

王平,冯涛,朱永建,等.深部软岩巷道围岩塑性区演化规律及其控制[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):1-10.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.001

Wang P, Feng T, Zhu Y J, et al. Evolution Law of Plastic Zone of Surrounding Rock on Deep Soft Rock Roadway and Its Control[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,34(2):1-10.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.001

# 深部软岩巷道围岩塑性区演化规律及其控制

王平<sup>1,2,3,4</sup>,冯涛<sup>1,2,3\*</sup>,朱永建<sup>1,2,3</sup>,余伟健<sup>1,2,3</sup>,任恒<sup>3</sup>,黄钟<sup>3</sup>

- 1.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南湘潭,411201;
- 2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,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;
- 4.湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室,湖南湘潭411201)

**摘要:**针对深部软岩巷道大变形的问題,采用理论分析、数值模拟以及工程试验等手段从巷道围岩塑性区演化规律探讨围岩控制原理.研究发现:深部高地应力软岩巷道塑性区轴比与应力集中之间的恶性循环,造成巷道围岩非均匀大变形,这是导致巷道失稳的主要原因.控制巷道塑性区最大半径方向上的围岩变形,这是关键,提出了“强化最大破坏深度围岩强度,强力控制关键区域巷道表面变形,支护结构协同控制,支护-围岩协同变形”的“两强两协同”围岩控制原理.基于该原理,设计以“可缩性桁架锚索+锚杆(索)”为核心的深部软岩巷道围岩协同控制方案,经工程试验表明该方案可有效地改善巷道围岩的大变形.

**关键词:**深部软岩巷道;塑性区轴比;控制原理

**中图分类号:**TD322 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)02-0001-10

## Evolution Law of Plastic Zone of Surrounding Rock on Deep Soft Rock Roadway and Its Control

Wang Ping<sup>1,2,3,4</sup>, Feng Tao<sup>1,2,3</sup>, Zhu Yongjian<sup>1,2,3</sup>, Yu Weijian<sup>1,2,3</sup>, Ren Heng<sup>3</sup>, Huang Zhong<sup>3</sup>

1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201, China;
4. Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In view of the large deformation of deep high stress soft rock roadway and by means of theoretical analysis, numerical simulation and engineering tests, the control principle of surrounding rock was discussed from the law of plastic zone evolution of tunnel surrounding rock. The study finds that deep high stress soft rock plastic zone of the non-uniform expansion is the main cause of the loss of stability of roadway, reflected in the vicious circle between the axial ratio of the plastic zone and the stress concentration. It is the key to control

收稿日期:2018-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804114;51774130);湖南科技大学科研启动基金资助项目(E51770);湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室开放基金资助项目(E21703)

\*通信作者,E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

deformation of surrounding rock in the direction of maximum radius of plastic zone of roadway and puts forward rock control principle of “two strong and two synergy”, which is “strengthening the rock strength of maximum damage depth, strong control of surface deformation in key areas of roadway, cooperative control of supporting structure, cooperative deformation of support-surrounding rock”. Based on this principle, a cooperative control scheme of deep high stress soft rock roadway surrounding rock is designed with the core of retractable truss, anchor bolt (cable), and the engineering tests show that the scheme effectively improve the large deformation of surrounding rock.

**Keywords:** deep soft rock roadway; axial ratio of plastic zone; control principle

随着采深的增加,深部软岩多表现出大变形的特点,严重制约了深部煤炭资源的安全开采,深部岩体的力学特性也发生了改变.谢和平院士<sup>[1]</sup>发现随着采深的增加,煤岩体属性由脆性向脆-塑性再到大范围塑性流动转变.何满潮院士<sup>[2]</sup>认为深部岩体是多尺度与多场耦合的地质体,从中微纳尺度的吸附、解析到细观尺度的流体运移、裂纹扩展及岩石损伤,在采矿活动扰动作用下均会发生异化,从而引发一系列的深部工程灾害.深部岩体最显著的力学行为特征是高度非线性、各向异性和随时间的强流变性.复杂力学环境是造成深部软岩巷道围岩难以控制的主要原因.研究表明,巷道围岩的大变形与塑性区的形成和发展密切相关,塑性区的形态、范围决定了巷道破坏的模式和程度<sup>[3]</sup>.王卫军教授<sup>[4]</sup>认为塑性区的局部畸变和恶性扩展是高应力软岩巷道围岩失稳的关键所在,提出了“锚网索喷+底板锚索+局部锚索或注浆加强”的围岩控制方案.孟庆彬<sup>[5]</sup>以应力扩大系数  $k$  来表征围岩中的应力扩散,结合数值模拟研究了锚杆、锚索预应力的耦合支护效应,提出了深部软岩巷道“锚网喷索+U型钢支架+注浆+底板锚注”的联合支护技术.胡敏军<sup>[6]</sup>通过建立一种新的软岩黏弹塑性应变软化蠕变模型对高应力软岩巷道的时效变形机理进行了分析,提出以“锚注支护”为核心的时效耦合支护体系.王渭明<sup>[7]</sup>建立了弱胶结软岩巷道围岩弹塑性流动损伤模型,分析了原岩应力、刚度劣化和扩容梯度等因素对围岩损伤、变形及塑性圈的影响,发现剪胀效应影响塑性区围岩损伤和位移,原岩应力水平影响塑性圈的分布.

