膨胀软岩巷道底鼓机理与耦合支护技术研究*

王进学[1] 杨胜利[2] 陈忠辉[2]
(中国恩菲工程技术有限公司;2. 中国矿业大学(北京))

摘 要 巷道底鼓是造成巷道变形破坏的常见形式之一,是制约矿山安全高效生产的重要因素和关键难题,这一问题在深部开采和复杂地质条件下的矿山中尤其严重。针对高地应力破碎膨胀软岩条件下的巷道底鼓进行了研究,分析了巷道底鼓的机理,建立了复杂条件下复合型底鼓的力学模型,根据动压理论推导了巷道底板塑性区范围及底板压力的本构方程。通过矿山实例,提出了锚杆锚索耦合支护设计方案,并利用 FLAC-3D 软件对巷道支护的稳定性进行了数值计算。研究结果表明,对巷道底板塑性区域内的滑移体进行关键部位加强支护,可以有效控制巷道底鼓的发生和发展。

关键词 巷道底鼓 高应力 膨胀软岩 机理 耦合支护

Study on the Floor Heave Mechanism of Roadway in Swelling Soft Rock and Its Coupling Support Technology

Wang Jinxue[1] Yang Shengli[2] Chen Zhonghui[2]
(1. *China ENFI Engineering Corporation*;2. *China University of Mining and Technology (Beijing)*)

Abstract Floor heave is one of common forms that causes deformation and failure of roadway. It is an important factor and key problem restricting the safety and high-efficient mining productivity, especially in deep mining and mines with complex geological conditions. Study was made on the floor heave of roadway at high ground stress and fractured swelling soft rock conditions. The floor heave mechanism was analyzed, a mechanical model for compound floor heave under complex conditions established and the constitutive equations of roadway floor plastic zone and floor pressure were deduced by dynamic pressure theory. In light of a mine case, a bolt and cable coupling support design plan was proposed and the numerical calculation was made for the stability of roadway support using FLAC-3D software. The research result shows that enhancing the support at the key part of the sliding body in the plastic zone of roadway floor can effectively control the occurrence and development of roadway floor heave.

Keywords Floor heave of roadway, High stress; Swelling soft rocks, Mechanism, Coupling support

巷道由于岩石开挖或开采扰动引起围岩应力的重新分布以及巷道运行过程中围岩性质不断发生变化,造成巷道顶底板及两帮岩体变形使巷道断面内敛,底板向上隆起,巷道的这种变形现象称为底鼓。底鼓是巷道破坏的常见现象,不仅造成巷道底板的变形破坏,而且会引起巷道两帮及顶板的变形和失稳,进而使巷道整体变形破坏[1-7]。现场调查表明,在底板不支护的深部回采中,巷道顶底板移近量的2/3~3/4是由于巷道底鼓引起的,底鼓造成的巷道维修量占总维修量的50%左右。随着开采深度的增加,巷道变形量增大(一般在500 mm以上,如淮南、铁法、金川等矿区),给巷道维护造成很大困难[7]。

国内外研究表明,巷道围岩控制是矿山开采的关键问题,要解决巷道的稳定支护,必须对巷道底鼓的机理及防治措施进行系统深入地研究,特别对于高应力软岩矿区的巷道工程,这一问题更为必要和严峻。国内外研究人员针对底鼓对矿山开采产生的影响和破坏作用,在理论、试验和控制技术研究方面进行了大量的研究,取得了有益的研究成果[1-7]。底鼓是一个复杂的动力现象,与地应力、工程地质条件及施工技术等多种因素有关,依据作用机理形成了挤压流动性底鼓、挠曲挠曲性底鼓、剪切错动性底

* 国家自然科学基金项目(编号:10572148)。
王进学(1968—),男,中国恩菲工程技术有限公司,高级工程师,博士,100038 北京市复兴路12号中国恩菲工程技术有限公司咨询部矿山室。

