

# 巷道围岩承载结构弹塑性理论分析

曾赤, 李树清, 谭玉林, 李兴, 谭妍

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 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)

**摘要:** 为了分析巷道围岩承载结构与支护的相互作用, 建立了圆形巷道围岩内、外承载结构弹塑性分析力学模型, 应用广义 Hoek - Brown 破坏准则和弹塑性基本理论, 得到了塑性区半径和围岩承载结构相关参数的表达式. 通过实例分析了巷道围岩承载结构与围岩稳定的关系, 以及支护力对巷道围岩承载结构相关参数的影响. 结果表明: 外承载结构位置、宽度以及塑性承载结构宽度与巷道围岩变形量及塑性区范围密切相关; 随支护力增大, 巷道围岩承载结构越靠近巷道周边.

**关键词:** 围岩承载结构; 支护力; 广义 Hoek - Brown 准则; 塑性区范围

**中图分类号:** TD322      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2014)04-0001-06

## Elastic - plastic theory analysis of bearing structure of rock around deep roadway

ZENG Chi, LI Shuqing, TAN Yulin, LI Xing, TAN Yan

(School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to analyze the interaction relations of bearing structure and supporting of roadway surrounding rock, the elastic - plastic mechanics analysis model of inner - outer bearing structure of circular roadway surrounding rock is established, by means of applying the generalized Hoek - Brown failure criterion and the basic theory of elastic - plastic. The expressions of the radius of plastic zone and the related parameters of surrounding rock bearing structure are obtained. Relationship between the bearing structure and the stability of surrounding rock of roadway surrounding rock, and the influence of supporting pressure on the bearing structural parameters of surrounding rock of roadway are analyzed by one instance. Results show that the position and width of outer bearing structure and the width of the plastic bearing structure, have greater influence on the deformation of surrounding rock of roadway and the range of plastic zone. With the increase of supporting pressure, the bearing structure of roadway surrounding rock approaches the perimeter.

**Key words:** bearing structure of surrounding rock; supporting pressure; generalized Hoek - Brown failure criterion; range of plastic zone

随着煤炭开采逐步转向深部发展, 深井巷道围岩应力高, 矿压显现剧烈, 给巷道围岩控制带来了较大挑战. 多年来, 国内外学者从不同的角度对巷道围岩控制开展了大量的研究工作, 提出了多种支护理论或方法, 如新奥法<sup>[1,2]</sup>、松动圈理论<sup>[3,4]</sup>、联合支护理论<sup>[5-8]</sup>、主次承载区支护理论<sup>[9]</sup>等. 文献

[10-12]探讨了深部巷道围岩内、外承载结构耦合稳定机理. 从支护及巷道围岩自承能力的角度分析支护与围岩相互作用关系, 将巷道围岩划分为以锚固体、注浆体及支架等巷道支护结构为主的内承载结构和以巷道围岩应力峰值点附近、以部分弹性区和塑性区煤岩体为主的外承载结构, 认为内承载

结构提供较大支撑作用力防止围岩垮落并控制围岩流变失稳,外承载结构是围岩承载的主体,内、外承载结构相互作用共同维持巷道围岩的稳定。

为了从理论上研究巷道围岩内、外承载结构的相互作用,文献[12]基于弹塑性理论,利用线性的 Mohr - coulomb 准则得到了巷道围岩外承载结构相关参数表达式,并分析了外承载结构相关参数对巷道围岩稳定性的影响及内承载结构支护力大小对外承载结构各相关参数的影响。

由于巷道围岩条件复杂,线性的 Mohr - coulomb 准则因其在数值计算中未能充分考虑到实际岩体的非线性特性,因而求解计算出的结果与工程实际情况存在一定的差别。广义 Hoek - Brown 破坏准则<sup>[13,14]</sup>较为真实地反映了岩块强度、岩体结构及采动影响等多种复杂因素对巷道围岩强度的影响,较全面、具体地描述了各类岩体的非线性破坏性质,更好地阐述了岩体破坏的普遍规律,因而得到了较为广泛的应用。

