文章编号：1002-0268（2004）06-0081-03

公路软岩隧道半刚性网壳锚喷衬砌新技术研究

庞建勇，刘松玉
（东南大学交通学院，江苏 南京 210096）

摘要：用钢筋焊接成的格构式金属棚子作为隧道支护喷层内部的加强撑，与型钢支架一样，其架间仍是弱支护部分，难以承受较大的变形地压，所以隧道工程中通常仅用其作为施工期间的临时衬砌结构。文章设计出新型网壳喷层衬砌并进行整架结构试验，完成网壳锚喷支架工业性试验，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结构合理、工艺简单、能承受高应力的新型支架。

关键词：网壳锚喷衬砌；半刚性；工业性试验；软岩隧道
中图分类号：U457.2 文献标识码：A

Study on Half-rigidity Shell Bolting Shotcrete of Soft Rock Tunnels

PANG Jian-yong，*LIU Song-yu*
（Transportation College，Southeast University，Jiangsu Nanjing 210096，China）

Abstract：The lattice-shaped metal brace welded with reinforcing steel bar replaced the profiled bar used as the reinforcement inside the supporting shotcrete of the tunnel. However，similar to the profiled bar bracing，the lattice-shaped brace also has the deficiency that the concrete between reinforcement bars can't support the pressure caused by large soil deformation for its weak strength. So it was only used as temporary lining. The test of the shell bolting and shotcrete trestle used in the soft rock tunnels under high stress，was introduced. The practical test result of the new bracing shows that it can improve the bracing ability with less material. The shell bolting and shotcrete support is a well-structured one，which can sustain great ground stress and can be constructed easily.

Key words：Shell bolting and shotcrete support；Half rigidity；Industrial test；Soft rock tunnel

0 引言

目前，公路隧道支护形式主要包括锚杆支护、喷射混凝土支护、型钢支护或者几种基本型式的不同组合。上述支护方法中不同程度上存在难以避免的技术缺陷：隧道支护中广为使用的砂浆锚杆，安设以后不能及时承载，即使采用早强水泥，其支护作用在1d后才能发挥出来；另外垂直向上的锚孔不易灌浆，施工质量难以保证，而且这种方式只能适用于压力较小的隧道支护；型钢支架是软岩隧道支护的基本方式之一，目前我国公路隧道常用的有工字钢、U型钢，特殊地段采用加强封闭式U型支架等，它们在力学性能和施工工艺等方面均存在明显不足，比如可缩性差、劳动强度大、工程造价高等。早在20世纪80年代，原西德和我国就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隧道支护喷层内部的加强撑，降低了钢材消耗和施工成本。但这种格构金属棚支护方式与工字钢、U型钢支架一样，其架间部位仍是结构的欠支护部分，难以承受较大的变形地压，所以隧道工程中通常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，彻底消除了欠支护部位产生的根源，较好地解决了加强支撑、喷层合理配筋、简化施工作业、降低

收稿日期：2003-03-27
万方数据
作者简介：庞建勇（1964-），男，副教授，安徽淮南人，东南大学博士研究生，主要研究方向为道路与铁路工程.

材料消耗等问题。

1　网壳喷层支护技术特点

网壳锚喷支护是将通常的金属棚子、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半刚性网壳锚喷结构，支护高应力软岩隧道。钢筋网壳支架的结构形式如图 1 所示。将地面加工成型的几块壳形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。

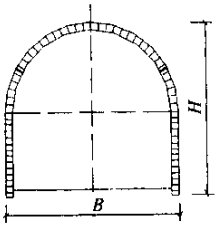


图 1　钢筋网壳支架结构示意图

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：第一、混凝土被许多小跨度双曲钢筋网壳分片包围着而形成约束混凝土，钢筋的弯曲变形与混凝土拉剪内力被削弱，大幅提高了薄层衬砌的承载能力；第二、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　室内试验及结果分析

室内整架网壳喷层承载力试验加载装置如图 2 所示。

试验支架由一块顶弧板与两块侧弧板组成，其结构形式与工业性试验所用网壳喷层相同，几何尺寸根据原形按 1∶1.5 缩小，具体为混凝土厚度 100mm，宽度 540mm，顶拱净半径 1 750mm，底跨 3 500mm，钢筋网壳主筋直径 20mm，外层纵筋直径 6.5mm，内层纵筋直径 14mm，横联筋及波折筋直径 6.5mm。喷射混凝土用 C20 现浇混凝土代替，其粗细骨料级配及水灰比与前者相同。试验过程中，沿支架周边共安装 13 台千斤顶进行加载，支架底脚支撑在大块混凝土

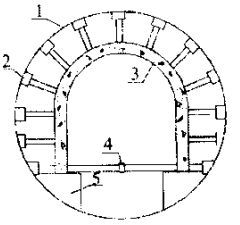


图 2　网壳喷层承载力试验加载装置平面示意图

1. 加载坑壁；2. 液压千斤顶；3. 网壳喷层；4. 横向支撑；5. 底板基座

基座上，用可缩横撑支撑在两底脚之间，用以模拟底板岩石对支架底脚的两向让压支撑作用。试验过程中，拱顶上的千斤顶与直腿上的千斤顶分别同步加载，直腿荷载强度与拱部荷载强度之比控制在 0.7 ~ 0.8 左右，同步测定钢筋应力及混凝土的变形。支架最终荷载达 31.6t 时，由于右侧直腿挠曲折断而失稳，此时左直腿中部开始出现与右侧初始破坏时形状相似的裂纹，拱顶仍完好无损，说明支架直腿部分是强度薄弱部分。钢筋网壳变形、内力、挠度和弯矩分布见图 3、图 4 所示。

