

# 金川高应力矿床充填采矿技术研究进展与亟待解决的技术难题

杨志强<sup>1,2</sup>, 高 谦<sup>1</sup>, 王永前<sup>2</sup>, 陈得信<sup>2</sup>, 姚维信<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 金川集团股份有限公司, 甘肃金昌 737100)

**[摘要]** 金川镍矿是世界上少见的大型硫化铜镍矿床。矿体埋藏深、地应力高、地压大、矿岩体不稳固,是目前世界上难采矿床之一。针对金川矿床不利的采矿技术条件,自建矿50多年来,金川矿山已经开展了大量广泛的采矿技术研究。本文首先概述了金川矿山工程概况,归纳总结了金川矿山充填采矿发展历程;然后,阐述了金川矿山充填技术研究以及所取得的研究成果。主要包括:根据工程地质研究和采矿方法试验,选择了与之相适应的下向分层进路胶结充填采矿方法;通过高浓度料浆自流输送和膏体泵送两种充填系统中的关键技术研究,在充填体作用机理、固体废物利用、充填料浆流变特性以及管道减阻输送等方面取得的研究成果;尤其针对膏体充填系统所存在的问题开展了技术攻关和系统改造,由此获得重大科技成果,使膏体充填系统顺利达产。最后指出了目前金川矿山充填开采现状以及存在的主要问题,并提出了金川大型镍矿实现安全、高效、经济和环保充填法开采仍亟待研究解决的关键技术难题。

**[关键词]** 金川镍矿;充填采矿;研究进展;技术难题

**[中图分类号]** TD853.34 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)01-0042-09

## 1 前言

金川镍矿是世界上著名的多金属共生的大型硫化铜镍矿床,位于我国甘肃省河西走廊龙首山下长6.5 km、宽约500 m的范围内,已探明矿石储量 $5.2 \times 10^8$  t,镍金属储量 $5.5 \times 10^6$  t,列世界同类矿床第3位;铜金属储量 $3.43 \times 10^6$  t,居中国第2位。矿床发现于1958年,1959年成立永昌镍矿,1961年更名为金川有色金属公司,2012年成立金川集团股份有限公司。

金川镍矿1964年生产出第一批电解镍,经过50多年的发展,金川集团股份有限公司已经成为国际知名的镍、铜、钴、铂族金属及化工生产的特大型联合企业。预计到2015年,有色金属及加工材年产量

$1.5 \times 10^6$  t,化工产品 $4.5 \times 10^6$  t;产品年销售收入1 000亿元,年营业收入1 500亿元。

金川镍矿目前有龙首矿、二矿区和三矿区3个生产矿山。龙首矿于20世纪60年代建设,目前生产能力达到 $1.65 \times 10^6$  t/a,采用竖井-平巷开拓系统及下向六角形高进路胶结充填法开采。二矿区1966年开始建矿,1983年投产,采用下向分层机械化水平进路胶结充填采矿法开采,目前年产矿石 $4.5 \times 10^6$  t,是金川镍矿的主力矿山,也是我国乃至世界上最大的下向分层进路充填采矿法矿山。金川三矿区是由原露天矿转型的生产矿山,主要开采原二矿区2#矿体F<sub>17</sub>以东的 $2.122 3 \times 10^8$  t矿石,目前年生产矿石已突破 $2 \times 10^6$  t,成为金川集团股份有限公司的又一主力矿山。

**[收稿日期]** 2013-12-30

**[基金项目]** 国家重点基础研究发展计划(2010CB731500)

**[作者简介]** 杨志强,1957年出生,男,山西万荣县人,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事充填采矿安全与管理及废弃物资源化综合利用等方面的研究;E-mail: YZQ@jnm.com

目前金川矿山年产矿石超过 $8 \times 10^6$  t,并与2015年达到 $1 \times 10^7$  t。金川矿山充填技术的进步,不仅推动了中国充填采矿技术的进步,而且也对世界充填技术的发展作出了贡献。

## 2 金川矿山充填采矿发展历程

### 2.1 金川铜镍矿床特点与存在的问题

#### 2.1.1 金川铜镍矿床特点

金川铜镍矿床特点以及存在的主要问题表现在以下几个方面<sup>[1]</sup>。

1) 矿区地应力高。金川矿区是典型的高地应力矿区,不仅表现在埋藏深、自重应力高,而且近似水平方向的构造应力最大达到50 MPa,即水平应力是垂直应力的1.69~2.27倍。

2) 矿体厚大。矿区已发现351个矿体,其中1#矿体最大,占矿区总储量的76.45%,产于二矿区4行至28行间的岩体深部,全长1 600 m,平均厚度98 m,其中富矿段长1 300 m,厚69 m。

3) 矿石含有多种有用成分,价值高。矿石特别是富矿,不但镍铜品位高,同时还伴生钴、铂族等17种元素,可回收利用的金属达14种之多。

4) 矿岩体破碎。矿床赋存于海西期含矿超基性岩体中,上盘围岩为二辉橄榄岩,下盘围岩主要为大理岩、二辉橄榄岩。矿区内断裂构造极其发育, $F_{16}$ 、 $F_{15}$ 、 $F_{26}$ 等断层对矿岩条件产生剧烈影响,使矿岩异常破碎,表现出岩石强度高而岩体稳定性差,由此给采矿方法选择和采场地压控制带来严峻挑战。为此,针对金川矿山的采矿设计和采场地压控制开展了大量的研究<sup>[2-10]</sup>。

