

Research And Application Of The New Compound Support System In High Stressed Soft Rock Drift

Shoulong MA, Zhenming WANG

Dept. of Design Institute ,SDIC Xinji Energy Group Co. Ltd. , Hefei, China

Email: a shoulongma@163.Com

Abstract: The new polypropylene fiber concrete bar shell bolting shotcrete support system was studied on the basis of the analysis for the mechanics principle of shell structures and polypropylene fiber concrete . The new polypropylene fiber concrete bar shell bolting shotcrete support system was a new kind of bolting and shotcrete supporting forms. The technique feature is a kind of specially three-dimensional bar-mat reinforcement. It has very high mechanical property and was applied in difficult drift. The model experiment was done by relying on the industrial test and the distortion, destruct shape, developmental rule of the supporting system was examined while the stress and strain distributing rule and also the ultimate load were obtained. Field application shows that without reducing the carrying capacity of supporting the case, and heavy metal stent compared to the steel supporting the form of reduced consumption and the amount of concrete rebound, and has good flexibility, is an excellent soft rock drift Jean pressure retaining structure, and has good prospects for widespread application.

Keywords: high stressed soft rock drift; polypropylene fiber concrete bar shell; compound support; model experiment; industrial test

新型复合衬砌技术在高应力软岩巷道中的研究及应用

马守龙, 王争鸣

国投新集能源股份有限公司设计研究院, 安徽合肥, 中国, 230031

Email: shoulongma@163.Com

摘 要:根据大跨度空间壳体结构的力学原理和聚丙烯纤维混凝土的基本力学特性、增强机理, 研究地下聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌新结构。该复合衬砌新结构实质上仍是锚网喷支护, 其技术特色是用一种在地面加工成型的特殊三维钢筋支架代替普通的二维钢筋网, 用聚丙烯纤维混凝土喷层代替普通混凝土喷层, 达到用较少的材料大幅提高衬砌支撑与让压能力的目标, 不需要使用型钢支架、锚索、围岩注浆等手段进行加固就能有效地支护高地压大变形巷道。依托工业性试验的典型软岩巷道工程, 进行高地压作用下原材料聚丙烯混凝土钢筋网壳结构模型试验, 研究聚丙烯混凝土钢筋网壳复合衬砌结构的力学性能、承载能力、衬砌的变形与受力特点。现场应用表明聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌结构具有很强的支护能力, 该支护结构非常适用于高应力软岩巷道支护的技术与设计的要求, 具有较高的应用价值。聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌为高应力软岩巷道支护开辟了一条新的途径, 提供了一种结构新颖、性能优良、高支撑力、低成本的支护形式。

关键词: 高应力软岩巷道; 聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳; 复合衬砌; 模拟试验; 工业性试验

1 引言

尽管巷道支护技术在近几十年中得到了巨大发展, 但软岩巷道支护仍然是支护的薄弱环节。软岩巷道的地压强度高、变形强烈, 支护较为困难, 致使这类巷道常遭受严重破坏, 需要多次返修。如何保证高应力软岩巷道支护安全可靠、经济合理, 仍是当前煤

矿支护领域的技术难题^[1]。本文根据地面大跨度网壳结构力学原理, 进行了一系列室内试验, 设计出聚丙烯混凝土钢筋网壳复合衬砌新结构, 在高地应力软岩巷道中进行工业性试验, 以求为软岩巷道提供经济合理、技术先进、安全可靠的新型支护形式。

2 新型复合衬砌结构静力分析

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^[6]。本文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 1 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，荷载取双向等压 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ ，约相当 IV 类围岩的地压强度。

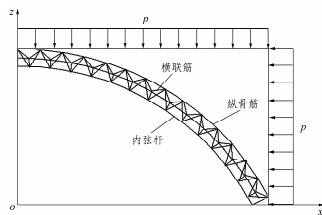


Figure1. Calculation model of reinforced shell
图 1 钢筋网壳计算模型图

进行网壳配筋喷层内力分析时，计算模型是图 1 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节点不耦合，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体刚度的影响。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成。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^[7]可统一表达为：

