

围岩-支护体耦合作用机理及其 最优化设计方案

罗生虎^{1,2*}, 伍永平^{2,3}, 张嘉凡^{1,2}

(1.西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054;
2.西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054;
3.西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054)

摘要:基于巷道开挖面的空间效应,根据弹塑性理论建立巷道围岩-支护体耦合作用模型,研究支护位置和支护体厚度与巷道位移、支护反力和围岩塑性区半径之间的关系;并在此基础上,根据最优化方法建立巷道耦合支护最优化模型,研究原岩应力、巷道断面以及支护体力学性质等因素对巷道支护方案的影响.结果显示,随着支护体厚度的减小及支护体离开开挖面距离的增大,巷道位移和巷道围岩塑性区半径逐渐增大,而支护反力逐渐减小;在支护体受力处于临界状态的情况下,支护体厚度随着原岩应力的增大、巷道断面的增大以及支护体离开开挖面距离的减小而增大.

关键词:围岩;支护体;耦合作用;优化设计

中图分类号:TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)02-0007-09

Surrounding Rock-support Body Coupling Mechanism and Optimize Design

Luo Shenghu^{1,2}, Wu Yongping^{2,3}, Zhang Jiafan^{1,2}

(1.Department of Mechanics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education,
Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3.School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the spatial effect of excavation face, a model of coupling action between rock and support body was built according to the elastic-plastic theory. Besides, an optimization model of roadway support based on optimization method was employed. The influences of the support position and thickness of support body on the deformation and pressure of the surrounding rock were analyzed by a case study, and the influencing factors, such as, rock stress, road section and physical properties of support body on the optimization model of roadway support were also discussed in detail. The results show that the support position and thickness of support body has a certain impact on the deformation and pressure of the surrounding rock, and with the distance increases between the support position and digging surface and the thickness of support body decreases, the displacement and plastic zone radius increases. The optimal design parameters of the roadway support are obtained, when the force acted on the support body reaches a critical state. The rock stress, road section and physical properties of support body have a significant impact on the optimization model of roadway support.

Keywords: surrounding rock; support body; coupling action; optimize design

收稿日期:2015-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51634007);陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2016JQ5019;2017JQ5091)

*通信作者,E-mail: luoshh06@163.com

在巷道耦合支护方面,国内外众多学者通过理论和实验等手段进行了大量的研究,新奥地利隧道施工方法、锚喷-弧板支护理论、围岩松动圈理论等被应用到巷道支护工程中,为地下岩石工程的设计与施工做出了重要的贡献^[1-5].

然而,现有支护设计多是以经验公式为主,再辅以现场监控和理论分析,但由于地下岩体工程的复杂性,仅靠一些经验公式是不能够完全解决的,必须做好基础理论的研究工作^[6-7].目前,弹塑性理论在岩石力学理论与工程中的应用较为广泛,以弹塑性理论导出的围岩-支护体耦合作用模型是巷道支护方面较为成熟的理论^[8-9],但侯公羽等人^[9-11]的研究结果显示,已有关于卡斯特纳方程的求解过程中对支护反力的力学简化存在缺陷,支护反力也不存在与支护特性曲线相交的可能.同时,在巷道支护工程中,巷道施工者关心的问题是安全和经济的双重因素下,何时何地架设何种支护体.许多学者对此展开研究,但已有的研究多是在原有设计方案上的改进,或是对多种设计方案的对比分析^[12],鲜见通过最优化理论来获取巷道耦合支护的最优方案^[6, 13].

本文在已有研究结果基础上,考虑巷道开挖面的空间效应,探讨围岩-支护体的耦合作用机理,分析支护位置和支护体厚度与巷道位移、支护反力以及围岩塑性区半径之间的关系;并在此基础上,根据最优化方法建立巷道耦合支护的最优化模型,分析原岩应力和巷道断面等因素对巷道耦合支护最优化方案的影响.

1 围岩-支护体耦合作用机理

为理论分析方便,假定巷道围岩为均匀、连续以及各项同性的弹塑性介质.巷道力学模型如图1所示,图中 R_0 为巷道半径, R_p 为巷道围岩塑性区半径, p_0 为原岩应力, a 为支护体内径.