#### 2.1.2 采矿设计存在得主要问题

针对金川镍矿的不良采矿技术条件,为了探索与之相适应的采矿方法,金川镍矿与国内外高等院校和科研单位合作,开展了大量的科学研究与采矿技术攻关,为采矿方法与回采工艺研究、采场地压控制奠定了基础。1965年龙首矿原设计富矿段采用分层崩落法,贫矿段采用分段崩落法,但由于矿岩破碎、地应力大,致使采场作业条件差、损失贫化率大、木材消耗量高,因此开展了上向分层胶结充填采矿法研究。还是由于矿岩稳定性差,破碎围岩下作业安全性差,最终采用下向六角形高进路胶结充填采矿法。

二矿区采矿方法和回采工艺经历了多次演变与发展过程,并且一直存在不同意见之争。二矿区

建成投产比龙首矿晚20年,建矿投产初期基本上采用的是龙首矿的采矿方法,即在矿岩中等稳定条件的东部2#矿体,采用沿走向5 m间隔垂直分条布置的上向分层充填采矿法,采取“隔一采一”的两步回采方案。对于矿岩不稳定的西部矿体,采用下向高进路分层充填采矿法,用电耙出矿。从1985年开始进行了几项重大的采矿方法工业试验,探索适应于该矿床的采矿方法。

1) 中国-瑞典采矿方法研究。试验研究包括上向和下向两个机械化盘区的采矿方法。机械化上向水平进路胶结充填采矿法平均生产能力达1 039 t/d;下向水平进路胶结充填采矿法平均生产能力达到817 t/d。

2) Vertical crater retreat 采矿方法试验研究。Vertical crater retreat,简称VCR采矿法,即为垂直漏斗后退式采矿法,在金川不良岩层条件下能否应用? 1984—1987年引进ROC306型履带式井下高压潜孔钻机和LF-4.1型铲运机,创造了采场综合生产能力为250 t/d的记录。但因第2个采场爆破引发了上盘垮落而中止。说明VCR法不适用于较不稳定的矿岩条件。

3) 中国-澳大利亚技术合作大孔空场嗣后一次充填高效率采矿方法试验研究。二矿区规划中计划将8 000 t/d提高到17 000 t/d,井下胶带运输和竖井提升能力均可满足这一要求。采场生产能力能否进一步提高? 1988—1992年,金川公司与澳大利亚芒特-艾萨矿业公司签订了技术合作协议,在二矿区东部中等稳定的区段组织大孔空场嗣后一次充填采矿试验,并在选定的 $(15 \times 8)$  m<sup>2</sup>采场,顶部凿岩硐室四周进行了长锚索加固。但在拉槽时因大孔爆破致使顶盘大量冒落而失败。

近30多年的采矿生产实践证明,下向进路胶结充填采矿法适用于金川矿床复杂的开采技术条件,特别是采用大型机械化配套设备,加强科学管理,能够提高进路及盘区生产能力,降低矿石损失贫化。同时还显示,提高充填技术和确保充填体质量,是控制采场地压和确保安全采矿的关键技术。同时,充填法开采是实现“采富保贫”和充分回收矿产资源的战略目标的唯一选择。

#### 2.1.3 深部多中段开采存在的问题

为了满足下向进路充填采矿对充填质量和不断提高充填能力的要求,近30年来金川矿山开展了广泛而深入的充填采矿技术研究,研究涉及充填材

料、充填工艺、充填装备以及充填系统的优化与改造等方面。不仅确保高地应力破碎矿岩条件下的安全生产,而且还使矿山生产能力每年以10%的速度递增。随着矿床开采深度的加深,开采面积扩大,深部采矿难度也随之增大。尤其深部多中段开采采场地压控制以及水平矿柱的稳定性等问题,将使二矿区开采面临更大挑战。其主要问题有以下5个方面。

1) 1 150 m中段水平矿柱消失的采场整体稳定性。二矿区1#矿体实施多中段开采。随着两中段间的水平矿柱厚度逐渐减小而改变空区轴比,从而造成围岩和充填体应力变化,势必影响采场围岩和充填体的整体稳定。因此水平矿柱回采结束后,采场围岩和充填体的稳定性如何?是否会发生充填体的整体脱落?是否会导致采场覆岩发生大范围沉陷以及诱发采场围岩剧烈活动?这是二矿区开采面临的严峻问题。

2) 水平矿柱消失后采场地压显现规律与控制。对采场起到支撑作用,抵抗矿区水平构造应用的水平矿柱,不仅对采场的整体稳定性起到至关重要的作用,而且还有效地抑制采场地压。一旦水平矿柱回采结束转入下个中段开采,势必对上个中段的采场地压显现规律产生根本性影响,并随着采深增加,影响程度加大,影响范围扩大。因此水平矿柱回采结束后,深部采场地压显现规律以及地压控制也是人们密切关注的问题。

3) 水平矿柱消失后采场岩移规律以及对竖井工程的影响。传统观点认为,充填法采矿一般不存在岩层移动的问题。这对于矿体埋藏深、围岩稳固和矿体小的充填法可能是正确的,但对于像二矿区1#矿体这类特大型不稳固矿体,地表岩移开裂甚至发生沉陷崩落是不可避免的,只是或早或迟,或轻微或剧烈。事实上,二矿区从1986年投产,到1998年地表发现张裂缝,二矿区在开采12年后,采场围岩移动已经发展到了地表。从1998年发现岩移张裂缝以来,随着开采规模和生产能力的扩大,采场岩移似乎日趋加剧,致使14行风井于2005年3月发生剧烈垮冒。金川二矿区采矿实践证明,对于超大规模的金川矿体开采,尽管矿体埋藏深,充填法采矿不仅诱发岩移,而且岩移范围较广、移动速率较大。更加令人关注的是,当1 150 m水平矿柱回采结束后,可能改变采场岩层移动的现有发展规律,势必对采矿工程和采场地压产生显著影响。因此,

