

深部巷道围岩破碎区及裂隙区分布及其 支护控制

徐向东¹, 李青锋^{2*}, 唐湘隆³

(1. 山西霍尔辛赫煤业有限责任公司, 山西 长治 046600; 2. 湖南科技大学 矿业工程研究院, 湖南 湘潭 411201;
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 深部巷道在高应力作用下不可避免地存在围岩破碎区和裂隙区, 分析其形成机理对于巷道围岩控制具有重要的理论指导意义. 首先根据承压平衡理论静力分析了挤压平衡圈形状以及挤压平衡圈形状轮廓轴比与侧压比的关系; 然后分析了不同侧压比下的深部巷道围岩应力弹性解和塑性解, 并据此分析了塑性区及延性岩裂隙区的分布; 最后进行了围岩变形分析, 并在分析围岩塑性变形基础上提出了深部巷道围岩控制的主要措施. 结果表明, 深部巷道应合理地设计巷道宽高轴比, 避免围岩破碎区域化和塑性区分布奇异化; 围岩强度弱化对围岩塑性区宽度有增大的趋势, 在支护控制时应在围岩破碎区域化和塑性区分布奇异化上针对性选择控制措施, 在变形控制上应以控制围岩碎胀变形为主.

关键词: 深部巷道; 破碎区; 裂隙区; 支护控制

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2018)01-0011-08

On Support Control in Deep Roadway about Distribution of Surrounding Rock Broken Zone and Fracture Area

Xu Xiangdong¹, Li Qingfeng², Tang Xianglong³

(1. Huoerxinhe Coal Industry Co. Ltd., Changzhi 046600, China;

2. Institute of Mineral Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Influenced by high geostress, the crushing zones and cracking zones of surrounding rock are inevitably existed in the deep mining roadway. Thus, the analysis of its formation mechanism has a vital theoretical guiding significance for the control of roadway's surrounding rock. Firstly, according to the theory of pressure balance, the shape of the extrusion balance ring, the relation between ratio of shape to profile and ratio of lateral pressure of extrusion balance ring are analyzed. Then the stress elastic solution and plastic solution of surrounding rock in deep roadway under different lateral pressure ratio are analyzed, while based on the above results, the distribution of plastic zone and ductile fracture zone is also calculated. Finally, the deformation analysis of surrounding rock has been carried out, and the main measures for controlling the surrounding rock of deep roadway is put forward based on the analysis of plastic deformation of surrounding rock. Based on these results, we know that the axial of the width and height should be rationally designed in deep roadway, and we should avoid the fragmentation of surrounding rock and the singularity of surrounding rock's plastic zone distribution. The weak of surrounding rock strength is, the increasing effect on the width of surrounding rock's plastic zone will be. In support control, measures should be taken to control the fragmentation of surrounding rock

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 湖南省自然科学基金面上资助项目(2018JJ2130); 国家自然科学基金面上资助项目(51374104)

* 通信作者, E-mail: liqingfeng0712@163.com

and the singularity of plastic zone. Deformation control should be focused on the control of the bulking deformation of surrounding rock.

Keywords: deep mining roadway; crushing zones; cracking zones; support control

在地下固体资源开采过程中不可避免地要进行巷道的掘进,目前巷道的形状主要有圆形、椭圆形、圆拱形和矩形^[1].相关研究认为^[2-5]:随着垂直应力、侧压系数和巷道形状的不同,巷道围岩的应力分布也不同,并在巷道周边形成塑性区,塑性区内围岩由表面向内部破坏程度依次减弱,对应松散破碎区(可能出现)、塑性流动区、塑性软化区和塑性强化区.塑性软化区内裂隙张开未连通,塑性流动区裂隙扩散并连通,塑性软化区、塑性流动区统称为裂隙区,由松散破碎区、裂隙区组成的区域也称之为传统意义上的围岩松动圈.

在浅部或较浅部、无构造应力条件下,围岩稳定性主要从确定合理的巷道宽高轴比考虑.于学馥的轴变论认为^[6]:合理的巷道宽高轴比应根据巷道方向确定,它等于地应力作用在巷道横断面上两主应力分量的比值,最稳定的轴比位于巷道纵轴与地应力最大主应力方向一致的横断面上.于学馥也认为^[7]:围岩破坏首先从应力超过岩体强度处开始,巷道在破坏过程中改变了轴比关系,同时改变应力分布状态,从而使围岩中的高应力下降,低应力升高,并向均匀分布状态发展,应力均匀分布时围岩内的最大应力值变为最小,并不出现拉应力,这时它的形状是椭圆形;在非均质和受结构面控制的岩体中,围岩稳定的形状轮廓似椭圆形;防止围岩出现冒落体和松动地压是维护围岩稳定的主要技术措施.

