

软岩巷道新型网壳锚喷支架静力 分析及其应用

Static analysis and application of a new kind of shell bolting and shotcrete support

庞建勇¹, 刘松玉¹, 郭兰波²

(1. 东南大学 交通学院岩土所, 江苏 南京 210096; 2. 安徽理工大学 土木系, 安徽 淮南 232001)

摘要: 简述了网壳锚喷支架的技术特点和静力分析, 介绍了网壳锚喷支架工业性试验方案及试验结果, 达到用较少材料又提高喷层支撑能力与让压的目标, 证明网壳锚喷支架是一种结构合理、工艺简单、能承受强大地压及采动荷载的新型支架。

关键词: 网壳锚喷支架; 静力分析; 软岩; 工业性试验

中图分类号: U 455. 7; TD 353

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2003) 05- 0602- 04

作者简介: 庞建勇(1964-), 男, 东南大学博士研究生, 从事地下结构设计计算、软土地基处理研究。

PANG Jian-yong¹, LIU Song-yu¹, GUO Lan-bo²

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The shell bolting and shotcrete trestle used in the soft rock tunnels were analyzed. The static analysis was also accomplished. The result of the practical test of the new bracing shows that it can improve the bracing ability with less material. In a word, the shell bolting and shotcrete support are well-structured, which can sustain great ground stress and can be constructed easily.

Key words: shell bolting and shotcrete support; static analysis; soft rock; practical test

0 前 言*

软岩巷道的地压强度高、变形强烈, 支护较为困难。近年来我国一些煤矿采用长走向、大采区布置方式, 主要运输及回风大巷服务年限很长, 后期还要经受回采动压影响, 因而对巷道支护技术要求很高。这类巷道目前主要采用 U 型钢支架及锚网喷两种具有让压性能的支护方式, 但随着开采深度增大, 高应力巷道越来越多, 两者的支护强度都在不断提高。U 型钢支架的架距不断缩小, 网背及架间联结件也有所加强, 但架间整体稳定性一般偏弱, 不能完全避免支架变形失稳, 且支护费用增加较多。企业为了提高工效、降低成本, 一般以锚网喷支护作为高应力软岩巷道首选支护形式, 同时不断开展技术革新, 提高其支护可靠性, 如采用双层锚网喷支护、高强度锚杆- 钢筋梁、钢筋梁与喷层联合支护等, 甚至采用锚网喷- 金属支架联合支护方式。

隧道工程中也不断致力于锚喷结构的研究, 早在 20 世纪 80 年代, 原西德及我国先后研制出用钢筋焊接成的格构式金属棚子, 用以代替型钢支架作为喷层内部的加强撑, 降低钢材消耗, 但这种格构金属棚支护方式的架间混凝土仍是结构的薄弱部分, 难以承受较大的变形地压, 所以隧道工程中仅用其作为施工期间的临时衬砌结构。本文根据地面大跨度网壳结构的力

学原理, 设计出网壳锚喷新结构, 克服了上述支护形式的缺点, 较好解决了加强支撑、喷层合理配筋、简化施工作业、降低材料消耗及支护费用等问题, 并在淮南矿区高应力软岩巷道成功进行了工业性试验。

1 网壳锚喷支护技术特点

网壳锚喷支护是将金属棚子、钢筋梁、架间联结杆等各部分合并为整体, 汲取地面大跨度网壳结构物的优点, 制成一种特殊的钢筋网壳支架。实际工程中, 既可用它代替棚式支架, 也可用它作为喷层的钢筋骨架, 与锚杆、喷射混凝土共同组成网壳锚喷结构, 支护高应力软岩巷道。钢筋网壳支架的结构形式如图 1 所示。几块拱壳形的构件用螺栓联结起来便形成一架支架, 其承载特性比一般金属支架优越: 地层压力经过外层钢筋网分散为空间力系, 由内层众多小跨度双向钢筋网壳支撑着。这种结构的三向稳定性强, 在同样荷载条件下, 构件的弯曲内力比梁拱结构小, 支架钢材比金属支架节省 50% 以上。

