

深埋高应力大变形巷道支护技术研究

Research on supporting technology of high stress and large deformation roadways at great depth

孙 扬, 王志远, 张爱民, 安建英(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:近些年来深地问题对矿山开采的影响越来越突出,已引起国内广泛关注。高应力是引发深地问题的主要源头,对于由高应力引发的硬岩岩爆防治方面的研究取得较多成果,但对于高应力引起的软岩大变形问题仍困扰诸多工程。金川二矿区自进入深部开采以来,巷道工程变形大、返修率高,高应力大变形问题仍困扰诸多工程。本文依托金川二矿深部650 m斜坡道工程,重点围绕高地应力、地层构造及支护工况开展高应力大变形巷道支护技术数值分析,建立多维度模型对巷道变形规律及支护技术控制进行研究。数值分析表明:对于深部水平应力场控制的岩层,巷道破坏呈高应力全断面大变形失稳模式;主应力方向对变形规律影响显著,呈现出应力压挤底鼓破坏范围大、持续时间长的特征;锚注支护对于控制底鼓及巷道收敛变形效果显著,柔性支护适度变形能调整释放围岩压力。

关键词:深埋高应力;大变形巷道;支护技术;数值分析

中图分类号: TD322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0026-05

Abstract: In recent years, deep earth problems have exerted increasing influence on mine exploitation, raising widespread concern at home and abroad. High stress is the main source of deep earth problems. Though many achievements have been made in the research on prevention and control of hard rock burst due to high stress, the large deformation of soft rock caused by high stress remain a problem that troubles a great number of projects. Since Jinchuan No. 2 mining area enters deep mining stage, it has been faced with various problems such as large deformation and high repair frequency of roadways. In this paper, based on the -650 m ramp of Jinchuan No. 2 mining area, numerical analysis is carried out on the supporting technology of high stress and large deformation roadways from the aspects of high geostress, strata structure and supporting conditions, and a multi-dimensional model is built to study the deformation rules and supporting technologies of roadways. The numerical analysis indicates that the roadways at the rock stratum controlled by horizontal stress fail in a mode of high-stress, whole section large deformation and instability; deformation rules are obviously reflected in the direction of main stress, where bottom heaving is caused due to the compressive stress and the failure features large range and long duration; bolt-grouting support shows good effect in control of bottom heaving and roadway convergence deformation, flexible support allows proper deformation, which can make the stress of surrounding rock adjusted and released.

Key words: high stress at great depth; large deformation roadway; supporting technology; numerical analysis

1 前言

金属矿产作为工业大宗原料,近年来随着中国经济体量的增加,对金属矿产需求逐年增加;同时,金属矿产资源储备为国家经济安全发展提供保障,为抗衡国际市场变化和维护综合国力保驾护航。随着浅部资源逐渐枯竭,国内矿山正在逐渐向1 000 m至1 200 m开采,少数的金属矿井正在建设超过1 400 m的深井开拓系统。国内诸多在产金属矿山转入深部开采,如金川镍矿、冬瓜山铜矿、铜绿山铜

矿、会泽铅锌矿、三山岛金矿等。同时,诸多新建矿山直接进入深部开采,如思山岭铁矿、海域金矿、高地锰矿、水旺庄金矿、纱岭金矿等。

随着深度继续增加,受深部岩层“高应力、高水压、高岩温、高温水”等不利因素影响,给深井矿山开采带来诸多困难。对于深井硬岩矿山,岩爆灾害控制成为主要难题;对于深井软岩矿山,高应力井巷大变形成为主要开采难题。我国面向2030年“深度”布局,提出了“深空、深海、深地、深蓝”系列重大专项;2020年10月,国家“十四五”发展规划再次明确深地深海领域,继续实施国家重大科技支持项目。井巷工程是进入深地的咽喉工程,是矿山连接地表和地下空间的物流通道,开展高应力深埋井巷支护技术研究是保证其服役期安全稳定的重要关键技术,对深井矿山正常安全生产具有重要意义。

[作者简介] 孙扬(1985—),男,陕西榆林人,高级工程师,从事金属矿山井巷工程咨询设计及岩石力学相关研究工作。

[引用格式] 孙扬,王志远,张爱民,等.深埋高应力大变形巷道支护技术研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):26-30+34.