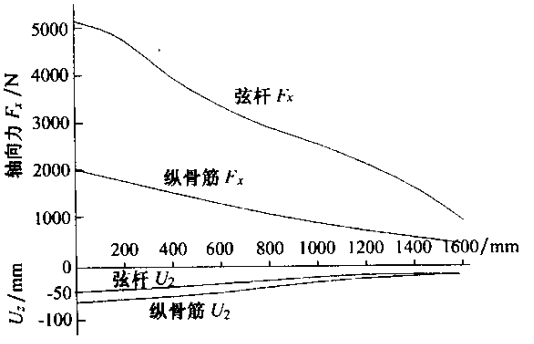


图 3　钢筋网壳变形及内力分析图

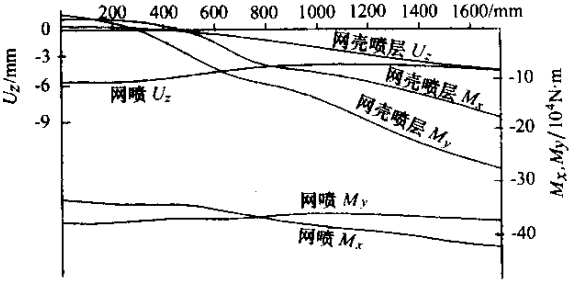


图 4　喷层挠度及弯矩分布图

由于试验支架与原型结构材料相同，假定作用于原型网壳喷层的水平、垂直地压比与试验支架相同，则原型网壳喷层的破坏应力状态应与试验支架相同，所以，原型结构的承载能力可按下式计算：原型网壳喷层承载能力 = 试验支架承载能力 × 支架截面积相似比 = $31.6 \times 1.5^2 = 71.1$t，这相当于 U29 钢棚的承载能

万方数据

力。根据工程类比可以确定，该种直腿钢筋网壳支架足以可靠支护高应力围岩隧道。在极不稳定围岩条件下，改用曲腿支架，承载力将大幅提高，估算可达 100t 以上，再加上两帮及底脚锚杆，也可以抑制强烈的帮臌与底臌，使隧道保持永久稳定。

3　工程应用

3.1　工程概况

安徽淮北某穿山公路隧道断面形状为直墙半圆拱，穿过的岩层主要为砂质泥岩、粉砂岩和泥岩等，岩层受多个小构造切割破坏，节理很发育，围岩软弱破碎，隧道各向变形比较强烈。

3.2　网壳结构设计与施工

根据隧道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 ϕ20 内弦杆、8 根 ϕ14 纵骨钢筋、4 根 ϕ6.5 波折筋（以上钢筋沿隧道周向）及若干 ϕ6.5 横联筋（沿隧道走向）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 30mm 的可缩垫板，再用螺栓联结而成。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，作为隧道的永久支护。

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，为了防止侧网壳踢出，在距底板 300mm 左右支架两帮各打一根长 1.8m 斜向限位锚杆。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。根据对隧道地压、变形的观测，确定支架架设 25m 后即可喷射混凝土，设计永久喷层标号 C20，喷层总厚度为 150mm。

3.3　工程效果评价

为了研究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，对试验段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。其中围岩变形实测如图 6 所示。

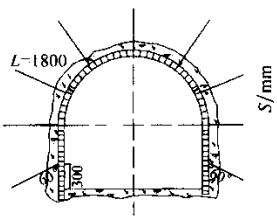


图 5　半刚性网壳喷层施工图

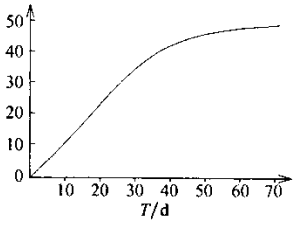


图 6　网壳支架时间与变形曲线

从现场监测结果可以看出：（1）实测表明，60d 左右，网壳锚喷支架的收敛达到最大值 50mm，以后收敛速度小于 0.02mm/d，说明隧道变形趋于稳定。（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，完全适合高应力软岩隧道的永久支护。

4　主要结论

（1）该种支架安装速度快，安装后，立即对隧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，满足了高应力软岩隧道支护的需要。（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，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，使该喷层能承受高围压，实现隧道一次支护成功，不需维修。（4）实践表明，在围岩有严重底臌、帮臌倾向的情况下，采用增强侧网壳刚度以及安设底脚与拱肩锚杆等措施，能有效地控制住隧道底、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。（5）根据技术经济分析，该新型支护结构设计合理、整体性强，与重型 U 型钢支架相比，直接成本降低 30% 以上。（6）网壳喷层支护技术已经申请国家发明专利，它为改进我国隧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．网壳结构设计［M］．北京：中国建筑工业出版社，1996.

[3]　王焕文，王继良．锚喷支护［M］．北京 煤炭工业出版社，1989.