万方数据

鼓、膨胀性底鼓以及多种因素共同作用的复合型底鼓等。目前,底鼓控制有多种方法,按机理可分为加固法和卸压法两大类。加固法是通过底板支护,提高底板强度控制底鼓变形,如底板锚杆、底板锚注、封闭式支架、砼反拱、联合支护等形式。卸压法主要是通过人工卸压措施,降低底板岩层应力,实现控制巷道底鼓的目的[1]。

本文对高应力破碎膨胀软岩巷道工程的底鼓现象进行了理论和数值计算研究,建立了复杂应力条件下巷道复合型底鼓的力学模型,提出了相应的控制措施,为复杂条件下巷道底鼓的控制提供了依据。

1　巷道底鼓类型与机理

根据巷道底鼓形成的力学作用机理,巷道底鼓可以分为 5 种类型:

(1)挤压流变性底鼓。该类型巷道底鼓主要发生在巷道底板为软弱破碎岩体的岩层内,在水平构造应力作用下,以巷道底板为沿空自由面,底板软弱破碎岩体受水平应力挤压流动到巷道内,形成巷道底鼓。当巷道整体处于软弱破碎围岩体时,由于开采造成应力重新分布和构造应力的不断释放,使破碎底板岩体变形逐渐增大,产生挤压流变底鼓随时间不断发展的时间效应。力学模型如图 1(a)所示。

(2)挤压挠曲性底鼓。该类型底鼓发生在层状岩体,并且对于中硬岩体的巷道工程也会造成底鼓的出现。由于水平压力作用,层状岩体产生挠曲变形,沿巷道底板临空方向凸起,造成巷道底鼓,如图 1(b)所示。研究表明,岩层分层越薄,巷道跨度越大,岩石越软弱,底鼓也越严重。

(3)剪切性底鼓。巷道破碎围岩体作用于巷道底板,使底板岩体受到剪切作用,底板软弱岩体沿剪切弱面形成滑移体,剪切滑移岩块在外压力作用下发生剪切错动,并向巷道内凸出,其力学模型如图 1(c)所示。

(4)膨胀性底鼓。岩石是一种多组分材料,在不同环境条件下表现出不同的物理力学性质,岩石浸水后,不仅岩石强度弱化,对于含有蒙托石、泥质岩等的岩层,会发生岩体膨胀,出现岩体扩容现象。同时岩体膨胀产生膨胀应力,加剧岩体变形,造成巷道底鼓。