金川二矿区镍矿是一座高地应力、深埋、围岩极不稳固的大型地下矿床,复杂的工程地质条件、高地应力环境、不稳固围岩一直给矿山开采带来巨大困难。随着开采深度的增加,采场地压活动更加剧烈,采动影响范围扩大,使巷道掘进与支护更加困难。二矿区当前已进入 850 m 和 700 m 中段深部开采,正在进行 650 m 深部中段采准工程。由于高地应力和围岩条件差,一直以来巷道工程塌方、冒顶、底鼓在二矿区工程中屡见不鲜,由此造成事故不断、巷道掘进效率低、安全隐患多;诸多返修巷道工程,既提高了支护成本,又直接影响了矿山的正常生产^[1]。在 850 m 中段的开拓工程中,该中段在施工中超过一半的巷道实施返修加固,部分地段多次返修。许多地段掘支成巷两周后两帮收敛变形达到 500 mm 以上,底鼓超过 1 000 mm,导致巷道断面由 5.4 m × 5.4 m 收缩为 3.5 m × 3.0 m。深部大变形巷道如图 1 所示。



图 1 金川二矿深部大变形巷道

金川二矿 650 m 深部中段巷道工程埋深超过 1 100 m,其地应力水平更高,遇到的井巷大变形问题更加突出,解决深埋高应力巷道大变形技术难度更大。本文依托 650 m 中段开采斜坡道工程,针对地质构造、围岩性质、地应力场及支护工况等主要因素,采用数值分析方法对高应力大变形巷道支护技术开展研究。

2 工程地质条件

矿山地下工程赋存于地层围岩中,地质条件是影响井巷工程稳定性的主要因素。地层构造、地应力场水平、围岩性质、地下水等是工程地质条件的主控因素。

2.1 地层条件

金川矿区主要地层为前震旦系白家嘴子组

(AnZb)和第四系(Q),白家嘴子组构成含镍超基性岩的直接围岩。白家嘴子组经受了各种变质作用和多期岩浆侵入,以混合岩、片麻岩、大理岩为主的岩系。矿区位于龙首山隆起构造线由东西走向变为北西走向的转折部位,总的构造特点是褶皱形态简单、断裂构造发育、性质复杂。矿区地层为向南西 40° 倾斜的单斜构造,倾角由北向南逐渐变缓;北部一般为 54° ~ 77°,南部为 37° ~ 54°。

矿体的顶板围岩主要由大理岩、条带状混合岩以及少量二辉橄榄岩组成,矿体的底板围岩种类相对复杂,从内向外依次为二辉橄榄岩、辉石岩、蛇纹石透闪石绿泥石片岩、中薄层大理岩夹斜长角闪。矿区已有工程研究测试得到深部围岩力学参数表明:总体围岩抗压强度 30 MPa 左右,相比其他千米埋深金属矿山围岩强度整体偏低。

2.2 地应力场

矿区位于龙首山隆起构造线由东西走向变为北西走向的转折部位,矿区地层陡倾,倾角为 37° ~ 77°。自浅部开采以来,地应力水平高。金川矿区地应力测量与研究始于 20 世纪 70 年代,一直持续到现在。矿区地应力以水平应力为主导,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。随深度增加,矿区水平最大主应力与最小主应力的差值有增大的趋势。深部水平应力大于垂直应力,且平均水平应力比垂直应力随深度增加梯度要大。在矿区不同深度和构造部位,所测得的主应力的方向和倾角有所变化。矿区东部测出的主应力方向偏东,倾角接近于水平,而矿区西部测出的最大主应力方向偏西,与水平面夹角较大。

《特大型镍矿工程地质与岩石力学》^[2]中对金川矿区深部地应力的规律进行了研究,得到了金川矿区埋深 400 ~ 1 000 m 不同深度的地应力

$$\sigma_H = 0.7114 + 0.0525H \quad (1)$$

$$\sigma_h = -0.2011 + 0.0291H \quad (2)$$

$$\sigma_v = -0.8815 + 0.0296H \quad (3)$$

式中: σ_H ——最大水平应力,MPa;

