

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2307-07

软岩巷道顶、帮、底全支全让 O 型 控制力学模型及工程实践

高明仕¹, 赵一超¹, 李 明², 曹志安³, 张 健³

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 永城煤电控股集团有限公司, 河南 永城 476600)

摘 要: 软弱岩体的阶段性、持续性流变, 导致软岩巷道围岩深度破坏和支护失效。软岩巷道顶、帮、底三者围岩系统在围岩系统稳定过程中所起的作用不同, 软岩巷道围岩稳定性控制应做到整体性和协调性支护。在分析巷道顶、帮、底相互作用效应基础上, 针对软岩巷道强流变四周均表现出大变形的破坏特征, 提出了全断面、全支全让 O 型封闭控制的支护原理。该原理强调, 开挖初期就应对软岩巷道顶、帮、底全断面进行强力支护, 同时全断面又适时让压, 在高阻支护力作用下又能适当释放围岩应力, 达到对软岩巷道的整体性和协调性控制。通过力学模型对软岩巷道围岩塑性区范围和表面位移与支护力的作用关系进行了分析计算, 得出巷道围岩变形破坏与支护力呈负相关关系。工程实践表明, 采用该支护原理有效控制了深部软岩巷道的大变形。研究成果对类似工程实践具有一定的参考借鉴价值。

关 键 词: 软岩巷道; 顶、帮、底相互作用效应; 全支全让; O 型控制; 工程实践

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Roof and support and bottom yielding support with whole section and O-shape control principle for soft rock roadway and engineering practice

GAO Ming-shi¹, ZHAO Yi-chao¹, LI Ming², CAO Zhi-an³, ZHANG Jian³

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Yongcheng Coal & Electricity Holding Group Co., Ltd., Yongcheng, Henan 476600, China)

Abstract: Due to the phasic and continuous rheology of soft rock, failure of surrounding rock and supports of soft rock roadway usually happened. Based on the analysis of interaction effect between roof and support and bottom, the support principle of yielding support with whole section and O-shape control is proposed for the large deformation roadway in deep soft rock. Firstly, the roadway in deep soft rock should be supported with whole section and high strength to control initial deformation. Meanwhile, effective measures releasing pressure of surrounding rock with whole section properly, surrounding rock of roadway would be controlled to good stability, making sure that the soft rock roadway could be controlled coordinately and consistently. Through the mechanical model, relations of plastic zone and surface displacement of the soft rock roadway with supporting force are calculated; the relationship between surrounding rock deformation and support force is negative. Engineering practice showed that the large deformation of roadway in deep soft rock could be controlled efficiently with this support principle. Research results have a good value to similar engineering.

Key words: soft rock roadway; deformation effect between roof and support and bottom; yielding support with whole section; O-shape control; engineering practice

1 引 言

软岩巷道支护问题一直是困扰煤矿生产和建设的重大难题之一^[1-4], 随着我国新生代煤田的开采及老矿井采深的增加, 软岩煤矿的数量和分布范

围将会继续增加和扩大。软岩本身所具有的大变形力学特性, 决定了软岩巷道支护技术的复杂性, 单一的支护形式和短期的支护思想难以满足软岩巷道工程支护的需要^[5-12]。软岩巷道变形破坏是一个系统工程, 一方的变形破坏就会影响到另一方的稳定

收稿日期: 2013-04-23

基金项目: “青蓝工程”资助; 江苏省优势学科建设平台资助项目(No. SZBF2011-6-B35); 中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2014ZDPY22)。
第一作者简介: 高明仕, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事巷道围岩控制、冲击矿压灾害防治方面的研究工作。E-mail: cumt_gms@163.com

性,因此,应该系统考虑软岩巷道围岩的稳定性,关于这方面的研究还不是很深入。

论文在分析巷道顶、帮、底相互作用效应的基础上,针对软岩巷道强流变四周均表现出大变形的破坏特征,提出了全断面、全支全让O型封闭控制的支护原理,对软岩巷道围岩塑性区范围和表面位移与支护力的作用关系进行了分析计算,得出了巷道围岩变形破坏与支护力的负相关关系,并在实践中得以成功应用。

