

李英明,张 瀚,孟祥瑞. 软岩巷道二次支护时机研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 47–52. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0465
Li Yingming, Zhang Han, Meng Xiangrui. Research on secondary support time of soft rock roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 47–52. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0465

软岩巷道二次支护时机研究

李英明^{1,2} 张 瀚² 孟祥瑞¹

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿业工程博士后科研流动站, 安徽 淮南 232001; 3. 运城职业技术学院, 山西 运城 044000)

摘 要: 为了准确地确定二次支护时机, 基于软岩巷道工程支护原理, 分析了软岩巷道支护过程中围岩应力与强度调整过程, 结合软岩巷道流变数学力学模型, 并以弹性区、塑性区、破裂区的力学行为与岩石全应力–应变的对应关系作为基础, 最终确定了二次支护最佳时间的理论公式。分析了二次支护最佳时间的影响因素及规律, 并将二次支护时机理论公式应用于工程实践。结果表明, 按照该理论公式设计二次支护时机能够较好地控制巷道围岩的稳定性。

关键词: 二次支护时机; 软岩巷道; 流变模型; 围岩稳定性

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253–9993(2015)S1–0047–06

Research on secondary support time of soft rock roadway

LI Ying-ming^{1,2}, ZHANG Han², MENG Xiang-rui¹

(1. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Mining Engineering Center for Post-doctoral Studies, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Yuncheng Polytechnic College, Yuncheng 044000, China)

Abstract: In order to determine accurately secondary support time, the adjustment process of surrounding rock stress and strength in the course of supporting is analyzed based on the support principle of soft rock roadway. Based on the rheological model of soft rock roadway and the corresponding relationship between the mechanics behaviors of elastic zone, plastic zone and fractured zone and rock complete stress-strain process, the theoretical formula of secondary support time is proposed. Then the influential factors and rules of secondary support time are analyzed. To validate the study, the secondary support time theory is applied to engineering practice. Results show the roadway maintains a good stability according to the proposed secondary support time.

Key words: secondary support time; soft rock roadway; rheological model; engineering practice

我国许多巷道或隧道都需要在软弱围岩进行开挖, 对于煤矿等地下工程建设尤为普遍。由于软岩的流变特征, 巷道往往向开挖空间逐渐发生形变; 围岩流动的变形, 会导致岩体内部产生新裂纹, 裂纹不断扩展使围岩强度降低, 由此容易导致巷道围岩失稳破坏; 并且由于裂隙的产生, 一些软岩巷道会发生渗水乃至透水现象, 加大了软岩巷道的治理难度。

针对软岩巷道, 由于围岩具有较强的流变性, 往

往采用一次支护仍达不到稳定性要求, 通常采用二次支护的方法, 在一次支护后围岩剧烈变形释放巨大塑性性能, 然后再进行二次支护^[1–5]。但工程实践表明, 二次支护在时间和强度上很难与围岩变形保持协调, 二次支护过早, 巨大的软岩塑性应变还不能得到充分释放, 二次支护强度难以抗拒围岩巨大的塑性变形而产生破坏; 二次支护过晚, 塑性应变能虽然得到释放, 但围岩自身承载能力随之降低, 转加到支护体上的载

荷将会加大。因此亟需解决二次支护在时间和强度上与围岩特性之间的耦合问题,科学合理地选择二次支护最佳时机^[6-9]。本文以巷道围岩分区的力学行为与岩石全应力-应变的对应关系为基础,运用软岩巷道流变数学力学模型,最终确定了二次支护最佳时间的理论公式,对于二次支护最佳时机的选择具有较大的理论及现实指导意义。

1 软岩巷道二次支护时间的确定

二次支护不同于一次支护,特别表现在支护时机的选择,二次支护发生在软岩形变释放巨大变形能之后,此时能取得较好的支护效果。但另一方面,为了维持巷道的稳定性,岩体自身的承载能力必须能够保证岩体不至于失稳。

1.1 软岩巷道工程支护原理

假设巷道开挖后围岩的存在合力 P_T 使围岩向临空区运动,该合力包括重力、水作用力、膨胀力、构造应力和工程偏应力等,依据文献[5]软岩的巷道支护原理,通过如下公式表示:

$$P_T = P_D + P_R + P_S \quad (1)$$

式中 P_T 为巷道开挖后使围岩向临空区运动的合力; P_D 为以变形的形式转化的工程力,软岩主要是塑性能以变形的形式释放; P_R 为围岩自身的承载力; P_S 为围岩工程支护力。