钢筋网壳支架与薄喷层组成的衬砌结构, 其承载性能也比一般钢筋网喷层优越: ①混凝土被许多小跨度双曲钢筋网壳分片包围着, 钢筋的弯曲变形与混凝

* 基金项目: 教育部重点科技资助项目(01089)

收稿日期: 2002- 10- 28

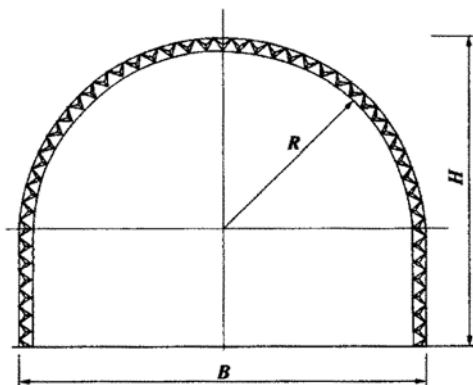


图1 网壳支架结构图

Fig. 1 Structure of shell support

土拉剪内力被削弱,大幅提高了薄层衬砌的承载能力;
②支架构件接头处的可缩垫板使喷层也有了一定的可缩性,因此网壳配筋喷层能够承受高应力地压,甚至超过锚网喷-型钢支架联合支护。

2 网壳支架结构静力分析

钢筋网壳及网壳配筋喷层的静力分析相当复杂,需利用三维杆系与板壳组合结构的有限元程序才能完成计算。为说明钢筋网壳结构的内力计算方法,仅取一片圆弧形顶网壳进行分析,比较网壳单独承载及网壳-喷层共同承载时,网壳的内力分布特点以及与普通网喷结构的差别。钢筋网壳的计算模型如图2所示。由于具有纵横两个对称面,故只取构件的1/2为计算区域。钢筋单元按照网壳的空间构造形式进行划分,荷载取两向等压 $p = 100 \text{ kN/m}^2$,约相当IV类围岩的地压强度。

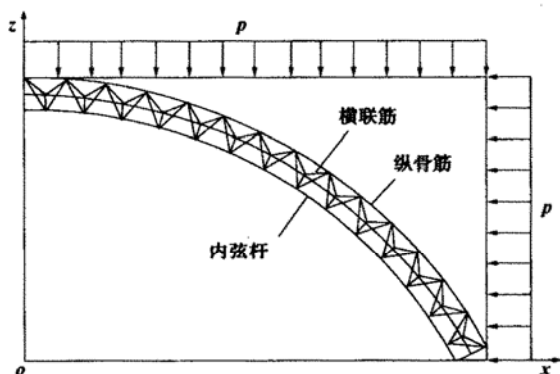


图2 网壳计算模型图

Fig. 2 Calculative model of shell

进行网壳配筋喷层内力分析时,计算模型是图2所示网格再加上喷层单元,喷层单元采用三角形壳体单元,材料为C20混凝土。由于钢筋单元与喷层单元的结点不耦合,所以计算壳体单元的刚度矩阵考虑了上、下两层钢筋与壳体中面的偏心距对壳板刚度的影响。普通喷层结构内力分析时,钢筋网配置于喷层的

中面上,其网孔与钢筋网壳的外层钢筋网相同,其纵筋的截面积为网壳的内外两纵筋的截面积之和,其横向联结筋是由网壳的上、下每两根横联筋合并为一根而形成的。因此,该模型的纵横钢筋用量与网壳相同,喷层的材料、厚度及单元划分也与网壳配筋喷层相同。这样,共有3种结构计算模型,其结构平衡方程组可统一表达为

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

式中 $\{\delta\}$ 为全体结点位移; $\{F\}$ 为全体等效结点荷载; $[K]$ 为结构刚度矩阵。

结构刚度矩阵 $[K]$ 分3种情况进行计算:

