

蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 033037.

CAI Meifeng. Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(3): 033037.

深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术

蔡美峰^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:首先,介绍了地应力对采矿工程荷载作用方式的特殊性,阐述了地应力控制采矿开挖过程和岩层稳定性的力学机理。地应力是采矿开挖前就存在于地层中的天然应力,采矿开挖出现自由空间并引起地应力向自由空间释放,形成“等效释放荷载”,它作用在开挖自由空间的边界上,而不是采矿外边界上。“等效释放荷载”带动周围岩体变形、位移和应力集中,导致围岩和岩层失稳、破坏。这与传统力学理论“外边界加载模式”有本质区别。若将地应力直接加在采矿外边界上,将得出“采矿外边界位移最大、开挖周边位移最小”等一系列错误结果。为此,必须根据采矿设计的开挖形态,将地应力转换成“等效释放荷载”进行计算和分析,才能得到正确的结果。同时,必须认识到地下采矿是多步开挖过程,也就是多次“等效释放荷载”加载过程。岩体是非线性材料,荷载的力学效应具有加载途径性。优化开采布局、开采顺序等可以优化“等效释放荷载”加载途径和力学效应,实现更好的岩层控制效应。最后,提出了地下采矿围岩稳定性与岩层控制的基本原理和方法,指出:支护的根本目的是保护、改善和提高岩体的强度,必须改变把围岩当成一种被动的荷载加以支撑的传统认识;充分发挥围岩自身强度达到采矿工程稳定,是岩石力学最基本的原理。在深部高地应力条件下,为了控制岩层变形和移动,维持采矿工程的稳定,上述原理的指导尤其重要。

关键词:深部开采;地应力;等效释放荷载;围岩稳定性;岩层控制;力学机理;关键理论和技术
中图分类号:TD32 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-7187(2020)03-3037-09

Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining

CAI Meifeng^{1,2}

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China)

Abstract: The special unloading mode of in-situ stress due to mining is introduced, and the mechanism of in-situ stress controlling the process of mining excavation and the stability of rock strata is expounded. In-situ stress is the natural stress originally existing in rock mass. Mining excavation produces a free space in the rock strata and simultaneously causes the release of in-situ stress to the free space, leading to the formation of "equivalent releasing load". The "equivalent releasing load" is acting on the boundary of the free space, not the outside boundary of the mining area. It makes deformation, displacement and stress concentration in surrounding rock mass, which are the factors causing surrounding rock and strata unstable or failure. It is different from the "outside boundary loading

收稿日期:2020-04-02 修回日期:2020-04-24 责任编辑:许书阁

作者简介:蔡美峰(1943—),男,江苏如东人,中国工程院院士,教授,博士生导师。

mode" of the traditional mechanic theory. If the in-situ stress is directly acting on the outside boundary of the mining area, the mechanical analysis will generate a series of wrong results, such as that the displacement is largest at the outside boundary of the mining area, and the smallest at the boundary of the free space. It is necessary to calculate the "equivalent releasing load" according to the already designed excavation plan and in-situ stress state prior to using the "equivalent releasing load" to make the mechanical analysis. At the meantime, it should be pointed out that mining is a multi-step excavation process, i.e. a multi-step loading process of "equivalent releasing load". The rock mass is a nonlinear material, its the mechanical effect of loading is remarkably dependent on the loading path. Optimizing mining layout and excavation steps can optimize the loading path of "equivalent releasing load" and its mechanical effect, thus getting better strata control. At last, the basic principles and methods for surrounding rock stability and ground control in underground mining are provided. It is pointed out that the essential purpose of the support is preserving, improving and enhancing the strength of rock, the surrounding rock could not be regarded as a passive load to be supported. It is a basic principle of rock mechanics that fully using the strength of rock itself to realize the stability of rock engineering. In deep mining with high-stress conditions, in order to make the stability of mining engineering by controlling rock deformation and displacement, the guidance of the above principle is especially important.

Key words: deep mining; in-situ stress; equivalent releasing load; surrounding rock stability; strata control; mechanical principle; key theories and technologies

1 采矿岩层控制的关键问题

1.1 采矿围岩变形与岩层控制力学机理

采矿是采用开挖和剥离的手段将埋藏在岩层中的矿产资源开采出来。开挖巷道和采场是地下采矿工程的主要工序之一。巷道和采场的开挖将导致其周围岩体的变形与岩层的移动。这种变形和移动若不加以控制,将可能导致巷道和采场的失

稳与破坏,影响开采的安全。因此,围岩变形与岩层控制是保证地下矿山安全高效开采的主要内容之一^[1]。

采矿开挖引起围岩变形和岩层移动的形成与发展过程主要受地应力场所控制。地应力是采矿开挖前就存在于地层中的天然原始应力,一切的采矿开挖活动都是在地应力的控制之下进行的^[2]。