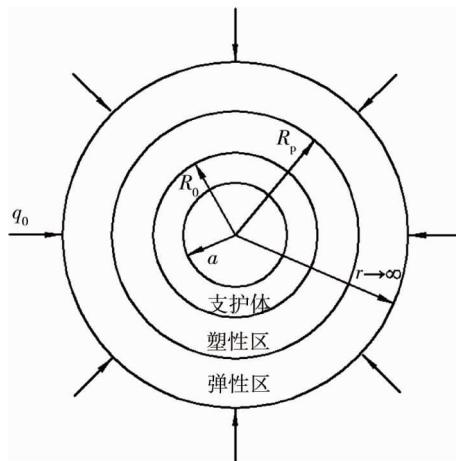


图1 巷道力学模型

1.1 开挖面的空间效应

巷道的初次支护一般是在毛洞开挖后若干日或距离开挖面一定距离处开始架设的,因此这里假设在距离巷道开挖面一定距离 x 处开始架设支护体,并假设支护体架设之后就产生支护效应,且无主动支护力.考虑开挖面的空间效应^[9, 14],假设在支护位置处的虚拟支护力为 p^* ,在支护处已经释放的原岩应力为 p^{**} ,则有

$$p_0 = p^* + p^{**}. \quad (1)$$

在支护位置 x 处,围岩通过弹塑性变形等形式释放的巷道位移 u_1 为^[14]

$$u_1 = u^* \left[1 + \exp\left(-\frac{x}{R_0}\right) \right]^{-1.7}. \quad (2)$$

式中: u^* 为没有架设支护体时巷道围岩在原岩应力作用下的径向位移.

1.2 弹性区应力和位移

由弹性理论^[15]可得弹性区的应力和位移为

$$\sigma_r^e = p_0 \left(1 - \frac{R_p^2}{r^2} \right) + \sigma_{R_p} \frac{R_p^2}{r^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_\theta^e = p_0 \left(1 + \frac{R_p^2}{r^2} \right) - \sigma_{R_p} \frac{R_p^2}{r^2}; \quad (4)$$

$$u_e = \frac{(1 + \mu) (\sigma_{R_p} - p_0) R_p^2}{Er} = \frac{AR_p^2}{r}. \quad (5)$$

式中: $A = (1 + \mu) (\sigma_{R_p} - p_0)$ 为常数; σ_{R_p} 为弹塑性交界面的径向应力; 角标 e 表示弹性区分量.

1.3 塑性区应力、应变和位移

对于塑性区, 根据 Mohr-Coulomb 准则, 可得塑性区的应力、塑性区半径和位移为^[16]

$$\sigma_r^p = (p + C \operatorname{ctg} \varphi) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \operatorname{ctg} \varphi; \quad (6)$$

$$\sigma_\theta^p = (p + C \operatorname{ctg} \varphi) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \operatorname{ctg} \varphi; \quad (7)$$

$$\frac{R_p}{R_0} = \left[\frac{(p_0 + C \operatorname{ctg} \varphi) (1 - \sin \varphi)}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}; \quad (8)$$

$$u_r^p = \frac{AR_p^2}{r}. \quad (9)$$

式中: C 为黏性系数; φ 为内摩擦角; 角标 p 表示塑性区分量.

则巷道位移为

$$u_0 = AR_0 \left[\frac{(p_0 + C \operatorname{ctg} \varphi) (1 - \sin \varphi)}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}}. \quad (10)$$

1.4 支护体应力、应变和位移

假设支护体为弹性介质, 则其应力和位移可表示为

$$\sigma_r' = \frac{R_0^2}{R_0^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) p; \quad (11)$$

$$\sigma_\theta' = \frac{R_0^2}{R_0^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) p; \quad (12)$$

$$u_r' = \frac{(1 + \mu_0)}{E_0} \frac{R_0^2}{R_0^2 - a^2} \left[\frac{1}{r} a^2 + (1 - 2\mu_0) r \right] p. \quad (13)$$

式中: E_0, μ_0 表示支护体的弹性模量和泊松比; 角标'表示支护体分量. 则支护体外径 R_0 处的位移为

$$u_{R_0} = \frac{(1 + \mu_0)}{E_0} \frac{R_0^2}{R_0^2 - a^2} \left[\frac{1}{R_0} a^2 + (1 - 2\mu_0) R_0 \right] p. \quad (14)$$