本文基于广义 Hoek - Brown 破坏准则,利用弹塑性理论,对外承载结构内、外边界位置、外承载结构宽度、塑性承载结构宽度进行求解,并分析巷道围岩承载结构各参数与巷道围岩变形量、塑性区范围关系,以及支护力对巷道围岩承载结构相关参数的影响。

## 1 基于广义 Hoek - Brown 准则的圆形巷道围岩弹塑性理论

### 1.1 模型的建立

建立的圆形巷道围岩内、外承载结构模型如图 1 所示。圆形巷道围岩内、外承载结构弹塑性分析计算模型如图 2 所示。其中,  $R_0$  为巷道半径;  $R_p$  为塑性区半径;  $R_i$  为内承载结构外半径;  $R_{bi}$  为外承载结构内半径;  $R_{bo}$  为外承载结构外半径,  $P_0$  为原岩应力;  $P_r$  为支护力。

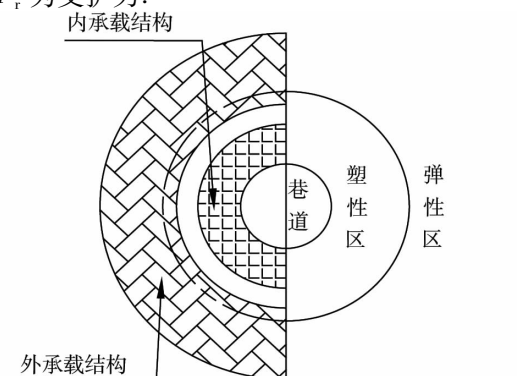


图1 圆形巷道围岩内、外承载结构模型

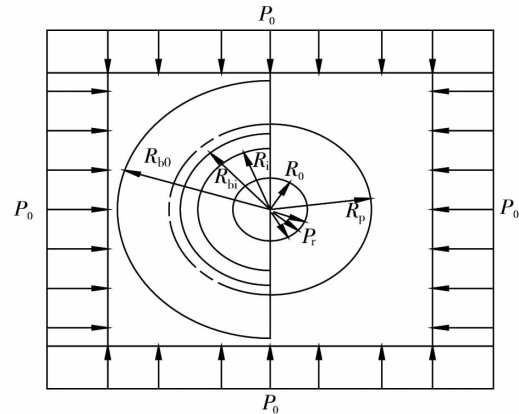


图2 圆形巷道围岩内、外承载结构弹塑性分析计算模型

### 1.2 广义 Hoek - Brown 破坏准则

根据文献[15], 广义 Hoek - Brown 破坏准则表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中,  $\sigma_1$ : 岩体破坏时最大主应力;  $\sigma_3$ : 岩体破坏时最小主应力;  $\sigma_{ci}$ : 完整岩体的单轴抗压强度;  $m_b, s, a$ : 与岩体质量有关的无量纲参数, 可以通过式(2)得到。

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right); \\ s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right); \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right). \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $D$ : 扰动因子;  $GSI$ : 围岩地质强度指标。

### 1.3 弹性区应力、位移

根据弹塑性理论, 对于平面应变问题, 圆形巷道围岩应力、应变满足以下方程<sup>[16,17]</sup>:

$$\text{平衡微分方程: } \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad (3)$$

$$\text{几何方程: } \begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \\ \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}. \end{cases} \quad (4)$$

物理方程(平面应变):

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1 - \mu^2}{E} \left( \sigma_r - \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_\theta \right); \\ \varepsilon_\theta = \frac{1 - \mu^2}{E} \left( \sigma_\theta - \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_r \right). \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_r, \sigma_\theta$ : 围岩径向应力和环向应力;  $r$ : 距圆形巷道中心的距离;  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ : 围岩径向应变和环向应变;  $u$ : 围岩径向位移, 指向巷道中心为正;  $\mu$ : 围岩

泊松比;  $E$ : 围岩弹性模量.