水平矿柱回采结束后采场岩移规律会发生何种变化?岩层移动是否会严重危及二矿区已建和在建的30座竖井以及大跨度地下工程的稳定性?尤其令人揪心的是,返修加固后的14行风井稳定如何?是否还会再次发生变形破坏?承担全矿矿石提升任务的16行西主井将会受到何种程度的影响?是否会危及竖井的安全运行?这些问题一直萦绕在人们脑海中挥之不去。

4) 二矿区1#厚大矿体深部中段开采方案的决策。与一期工程相比,埋深接近千米的深部采场开采面积将超过 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。无论是围岩和充填体所赋存的应力环境、围岩力学特性还是深部工程地质和水文地质条件均发生了不同程度的变化。一期工程无矿柱连续开采的成功经验很难拷贝到深部中段,但也没有任何理由毫无根据的否定无矿柱连续开采的可行性。关键在于对深部采矿条件作进一步分析和研究,由此改进采矿技术和回采工艺,以适应深部高地应力的开采条件,确保深部采场安全高效开采。这是金川二矿区深部开采方案决策不可回避的重要问题。

5) 二矿区1 250 m水平以上贫矿开采可行性与优化决策。金川矿床在建矿初期基于当时的技术条件以及国家对有色资源的迫切需求,提出了“采富保贫”的资源开发战略决策。因此,几十年的采矿生产中,保留了1#矿体1 250 m中段以上以及上盘的大量贫矿。随着金川资源的日趋减少以及开采规模的逐渐增大,贫矿资源的开发利用已经列入金川集团股份有限公司的开发规划中。由于富矿开采破坏了原岩应力状态,使采场围岩和矿体稳定性更差,从而使1 250 m水平以上贫矿开采面临更大困难;同时,贫矿开采对采场围岩产生二次扰动,加剧岩层移动速度,岩移势必加剧对矿区竖井等主要构筑物稳定性的影响。因此,1 250 m以上贫矿何时开采、如何开采也是二矿区资源开发所面对的又一艰难抉择。

## 2.2 金川充填技术研究发展阶段

金川矿山充填采矿技术的发展可分为三个阶段<sup>[11-13]</sup>。

### 2.2.1 粗骨料机械化胶结充填

建矿后至20世纪80年代初,以龙首矿粗骨料机械化胶结充填为标志。金川矿山在采用充填采矿法初期,在龙首矿建设了粗骨料简易充填系统,采用40 mm戈壁集料为充填骨料,袋装水泥人工拆

包,  $0.4 \text{ m}^3$ 、 $0.8 \text{ m}^3$ 混凝土搅拌机制备, 矿车-串筒溜放充填, 采场进路中电耙倒运。该种充填方式工人劳动强度大, 作业效率低, 生产能力小, 作业环境差。经多次改进在龙首矿建成了粗骨料机械化充填系统, 采用 $-25 \text{ mm}$ 戈壁碎石集料溜井存放, 袋装水泥拆包机拆包, 射流制浆或 $\phi 1.2 \text{ m}$ 混凝土搅拌机制浆, 水泥浆采用管道自流输送。水泥浆与骨料混合均匀后, 采用井下吊挂皮带运料加电耙倒运。这种简化充填系统的充填方式虽然取得较大进步, 但仍未实现充填料浆的管道输送, 仍存在采矿作业效率低、生产能力小和作业环境差等问题。

### 2.2.2 高浓度管道自流输送

20世纪80年代至20世纪末, 以高浓度料浆管道自流输送充填技术的全面推广为标志; 同时开展了膏体泵送充填技术研究, 在二矿区建成了膏体泵送充填系统。在大量试验研究的基础上, 分别在二矿区及龙首矿建成了高浓度料浆管道自流输送充填系统。采用的充填工艺为: 以 $3 \text{ mm}$ 棒磨砂+河砂(戈壁砂)为集料, 采用火车运至砂池中并通过抓斗、中间料仓、圆盘给料机、核子秤进行给料计量, 采用分砂小车分砂。通过罐车将散装水泥卸入水泥仓并通过双管螺旋给料机、冲板式流量计进行给料和计量; 通过流量计及调节阀进行水的供给和计量; 采用集散式控制系统和智能化仪表, 实现了物料配比、料浆浓度、搅拌桶液位的自动检测和调节; 与此同时, 还开展了粉煤灰替代部分水泥的试验及工业化生产; 在实现高浓度料浆管道自流输送充填的基础上, 对充填进路挡墙进行改进, 由炉渣砖挡墙全部替代木质挡墙。开展了膏体泵送充填新技术的试验研究, 引进德国普斯迈斯特固体泵有限公司(PM)的KOS2170、KOS2140型液压双缸活塞泵、德国Schwing公司KSP140-HDR型活塞泵, 于1999年在二矿区建成了膏体泵送充填系统。