2 软岩巷道顶、帮、底相互作用效应

理论研究和实践表明^[13-17]:巷道围岩中,顶板、巷帮和底板岩层中任何一部分的力学性质发生变化都会导致其他两部分的显著变化,从对三者之间相互作用效应的分析来看,这三者相互作用的效果是不同的,具体表现为:顶板对帮和底的影响是最小的,而底板对顶和帮的影响程度最大,因而,它们三者围岩系统稳定过程中所起的作用也是不同的,其中底板是围岩稳定的关键条件,巷帮是围岩稳定的重要条件,顶板是围岩稳定的必要条件。顶、帮、底相互作用的实质是由于顶、帮、底三者之间力学性质的相对性引起巷道断面发生变化而表现出来的围岩变形破坏现象。软岩巷道顶板、两帮及底板岩层变形特征及相互稳定性效应如图1所示,由此可见,软岩巷道围岩变形控制应做到顶、帮、底围岩整体性、支护结构的整体性,使支护与围岩共同组成整体承载结构,实现顶、帮、底全断面的O型控制。

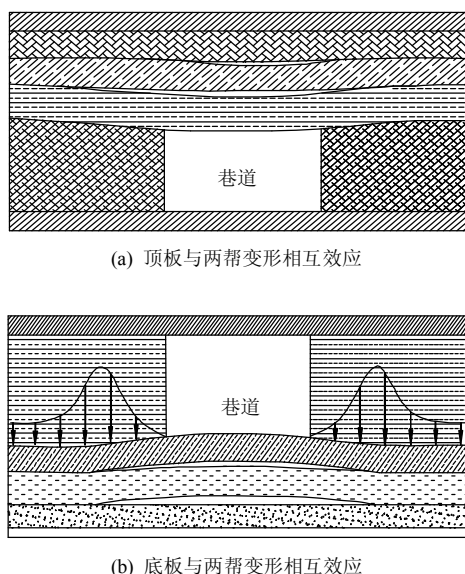


图1 软岩巷道顶板和两帮及底板岩层变形效应特征
Fig.1 Deformation effect on roof and supports and floor of soft rock roadway

3 软岩巷道全支全让O型控制技术原理

针对深部软岩大变形巷道帮、顶、底相互作用效应和支护力的作用研究,特提出全支全让O型控制的支护原理,其主要内涵为:

全支全让:在实行全断面强力支护的同时,进行全断面的让压应力调整,在高强度支护控制围岩初期卸荷碎胀扩容变形的基础上,适应围岩的绝对卸荷变形,适当进行让压,一方面抑制了初期变形,一方面释放高应力,将围岩变形能适当转移和释放。同时保护了支护系统,避免支护系统过早地破坏或失效。实现手段:①全支:对顶帮实施锚杆、锚索支护,对底板则采用注浆加固;②全让:顶帮让压锚索支护、底板卸压槽。

O型控制:通过全断面的围岩支护和全断面都具有的让压性能,实现巷道全断面的变形控制,而且不留空余和死角,实现全方位、全断面封闭式的高强支护和让压性能,实现全封闭式的变形控制,形象地称之为O型控制。

巷道开挖后围岩应力急速调整、重新分布,围岩强度也随之发生弱化^[18],表现出来的就是巷道围岩的扩容变形以及阶段性的流变效应。因此,对巷道四周施加高强度的支护阻力 p_i ,同时带有适当的让压性能以便围岩碎胀扩容压力的适时转移;待卸压一段时间后继续施加高强度、高刚度的支护阻力,同时对围岩全断面进行注浆密实加固,巷道表面的切向应力 σ_t 明显外移,原来巷道浅部的破裂区A和塑性区B的强度都大大提高,共同形成固化的、具有一定厚度和强度的承载结构,维护巷道围岩的长期整体稳定性。

软岩巷道顶帮底全支全让O型控制力学模型如图2所示。

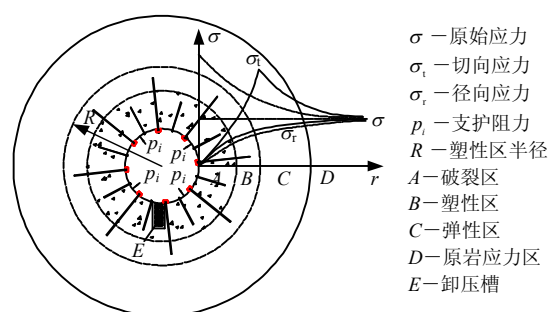


图2 巷道顶、帮、底全支全让O型控制支护原理力学模型
Fig.2 Mechanical model of support principle of yielding support for full section echelon support and O-shape control