由于弹性区边界条件满足:

$$\text{外边界: } r \rightarrow \infty \text{ 时, } \sigma_r = \sigma_\theta = P_0; \quad (6)$$

内边界: 在弹塑性区交界  $r = R_p$  处, 巷道围岩处于广义 Hoek - Brown 准则的极限状态, 且应力、位移连续, 满足式(7) 和式(8).

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + s \right)^a; \quad (7)$$

$$\sigma_\theta + \sigma_r = 2P_0. \quad (8)$$

联立式(3) ~ 式(8), 可得弹性区的应力、位移.

弹性区的径向应力:

$$\sigma_r^e = P_0 - (P_0 - \sigma_{R_p}) \left( \frac{R_p}{r} \right)^2; \quad (9)$$

弹性区的环向应力:

$$\sigma_\theta^e = P_0 + (P_0 - \sigma_{R_p}) \left( \frac{R_p}{r} \right)^2; \quad (10)$$

弹性区的位移:

$$u^e = \frac{1 + \mu}{E} (P_0 - \sigma_{R_p}) \frac{R_p^2}{r}. \quad (11)$$

式中,  $\sigma_{R_p}$ : 弹塑性区交界面上的径向应力<sup>[18,19]</sup>, 可将式(7) 和式(8) 联立, 并采用牛顿迭代法求得近似解式(13).

$$\sigma_{R_0} = P_0 - \left( \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{m_b}{4} \right)^2 + m_b \frac{P_0}{\sigma_{cie}} + s} - \frac{m_b}{8} \right) \sigma_{cie}; \quad (12)$$

$$\sigma_{R_p} = \sigma_{R_0} + \frac{2(P_0 - \sigma_{R_0}) - \sigma_{cie} \left( m_b \frac{\sigma_{R_0}}{\sigma_{cie}} + s \right)^a}{2 + am_b \left( m_b \frac{\sigma_{R_0}}{\sigma_{cie}} + s \right)^{a-1}}. \quad (13)$$

式中,  $m_b, s, a$ : 弹性区的广义 Hoek - Brown 参数;  $\sigma_{cie}$ : 对应广义 Hoek - Brown 参数的弹性区单轴抗压强度.

#### 1.4 塑性区应力、位移

塑性区边界条件满足<sup>[20-22]</sup>:

外边界: 即为弹塑性区内边界  $r = R_p$ ;

内边界: 为圆形巷道处, 即  $r = R_0$ ; 此时支护力为  $P_r, \sigma_r = P_r$ .

根据弹塑性理论中平衡微分方程式(3) 及式(7), 满足塑性区内边界条件, 求解可得塑性区的径向应力:

$$\sigma_r^p = \frac{\sigma_{cir}}{m_{br}} \left[ \left( m_{br} \frac{P_r}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r} + \right.$$

$$\left. m_{br} (1 - a_r) \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) \right]^{\frac{1}{1-a_r}} - \frac{\sigma_{cir}}{m_{br}} s_r; \quad (14)$$

塑性区的环向应力:

$$\sigma_\theta^p = \frac{\sigma_{cir}}{m_{br}} \left[ \left( m_{br} \frac{P_r}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r} + m_{br} (1 - a_r) \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) \right]^{\frac{1}{1-a_r}} - \frac{\sigma_{cir}}{m_{br}} s_r + \sigma_{cir} \left[ \left( m_{br} \frac{P_r}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r} + m_{br} (1 - a_r) \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) \right]^{\frac{a_r}{1-a_r}}. \quad (15)$$

式中,  $m_{br}, s_r, a_r$ : 塑性区的广义 Hoek - Brown 参数;  $\sigma_{cir}$ : 对应广义 Hoek - Brown 参数的塑性区单轴抗压强度. 考虑到岩体在受力破坏过程中, 其单轴抗压强度  $\sigma_{ci}$  不变, 所以  $\sigma_{ci} = \sigma_{cie} = \sigma_{cir}$ .

$$\text{根据塑性区扩容方程: } \frac{\varepsilon_r^p}{\varepsilon_\theta^p} = -\beta. \quad (16)$$

式中,  $\varepsilon_r^p, \varepsilon_\theta^p$ : 塑性区的径向、环向应变;  $\beta$ : 膨胀系数, 在平面应变条件下,  $\beta$  取值 3 ~ 8.