对式(1)进行分析可知:巷道开挖后,围岩体所受的合力 P_T 由 P_D 、 P_R 和 P_S 三部分共同分担,为保证巷道稳定需满足条件: $(P_R + P_S) > (P_T - P_D)$;其中若要实现巷道支护优化, $P_S \rightarrow \min$,由此 $(P_R + P_D) \rightarrow \max$ 。

1.2 最佳支护时间的确定

依据文献[5,6]的定义,最佳支护时间 T_s 即为 $(P_R + P_D) - t$ 曲线峰值点所对应的时间,考虑到工程实践中难以确定具体的时间点,提出了最佳支护时间段,如图1所示 $T_{s1} \sim T_{s2}$ 的时间段即为最佳时间段。

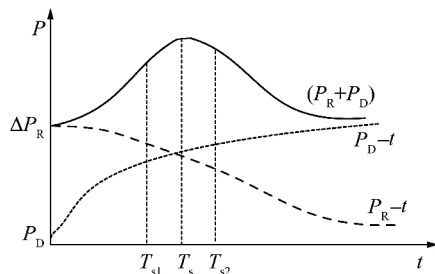


图1 最佳支护时间及最佳支护时间段

Fig. 1 Optimal support time and the optimal support time interval

根据以上分析可知,若得知 $(P_R + P_D) - t$ 曲线峰值点所对应的时间即可求得最佳支护时间。但工程实践中由于影响因素较多,较难求出关于 P_R 、 P_D 的具体关系表达式,因此参考此方法^[5]准确量化最佳支护时间较为困难。

考虑到软岩巷道支护过程是一个应力调整和围岩强度调整的过程,巷道开挖以后,围岩应力重新分布,巷道附近围岩应力高度集中,致使该区域附近围岩屈服进入塑性状态,应力集中区向纵深偏移;当应力集中的强度大于围岩屈服强度时,又产生新的塑性区,如此塑性区不断向纵深发展,若不采取适当支护措施,临空塑性区将随变形加大而出现松动破坏。随着应力集中向深部偏移,应力集中程度降低,同时深部岩石处于三轴应力状态,围岩强度大大提高,其破坏可能性大大降低,所以在巷道支护中,要尽量使巷道围岩出现稳定塑性区,严格限制松动破坏区的发展。那么,最佳支护时间力学含义即在原有力学状态的基础上最大限度发挥塑性区承载能力而不进一步出现松动破坏时所对应的时间。

根据围岩松动圈理论,巷道围岩弹性区、塑性区及破裂区的力学行为与岩石的全应力-应变曲线的相应段是对应的^[10-11],如图2所示,岩石进入塑性阶段的屈服极限约为峰值强度的 $2/3$,当岩石承载的应力进一步扩大直至大于或等于峰值强度时,岩石发生松动破坏。根据上述最佳支护时间的分析,需要保证巷道围岩最大限度的进入塑性区但不能出现松动破坏,由此,最佳支护时间可通过力学公式表示为

$$\frac{2}{3} \sigma_{\theta_{\text{rec}}} \leq \sigma_t \leq \sigma_{\theta_{\text{rec}}} \quad (2)$$

式中 $\sigma_{\theta_{\text{rec}}}$ 为巷道围岩三轴应力极限; σ_t 为 t 时刻围岩应力。

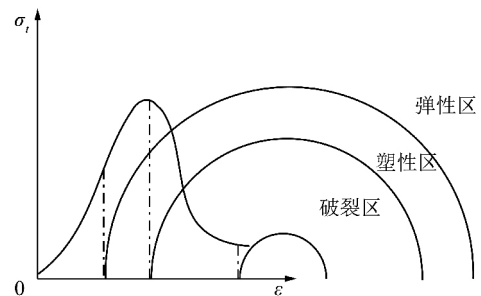


图2 巷道围岩分区

Fig. 2 Zone of roadway surrounding rock

2 软岩巷道流变数学力学模型

根据以上分析,确定软岩巷道二次支护时间需要围绕围岩长期强度特征及围岩应力分布情况进行研

究^[12-16]。通过合理建立软岩巷道流变数学力学模型,掌握软岩巷道流变条件下各个时间的围岩强度和应力分布关系,科学合理地确定二次支护时机。

2.1 岩石长期强度衰减特征

一般而言,岩石发生破坏主要存在 2 种情况:①岩石承受的荷载大于其瞬时强度的情况,岩石很快就发生破坏;②流变作用的影响,岩石的长期强度会随着外载作用时间的延长而降低,并最终低于岩石所受的荷载,此种情况特征是岩石并非在初期就发生破坏而需要经过较长的一段时间。