当钢筋网壳单独承载时

$$[K] = \sum_m [K]_m \quad (2)$$

当网壳-喷层共同承载时

$$[K] = \sum_m [K]_m + \sum_l [K]_e \quad (3)$$

当普通钢筋网与喷层共同承载时

$$[K] = \sum_n [K]_n + \sum_l [K]_e \quad (4)$$

$[K]_m$, $[K]_e$ 和 $[K]_n$ 分别为钢筋网壳单元刚度矩阵、喷层单元刚度矩阵和普通钢筋网的单元刚度矩阵。各单元矩阵的计算原理、方程组的存储、求解方法以及内力计算等本文不再赘述。将计算结果整理如图3、图4所示。

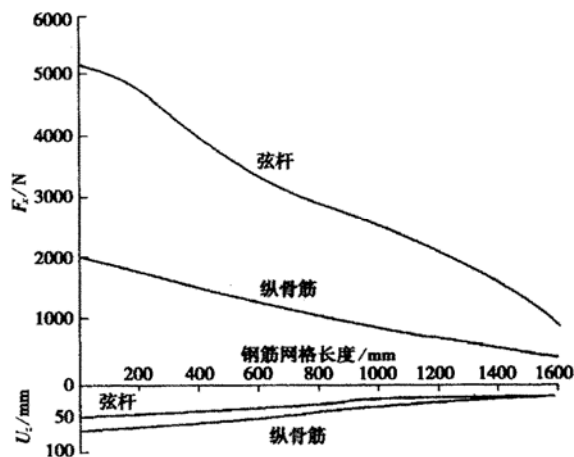


图3 钢筋网壳变形及内力分析图

Fig. 3 Internal force and deformation of shell

由图3可见,钢筋网壳单独承载时,网壳的变形较大,拱顶挠度达70 mm左右,纵向钢筋都处于受拉状态,说明构件在两端径向收敛位移为限定值的条件下,网壳整体向下弯曲。内弦杆最大拉力 $F_x = 5400 \text{ N}$,拉应力 $\sigma_{x\max} = 1720 \text{ N/cm}^2$,外层纵骨筋最大拉力 $F_x = 2000 \text{ N}$,拉应力 $\sigma_{x\max} = 2550 \text{ N/cm}^2$ 。各纵向钢筋都处于弹性承载状态,拉应力远远低于钢筋设计抗拉强度,设计时所选用的钢筋直径偏大,目的是为了增强网壳

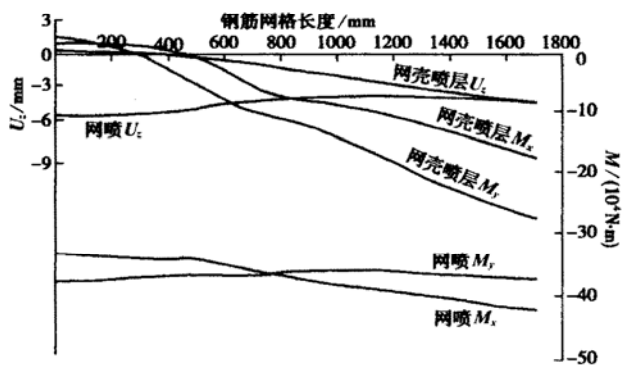


图4 喷层挠度及弯矩分布图

Fig. 4 Deflection and bending moment of shotcrete

刚度, 适应高应力软岩巷道, 抵抗围岩较大的变形。图4将普通网喷与网壳喷层两者的挠度及弯矩分布进行对比。普通网喷的拱顶下沉较大, 而网壳喷层的拱顶发生向上微小的位移, 两者配筋量相同, 挠度分布的差别是由于配筋方式不同而造成的。普通网壳的柔性强, 地层向内挤压时, 它随着围岩一起向巷道内移动, 网壳喷层的刚度较强, 对围岩变形有一定的抵抗能力, 拱部地压引起的拱顶下沉量小, 并且被拱端横向内移所引起的拱顶上移量所抵消。弯矩分布曲线也有类似特征, 但网壳喷层纵、横截面上的弯矩都较小, 比普通喷层所承受的弯矩削弱了一倍左右。