综上所述,可以明确的是深部软岩巷道大变形与其围岩塑性区演化密切相关,塑性区演化规律决定了支护形式、强度和支护时机的选择.那么,是什么因素驱动了巷道围岩塑性区的恶性扩展值得我们思考.因此,研究深部软岩巷道围岩塑性区演化机制及其控制具有重要的理论与实际意义.

## 1 巷道塑性区形成与演化机制

### 1.1 塑性区的形成

巷道围岩形成塑性区是多种因素综合作用的结果,塑性区形态主要受围岩中应力状态的影响,其中,非圆形塑性区是由于围岩受到双向不等的应力作用<sup>[8]</sup>.巷道开挖后,围岩应力状态改变,巷道表面围岩由三向应力状态转变为双向甚至单向应力状态.在巷道临空面方向,应力的突然卸载造成围岩中产生较大的偏应力,当偏应力超过一定值后,围岩即进入塑性状态,塑性变形不断扩展直至围岩破坏.巷道围岩塑性区中岩体单元的偏应力  $s_i$  表达式为

$$\begin{cases} s_1 = \frac{2\sigma_1 - \sigma_3}{3}; \\ s_3 = \frac{2\sigma_3 - \sigma_1}{3}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s_1, s_3$  为 2 个主偏应力,MPa; $\sigma_1, \sigma_3$  为该点的最大主应力和最小主应力,MPa.

### 1.2 塑性区的影响因素

塑性区的形成和发展受多种因素的综合作用,主要包括 4 个方面:(1)岩体自身岩性的影响,主要体现在内摩擦角( $\varphi$ )和粘聚力( $c$ )这 2 个参数的影响;(2)地应力的影响,包括地应力的大小和方向以及由于

开挖形成的主偏应力,塑性区产生的力学本质即是巷道围岩中存在偏应力,不同的偏应力作用下产生了圆形、椭圆形以及蝶形塑性区<sup>[9-10]</sup>; (3) 支护结构的影响,包括支护强度及支护形式的影响; (4) 巷道断面的影响,包括巷道断面大小和形状的影响.

1.2.1 围岩岩性的影响

巷道围岩以压剪破坏为主,根据莫尔-库伦准则,在极限平衡状态下,围岩中偏应力为

$$\begin{cases} s_1 = \frac{(1 + 3\sin\varphi)\sigma_3 + 4c\cos\varphi}{3(1 - \sin\varphi)}; \\ s_3 = \frac{(1 + \sin\varphi)\sigma_3 - 2c\cos\varphi}{3(1 - \sin\varphi)}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varphi$  为内摩擦角; $c$  为岩体粘聚力.

图 1 为巷道周边岩体主偏应力随岩性参数  $c$  和  $\varphi$  的变化趋势.

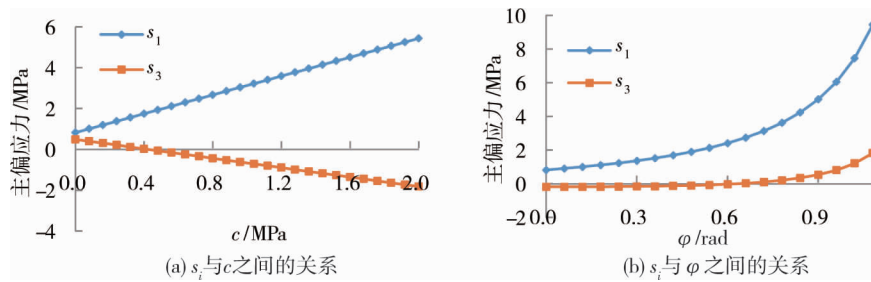


图 1 主偏应力与岩石参数间的关系

对于同一种岩体,偏应力越大其塑性区扩展越快.可以看出,在地应力为定值( $\sigma_0 = 0.5$  MPa)时,主偏应力绝对值与粘聚力之间则呈线性增长关系,主偏应力的绝对值与岩石内摩擦角之间呈曲线增长关系,通过支护结构增大巷道周边破碎围岩的摩擦角和提高岩体的粘聚力,在一定程度上可遏制巷道深部围岩塑性区的产生和扩展.

1.2.2 地应力的影响

在双向等压状态下,在临近巷道表面的围岩中最小主应力  $\sigma_3$  为 0,则有

$$\begin{cases} s_1 = \left( \frac{1}{3} + \sqrt{2} \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sigma_0; \\ s_3 = \left( \frac{1}{3} - \sqrt{2} \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sigma_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_0$  为圆形巷道半径; $r$  为围岩中目标点与巷道中心点距离.

地应力对主偏应力在巷道周边围岩中的分布情况如图 2 所示(半径  $R = 2$  m 的圆形巷道).