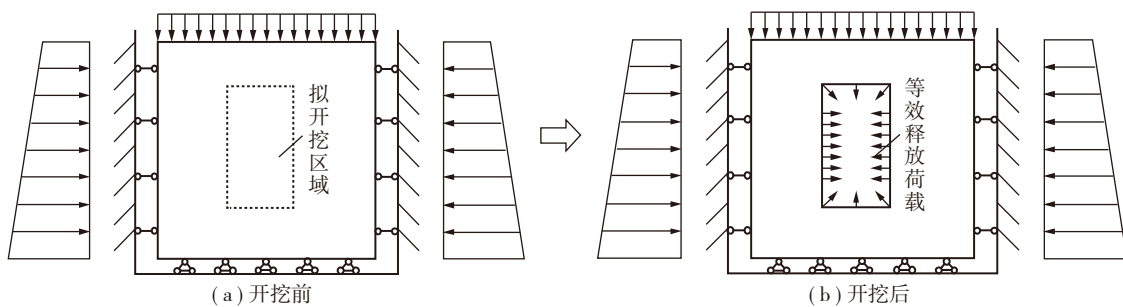


图1 “等效释放荷载”示意
Fig. 1 Diagrammatic sketch of "equivalent releasing load"

如图1所示,在地应力场的作用下,图1(a)中虚线所标的采矿拟开挖区域,不论地应力的值多大,在采矿开挖之前都处于自平衡的稳定状态。采矿开挖后,出现一个如图1(b)中实线所标的自由空间,并同时引起地应力向自由空间的释放,形成作用在自由空间边界上的“等效释放荷载”。1969年,J. M. DUNCAN(邓肯)和R. W. CLOUGH(克拉夫)提出

了“反转应力”加载模型,为根据开挖状态将地应力作用转变成“等效释放荷载”,提供了具体的分析和计算方法^[3]。文献[3]对此做了基本介绍。正是这种“等效释放荷载”,带动周围岩体的变形、位移和应力重分布,在围岩中形成局部应力集中。按照弹性力学的理论,力乘以位移就是能量。采矿开挖在岩体中产生的位移和应力集中就形成开挖

扰动能量聚集在岩体中。这种开挖扰动能量对岩体的稳定性有决定性影响。

“等效释放荷载”相关理论是指导采矿和其他地下岩石开挖工程力学计算、分析和研究最基本的理论。它是基于地应力是存在于地层中的内应力,而不是外加荷载提出来的。在分析地下巷道、采场围岩应力位移场时,过去传统的方法是建立外边界加载模型,先挖洞、后加载,与结构力学的加载与力学分析方式是相同的。这脱胎于经典弹性理论中半无限体孔边应力集中分析的力学模型与方法^[4]。它没有考虑采矿岩体中原始地应力的存在。实际上,地下采矿围岩中的位移和应力集中是由于“开挖”引起的,是地应力向采矿开挖自由空间释放形成的“等效释放荷载”造成的。“等效释放荷载”作用在开挖自由空间的边界上,而不是作用在采矿外边界上。到外边界时,开挖引起的影响已很小,位移可以忽略不计。而用“外边界加载模型”,将地应力直接加在采矿外边界上进行计算,将会得到外边界位移最大、开挖周边位移最小的结果,这与实际是完全相反的。

地应力的形成主要与地球的各种动力运动过程有关,包括:大陆板块边界受压、地幔热对流、地球内应力、地心引力、地球旋转、岩浆侵入、地壳非均匀扩容等。70多年来的实测和理论分析表明,以大陆板块挤压为主的地球水平构造应力和以地心引力为主的垂直自重应力是地应力的2个主要组成部分。地应力值随地层深度增加呈近似线性增长的关系。因此,深部采矿遇到的第1个问题,就是高地应力条件^[5]。在高应力作用下,深部岩体结构与力学特性会发生重大变化,硬岩可能变成软岩,弹性体可能变成塑性体或潜塑性体,从而引起岩层更大变形和移动。如前所述,岩体中的高应力和大位移,将形成高开挖扰动能量的聚集,不但对岩体稳定性有重大影响,而且可能导致岩爆等动力灾害的发生。再加上深部高地温、高渗透压和复杂的地质环境条件以及深井提升、通风、排水等问题,都是浅部开采不会出现的。因此,深部采矿与岩层控制的理论和方法与浅部相比,会有十分显著的差别。浅部采矿设计与岩层控制已经形成一套成熟的理论、技术、控制措施、设计标准、计算方法等,原封不动地用于深部,而不考虑深部特殊的岩体结构和应力环境条件,因为盲目性和不确定性,将会导致严重

的失误,甚至灾难性的后果。

为了适应深部采矿的应力环境条件和开采技术条件,保证深部开采的安全和高效进行,对传统的适用于浅部的采矿理论、方法、工艺技术进行有针对性的根本变革是十分必要的^[6-7]。譬如,按照岩石力学的理论,深部高应力条件下的巷道和采场支护,应十分重视巷道和采场所处应力环境的测量与分析,强调峰值强度后已破坏岩体残余强度的利用。巷道和采场围岩稳定性与岩层控制的力学分析研究,应在传统的基于弹性理论和方法研究的基础上,发展和应用基于弹塑性、黏弹塑性、流变性和复杂非线性等符合深部岩体力学特性与开采应力环境条件的理论和方法。巷道和采场支护与岩层控制结构系统设计应更多地建立在能量(开采扰动能量在岩体中聚集)分析的基础上,而不是简单地以应力和强度作为设计准则^[8]。

