

# 金川高应力碎裂围岩巷道环境强化技术

Reinforcement technologies of the roadways surrounded by high stress fractured rocks in Jinchuan mining area

王志远(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

**摘要:**金川矿区工程地质条件复杂,岩体破碎,地应力高,巷道支护难度大,维护成本高。本文对金川矿区以往关于巷道支护的研究成果进行系统的总结,根据金川矿区多年来的工程实践,总结出在金川矿区广泛应用的高应力碎裂围岩巷道环境强化技术,为类似矿山的巷道支护提供参考。

**关键词:**巷道支护;金川矿区;高应力碎裂岩体

**中图分类号:** TD263      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0035-04

**Abstract:** Jinchuan mining area has complex geotechnical conditions, where the fractured rock masses and high geostress have increased the difficulty in roadway support and the maintenance cost of roadways. In this paper, a systemic summary is made for the research achievements in roadway support of Jinchuan mining area, and based on years of engineering practice in such area, the widely used technology for reinforcement of the roadways surrounded by high stress fractured rocks in the mining area is concluded to provide reference for roadway support of similar mines.

**Key words:** roadway support; Jinchuan mining area; high stress fractured rock mass

## 1 前言

金川镍矿是我国最大的硫化铜镍矿床,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,水平构造应力高,矿岩破碎,稳定性极差。该矿床以埋藏深、地应力高、矿体厚大和矿岩松软破碎且有蠕变性等特点著称,这些特点给矿山开采设计与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,金川镍矿与国内外科研院所和高等院校合作,对矿区地质构造、矿岩力学特性、矿区地应力等工程地质和赋存环境展开研究,深入研究了矿区破碎岩体在高地应力环境中的力学特性,客观评价岩体质量,合理确定力学与变形参数,为采场结构、回采工艺、巷道支护、充填体强度的优化设计提供重要依据。本文简要介绍金川镍矿建矿多年来对巷道支护开展的技术攻关成果,对金川镍矿高应力破碎围岩变形控制及巷道支护的工程经验和失败教训等进行总结,并在此基础上介绍矿山目前采用的巷道围岩强化技术,为金川深部巷道支护提供经验,也为国内外同类矿山巷道支护提供借鉴和参考。

## 2 金川矿区工程地质概况

金川矿区由于经历了多次构造运动作用、变质作用和多期岩浆的侵入,给矿区留下以断裂为主的构造形迹,形成了复杂多变的围岩结构,这使得区内断裂构造发育、节理纵横交错,形成大量层间挤压破碎带。矿区矿体围岩破碎,各级结构面发育,构造破碎带、接触破碎带比较发育,地应力大。矿区的地应力以水平应力为主导,已有地下工程的变形破坏迹象也表明矿区以受水平作用的构造应力为主导。应力值随深度增加而增大,在200~500 m深度最大主应力值一般为20~30 MPa,最高达50 MPa。二矿区深部最大主应力随深度呈非线性规律递增,总体上以NNE-NE向为主,但在部分区域也有所不同,具有一定的复杂性。

区内岩浆岩脉极为发育,是影响工程地质条件的一个重要因素。这些岩浆岩形态十分复杂,大的呈岩墙,小的呈岩枝等;由于侵入形式与方式不同,对围岩的破坏不同。二矿区 $F_{17}$ 、 $F_8$ 断层多期岩浆的侵入,岩浆岩和断层的交替作用,使断层带内的岩矿块呈散体结构,这些部位岩体稳定性很差。

根据以往工程地质研究成果,金川矿区岩体划分为六个岩带、十一个工程地质岩组。在矿山工程建设中,巷道围岩主要为多种岩浆岩频繁穿插的中薄层大理岩组(Ⅲ<sub>3</sub>)、片麻岩组(Ⅱ),受到这些围岩

[作者简介] 王志远(1981-),男,硕士,采矿工程师,从事采矿咨询和设计工作。

[引用格式] 王志远. 金川高应力碎裂围岩巷道环境强化技术[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(6): 35-36.