4 巷道围岩塑性区范围及位移与支护力的关系

4.1 塑性区范围求解

建立支护作用下巷道围岩应力状态模型, 如图 3 所示, $\sigma = \gamma H$, γ 为岩石的重度, $\gamma = \rho g$, H 为巷道埋深; μ 为岩石的泊松比; r_0 为巷道半径; p 为支护力。

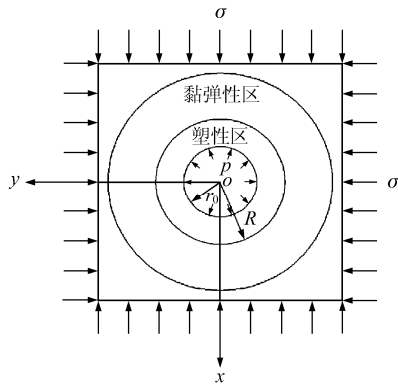


图 3 支护力作用下巷道围岩塑性区计算模型
Fig.3 Plastic zone analysis model of surrounding of roadway under supporting

根据弹塑性力学, 塑性区内的静力平衡条件为

$$r \frac{d\sigma_r^p}{dr} + \sigma_r^p - \sigma_\theta^p = 0 \quad (1)$$

根据摩尔-库仑准则, 塑性区的极限平衡条件为

$$\sigma_\theta^p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_r^p + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中: c 、 φ 分别为围岩体的黏聚力和内摩擦角。

根据式 (1)、(2) 求解得

$$\sigma_r^p + c \cot \varphi = Ar^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (3)$$

由图 3 模型可知, 塑性区边界条件变为, 当 $r = r_0$ 时, $\sigma_r^p = p$, 将其代入式 (3), 得

$$A = (c \cos \varphi + p) / r_0^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 得

$$\sigma_r^p = (c \cos \varphi + p) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (2) 得

$$\sigma_\theta^p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left[(c \cos \varphi + p) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right] - c \cot \varphi \quad (6)$$

根据 $\sigma_r^p + \sigma_\theta^p = 2\sigma$ 求解得

$$R = r_0 \left[\frac{(\sigma + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi + p} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (7)$$

式 (7) 即为图 3 中有支护力条件下巷道围岩的塑性区半径范围。

4.2 巷道表面位移求解

为了对巷道围岩变形状态进行分析, 进行了三轴蠕变压缩试验。选择西原模型作为理论分析的流变模型, 如图 4 所示。

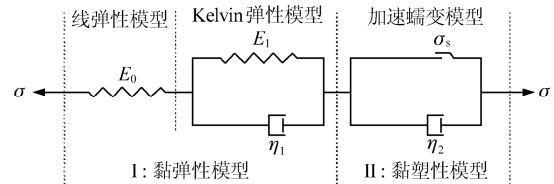


图 4 巷道围岩流变的西原模型
Fig.4 Nishihara model of roadway surrounding rock rheology

该模型的本构关系为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right) & (\sigma \leq \sigma_s) \\ \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t & (\sigma > \sigma_s) \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_0 、 E_1 分别为理想线弹性模型和 Kelvin 模型的弹性模量; η_1 、 η_2 分别为 Kelvin 模型和加速蠕变模型的黏滞系数; σ_s 为岩样的屈服应力

根据黏弹性力学知识, 黏弹性区围岩变形是在弹性变形的基础上进行拉普拉斯逆变换得到的。

应力、位移的弹性解为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^e &= \frac{\sigma R^2 \sin \varphi - c R^2 \cos \varphi}{r^2} + \sigma \\ \sigma_\theta^e &= -\frac{\sigma R^2 \sin \varphi - c R^2 \cos \varphi}{r^2} + \sigma \\ \tau_{r\theta}^e &= \tau_{\theta r}^e = 0 \\ u_r^e &= \frac{1}{2G} \left[-\frac{\sigma R^2 \sin \varphi - c R^2 \cos \varphi}{r} + (1 - 2\mu) \sigma r \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: G 为围岩剪切模量。

在本构关系的基础上, 将式 (9) 第 4 式进行拉普拉斯逆变换得到巷道围岩黏弹性区的位移表达式为

$$u_r^{e'} = \frac{\sigma}{2r\eta_1 E_0} \left[(E_0 - E_1 + \eta_1) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} + E_1 \right] [R^2 \sin \varphi + r^2 (1 - 2\mu)] + \left[\frac{R^2 c \cos \varphi}{2r E_0} \frac{E_0 + \eta_1}{E_1 + \eta_1} + \frac{E_1}{\eta_1} e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right] \quad (10)$$