上述网壳喷层静力计算结果表明, 设计的新型钢筋网壳结构形式非常合理, 结构本身既具有一定的单独承载能力, 又是混凝土喷层良好的钢筋骨架。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

淮南矿业集团张集煤矿设计年产量 400 万 t, 矿井服务年限为 122 a, 西翼轨道大巷位于 -600 m 水平, 承担着矿井西翼采区的主要运输任务。该巷道设计断面形状为马蹄形, 穿过的岩层主要为细砂岩、粉砂岩、泥岩和 13 槽煤, 节理比较发育, 地压大, 围岩条件比较恶劣。

3.2 网壳结构设计与施工

鉴于西翼轨道大巷埋深大、地质条件复杂、服务年限长等因素, 为保证巷道一次支护成功, 决定在 600 m 范围段内采用新型网壳锚喷作为永久支护。

根据轨道大巷地压大小与围岩特性, 通过计算确定钢筋网壳结构形式为双层网壳结构, 每架钢筋网壳由 1 片顶网壳和 2 片侧网壳拼装而成。每片由 4 根 $\phi 20$ 内弦杆、8 根 $\phi 12$ 纵骨钢筋、4 根 $\phi 8$ 波折筋(以上钢筋沿巷周方向)及若干 $\phi 8$ 横联筋(沿巷道走向方向)焊接而成, 两端各焊接一块带螺栓孔的联结板, 顶、侧网

壳拼装时在两个接头处夹一块厚 50 mm 的可缩垫板, 再用螺栓联结而成。钢筋具体布置详见图 1。网壳支架一架紧接一架进行架设, 中间不留间隙, 拼装完毕后, 便紧贴围岩表面形成众多小跨连续的双曲拱形支撑架, 先期对围岩进行让压支护, 经过一段让压时间后, 再喷射混凝土, 形成网壳钢筋衬砌结构, 作为巷道的永久支护。

施工时支架的架设顺序是: 两帮网壳—顶网壳。第一架网壳支架是基准, 必须严格掌握中、腰线予以定位, 顶、帮网壳一定在同一平面内, 不能有迈步、错位现象, 以保证后续支架架设质量。每架支架的外缘必须与围岩保持良好接触, 若间隙过大, 可用矸石、混凝土预制块等材料充填。由于支架埋入底板较浅, 在高围岩应力作用下, 为防止侧网壳踢出, 在距底板 300 mm 左右支架两帮各打一根长 2.0 m 斜向限位树脂锚杆。具体施工断面图见图 5 所示。

钢筋网壳支架架设一段距离后, 实施永久喷层滞后时间根据围岩变形大小适当掌握, 但必须在下弦杆钢筋出现明显局部变形之前施喷。根据对轨道大巷地压和变形观测, 支架架设 25 m 后即可喷射混凝土, 设计永久喷层标号为 C20, 加上临时支护, 喷层总厚度为 150 mm。