影响的主要是竖井、斜坡道、运输平巷、溜矿井等工程。生产采准工程中,巷道工程围岩以含矿超基性岩带(Ⅵ)、多种岩浆岩频繁穿插的中薄层大理岩组(Ⅲ<sub>3</sub>)为主。据有关资料统计,开拓工程的32%通过上述不良岩层,85%以上的片帮冒顶发生在断层破碎带、节理密集带、构造片岩带和脉岩接触带及岩矿破碎的富水地段。

巷道主要的工程地质问题体现在:拱顶混凝土剥落,沿长轴方向开裂;拱腰或拱脚发生斜向或纵向的剪切开裂;侧墙内鼓、张裂,并有不同程度的纵向裂缝;拱顶下垂,甚至被压平;底板鼓起等<sup>[1]</sup>。

### 3 金川巷道支护技术的研究历程及成果

#### 3.1 巷道围岩变形规律与支护机理研究

巷道围岩变形监测是高应力碎裂围岩巷道支护设计和稳定性评价的重要手段。金川利用水准仪、收敛仪和GPS等对采场巷道围岩、充填体和地表进行长期的全方位变形监测,在获得了大量监测数据的基础上对采场围岩与充填体变形规律进行分析和预测<sup>[2-3]</sup>。动压巷道的长期变形监测分析结果表明,采动应力和岩体结构是影响采场围岩稳定性的重要因素,据此提炼出二次支护和巷道返修支护宜强不宜弱的控制理念,为深部大量返修巷道的支护设计和施工工艺提供了依据<sup>[4]</sup>。

有学者对金川矿区地下巷道围岩变形破坏的本质进行研究,指出巷道围岩的变形破坏主要是结构面在围岩动态过程中一系列复杂的时间相关性力学行为和力学响应所致,即地下巷道固岩动态本质是结构性流变,巷道变形破坏是围岩结构性流变的最终和必然结果。虽表现出强烈的流变特性,但其机制与软岩流变是截然不同的;软岩流变主要由岩石流变引起,而高应力区的结构性流变围岩的流变是动态过程围岩内结构面随时间变形所致<sup>[5]</sup>。

相关学者对二矿区1 218 m水平采准巷道围岩进行分析,得出围岩的各向异性是造成金川镍矿巷道变形破坏的主要因素之一,并据此对喷锚支护相关参数给出优化建议<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 巷道支护型式的研究

矿山建矿初期对金川矿岩力学特性和围岩质量缺乏深刻认识,巷道支护型式主要以木材、预制混凝土块、钢筋混凝土和金属支架为主。这种被动支护难以适应不良的破裂围岩,导致巷道在掘进和使用过程中发生大量垮冒,给矿山建设和采矿生产带来困难。

20世纪80年代,在金川二矿区进行采准巷道

快速掘进与支护的现场试验,首次引进喷锚支护技术,取得良好的支护效果,是金川巷道支护技术重大改革和创新性实践。在二矿区1 198 m水平对处在不良岩层的分段道进行锚注支护试验,使用空心锚杆兼做注浆管,实现了“锚注一体化”,使锚杆与注浆各自的围岩加固效果得到充分发挥。其支护效果表明,锚注支护适用于金川高应力碎裂岩体的巷道变形控制,是高应力碎裂围岩巷道合理支护型式之一<sup>[7]</sup>。

对1 098 m分段巷道围岩进行收敛变形监测,以此为基础分析探讨了一次支护、二次支护以及其它支护类型的支护时机问题,为二矿区深部巷道的支护技术研究提供了有价值的借鉴<sup>[8]</sup>。

针对二矿区1 178 m分段巷道的围岩特性和地压特点,相关学者在分析现有支护型式的基础上,首次采用了锚索网综合支护型式进行高应力围岩的变形控制,并进行了理论分析和现场试验<sup>[9]</sup>。部分学者认为高应力碎裂围岩巷道必须进行锚索支护,并重视对底板的控制,通过数值模拟研究,提出喷锚网+锚索+底部锚杆支护型式,能够有效维持高应力碎裂围岩巷道的稳定<sup>[10]</sup>。通过对不同支护型式、不同采动影响系数和不同支护参数对巷道稳定性的影响的分析,为喷锚网支护设计和现场应用提供了理论依据。