在弹塑性交界面  $r = R_p$  处, 满足应变连续, 即  $u_r^e|_{r=R_p} = u_r^p|_{r=R_p}$ , 将式(4)、式(11) 和式(16) 联立, 可得塑性区的位移:

$$u^p = \frac{1 + \mu}{E} (P_0 - \sigma_{R_p}) R_p \left( \frac{R_p}{r} \right)^\beta. \quad (17)$$

#### 1.5 求解塑性区半径

在弹塑性区交界处满足应力连续, 即

$$\sigma_r^e|_{r=R_p} = \sigma_r^p|_{r=R_p}. \quad (18)$$

将式(9)、式(14) 和式(18) 联立即得塑性区半径  $R_p$ :

$$R_p = R_0 \exp \left( \frac{\left( \sigma_{R_p} \frac{m_{br}}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r} - \left( m_{br} \frac{P_r}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r}}{m_{br} (1 - a_r)} \right). \quad (19)$$

## 2 巷道围岩内、外承载结构相互作用

### 2.1 外承载结构的位置

巷道开挖后, 围岩切向应力逐渐增大, 在弹性区和塑性区交界处将达到最大. 为了研究方便, 不妨取围岩塑性区内超过原岩应力的区域和弹性区内切向应力达到 1.1 倍以上原岩应力的区域作为外承载结构<sup>[12]</sup>. 因此, 在塑性区内, 当  $r = R_{bi}$  时, 令  $\sigma_\theta = P_0$ , 结合式(15) 即可以得到外承载结构内边

界半径  $R_{bi}$ .

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^p = & \frac{\sigma_{cir}}{m_{br}} \left[ \left( m_{br} \frac{P_r}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r} + \right. \\ & m_{br} (1 - a_r) \ln \left( \frac{R_{bi}}{R_0} \right) \left. \right]^{1-a_r} - \frac{\sigma_{cir}}{m_{br}} s_r + \\ & \sigma_{cir} \left[ \left( m_{br} \frac{P_r}{\sigma_{cir}} + s_r \right)^{1-a_r} + \right. \\ & \left. m_{br} (1 - a_r) \ln \left( \frac{R_{bi}}{R_0} \right) \right]^{a_r} = P_0. \quad (20) \end{aligned}$$

因式(20)中关于  $R_{bi}$  的项含有未知次幂, 所以通过方程直接求解得不到确切的表达式, 只能通过数值方法求解, 取  $R_{bi}$  的实数解.

在弹性区内, 由式(10) 令  $\sigma_{\theta} = 1.1P_0, r = R_{bo}$ , 即

$$\sigma_{\theta}^e = P_0 + (P_0 - \sigma_{R_p}) \left( \frac{R_p}{R_{bo}} \right)^2 = 1.1P_0. \quad (21)$$

对式(21) 求解, 可得到外承载结构外边界半径  $R_{bo}$ :

$$R_{bo} = R_p / \sqrt{\frac{0.1P_0}{P_0 - \sigma_{R_p}}}. \quad (22)$$

## 2.2 外承载结构的宽度

如图1所示, 外承载结构实际上由大部分处于弹性状态的围岩和小部分处于塑性状态的围岩组成. 根据外承载结构区域内围岩体的性状不同, 可以将其分为弹性承载结构和塑性承载结构. 其中, 弹性承载结构因其围岩稳定、变形较小, 起主要的承载作用, 而塑性承载结构因自身强度较差, 承载能力较弱, 对外承载结构稳定起制约作用. 可根据外承载结构内边界半径、外承载结构外边界半径、塑性区半径得到外承载结构宽度和塑性承载结构宽度.