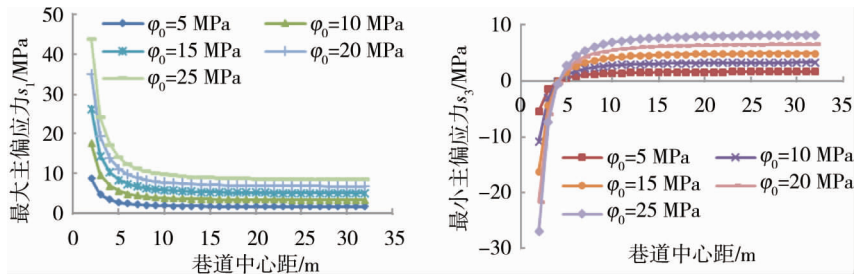


图 2 主偏应力随地应力的变化关系

可以看出:距离巷道越远,最大主偏应力迅速减小并趋于稳定,最小主偏应力迅速增大后趋于稳定.地应力越大,主偏应力的初始值和稳定值越大.半径  $R = 2$  m 的圆形巷道,巷道周边 5 m 范围是主偏应力较大的区域,也是塑性区岩体极易破坏的区域.

### 1.2.3 支护阻力的影响

支护强化围岩参数、改善围岩应力状态,不同形式的支护可以形成不同形状的支护-围岩共同承载体结构,以此控制巷道围岩的稳定<sup>[11-12]</sup>.在深部巷道围岩体中,最大主应力是由地应力及巷道开挖情况等因素共同决定的,支护结构在应力上的作用往往体现在最小主应力 $\sigma_3$ 上,当围岩体中最大主应力一定时( $\sigma_1 = 20$  MPa),支护结构对巷道围岩中偏应力的影响,如图3所示.

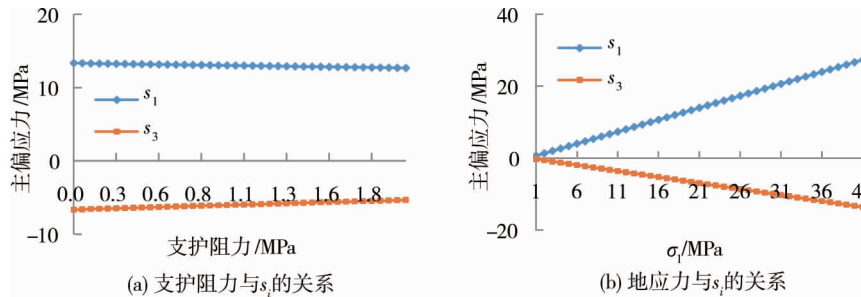


图3 围岩中应力与主偏应力的关系

可以看出:支护阻力越大,巷道围岩中主偏应力越小,巷道围岩的塑性区也就越小.从影响程度来看,主偏应力受支护阻力的影响较小,主要受地应力控制,原因在于支护阻力相对于地应力非常小,对于塑性区的影响有限.但是,在巷道破碎区内围岩地应力卸载后,支护阻力则对围岩的变形有较大的控制作用,同时,支护-围岩承载共同体可以为更深部塑性区围岩提供一定的围压,减小最大主偏应力,控制塑性区的快速扩展.

### 1.2.4 巷道断面的影响

巷道开挖后在周围形成局部应力场,巷道局部应力场是控制巷道围岩塑性区初始形态的主要因素,在双向等压条件下,不同形状巷道周边的主偏应力场分布如图4所示.

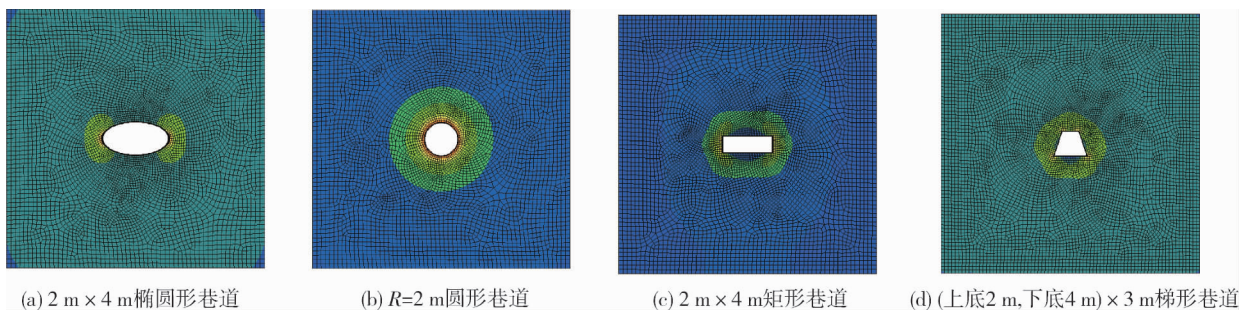


图4 不同巷道主偏应力分布

可以看出:在不同断面形状巷道表面上的偏应力较为集中,越往围岩深部,偏应力值逐渐减小.偏应力在不同形状巷道表面的集中区域和集中程度不同,在椭圆形巷道的长轴两端、矩形或梯形的尖角处偏应力较为集中.不同断面形状巷道具有不同的初始塑性区形态.在应力较小时巷道断面对塑性区形态有影响,而应力达到一定程度后,巷道断面形状对塑性区的影响减弱<sup>[13]</sup>.因此,巷道断面仅影响塑性区的初始形态,而塑性区的扩展及失稳过程中的演化形态主要受地应力控制.

总结起来,深部软岩巷道围岩在高地应力作用下,围岩岩性、支护阻力以及巷道原始断面对塑性区形态及扩展的影响较小,巷道围岩塑性区主要受深部高地应力的控制.