### 2.2.3 高浓度管道自流充填技术革新和膏体充填系统改造

2000—2010年, 以高浓度料浆管道自流输送系统挖潜、革新、改造以及二矿区膏体泵送充填系统达到产能为标志。二矿区一、二期搅拌站投入使用后, 随着矿山生产能力的不断提高, 需要对充填系统进行挖潜、革新、改造。由此对制约充填系统能力的诸多要素进行改进, 包括: a. 不断优化充填集料组成, 改进集料供配料系统, 提高单套系统制备输送能力; b. 在大量试验研究的基础上, 在充填料浆

中添加减水剂、早强剂等; c. 提高充填料浆浓度及充填体强度; d. 对充填钻孔及井下充填管道材质、连接方式(快速卡箍连接、耐磨柔性接头等)进行优化选择, 提高充填料浆通过能力及使用寿命; e. 采场进路充填挡墙材料及架设方式, 提高采场充填效率、缩小分层道与进路交叉口顶板暴露面积; f. 在进路挡墙处设置脱水设施并在充填管道进入进路口处设置导水阀等, 使进路充填体尽快脱水凝固并提高充填接顶率等。

## 3 金川充填采矿技术研究成果

### 3.1 充填材料及配比优化研究

充填体由集料、胶结剂、水及各种添加剂组成。为了人工假顶下的安全作业, 下向进路充填采矿法要求 $3 \text{ d}$ 、 $7 \text{ d}$ 、 $28 \text{ d}$ 充填体的单轴抗压强度分别达到 $1.5 \text{ MPa}$ 、 $2.5 \text{ MPa}$ 、 $5.0 \text{ MPa}$ , 实现充填料浆管道输送的顺利实施, 为此开展了充填材料组成的优化配比研究<sup>[14-20]</sup>。

1) 充填集料。通过试验表明,  $3 \text{ mm}$ 棒磨砂、戈壁砂、选矿尾砂(全尾砂或分级尾砂)、破碎废石均可作为充填集料。在充填集料组成中, 棒磨砂、戈壁砂可相互替代, 占集料比例大小对充填体强度影响较小。添加尾砂可以改善料浆的和易性及保水性, 有利于料浆的管道输送, 但添加比例增加将降低充填料浆浓度, 对充填体强度产生负面影响。由于高浓度料浆自流输送系统输送浓度受到限制, 所以不宜添加尾砂。为了改善料浆的可泵性, 防止堵管事故的发生, 在膏体泵送系统中可适当添加尾砂, 但添加比例不宜超过骨料总量的 $40\%$ 。

2) 胶结剂。充填的胶凝材料为 $32.5$ 级增强复合水泥, 水泥比重为 $3.1 \text{ t/m}^3$ , 容重 $1.1 \text{ t/m}^3$ , 细度的比表面积为 $310\sim 330 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。初凝时间 $> 45 \text{ min}$ , 终凝时间 $< 10 \text{ h}$ ,  $3 \text{ d}$ 、 $28 \text{ d}$ 的抗折强度分别大于 $2.5 \text{ MPa}$ 和 $5.5 \text{ MPa}$ ;  $3 \text{ d}$ 、 $28 \text{ d}$ 的抗压强度分别大于 $10.0 \text{ MPa}$ 和 $32.5 \text{ MPa}$ 。粉煤灰具有火山灰性质, 与水泥一起产生水化反应, 可部分替代水泥, 降低充填成本。但由于粉煤灰颗粒为真空球状, 容重小, 在充填料浆浓度较低时, 更易产生离析, 所以目前在二矿区高浓度料浆自流输送系统中未添加粉煤灰, 而在膏体泵送系统中, 干粉煤灰添加量为 $150 \text{ kg/m}^3$ 。金川闪速炉水淬渣具有一定的火山灰性质, 通过对镍冶炼水淬渣经提铁(炼钢)后的二次炉渣的研究表明, 掺入磨细的二次渣 $300 \text{ kg/m}^3$ 、再加 $1\%$ 石灰、 $3\%$ 石

膏及 90 kg/m<sup>3</sup> 水泥的复合胶结剂,可满足管道自流输送工艺要求,但由于多种因素制约,未能在生产中推广应用。

3) 添加剂。添加剂主要有早强剂及减水剂。早强剂可缩短充填体凝结时间,提高充填体早期强度,并对充填体后期强度无明显负面影响。减水剂能减少充填料浆用水量,在坍落度或流动性相同的条件下,提高充填料浆浓度,相应地由于充填料浆浓度提高,充填体强度亦可得到提高。目前在自流系统及膏体泵送系统中均添加有干粉状早强剂,添加比例为水泥量的 1.5%,膏体泵送系统中添加水泥用量的 1%~1.5% 的 JKJ-NF 高效液态减水剂。试验表明,减水剂添加比例为水泥用量的 1% 和 2% 时,3 d 充填试块强度提高 0.25%~40%,7 d 强度提高 8.1%~62%,28 d 强度提高 3.6%~45%。当添加比例增大至 3% 时,28 d 强度降低 8%~19%。