文献[14-15]认为岩石长期强度随着时间呈负指数函数衰减(图 3),岩石的长期强度满足:

$$\sigma_{ct'} = \sigma_{c0} \exp\left(\frac{-at}{b+t}\right) \quad (3)$$

式中 σ_{c0} 为岩石瞬时抗压强度; $\sigma_{c\infty}$ 为岩石的长期抗压强度; $\sigma_{ct'}$ 为任意时间 t' 的岩石抗压强度; a, b 均为待定常数。

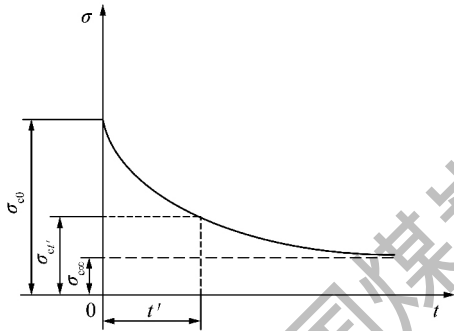


图 3 岩石长期强度曲线

Fig. 3 Long-term strength curve of rock

2.2 巷道非线性流变模型

对于地下空间软弱围岩巷道,可进行简化,假设巷道围岩为连续、均质、各向同性的理想弹塑性体,存在蠕变性和黏性行为;在无限长的巷道长度里,围岩性质一致;埋深大于或等于 20 倍的巷道半径,水平原岩应力可简化为均布应力;基于上述假设,本文所要研究的问题就简化为轴对称的平面应变圆孔问题,其力学模型图 4 所示。

考虑到巷道实际开挖过程中,巷道围岩受到断面径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 和巷道轴向应力 σ_z 的作用,分别相当于三向应力状态下最小主应力 σ_3 ,最大主应力 σ_1 和中间主应力 σ_2 ,即

$$\sigma_r < \sigma_z < \sigma_\theta \quad (4)$$

应用 Mohr - Coulomb 准则,则巷道断面塑性区内任一点至巷道轴线距离为 r 的径向应力 σ_r 及切向应力 σ_θ 解析解^[16]为

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

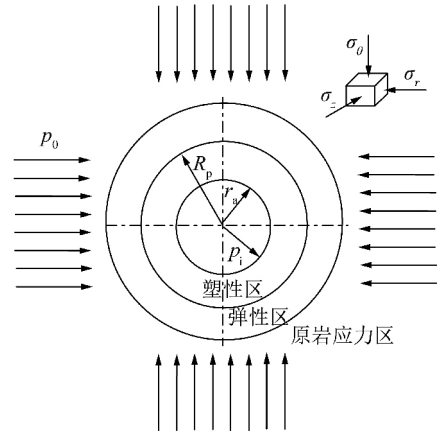


图 4 巷道围岩力学模型

Fig. 4 Surrounding rock of roadway model diagram

$$\sigma_\theta = (p_i + c \cot \varphi) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r}{r_a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (6)$$

式中 c 为材料黏聚力; φ 为材料内摩擦角; r_a 为巷道断面半径; p_i 为初次支护阻力。

依据文献[14,16]的做法,此时巷道围压应力 σ_t 可通过径向应力 σ_r 及切向应力 σ_θ 表示为

$$\sigma_t = \sigma_\theta - \sigma_r = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (p_i + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (7)$$

2.3 岩石单轴应力极限与三轴应力极限的转换

利用莫尔极限应力圆可实现岩石单轴应力极限向三轴应力极限的转化,其莫尔极限应力圆如图 5 所示。

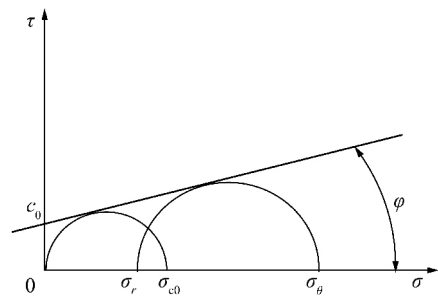


图 5 线性莫尔强度理论示意

Fig. 5 Schematic diagram of linear Mohr strength theory

依照岩石三轴应力状态下最大主应力和最小主应力的关系,参考文献[14]的做法,可知岩石瞬时三轴应力极限(强度) $\sigma_{\theta rc0}$ 满足:

$$\sigma_{\theta rc0} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2\sigma_r \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad \sigma_{c0} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