对于塑性区岩体,在变形过程中会出现膨胀即扩容现象,那么在塑性区某点处的两个应变 ε_r^p 和 ε_θ^p 存在关系:

$$\frac{\varepsilon_r^p}{\varepsilon_\theta^p} = \mu' \quad (11)$$

在巷道的内边界 $r=r_0$ 处,显然有 $\mu_0'=1$,根据试验及参考文献,岩体扩容与该处的应力有关,并且规定在弹性交界处有

$$\mu' = \frac{1}{2}(\mu_0' + \mu_R') = 1 - \frac{\sigma - \sigma_R^e}{2(1-\mu)\sigma - \sigma_R^e} \quad (12)$$

式中: σ_R^e 为黏弹性区与塑性区交界处径向应力大小。

根据塑性区几何方程

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r^p &= \frac{du_r^p}{dr} \\ \varepsilon_\theta^p &= \frac{u_r^p}{r} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

解得

$$u_r^p = \frac{\gamma H r_0 \left\{ \left[\frac{(\gamma H + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi + p} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}} \left\{ \frac{1 + \frac{\gamma H - \sigma_R^e}{2(1-\mu)\gamma H - \sigma_R^e}}{2} \right\} \sin \varphi + \gamma H r_0 (1 - 2\mu) \right\}}{2\eta_1 E_0} \left[(E_0 - E_1 + \eta_1) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} + E_1 \right] + \frac{r_0 \left\{ \left[\frac{(\gamma H + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi + p} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}} \left\{ \frac{1 + \frac{\gamma H - \sigma_R^e}{2(1-\mu)\gamma H - \sigma_R^e}}{2} \right\} c \cos \varphi \right\}}{2E_0} \left[\frac{E_0 + \eta_1}{E_1 + \eta_1} + \frac{E_1}{\eta_1} e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right] \quad (17)$$

由以上推导分析可知,影响软岩大断面巷道围岩变形破坏的关键因素除了巷道围岩自身的力学性质外,主要与巷道开挖断面,即半径 r_0 及支护力 p 有关。因此,在其他因素一定的条件下,随着巷道半径 r_0 的增加(断面的增大),巷道围岩变形一定大幅度增大;而随着支护力的增大,巷道围岩塑性区范围减小,即巷道围岩变形破坏与支护力呈负相关。

由式(17)可以得到,在时间 $t=\infty$ 时,巷道围岩变形量 u_r^p 与支护力 p 之间的关系。通过计算可得,控制变形量 u_r^p 分别为100、200、300、500、935 mm时,其支护 p 分别为642、403、221、126、0 kPa。两者之间的关系曲线如图5所示。

因此,对软岩大变形巷道应进行全断面高强支护力作用,及早有效控制巷道围岩变形破坏和塑性区范围。

$$u_r^p = \beta r^{\mu'} \quad (14)$$

式中: β 为常数。根据位移边界条件 $u_R^p = u_R^e$,求解得

$$\beta = \frac{\sigma}{2r\eta_1 E_0 R^{\mu'}} \left[(E_0 - E_1 + \eta_1) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} + E_1 \right] \cdot [R^2 \sin \varphi + r^2(1 - 2\mu)] + \frac{R^2 c \cos \varphi}{2rE_0 R^{\mu'}} \left[\frac{E_0 + \eta_1}{E_1 + \eta_1} + \frac{E_1}{\eta_1} e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right] \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)得

$$u_r^p = \frac{\sigma r^{\mu'}}{2r\eta_1 E_0 R^{\mu'}} \left[(E_0 - E_1 + \eta_1) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} + E_1 \right] \cdot [R^2 \sin \varphi + r^2(1 - 2\mu)] + \frac{R^2 c \cos \varphi r^{\mu'}}{2rE_0 R^{\mu'}} \left[\frac{E_0 + \eta_1}{E_1 + \eta_1} + \frac{E_1}{\eta_1} e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right] \quad (16)$$