4) 水。充填系统用水主要有工业用水或井下排至地表的矿坑水。各种废水 pH、不溶物含量等均不超过《混凝土用水标准》的规定范围,经沉淀后可用于矿山充填。

### 3.2 充填料浆流变性 & 管道输送研究

为了确定各种不同集料所制备充填料浆的输送参数,开展了多种充填料浆的理论分析、实验室试验、环管试验和 L 型管道自流输送试验。在建立流变学力学模型的基础上,分别用 NXS-II 型旋转黏度计、德国 RV-II 黏度计、十字桨叶式测量头,测定了全尾砂膏体流变参数;采用两点式工作度仪、管式黏度计或专用旋转黏度计,测定加粗骨料的全尾砂膏体流变参数。建立了渣浆泵水力输送环管试验系统,研究高浓度料浆的管输特性。在二矿区东部充填站,建立了液压双缸活塞泵环管输送试验系统。系统中采用德国 PM 公司的 KOS2170 液压双缸活塞泵,管道上安装有浓度计、流量计、远传压力表及无纸记录仪等,对各种配比的高浓度或膏体充填料浆进行环管试验,测定其流变参数及不同管径的输送阻力,为工业生产提供全尺寸的真实数据。通过大量试验研究及理论计算,分析了高浓度充填料浆及膏体充填料浆的管输特性,提出了均质流、非均质流及两相流的临界流速等,总结出金川水力坡度计算经验公式,获得了不同配比及浓度下的管道输送阻力,为充填管网设计、充填料浆制备输送参数确定及膏体输送设备选型提供依据<sup>[21-28]</sup>。

### 3.3 高浓度及膏体充填料浆制备技术研究

金川所属矿山的生产能力大,对充填体质量要求高,加之充填料组成复杂,因此对充填料浆制备技术要求高,历年来金川公司开展了充填料浆制备工艺及设备研究,为高浓度自流输送系统及膏体泵送系统的正常生产提供了保证,也为国内外类似矿山提供了经验和借鉴<sup>[29-36]</sup>。

1) 高浓度充填料浆制备质量控制,是实现高浓度料浆顺利自流输送的核心。为了充填料浆浓度及流量的稳定,特别是在充填料浆中含有棒磨砂、戈壁砂等粗集料(相对于尾砂而言)时,一旦充填料浆浓度波动较大或流量变化较大时,极易在管道输送中发生离析而堵管,并严重影响充填体质量。为了保持充填料浆浓度及流量的稳定,采取了多项技术及管理措施:a. 严格把握充填材料各组分质量,制定相关技术标准;b. 采用先进的棒磨砂、戈壁砂、水泥、粉煤灰及水等各组分的给料计量设备,使各组分在系统运行时给料稳定可调;c. 采用先进的检测控制仪表,使各物料给料量、灰砂比、搅拌桶液位、充填料浆浓度及流量等系统运行参数测定准确;同时采用计算机控制系统实时模拟显示、反馈控制与调节,从而使系统处于设定工况下稳定运行;d. 建立健全相关的管理制度及操作规程,完善充填工区的机构设置及人员配备,制定合理的工资及激励制度,以调动职工的积极性等。

2) 膏体制备质量控制。膏体充填料各组分配比的准确性及浓度稳定性,是实现顺利泵送的关键因素。当膏体浓度变化 1%~2% 时,其输送阻力变化 50% 以上。浓度过高可能导致输送阻力过大而泵压不够或发生管道爆裂;浓度过低则将导致料浆离析。由于膏体泵送系统添加尾砂,除采取和自流输送系统相同的技术与管理措施外,尾砂添加浓度及流量的稳定也是决定膏体制备质量的关键因素。为此分别开展了尾砂仓外高压水制浆、真空带式过滤机脱水、风水联合制浆、砂仓循环水制浆等尾砂添加工艺研究,最终采用砂仓循环水制浆、直接放砂至搅拌槽的尾砂添加工艺,实现放砂浓度和流量的可调,从而保证了膏体制备质量。

### 3.4 充填料浆输送管网优化研究

试验研究确定金川矿山充填的主体集料为 3 mm 棒磨砂,采用高浓度料浆管道自流输送胶结充填。为了保证不堵管,充填管内流速需要大于等于

2 m/s的临界流速。由于棒磨砂棱角尖锐、磨蚀性强,所以导致充填钻孔及井下水管道磨损严重,导致对充填钻孔的不断修复或重新打孔,从而导致钻孔网布置庞杂。为了解决该问题,开展了充填管网的优化研究<sup>[37-43]</sup>。

1) 优化充填钻孔及井下管道材质。二矿区生产初期,井筒中采用 $\phi 152$  mm普通钢管。由于材质差、管壁薄,同心度及垂直度差,管道使用寿命短。料浆输送量达到3 000~15 000 m<sup>3</sup>时磨穿漏浆。研究采用钨铬双金属耐磨管和刚玉耐磨管,可使充填量超过 $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。

2) 优化充填钻孔及水平管道管径。充填钻孔套管采用 $\phi 219$  mm耐磨管,壁厚20 mm,以降低料浆流速,减轻磨损。水平管道采用 $\phi 133$  mm耐磨管,壁厚18~20 mm,以使料浆流速大于临界流速。同时将水平管道的法兰连接改为卡箍连接,多路充填管道与不同充填地点管道的互换研究发现,采用耐磨柔性接头,将充填钻孔底部易磨穿的弯头埋入高标号混凝土中,磨穿后混凝土中的圆形通道仍可通过料浆。这些措施有助于充填料浆的顺利输送,从而提高充填系统生产能力。

### 3.5 膏体充填技术攻关与充填系统改造研究

作为我国首次采用的膏体充填系统,该系统在1999年建成投产后在生产中暴露出一系列问题。为此金川矿山开展联合技术攻关,自2003年开始经过近5年的反复探索、试验和研究,逐步完善和解决了一系列关键技术难题。