由于岩石流变过程中围岩性质会发生变化,则考虑岩石瞬时强度,可令 c 为初始黏聚力 c_0 , φ 等于初始内摩擦角 φ_0 ,若用 σ_{c0} 表示 $\sigma_{\theta rc0}$,则上式可变为

$$\sigma_{\theta r c 0} = \sigma_{c 0} + \frac{2\sigma_r \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} \quad (8)$$

联立式(3)、(8)可得岩石三轴应力条件下岩石的长期强度 $\sigma_{\theta r c t}$:

$$\sigma_{\theta r c t} = \sigma_{\theta r c 0} \exp\left(\frac{-at}{b+t}\right) = \left(\sigma_{c 0} + \frac{2\sigma_r \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}\right) \exp\left(\frac{-at}{b+t}\right) \quad (9)$$

2.4 最佳支护时间的确定

根据式(2), 软岩巷道围岩应力需满足:

$$\frac{2}{3}\sigma_{\theta r c t} \leq \sigma_t \leq \sigma_{\theta r c t}, \text{ 并联立式(7)、(9)可得}$$

$$\frac{2}{3}\left(\sigma_{c 0} + \frac{2\sigma_r \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}\right) e^{\frac{-at}{b+t}} \leq \frac{2\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (p_i + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_a}\right)^{\frac{2\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \leq \left(\sigma_{c 0} + \frac{2\sigma_r \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}\right) e^{\frac{-at}{b+t}} \quad (10)$$

由于围岩应力最大值出现在塑性区与弹性区交界的半径 R 上, 而此时 R 满足

$$\frac{R}{r_a} = \left[\frac{(p_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(p_i + c \cot \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (11)$$

对于式(10)令 $r = R$, 并将式(11)代入其中可得

$$\frac{2(p_0 \sin \varphi + c \cos \varphi)}{\sigma_{c 0} + 2p_0 \sin \varphi - (c \cos \varphi + p_i)} \frac{\sin 2\varphi}{1 - \sin \varphi} \leq e^{\frac{-at}{b+t}} \leq \frac{3(p_0 \sin \varphi + c \cos \varphi)}{\sigma_{c 0} + 2p_0 \sin \varphi - (c \cos \varphi + p_i)} \frac{\sin 2\varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

由于软岩巷道开挖过程中, 围岩应力重新分布, 围岩裂隙产生扩容和扩展, 围岩力学性质随之不断恶化^[17-18], 此时可令围岩强度参数 c, φ 分别满足 $c = mc_0, \varphi = n\varphi_0$, 并令

$$A = \frac{p_0 \sin \varphi + c \cot \varphi}{\sigma_{c 0} + 2p_0 \sin \varphi - (c \cos \varphi + p_i)} \frac{\sin 2\varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (13)$$

式中, m 为长期黏聚力与瞬时黏聚力的比值; n 为长期内摩擦角与瞬时长内摩擦角的比值; 将 A 代入式(12)中, 最佳支护时间 T_s 可表示为

$$\frac{-b \ln(3A)}{\ln(3A) + a} \leq T_s \leq \frac{-b \ln(2A)}{\ln(2A) + a} \quad (14)$$

3 最佳二次支护时间影响因素分析

通过式(13)、(14)分析可以看出影响二次支护时间的因素有: 巷道的原岩应力 p_0 、初次支护阻力 p_i 、围岩体瞬时抗压强度 $\sigma_{c 0}$ 、岩体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。考虑到从巷道开挖到巷道支护整个过程中, 岩

体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 不断发生着变化, 是影响巷道围岩稳定和二次支护时间确定的关键因素, 下文主要围绕黏聚力 c 和内摩擦角 φ (包括 c_0, φ_0, m, n) 进行研究。