1.5 围岩-支护体耦合关系

根据支护体和围岩的变形协调关系有

$$u_0 = u_1 + u_{R_0}. \quad (15)$$

将式(2)、式(10)和式(14)带入式(15)可得支护反力 p 为

$$\frac{1}{E_0} \left[- (1 + \mu_0) \frac{1}{r} \frac{R_0^2 a^2}{(R_0^2 - a^2)} - (1 - \mu_p) r \frac{R_0^2}{R_0^2 - a^2} \right] p = AR_0 \left[\frac{(p_0 + C \operatorname{ctg} \varphi) (1 - \sin \varphi)}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}} - u^*. \quad (16)$$

上式为支护力 p 的隐式方程,可通过数值方式求解.当内摩擦角为 30° 时,可得

$$p = \left\{ \left[\left[\frac{C_2 C_3 (a^2 + C_4)}{(R_0^2 - a^2)} + u^* \right]^2 - \frac{4 C_3 (a^2 + C_4)}{(R_0^2 - a^2)} (C_2 u^* - C_1) \right]^{1/2} - \left(\frac{C_2 C_3 (a^2 + C_4)}{(R_0^2 - a^2)} + u^* \right) \right\} / \left\{ \frac{2 C_3 (a^2 + C_4)}{(R_0^2 - a^2)} \right\}. \tag{17}$$

式中: C_1, C_2, C_3, C_4 为常数, $C_1 = AR_0(p_0 + C \text{ctg}\varphi)(1 - \sin\varphi)$, $C_2 = C \text{ctg}\varphi$, $C_3 = \frac{(1 + \mu_0) R_0}{E_0}$, $C_4 = (1 - 2\mu_0) R_0^2$.

2 巷道支护影响因素分析

取围岩的力学参数: $p_0 = 50 \text{ MPa}$, $E = 1 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\sigma_c = 9.75 \text{ MPa}$, $R_0 = 3 \text{ m}$, $\varphi = 30^\circ$, $\mu = 0.32$; 支护体力学参数: $E_0 = 2 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\mu_0 = 0.167$, $a = 2.7 \text{ m}$.

图 2 所示为支护反力与支护位置之间的关系,由图中可以看出:支护位置对支护反力有显著影响,支护反力随着支护体离开挖面距离的增大而迅速减小,当支护体离开挖面的距离大于 4 倍洞跨时,支护反力趋向于零.可见,在支护体架设之前巷道围岩已经通过弹塑性变形等形式释放了部分能量,支护体架设位置离开挖面越远,在支护体架设之前巷道围岩释放的能量就越多,支护体架设后围岩释放的能量就越小,对应的支护反力也就越小.

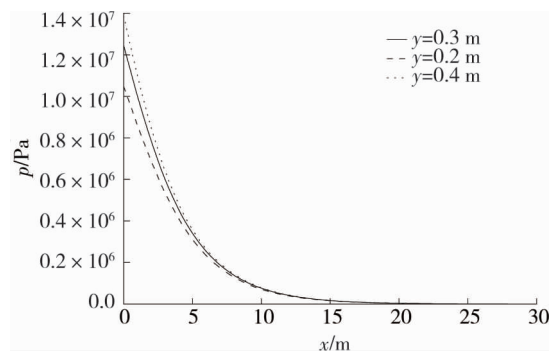


图 2 支护反力与支护位置

在巷道支护过程中,巷道位移和巷道围岩的塑性区半径是表征巷道围岩稳定-失稳的重要指标,一般巷道位移或巷道围岩的塑性区半径越大,围岩破损越严重,巷道也越不稳定.图 3 和图 4 所示为巷道位移和塑性区半径与支护位置之间的关系,由图中可以看出:巷道位移和巷道围岩的塑性区半径都随着支护体离开挖面距离的增大而增大,当支护体离开挖面的距离大于 4 倍洞跨时,巷道位移和巷道围岩的塑性区半径都保持不变.可见,支护体架设的越早,最终形成的巷道围岩径向位移和塑性区半径就越小,围岩越也稳定.同时结合图 2~图 4 可以看出:本文的计算结果与已有的研究结果^[8, 10-11]在定性上是一致的,这也说明了本文理论模型的合理性与正确性.