深部巷道围岩松散破碎区的力学状态为散体,不能采用连续介质力学方法分析.而裂隙扩散区和裂隙宽张开区的力学状态处于塑性流动和塑性软化,为便于围岩稳定性分析,将塑性流动区和塑性软化区在一定假设条件下按连续介质的塑性力学理论进行分析.

1 松散破碎区的分布规律

松散破碎区岩体一般呈碎块状,杂乱无章,只有锚杆等支护结构的给定力作用下相互挤压并将给定力传递给裂隙区.对于破碎区与裂隙区交界面,由于支护结构给定力传递到交界面的法向挤压力相对于围岩压力可忽略不计,一般认为在一定静力条件下,裂隙区内岩体处于承压平衡拱状态,类似于砌体挤压拱.假设围岩为均质、各向同性,取水平应力与垂直应力之比为 λ ,在垂直应力 q ,水平应力 λq 作用下,深部矩形巷道的围岩内部形成挤压平衡圈,挤压平衡圈与巷道表面之间形成松散破碎区如图1a所示.挤压平衡圈为椭圆,其力学计算简图如图1b.

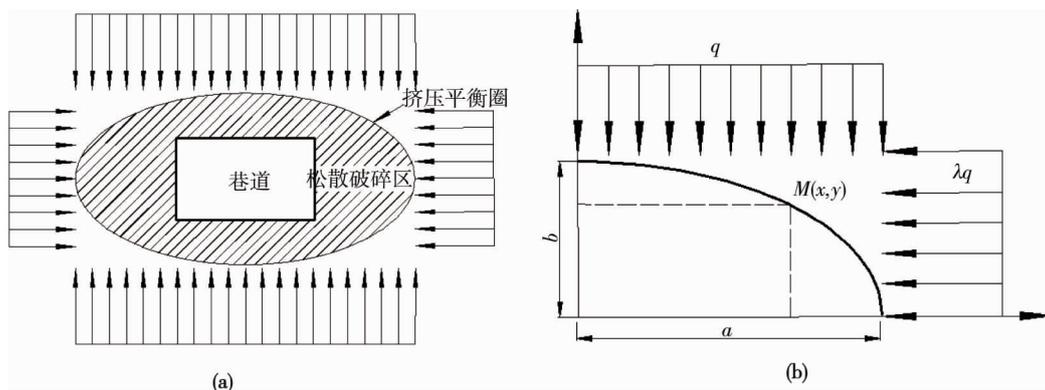


图1 挤压平衡圈力学模型简化图

挤压平衡圈岩体力学平衡的条件是平衡圈任意截面上只有轴向压力而无剪力和弯矩,对1/4挤压平衡圈中任意一点 $M(x,y)$ 取矩,则有:

$$\lambda qb(b-y) + \lambda qb\left(y - \frac{b}{2}\right) = qa(a-x) + qa\left(x - \frac{a}{2}\right). \quad (1)$$

即有 $a = \sqrt{\lambda}b$, 说明挤压平衡圈形状轮廓为轴比(高与宽之比)为 $1/\sqrt{\lambda}$ 的椭圆.

2 合理的巷道宽高轴比及其围岩应力

2.1 合理的巷道宽高轴比

对于浅部或较浅部、无构造应力条件下的巷道围岩,因应力水平不高,巷道宽高轴比选择不当对围岩稳定性控制影响不大.而对于深部巷道的围岩稳定性控制,控制合理的巷道宽高轴比非常有必要.同样假设围岩为均质、各向同性、线弹性,且在垂直应力 q , 水平应力 λq 作用下,由弹性力学可知长轴为 $2a$, 短轴为 $2b$ 的椭圆巷道周边切向应力的计算公式为

$$\sigma_{\theta} = \frac{q}{a-b} \left[\frac{4ab(a-\lambda b)}{(a^2+b^2) - (a^2-b^2)\cos(2\theta)} + (a+b)(\lambda-1) \right]. \quad (2)$$

式中: θ 为极角; σ_{θ} 为椭圆巷道周边切向应力.