1) 外承载结构的宽度

$$b_1 = R_{bo} - R_{bi}; \quad (23)$$

2) 塑性承载结构宽度

$$b_2 = R_p - R_{bi}. \quad (24)$$

## 2.3 巷道周边围岩位移

把巷道半径  $R_0$  代入式(17), 即得到巷道周边围岩的变形值:

$$u^p = \frac{1 + \mu}{E} (P_0 - \sigma_{R_p}) R_p \left( \frac{R_p}{R_0} \right)^{\beta}. \quad (25)$$

## 3 算例分析

某矿井巷道埋深 1 028 m, 巷道断面为圆形, 其

基本参数<sup>[21-23]</sup>如下:

巷道半径  $R_0 = 2$  m, 原岩应力  $P_0 = 23.4$  MPa, 弹模  $E = 5.7$  GPa, 泊松比  $\mu = 0.25$ , 弹性区广义 Hoek - Brown 参数  $m_b = 1.7, s = 0.0039, a = 0.55$ , 单轴抗压强度  $\sigma_{cie} = 30$  MPa, 塑性区广义 Hoek - Brown 参数  $m_{br} = 0.85, s_r = 0.0019, a_r = 0.6$ , 单轴抗压强度  $\sigma_{cir} = 30$  MPa, 膨胀系数  $\beta = 3$ .

### 3.1 巷道围岩承载结构参数与围岩稳定的关系

#### 3.1.1 外承载结构位置及宽度与塑性区范围的关系

如图3, 随着外承载结构内、外边界增大, 塑性区半径也随之增大, 说明外承载结构远离巷道周边, 巷道围岩塑性区范围越大, 巷道围岩也就越不稳定.

外承载结构宽度作为承载围岩应力最主要的承载部分, 其宽度大小直接影响着围岩稳定性, 而塑性承载结构作为外承载结构的一部分, 因其自身的围岩稳定性较弱, 其宽度大小制约着弹性区外承载结构作用的充分发挥. 如图4, 随着外承载结构宽度和塑性承载结构宽度的增大, 塑性区范围基本上呈线性增加, 说明承载结构宽度越大, 塑性区范围也越大, 巷道围岩稳定性越差.