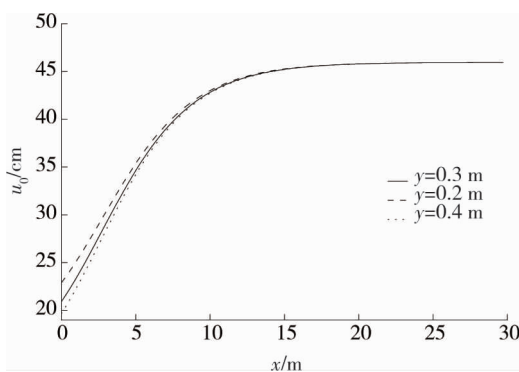


图 3 巷道位移与支护位置

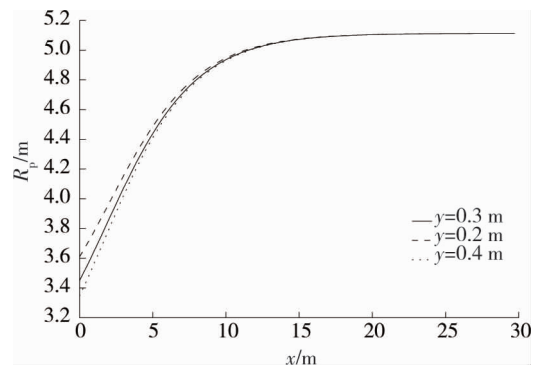


图 4 塑性区半径与支护位置

由以上分析可以看出:从巷道围岩稳定性的角度出发,支护体架设的越早越好.即离开挖面越近越好,但是从图 2 可以看出:支护体厚度为 0.3 m 时,当支护体架设过早时,支护体所承载的支护反力已超过其承载极限,支护体已经发生破坏,必须要增加支护体厚度,但这势必会增加支护成本.

3 巷道支护最优化设计方案

综合上述分析可以看出:在地下工程中,巷道围岩的稳定性与支护位置和支护体厚度等因素密切相关,支护体离开挖面的距离越小以及支护体厚度越大,巷道位移越小,巷道围岩也就越稳定.从安全的角度考虑,支护时间越早越好,支护体也越厚越好,但这势必会增加支护成本.因此何时支护,以及支护体厚度应该为多大,是巷道支护工程首先要解决的问题.

为此,在以上研究基础上,从保持围岩稳定和节约支护成本 2 方面考虑,建立巷道耦合支护的最优化设计模型.首先本着安全的角度,巷道围岩越稳定越好,这里用巷道位移来表征巷道围岩的稳定性,即,要求巷道位移越小越好.由式(10)和式(17)可得

$$\begin{aligned} \min u_0(R_0, x, y) = & \frac{2C_1C_3[(R_0 - y)^2 + C_4]}{(2R_0y - y^2)} \left/ \left\{ \left[\frac{C_2C_3[(R_0 - y)^2 + C_4]}{(2R_0y - y^2)} + u_0 \left[1 + \exp\left(-\frac{x}{1.10R_0}\right) \right]^{-1.7} \right]^2 - \right. \right. \\ & \frac{4C_3[(R_0 - y)^2 + C_4]}{(2R_0y - y^2)} \left\{ C_2u_0 \left[1 + \exp\left(-\frac{x}{1.10R_0}\right) \right]^{-1.7} - C_1 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{C_3C_2[(R_0 - y)^2 + C_4]}{(2R_0y - y^2)} - \\ & \left. \left. u_0 \left[1 + \exp\left(-\frac{x}{1.10R_0}\right) \right]^{-1.7} \right\}. \right. \end{aligned} \quad (18)$$

同时,要求支护体不发生破坏,即支护体不发生塑性变形,由 Mohr-Coulomb 准则可得

$$\sigma'_\theta(R_0 - y, x) - k\sigma'_r(R_0 - y, x) < \sigma'_0. \quad (19)$$

式中: σ'_0 为支护体抗压强度.