## 2 深部软岩巷道塑性区演化规律

根据前面的分析可知,深部软岩巷道由于岩石粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 较小,且地应力 $\sigma_0$ 较大,则巷道开挖后塑性区范围大,而且塑性区的演化形态主要受地应力控制.有研究表明<sup>[14]</sup>,远场应力差值决定塑性

区形态,在不同的应力状态下,圆形巷道塑性区演化过程可以分为 3 类:(1)双向等压条件下圆形塑性区的均匀扩展;(2)双向压差较小条件下的椭圆形塑性区快速扩展;(3)双向压差较大条件下的蝶形塑性区急剧扩展.塑性区的扩展形态及其扩展速度决定了支护的强度及支护形式.

### 2.1 塑性区扩展形态与扩展速度分析

假设塑性区内岩体满足均质、连续的条件,采用微元法将塑性区以巷道中心为圆心沿径向将围岩划分为多个塑性环,从内到外依次编号为 1,2,⋯,n,塑性环的宽度根据一定的比例划分.为分析塑性区扩展形态对塑性区扩展的影响,建立圆形和椭圆形力学模型如图 5 所示,将椭圆形和蝶形塑性区分别划分为 2 个塑性环进行分析.根据连续性假设,塑性环 1 中的岩体最大主应力为  $\sigma_1^1$ , 最小主应力为 0.塑性环 2 中岩体最大主应力  $\sigma_1^2$ , 最小主应力为塑性环 1 提供的径向应力  $\sigma_3^2$ .其中,  $\theta$  为目标围岩与水平方向的夹角.

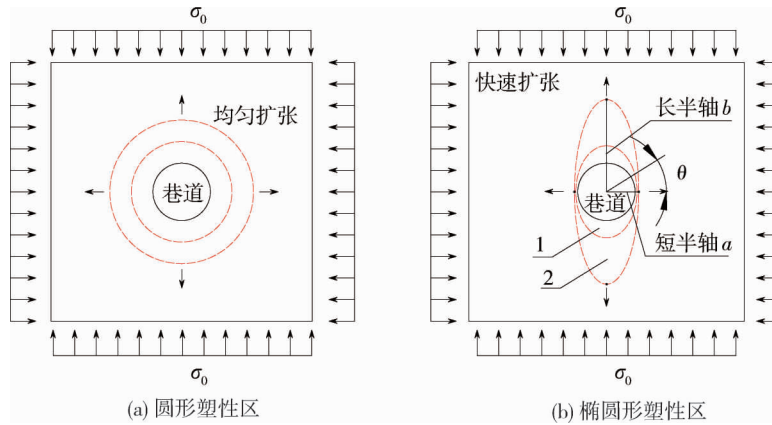


图 5 巷道塑性区演化力学模型

#### 2.1.1 圆形塑性区 (侧压 $\lambda = 1$ )

圆形塑性区单元环的最大主偏应力分布如下:

$$\begin{cases} s_1^1 = \frac{2\sigma_0 \left(1 + \frac{r_0^2}{r_1^2}\right)}{3}; \\ s_1^2 = \frac{2\sigma_0 \left(1 + \frac{r_0^2}{r_2^2}\right) - \sigma_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2}\right)}{3}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $s_1^1$  为塑性环 1 中的主偏应力;  $\sigma_0$  为远场地应力;  $r_1$  为塑性环 1 的平均半径;  $s_1^2$  为塑性环 2 中的主偏应力;  $r_2$  为塑性环 2 的平均半径.

如果将塑性环宽度划分适当,则塑性环 1 和塑性环 2 之间的交界可作为塑性区的内边界,而塑性环 2 可作为塑性区的外边界,即扩展边界.将塑性环 2 与塑性环 1 的主偏应力相比,则有

$$\frac{s_1^2}{s_1^1} = \frac{1}{2} + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \frac{r_0^2}{r_1^2 + r_0^2}. \quad (5)$$

根据式(5)可以看出:当  $r_1$  趋于无穷大时,  $s_1^2/s_1^1 = 1/2$ ; 当  $r_1 = r_2 = r_0$  时,  $s_1^2/s_1^1 = 1$ , 则有  $1 \geq s_1^2/s_1^1 \geq 1/2$ .对于圆形巷道,深部围岩中最大主偏应力小于临近较浅围岩中的主偏应力.当  $r_1$  不变时,  $r_2$  越大,  $s_1^2/s_1^1$  越小,说明越往深部,围岩中的主偏应力越小,塑性区边界处于缓慢扩展状态.

#### 2.1.2 椭圆形塑性区 (侧压 $\lambda = 2$ )

岩体深部多处于双向不等压状态,椭圆形和蝶形塑性区居多.对于椭圆形塑性区而言,圆形巷道应力解便不适用了.考虑到最大主应力与最大主偏应力之间呈线性关系,为简化分析,采用椭圆长轴端的集中应力来分析塑性区边界的扩展规律较为合适.同样,假设巷道围岩满足均质、连续的条件,采用平面问题处

理,根据弹性力学可知当 $\theta=0$ 时,椭圆形孔口上的切向应力为

$$\sigma_t = \left(1 + \frac{2b}{a}\right) \lambda \sigma_0 - \sigma_0. \quad (6)$$

式中: $\sigma_t$ 为椭圆巷道表面切向应力; $a, b$ 为椭圆形巷道短半轴和长半轴; $\lambda$ 为侧压系数.