据文献[8]可知,最稳定轴比的巷道周边应力是均匀分布的.此时的巷道轴比(高与宽之比)为 $1/\lambda$, 巷道周边应力恒为 $(\lambda+1)q$. 而挤压平衡圈轴比(高与宽之比为 $1/\sqrt{\lambda}$)巷道的周边应力为

$$\sigma_{\theta} = q \left[\lambda + 1 + 2\sqrt{\lambda} - \frac{4\lambda}{(\lambda+1) - (\lambda-1)\cos(2\theta)} \right]. \quad (3)$$

由式(3)可知, $\lambda > 1$ 时按挤压平衡圈轴比设计的椭圆形巷道的周边应力最小值、最大值分别为 $1-\lambda+2\sqrt{\lambda}$, $\lambda-1+2\sqrt{\lambda}$, 此时满足巷道周边无拉应力的 $\lambda < 3+2\sqrt{2}$; $\lambda < 1$ 时按挤压平衡圈轴比设计的椭圆形巷道的周边应力最小值、最大值分别为 $\lambda-1+2\sqrt{\lambda}$, $1-\lambda+2\sqrt{\lambda}$, 此时满足巷道周边无拉应力的 $\lambda > 3-2\sqrt{2}$. 显然, $3-2\sqrt{2} < \lambda < 3+2\sqrt{2}$ 时以挤压平衡圈轴比设计的椭圆形巷道的周边应力无拉应力.

2.2 围岩应力弹性解

对于长轴为 $2a$, 短轴为 $2b$ 的椭圆,令 $R_0 = (a+b)/2$, $m = (a-b)/(a+b)$, $\zeta = \rho(\cos\theta + i\sin\theta)$, 通过保角映射变换函数 $x + iy = z = R_0\left(\frac{1}{\zeta} + m\zeta\right)$ 可将椭圆映射到单位圆,则由弹性力学可得在垂直应力 q , 水平应力 λq 作用下,椭圆巷道围岩应力弹性解如式(4):

$$\sigma_{\theta} + \sigma_{\rho} = q \frac{(1+\lambda)\rho^4 + 2(1-\lambda)\rho^2\cos(2\theta) - m^2(1+\lambda) - 2m(1-\lambda)}{\rho^4 - 2m\rho^2\cos(2\theta) + m^2}. \quad (4)$$

式中: σ_{ρ} 为椭圆巷道周边径向应力.

所以最稳定轴比椭圆巷道的围岩应力弹性解如式(5):

$$\begin{cases} \sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} = (\lambda+1)q; \\ \sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = (\lambda+1)q\rho^2 \frac{[(\lambda-1)^2 + (\lambda+1)^2]\rho^4 - (\lambda^2-1)\rho^2\cos(2\theta)(1+\rho^4)}{(\lambda-1)^2\rho^8 + (\lambda+1)^2\rho^4 - 2(\lambda^2-1)\rho^2\cos 2\theta}; \\ \tau_{\rho\theta} = (\lambda+1)q\rho^2 \frac{(\lambda^2-1)\rho^2\sin(2\theta)(1-\rho^4)}{(\lambda-1)^2\rho^8 + (\lambda+1)^2\rho^4 - 2(\lambda^2-1)\rho^2\cos(2\theta)}. \end{cases} \quad (5)$$

而挤压平衡圈轴比的椭圆巷道的围岩应力弹性解如式(6):

$$\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} = (\lambda+1)q + \frac{4\sqrt{\lambda}(\lambda+1) - 4\sqrt{\lambda}(\lambda-1)\rho^2\cos(2\theta) - 8\lambda}{(\sqrt{\lambda}+1)^2\rho^4 - 2(\lambda-1)\rho^2\cos(2\theta) + (\sqrt{\lambda}-1)^2}q. \quad (6)$$

2.3 最稳定轴比和挤压平衡圈轴比的塑性区分布

塑性区内的最大主应力 σ_1 , 最小主应力 σ_3 满足静力平衡方程和极限平衡条件, φ 为内摩擦角, 可知:

$$r \frac{d\sigma_3}{dr} + \sigma_3 - \sigma_1 = 0; \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (8)$$

若 $r=r_1$ 时 $\sigma_r = \sigma_3 = p_j$, 且假设岩体不产生塑性软化, 则

$$\sigma_3 = (p_j + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi; \quad (9)$$

$$\sigma_1 = (p_j + c \cot \varphi) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi. \quad (10)$$