为延长高应力碎裂围岩巷道安全稳定的使用周期,减少巷道返修率,降低矿山生产成本,金川积极引入已经在煤矿软岩巷道成功应用的钢管混凝土支架支护技术,并结合现有支护型式对1 000 m试验巷道进行联合支护,取得良好的效果。

部分学者和工程技术人员对两次支护的强度和支护时机进行了详细多角度的论证,对“先让后抗”和“先抗后让”两种不同的支护设计理念进行剖析,得出金川高应力碎裂围岩巷道支护设计的核心是让与抗的时间,而让与抗的时间,关键在于对高应力碎裂围岩变形特性与释放过程有正确的认识和深刻理解。

### 4 金川巷道加固技术

在大量前人研究和现场试验的基础上,随着对金川矿区的开采技术条件认识得逐渐加深,其巷道支护技术逐渐发展成熟,形成一套行之有效的理论和方法,在整个矿区得到推广和应用。

#### 4.1 高应力碎裂围岩巷道布置

采矿工程是一个多步骤的开挖过程,每次开采都会对临近的工程产生复杂的影响,也就是会处于

加载或卸载的变化状态,由于岩体特征不同,其空间效应也不同,尤其是对金川的不良岩层应予以重视,因为金川不良岩层具有重塑性和应变软化特征。巷道布置除考虑地质条件和工艺要求外,还应做好以下两点:

(1)岩层的陡缓和岩层走向与巷道轴线的交角,要避免缓倾角和小交角,尽可能使其大于 $30^\circ$ 。

(2)调整巷道轴线方向,尽量使侧压力系数接近于1,这样可使巷道均匀受压,对发挥岩石强度十分有利。

## 4.2 支护型式

根据不同的围岩状况,给出不同的支护型式,现场可根据揭开的巷道围岩状况,酌情考虑各种支护型式。

### 1) 双层喷锚网支护

双层喷锚网支护适用于完整性较好的混合岩、较稳固的岩体地段。2次支护均采用锚杆-金属网-喷射混凝土,第1次支护随掘进工作面推进,待岩体放压后,实施第2次支护。锚杆排距、间距一般为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ,紧固段采用辊轧直螺纹,并配套相应的加厚螺帽,以确保锚杆的整体强度;锚杆采用水泥砂浆全长锚固;岩体破碎时,可适当减小排距及间距,增加锚杆数量。喷射混凝土的强度等级为C25,采用湿喷技术;每次支护厚度为 $100\text{ mm}$ ;封底混凝土的强度等级为C30;一般应与第2次支护同时进行。

### 2) 喷锚网+锚注+钢筋(素)混凝土支护

支护型式适用于完整性较差的混合岩及岩性变化的交界等稳固性较差地段。第1次支护采用锚杆-金属网-喷射混凝土,随掘进工作面推进。锚杆锚固剂优先采用砂浆锚杆,岩体异常破碎、变形速率高的地段,采用树脂药卷全长锚固,每根锚杆放置2块垫板,以改变垫板的受力状态。

待岩体放压后,实施第2次支护,即单层钢筋混凝土+注浆。混凝土强度等级为C30,厚度一般为 $350\text{ mm}$ 。注浆锚杆采用直径为 $32\text{ mm}$ ,壁厚 $6\text{ mm}$ 的无缝钢管制作,采用纯水泥浆液,水灰比为 $0.6 \sim 0.8:1$ 。封底混凝土的强度等级为C30,一般应与第2次支护同时进行。局部遇岩体破碎易冒落段,可增加超前支护或钢拱架支护。