1) 取消了原有真空带式过滤机系统,在尾砂仓中采用循环水制浆工艺,并由尾砂仓直接放砂至膏体搅拌机中,从而使尾砂添加浓度稳定、流量可调。

2) 将原有水泥地面活化搅拌制浆、KOS2170活塞泵输送至井下重新搅拌、二段泵送,改为地面搅拌制浆、渣浆泵或软管泵输送至地面膏体搅拌机中,避免了活化搅拌机挂壁严重、水泥浆输送管道过长且易于堵塞的问题。

3) 原系统在1 250 m中段设有接力泵站,由于井下环境恶劣,该泵站KSP140-HDR活塞泵配电及控制系统易于出现故障,后取消该泵站,而由地面输送泵一段直接将胶结膏体输送至采场进路进行充填,避免了地面井下两级泵站的匹配问题。

4) 针对原有二段搅拌机轴头磨损及漏浆等问题,采用取消原一级搅拌、二段搅拌机轴瓦改为悬吊支撑并将二段搅拌机槽体加高等措施,解决了搅

拌机磨损及漏浆问题,加高槽体后,搅拌机容积更大,更有利于输送泵的平稳运行。

5) 将水清洗管道改为地表风水联合清洗方式,保证了管道的清洁干净。

6) 通过对膏体料浆配比及控制参数的优化设计,使膏体浓度更为稳定。通过以上综合措施的实施和系统改造,使二矿区膏体泵送充填系统逐步进入正常生产状态,2006年充填83 746 m<sup>3</sup>,2007年充填156 348 m<sup>3</sup>,2009年达到了 $2 \times 10^5$  m<sup>3</sup>设计生产能力<sup>[44]</sup>。

## 4 金川充填技术存在问题与关键技术研究

### 4.1 金川充填技术存在的问题

2010年二矿区矿石生产能力 $4.5 \times 10^6$  t,充填量达到 $1.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。预计到2015年二矿区年出矿量将达到 $5 \times 10^6$  t,年充填量 $1.7 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。考虑1.15的不均衡系数,仅二矿区的充填量最大将达到 $1.95 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。到时二矿区将呈现850 m、1 000 m和1 250 m三个中段同时回采及充填的生产格局。由于深部开采条件更趋复杂多变,地应力增大,采场地压显现更加剧烈,所以对深部采场的充填体质量提出更高要求。经过几十年努力,虽然在充填技术方面取得了丰硕成果,保证了矿山正常生产,但现有充填系统仍存在诸多问题,其技术装备水平难以满足深部充填采矿生产要求,具体体现在以下几个方面。

1) 自流输送系统工艺设备老化、流程复杂。二矿区一期搅拌站建于1982年,二期搅拌站建于1997年。由于原设计能力为满足 $2.97 \times 10^6$  t/年的生产规模,现已无法满足日益扩大的生产能力要求,其储砂、供砂和分砂等设施容量以及供料能力严重不足。一期搅拌站水泥供料经多次倒运,设备多、工艺繁琐、故障率高、维护量大;同时厂房除尘系统无法满足收尘要求。由于长期处于满负荷运行,其配电、供水等设施也达到了承载极限。

2) 整体充填设施配置不合理,充填能力无法进一步提高。一、二期搅拌站共用一个储砂池,一期搅拌站5套制备系统中的1#、2#系统已拆除,3#、4#、5#系统只能2套生产、1套备用。二期搅拌站膏体泵送系统运行时需占用自流系统作为水泥浆制备,只有膏体泵送系统停运或检修时,自流系统方可独立运行。因此二矿区实际只能同时运行3套制备系统,其中一期2套、二期1套,其整体配置已难以更改,

充填能力无法进一步提高。

3)膏体充填系统工艺及装备老化。膏体充填系统的主体输送设备KSP140-HDR型液压双缸活塞泵是德国Schwing公司20世纪80年代产品,早已不再生产,其备品配件无从供给,且整套膏体制备输送均采用单台套运行模式。虽经联合攻关已使膏体充填系统达到设计生产能力,但制约因素多,一旦出现设备故障、产生堵管等现象,将严重影响系统的正常运行,降低充填能力。

#### 4.2 金川充填采矿亟待解决的技术难题

鉴于金川矿山充填系统存在的问题,亟待开展以下研究工作。

1)大流量高浓度料浆自流输送胶结充填技术研究。目前二矿区高浓度料浆自流输送单套系统制备输送能力仅为80~100 m<sup>3</sup>/h,料浆浓度为77%~79%,灰砂比全部为1:4,每天连续运行12~14 h。膏体泵送充填系统制备输送能力为60~80 m<sup>3</sup>/h,料浆浓度为82%~84%,水泥添加量为300 kg/m<sup>3</sup>,每天连续运行12 h。由于受多方条件制约,已有充填设施难以进一步提高充填能力,难以满足将来年出矿5×10<sup>6</sup> t及充填1.95×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>的生产能力要求。为此,在二矿区二期搅拌站西侧新建一个充填搅拌站,站内设置4套高浓度料浆自流输送充填系统。为了减少设备台套数、提高生产效率、降低充填生产管理成本和综合能耗,将单套系统制备输送能力提高到150 m<sup>3</sup>/h,从而达到1.95×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/年的充填能力,因此,需要开展大流量高浓度料浆自流输送能力的理论计算、充填料物化特性、大容量搅拌槽研制、大流量充填料浆环管试验以及大流量高浓度充填料浆制备输送工业试验等研究。