σ_v ——垂直应力,MPa;

σ_h ——最小水平应力,MPa;

H ——埋深,m。

3 支护数值分析

数值分析选取 700 m 至 610 m 中段工程的斜坡道作为分析实验段,位于地质剖面线 12 行至 14 行

之间,穿过的岩层剖面及竖向位置将通过 14 行地质剖面图确定。具体平面位置如图 2 所示。

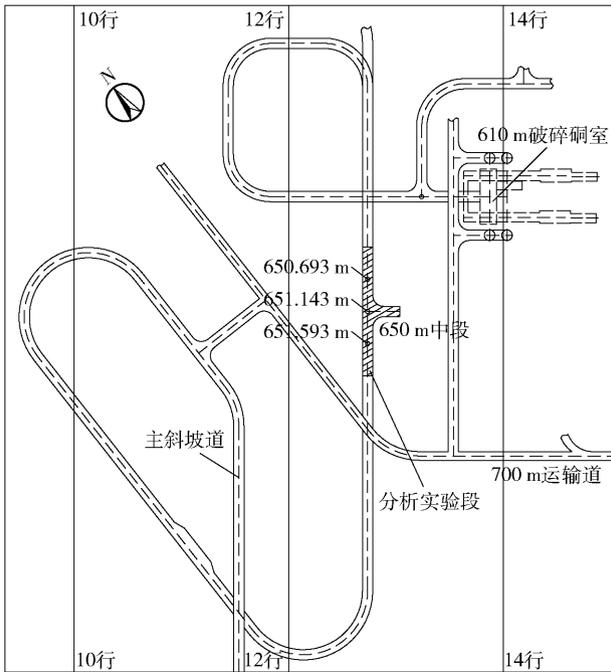


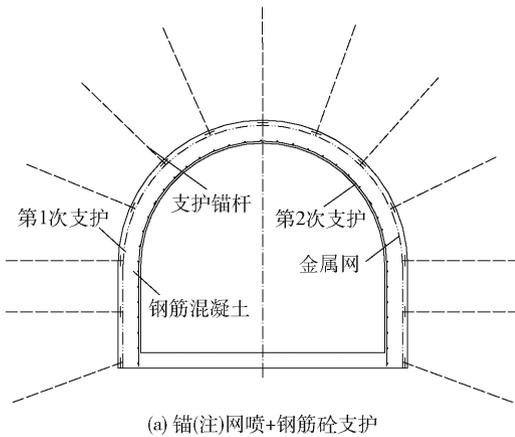
图 2 数值分析实验段平面位置图

3.1 工况方案

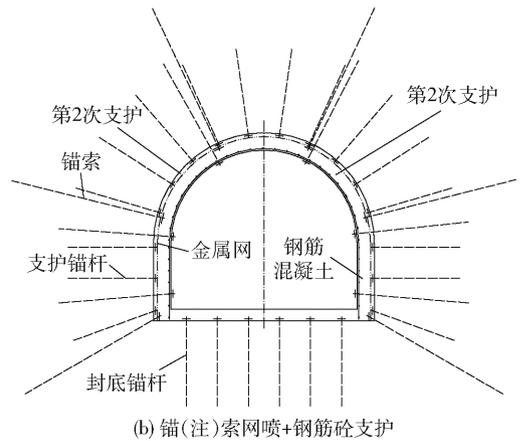
结合矿区上部中段实践与现场实验方案,本文数值分析从支护方案、地应力场和地层围岩条件三方面设置分析工况。将地应力作为第一影响因素,依据二矿区地应力测量研究结果构建地应力场,同时设置两工况变量;将支护方案作为第二影响因素,设置三种不同支护方案。考虑斜坡道穿越地层围岩情况,设置两组围岩物理力学参数;数值分析工况组合见表 1。地应力场 I 型工况对应最大水平主应力平行于斜坡道轴线方向,地应力场 II 型工况对应最大水平主应力垂直于斜坡道轴线方向。三种支护方案分别为双层锚网喷支护、锚(注)网喷+钢筋砼、锚(注)索网喷+钢筋砼,地应力场与支护方案组合如图 3 所示。