1.2 深部地压显现规律与特征

按表现形式,地压可分为4类:散体地压、变形地压、冲击地压、膨胀地压^[9]。变形地压和冲击地压是深部地压2种主要的表现形式。

变形地压是采矿开挖在围岩中产生的位移引起的压力,这是地压的一种最基本的形式。在岩体条件较好的情况下,随着开挖的进行,围岩的位移和变形发展到一定程度就停止了,开挖结束后可能不需要支护,围岩自身就能维持稳定。但在多数情况下,特别是深部和非线性、流变岩体条件下,围岩必须支护才能防止过量位移引起的破坏。深部高应力条件下,围岩具有产生大变形的内外部条件,围岩必须通过支护才能防止过量变形而引起的岩层移动和破坏。

冲击地压是一种岩石动力学现象。如前所述,在地应力的作用下,采矿开挖产生的“等效释放荷载”引起围岩变形、位移和局部应力集中,形成开挖扰动能量(一种应变能)储存在岩体中。多步骤的采矿开挖形成多次的“等效释放荷载”加载过程,每次加载过程都产生扰动能聚集在围岩中。大量聚集的开采扰动能量在岩体由于高应力作用出现破裂等情况下突然释放,就形成动力冲击破坏,即冲击地压,金属矿称为岩爆。所以岩爆是一种应变能型的冲击地压。深部高应力为岩爆发生创造了条件^[10-11]。

煤矿在接近断层开采时,断层附近的应力集中

以断层为核心呈非对称分布,并由此引起能量聚集的非对称分布。在新的开采扰动下,不对称的能量分布将导致断层错动并伴随能量的释放,产生冲击破坏,形成矿震。所以大多数的矿震是断层错动型的冲击地压。天然地震都是断层错动型的,因而煤矿矿震的形成机理更接近于天然地震^[12]。

冲击地压防控,是深部采矿岩层控制的核心问题。应主要从选择合理的采矿方法、优化开采布局和开采顺序,并采取适当的能吸收能量的支护措施,避免和减少采矿过程中在岩体中产生的应力集中和过量位移,减少开采扰动能量的聚集,并控制开采扰动能量释放的途径,从而减轻和控制冲击地压的发生。

2 地应力对采矿和岩层控制的主导作用

2.1 地应力对采矿设计和岩层控制的重要性

地应力是在采矿开挖之前就已存在于地层中的天然应力,所有的采矿开挖活动及其引起的力学反应,包括围岩应力集中、岩体变形和位移、岩层移动等都是在地应力场的影响和控制下进行的。

为了进行可靠的岩层控制,保证采矿工程的安全与高效,就必须对采矿开挖全过程的岩层活动和工程稳定性,进行定量的计算和分析。这样才能做出科学的采矿设计,制定合理可靠的岩层控制措施,用于指导采矿开挖工程施工。地应力是进行定量设计计算必须的力学前提条件。

由于采矿开挖工程结构和形状的复杂性与多样性,传统力学解析解的计算方法并不适用于这样的计算。因为解析解的方法,只能计算和分析圆形,或通过复变函数变换的方法计算椭圆形等简单和单一的开挖断面形状。现代数值模拟方法使采矿的定量设计计算成为可能。但一切计算都必须在已知地应力条件下才能进行。

2.2 采矿及其岩层控制力学研究与其他力学研究的根本区别

从大的学科分类,采矿是力学问题,岩层控制当然也是力学问题。采矿力学的研究对象是采矿工程岩体(地层),荷载条件是地应力。不能把“岩体”看成固体力学中的一种材料,它是一种天然地质体,具有非常复杂的地质结构,是典型的“不连续介质”。地应力是存在于地层中的天然原始应力。在采矿开挖活动之前,地层处于自然平衡状

态。采矿开挖打破了这种平衡状态,引起地应力向采矿开挖产生的自由空间释放,形成“等效释放荷载”。正是这种“等效释放荷载”,才是带动采矿工程围岩变形、破坏和岩层移动的作用力。

由于地应力是一种内应力,而不是外加荷载,因此,采矿工程是“先有荷载,后挖洞”。而一般力学研究,工程结构上的荷载是外加的,是“先挖洞,后有荷载”。所以采矿工程力学研究,包括岩层控制研究的思路和方法,与以研究“外荷载作用”为特征的固体力学、结构力学的研究思路和方法有根本不同。

2.3 采矿及其岩层控制力学研究中的施工因素

一般力学分析是根据相关力学理论求解在外荷载的作用下,材料结构或工程体中应力、变形及破坏的产生和分布状况,以分析和评价材料结构或工程的安全性等。只要掌握了材料的本构关系和外荷载的大小与作用方式,这一分析就能完成。所以一般的力学分析与研究主要关心2个因素,一是材料因素,二是荷载因素。而采矿力学研究必须还要考虑施工因素。

地下采矿是一个非常复杂的开挖过程,其开挖不是一次完成,而是分多次完成的。每次开挖都是一次地应力的局部释放过程,也就是一次“等效释放荷载”的加载过程。力学研究表明,对于线弹性材料,不论加载的途径和次数是否相同,只要荷载的总量相同,其在材料中产生的力学效应,如应力、位移大小与分布等,是相同的。即荷载的力学效应具有可叠加性,没有加载途径性。但对于非线性材料,荷载的力学效应不具有可叠加性,而具有加载途径性。即尽管荷载总量相同,但不同的加载方式、不同的加载途径、次序等,都会在材料中产生最终不同的力学效应。由于采矿岩体是典型的非线性材料,不同的巷道和采场布置,不同的开挖过程、开采顺序,不同的支护结构和施工时间等,其“等效释放荷载”的加载过程和路径就不同,就会在采矿岩体中产生不同的力学效应,出现不同的应力-应变分布和最终不同的岩层移动与工程稳定性状态。