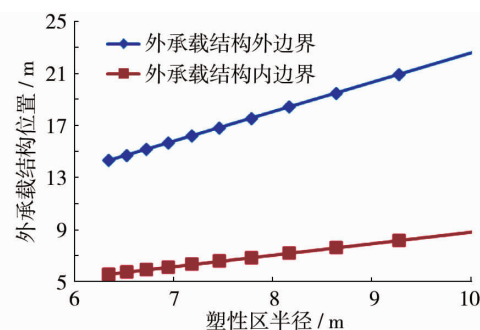


图3 外承载结构位置与塑性区范围的关系

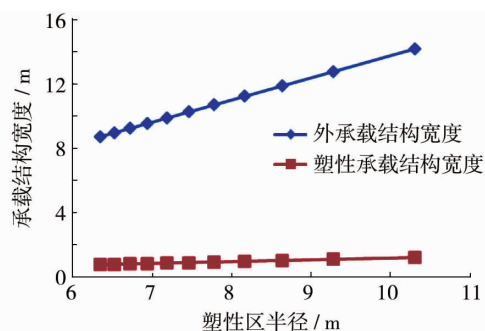


图4 承载结构宽度与塑性区范围的关系

#### 3.1.2 外承载结构位置及宽度与围岩变形量的关系

如图5~图7, 随着外承载结构内、外边界处位

置的增大,外承载结构所处边界处的位移也增大,说明外承载结构远离巷道周边,巷道围岩的变形量越大,巷道围岩也就越不稳定。

此外,外承载结构宽度与塑性承载结构宽度也表现出正相关关系,说明承载结构宽度越大,巷道周边围岩的变形量也越大,巷道围岩也就越不稳定。

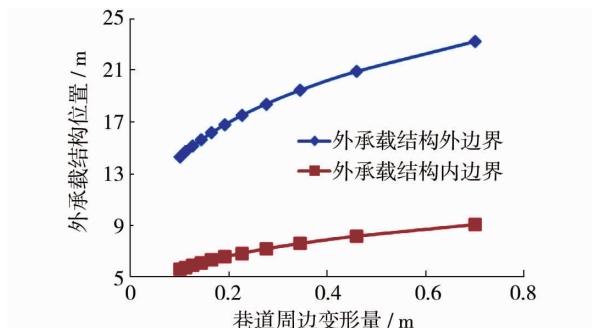


图5 外承载结构位置与巷道周边变形量的关系

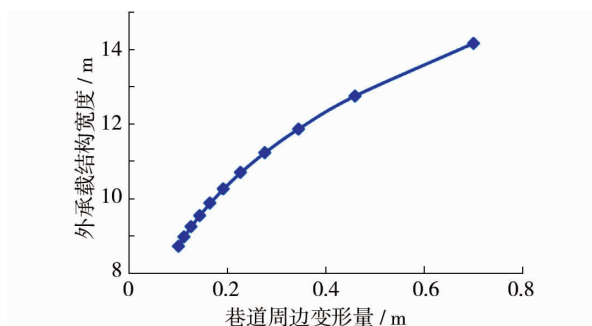


图6 外承载结构宽度与巷道周边变形量的关系

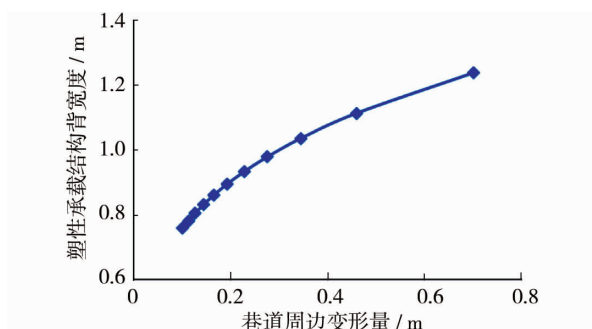


图7 塑性承载结构宽度与巷道周边变形量的关系

### 3.2 支护力与巷道围岩承载结构参数的关系

通过考察支护力在0~1 MPa范围内对外承载结构内、外边界位置、外承载结构宽度、塑性承载结构宽度四个相关参数的影响。如图8和图9,不同支护力下,外承载结构各相关参数值均随支护力的增大而呈现出先骤降再渐缓下降的非线性变化特征。当支护力在0.0~0.2 MPa范围内,深部巷道围岩受较大的原岩应力,围岩较为破碎,因提供围岩

支护力较小,不足以维持巷道围岩的稳定,因此巷道围岩各外承载结构相关参数表现为随支护力增大而迅速减小,以发挥巷道围岩承载结构自身的承载能力,维持围岩的稳定;随着支护力的增大,支护不仅为巷道围岩提供了较大的支承力,最主要是较大支护力改善了巷道围岩的岩性,促使塑性区范围变小且随巷道围岩外承载结构内、外边界位置向巷道周边移近、外承载结构宽度及塑性承载结构宽度的减少,整体上提高了巷道围岩承载结构的承载能力,对维持巷道围岩的稳定产生了较大影响。

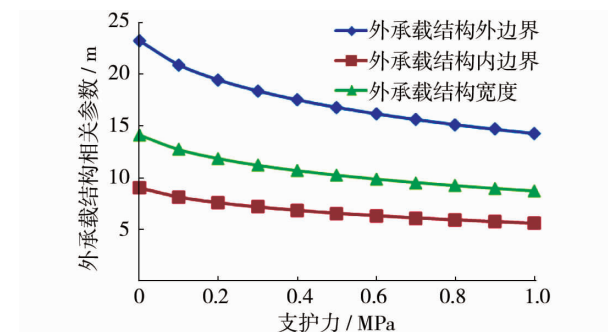


图8 不同支护力对外承载结构参数的影响

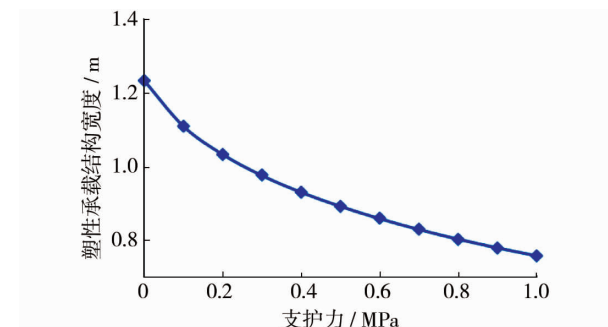


图9 不同支护力对塑性承载结构宽度的影响

## 4 结论

1)应用广义 Hoek - Brown 破坏准则和弹塑性理论建立了巷道围岩内、外承载结构力学分析模型,推导了外承载结构内、外边界位置、外承载结构宽度、塑性承载结构宽度相关表达式,为分析巷道围岩内、外承载结构相互作用关系奠定了基础。