在 $r=r_0$ 处为巷道径向位移显现,即

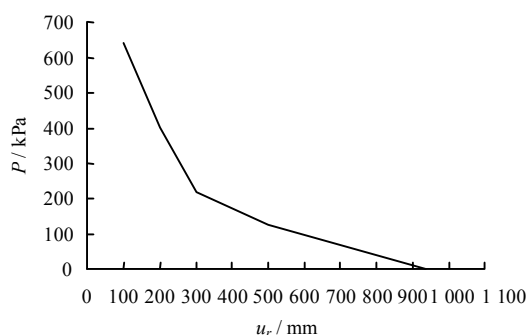


图5 $t=\infty$ 时 u_r^p 与 p 关系曲线

Fig.5 Relation curve of u_r^p and p in $t=\infty$

5 工程实践

5.1 试验巷道地质条件

车集煤矿28轨道下山设计长度为738.59 m,服务年限为41 a,标高为-810~1 060 m,巷道岩

性多为泥岩、页岩和砂质泥岩等互层,属于典型的深部高应力大变形巷道。

5.2 支护方案和参数

巷道断面形状为直墙半圆拱,巷宽为 4.2 m,墙高为 1.5 m,拱高为 2.1 m,断面面积为 13.2 m²,具体设计:

(1) 初喷:掘巷成型达到设计要求,敲帮问顶后即进行喷浆,喷浆前应处理活矸,及时喷射混凝土封闭围岩。混凝土配比(重量比)为水泥:砂:石子:水=1.0:2.0:2.0:0.6,喷浆前必须清洗岩面,喷层厚度为 20~30 mm。喷层起临时支护作用,同时喷层也是柔性的,起到了较好的让压性能。

(2) 顶帮锚杆:从顶板正中位置开始,依次向两侧全断面布置锚杆(700 mm×700 mm)配合钢筋网联合支护,采用托盘固定,锚杆规格为 $\Phi 20$ mm×2 500 mm,钢筋网采用 $\Phi 6.5$ mm 钢筋焊制而成(网孔 70 mm×70 mm)。两帮锚杆间、排距均为 700 mm,锚杆预紧力不低于 50 kN,锚固力不低于 200 kN。

(3) 控底锚杆:在帮与底角交界处施工专用的底角控底锚杆,向下 30°左右施工钻眼安装,并压住帮部钢筋网。

(4) 顶锚索:巷道顶板采用 3 根预应力钢绞线让压锚索配双托盘支护,钢绞线规格为 $\Phi 17.8$ mm×7 500 mm,3 根让压锚索间距为 2 000 mm,排距为 1 400 mm。让压锚索预紧力不低于 100 kN,锚固力不低于 250 kN。

(5) 帮锚索:巷道两帮分别采用 2 根让压锚索加强支护。巷道两侧最下根让压锚索向下斜带 30°~45°布置,另两根让压锚索向上斜带 10°~15°布置。两帮让压锚索间距为 1 100 mm,最下一根让压锚索距离底板 200 mm。

(6) 巷道底板:沿巷道走向,在巷道中央,挖宽为 500 mm,深为 2 m 的卸压槽,待卸压完毕,采用水泥回填封闭卸压槽。

(7) 帮底注浆:帮底采用自固式注浆锚杆进行加固,巷道两帮分别布置 2 根,两帮最下面一个注浆锚杆斜向下 30°左右布置,另外 2 根垂直岩面布置,底板布置 2 根,靠帮 1 000 mm 处施工钻眼,锚杆斜向下 30°左右布置。帮底注浆锚杆加固参数:每排 6 套锚杆,排距为 1 400 mm。

上述支护参数设计中分别体现了全支全让 O 型控制的支护原理:

全支全让:①全断面支护:顶帮围岩锚杆锚索强力支护,底板滞后一定时间注浆加固支护;②全断面让压:初喷喷层柔性让压,顶帮采用锚索让压

装置实现让压作用,底板卸压槽实现及时让压作用。

O 型控制:顶、帮、底都进行支护和让压,实现了巷道围岩全断面封闭式整体支护,即 O 型控制。具体支护如图 6 所示。

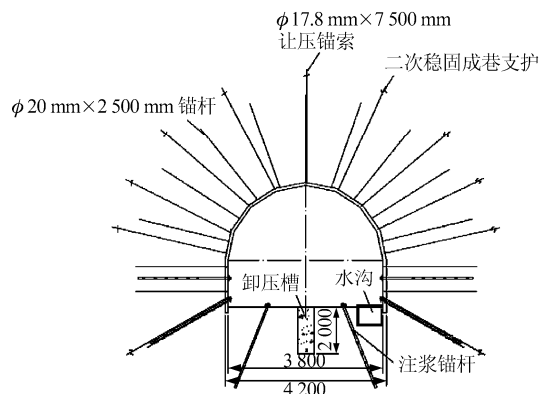
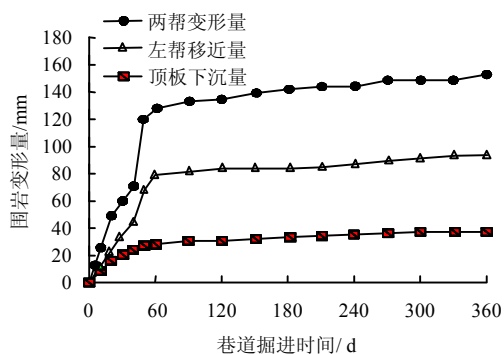


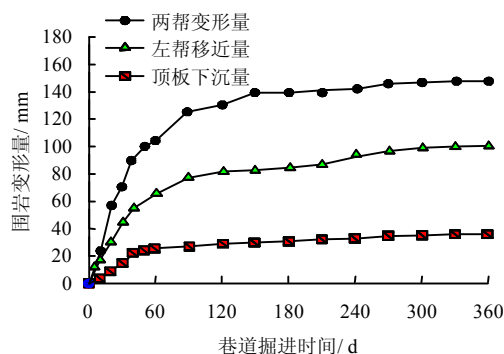
图 6 全支全让 O 型控制支护参数(单位: mm)
Fig.6 Parameters of yielding support for full section and O-shape control (unit: mm)

5.3 巷道维护实际效果

巷道围岩变形量规律如图 7 所示,从巷道变形观测数据可以看出,巷道在掘进后 7 d 以内,顶板下沉速度和两帮相对移近速度都比较大,巷道表面



(a) 测站 1

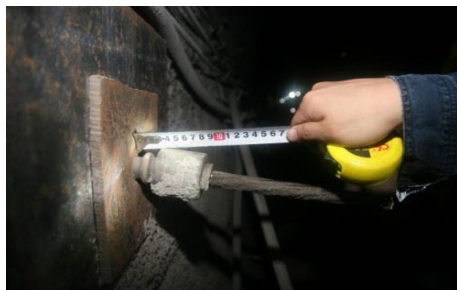


(b) 测站 2

图 7 巷道围岩变形量

Fig.7 Displacements of the roadway surrounding rock

位移急剧增大; 15 d 以后, 围岩移近速度变慢, 巷道表面位移缓慢增加; 锚索附带的让压装置收缩变形近 25 mm (见图 8(a))。1 a 后, 试验巷道两帮变形量为 153 mm, 顶板下沉量为 38 mm, 巷道围岩变形得以有效控制。巷道整体支护效果如图 8(b)所示。



(a) 锚索让压



(b) 整体成巷

图 8 28 采区二联巷支护效果照

Fig.8 Photographs of support effect in the second connecting roadway in mining area 28

6 结 论

(1) 软岩巷道顶板、巷帮和底板岩层中任何一部分的力学性质发生变化都会导致其他两部分的显著变化, 三者围岩系统稳定过程中所起的作用不同, 软岩巷道围岩稳定性要做到全断面整体性控制。

(2) 分析了深部软岩巷道强流大变形成特征及其关键影响因素, 提出了软岩巷道全断面全支全让 O 型控制的技术原理, 强调开挖初期就要对软岩巷道顶、帮、底全断面进行强力支护, 同时全断面又适时让压, 达到对软岩巷道的整体性和协调性控制。通过力学分析计算, 得出巷道围岩变形破坏与支护力呈负相关性。

(3) 工程实践表明, 采用该支护原理在试验巷道初期, 锚索附带的让压装置收缩变形近 25 mm; 1 a 后两帮变形量为 153 mm, 顶板下沉量为 38 mm, 巷道整体支护效果良好。研究成果对类似深井软岩巷道稳定性控制有一定的参考和借鉴价值。