3) 喷锚网+钢筋混凝土+锚注+锚索+封底锚杆支护

支护适用于完整性极差、稳固性极差的软弱岩层地段。第1次支护采用锚杆-金属网-喷射混凝土

土,锚杆排距、间距一般为 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ,锚杆采用树脂药卷全长锚固,每根锚杆放置2块垫板,以改变垫板的受力状态。

待岩体放压后,实施第2次支护,即注浆+中长锚索+封底锚杆和 $350\text{ mm}$ 厚的单层钢筋混凝土。封底锚杆长 $1.8\text{ m}$ ,中长锚索的长度 $6.0\text{ m}$ ,索体由两根直径为 $15.24\text{ mm}$ 的钢绞线组成或直径 $28\text{ mm}$ 的精轧螺纹钢;中长锚索要采用全长锚固式,水泥砂浆灌注;钢绞线锚索由QLM15-2型夹片式锚具锁紧,精轧螺纹钢锚索采用与之相配套的螺母锁紧。注浆锚杆采用直径为 $32\text{ mm}$ ,壁厚 $6\text{ mm}$ 的无缝钢管制作,采用纯水泥浆液,水灰比为 $0.6 \sim 0.8:1$ 。封底混凝土的强度等级为C30,一般应与第2次支护同时进行。局部遇岩体破碎易冒落段,可增加超前支护或钢拱架支护。

### 4) 喷锚网+钢管混凝土支护

支护适用于受采动影响较大、变形严重、普通支护效果较差、返修频次较高的巷道。第1次支护采用砂浆锚杆-金属网-喷射混凝土-钢管混凝土支架联合支护。喷锚网随掘进工作面推进实施,随掘随支,钢管混凝土支架可滞后架设,但不应超过工作面 $10\text{ m}$ 。喷射混凝土厚度为 $100\text{ mm}$ ,强度等级为C30,锚杆体紧固端要求采用辊轧直螺纹,采用砂浆锚杆。钢管混凝土支架采用直径为 $219\text{ mm}$ 的无缝钢管制作,安装钢管混凝土支架时,应保证钢管混凝土支架紧贴支护体,钢管混凝土支架安装完毕后,采用砂浆锚杆对支架进行锚固,支架安装锚固后,向空钢管支架内灌注混凝土,灌注混凝土强度等级为C40,确保钢管支架内混凝土充满后方可停止灌注,钢管混凝土支架间使用连杆连接。第2次支护采用喷锚网支护,在2架钢管混凝土支架中间施工一排锚杆,其他支护参数同第1次支护。钢管混凝土支护时,根据现场实际巷道变形情况,第2次支护也可采用单层钢筋混凝土支护+内注式注浆锚杆。

## 4.3 巷道支护设计和施工中考虑的空间及时间因素

### 1) 巷道断面

调整巷道断面形状,以适应原岩应力场。直墙半圆拱在金川矿区应用最为广泛,当巷道围岩较差时,部分采用圆形或椭圆形断面;底鼓严重的区域,在底部增加圆弧返拱以增加巷道的稳定性。

金川主要巷道的断面规格在满足巷道使用功能的基础上,预留一定围岩收敛变形的空间,留变形量与巷道围岩性质及其所处的地应力环境密切相关,根据金川多年来的经验,一般预留 $150 \sim 300\text{ mm}$ 。

虽然初期投资少量增加,但降低了后期维护返修的成本。

## 2) 时间因素

基于岩石的蠕变性能,使用年限不同的巷道采用不同的支护方式以满足其在服务年限内安全使用。分层联络道使用年限较短,以喷锚网支护为主;分段道和中段巷道使用年限较长,根据围岩条件的不同分别选用不同的支护方式。

二次支护时间建立在让压支护设计的基础上,当初期支护结构的柔性不能满足深部高应力巷道围岩工程的地压释放要求时,就需要调整二次支护时间来实现对过大变形地压释放,实现让压支护维护巷道稳定性的控制目的。如果二次支护过早,巷道让压不够充分,支护结构需要承受较大的变形地压。如果二次支护太迟,围岩变形释放超过围岩的允许变形值,使围岩松弛进入散体地压状态,则应在适当的时机进行支护,支护压力达到最小状态,不仅有利于维护围岩的自承能力,而且还有效降低围岩的地压。根据金川多年来的经验,一般二次支护在一次支护后 30 d 实施。