所以,施工因素对地下采矿工程和岩层的稳定性状态,以及岩层控制方法与措施的制定及其实施效果,均具有重大影响。这也是采矿设计优化的主要内容。

3 地下采矿围岩稳定性与岩层控制的基本原理与方法

3.1 基本原理与方法^[13]

(1) 选择合理的开挖走向、断面形状和几何尺寸

地下采矿巷道、采场、硐室等岩石开挖工程的走向、断面形状和几何尺寸与其开挖在周围岩体中引起的应力、位移大小与分布状态,及其岩层变形与移动有非常密切的关系。在地应力的作用下,地下岩体处于三向受力状态,当地下巷道、采场、硐室的走向与最大主应力方向相一致时,其断面内的2个主应力是较小的主应力,对断面及其巷道、采场、硐室的整体稳定性是有利的。因此,在生产条件许可的情况下,应尽可能地安排地下巷道、采场、硐室的走向与最大主应力的方向相一致或相接近。特别是对于大长度大断面岩石工程,其开挖走向要尽可能避免与地应力的最大主应力方向大角度相交。

为了合理选择地下采矿巷道、隧道、硐室等开挖工程的断面形状,必须准确掌握地应力的分布状态。在工程断面2个主应力(对于水平方位的开挖工程,即水平主应力 σ_h 和垂直主应力 σ_v ,如图2所示)相等的情况下,最佳的开挖断面形状是圆形。在工程断面2个主应力不等的情况下,最佳的开挖断面形状是椭圆。椭圆轴比(水平半轴 a /垂直半轴 b)与断面2个主应力比(σ_h/σ_v)相等时,椭圆周边处于等压缩受力状态。这和工程断面2个主应力相等情况下,最佳的开挖断面形状是圆形的效果是一样的。在此情况下,岩层最稳定。因此,开挖断面形状的选择,要根据地应力状态和实际生产需要,尽可能向圆形或椭圆形接近。

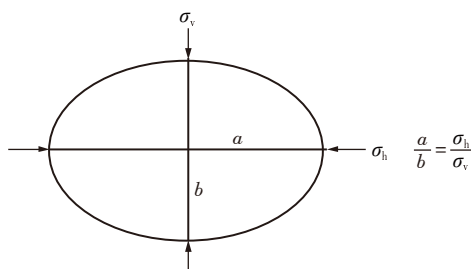


图2 水平巷道最佳断面形状示意

Fig. 2 Diagrammatic sketch of optimum section shape of horizontal tunnel

位于甘肃河西走廊的金川镍矿,是世界第3、中国第1的镍生产基地,被称为“中国的镍都”,镍产

量占全国总产量的90%以上。20世纪60年代初开始建设,巷道设计采用传统的三心拱形状,高度大于宽度。由于巷道变形破坏严重,建矿10多年不能正常投产。20世纪70年代中后期,金川镍矿在国内最早开展实用性地应力测量,测量结果表明矿区水平应力明显大于垂直应力。根据这一测量结果,将巷道断面形状由直墙三心拱改为矮墙半圆拱(宽度明显大于高度,接近于椭圆形),并改进了喷锚支护技术,解决了巷道稳定性问题并很快正常投产^[14]。

采矿开挖工程的几何尺寸对工程的稳定性有直接影响。在相同的岩体和荷载条件下,几何尺寸越小越稳定,越大越不稳定。在满足生产要求的前提下,要尽可能减小开挖体的几何尺寸。对于大几何尺寸的开挖体,要采取必要、合理的支护措施,维持其稳定性。

(2) 改善应力分布状态,在岩体强度不变的条件

下,使不稳定应力状态变为稳定应力状态

莫尔(Mohr)强度理论是最适用于岩土工程围岩稳定性分析的理论。在应用该理论分析岩体稳定性时,当表示岩体受力状态的应力莫尔圆位于强度曲线(图3中的 $\tau=c+\sigma\tan\varphi$ 线)之下时,说明岩体是稳定的;如果莫尔圆与强度曲线相切或相割(有一部分位于强度曲线之上),则表示岩体是不稳定的。

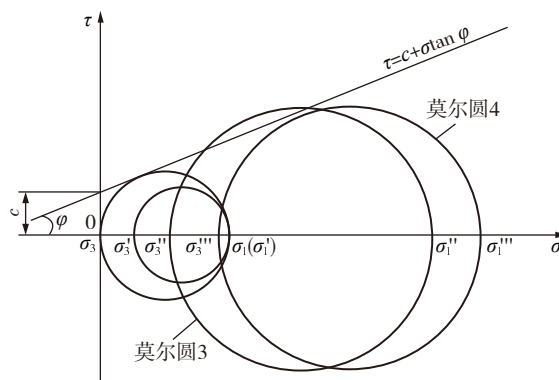


图3 莫尔强度理论围岩稳定性分析示意

Fig. 3 Diagrammatic sketch of stability analysis of surrounding rock by Mohr's strength theory

