

文章编号: 1000-7598-(2006) 07-1061-05

深部软岩巷道锚网索耦合支护非线性设计方法研究

孙晓明¹, 何满潮^{1,2}, 杨晓杰¹

(1. 中国矿业大学(北京校区) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江科技学院, 哈尔滨 150027)

摘 要: 由于深部软岩巷道工程岩体介质已进入塑性大变形阶段, 其破坏主要是由于支护体与围岩之间的不耦合造成的, 因此提出了锚网索耦合支护非线性设计方法。与传统的线性参数设计不同, 该方法在变形设计的基础上, 针对最佳耦合过程进行强度设计, 提出锚网索耦合支护参数, 并在施工过程中通过反馈设计进行修正。与新奥法不同, 采用该设计方法进行锚网索耦合支护既能充分发挥锚网主动支护浅部围岩的能力, 又能通过锚索调动深部围岩强度的支护能力, 从而可以实现软岩巷道支护体与围岩在强度上、刚度上和结构上的耦合, 保证软岩巷道围岩的稳定性。

关 键 词: 深部; 软岩巷道; 锚网索耦合支护; 非线性力学; 支护设计方法

中图分类号: TU 223

文献标识码: A

Research on nonlinear mechanics design method of bolt-net-anchor coupling support for deep soft rock tunnel

SUN Xiao-ming¹, HE Man-chao^{1,2}, YANG Xiao-jie¹

(1. School of Mechanics, Architecture & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. Heilongjiang University of Science & Technology, Haerbin 150027, China)

Abstract: For the engineering rock mass media of soft rock tunnel has been in the plastic and large deformation stage and its deformation and fail are caused by the un-coupling between support and surrounding rock, a nonlinear mechanics design method of bolt-net-anchor coupling support is put forward; and it includes deformation design, strength design and feedback design. This design method is different from the classic design method, it is the parameters design. The coupling support parameters of bolt-net-anchor got by strength design are based on the optimum coupling procedure got by deformation design, and can be modified by feed back design in the supporting period of tunnel. Different from the new Austrian tunneling method, using this design method can realized the coupling on the strength, rigidity and structure between support and surrounding rock by bolt-net support interior surrounding rock and anchor to mobilize the intension of exterior rock.

Key words: deep; soft rock tunnel; bolt-net-anchor coupling support; nonlinear mechanics; support design method

1 引 言

随着浅部资源日益减少, 国内外矿山都相继进入深部资源开采状态。由于深部巷道围岩所处的复杂地质力学环境, 使得巷道围岩稳定性控制问题成为影响深部资源安全开采的突出问题之一^[1]。针对深部围岩表现出的大变形等非线性力学特征, 国内外进行了大量的研究和探索。在国外, 为保证深部巷道围岩的稳定及开采的顺利进行, 前苏联、原西德、波兰等国的学者都对深部开采的巷道地压及其控制措施进行了大量研究^[2~4]。国内学者在深部软

岩问题研究的基础上, 逐渐形成了一些有影响的理论和技术, 如松动圈理论、大弧板理论、联合支护理论^[5~8]等。近年来出现的锚网、锚索支护形式是一种非常有效的深部软岩巷道支护形式, 国内学者对其支护机理及相关理论问题也进行了大量地研究^[9,10]。但是, 由于在实施支护过程中只强调支护体的强度, 盲目施工, 因而支护效果差, 严重的还会造成巷道顶板大面积垮落等安全事故, 使得锚网、锚索支护形式在软岩巷道支护中不能得到广泛推广。究其原因, 主要是因为对于已进入非线性塑性大变形阶段、变形场是非线性力学场的软岩巷

收稿日期: 2004-10-29

修改稿收到日期: 2005-01-18

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No.50490270); 国家自然科学基金项目(No.50544009), 教育部科学技术研究重大项目资助项目(No.10405)。

作者简介: 孙晓明, 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程, 软岩工程力学方面的研究工作。E-mail: xiaoming_s@263.net