(5)复合型底鼓。对于处在复杂条件下的巷道工程,巷道围岩受多因素的影响和制约,如水平构造应力、剪切应力、膨胀应力等,形成多因素共同作用的复合型巷道底鼓。

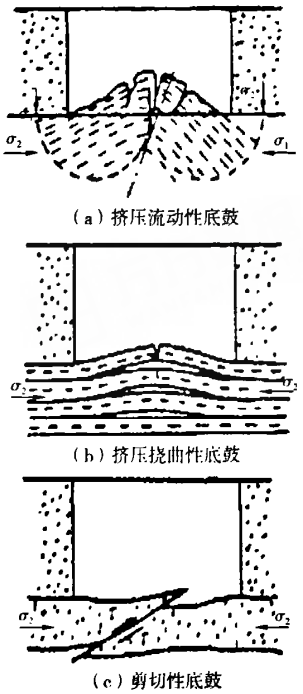


图 1　巷道底鼓力学模型示意

2　复合型底鼓力学模型及解析分析

2.1　复合型巷道底鼓力学模型分析

复合型巷道底鼓是多因素共同作用的结果,本研究针对高应力破碎软岩条件,综合考虑地应力、破碎岩体荷载、膨胀应力的影响,建立巷道力学模型如图 2 所示。

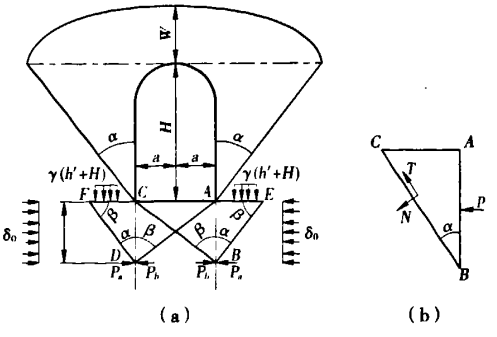


图 2　巷道底鼓力学分析

巷道开挖后,由于应力的重新分布,使一定范围内的巷道围岩发生塑性破坏,并在巷道顶部形成压力拱,压力拱上部围岩荷载通过拱脚传递至深部围岩体,支护体仅支撑拱内破碎岩体的荷载 $q(q=\gamma(h'+H))$。巷道侧壁底板受垂直荷载 q 作用(假设巷道两帮条件相同),底板围岩产生主动塑性应力和被动塑性应力,ABE 区岩体处于主动塑性压力状

万方数据

态，而 ABC 区岩体处于被动塑性压力状态。同时，在水平构造应力的挤压作用和膨胀应力作用下，产生垂直向上的围岩压力，使巷道底板向上临空隆起或挤入巷道，造成底鼓显现。

2.2　巷道底鼓力学分析

如图 2(a)所示，假定巷道底板岩体处于极限平衡状态，AB 右侧承受主动压力，左侧承受被动压力，B 点的深度 y_0 可由力的平衡条件确定，巷道底板处于平衡状态时，有 $\angle ABE = 45° - \phi_k/2$，$\angle ABC = 45° + \phi_k/2$。作用于 B 点的主动压力 P_a^B、被动压力 P_b^B 分别为[1]

$$\begin{cases} P_a^B = \gamma(h' + H + y_0)\tan^2(45° - \phi_k/2) \\ P_b^B = \gamma y_0 \tan^2(45° + \phi_k/2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中，γ 为岩石平均容重；h' 为压力拱高度；H 为巷道高度；ϕ_k 为岩层内摩擦角；y_0 为底鼓破坏或塑性区破坏深度。

由应力破坏条件 $P_a^B = P_b^B$，得出：

$$y_0 = \frac{\tan^2(45° - \phi_k/2)}{\tan^2(45° + \phi_k/2) - \tan^2(45° - \phi_k/2)}(h' + H). \quad (2)$$

当 $y_0 > 0$ 时，巷道底板产生向上的压力，ABE 滑动体处于主动状态，产生主动压力 P_a 作用于 AB 右侧，推动滑移体向左移动，ABC 滑动体处于被动状态，产生的被动压力 P_b 作用于 AB 左侧，主要作用是阻止滑移体的移动。因此，主动压力与被动压力之间的差值 P 是产生岩体滑动的实际动力，方向为水平方向，计算解析式为

$$P = P_a - P_b. \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_a = \frac{1}{2}\gamma y_0(2h' + 2H + y_0)\tan^2\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) \\ P_b = \frac{1}{2}\gamma y_0^2 \tan^2\left(45° + \frac{\phi_k}{2}\right) \end{cases}. \quad (4)$$

综合关系式(3)、(4)，得：

$$P = \frac{1}{2}\gamma y_0\left[(y_0 + 2h' + 2H)\tan^2\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) - y_0\tan^2\left(45° + \frac{\phi_k}{2}\right)\right]. \quad (5)$$

将 P 正交分解，得平行于被动滑动面的剪切力 T 和垂直于该面的压力 N，如图 2(b)所示，即：

$$\begin{cases} T = P\cos\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) \\ N = P\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) \end{cases}, \quad (6)$$

式(6)中，T 为促使滑移体 ABC 沿 BC 面滑动的滑移力，N 在该面产生与 T 反方向的摩擦力 F，阻止滑移体的滑动，摩擦力值为

$$F = P\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right)\tan^2\phi_k. \quad (7)$$