2)外承载结构位置与塑性区范围、巷道围岩变形密切相关,其主要表现为外承载结构越靠近巷道周边,则塑性区范围越小、巷道围岩变形越小,巷道围岩越稳定。

3)随支护力的增加,外承载结构各相关参数值呈现出先骤降再渐缓下降的非线性变化特征。较大支护力不仅为巷道围岩提供了较大的支承能力,

最主要是改善了巷道围岩的岩性,提高巷道围岩承载结构的自承能力,对维持巷道围岩稳定产生了积极作用.

#### 参考文献:

- [1] Rabcewicz L V. The New Austrian Tunnelling method[J]. Water Power, 1965(1):19-24.
- [2] Rabcewicz L V. Stability of tunnels under rock load[J]. Water Power, 1969(1):225-273.
- [3] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报,1994,19(1):21-32.
- [4] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001.
- [5] 冯豫. 我国软岩巷道支护的研究[J]. 矿山压力与顶板管理,1990(2):42-44.
- [6] 陆家梁. 软岩巷道支护原则与支护方法[J]. 软岩工程,1990(3):20-24.
- [7] 郑颖人. 地下工程锚喷支护设计指南[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
- [8] 郑雨天. 岩石力学的弹塑性理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1988.
- [9] 方祖烈. 拉压域特征及主次承载区的维护理论,世纪之交软岩工程技术现状与展望[M]. 北京:煤炭工业出版社,1999.
- [10] 王卫军,李树清,欧阳广斌. 深井煤层巷道围岩控制技术及其试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):2102-2107.
- [11] 李树清,王卫军,潘长良. 深部巷道围岩承载结构的数值分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(3):377-381.
- [12] 李树清. 深部煤巷围岩控制内、外承载结构耦合稳定原理的研究[D]. 长沙:中南大学,2008.
- [13] Sharan S K. Elastic - brittle - plastic analysis of circular openings in Hoek - Brown media [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(6):817-824.
- [14] 温森,杨圣奇. 基于 Hoek - Brown 准则的隧洞围岩变形研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):63-69.
- [15] Hoek E, Carranza - Torres C, Corkum B. Hoek - Brown failure criterion—2002 edition [C]// Hammah R, Bawden W F, Curran J, et al. ed. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society NARMS - TAC 2002. Toronto:University of Toronto Press,2002.
- [16] Edwin T B, Asce M, John W B, et al. Ground response curves for rock tunnels [J]. Journal of Geotechnical Engineer, 1983,109(1):15-39.
- [17] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining[M]. London:Chapman & Hall,1993.
- [18] Sofianos A I. Tunnelling Mohr - Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the generalized Hoek - Brown criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2003, 40:435-440.
- [19] Sofianos A I, Nomikos P P. Equivalent Mohr - Coulomb and generalized Hoek - Brown strength parameters for supported tunnels in plastic or brittle rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2006,43:683-704.
- [20] Lu Y E, Wu Y. Analytical solutions of stress and displacement in strain softening rock mass around a newly formed cavity [J]. Journal of Central South University, 2013,20(5):1397-1404.
- [21] Sharan S K. Analytical solutions for stresses and displacements around a circular opening in generalized Hoek - Brown Rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2008,45(1):78-85.
- [22] Carranza - Torres C. Elasto - plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek - Brown failure criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41 (3):480-481.
- [23] 蒋斌松,杨乐,时林坡. 基于 Hoek - Brown 准则的破裂围岩应力分析 [J]. 固体力学学报, 2011 (s1):300-305.