其次,从经济角度出发,巷道支护使用的材料越少越好,这里用单位厚度的支护体体积来表征,即

$$\min V(y) = \pi[R_0^2 - (R_0 - y)^2]. \quad (20)$$

基于以上分析可以看出:本文给出的巷道支护优化模型中的决策变量可取为支护体离开挖面距离 x 和支护体厚度 y ; 目标函数可取为巷道位移和单位厚度的支护体体积; 约束条件可取为支护体不发生塑性变形.则其对应的巷道耦合支护最优化模型可表示为^[17]

$$\begin{aligned} \min & V(y); \\ \min & u(R_0, x, y); \\ \text{s.t.} & \sigma'_\theta(R_0 - y, x) < \sigma_0; \\ & R_0 - y > 0; \\ & x, y > 0. \end{aligned} \quad (21)$$

可以看出:以上为多目标非线性的最优化问题,对于实际工程问题,可根据实际工程情况设定具体的决策变量、目标函数以及约束条件.

4 优化方案影响因素分析

下面将分析原岩应力、巷道断面以及支护体力学性质对优化模型的影响.其中,围岩和支护体的部分力学参数: $E = 1 \times 10^3$ MPa, $\sigma_c = 9.75$ MPa, $\varphi = 30^\circ$, $\mu = 0.32$, $\mu_0 = 0.167$, $\sigma'_0 = 10$ MPa.

4.1 原岩应力对巷道支护优化方案的影响

这里取 $R_0 = 3$ m, $E_0 = 2 \times 10^4$ MPa, 原岩应力 p_0 依次取为 10, 20, 30 MPa, 分析原岩应力对巷道支护优化方案的影响.表 1 所示为原岩应力对巷道支护优化设计参数的影响,由表中可以看出:本文给出的巷道支护优化设计模型,在保持巷道稳定的前提下,给出了支护体受力达到临界状态下的设计参数,最大限度的发挥了支护体的功效,达到了优化的目标和效果.

表 1 原岩应力对巷道支护优化设计参数的影响

p_0/Pa	x/m	y/m	u_0/m	$\sigma'_0 - \sigma'_\theta/\text{MPa}$
10	10.886	0.10	0.186 0	2.842E-14
	10.170	0.15	0.183 2	3.730E-14
	9.594	0.20	0.180 6	1.506E-10
	9.116	0.25	0.178 1	5.329E-15
	8.708	0.30	0.175 8	7.460E-14
	8.354	0.35	0.173 5	3.019E-14
	8.042	0.40	0.171 3	3.375E-14
	20	11.602	0.10	0.301 8
10.735		0.15	0.297 4	2.398E-13
10.064		0.20	0.293 2	1.154E-13
9.519		0.25	0.289 1	3.019E-14
9.062		0.30	0.285 3	4.796E-14
8.670		0.35	0.281 6	1.776E-15
8.328		0.40	0.278 0	1.047E-15
30		12.038	0.10	0.445 4
	11.066	0.15	0.438 8	8.704E-14
	10.332	0.20	0.432 6	1.243E-14
	9.745	0.25	0.426 6	3.019E-14
	9.258	0.30	0.420 9	4.796E-14
	8.844	0.35	0.415 5	5.861E-14
	8.484	0.40	0.410 3	5.329E-15

图 5 所示为不同原岩应力条件下支护体厚度与支护位置之间的关系,由图中可以看出:围岩应力对巷道支护优化有显著的影响,且这种影响会随着支护体厚度的增大而逐渐减小.在原岩应力不变的情况下,支护体厚度会随着支护位置的增大而减小;在原岩应力变化的情况下,支护体厚度和支护位置都会随着原岩应力的增大而增大.

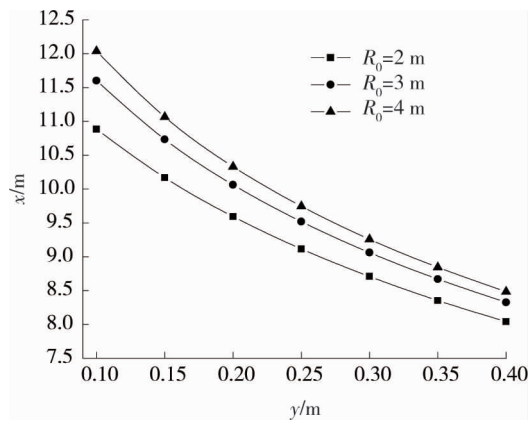


图 5 原岩应力对支护体厚度和支护位置的影响

4.2 巷道断面对巷道支护优化方案的影响

这里取 $p_0 = 20 \text{ MPa}$, $E_0 = 2 \times 10^4 \text{ MPa}$, 巷道半径 R_0 分别取为 2, 3, 4 m, 分析巷道断面对巷道支护优化方案的影响.表 2 所示为巷道断面对巷道支护优化设计参数的影响,由表中可以看出,巷道断面对围岩支护有显著的影响.