道, 其变形破坏实质上是巷道围岩在工程力作用下产生塑性大变形的一种力学过程, 必须采用适合于软岩非线性大变形力学特性的支护设计方法, 才能充分发挥锚网、锚索的支护能力, 保证软岩巷道围岩的稳定性。

2 锚网索耦合支护的概念

锚网索耦合支护就是针对软岩巷道围岩由于塑性大变形而产生的变形不协调部位, 通过锚网-围岩以及锚索关键部位支护的耦合而使其变形协调, 从而限制围岩产生有害的变形损伤, 实现支护一体化、荷载均匀化, 达到稳定巷道的目的^[11]。软岩巷道实现耦合支护的基本特征在于巷道围岩与支护体在强度、刚度及结构上的耦合, 如图 1 所示。

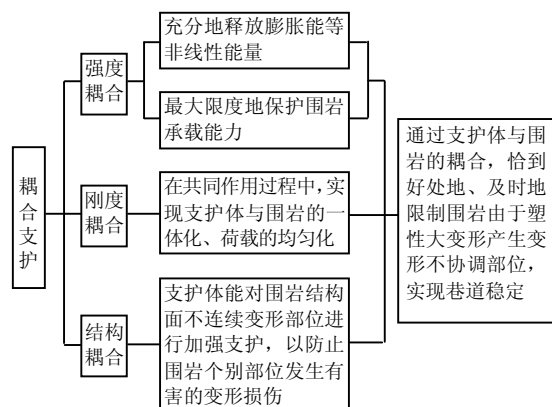


图 1 耦合支护的基本特征

Fig.1 The characters of coupling support

3 锚网索耦合支护非线性设计方法

由于深部软岩巷道岩体介质已进入到塑性、黏塑性和流变性阶段, 因此锚网索耦合支护设计必须用软岩非线性大变形力学设计理论^[12,13]为基础的设计方法, 主要内容包括以下三个方面: 变形设计、强度设计和反馈设计。

3.1 变形设计

变形设计是进行强度设计的基础, 亦是区别于传统线性设计的主要特点之一, 通过变形设计, 确定适合于软岩巷道变形特点的最佳耦合过程。

3.1.1 地质力学评估

地质力学评估是整个设计的基础, 应在广泛的、全面的现场工程地质调查的基础上进行。地质力学评估的内容包括现场地质条件调查、巷道围岩力学性质测定、原岩应力实测、巷道围岩结构测试、采动应力测量和锚杆拉拔试验等。

3.1.2 软岩类型及其变形力学机制确定

根据地质力学评估结果, 结合工程软岩及其变形力学机制的分类体系^[5], 可以正确地确定巷道围岩的软岩类型及其变形力学机制。不同类型的软岩其变形力学机制及采取的耦合对策都不相同, 正确确定软岩的变形力学机制及其复合型是软岩巷道工程成功支护的关键技术之一。

3.1.3 耦合对策设计

在正确地确定软岩类型及其变形力学机制的基础上, 通过耦合对策设计实现巷道围岩结构优化、支护体与围岩在强度、刚度上的耦合。

(1) 围岩结构优化

巷道所处部位围岩结构类型决定了巷道支护的难易程度。应根据巷道围岩条件, 选择合理的断面形状及巷道位置, 优化巷道围岩结构, 才能充分发挥巷道围岩本身强度。

(2) 强度耦合

强度耦合是由设置支护体与围岩之间的合理变形空间来确定。不同类型的软岩, 在保证巷道围岩强度的前提下其所允许的变形能释放变形空间不同。根据工程实践研究结果, 各类软岩的变形能允许释放空间为 ①膨胀性软岩(S型): 50~100 mm; ②节理化软岩(J型): 30~50 mm; ③高应力软岩(H型): 80~150 mm; ④对于复合型软岩(HS型、HJ型及HJS型), 其变形能允许释放空间应根据优势变形能确定。