3.1 算 例

采用某理想圆形巷道作为该算例的计算模型, 巷道半径 $r_a = 4$ m, 所受原岩应力 $p_0 = 25$ MPa, 初次支护阻力 $p_i = 1$ MPa, 经大量单轴抗压蠕变实验可知岩石长期强度待定量取值范围一般为: $a = 0 \sim 3, b = 50 \sim 150$, 本算例中取 $a = 0.5, b = 100$ 。本算例中围岩岩体物理力学参数取值范围为: $c_0 = 0.5 \sim 5$ MPa, $\varphi_0 = 15^\circ \sim 50^\circ, m = 0.2 \sim 0.8, n = 0.2 \sim 0.8$ 。

3.2 影响因素分析

将最佳时间的关系表达式(14)表示为 $T_{s1} \leq T_s \leq T_{s2}$, 令

$$T_{s1} = \frac{-b \ln(3A)}{\ln(3A) + a} \quad (15)$$

$$T_{s2} = \frac{-b \ln(2A)}{\ln(2A) + a} \quad (16)$$

基于上述算例及式(15)、(16), 通过联立各参数可得到如图6、7所示的关系曲线。可以看出, 当巷道围岩的瞬时强度参数 c_0, φ_0 为定值时, T_{s1} 及 T_{s2} 分别随着 m 或 n 的增加而降低, 即随着围岩长期强度参数的不断恶化, T_{s1} 及 T_{s2} 随之增加; 当 c_0 或 φ_0 较小时, 其对应的 T_{s1} 及 T_{s2} 的变化幅度较小; 而当 c_0 或 φ_0 取值不断加大时, 相对应的 T_{s1} 及 T_{s2} 的变化幅度不断增加。

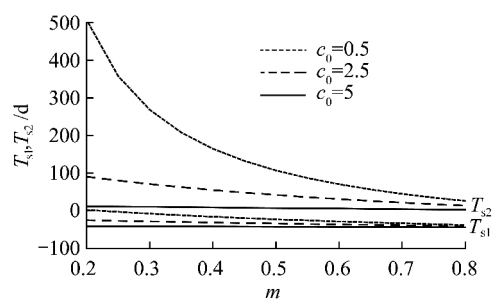


图6 黏聚力对 T_{s1} 及 T_{s2} 的影响曲线

Fig. 6 Relationship curves between cohesion and T_{s1}, T_{s2}

进一步研究发现, 绝大多数情况下 T_{s1} 均为负值; 而只有在下列情况下 T_{s1} 才大于 0: ① 当岩体瞬时黏聚力 c_0 增加到 5, 长期黏聚力降低到瞬时黏聚力的 20% 时, T_{s1} 为 2.499 79 d; ② 当岩体瞬时长内摩擦角 φ_0 增加到 50° , 长期值降低到瞬时值的 20% 时, T_{s1} 为 10.224 8 d。

综合分析可知, 黏聚力 c 对 T_{s1} 及 T_{s2} 影响曲线与内摩擦角 φ 对 T_{s1} 及 T_{s2} 影响曲线相似, T_{s1} 及 T_{s2} 均随

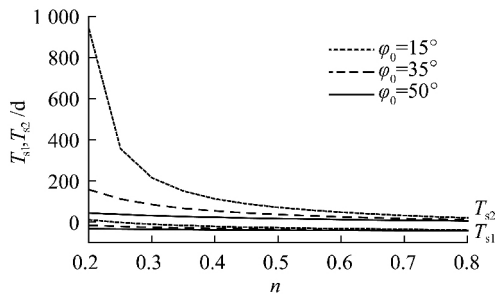
图7 内摩擦角对 T_{sl} 及 T_{s2} 的影响曲线

Fig. 7 Relationship curve between inner friction angle and

 T_{sl}, T_{s2}

着围岩长期强度参数 c 或 φ 的降低而增加,符合二次支护过程中围岩需要充分发生形变释放塑性性能这一规律;而最佳支护时间下限 T_{sl} 只有在岩体瞬时强度参数(c_0, φ_0)较大长期围岩强度参数(c, φ)较小时才具有参考意义。