表 2 巷道断面对巷道支护优化设计参数的影响

R_0/m	x/m	y/m	u_0/m	$\sigma'_0 - \sigma'_\theta / \text{MPa}$
2	10.735	0.10	0.198 2	1.953E-14
	9.778	0.15	0.194 1	2.131E-14
	9.062	0.20	0.190 2	4.618E-14
	8.493	0.25	0.186 5	1.403E-13
	8.025	0.30	0.183 1	5.506E-14
	7.630	0.35	0.179 9	3.907E-14
	7.290	0.40	0.176 9	5.329E-15
3	11.602	0.10	0.301 8	5.506E-14
	10.735	0.15	0.297 4	2.398E-13
	10.064	0.20	0.293 2	1.154E-13
	9.519	0.25	0.289 1	3.019E-14
	9.062	0.30	0.285 3	4.796E-14
	8.670	0.35	0.281 6	1.776E-15
	8.328	0.40	0.278 0	1.047E-15
4	12.151	0.10	0.405 5	8.881E-15
	11.361	0.15	0.400 9	1.030E-13
	10.735	0.20	0.396 5	1.350E-13
	10.218	0.25	0.392 3	3.375E-14
	9.778	0.30	0.388 2	6.039E-14
	9.397	0.35	0.384 2	1.048E-13
	9.062	0.40	0.380 4	4.618E-14

图 6 所示为不同巷道断面情况下支护体厚度与支护位置之间的关系,由图中可以看出:在巷道断面不变的情况下,支护体厚度随支护位置的增大而减小;在巷道断面改变的情况下,支护体厚度和支护位置都随着巷道断面的增大而增大.

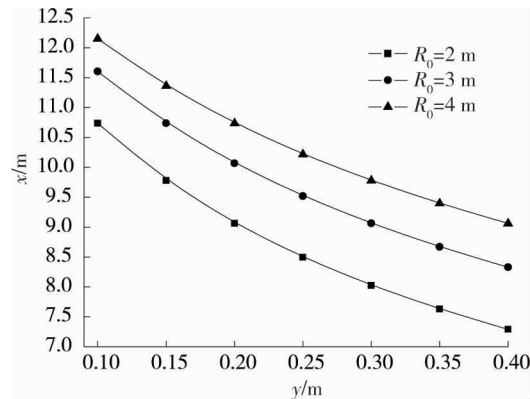


图 6 巷道断面对支护体厚度和支护位置的影响

4.3 支护体弹模对巷道支护优化方案的影响

这里取 $R_0 = 3 \text{ m}$, $p_0 = 20 \text{ MPa}$, 支护体弹性模量 E_0 依次取为 2×10^4 , 3×10^4 , $4 \times 10^4 \text{ MPa}$, 分析支护体弹性模量对巷道支护优化方案的影响.表 3 所示为支护体弹模对巷道支护优化设计参数的影响,由表中可以看出,支护体弹模对巷道支护有着显著的影响.

图 7 所示为不同弹性模量情况下支护体厚度与支护位置之间的关系,由图中可以看出:在支护体弹模不变的情况下,支护体厚度随支护位置的增大而减小;在支护体弹模改变的情况下,支护体厚度和支护位置都随着巷道断面的增大而增大.

表 3 支护体弹模对巷道支护优化设计参数的影响

E_0/MPa	x/m	y/m	u_0/m	$\sigma'_0 - \sigma'_\theta/\text{MPa}$
2×10^4	11.298	0.10	0.301 8	6.394E-14
	10.498	0.15	0.297 4	3.552E-15
	9.868	0.20	0.293 2	8.171E-14
	9.352	0.25	0.289 1	8.881E-15
	8.916	0.30	0.285 3	3.552E-14
	8.540	0.35	0.281 6	3.552E-14
	8.211	0.40	0.278 0	5.329E-15
3×10^4	11.602	0.10	0.301 8	5.506E-14
	10.735	0.15	0.297 4	2.398E-13
	10.064	0.20	0.293 2	1.154E-13
	9.519	0.25	0.289 1	3.019E-14
	9.062	0.30	0.285 3	4.796E-14
	8.670	0.35	0.281 6	1.776E-15
	8.328	0.40	0.278 0	1.047E-15
4×10^4	11.821	0.10	0.301 8	1.421E-13
	10.902	0.15	0.297 4	4.618E-14
	10.200	0.20	0.293 2	2.131E-14
	9.634	0.25	0.289 1	8.881E-15
	9.162	0.30	0.285 3	1.421E-14
	8.759	0.35	0.281 6	1.652E-13
	8.408	0.40	0.278 0	5.329E-15