(3) 刚度耦合

根据巷道围岩条件确定合理的支护材料, 使支护体与围岩在刚度上实现耦合, 充分发挥围岩自身强度, 从而使支护体与围岩构成的支护系统形成统一体, 才能充分提高整个支护系统的稳定性。基于耦合支护理论研究结果^[11], 支护材料选择的原则是: ①锚杆杆体弹性模量与围岩弹性模量互相耦合(一般相差两个数量级左右); ②锚杆托盘材料强度小于锚杆材料强度, 其尺寸大小根据围岩结构及支护强度确定。对于碎裂、散体结构围岩, 一般锚杆托盘尺寸应大于块裂结构、整体结构围岩锚杆托盘。③网的选择应根据围岩结构及支护强度确定。对于碎裂、散体结构围岩, 一般选择金属网; 对于块裂结构围岩, 一般可选择经纬网或菱形网。④锚梁及钢带的选择主要根据支护强度确定, 对于支护强度较小的巷道可选择钢筋梯; 对于支护强度大、围岩岩体结构差的巷道一般选择钢带。

3.1.4 耦合过程设计

软岩非线性力学特性决定了软岩巷道在施工过程中会表现出明显的过程相关性, 即不同的卸(加)

载顺序将会产生不同的围岩损伤、变形结果^[14]。耦合过程设计要通过计算机数值模拟来完成，其目的是确定复合型变形力学机制的合理转化过程。进行耦合过程优化设计时，应对比巷道不同卸（加）载顺序所产生的应力分布结果、巷道塑性区范围以及巷道围岩位移变形情况，综合分析巷道围岩条件和施工要求，选择塑性区相对最小、应力分布相对最均匀、巷道围岩位移量相对最小的方案为最佳的卸（加）载顺序，由此确定最佳耦合过程。耦合过程设计的另一个重要内容是根据数值模拟结果确定巷道关键部位的位置（图2），从而在二次耦合支护时实现支护体与围岩结构上的耦合。



图2 根据数值模拟结果确定巷道关键部位

Fig.2 Determining the key position of tunnel by numerical simulation result

3.2 强度设计

通过变形设计，将复合型变形力学机制转化为单一重力机制的变形力学机制后就可以进入强度设计阶段，即确定巷道合理的耦合支护参数，包括初次耦合支护参数和二次耦合支护参数。

3.2.1 初次耦合支护参数

（1）锚杆长度确定

$$\text{锚杆长度: } L_b = l_{b1} + l_{b2} + l_{b3} \quad (1)$$

式中 L_b 为锚杆长度（m）； l_{b1} 为锚杆外露长度，一般取 0.1~0.15 m； l_{b2} 为锚杆有效长度（m）； l_{b3} 为锚杆锚固长度，一般取 0.3~0.4 m。

锚杆有效长度（ L_{b2} ）的确定方法为

$$\begin{cases} \text{圆形及正方形巷道顶、帮: } l_{b2} = L_p - a/2 & (2) \\ \text{矩形巷道} \begin{cases} \text{顶: } l_{b2} = L_p - b/2 & (3) \\ \text{帮: } l_{b2} = L_p - a/2 & (4) \end{cases} \\ \text{直墙半圆拱巷道} \begin{cases} \text{顶: } l_{b2} = L_p - \frac{(a/2)^2 + (c+d)^2}{c+d} & (5) \\ \text{帮: } l_{b2} = L_p - a/2 & (6) \end{cases} \end{cases}$$

$$\text{沿空巷道: } l_{b2} = 0.5a \left(\frac{k_1 P}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中 a 为巷道宽度（圆形巷道为直径，m）； b 为矩形巷道高度（m）； c 为直墙圆拱形巷道墙高（m）； d 为直墙圆拱形巷道拱高（m）； k_1 为抗拉安全系数，一般取 3~5； σ_t 为各岩层平均抗拉强度（kN/m²）； P_{sr} 为沿空巷道各部位支护荷载^[11]（kN/m²）； L_p 为塑性软化区范围^[15]（m）。