联立式(9)和式(10)可知:

$$\sigma_1 + \sigma_3 = (p_j + c \cot \varphi) \frac{2}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 2c \cot \varphi. \quad (11)$$

在上述椭圆巷道围岩应力弹性解中将椭圆映射到单位圆, 则在此保角映射中 r 对应于 $1/\rho$, r_1 对应于 1, 即在弹性区与塑性区交界面, 对于最稳定轴比椭圆巷道有:

$$(p_j + c \cot \varphi) \frac{2}{1 - \sin \varphi} (1/\rho)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 2c \cot \varphi = \sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_\rho + \sigma_\theta = (\lambda + 1) q. \quad (12)$$

反解式(12)可求得 ρ 的表达式为

$$\rho = \left\{ \frac{[(\lambda + 1) q + 2c \cot \varphi] [1 - \sin \varphi]}{2(p_j + c \cot \varphi)} \right\}^{\frac{\sin \varphi - 1}{2 \sin \varphi}}. \quad (13)$$

据文献[6,7]可知, 最稳定轴比椭圆巷道的塑性区边界仍然是椭圆, 且此时的巷道轴比(高宽之比)为 $1/\lambda$, 则 $\lambda = \frac{a}{b}$. 设椭圆塑性边界的宽、高分别为 $2A, 2B$, 则有 $A = \frac{a+b}{2} \left(\frac{1}{\rho} + m\rho \right)$, $B = \frac{a+b}{2} \left(\frac{1}{\rho} - m\rho \right)$, 式中 $m = (a-b)/(a+b)$, 取 $\rho = 0.5$, 可知此时最稳定轴比椭圆塑性区宽高轴比为

$$\frac{A}{B} = \frac{2 + 0.5 \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}}{2 - 0.5 \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}}. \quad (14)$$

取侧压系数 λ 为 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 1.00, 1.44, 1.69, 1.96, 2.25, 2.56 时, 最稳定轴比椭圆塑性区宽高轴比 A/B 分别为 0.66, 0.76, 0.85, 0.86, 1.00, 1.09, 1.14, 1.18, 1.21, 1.25. 由数据可知, 随着侧压系数 λ 的增大, 最稳定轴比椭圆巷道塑性区的宽高轴比也随之增大, 其长轴方向与最大主应力方向保持一致, 短轴方向与最小主应力方向一致.

对于挤压平衡圈轴比椭圆巷道同理有:

$$(p_j + c \cot \varphi) \times \frac{2}{1 - \sin \varphi} \times (1/\rho)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 2c \cot \varphi = (\lambda + 1) q + \frac{4\sqrt{\lambda}(\lambda + 1) - 4\sqrt{\lambda}(\lambda - 1)\rho^2 \cos(2\theta) - 8\lambda}{(\sqrt{\lambda} + 1)^2 \rho^4 - 2(\lambda - 1)\rho^2 \cos(2\theta) + (\sqrt{\lambda} - 1)^2 \rho^2}. \quad (15)$$

为研究不同侧压系数 λ 情况下巷道周边塑性区分布情况及巷道周边位移情况, 取圆形巷道原始半径 2 m, 垂直应力 $q = 20$ MPa, 巷道周边支护强度 $p_j = 0.5$ MPa, 内聚力 $c = 6$ MPa, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 经 MATLAB 计算不同侧压系数 λ 值的情况下, 圆形巷道周边边界与塑性区边界情况如图 2 所示.

如图 2 所示. 相比最稳定轴比椭圆巷道的椭圆塑性区而言, 挤压平衡圈轴比巷道塑性区分布形状更具体多元化, 其塑性区分布形状和范围受侧压系数 λ 直接影响: 当 $\lambda = 1$ 时, 圆形巷道周边塑性区呈圆形分布, 其塑性区边界距巷表距离 0.4 m, 此时塑性区分布均匀且范围较小; 当 $\lambda = 1.44$ 时, 此时巷道两侧处发生