不同侧压下椭圆巷道周边应力集中系数与巷道轴比之间的关系如图6所示.

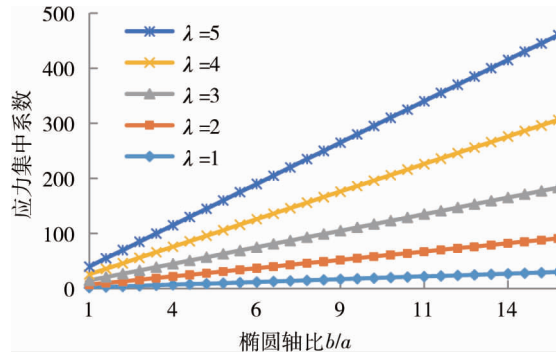


图6 塑性区长轴端应力集中与轴比关系

可以看出:侧压系数越大,椭圆形塑性区的轴比越大,椭圆形塑性区长轴端应力就越集中.因此,在椭圆形塑性区初期轴比较小时,椭圆形塑性区缓慢扩展,当椭圆形塑性区轴比逐渐增大之后,塑性区则产生快速扩展.对于蝶形塑性区同样存在轴比越大塑性扩展速度越快的规律,在此就不再赘述.

## 2.2 椭圆形和蝶形塑性区快速扩展机理

将塑性变形超过一定阈值的围岩体删去,可近似得到在双向不等压条件下(垂直应力等于0)的巷道塑性区边界的演化过程:圆形→椭圆形→长轴延长→长轴短轴共同延长(长轴扩展速度大于短轴扩展速度),如图7所示.

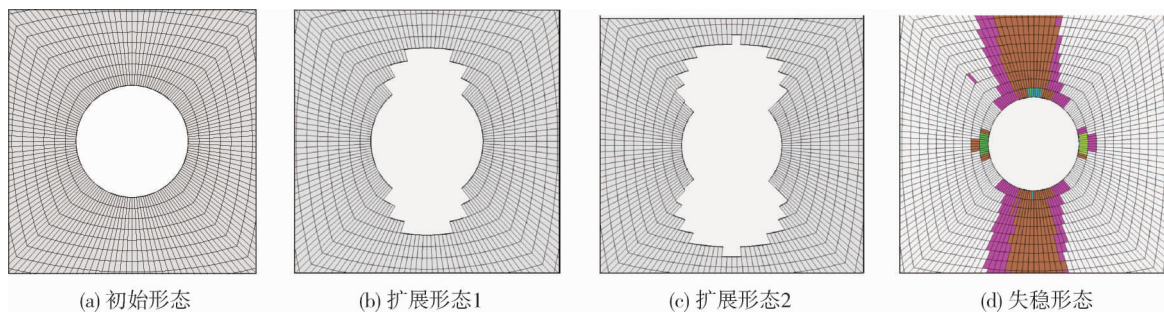


图7 塑性区边界演化过程

可以看出:巷道围岩塑性区的演化过程可以总结为初始形态→扩展形态→失稳形态.其中,塑性区初始形态主要由巷道形状决定,而扩展形态则是由地应力控制为主,塑性区失稳形态是由地应力和塑性区轴比共同决定.在深部条件下,初始形态在开挖后迅速形成,随即演变到扩展形态,塑性区边界开始以蠕变扩展为主,随着轴比的不断增大,塑性区边界演变为快速扩展和急剧扩展的失稳形态,造成巷道失稳.

在双向不等压加载条件下,巷道围岩塑性区非均匀扩展,围岩发生非均匀破坏,内在原因是塑性区半径在不同方向扩展速度不同,从而造成圆形孔口逐渐变为椭圆形孔口,在相同的远场应力作用下,椭圆形塑性区长轴端应力集中程度越来越高.应力越集中又进一步加速长轴端塑性区的扩展,椭圆形轴比进一步增大,椭圆孔口变得越发扁平.如果塑性区长轴延长足够长度,塑性区长轴端则会出现如同裂纹尖端的奇异性,即应力无穷大,如此恶性循环是导致塑性区最终急剧扩展的主要原因.这就从力学原理上提供了一种巷道塑性区急剧扩展,发生冲击地压的解释.同理,对于蝶形塑性区可以看作是2个交叉的椭圆形塑性区逐渐到快速再到急剧扩展的演化过程.该结论与文献[14]从塑性区最大半径 $R_{\max}$ 、最大主应力“ $P_1$ ”以

及最小主应力“ $P_3$ ”之间的关系提出的冲击地压猜想有相似之处.此外,塑性区的扩展速度受到围岩岩性、巷道形状、地应力大小以及支护结构的综合影响.但各影响因素的作用却有所不同,岩性决定岩石进入塑性状态的阈值、巷道形状决定塑性区的初始形态、地应力是塑性区的主要驱动力而支护结构主要控制破碎区岩体的变形从而为巷道塑性边界岩体形成一定的围压,遏制塑性边界的快速扩展.