考虑岩体膨胀应力 σ_b，求得促使滑移体滑动的实际滑动力 T_0 为

$$T_0 = T + \sigma_b\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) - F = P\cos\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) + \sigma_b\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) - P\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right)\tan^2\phi_k = \frac{\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right)}{\cos\phi_k}P + \sigma_b\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) = \frac{1}{2}P\sec\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right) + \sigma_b\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right). \quad (8)$$

同理，在假定两帮相同条件下，AD 面产生相同的滑移力，BC 面与 AD 面产生的滑动力的合力 P_0，即为造成巷道底鼓的围岩压力，有：

$$P_0 = 2T_0\sin\left(45° - \frac{\phi_k}{2}\right). \quad (9)$$

为阻止巷道发生底鼓，必须对底板围岩体内的滑移体提供一定的支护阻力，以平衡巷道底板向上的围岩压力，并留置可靠的安全系数。

3　工程实例

3.1　工程概况

某镍铜矿运输巷道布置在高应力破碎混和岩岩体内，且岩石属于膨胀岩，最大水平应力 $\sigma_0 = 20$ MPa，膨胀应力 $\sigma_b = 0.093$ MPa，岩石单轴抗压强度 $\sigma = 54.77$ MPa，弹性模量 $E = 17.8$ GPa，泊松比 $\mu = 0.217$，内聚力 $C = 15.01$ MPa，内摩擦角 $\varphi = 29.08°$，岩石密度均值 $\gamma = 2.61$ g/cm^3。巷道宽度 $A = 4$ m，高度 $H = 5$ m，拱部为半圆拱形断面。

3.2　塑性区范围与底板压力计算

根据压力拱理论，计算得到压力拱高度 $h' = 2.17$ m，将各参数值代入公式(2)，求得巷道底板塑性区发展深度为：$y_0 = 0.98$ m。

计算(5)～(8)式，分别求得各压力值为

$$\begin{cases} P = 31.54\ \text{kN/m}^2 \\ T = 27.19\ \text{kN/m}^2 \\ N = 15.99\ \text{kN/m}^2 \\ F = 8.9\ \text{kN/m}^2 \\ T_0 = 65.45\ \text{kN/m}^2 \end{cases}.$$

万方数据

代入公式(9),求得围岩压力为

$P_0 = 2T_0\sin(45° - \phi_k/2) = 66.36\ \text{kN/m}^2$.

3.3 支护方案设计

根据巷道围岩地质与应力条件,设计巷道一次支护采用锚网喷支护,以维护巷道掘进过程中的初期稳定状态,二次永久支护采用锚网索喷联合支护方式,针对巷道底鼓的理论分析结果,在巷道底脚关键部位进行锚杆、锚索加强支护。表 1 为巷道支护参数表,图 3 为巷道支护方案示意图。

表 1　巷道支护参数

项目名称	一次支护锚杆	二次支护锚杆	二次支护锚索
材　质	左旋无纵筋螺纹钢	左旋无纵筋螺纹钢	钢绞线
规格/mm	ϕ22 × 3 000	ϕ22 × 3 000	2 × ϕ15.14 × 8 000
布置方式	矩形网状	矩形网状	矩形网状
间排距/mm	1 000 × 1 000	1 000 × 1 000	2 000 × 2 000
托板/mm	150 × 150 × 10	150 × 150 × 10	200 × 200 × 12
锚固力/kN	≥120	≥120	≥150
锚固剂	水泥砂浆	水泥砂浆	水泥砂浆
喷射混凝土强度	C20	C30	
喷射混凝土厚度/mm	100	100	
钢筋网规格/mm	ϕ6.5 × 100 × 100	ϕ6.5 × 100 × 100	
组合构件	钢筋托梁	钢筋托梁	

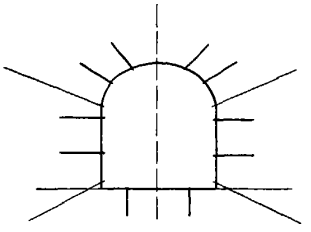


图 3　巷道二次支护方案示意

3.4 数值计算结果分析

建立研究巷道的计算模型,利用 FLAC - 3D 计算软件对巷道无支护和支护状态下的变形破坏进行数值模拟,分别得到无支护情况下和支护情况下巷道围岩垂直位移云图及巷道底板位移变化规律曲线图,如图 3 ~ 图 6 所示。