（2）锚杆间排距确定

锚杆按等距排列，即 $S_b = S_c = S_l$ ，根据每根锚杆所承担的支护荷载，则可确定锚杆的间排距：

$$S_b = \left(\frac{[\sigma_b]}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中 S_b 为等距排列时的锚杆间排距（m）； S_c 为锚杆间距（m）； S_l 为锚杆排距（m）； $[\sigma_b]$ 为单根锚杆的极限破断力（kN）； P 为巷道各部位支护荷载^[11,15]（kN/m²）。

3.2.2 二次耦合支护参数

无论是一般软岩巷道，还是沿空软岩巷道，其二次耦合支护均是在关键部位出现时的最佳支护时间对关键部位进行锚索加强支护。

（1）锚索二次耦合支护设计原则

锚索支护设计原则可以概括为 5 条，即①锚索长度原则：锚索长度取决于巷道顶板岩性、岩体结构和巷道工程尺寸。当坚硬顶板岩层高度小于 3 倍巷道宽度时，锚索长度取决于坚硬岩层位置，锚索锚固段要设计在坚硬岩层内 1~1.5 m；当坚硬岩层高度大于 3 倍巷道宽度时，其长度按 3 倍巷道宽度设计，同时要充分注意锚固段的结构设计和施工质量，重点考虑深部围岩强度和巷道浅部支护体之间的相互耦合作用。②锚索强度原则：锚索承载强度取决于锚索根数和锚索间排距，其设计总荷载按巷道顶板塑性软化区范围的岩石重量乘以安全系数来计算。③耦合作用设计原则：锚索和锚杆支护达不到耦合作用状态，将会出现恶性事故。因此，重视各种时空条件下的预应力施加值的变化至关重要。一般地在迎头工作面施作锚索支护，预应力值应适当小一些，约是锚杆设计值的 0.8~1.0 倍；在掘进机后实施锚索支护时预应力水平应是锚杆设计荷载值的 1.0~1.3 倍比较适宜。④关键部位原则：理论研究表明，锚索设计在顶板的力学关键部位效果最好，锚索要尽量设计在顶板的关键部位。⑤反馈设计原则：现场地质条件复杂多变，要加强锚索支护的检测，及时反馈分析、修正和完善设计，以及时弥补理论和实践存在的缺憾。

(2) 锚索支护参数的确定

根据锚索支护设计原则, 锚索支护应在关键部位出现时的最佳支护时间对关键部位加强支护, 此时的锚索支护参数由以下公式进行确定。锚索长度为

$$L_a = l_{a1} + l_{a2} + l_{a3} \quad (9)$$

式中 L_a 为锚索长度 (m); L_{a1} 为锚索外露长度, 一般取 0.3 m; L_{a2} 为锚索有效长度 (m); L_{a3} 为锚索锚固长度, 一般取 1.0~2.0 m。锚索有效长度确定方法有,

对于一般软岩巷道:

$$l_{a2} = \max \left\{ 1.5a, \sum_{i=1}^n h_i \right\} \quad (10)$$

式中 h_i 为稳定岩层下各层厚度 (m); i 为稳定岩层下岩层层数。

对于沿空软岩巷道:

$$l_{a2} = \max \left\{ 3a, \sum_{i=1}^n h_i \right\} \quad (11)$$

当 $l_{a2}/a > 3$ 时, $l_{a2} = 3a$ 。此时不需要加长锚索寻找坚硬顶板岩层, 只要充分注意锚固段的结构设计和施工质量, 重点考虑深部围岩强度和巷道浅部支护体之间的相互耦合作用即可。锚索间排距根据锚杆失效时锚索所承担的岩层重量确定。每排布置一根锚索, 则其排距为

$$S_a = \frac{3[\sigma_a]}{4a^2\gamma k} \quad (12)$$

式中 γ 为上覆岩层平均重度 (kN/m^3); $[\sigma_a]$ 为单根锚索的极限破断力 (kN), 通常所使用的锚索 $[\sigma_a] = 260 \text{ kN}$; k 为安全系数。