选择合理的巷道断面形状、轴比,合理的采场开采顺序、开挖步骤,采取合理的支护措施等,是改善应力分布状态、促使岩体稳定的重要手段。参照莫尔强度理论,采用这些手段,可以使莫尔圆缩小或右移,使其从原来与强度曲线相切或相割,变成位于强度曲线之下,从而由不稳定的状态变成稳定的状态。

如图3所示,图中最左边的一个莫尔圆,是岩石单轴加载试验时,岩石发生破坏时岩石受力状态的莫尔圆。此时,岩石承受的最大主应力是 σ_1 ,最小主应力 $\sigma_3 = 0$ (表明是单轴压缩状态), σ_1 就是岩石的单轴压缩强度。如 σ_1 不变($\sigma_1' = \sigma_1$), σ_3 变成 $\sigma_3' (\neq 0)$,此时岩石处于双向受力状态,则莫尔圆比原来缩小,变成从左向右第2个莫尔圆,它位于强度曲线之下,表明处于稳定受力状态。这就等于巷道的表面,在没有支护的条件下处单向受力状态,可能不稳定;施加支护后,在其表面增加一个抗力,变成双向受力状态就稳定了。

图3中右边的2个莫尔圆(莫尔圆3,莫尔圆4),其直径是相等的。但莫尔圆3与强度曲线相割,代表的是不稳定的岩体应力状态;莫尔圆4的2个主应力(σ_1'' , σ_3'')分别大于莫尔圆3中的2个主应力(σ_1' , σ_3'),移到了莫尔圆3的右边,落在强度曲线之下,表明岩体变成了稳定的应力状态。

(3) 提高岩石强度,改善围岩力学性质

按照莫尔强度理论,岩石破坏是一种剪切破坏。破坏时剪切面上能承受的最大剪应力,即剪切强度(τ)取决于岩石的2个力学参数:黏结力(c)和内摩擦角(φ)。根据这2个力学参数,可以在 σ - τ 坐标系中绘制出该岩石简化的直线型莫尔强度曲线($\tau = c + \sigma \tan \varphi$),如图3所示。黏结力(c)和内摩擦角(φ)就是岩石剪切强度的2个基本指标。在一定的围岩受力条件下,如果应力莫尔圆超出了强度曲线,处于不稳定应力状态,岩石就会产生破坏。通过提高岩石强度指标、改善围岩力学性质,使岩石的 c , φ 值提高,就可以使岩石的强度曲线上升。从而使原来超出强度曲线的莫尔圆,落在升高后的强度曲线之下,表明岩体从不稳定的受力状态变成稳定的受力状态。因此,改善围岩力学性质、提高岩石强度,是防止岩石破坏的重要手段。喷锚支护的主要作用就是提高岩石强度,所以比传统支护更有效。

(4) 保护岩石强度,防止岩性恶化

在一定受力条件下,如果岩体是稳定的,说明岩体的受力状态莫尔圆位于岩石的强度曲线之下。如果在采矿工程开挖和运营过程中,产生各种不利的物理-化学作用,致使岩石的力学性质恶化、强度指标 c , φ 值减小,则强度曲线下降。导致原来位于强度曲线之下的莫尔圆超出下降后的强度曲线,使原来处于稳定状态的岩体,变成不稳定,出现破

坏。“保护岩石强度、防止岩性恶化”就是要避免这种情况的发生。

采矿过程中采取的各种支护措施,是“保护岩石强度、防止岩性恶化”的重要手段。支护要特别重视2点:①围岩开挖暴露后,由于风化、水的作用,裂隙扩展等,围岩表层强度会迅速恶化,所以在围岩开挖后以最快的速度封闭围岩是极其重要的,喷射混凝土是最有效的手段;②传统的支护,如木支护、钢圈支护、砌块支护等,都是点接触式的支护,不能封闭围岩;浇注混凝土支护虽然能封闭围岩,但需要较长时间,可能表层围岩已经显著恶化才完成支护,这会大大减小或失去支护的作用。

(5) 改变围岩受力条件,抑制围岩变形

如1.1节所述,采矿开挖出现的自由空间引起地应力向自由空间的释放,形成“等效释放荷载”。它带动围岩向开挖自由空间变形与移动。当变形与移动超过一定限度后,就会引起围岩失稳和破坏。因此,必须采用数值模拟等方法对这种变形和移动的大小与方向进行定量计算。在此基础上,通过合理的支护措施改变围岩受力条件,将岩体的变形与移动控制在允许的范围之内。特别要注意岩体中是否存在具有滑移倾向的软弱结构面,如存在这样的结构面,必须给予其适当的阻力,防止其滑移导致岩体和工程的破坏。在采矿工程中,充填法是最有效的支护方法。充填体的最主要作用是抑制围岩变形,而不是提供支承压抗力^[15-16]。