0.4 m 左右的横向拓展,巷道分布形状由圆形转为椭圆形分布,巷道周边塑性区同样发生 0.4 m 左右的拓展,其分布近似椭圆;当 $\lambda = 1.69$ 时,塑性区范围拓展较大,其分布形状由椭圆形分布转化为上下对称的圆拱形分布,此时巷道顶板中点距塑性区边界 1.5 m;当 $\lambda = 1.96$ 时,两帮塑性区发生贯通,巷道两侧塑性区距离巷表距离由 $\lambda = 1.69$ 时的 0.5 m 增至 2.0 m,巷道两帮位置塑性区陡增,出现局部“畸变”;当 $\lambda = 2.25$ 时,巷道周边继续发生拓展并依旧呈椭圆形分布,其顶底板塑性区形状由圆拱形分布转化为扇形分布,塑性区边界距巷道顶板中点位置约 2.5 m.当 $\lambda = 2.56$ 时,顶底板处塑性区分布由扇形两侧出现分支并逐渐往深部拓展,塑性区范围进一步扩大,两翼尖端处位置距离巷表 6 m,此时塑性区分布呈现出“奇异化”.

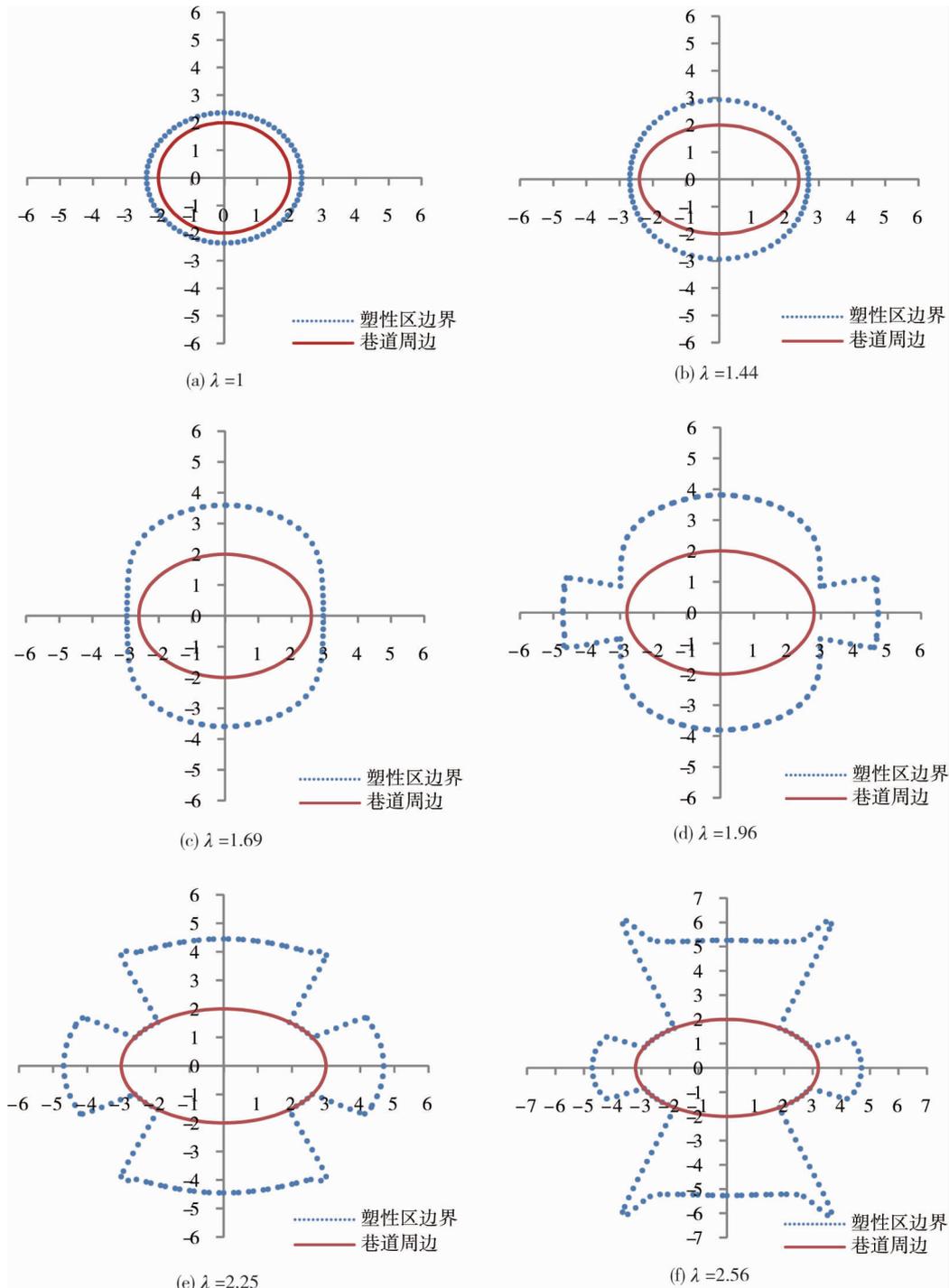


图 2 不同侧压系数下挤压平衡圆轴比巷道边界与塑性区边界变化情况

综上所述:当侧压系数 $\lambda \geq 1$ 时,随着侧压系数的增大,巷道周边塑性区亦随之增大,塑性区分布形状

呈多元化.针对不同的侧压系数 λ ,支护方式应随之发生调整,针对塑性区易突变和失稳的关键位置,支护强度应适当增强,支护的重点关键部位也应发生对应的变更.当塑性区范围过大,普通锚杆支护易失效时,锚索与其他支护的配合必不可少.同时随着侧压系数 λ 的增大,巷道两帮也发生一定范围的拓展,此时挤压平衡圈轴比巷道在破坏过程中逐渐改变了巷道轴比关系,其应力分布状态也同样发生了改变.

3 裂隙区的分布规律

在上述分析中假设岩体内聚力 c 和内摩擦角 φ 在岩体变形过程中不发生变化,而于学馥进行的相关试验表明,围岩强度恶化时 c 值下降很多,但 φ 值下降不是很多.显然塑性软化区和塑性流动区属于围岩强度恶化,塑性软化区属于围岩强度恶化开始状态,根据相关研究成果^[9],岩体全应力-应变曲线可简化为四段线,即弹性段、塑性强化段、脆-塑性突降段和塑性流变段,脆性明显的岩石无塑性强化段和塑性流变段,如葛修润1997年提出的非理想脆-塑性模型^[10].若取 $\beta = (\varepsilon_r - \varepsilon_0) / \varepsilon_0$, β 越趋近于零,表示岩石脆性越强; β 越大,表示岩石延性越强;由于 $\varepsilon_0, \varepsilon_r$ 均是围压的函数, β 越大,表示围压越大.综上所述,脆性岩的裂隙区对应于脆-塑性突降段,而延性岩的裂隙区对应于脆-塑性突降段和塑性流变段.