表 1 地应力场与支护方案组合工况

地应力/支护	双层锚网喷 (A)	锚(注)网喷+ 钢筋砼(B)	锚(注)索网喷+ 钢筋砼(C)
地应力场 I	I A	I B	I C
地应力场 II	II A	II B	II C



(a) 锚(注)网喷+钢筋砼支护



(b) 锚(注)索网喷+钢筋砼支护

图 3 断面支护示意图

3.2 围岩力学参数

根据实验段斜坡道在 14 行地质剖面图中位置,650 m 实验段斜坡道主要处于混合岩(IV)和大理岩

(III3)岩层中,模型依据实际地层输入两种不同岩层围岩信息进行分析,地层围岩力学参数见表 2。

表 2 地层围岩力学参数

岩组	抗拉强度 R_c /MPa	抗压强度 R_t /MPa	抗剪强度参数		变形模量 E_m /GPa	泊松比 u	重度 $R/kN \cdot m^{-3}$
			C /MPa	ϕ /($^\circ$)			
混合岩(IV)	34.26	3.1	5.90	53.3	3.4	0.15	27.3
大理岩(III3)	22.70	2.2	3.97	45.8	2.8	0.22	27.4

3.3 模型建立

应用岩土专用数值技术软件迈达斯 GTS 建立

数值计算模型,采用实体四面体单元模拟地层,结构单元模拟支护结构。依托主斜坡道工程背景,选取

斜坡道断面宽度 5~6 倍作为模型分析计算宽度和高度,最终确定模型范围为长 × 宽 × 高 = 60 m × 60

m × 60 m。建立的数值分析模型结构及网格如图 4 示。

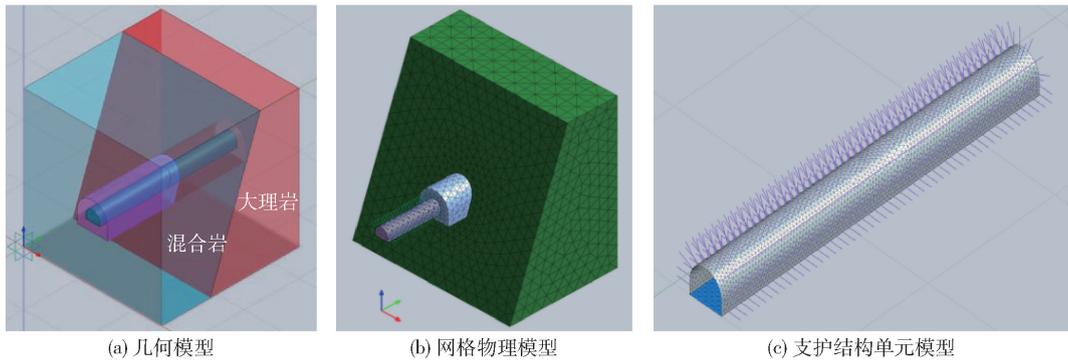


图 4 数值分析模型

支护方案中注浆效果采用当前常用的等效方法予以考虑,将锚注中的注浆锚杆的弹性模量折算给岩体,计算方法为式(4)。注浆后岩体的黏聚力及摩擦角综合参考其他文献^[3-5]按 1.5 倍提高考虑。

$$E = \frac{S_g E_g + S_c E_c}{S_g + S_c} \quad (4)$$

式中: E ——折算后的地层的弹性模量,MPa;
 E_c ——原地层的弹性模量,MPa;
 E_g ——注浆锚杆的弹性模量,MPa;

S_g ——注浆锚杆截面面积, m^2 ;
 S_c ——锚注支护体的截面面积, m^2 。

3.4 数值模拟分析

不同的支护及多次联合支护影响数值分析结果,本次数值计算利用施工阶段方法考虑了三种支护工况的差异,对现场实际施工工序进行合理简化合并,综合确定了详细计算工序。计算分为三个区段,每次开挖 20 m,对应的各次支护也按照区段施工。施工阶段见表 3。