(6) 全断面支护

片帮、冒顶、塌方、底臃等,是地下巷道最常见的围岩局部失稳、破坏现象。这些现象的发生,与巷道围岩局部的力学性质、强度出了问题,包括剪切强度、拉伸强度、压缩强度和 c , φ 值的下降等密切相关。如前所述,喷锚支护的主要作用就是改善岩体的力学性质,提高岩体的强度。所以,大量矿山采用喷锚支护控制和防治上述的失稳、破坏现象。但很多矿山控制和防治的效果并不好。一个很重要的原因,就是没有进行全断面支护。只支护加固了巷道顶部和两帮周边的围岩,没有加固底部的围岩。这样在巷道围岩中就形成不了一个完整的周边围岩承载圈,极大地降低了承载能力。为实现全断面支护,巷道底部要打底拱和适当的向下锚杆,巷道周边锚杆和底拱用钢筋网连成一体,成为一个完整的喷锚网支护圈。这对围岩力学、强度条件不

太好的矿山,是十分必要的。

(7) 小结

采矿工程岩层失稳和破坏主要是由于岩体强度的损伤、下降所造成的;支护的根本目的是保护、改善和提高岩体的强度;不能把围岩当成一种被动的荷载加以支撑。充分发挥围岩自身强度达到采矿工程的稳定,是岩石力学最基本的原理^[17]。在深部高应力条件下,为了改善围岩应力分布状态,控制岩层变形和移动,维持采矿工程的稳定,上述原理的指导尤其重要。

3.2 工程实例

以玲珑金矿主运输巷道塌陷加固治理工程^[18]为例进行说明。

(1) 工程简介

玲珑金矿位于山东省招远市,是我国最大的黄金矿山之一。该矿主运输巷道(简称主运巷)的下方有2条矿脉。20世纪80年代初2条矿脉回采时,为了保护主运巷的安全,采场上部留了12 m厚的保安矿柱未采,采空区进行了废石充填。但从80年代后期开始的非法“民采”,在主运巷的下方进行了大规模的盗采、盗挖,12 m厚的保安矿柱被盗采后剩下不到1 m的厚度。从1990年开始,主运巷就发现有

异常变形,到1995年发生急剧的下沉和变形破坏,最大下沉0.6 m,并伴随大面积片帮垮落、冒顶、四周围岩严重松动等现象。塌陷后的巷道断面收缩到不足原设计断面的1/2,电机车不能正常通行。为了维持正常生产,矿方采取了灌浆、钢支架、木支架、铁轨钢板铺底等一系列支护加固措施,均不见效。事实表明,常规技术已无法解决该巷道的修复治理问题。1996年底,笔者团队接手该项目后打破常规、另辟蹊径,提出了先不直接修复治理巷道,而先加固四周围岩,然后重新掘支成巷的方案。

(2) 加固治理难点

① 巷道严重变形收缩,需首先拆除临时支架,将断面扩至原设计大小,然后进行加固,才能满足运输要求。但由于巷道顶部和两帮围岩严重松动破坏,一旦拆除支架,围岩将立即塌落而无法进行施工。