3.3 反馈设计

反馈设计是确定支护参数初始设计的合理性, 并及时提出修改设计, 以保证巷道的稳定。

3.3.1 巷道耦合支护参数的反馈设计

巷道支护参数的反馈设计是根据巷道施工过程中所获得的各种监测数据及变形破坏特征的分析进行的, 主要包括巷道深部位移监测曲线、锚杆(索)支护阻力监测曲线、顶板离层的监测曲线等。根据上述曲线还可进行最佳二次支护时间的修改, 即当监测数据变化趋势趋近于稳定时, 即为最佳二次支护时间。

3.3.2 巷道实现耦合支护的判断准则

(1) 锚杆受力状态判断准则 根据锚网-围岩耦合作用分析结果^[3], 当观测到顶部区锚杆应力状态随时间的变化而下降, 帮部锚杆应力状态同时提

高时, 说明围岩受力集中应力区已向低应力区转化, 此时表明锚网支护与围岩实现了耦合, 使围岩应力分布均匀化。

(2) 关键部位判断准则 关键部位的产生是支护体与围岩不耦合支护的一个重要特征, 因此, 可以根据巷道实施支护后其产生鳞片状剥落、片状支护体剥落等高应力腐蚀现象的部位的多少, 来判断是否达到耦合支护状态。软岩巷道实现耦合支护的特征是以实施支护后关键部位不再产生或极少产生关键部位。

4 结 语

基于软岩非线性力学设计理论提出的锚网索耦合支护非线性设计方法, 针对岩体介质已进入到塑性大变形阶段的深部软岩巷道工程, 在变形设计的基础上, 针对最佳耦合过程进行强度设计提出锚网索耦合支护参数, 并在施工过程中通过反馈设计进行修正。与新奥法不同^[16], 采用该设计方法进行锚网初次耦合支护是主动促稳而不是被动等稳, 二次支护是关键部位支护而不是全断面支护, 既能充分发挥锚网主动支护浅部围岩的能力, 又能通过锚索调动深部围岩强度的支护能力, 从而可以实现软岩巷道支护体与围岩在强度上、刚度上和结构上的耦合。应用深部巷道锚网索耦合支护设计方法已成功解决了所承担的煤炭、水利、交通、国防等工程单位多项关键工程和国际合作项目中的软岩难题, 取得了显著的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] Russo-Bello F, Murphy S K. Longwalling at great depth in a geologically disturbed environment-the way forward [J]. *The Journal of South African Institute Of Mining And Metallurgy*, 2000, 100(2): 91—100.
- [2] Schweitzer J K, Johnson R A. Geotechnical classification of deep and ultra-deep Witwatersrand mining areas[J]. *South Africa, Mineralium Deposita*, 1997, 32: 335—348.
- [3] Koichi Akai, Yuzo Ohnishi. Strength and deformation characteristics of soft sedimentary rock under repeated and creep loading[A]. *Proceedings of 5th Congress of the International Society for Rock Mechanics* [C]. [s.l.]: A. A. Balkema, Rotterdam, 1983. 121—124.
- [4] Kaiser P K, Morgenstern N R. Phenomenological model for rock with time-dependent strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics of Mining Science & Geomechanics Abstract*, 1981, 18: 153—165.
- [5] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及其应用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [7] 朱效嘉. 锚杆支护理论进展[J]. *光爆锚喷*, 1996, (3): 1—4.

