个主要挑战，制约我们持续扩大采场的生产能力。为此，我们研究了岩体空孔爆破时的受力状态和抛掷规律，给出了螺旋掏槽爆破的力学机理。基于自由面宽度与最佳抵抗线之间的关系，我们建立了螺旋掏槽钻孔布置的原则。另外，我们决定了从装药孔到空孔距离的增加次序，研发了一种大直径空孔螺旋掏槽爆破工艺。从空孔到装药孔的距离应当是空孔直径的

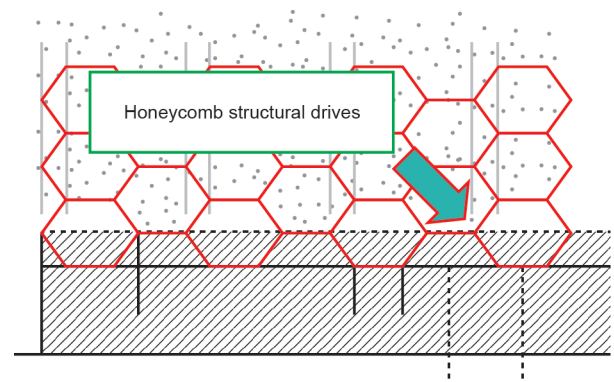


图8. 大断面六角形进路采矿方法。

1~1.8倍、2~3.5倍和4~5.5倍。非对称炮孔布置以及毫秒雷管的使用对掏槽形成是有帮助的。每个爆破循环中的进尺增加了12%，爆破效率超过90%，并且巷道的断面形状得到了很好的控制。其结果是巷道支护、采矿以及充填作业提供了一个良好的工作程序和合适的技术条件。

4.2.4. 厚矿体采场布置的优化

在金川镍矿，盘区是一个基本的采矿单元。盘区中的回采设计最初是一种单个的穿脉进路，存在安全性差、采充循环时间长、通风阻力大、设备效率低等缺点。后来，采矿设计被修改成双穿脉环形分层进路（图

9)。为获得更高的效率，开采区域被分成独立回采或联合回采的矿块。双穿脉环形分层进路的使用提高了设备效率，加速了分层转换时间，缩短了分层巷道及采空区的暴露时间，减少了主要巷道和辅助巷道的二次支护费用。由于双进路工艺，无轨设备的运行效率从88%增加至95%，盘区生产能力增加20%，有效风流速度的增加超过30%。为了解决单个采场的采矿效率低、上部采场的下降速度缓慢、采场间不协调等问题，研发了一种包括上、下采场间协作采矿的新工艺。分层巷道掘进后立即进行采矿作业，以确保采场合适的下降速度和高的生产率，其结果是实现了平衡开采。

4.3. 矿山固体废弃物作为粗骨料的高浓度料浆管道输送充填

4.3.1. 与厚矿体连续开采相匹配的充填体强度

金川镍矿主要使用下向分层充填采矿法，结果在采场上方形成了大而厚的充填体。充填体的质量和稳定性对位于其下方的矿体的安全回采有重大影响。通过大量的采矿实践和试验，通过使用金川自产的棒磨砂和砂砾作为高浓度自流输送系统的粗骨料，优化充填料中骨料、胶结剂和添加剂的配比，并在充填体强度与厚矿体连续开采之间取得好的平衡，制备出了一种适合管道输送的高浓度充填料浆。

从下向胶结的采空区的边壁轮廓（图10）获得了厚大充填体的几何和物理性质。厚大充填体的结构和强度采用数字式钻孔摄像机、超声波钻孔探测器和现场充填体强度试验来揭示。经过长时间的固结和压实，充填体结合紧密，没有空洞和裂痕，充填体的单轴抗压强度高达7.8~11.9 MPa，因而可以满足安全和生产的需求。