## 4.4 其他

### 1) 控制围岩应力

巷道开挖后,岩层中的原始应力状态随之变化,巷道周边岩体即围岩发生应力转移和释放,导致围岩出现二次应力,控制围岩的二次应力分布和蠕变变形,是巷道支护的难点和解决围岩稳定最值得注意的是问题。通过在硐体后面充填炉渣灰,或使用临时小巷道放压、待压跨后再修建正规断面巷道,或采用长、短锚杆调整围岩应力等卸压法控制围岩应力,使围岩二次应力小于围岩二次强度,支护体刚度大于围岩二次强度,使巷道支护取得良好效果。

### 2) 辊轧直螺纹锚杆技术

锚杆杆体采用辊轧直螺纹,其紧固端螺纹采用滚轧加工技术,即用辊工具进行挤压,使金属塑性变形而形成螺纹的方法。这样加工成的锚杆尾部强度高,从而提高了喷锚网支护的整体支护效果。

### 3) 双层锚杆托板

锚杆支护采用双层垫板,即在原有垫板外侧放置一块同样厚度但尺寸较小的垫板,以改变垫板的受力状态,有效提高成套锚杆的承载力。

### 4) 锚固剂

金川巷道支护常用的锚固剂有水泥砂浆、快硬

水泥药卷和树脂药卷三种。针对节理裂隙发育的围岩,推荐使用水泥砂浆;围岩比较破碎,需要支护体快速起作用则优先使用树脂药卷。

## 5 结论

金川矿区地应力高、岩体节理裂隙发育导致围岩破碎,表现出岩块强度高、岩体强度低等特点。金川岩体的结构面对岩体的破坏机理和破坏模式起控制作用,导致岩体整体特性是“散”而不是“软”,其岩体在低应力环境下发生松散垮冒,而在高应力环境中则显现碎胀蠕变。自建矿以来,巷道工程的稳定性维护一直困扰金川镍矿的采矿生产,矿山的岩石力学和巷道支护技术研究一直伴随采矿生产。经过几代岩石力学工作者的努力,金川矿区高应力碎裂围岩支护技术逐渐趋于成熟,矿山返修费用自 2015 年以来逐年降低,为金川矿山深部巷道支护和类似矿山的巷道支护提供了一定借鉴和参考。

### [参考文献]

- [1] 高建科,杨长祥. 金川二矿区深部采场围岩与充填体变形规律预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2625 - 2632.
- [2] 鲁全胜,高谦. 金川二矿区采场巷道围岩与充填体收敛变形监测研究[J]. 金川科技, 2004(1): 14 - 22.
- [3] 路世豹,李晓,马建青,等. 金川二矿区地下巷道变形监测分析及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 488 - 492.
- [4] 刘高,谌文武,韩文峰,等. 锚注支护在金川地下巷道中的应用[J]. 西部探矿工程, 2002, 14(S1): 157 - 159.
- [5] 吕擎峰,韩文峰. 金川岩体各向异性与巷道支护变形破坏关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 149 - 152.
- [6] 杨新安,黄宏伟,刘保卫. 金川高应力碎裂岩体巷道变形与支护技术研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(3): 12 - 16.
- [7] 张忠. 金川二矿区 1 098 m 分段巷道稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(z2): 2620 - 2624.
- [8] 李莉,高谦,王正辉. 金川二矿区深度 1 178 m 中段采场巷道支护设计与稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2005, 57(1): 19 - 22.
- [9] 杨春丽,王永才. 金川矿区深部巷道支护方式优化数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2008(3): 71 - 74.
- [10] 李光,马凤山,郭捷,等. U 钢管混凝土支架支护技术在金川矿山的应用[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(5): 57 - 66.