4 工程应用

淮北矿业集团祁南矿胶带运输大巷,该巷道位于井田西南部,平均埋深为 550 m。巷道围岩以细砂岩为主,岩层节理及裂隙较发育,具有松软破碎岩层的特性。初期采用一次支护,即锚、网、喷联合支护,由于巷道变形过大,且持续时间长,后决定采用二次支护。依据前述最佳支护时间理论公式,经现场观测及实验研究,取参数 $p_0 = 13 \text{ MPa}$, $p_1 = 0.5 \text{ MPa}$, $\rho_0 = 2.5 \text{ MPa}$, $\varphi_0 = 30^\circ$, $m = 0.35$, $n = 0.60$, $a = 0.5$, $b = 100$ 。将这些参数代入式(13)、(14)中,得到理论二次支护最佳时间 $0 \leq T_s \leq 14.2003 \text{ d}$,但考虑到实际支护过程中要使围岩充分变形释放巨大塑性性能,二次支护最佳时间取值应接近理论值上限但不能超过该上限值。因此对理论结果进一步修正,确定二次支护最佳时间为 13~14 d,实际中一次支护后 14 d,采用“锚带网索喷+注”联合支护形式进行二次支护。

初期未进行二次支护段与后期改为二次支护施工段都进行了巷道表面位移观测,观测结果如图 8、9 所示,由图 8 可知整个观测过程中,巷道初期支护后两帮相对移近量急剧增加,在二次支护前 2 种支护方式两帮移近量非常接近;一次支护后 14 d 进行二次支护,通过观测发现二次支护后巷道两帮变形速度有了较大幅度的减小,基本处于稳定状态;与此同时,无二次支护巷道断面两帮相对移近量仍大幅增加,直至达到 35 d 左右,两帮移近量增长幅度开始减缓,50 d 后两帮移近量增长幅度又有增大趋势。

一次支护方式与二次支护方式巷道顶底板移近情况如图 9 所示,巷道顶底板移近量随时间变化曲线

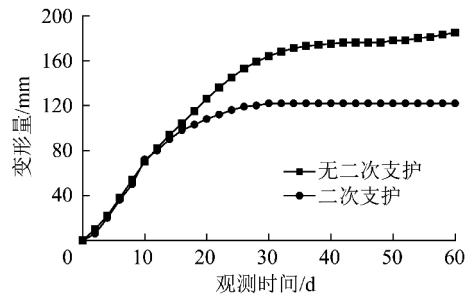


图8 二次支护前、后巷道两帮相对移近量

Fig. 8 Both sides convergence of roadway with and without secondary support

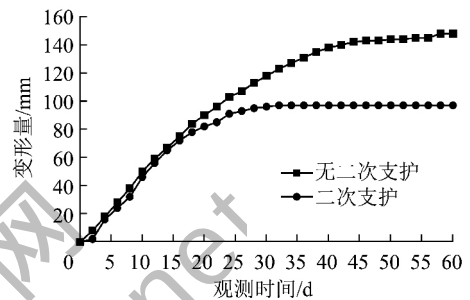


图9 二次支护前、后巷道顶、底板相对移近量

Fig. 9 Roof to floor convergence of roadway with and without secondary support

与两帮的曲线相似,整个变化规律大体一致,深入比较可知,二次支护后顶、底板最大移近量为 97 mm,而两帮相对移近量最大为 125 mm;且经过二次支护后巷道两帮及顶、底板变形速度均有较大幅度的减小,并且在 30 d 后围岩变形速度基本都小于 0.32 mm/d,此时可认为巷道基本保持稳定。通过巷道表面位移观测表明二次支护最佳时间的理论公式是合理,科学合理地选择支护时机,是实现二次支护在时间和强度上与围岩特性之间耦合的重要条件。

5 结 论

(1) 基于软岩巷道工程支护原理,分析了软岩巷道支护过程中围岩应力与强度调整过程,结合软岩巷道流变数学力学模型,并以弹性区、塑性区、破裂区的力学行为与岩石全应力-应变的对应关系作为基础,最终确定了二次支护最佳时间的理论公式。

(2) 通过对二次支护最佳时间的研究发现,围岩体的强度参数对二次支护时间的确定有着重要影响:岩体的瞬时强度参数(c_0, φ_0)越大,破坏时强度参数下降的越多,二次支护时间也就相应越大。

(3) 将理论公式运用到祁南矿胶带运输大巷,确定最佳二次支护时间为 13~14 d;通过巷道表面位移观测表明该理论公式是合理的,说明通过该理论公式确定二次支护时间能够较好的控制围岩的稳定性,为