### 3 深部软岩巷道围岩控制原理

深部软岩巷道围岩进入塑性状态的阈值较低,巷道开挖后很快形成塑性区初始形态,同时形成一部分围岩破碎区.若不加以控制,在高应力作用下塑性区则很快发展成为椭圆形或蝶形塑性区扩展形态,随后塑性区轴比不断扩大加剧了塑性区长轴端的扩展,在塑性区扩展到一定程度后,演变为急剧扩展形成塑性区的失稳形态,造成冲击地压或者巷道快速大变形失稳,如图8所示.

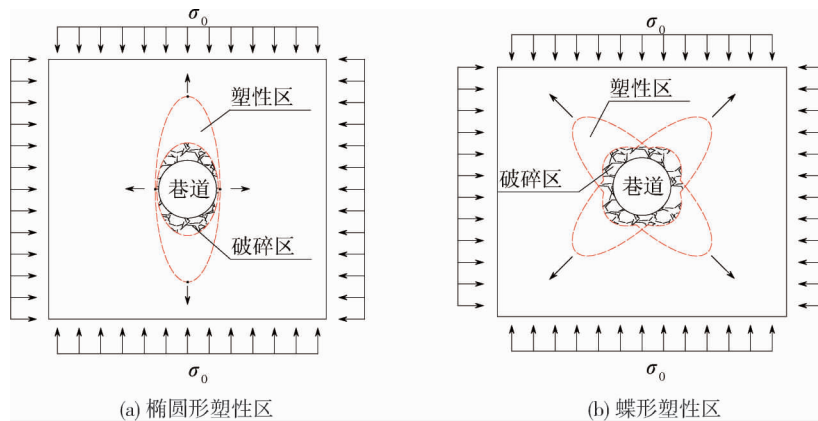


图8 塑性区与破碎区关系( $\lambda > 1$ )

巷道围岩控制必须考虑塑性区的演化规律,结合深部巷道围岩控制的工程特性,提出深部软岩巷道围岩控制原理:即“两强两协同”原理,具体包括强化最大破坏深度围岩强度,强力控制关键区域巷道表面变形,支护结构变形协同控制,支护结构与围岩塑性变形协同的基本原理.

#### 3.1 强化最大破坏深度围岩强度

根据应变叠加原理可知:塑性区深度较大的方向,破碎区深度也较大.破碎区岩体属于非连续的散体介质,基本不具备承载能力.由于岩石的碎胀性,破碎区岩体的变形是造成巷道大变形的直接原因.为了控制塑性区恶性扩展,必须发挥破碎区岩体的承载能力,采用锚杆、锚索等支护结构强化该区域围岩强度<sup>[15]</sup>,一方面控制破碎区岩体自身的稳定,另一方面形成支护-围岩共同体承载来自塑性区较大的地应力.对于椭圆形巷道,存在一个等应力轴比,使得巷道围岩中应力均匀分布,即最大主应力方向与椭圆形长轴方向平行且满足轴比等于侧压系数的倒数.然而,巷道最大破坏深度方向往往与最大主应力方向垂直,使得围岩中应力分布极不均匀,因此,强化最大破坏深度围岩强度,尽量减缓最大塑性区半径向塑性区扩展速度,使围岩中应力分布更均匀是控制巷道围岩大变形的的方法之一.

#### 3.2 强力控制巷道关键区域表面变形

巷道表面大变形直接影响巷道使用.根据前面的分析可知:巷道变形量越大,破碎区岩体提供给塑性区岩体的最小主应力 $\sigma_3$ 就越小,巷道塑性区围岩中主偏应力 $s_1$ 就越大,巷道塑性区长半径越大,塑性区扩展速度越快.因此,控制巷道表面的变形,一方面是满足巷道使用的要求,另一方面也是防止塑性区持续、快速扩展的必要手段.根据塑性区扩展形态来看,无论是椭圆形还是蝶形,控制塑性区长轴方向围岩表面变形是关键.对于深部软岩巷道,需要强力控制巷道关键区域表面的变形.巷道关键区域表面变形的控制程度直接影响塑性区长轴方向的扩展速度.

#### 3.3 支护结构协同控制

深部软岩巷道围岩塑性区不均匀分布造成了巷道围岩变形的不均匀,椭圆形塑性区长轴方向巷道表

面变形远远大于短轴方向巷道表面的变形.如果在巷道不同方向上采用相同的支护结构,容易引起支护结构支护强度和变形能力的不协调,造成巷道局部失稳.巷道局部失稳又引起塑性区在某一方向上发生快速扩展,从而造成巷道支护的整体失效.支护结构的协同包括2方面:(1)支护结构在主动支护时支护阻力需要协同,对于重点变形区域强力支护,形成整体的主动支护结构;(2)支护结构在被动受载时的变形协同,在受到塑性区岩体作用力时,支护结构尽量保持同步、协同变形,使巷道支护结构始终保持整体性.主动协同支护遏制塑性区的快速扩展,被动协同变形控制塑性区均匀扩展.