- ZHU Xiao-jia. The development of bolt support theory[J]. **Smooth Blasting and Bolt-shotcreting**, 1996, (3): 1—4.
- [8] 陆士良, 姜耀东. 支护阻力对软岩巷道围岩的控制作用[J]. **岩土力学**, 1998, 19(1): 1—6.
- LU Shi-liang, JIANG Yao-dong. The control of support resistance over strata around roadway in soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(1): 1—6.
- [9] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19 (增): 917—921.
- GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Model testing study of strain distribution regularity in rock mass caused by prestressed anchorage cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19 (Supp.): 917—921.
- [10] 刘长武, 郭永峰. 锚网(索)支护煤巷顶板离层临界值分析[J]. **岩土力学**, 2003, 24(Supp.): 231—234.
- LIU Chang-wu, GUO Yong-feng. Analysis of roof bedding separation critical value of coal mining gallery supported with bolts(cables)[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 231—234.
- [11] 孙晓明. 煤矿软岩巷道耦合支护理论研究及其设计系统开发[博士学位论文 D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2002.
- [12] 何满潮, 王树仁. 大变形数值方法在岩土工程中的应用[J]. **岩土力学**, 2004, 25(2): 185—188.
- HE Man-chao, WANG Shu-ren. Application of numerical method of large deformation to soft rock engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 185—188.
- [13] 何满潮, 吕晓俭, 景海河. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计理念[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 24(8): 1 215—1 224.
- HE Man-chao, LÜ Xiao-jian, JIANG Hai-he. The characters of surrounding rock in deep engineering and its non-linear dynamic-mechanical design concept[J]. **Journal of Rock Mechanics & Engineering**, 2002, 24(8): 1 215—1 224.
- [14] 何满潮, 李春华, 王树仁. 大断面软岩硐室开挖非线性力学特性数值模拟研究[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(4): 483—486.
- HE Man-chao, LI Chun-hua, WANG Shu-ren. Research on the non-linear mechanics characters of large section cavern excavating within soft rock by numerical simulation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(4): 483—486.
- [15] 姜衍祥. 软岩巷道支护荷载的确定方法及其计算系统开发[博士论文 D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 1998.
- [16] 韩瑞庚. 地下工程新奥法[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

中国土木工程学会 2006 年重点学术会议

序号	项目名称	主要内容及目的	时间、人数、会期	地点	主办单位/分科学会或委员会
1	中国土木工程学会第十二届学术年会暨隧道及地下工程分会第十四届年会	隧道及地下工程理论与实践新进展	2006 年 11 月 9—11 日, 400 人	上海	隧道及地下工程分会
2	第十三届全国工程建设计算机应用学术会议	1. 计算机应用与信息化技术在工程建设领域的发展 2. 近两年来我国工程建设领域计算机应用与信息化技术学术成果交流	2006 年 11 月, 150 人, 3 天	广州	中国土木工程学会计算机应用分会 中国建筑学会建筑结构分会 计算机应用专业委员会
3	中国土木工程学会防护工程分会第十次学术年会	交流、研讨防护工程及其相关领域的研究成果、技术进展及学术思想等	2006 年 8 月, 200 人, 3 天	乌鲁木齐	总参军训和兵种部第二炮兵司令部
4	第一届滑坡工程会议与第二届全国岩土与工程学术大会	为全面进行岩土与工程的有关技术交流	2006 年 10 月末, 近千人	武汉	中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 中国建筑学会工程勘察分会 中国地质学会工程地质分会 中国岩石力学与工程学会
5	第十七届全国桥梁学术会议	会议主题: “加强创新、提高质量、注重美学”	2006 年 5 月, 300 人, 3 天	重庆	桥梁及结构工程分会
6	第四届全国 FRP 应用技术学术交流会	FRP 材料性能研究、FRP 加固修复技术研究及应用成果技术交流	2006 年 10 月, 200 人 2—3 天	济南	FRP 及工程应用专业委员会
7	大城市交通圈研讨会	中日交流国际大城市交通问题, 研讨对策、出路和公交优先等	2006 年 3 月中旬, 150 人, 2 天	上海	城市公共交通分会协助中国土木工程学会筹备会务
8	城市公共交通分会七届四次年会	BRT 现场交流会	2006 年 10 月中旬, 250 人, 2 天	济南	城市公共交通分会

(信息来源: 中国土木学会网站)