不考虑围岩处于脆-塑性突降段时 φ 值的变化,设围岩处于脆-塑性突降段时 c 值与应变 ε 关系为线性关系,即围岩处于脆-塑性突降段的 c 值与应变 ε 关系式为 $c = \frac{c_r - c_0}{\varepsilon_r - \varepsilon_0} \varepsilon + \frac{\varepsilon_r c_0 - \varepsilon_0 c_r}{\varepsilon_r - \varepsilon_0}$,其中: c_0, ε_0 为岩体峰值强度时的内聚力与峰值应变; c_r 为岩体残余强度时的内聚力; ε_r 为塑性流变段起始应变.

设塑性区的环向应变为

$$\varepsilon = B_0 \left[\delta_1 \frac{R^2}{r^2} + (1 - \delta_1) \frac{R^n}{r^n} \right], B_0 = \frac{(1 + \mu) [q \sin \varphi + c \cos \varphi]}{E} \quad (16)$$

式中: R, E 为塑性区半径和塑性区内岩体弹性模量; μ 为塑性区内岩体泊松比; δ_1 为比例系数, $n > 2$.

塑性区的体应变 $\varepsilon_v = -B_0(n-2)(1-\delta_1)R^n/r^n$,岩体屈服时的体应变 $-B_0(n-2)(1-\delta_1)$,峰值时的环向应变、体应变分别为 $B_0[\delta_1 R^2/R_s^2 + (1-\delta_1)R^n/R_s^n]$, $-B_0(n-2)(1-\delta_1)R^n/R_s^n$, R_s 为围岩松动区半径,而 δ_1, n 可由岩石力学实验求得.

则围岩处于脆-塑性突降段的 c 值与点的极半径关系式为

$$c = \frac{c_r - c_0}{\varepsilon_r - \varepsilon_0} B_0 \left[\delta_1 \frac{R^2}{r^2} + (1 - \delta_1) \frac{R^n}{r^n} \right] + \frac{\varepsilon_r c_0 - \varepsilon_0 c_r}{\varepsilon_r - \varepsilon_0} \quad (17)$$

将式(17)代入式(8)可得式(8)与式(7)的通解为

$$\sigma_3 = -\frac{\cos \varphi}{\varepsilon_r - \varepsilon_0} \left\{ \frac{\varepsilon_r c_0 - \varepsilon_0 c_r}{\sin \varphi} + (c_r - c_0) B_0 \left[\delta_1 \frac{R^2}{r^2} + \frac{2(1 - \delta_1)}{(2 - n) \sin \varphi + n} \times \frac{R^n}{r^n} \right] \right\} + \eta r^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (18)$$

式中: η 为积分常数.