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

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

结构刚度矩阵 $[K]$ 分以下 3 种情况进行计算：

(1) 当钢筋网壳单独承载时：

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

(2) 当网壳-喷层共同承载时：

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

(3) 当普通钢筋网与喷层共同承载时：

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

式(2)~(4)中： $[K]_m$ ， $[K]_e$ 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^[3]。各单元矩阵的计算原理、方程组的存储、求解方法及内力计算等本文不再赘述。计算结果如图 2、3 所示。

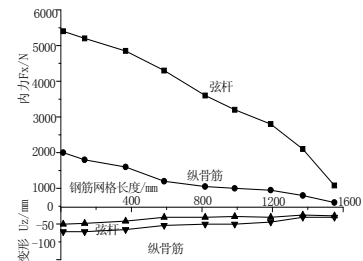


Figure2. Internal force and deformation of shell

图 2 钢筋网壳变形及内力分析图

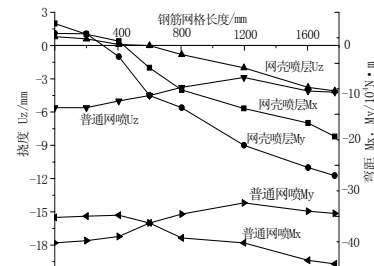


Figure3. Deflection and bending moment of shotcrete

图 3 喷层挠度及弯矩分布图

由图 2 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刚度，适应高应力软岩巷道、抵抗围岩较大的变形。图 3 将普通网喷与网壳纤维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，而网壳纤维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。普通网壳的柔性较强，地层向内挤压时，它随着围岩一

起向巷道内移动,网壳纤维喷层的刚度较强,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,但网壳纤维喷层纵、横截面上的弯矩都较小,比普通喷层所承受的弯矩削弱50%左右。

3 新型复合衬砌模型试验

3.1 模型设计与试验加载

结合山西煤电集团公司杜尔平矿南大巷工程情况,利用大型地下结构试验台,进行围压作用下原材料网壳结构模型试验,研究复合衬砌支护结构的力学性能和承载能力。试验取衬砌结构拱顶一片结构为原型,几何相似比为 $C_L=2$ 。即工程设计中的原型与试验模型尺寸之比是2:1,模型所用的材料与原型相同。

由相似条件确定网壳的主弧筋直径为12mm,其余钢筋直径为8mm,试验模型所采用的混凝土设计强度为C20,混凝土的配比为:水泥:砂子:石子:水=1:1.84:1.84:0.45,纤维掺量为0.9Kg/m³,试件的厚度为100mm,高为400mm。



Figure4. Device of model test

图4 模型试验装置图

试验装置如图4所示。沿支架周边共安装3台油压千斤顶进行加载,每个油缸的最大压力为1000KN。为了模拟载荷均匀分布,用厚钢板和沙浆将千斤顶的点荷载转换成近似分布面载荷。测量设备采用了高速静态电阻应变仪。试验加载时,荷载从0.5MPa起步,之后每步以1.0MPa递增,直到试件破坏为止。