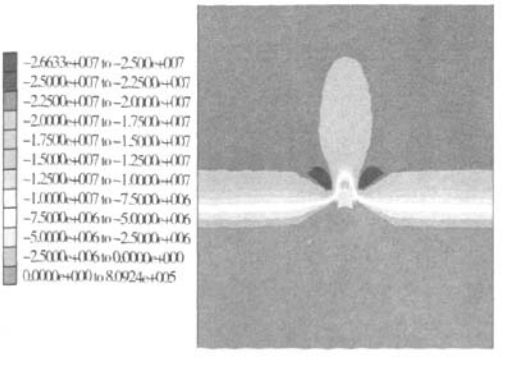


图 3　无支护巷道围岩垂直位移云

从图 3 位移云图可以看出,无支护巷道围岩的垂直位移主要在顶、底板,沿顶、底板垂直方向移近。

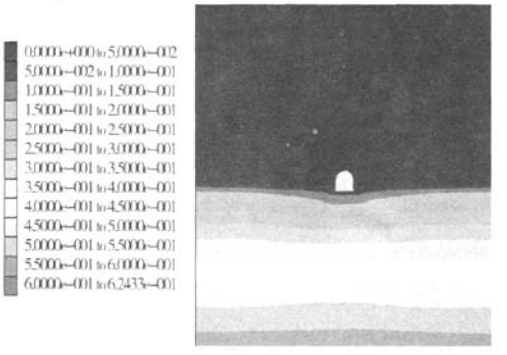


图 4　支护巷道围岩垂直位移云

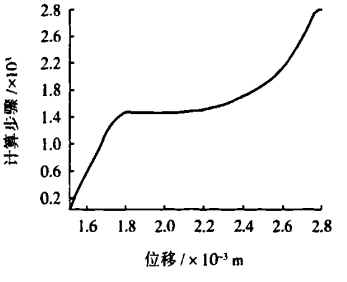


图 5　无支护巷道底板垂直位移变化规律

由于受岩石膨胀力和水平构造应力作用,巷道底板位移区域和位移量都较大,是造成巷道底鼓的主要原因。图 5 的底板垂直位移变化规律曲线图表明,巷道在开挖初期底板位移快速线性增加,位移量约为 15 cm,然后基本处于稳定状态,随着巷道的掘进,底板位移再次快速增大,最终达到 30 cm 后进入永久的稳定状态,巷道具有明显的底鼓显现。

万方数据

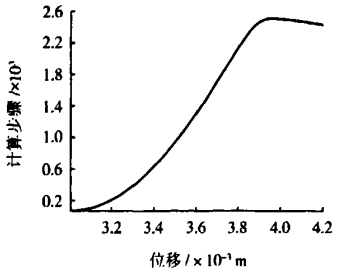


图6　支护巷道底板垂直位移变化规律

图4位移云图显示，通过锚网索喷永久支护，巷道围岩的垂直位移主要发生在巷道底板深部围岩，而顶板围岩及底板支护范围内围岩的位移得到有效控制，且位移量很小。图6结果表明，巷道在永久支护后，随巷道掘进底板向上的位移呈线性增加，达到峰值后进入稳定状态，其峰值位移量为2.6 cm左右。

对比巷道无支护和支护情况下的底板位移变化规律，巷道底板位移量由30 cm减小到2.6 cm，基本消除了底鼓现象，说明通过对巷道底板关键部位进行锚索加强支护措施，可以有效控制因复杂地质因素和岩石条件引起的巷道复合底鼓现象。