2)膏体充填持续稳定运行控制与管理研究。通过联合技术攻关,虽然解决了制约膏体充填正常运行的一系列难题,并达到了设计生产能力,但膏体充填系统中的核心设备——KSP140-HDR型液压双缸活塞泵为单台套运行,备品配件无从供应,一旦出现故障将直接导致系统停运。近20年来,国内类似设备发展极快,其性能参数早已超过国外20世纪80年代产品,输送能力可达120 m<sup>3</sup>/h,出口压力达12~16 MPa。个别厂家已能生产矿山充填专用液压双缸活塞泵。为了确保膏体泵送充填系统正常持续生产,需要与国内有关厂家进行合作,研制适合

二矿区工况条件下的充填专用输送泵,并采用一用一备的系统配置,以确保膏体充填系统发挥作用。

3)降低充填采矿成本和提高充填采矿效益的关键技术研究。历年来金川矿山的充填材料均为棒磨砂、戈壁砂和部分全尾砂。胶结材料采用普通的硅酸盐水泥。随着矿山生产能力的逐年增加,不仅棒磨砂生产能力难以满足矿山充填的需求,而且棒磨砂人工加工成本高达47元/t。加之深部采场地压大,对充填体强度要求高,因此均采用1:4的高灰砂比,从而导致充填采矿成本居高不下。不仅大大降低深部采矿经济效益,而且给矿山的贫矿开采带来严峻的挑战。因此,开展降低充填采矿成本的关键技术研究,对于金川安全、高效和经济开采,不仅必要而且势在必行。

目前,金川矿山已经从两个方面开展研究:一方面,开发破碎废石作为充填集料代替棒磨砂;另一方面,利用粉煤灰、脱硫灰渣和矿渣微粉开发低成本和高强度的新型充填胶凝材料替代水泥。显然,破碎碎石的粗骨料和新型充填胶凝材料的应用,其充填体强度和管道输送特性均与目前的棒磨砂水泥胶凝材料充填料浆存在本质上的差异。针对破碎碎石充填料和新型充填胶凝材料,需要开展充填物料的优化配比,充填体强度以及充填料浆流变特性的理论与试验研究,从而实现充填料浆的优化制备和管道减阻自流输送,并使充填体强度满足金川矿山对充填体的强度要求,达到安全、高效和低成本开采。这是金川矿山亟待开展研究的重要研究课题,是提高金川矿山采矿效益和绿色开采的必由之路。

## 5 结语

金川镍矿是我国最早采用充填法采矿的矿山之一,也是我国首次采用膏体充填技术的矿山。几十年来,为了满足我国对铜镍以及铂族金属的迫切需求,金川矿山以发展充填采矿技术为目标,开展了充填作用机理、废物资源利用、高浓度和膏体流变特性以及管道输送等方面研究,解决了下向分层胶结充填采矿中的技术难题,实现了金川矿山安全、高效和环保采矿,其生产能力以每年10%的速度增长。金川矿山充填采矿的研究成果不仅为金川高应力难采矿床开采奠定了基础,也为国内外充