表 3 数值分析施工阶段

施工阶段	阶段 S1	阶段 S2	阶段 S3	阶段 S4	阶段 S5	阶段 S6	阶段 S7	阶段 S8	阶段 S9	阶段 S10
支护类型 A	开挖 1 锚杆 1 喷砼 1	锚杆 2 喷砼 2	底浇筑	锚杆 1 喷砼 1	锚杆 2 喷砼 2	底浇筑	锚杆 1 喷砼 1	锚杆 2 喷砼 2	底浇筑	
支护类型 B	开挖 1 锚杆 喷砼	浇筑砼	注浆	锚杆 喷砼	浇筑砼	注浆	锚杆 喷砼	浇筑砼	注浆	
支护类型 C	开挖 1 锚杆 喷砼	锚索 底锚杆 浇筑砼	开挖 2 注浆	锚杆 喷砼	锚索 底锚杆 浇筑砼	开挖 3 注浆	锚杆 喷砼	锚索 底锚杆 浇筑砼	注浆	

4 数值计算结果

4.1 计算结果对比

依据计算结果,该斜坡道在大理岩侧最终位移最大,选取距离混合岩模型硐口垂直轴线 50 m 监测断面测点并进行分析,各工况变形对比分析曲线如图 5、图 6 所示。

图 5 与图 6 对比结果表明:各工况中顶板下沉与帮部收敛较底鼓位移明显小,支护工况 A(双层锚网喷支护)的表面收敛位移明显大于另外两种支护工况,施加注浆支护对于控制底鼓效果明显。

图 7 所示为各工况同部位位移对比曲线图,可

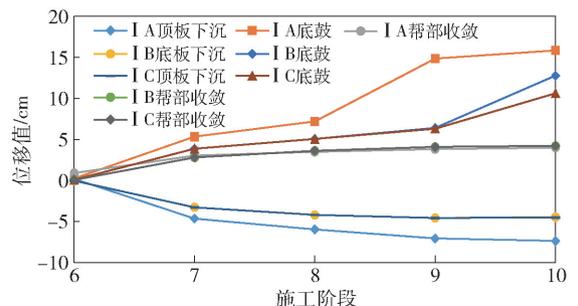


图 5 地应力场 I 各工况断面监测位移曲线图

以看出地应力场方向对斜坡道底鼓、顶板下沉和帮部收敛影响明显;地应力场 I 各工况顶板下沉均大

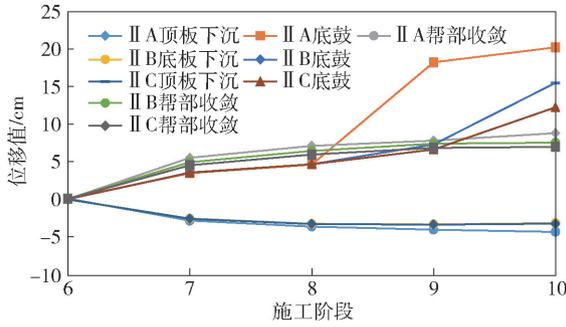


图6 地应力场II各工况断面监测位移曲线图

于地应力场 II,地应力场 I 最大顶板下沉是地应力场 II 两倍多;同一支护工况下,地应力场 II 底鼓值明显大于地应力场 I 的底鼓值,地应力场 I 最大底鼓比地应力场 II 小 27.6%;同一支护工况下,地应力场 II 的帮部收敛明显大于地应力 I 的收敛值,地应力场 II 最大帮部收敛是地应力场 I 两倍多。