3.2 试验结果分析

对所测得的数据进行处理,绘出应变—荷载及位移曲线图,如下列图所示。

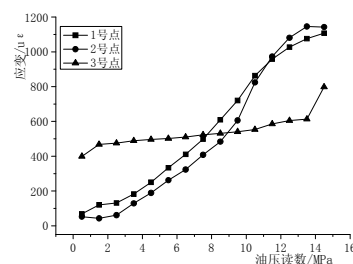


Figure5. Load-strain curves of main arc bar

图5 主弧筋应变荷载曲线图

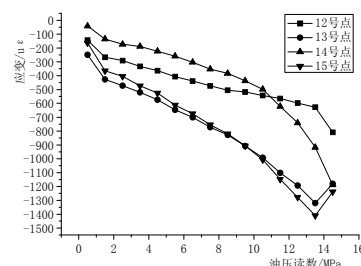


Figure6. Load-strain curves of main arc bar

图6 次弧筋应变荷载曲线图

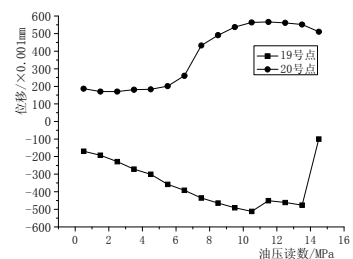


Figure7. Displacement of concert of radid

图7 混凝土环向位移

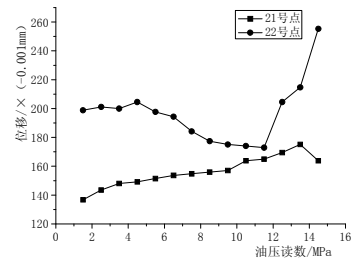


Figure8. Displacement of concert of direction

图8 混凝土纵向位移

通过实验,该单片复合衬砌的极限承载能力换算成工程单位为1437KN,这个承载能力相当于

U₂₉ 钢棚的极限承载能力。从上述位移荷载曲线图和应变荷载图可以看出,当荷载达到极限承载力值时,聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌内的主弧筋和次弧筋都接近或达到屈服状态,因此该结构的主要承载钢筋是主弧筋和次弧筋。钢筋网壳承载结构为外表面的一层钢筋,内部立体纵横交叉的钢筋支撑着外层钢筋,起着传力作用。这样结构就可用外表面承载结构衬托巷道围岩表面。

从混凝土的位移曲线图可以看出,混凝土纵向主要以受压为主,这充分发挥了混凝土的抗压强度的性能,同时纵向的位移量较小。而混凝土环向有拉有压,这时聚丙烯纤维混凝土就能发挥其良好的抗拉性能,避免混凝土喷层因拉应力而过早破坏,提高了复合衬砌结构的整体稳定性。

4 工程应用

4.1 工程概况

杜儿坪矿南大巷是矿井的主要运输大巷,巷道全长 6850 m,其中南大巷穿 2#、3#煤层,在南八、南十斜坡等处由于大巷位于向斜底部,受向、背斜构造及盘区压力的影响,巷道变形严重,该段大巷原设计支护形式为砌碛,后经多次整修,破坏严重地段采用 U 型支架支护加固整修,但整修支护效果不明显,受两边工作面采动影响,加之围岩主要为泥岩、砂质泥岩和钙泥质胶结的石英砂岩,极为松软破碎,整体性差,泥岩遇水崩解,该巷道变形破坏严重,严重影响了南大巷的运输。

4.2 支护设计

根据杜尔坪矿工程地质条件及工程使用要求,决定在南大巷 120 m 严重破碎段内使用新型聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌支护。根据南大巷 120 m 严重破碎段地质条件与地压显现特点,设计出合适的巷道断面形状及加工、施工两便的钢筋网壳支架结构,喷层使用新型聚丙烯纤维混凝土。每棚钢筋网壳支架大致按巷道断面分

为 3 片,由 1 片顶网壳和 2 片侧网壳拼装而成。网壳宽度为 700 mm,每片由 2 根 $\Phi 24$ mm 主弧筋、6 根 $\Phi 16$ mm 次弧筋、若干 $\Phi 8$ mm 桥架及若干 $\Phi 8$ mm 连接筋焊接而成,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。由于设计网壳支架不封底,为了防止侧腿踢出,每片侧网壳应打两根斜向限位锚杆,并将托盘固定在网壳中间的两根中骨筋上,设计锚杆直径 $\Phi 22$ mm,长 2.0 m,锚杆布置按 800×800 mm 梅花状布置,具体布置见图 9。