填采矿技术的发展和工程应用提供了宝贵经验。

### 参考文献

- [1] 杨志强,高 谦,王玉山,等.特大型镍矿工程地质与岩石力学[M].北京:科学出版社,2013.
- [2] 王正辉,高 谦.胶结充填采矿法充填作用机理与稳定性研究[J].金属矿山,2003(10):18-20.
- [3] 王正辉.充填体的质量与控制[J].采矿技术,2001(3):16-18.
- [4] 王佩勋,王正辉.胶结充填体质量问题探析[C]//第八届国际充填采矿会议论文集.2004:205-208.
- [5] 王新民,史良贵,肖智政,等.减水剂在充填料浆中的作用机理及应用研究[J].金属矿山,2004(4):11-13.
- [6] 张海军,陈怀利,梁艇栋,等.提高胶结充填体早期强度的试验研究[J].金属矿山,2009(增1):284-286.
- [7] 顾贵先.粉煤灰在金川矿山胶结充填中的应用[J].有色矿山,1994(4):15-16.
- [8] 孙三壮,梅维岑,黄顺利,等.金川二矿区井下废石料充填利用及充填体受力状态分析[J].矿冶工程,1997(1):1-4.
- [9] 王小卫.影响金川矿山细砂胶结充填体质量的因素分析[J].铀矿冶,1999(1):32-36.
- [10] 刘同有,韩 斌,王小卫.镍闪速炉水淬渣胶结充填配合比优化选择与分析[J].中国矿业,2000(6):19-22.
- [11] 刘同有,周成浦.金川镍矿充填采矿技术的发展[J].中国矿业,1999,8(4):1-4.
- [12] 杨长祥,辜大志,张海军,等.镍矿资源深部开采面临的技术问题及对策[J].采矿技术,2008(4):34-36.
- [13] 刘同有.充填采矿技术与应用[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [14] 吴统顺,朱毓新,叶粤文,等.龙首矿下向高进路采场胶结充填体的力学机理研究[J].长沙矿山研究院季刊,1985,2(1):10-18.
- [15] 周自昌,贺发运.降低金川二矿区充填成本的途径[J].西部探矿工程,2002(2):68-69.
- [16] 党明智,田 维,莫亚斌.高浓度尾砂胶结充填在金川二矿区的应用[C]//第八届国际充填采矿会议论文集.2004:73-75.
- [17] 王正辉,张丰田,莫亚斌.尾砂充填料浆的配合比试验研究[J].矿业研究与开发,2006,26(1):11-13.
- [18] 张海军,李 英,赵永贤.粉煤灰替代部分水泥的膏体充填技术[J].有色金属(矿山部分),2009(3):1-2.
- [19] 王正辉.胶结充填中粉煤灰替代水泥的比例研究[J].采矿技术,2010(3):43-45.
- [20] 苑雪超,乔登攀.金川二矿废石胶结充填料浆搅拌方式的研究[J].有色金属(矿山部分),2010(4):6-10.
- [21] 王爵鹤,姜渭中,周成浦.高浓度胶结充填料管道水力输送[J].长沙矿山研究院季刊,1981(1):10-23.
- [22] 李建军.充填料对镍可浮性的影响及消除[J].有色矿山,1990(3):28-32.
- [23] 刘同有,金铭良,周成浦.金川高浓度充填料浆管道自溜输送新工艺[J].中国矿业,1998(1):31-38.
- [24] 王新民,肖卫国,王小卫,等.金川全尾砂膏体充填料浆流变特性研究[J].矿冶工程,2002,22(3):13-16.
- [25] 王佩勋.矿山充填料浆水力坡度计算[J].有色矿山,2003(1):8-11.
- [26] 贺发运.金川公司二矿区流体和细粒散体钻孔输送技术[J].采矿技术,2006(3):205-206.
- [27] 陈忠平,翟淑花,高 谦.泡沫砂浆充填体力学特性及其应用研究[J].金属矿山,2010(8):7-10.
- [28] 翟淑花,高 谦,张梅花,等.高强轻质泡沫砂浆充填体在矿山的应用研究[J].化工矿物与加工,2010(12):30-34.
- [29] 王佩勋,王五松.膏体泵送充填工艺试验研究与应用[C]//第六届全国采矿学术会议论文集.1999:412-416.
- [30] 方理刚.膏体泵送特性及减阻试验[J].中国有色金属学报,2001(4):676-679.
- [31] 陈长杰,蔡嗣经.金川二矿区膏体充填系统试运行有关问题的探讨[J].矿业研究与开发,2001(3):21-23.
- [32] 陈长杰,蔡嗣经.金川二矿膏体泵送充填系统可靠性研究[J].金属矿山,2002(1):8-9.
- [33] 王新民,肖卫国,王小卫,等.金川全尾砂膏体充填料浆流变特性研究[J].矿冶工程,2002(3):13-16.
- [34] 蔡嗣经,陈长杰.关联系统的可靠性及其在金川二矿膏体充填系统中的应用[C]//第八届国际充填采矿会议论文集.2004:38-40.
- [35] 李云武.膏体泵送充填技术在金川二矿区的试验研究及应用[J].有色金属(矿山部分),2004(5):9-11.
- [36] 张秀勇,乔登攀.金川二矿区胶结充填料浆可泵性影响因素分析[J].金属矿山,2010(9):34-37.
- [37] 梅维岑.金川矿区充填钻孔的应用经验与体会[J].有色矿山,1993(6):11-13.
- [38] 张鸿恩.用于充填料输送的新型耐磨钢管[J].矿业研究与开发,1996(增1):121-123.
- [39] 郑晶晶,张钦礼,王新民,等.基于BP神经网络的充填钻孔使用寿命预测[J].湘潭师范学院学报,2008(4):40-44.
- [40] 郑晶晶,张钦礼,王新民,等.充填管道系统失效模式与影响分析(FMEA)及失效影响模糊评估[J].中国安全科学学报,2009(6):166-171.
- [41] 王贤来,郑晶晶,张钦礼,等.充填钻孔内管道磨损的影响因素及保护措施[J].矿冶工程,2009(5):9-12.
- [42] 刘洲基.Bredel软管泵在金川矿山充填中的工业试验[J].采矿技术,2010(4):40-43.
- [43] 郭三军.金川矿区破损充填钻孔永久性可修复综合技术[J].中国矿山工程,2011(1):1-3.
- [44] 姚维信,姚中亮,刘洲基,等.高浓度大流量管输充填技术与工艺[M].北京:科学出版社,2014.

# Research development of filling mining technique and technical problems to solve in Jinchuan Nickel Mine with high stress

Yang Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Gao Qian<sup>1</sup>, Wang Yongqian<sup>2</sup>,  
Chen Dexin<sup>2</sup>, Yao Weixin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mines of Ministry of Education, University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China)

**[Abstract]** Jinchuan Nickel Mine is one of the large copper sulfide nickel deposit in world. Because the buried depth of the ore is larger, the ground stress is higher and the stability of the ore and rock masses is poorer, it is one of the most difficult deposits to mining in the world. According to the mining technical conditions of Jinchuan deposit, a lot of researches have been carried out since the mine was built. At first, this paper provides a brief overview on engineering general situation of Jinchuan mine, then summarizes the filling mining development in Jinchuan mine. On this basis, it further expounds the research results of filling technology obtained in Jinchuan mine. Based on a large number of research on engineering geology and mining method test, the downward layered cemented filling mining method was used. Research development on filling mechanism, multipurpose use of solid waste, filling slurry rheological properties and pipe reduction conveying etc. had been obtained. Especially the paste filling technology that was the first time to be used in our country, was studied and filling system was reformed, the paste filling had reached design production capacity smoothly. Finally it points out the current situation and existing main problems in filling mine and puts forward key technical problems to solve in order to realize the safe, efficient, economic and environmental mining in Jinchuan Nickel Mine.

**[Key words]** Jinchuan Nickel Mine; filling mining; research and development; technical problems