② 围岩严重破裂松散,无法直接实施注浆技术。一是无法打注浆孔;二是该巷道没有原始混凝土砌碛等衬砌层,即使直接注浆也会发生大面积跑浆现象,达不到加固目的。

(3) 加固治理方案

加固治理方案如图4所示。

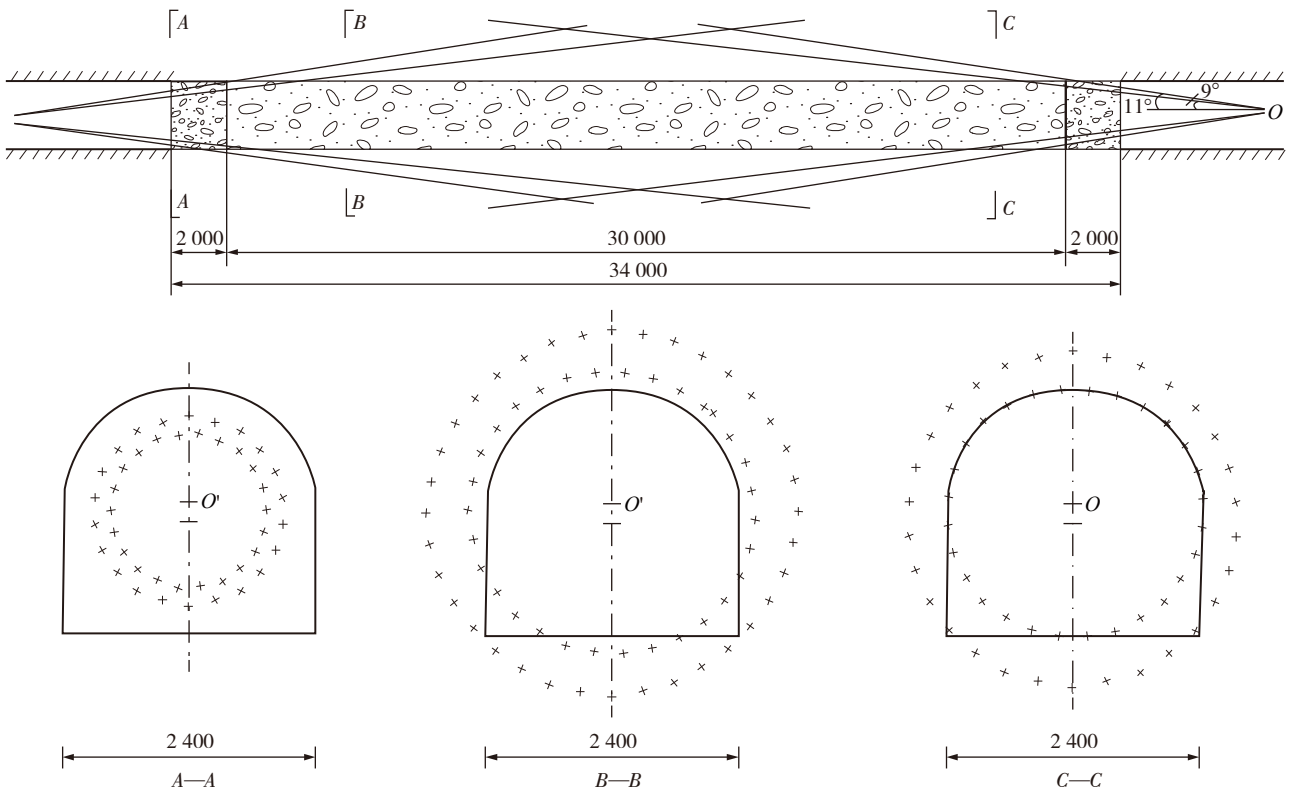


图4 加固治理方案示意

Fig. 4 Diagrammatic sketch of reinforcing and administering scheme

① 将塌陷段(图4中30 m长度段)用废石渣土充填封堵,充填过程中从中间向两端预埋2套注浆管路,封堵段填实后,两端砌止浆墙(厚度2 m)封堵。接着通过预埋管向填渣段进行低浓度注浆使其固结,防止围岩注浆时朝巷道内跑浆。

② 从两端止浆墙朝巷道四周围岩打2圈注浆孔(钻孔的倾角分别为 9° , 11°),两端打入的钻孔在封堵段中部围岩体内交叉搭接;每孔插入2根 $\phi 25$ mm的螺纹钢后封孔,并实施高压注浆;注浆材料为水泥-水玻璃双液浆,水泥浆:水玻璃=1:0.3~1:0.6(体积比),其中水泥浆的水灰比为1:1~1:0.6,水玻璃浓度为(30~45)Be'(波美度)。注浆前需在现场进行注浆材料的配比试验,滤定出配比曲线以指导现场施工,保证上向注浆时浆液可获得10 m左右的有效扩散,下向注浆时控制浆液流动速度和凝固时间,使其停留在巷道下20 m以内的充填物内,而不从空区盲目流失。

③ 经过1个月的养护期,按原设计断面尺寸将巷道重新掘开,并进行喷锚支护。

(4) 加固效果及力学机理

① 高压注浆材料浆液黏度低,流动性能好,可注性强,能进入细小裂隙和砂层中,因此每孔浆液均可获得10 m左右的有效扩散,且每孔均有2根钢筋插入,其本身就是一个微型灌注桩;全部锚注孔连成一片,形成一个整体的灌注桩群;从而有效地改善巷道周边围岩的应力分布状态,提高岩体强度,从根本上保持巷道的稳定。

② 巷道顶部的左右钻孔在中间部位搭接,在向上10多米范围内形成一个拱形加固带;下部的左右钻孔同样在中间部位搭接,近20 m厚的加固层相当于在整个巷道塌陷段架起一座桥梁。从上下左右整体上看,加固段是在破碎带中形成了一个安全管状通道,从而有效地控制了岩层变形与移动,出色地发挥了全断面支护的作用。

③ 下部钻孔注浆时,对浆液流动速度和凝固时间可以加以控制,使其不从空区盲目流失,而是停留在巷道下20 m以内的充填物内,使充填物固化,从而再次形成一个人工保安矿柱,减少了下部空区对巷道稳定性的影响。

④ 在巷道周边形成的管状加固带,相当于一道隔水帷幕,起到防水渗漏的作用,阻止围岩被风化、侵蚀而导致物理力学性能的恶化和强度的降低,保

持围岩稳定^[19]。

4 结 论

(1) 地应力是采矿开挖前就存在于地层中的天然应力,一切的采矿开挖活动都是在地应力的控制之下进行的。因此,采矿开挖引起围岩变形和岩层移动的形成与发展过程,主要受地应力场所控制。为了进行科学的采矿设计,制定和实施有效的岩层控制措施,准确掌握矿区地应力条件是十分必要的。

(2) 地下采矿围岩中的位移和应力集中是由于采矿“开挖”引起的。采矿开挖出现自由空间,引起地应力向自由空间释放,形成“等效释放荷载”。它作用在开挖自由空间的边界上,而不是作用在采矿外边界上。正是这种“等效释放荷载”带动周围岩体、岩层的变形与移动。传统的“外边界加载模型”,将地应力直接加在采矿外边界上,将会得到“采矿外边界位移最大、开挖周边位移最小”等一系列错误结果。所以,地下采矿力学研究,包括岩层控制研究,必须根据开挖状态,将地应力转换成“等效释放荷载”进行计算和分析,才能得到正确的结果。

(3) 地应力随深度增加呈近似线性增长。在高应力作用下,深部岩体结构与力学特性会发生重大变化,硬岩可能变成软岩,弹性体可能变成塑性体或潜塑性体,从而引起岩层更大变形和移动。因此,深部采矿岩层控制的理论和方法与浅部会有十分显著的区别。深部巷道和采场支护与岩层控制结构系统设计应更多地建立在能量(开采扰动能量)分析的基础上,而不是简单地以应力和强度作为设计准则。