### 3.4 支护结构与塑性区围岩变形协同

深部软岩巷道的变形不可避免,甚至有一部分是“给定变形”<sup>[16]</sup>.如何控制巷道围岩的变形速度,使巷道在服务期内变形量不影响使用即达到围岩控制的目的.众所周知,只有最大程度地发挥出围岩的承载能力,形成支护-围岩承载共同体,才能获得较好的支护效果.支护-围岩承载共同体形成的前提是支护结构必须与塑性区围岩变形协同,这种协同变形同样也包含2方面:(1)在塑性区变形较大的方向上,支护结构要求具有较大的协同变形能力,同时还能提供一定的支护阻力;(2)支护结构尽量控制巷道的顶板、两帮和底板整体变形协同,确保巷道围岩均匀变形.支护-围岩承载共同体整体变形和均匀受载是衡量支护结构之间以及支护结构与围岩之间协同性优劣的基本标准.

## 4 工程试验验证

### 4.1 巷道概况

以江西某回采巷道为例,巷道平均埋深超过-850 m,煤层平均厚度为2.8 m,平均倾角12°.煤层顶板为碳质页岩、砂质泥岩以及粉砂岩与细砂岩互层,煤层底板为碳质泥岩、泥岩以及粉砂岩为主,属于深部软岩巷道.根据现场巷道变形情况调查,发现巷道顶板严重下沉,两帮大量鼓出并伴有强烈底鼓,巷道维护十分困难.通过钻孔成像仪探测巷道顶板和两帮后破碎岩体的深度,假设破碎区与塑性区深度正相关,将测点深度用光滑曲线连接,结合前文中塑性区形态推得如图9所示塑性区边界.

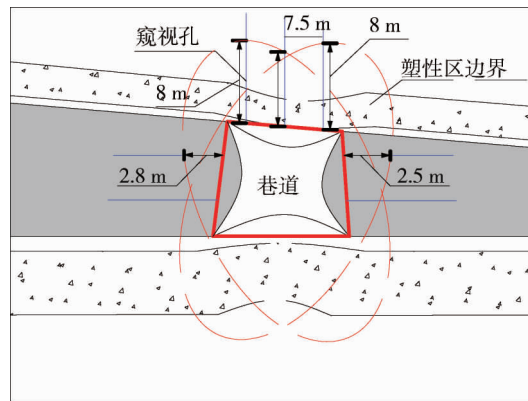


图9 巷道断面及塑性区范围

可以看出:巷道塑性区形态基本呈椭蝶形,蝶形的两翼对角线与巷道对角线近似,最大半径约8 m,塑性区短轴垂直于帮部近水平分布,半径大于2.5 m.

### 4.2 深部软岩巷道控制对策

根据“强化最大破坏深度围岩强度,强力控制关键区域巷道表面变形,支护结构协同控制,支护结构与围岩塑性协同变形”的围岩控制原理提出支护方案如图10所示.

1) 强化塑性区最大破坏深度围岩,采用“锚杆+锚索”强化顶板围岩,锚杆采用直径为 $\Phi 20$  mm,长2 600 mm的左旋无纵筋螺纹钢锚杆,间排距为750 mm $\times$ 800 mm.锚索直径为 $\Phi 22$  mm,长为9 000 mm.锚索,间排距为1 600 mm $\times$ 750 mm.“锚杆+锚索”支护结构可提高顶板围岩破碎区内围岩的粘聚力和内摩擦



角,增大主偏应力,使得更深处的塑性区围岩主偏应力减小,一定程度上遏制了塑性区边界的蠕变扩展.

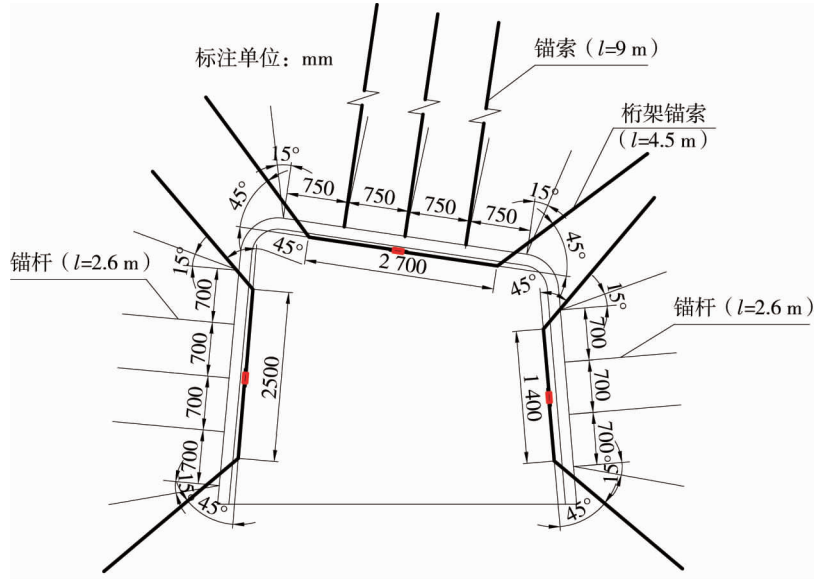


图 10 新支护方案

2) 强力控制关键区域巷道表面变形,巷道顶板和两帮均挂金属网和梯子梁,在顶板沿巷道轴向以顶板锚索为支点交替安装槽钢,加强支护结构“护表”作用,限制巷道表面围岩尤其是顶板的变形.金属网采用 12#铁丝编制的菱形金属网,网目为 40 mm,网尺寸:长×宽=1 100 mm×800 mm.梯子梁直径为 10 mm,间距为 60 mm.槽钢选用长 1 600 mm 的 18#槽钢.