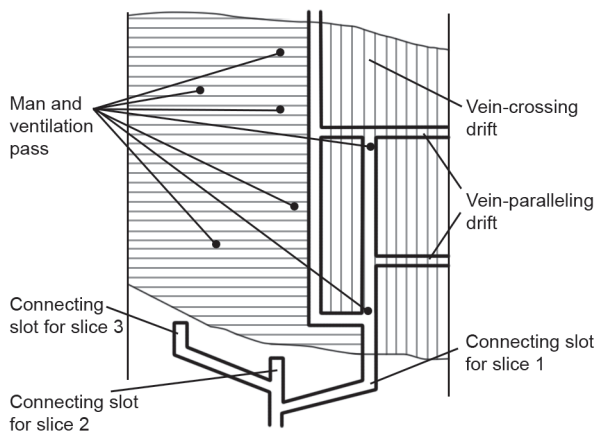


图9. 双穿脉环形分层进路的掘进和采矿。

4.3.2. 矿山固体废弃物作为粗骨料的高流动性料浆充填工艺的开发

基于粗骨料的堆积和空隙效应，我们研究了不同的堆密度模型以及几种不同类型粗骨料的优化分级公式。上述工作获得了粗骨料的分级和相容性的好办法。为了找出即使水泥耗量高但充填体质量仍然差的原因，使用分级指标法来分析棒磨砂的级配和料浆浓度。考虑粗骨料、水泥和水的配比，建立了一个新的胶结充填体强度模型公式，以获得成本节约、充填体强度和输送浓度方面的最好结果：

$$R = \alpha \Phi^\beta \left(\frac{W}{C} \right)^\lambda \left(\frac{C}{A} \right)^\eta \quad (2)$$

式中， Φ 为粗骨料的堆密度； W/C 为水灰比； C/A 为灰砂比； $\alpha, \beta, \lambda, \eta$ 为试验常数。

此外，对于高浓度充填料浆，建议的高流动性的条件为：料浆塌落度大于220 mm，料浆扩散度大于450 mm。料浆中的中、小颗粒用来承载大颗粒，并且小颗粒可以填满大颗粒间的空隙。在采空区，充填料浆基本上是自己找平的。另外，研发了使用矿山固体废弃物作为粗骨料的高流动性料浆新技术。

4.3.3. 高浓度料浆流动特性和满管流输送力学机理的研究

当垂直于管道截面的充填料浆浓度梯度为零时，临界流动浓度被定义为料浆浓度。临界浓度的数学模型为：

$$M_z = [1 - 16d_s / (16d_s \gamma_k - 3C_s \tau_0)] [\gamma_k / (\gamma_k - \gamma_0)] \quad (3)$$

式中， M_z 为料浆的重量浓度； d_s 为平均颗粒直径； γ_k 为

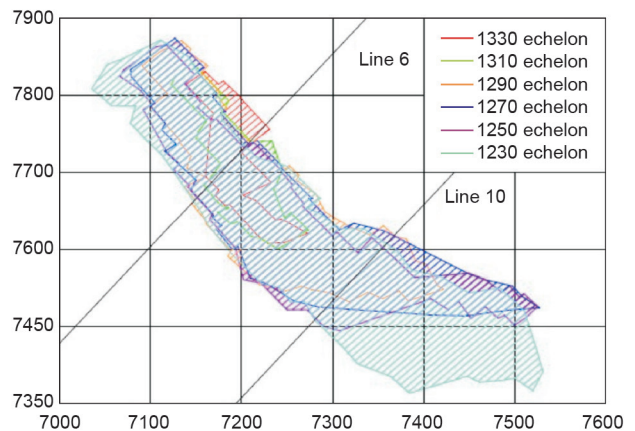


图10. 中段间采空区边缘的形状。

堆积充填料的干重, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; γ_0 为水的比重; C_s 为颗粒的形状系数; τ_0 为料浆的初始剪切应力。

公式(3)可以用于决定临界流动浓度、固体的颗粒尺寸、料浆的初始剪切应力、固体的堆密度以及输送介质之间的关系。该公式决定了在临界流动浓度时,对于料浆的制备,需要一定的浓度和细颗粒含量。试验结果表明,当尾砂与棒磨砂的优化比例为3:7时,料浆浓度达到临界值,为77%~79%。料浆的流动模式显示了Herschel-Bulkley流体特征,动黏度系数 η 等于1~2.5 Pa·s。基于水平段管道的料浆系统曲线和垂直段管道的泵送曲线,我们导出了变直径管道的满管流输送系统的工作原理。为了消除由垂直管道产生的残余静压,减小垂直或水平管道的直径,使得料浆流经该处的摩擦阻力增加,以满足充填作业的技术要求。