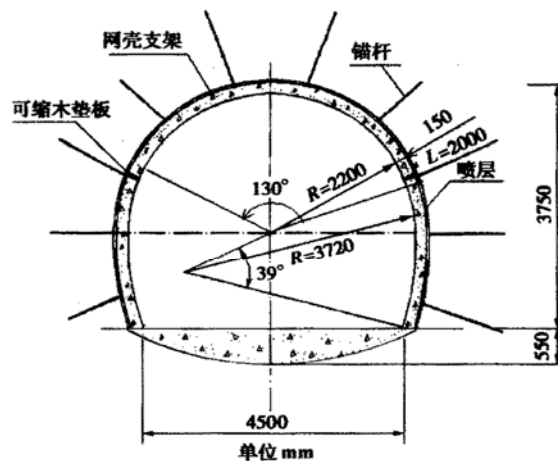


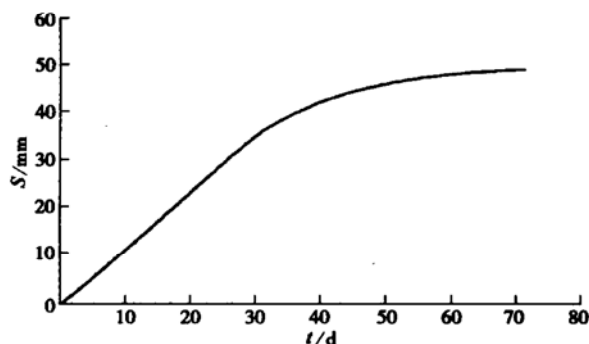
图5 轨道大巷网壳喷层施工图

Fig. 5 Shell of railway tunnel

3.3 工程效果评价

为了研究新型网壳锚喷支架的实际受力情况及工作性能, 进一步完善支架的设计理论与设计方法, 对轨道大巷的网壳支架实际工作状态进行了现场监测, 主要测试内容包括支架表面收敛、网壳钢筋应力应变和围岩内部位移, 在 800 m 范围内共布置了 3 个测站, 其中中间测站围岩变形实测如图 6 所示。

从现场监测结果可以看出: ①轨道大巷实测表明, 2 个月左右以后, 网壳锚喷支架的收敛达到最大值 50 mm, 以后收敛速度小于 0.03 mm/d, 说明巷道变形趋

图6 网壳支架 $T-S$ 曲线Fig. 6 $T-S$ curve of shell support

于稳定;②通过实测网壳支架受力分析,该新型支架受力合理,且具备一定的安全储备,完全适合高应力软岩巷道的永久支护;③本次工业性试验成功应用于新掘轨道大巷,对于其他返修巷道和承受动压的采区巷道,同样具有推广应用价值。

4 结 语

网壳喷层支护与软岩巷道的传统支护方式如锚网喷支护、锚网喷-型钢支架联合支护等相比较,结构上有重大改进,主要有:

(1) 该种支架安装速度快,安装后,立即对巷道表面提供较强的连续支撑,可有效地防止围岩松动,同时具有一定的让压性能,满足了高应力软岩巷道支护的需要。

(2) 钢筋网壳喷层支架为连续式多跨双曲拱形结构,实现了支架轻型化、立体化、连续化,使支架的整体稳定性大大增强,可承受变形地压及采动荷载,同时降低了支架成本,简化了安装作业程序。

(3) 当钢筋网壳支架发挥了适当让压作用后,再施作喷层,形成网壳配筋喷层衬砌结构,利用双曲拱形钢筋网,大幅度提高了喷层的抗弯能力,同时使喷层具有一定的可缩性,使该喷层能承受高地压及采动荷载,实现巷道一次支护成功,不需维修。

(4) 在围岩有严重底臃、帮臃倾向的情况下,采用增强侧网壳刚度以及安设底脚与拱肩锚杆等措施,能有效地控制住巷道底、帮变形,增强支架整体稳定性,钢筋用量增加不多,就能大幅度提高其整体承载能力,满足极软岩巷的支护需要。

(5) 根据张集矿技术经济分析,认为该新型支护结构设计合理、整体性强,具有抵抗巷道大变形的能力,与重型U型钢支架相比,直接成本降低30%以上。

(6) 网壳喷层支护技术在国内外尚无先例,它为改进我国软岩巷道支护结构开拓了新途径。

参考文献:

- [1] 庞建勇,郭兰波.网壳锚喷支护结构试验研究[J].矿山压力与顶板管理,1998,(2):52-54.
- [2] 尹德钰,等.网壳结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [3] 王焕文,等.锚喷支护[M].北京:煤炭工业出版社,1989.