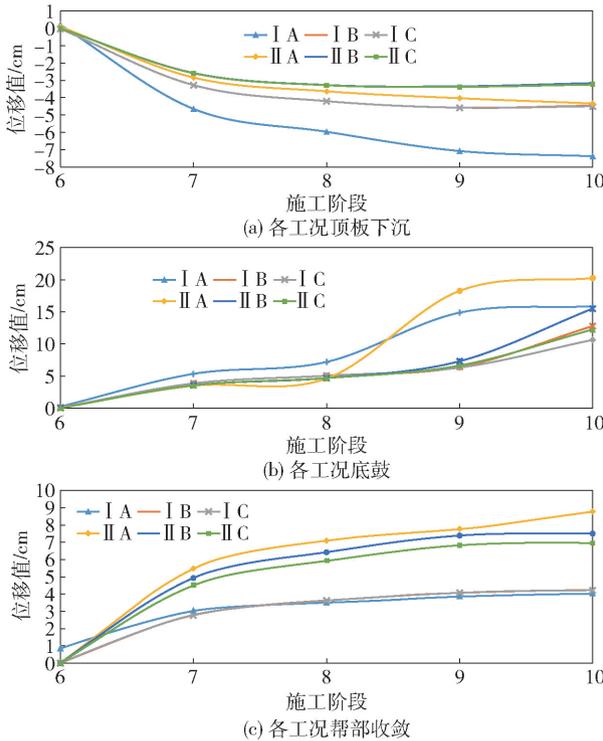


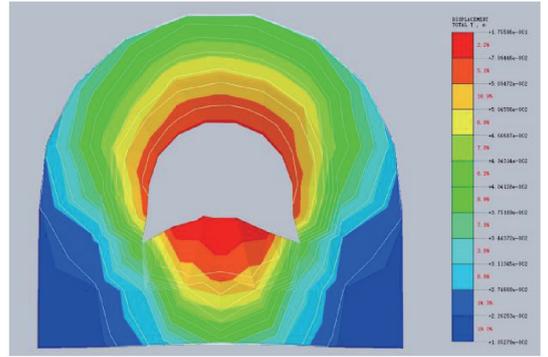
图7 各工况同部位表面位移对比曲线图

4.2 变形破坏模式分析

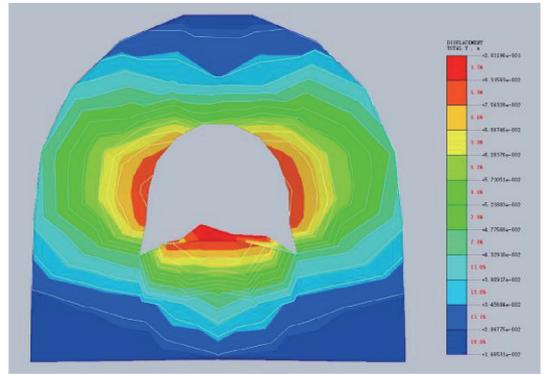
综合数值结果对比分析,其断面总体变形大;全断面变形,以底鼓变形最大;支护后变形速率下降,但仍存在持续变形。最大水平应力对变形影响显著,当最大水平应力垂直斜坡道轴线时,其两帮收敛变形显著。

斜坡道埋深超过 1 000 m,根据地应力测量分布规律其最大水平应力超过 50 MPa,其最大水平应力与竖向应力比达到 1.8;最大水平应力与混合岩抗

压强度比超过 1.4,与大理岩的抗压强度比值超过了 2.2。图 8 所示为总位移变形图,其断面呈现全断面收缩变形;两帮挤压收缩,底板挤压突出变形破坏。



(a) 工况 I A



(b) 工况 II A

图8 斜坡道断面总位移变形图

综上所述,斜坡道变形破坏呈高应力全断面大变形失稳模式,呈现高应力影响显著、应力挤压底鼓破坏范围大、持续时间长的特征,具备高应力软岩型大变形模式。

5 结论

在大理深高应力工程背景下,按照最大主应力平行斜坡道轴向和垂直斜坡道轴向两个地应力场建立模型,与不同支护方式组合六个工况数值分析得出主要结论:

(1)斜坡道拱顶、底板、侧帮均发生了大变形,主应力方向对断面收敛影响明显;最大水平应力平行于斜坡道轴线的顶板下沉值大于最大主应力垂直于斜坡道工况,最大主应力垂直于斜坡道轴线的帮部收敛大于最大主应力平行于轴线的工况。

(2)地层岩性对斜坡道变形影响显著,大理岩侧位移明显大于混合岩侧位移,范围也明显较混合岩侧大;地应力场 I 型时,大理岩侧最大水平位移深