(4) 地下采矿是非常复杂的多步开挖过程,每步开挖都是一次“等效释放荷载”加载过程。采矿岩体是非线性材料,荷载的力学效应不具有可叠加性,而具有加载途径性。不同的巷道和采场布置,不同的开挖过程、开采顺序等,其“等效释放荷载”的加载途径就不同,就会在采矿岩体中产生不同的力学效应和工程稳定性状态。选择合理的采矿方法,优化开采布局、开采顺序、开挖步骤等,对优化“等效释放荷载”的加载途径和力学效应,实现有效的围岩稳定性和岩层控制,具有重要作用。

(5) 采矿工程岩层失稳和破坏主要是由于岩体

强度的损伤、下降所造成的;支护的根本目的是保护、改善和提高岩体强度;不能把围岩当成一种被动的荷载加以支撑。充分发挥围岩自身强度达到采矿工程的稳定,是岩石力学最基本的原理。“玲珑金矿主运输巷道塌陷加固治理工程”是应用该原理的成功范例。

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京:科学出版社,2000.
CAI Meifeng. Principles and techniques of in-situ stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [3] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制-理论与实践[M].北京:科学出版社,2001.
CAI Meifeng. Optimization of mining design and control of ground pressure in metal mines-theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [4] 王龙甫. 弹性理论[M].北京:科学出版社,1984.
WANG Longfu. Elastic theory[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [5] 蔡美峰,刘卫东,李远. 玲珑金矿深部地应力测量及矿区地应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):227-233.
CAI Meifeng, LIU Weidong, LI Yuan. In-situ stress measurement and regional stress distribution law in deep position of Linglong Gold Mine[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 227-233.
- [6] CAI Meifeng, BROWN Edwin T. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources[J]. Engineering, 2017, 3(4): 432-433.
- [7] FAIRHURST Charles. Some challenges of deep mining[J]. Engineering, 2017, 3(4): 527-537.
- [8] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Deep mining status and developing strategy of metal mines[J]. Journal of Engineering Sciences, 2019, 41(4): 417-426.
- [9] 高磊. 矿山岩石力学[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
GAO Lei. Mining rock mechanics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987.
- [10] CAI Meifeng. Prediction and prevention of rock burst in metal mines-A case study of Sanshandao gold mine[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(2): 204-211.
- [11] 蔡美峰,冀东,郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10): 1973-1980.
CAI Meifeng, JI Dong, GUO Qifeng. Study on prediction of rock burst based on in-situ stress measurement and accumulating theory of mining induced disturbing energy[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1973-1980.
- [12] 李鹏,蔡美峰,郭奇峰,等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):1-17.
LI Peng, CAI Meifeng, GUO Qifeng, et al. Research status and developing tendency of fault dislocation type pumping pressure in coal mines[J]. Journal of Harbin Industrial University, 2018, 50(3): 1-17.
- [13] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定性分析[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
YU Xuefu, ZHENG Yinren, LIU Huaiheng, et al. Stability analysis of surrounding rock in underground engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983.
- [14] 蔡美峰,孔广亚. 金川二矿区深部开采稳定性分析和采矿设计优化研究[J]. 中国矿业,1998,7(5):33-37.
CAI Meifeng, KONG Guangya. Study on stability analysis of deep mining and optimization of mining design in the 2nd mining area of Jinchuan Mine[J]. China Mining Magazine, 1998, 7(5): 33-37.
- [15] 江权,史应恩,蔡美峰,等. 深部岩体大变形规律:金川二矿区巷道变形与破坏现场综合观测研究[J]. 煤炭学报,2019,44(5): 1337-1348.
JIANG Quan, SHI Ying'en, CAI Meifeng, et al. Regularities of large deformation of deep rock mass: Synthetical field monitoring and analysis of tunnel deformation and failure in the 2nd mining area of Jinchuan Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1337-1348.
- [16] 杨志强,高谦,蔡美峰,等. 我国大型贫铁矿充填法开采关键技术与发展方向[J]. 矿业工程研究,2015,30(1):38-45.
YANG Zhiqiang, GAO Qian, CAI Meifeng, et al. The key mining techniques and developing tendency of large-scale lean iron ore deposit by filling method[J]. Journal of Mining Engineering Research, 2015, 30(1): 38-45.
- [17] 于学馥. 岩石记忆与开挖理论[M].北京:冶金工业出版社,1993.
YU Xuefu. Remembering and excavation theory of rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [18] 蔡美峰,高永涛,李长洪,等. 玲珑金矿主运巷塌陷段锚注加固技术研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(4):388-391.
CAI Meifeng, GAO Yongtao, LI Changhong, et al. Study on techniques for reinforcing collapsed main transport tunnel by bolting and grouting in Linglong Gold Mine[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 388-391.
- [19] 蔡美峰,孔留安,李长洪,等. 玲珑金矿主运巷塌陷治理区稳定性动态综合监测与评价[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(5): 886-894.
CAI Meifeng, KONG Liuan, LI Changhong, et al. Dynamic synthetical monitoring and assessment for reinforced collapsing area of main transport tunnel in Linglong Gold Mine[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 886-894.