3.1 脆性岩的围岩裂隙区

对于脆性岩,此时 $B_0 = \varepsilon_0$,若 $\sigma_3(r = r_1) = p_j, p_j$ 为巷道周边支护强度,则将 $\sigma_3(r = r_1) = p_j$ 代入式(18)可得 η 为

$$\eta_1 = \left\{ p_j + \frac{\varepsilon_r c_0 - \varepsilon_0 c_r}{\varepsilon_r - \varepsilon_0} \cot \varphi + \frac{c_0 - c_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \varepsilon_0 \cos \varphi \left[\delta_1 \frac{R^2}{r_1^2} + \frac{2(1 - \delta_1)}{(2 - n) \sin \varphi + n} \times \frac{R^n}{r_1^n} \right] \right\} r_1^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}$$

将 $\sigma_3(r = R) = q[1 - \sin \varphi] - c_0 \cos \varphi$ 和 $\eta = \eta_1$ 代入式(18)可求解得到脆性岩的围岩松动区半径(即塑性区半径).

以 $E = 20 \text{ GPa}, c_0 = 6 \text{ MPa}, c_r = 0.5 \text{ MPa}, \varphi = 30^\circ, n = 2.5, \delta_1 = 0.8, r_1 = 2$,计算 $q = 20 \text{ MPa}, \mu = 0.4, \varepsilon_r = 1.1 \varepsilon_0$ 时的塑性区半径约为2.9 m,大于未考虑围岩强度弱化时的塑性区半径2.363 m.

3.2 延性岩的围岩裂隙区

当围岩处于塑性流变段时, $c = c_r$,若取围岩处于塑性流变段(裂隙扩张区)的最大半径为 R_w ,

$\sigma_3(r=r_1) = p_j$, p_j 为巷道周边支护强度,则由式(9)可得围岩处于塑性流变段与脆-塑性突降段交界处的 σ_3 为

$$\sigma_3(r=R_w) = (p_j + c_r \cot \varphi) \left(\frac{R_w}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c_r \cot \varphi. \quad (19)$$

式中: r_1 为圆形巷道半径.

令式(18)中的 $r = R_w$, 由两式右边相等可得到一个含变量 R, R_w 和 η 的方程.

再令式(18)中的 $r = R$ 可得到 $\sigma_3(r=R)$ 的表达式, 将之与等式 $\sigma_3(r=R) = q[1 - \sin \varphi] - c_0 \cos \varphi$ 比较, 由两式右边相等可得到一个含变量 R 和 η 的方程.

又由式(16)可得方程 $\varepsilon_r = B_0 \left[\delta_1 \frac{R^2}{R_w^2} + (1 - \delta_1) \frac{R^n}{R_w^n} \right]$, 上述3个方程联立求解得到延性岩的塑性区半径和裂隙扩张区半径.

以 $E=20$ GPa, $c_0=6$ MPa, $c_r=0.5$ MPa, $\varphi=30^\circ$, $n=2.5$, $\delta_1=0.8$, $r_1=2$, 计算 $q=20$ MPa, $\mu=0.4$, $\varepsilon_0 = B_0$, $\varepsilon_r = 1.5 B_0$ 时的塑性区半径约为 3.34 m, 裂隙区半径约为 2.76 m, 塑性区半径大于未考虑围岩强度弱化时的塑性区半径 2.363 m. 而当 $c_r=2$ MPa, 其他参数值未变化时的塑性区半径约为 2.64 m, 裂隙区半径约为 2.18 m, 同样塑性区半径大于未考虑围岩强度弱化时的塑性区半径 2.363 m, 但增加幅度减弱, 说明控制围岩内聚力弱化幅度有利于支护控制.