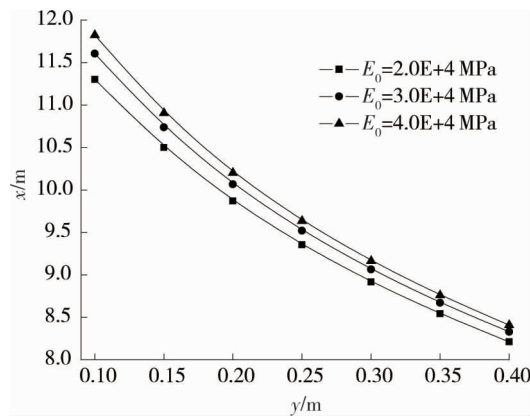


图 7 支护体弹模对支护体厚度和支护位置的影响

5 结论

1) 随着支护体离开挖面的距离增大,巷道位移和塑性区半径逐渐越大,而支护反力和支护体位移则逐渐减小.因此支护体架设的越晚,支护体的变形也就越小,由支护体变形而产生的支护反力也越小,围岩也越不稳定.

2) 通过建立巷道支护的优化设计模型,在满足支护体不被破坏并发挥最大效用的前提下,给出了巷道支护的设计参数,达到了巷道优化设计的效果和目的.

3) 本文仅是从理想化的力学模型出发,与实际工程问题仍有一定的差距.但结合文本的理论模型中可以看出,巷道支护过程是一个复杂的耦合过程,在实际工程中应结合实际要求,合理地架设支护体.

参考文献:

- [1] 伍永平.大倾角煤层开采"R—S—F"系统动力学控制基础研究[M].西安:陕西科学技术出版社,2006.
- [2] 康红普,王金华,李玉梅,等.掘进工作面围岩应力分布特征及其与支护的关系[J].煤炭学报,2009,23(7):145-150.
- [3] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J].煤炭学报,2012,37(4):535-542.
- [4] 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.
- [5] 罗生虎,伍永平,张嘉凡.围岩-锚固体流变控制机制及支护最优化设计[J].岩土力学,2017,38(1):124-132.
- [6] 何满潮.深部软岩工程的研究进展与挑战[J].煤炭学报,2014,39(8):1409-1417.
- [7] 于永江,王大国,李强,等.煤岩体的弹塑脆性本构模型及其数值试验[J].煤炭学报,2012,37(4):585-589.
- [8] 罗生虎,李少华,张嘉凡.基于扩容和软化的围岩-支护体耦合作用机理[J].煤炭技术,2015(11):60-61.
- [9] 侯公羽.围岩-支护作用机制评述及其流变变形机制概念模型的建立与分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(s2):3618-3629.
- [10] 侯公羽,李晶晶.弹塑性变形条件下围岩-支护相互作用全过程解析[J].岩土力学,2012,33(4):961-970.
- [11] 侯公羽,牛晓松.基于 Levy-Mises 本构关系及 Hock-Brown 屈服准则的轴对称圆巷理想弹塑性解[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):765-777.
- [12] 伍国军,陈卫忠,杨建平,等.基于软弱夹层损伤破坏模型的软岩巷道支护优化研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(s2):4129-4135.
- [13] 罗生虎,伍永平,张嘉凡.软岩巷道耦合支护最优化设计粘弹性分析[J].西安科技大学学报,2016,36(6):759-768.
- [14] Carranza-Torres C, Fairhurst C. The elastoplastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(6):777-809.
- [15] 陈惠发,萨里普.弹性与塑性力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [16] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等.地下工程围岩稳定分析[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [17] 解可新,韩立兴,林友联.最优化方法[M].天津:天津大学出版社,1997.