实现二次支护在时间和强度上与围岩特性之间耦合创造了条件。

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 Jianbiao,Wang Xiangyu,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] 李大伟,侯朝炯,柏建彪.大刚度高强度二次支护巷道控制机理与应用[J].岩土工程学报,2008,30(7):1072-1078.
Li Dawei,Hou Chaojiong,Bai Jianbiao. Control mechanism and application of doubly supported roadways with large rigidity and high strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(7):1072-1078.
- [3] 常庆粮,周华强,李大伟.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):169-172.
Chang Qingliang,Zhou Huaqiang,Li Dawei. Stability principle of extremely rigid secondary support for soft and broken rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2007,24(2):169-172.
- [4] 方新秋,赵俊杰,洪木银.深井破碎围岩巷道变形机理及控制研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):1-7.
Fang xinqiu,Zhao Junjie,Hong Muiyin. Failure mechanism and control measure of roadway deformation with fractured surrounding rock in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(1):1-7.
- [5] 何满潮,孙晓明.中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M].北京:科学出版社,2004.
He Manchao,Sun Xiaoming. Design and construction of support & protection engineering of coal mine in China[M]. Beijing: Science Press,2004.
- [6] Zhao Zenghui,Wang Weiming,Wang lei. Response models of weakly consolidated soft rock roadway under different interior pressures considering dilatancy effect[J]. Journal of Central South University,2013,20(12):3736-3744.
- [7] 张周平,余伟健,高 谦.金川深部工程围岩支护时机与参数设计研究[J].金属矿山,2008,2(5):40-44.
Zhang Zhouping,Yu Weijian,Gao Qian. Study on time and parameter design for engineering support of wall rock at depth in Jinchuan Mine[J]. Metal Mine,2008,2(5):40-44.
- [8] 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 Weizhong,Tan Xianjun,Lü Senpeng 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.
- [9] 王永刚,任伟中.软弱围岩的蠕变损伤特性及最佳支护时间[J].中国铁道科学,2007,28(1):50-55.
Wang Yonggang,Ren Weizhong. Creep damage characteristics and decision of optimum support time for weak surrounding rock creep damage characteristics and decision of optimum support time for weak surrounding rock[J]. China Railway Science,2007,28(1):50-55.
- [10] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
Cai Meifeng,He Manchao,Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press,2002.
- [11] 何满潮,袁和生,刘东燕.中国煤矿锚杆支护理论与实践[M].北京:科学出版社,2004.
He Manchao,Yuan Hesheng,Liu Dongyan. Bolt support theory and practice of China coal mine[M]. Beijing: Science Press,2004.
- [12] 贺永年,韩立军,王衍森.岩石力学简明教程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
He Yongnian,Han Lijun,Wang Yansen. Brief course of rock and soil mechanics[M]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology Press,2010.
- [13] 蒋斌松,张 强,贺永年.深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):982-986.
Jiang Binsong,Zhang Qiang,He Yongnian. 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,2007,26(5):982-986.
- [14] 万志军,周楚良,马文顶,等.巷道/隧道围岩非线性流变数学力学模型及其初步应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(5):762-767.
Wan Zhijun,Zhou Chuliang,Ma Wending et al. Nonlinear rheological mathematical-mechanical of surrounding rock deformation of roadways or tunnels and its preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(5):762-767.
- [15] 万志军,周楚良,罗兵全.软岩巷道围岩非线性流变数学力学模型[J].中国矿业大学学报,2004,33(4):468-472.
Wan Zhijun,Zhou Chuliang,Luo Bingquan. A non-linear rheologic mathematical mechanical model of roadway's surrounding rock in weak rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2004,33(4):468-472.
- [16] 陈彦光,陆士良.中国煤矿巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994.
Chen Yanguang,Lu Shiliang. Tunnel surrounding rock control of China coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology Press,1994.
- [17] 彭苏萍,王希良,刘咸卫.“三软”煤层巷道围岩流变特性试验研究[J].煤炭学报,2001,26(2):149-152.
Pen Suping,Wang Xiliang,Liu Xianwei. Research on rheological characteristics of rock in the weak coal-bearing strata[J]. Journal of China Coal Society,2001,26(2):149-152.
- [18] 徐卫亚,杨圣奇.节理岩石剪切流变特性试验与模型研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):5536-5542.
Xu Weiya,Yang Shengqi. Experiment and modeling investigation on shear rheological property of joint rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(2):5536-5542.