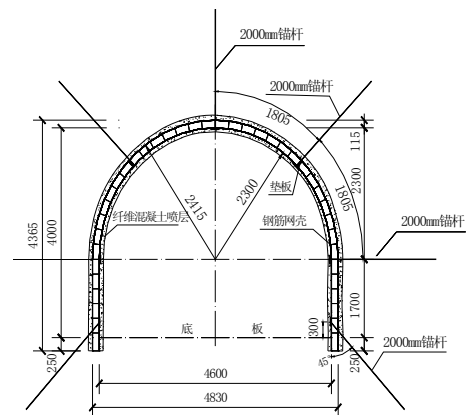


Figure9. Shell shotcrete construction in drift
图 9 巷道网壳喷层施工图

为了研究新型聚丙烯网壳锚喷支护的实际受力情况及工作性能,对试验段支架实际工作状态进行了现场监测,结果如图 10 所示。

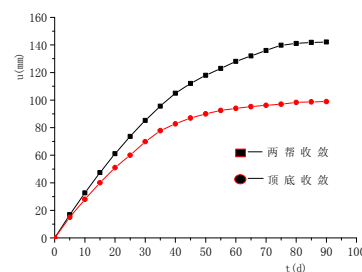


Figure10. Shell shotcrete curve of u-t
图 10 网壳支架收敛率曲线

现场监测结果可以看出:

(1) 实测表明,2 个月左右,网壳锚喷支架的收敛率达到最大值 1.8 mm/m,以后收敛速度

趋于减缓,说明巷道经过跨采一段时间后,变形趋于稳定。

(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,完全适合跨采及软岩巷道的永久支护。

5 主要结论

(1) 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,又是纤维混凝土喷层良好的钢筋骨架。

(2) 室内试验结果表明,聚丙烯网壳支架本身具有较大支护阻力,同时又具有良好的可缩性,该结构具有“先柔后刚”的特性,符合软岩支护的基本思想。

(3) 通过现场对钢筋应变、巷道围岩位移及收敛的量测,可知网壳锚喷支护结构与围岩相互作用的整体性好,能够延长围岩的自稳时间,有利于充分发挥围岩自身的作用。

(4) 工程应用表明,该新技术施工安全、工艺可行,做到了一次支护成功,可以针对不同地质条件与不同地压显现特征,设计出不同规格的支架,可单独进行巷道支护,也可以与锚索或围岩注浆等构成联合支护体系,因而在各种类型的软岩巷道中都可以使用。从根本上改变了软岩巷道需要不断维修或返修的状况。

(5) 聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌突破传统支护结构形式,设计合理、整体性强,使复合衬砌的力学性能得到很大改进,在不降低支

护的承载能力的情况下,降低了钢材的用量,同时纤维混凝土喷层降低了混凝土回弹量,且复合衬砌结构自身有良好的柔性,是软岩巷道的一种优良的让压支护结构,具有较好的推广前景。

References (参考文献):

- [1] Li Mingyuan, Wang Lianguo, Yi Gongyou. Bolting-grouting theory and experiences of soft rock roadway [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001 (Ch).
李明远, 王连国, 易恭猷. 软岩巷道锚注理论与实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [2] He Manchao. China's coal mines soft rock roadway engineering supporting the design and construction guidelines [M]. Science Press, 2004 (Ch).
何满潮. 中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南 [M]. 科学出版社, 2004.
- [3] Ma shoulong. Research And Application Of The New Polypropylene Fiber Concrete Bar Shell Bolting Shotcrete Support System In High Stressed Soft Rock Drift [D]. Anhui University of Science and Technology, 2008 (Ch).
马守龙. 高应力软岩巷道聚丙烯纤维混凝土钢筋网壳复合衬砌新技术研究及应用 [D]. 安徽理工大学, 2008.
- [4] Pang Jianyong. Semi-Rigid Wire-Shell Bolting Shotcrete Support And Its Applications In Dynamic Pressure Tunnels [J]. China Civil Engineering Journal, 2005.03, 8-11 (Ch).
庞建勇. 半刚性网壳锚喷支护及其在跨采隧道中的应用 [J]. 土木工程学报, 2005.03.
- [5] Yin Deyu. Reticulated shell structure design [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1996 (Ch).
尹德钰. 网壳结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [6] Wang Huanwen, Wang Jiliang. Anchor shotcreting [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1989 (Ch).
王焕文, 王继良. 锚喷支护 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [7] Shen Jumin, Wang Chuanzhi. Reinforced concrete plate and shell finite element and limit analysis of [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001 (Ch).
沈聚敏, 王传志. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [8] Li Huaming. Properties of polypropylene fiber concrete research and its application in the tunnel project [D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2005 (Ch).
李华明. 聚丙烯纤维混凝土性能研究及其在隧道工程中的应用 [D]. 重庆: 西南交通大学, 2005.