3) 支护结构协同控制与围岩协同变形,巷道顶板和两帮采用“可缩性桁架锚索”调节围岩表面的非均匀变形,与巷道顶板及两帮中的锚杆、锚索协同控制围岩,改善“锚杆+锚索”支护结构,形成以“可让压桁架锚索”为核心的锚、网、索、梁协同支护技术.桁架采用 18#槽钢,顶板桁架长 2 700 mm,上帮桁架 2 500 mm,下帮桁架 1 400 mm,桁架锚索在围岩中长度大于等于 4 500 mm,通过自主设计的可缩性锚索锁具连接.锚索与对应岩面呈 45°夹角,支护方案及参数见表 1 所示.

表 1 具体支护参数

支护位置	支护结构	间排距/mm×mm	规格/mm×mm	预紧力/kN
顶板	金属网	--	100×100 菱形,接茬处≥100	锚杆紧贴岩面
	锚杆	750×800	Φ20×2 600	≥40
	锚索	1 600×750	Φ22×9 000	≥50
	槽钢梁	1 500	18#槽钢	--
	桁架锚索	2 700×1 600	Φ15.24×4 500	60~70
左帮	金属网	--	100×100 菱形,接茬处≥100	锚杆紧贴岩面
	锚杆	700×800	Φ20×2 600	≥30
	桁架锚索	2 500×1 600	Φ15.24×4 500	60~70
右帮	金属网	--	100×100 菱形,接茬处≥100	锚杆紧贴岩面
	锚杆	700×800	Φ20×2 500	≥30
	桁架锚索	1 400×1 600	Φ15.24×4 500	60~70

采用新支护方案后,进行了为期 3 个月的巷道变形监测,结果表明:基于“两强两协同”支护原理的控制方案后,巷道围岩变形得到明显改善,顶底板移近量在初期仍有 0.75 m 的变形,但随后顶底板移近量基本趋于稳定,满足巷道的使用需求,在巷道的服务期间基本上不用返修,达到了围岩控制的目的.此外,需要指出的是,采用“两强两协同”支护原理并非不让围岩变形,事实上支护时应当适当预留变形量,以适应“给定变形”,在此基础上进行有针对性的“两强两协同”联合支护.

## 5 结论

1) 主偏应力是围岩产生非圆形塑性区的力学原因,它与围岩的粘聚力呈线性增长关系与内摩擦角之间呈曲线增长关系.支护阻力对围岩中主偏应力的影响较小,地应力对主偏应力影响较大,支护-围岩共同体可以有效减小深部围岩主偏应力,延缓塑性区边界的扩展.

2) 根据塑性区形态可将巷道塑性区演化过程分为3个阶段,即初始形态阶段、扩展形态阶段和失稳形态阶段.巷道形状决定塑性区初始形态,而地应力的大小和方向决定了塑性区的扩展和失稳形态.塑性区扩展速度总是先缓慢扩展,在轴比变大后快速扩展.

3) 深部巷道失稳机制:巷道开挖后迅速进入以椭圆形和蝶形为主的扩展形态,随后,塑性区长轴端应力集中,塑性区轴比将持续增大,进一步引起长轴端应力集中,最终造成塑性区边界沿塑性区长轴方向急剧扩展,导致巷道失稳.

4) 基于塑性区演化规律,提出了“两强两协同”围岩控制原理,即强化最大破坏深度围岩强度,强力控制关键区域巷道表面变形,支护结构协同控制,支护结构与围岩塑性协同变形的基本原理.提出以“锚杆+锚索”强化、“金属网+梯子梁+槽钢”控制围岩表面变形以及“可缩性桁架锚索”协同的深部软岩巷道围岩控制技术.经工程试验,可以有效地控制深部软岩巷道围岩的大变形失稳.

### 参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [3] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
- [4] 王卫军,郭罡业,朱永建,等.高应力软岩巷道围岩塑性区恶性扩展过程及其控制[J].煤炭学报,2015,40(12):2747-2754.
- [5] 孟庆彬,韩立军,张帆舸,等.深部高应力软岩巷道耦合支护效应研究及应用[J].采矿与安全工程学报,2017,38(5):1425-1444.
- [6] 胡敏军.深部高应力软岩巷道时效变形机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [7] 王渭明,赵增辉,王磊.考虑刚度和强度劣化时弱胶结软岩巷道围岩的弹塑性损伤分析[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):679-685.
- [8] 李云祯,黄涛,戴本林,等.考虑第三偏应力不变量的岩石局部化变形预测模型[J].岩石力学与工程学报,2010,29(7):1450-1556.
- [9] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [10] 郭晓菲,马念杰,赵希栋,等.圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(8):1871-1877.
- [11] 余伟健,高谦,朱川曲.深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):2134-2142.
- [12] 苏永华,梁斌,刘少峰,等.基于组合拱理论隧道锚喷支护稳定可靠度求解的一维积分方法[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2446-2454.
- [13] 赵志强.大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014:23-24.
- [14] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等.均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(41):2679-2688.
- [15] 韦四江,勾攀峰.锚杆预紧力对锚固体强度强化的模拟实验研究[J].煤炭学报,2012,37(12):1987-1993.
- [16] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部巷道围岩预留变形控制技术[J].煤炭学报,2016,41(9):2156-2164.