4 围岩变形与支护控制

在围岩变形分析中关键是变形的积累, 对于延性岩, 当围岩处于脆-塑性突降段时, 其应变由 ε_0 突增到 ε_r , 一般其增量相对于总的塑性应变非常小, 故在变形分析中将脆-塑性突降应变取为 $0.5(\varepsilon_0 + \varepsilon_r)$ 来考虑脆-塑性突降段的贡献, 则塑性区半径 R 为

$$R = r_1 \left\{ \frac{[c_0 \cot \varphi + q][1 - \sin \varphi] - \left(\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_r}{2 B_0} \right)^{\frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} (c_0 - c_r) \cot \varphi}{c_r \cot \varphi + p_j} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}. \quad (20)$$

设围岩中某一点的极半径为 r , 对于静水压力圆形巷道, 弹性阶段的最大径向变形为 $B_0 r$, 而考虑损伤扩容和碎胀效应的塑性变形为

$$u_r^p = B_0 \left[\delta_1 \frac{R^2}{r} + (1 - \delta_1) \frac{R^n}{r^{(n-1)}} \right]. \quad (21)$$

由式(20)和式(21)可知, p_j 与 $c_r \cot \varphi$ 之和越大对损伤扩容和碎胀变形控制有利, 式(21)的第一项 $B_0 \delta_1 \frac{R^2}{r}$ 对应损伤扩容变形, 第二项 $B_0 (1 - \delta_1) \frac{R^n}{r^{(n-1)}}$ 对应碎胀变形, 且第二项的碎胀变形主要发生在巷道围岩浅表, 有效的锚杆支护(主要指锚固有效)和强力锚索对变形控制非常重要.

实际围岩变形过程中, 峰值前的损伤扩容和峰值后的碎胀变形均是客观存在的, 是围岩能量释放的体现, 而且变形遵循由弱强度岩层到高强度岩层、由巷道浅表到深部逐步发展, 也即巷道掘进时锚杆的预应力应大于由式(21)第一项确定的锚杆锚固区内变形所引起的变形力和围岩破碎区内岩体重量, 而且锚杆的锚固承载力应大于由式(21)第二项确定的锚杆锚固区内变形所引起的变形力和围岩破碎区内岩体重量; 锚索的预应力应大于由式(21)第一项确定的锚索锚固区内变形所引起的变形力. 变形力是锚杆(或锚索)锚固岩体综合刚度与锚固区内变形的乘积.

5 结论

1) 深部巷道应合理地设计巷道宽高轴比, 避免因巷道宽高轴比不合理而导致围岩破碎区域化, 同时破碎区应避免出现, 因巷道断面原因也只允许局部出现, 否则必须采取注浆的办法加固围岩.

2) 围岩松动区应采用预应力锚杆控制其发展,围岩松动区应控制其发展,围岩松动区的主要控制措施是预应力锚杆,锚固段内岩体稳定,预应力应大于围岩松动区内的岩体重量,同时满足刚度匹配.且锚杆应在裂隙区内有 0.5 m 以上的锚固长度;

3) 防止围岩松动区与塑性强化区(或弹性区)间离层的主要措施是预应力锚索,锚索锚固端伸入塑性强化区内 1.5 m 以上,同时也要满足刚度匹配.围岩松动区与塑性强化区(或弹性区)间应采用预应力锚索控制其离层.

参考文献:

- [1] 马华,刘飞.井巷中巷道的断面设计与支护[J].煤矿现代化,2011(4):10-11.
- [2] 肖伟.软弱围岩岩石力学性质及支护对策研究[D].石家庄:石家庄铁道学院,2005.
- [3] 冯宇峰,田素川,卢备,等.大变形软岩巷道锚网支护失效机制研究[J].今日科苑,2009(20):40-41.
- [4] 梁时楷.高应力软岩巷道支护压力及变形破坏机理的研究[J].江西煤炭科技,2009(3):142-144.
- [5] 朱汉华,杨建辉,尚岳全,等.隧道新奥法原理与发展[J].隧道建设,2008,28(1):11-14.
- [6] 于学馥,乔端.轴变论和围岩稳定轴比三规律[J].有色金属,1981,33(3):8-15.
- [7] 于学馥.轴变论与围岩变形破坏的基本规律[J].轴矿冶,1982,1(1):8-18.
- [8] 惠兴田,邓坤,高瞻,等.等应力轴比 FLAC^{3D}实现及其应用[J].矿业安全与环保,2008,35(2):25-27.
- [9] 卢允德.岩石三轴压缩试验及线性软化本构模型的研究[D].上海:上海交通大学,2003.
- [10] Ge X R. Post failure behavior and a brittle plastic model of brittle rock [C]// Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam; Balkema, 1997, 151-160.