4　结　论

通过理论分析和实例研究，可以得到以下几点结论：

(1)复合型巷道底鼓是复杂地质因素和岩石条件共同作用的结果，本研究根据巷道底鼓的影响因素建立了巷道底鼓力学解析计算模型，进行了巷道底鼓破坏范围及围岩压力的理论分析，为巷道底鼓的机理研究及其控制提供了理论依据。

(2)通过数值计算方法，对实际矿山的巷道工程底鼓现象进行了分析研究，结果表明随着巷道的掘进巷道底板发生垂直位移，最大位移量达到30 cm，属于明显的底鼓显现。在掘进过程中，位移变化呈现开挖初期快速增加－稳定－快速增大的规律。

(3)提出了锚网喷一次支护、锚网索喷二次支护及巷道底脚关键部位锚索加强支护的耦合支护设计方案，通过数值计算，巷道支护后底板位移量由无支护的30 cm减小到2.6 cm，且巷道底板位移随掘进呈线性增加，达到峰值后趋于稳定。

(4)研究结果表明，通过对底板滑移区域进行关键部位的锚索补强支护措施，可以有效控制底板的位移量，消除因复杂地质因素和岩石条件引起的复合型巷道底鼓现象。

参　考　文　献

[1] 李国富，代学灵，戴铁丁. 剪胀底鼓机理与控制对策研究[J]. 金属矿山，2007(6)：16-18.

[2] 兰永伟，张永吉，高红梅. 深部开采条件下巷道底鼓机理的研究[J]. 矿业研究与开发，2005，25(1)：34-36.

[3] 马建军，蔡路军，程良奎. 软岩巷道稳定性影响因素及其支护理论探讨[J]. 有色金属(矿山部分)，2005，57(6)：39-41.

[4] 李树清，冯　涛，王从陆，等. 葛泉矿软岩大巷底鼓机理及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(8)：1450-1455.

[5] 黄　胜，刘　巍，于　驰. 浅谈巷道底鼓的防治措施[J]. 矿业工程，2006，5(4)：27-29.

[6] 王卫军，侯朝炯. 沿空巷道底鼓力学原理及控制技术的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(1)：69-74.

[7] 姜耀东，赵毅鑫，刘文岗，等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(14)：2396-2401.

[8] 李国富. 膨胀型软岩变形机理与特种控制技术研究[J]. 金属矿山，2006(9)：18-22.

[9] 范　文，俞茂宏，陈立伟，等. 考虑剪胀与软化的硐室围岩弹塑性分析的统一解[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(19)：3213-3220.

(收稿日期　2008-10-23)

(上接第11页)

[5] 牛建英. 市场失灵下的资源产业布局策略[J]. 金属矿山，2006(6)：5-7.

[6] 吴溪淳. 中国钢材市场发展趋势及对铁矿石市场的影响[J]. 金属矿山，2006(9)：1-4.

[7] 杨德新. 跨国经营与跨国公司[M]. 北京：中国统计出版社，2000.

[8] 童　生，成金华. 我国资源型企业跨国经营的政治风险及其规避[J]. 国际贸易问题，2006(1)：90-95.

[9] 蔡丛光，曾建喜. 国内有色金属矿业企业并购及全球化之路[J]. 采矿技术，2005，5(1)：103-105.

[10] 朱及天，洪天求. 我国钢铁需求预测及铁矿资源安全供给对策[J]. 金属矿山，2006(10)：9-12.

[11] 周进生，鲍荣华. 世界矿业的全球化发展趋势[J]. 中国矿业，2004，13(1)：16-18.

[12] 朱　训. 关于矿业企业发展的几个问题[J]. 中国矿业，2003，5(1)：4-7.

[13] 侯　卉，胡旺阳，李　兵. 我国铁矿石资源可持续发展的战略分析[J]. 金属矿山，2007(10)：18-21.

[14] 许　南，杨迎春. 现阶段我国有色金属工业企业跨国经营问题探析[J]. 湖南有色金属，2005，21(2)：58-61.

(收稿日期　2008-10-11)

万方数据