4.3.4. 深井充填钻孔的破坏模式及其修复研究

在金川镍矿,充填管道系统与采矿作业密切相关。大部分管道布置在复杂岩体和动态开挖的巷道中,充填钻孔的破坏是充填系统失效的最主要原因,其破坏形式主要为堵塞、磨损引起的泄漏以及破裂。通过研究料浆中固体颗粒的静水沉降速度、非球形颗粒的阻力沉降规律和料浆粗骨料的沉降堵塞条件,找出了充填钻孔下沉和堵塞的力学机理。建立了从料浆和料浆的真空段形成的压力波的水锤物理模型,得出了充填钻孔中管道破裂的力学机理。同时,通过分析充填料浆的扭矩和能量,还建立了垂直充填钻孔的冲击磨损物理模型。我们研发了探测钻孔破裂地点的方法、钻孔永久修复的方法(图11)以及充填钻孔中管道的非耦合安装方法。通过有规律地切割和替换破坏的管道,充填钻孔变得永久可修复。取出已破坏的套管并使用充填管道的非耦合安装技术,使破坏了钻孔可以整修一新,从而确保了高效充填。

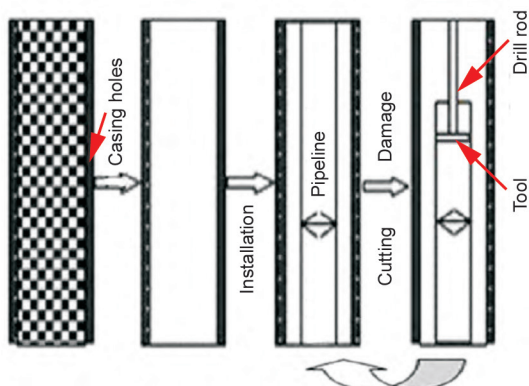


图11. 破裂的充填钻孔修复原理。

5. 结论

金川镍矿床的开发面临一系列主要的科技挑战,包括高地应力、复杂的地质结构、困难的开采条件以及复杂的岩石力学问题。为了实现在金川矿深部资源的高效开发和综合利用,金川矿的研究者参与了联合攻关,不断吸收和研究国内外先进技术,向专家学习,持续创新采矿工程理论和改进现有技术。

金川镍矿呈现的开采条件和岩体变形力学机理以高应力和巨型矿床尺寸为特征。由于开发了承压破碎岩体的地层控制理论和技术,为现存条件下的高效、安全开采提供了基础。

为大面积连续开采而发明了新的技术,在矿山深部使用了蜂窝状结构进路,实现了矿体的连续回采和下降。提高了机械化程度和采矿产量,增加了开采能力和利润率。

研发了使用矿山固体废弃物作为粗骨料的高浓度料浆管道输送技术。采用现有先进充填工艺和参数建设的这个金属矿山,拥有世界上最大的充填能力。事实上,金川矿的整体充填技术处于世界领先水平。

在巨型和复杂的金川镍矿,为深部安全和连续开采建立了一个技术集成包,因此实现了深部开采的技术突破。这个集成包不仅应用于金川矿,也在国内其他一些矿山得到了应用,如新疆维吾尔自治区的喀拉通克镍矿、云南省的会泽铅锌矿以及吉林省的板庙子金矿等。

金川镍矿的采矿作业正在向地下更深处以及更高智能和更低损失的方向推进,对于深部资源的高效开发和综合利用我们已取得了影响深远的科研成就;为了金川镍矿的可持续发展,需要进一步研发深部贫矿资源的安全、高效和低成本采矿方法,进行尾矿和冶炼炉渣的循环利用,研制用于深部镍矿的大颗粒尺寸的大流量充填料浆,研究矿山深部应力变化规律与岩体力学响应两者间的关系,开发适合金川镍矿深部巷道支护的新工艺。

References

- [1] Jinchuan Nonferrous Metals Corporation, Jinchuan Branch of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Issues on engineering geology and rock mechanics for mining at Jinchuan nickel mine. Jinchang: Jinchuan Branch of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering; 1996. Chinese.
- [2] He M. Conception system and evaluation indexes for deep engineering. Chinese J Rock Mech Eng 2005;24(16):2854-8. Chinese.
- [3] Jinchuan Nonferrous Metals Corporation, Institute of Geology and Geophysics of Chinese Academy of Sciences. Research on the engineering geomechanics for mining at Jinchuan copper-nickel mine. Beijing: Institute of Geology and Geophysics of Chinese Academy of Sciences; 2000. Chinese.
- [4] Yang Z, Gao Q, Wang Y, Yue B, Meng X, Lei Y. Engineering geology and rock mechanics for super-large nickel mine. Beijing: Science Press; 2013. Chinese.
- [5] Wang S, Gao Q. Research and outlook for engineering geology at Jinchuan mine. 1997. Chinese.