参 考 文 献

- [1] 柏建彪, 王襄禹, 姚喆. 高应力软岩巷道耦合支护研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 421—425.
BAI Jian-biao, WANG Xiang-yu, YAO Zhe. Study of coupling support in soft rock roadway under high stress[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(4): 421—425.
- [2] 王连国, 张健, 李海亮. 软岩巷道锚注支护结构蠕变分析[J]. 中国矿业大学学报, 2009, (9): 608—612.
WANG Lian-guo, ZHANG Jian, LI Hai-lian. A creep analysis of a bolt-grouting support structure within a soft rock roadway[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, (9): 608—612.
- [3] 高明仕, 张农, 张连福, 等. 伪硬顶高地压水患巷道围岩综合控制技术及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (21): 3996—4002.
GAO Ming-shi, ZHANG Nong, ZHANG Lian-fu, et al. Synthetical control technique and engineering application in the roadway with false-hard roof high surrounding pressure and water disturbing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, (21): 3996—4002.
- [4] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233—1238.
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application to deep roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(12): 1233—1238.
- [5] 李大伟. 软岩巷道锚喷支护破坏分析与对策[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, (6): 641—646.
LI Da-wei. Failure analysis and countermeasure of bolt shotcrete support for soft rock roadway[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2007, (6): 641—646.
- [6] 常庆粮, 周华强, 李大伟, 等. 软岩破碎巷道大刚度二次支护稳定原理[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 169—177.
CHANG Qing-liang, ZHOU Hua-qiang, LI Da-wei, et al. Stability principle of extremely rigid secondary support of soft and broken rock roadway[J]. *Journal of Mining and*

- Safety Engineering**, 2007, 24(2): 169—177.
- [7] 陈卫忠, 谭贤君, 吕森鹏, 等. 深部软岩大型三轴压缩流变试验及本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1735—1744.
- CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, LÜ Sen-peng, et al. Research on large-scale triaxial compressive rheological test of soft rock in depth and its constitutive model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1735—1744.
- [8] 范庆忠. 岩石蠕变及扰动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 216—219.
- FAN Qing-zhong. Experimental study of creep and its disturbed effect of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 216—219.
- [9] 崔希海, 李进兰, 牛学良, 等. 岩石扰动流变规律和本构关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1875—1881.
- CUI Xi-hai, LI Jin-lan, NIU Xue-liang, et al. Experimental study of rheological regularity and constitutive relationship of rock under disturbing loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1875—1881.
- [10] 李刚, 梁冰. 水影响下软岩巷道变形规律及其控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 219—221.
- LI Gang, LIANG Bing. Deformation laws of roadway in soft rock under effect of water and its control[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)**, 2009, 28(1): 219—221.
- [11] 陈士林, 钱七虎, 王明洋. 深部坑道围岩的变形与承载能力问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2203—2204.
- CHEN Shi-lin, QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang. Problems of deformation and bearing capacity of rock mass around deep buried tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2203—2204.
- [12] 付志亮, 牛学良, 宁伟, 等. 海域第三系软岩巷道蠕变控制及支护机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(7): 1192—1207.
- FU Zhi-liang, NIU Xue-liang, NING Wei, et al. Study on creep control and supporting mechanism of tertiary soft rock roadways in the sea[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(7): 1192—1207.
- [13] 袁得江. 软岩巷道顶帮底相互作用效应及其控制技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- [14] 俞文生, 平洋. 基于黏弹性本构性能的隧道围岩变形预测研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 35—41.
- YU Wen-sheng, PING Yang. Research on deformation forecasting of tunnel surrounding rock based on viscoelastic constitutive behavior[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 35—41.
- [15] 孙闯, 张向东, 李永靖. 高应力软岩巷道围岩与支护结构相互作用分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2601—2607.
- SUN Chuang, ZHANG Xiang-dong, LI Yong-jing. Analysis of interaction between surrounding rock and support structure in high stressed soft rock roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2601—2607.
- [16] 黄兴, 刘泉声, 乔正. 朱集矿深井软岩巷道大变形机制及其控制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 827—834.
- HUANG Xing, LIU Quan-sheng, QIAO Zheng. Research on large deformation mechanism and control method of deep soft roadway in Zhuji coal mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 827—834.
- [17] 潘贵豪, 明世祥, 刘新强, 等. 高应力软岩巷道支护新理论及应用研究[J]. 湖南科技大学学报, 2009, 24(3): 11—15.
- PAN Gui-hao, MING Shi-xiang, LIU Xin-qiang, et al. Research on new supporting theory of high-stress soft rock drift and its application[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology**, 2009, 24(3): 11—15.
- [18] 张农, 侯朝炯, 杨米加, 等. 巷道围岩强度弱化规律及其应用[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 133—135.
- ZHANG Nong, HOU Chao-jiong, YANG Mi-jia, et al. Law of rock strength weakening around roadway and its application[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1999, 28(3): 133—135.