

用全封闭格栅钢架控制膨胀性软岩巷道变形破坏的研究与实践

张厚江¹, 焦玉勇¹, 孟昭君², 王浩¹, 覃卫民¹, AMOUSSOU Coffi Adoko³, 赵强¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 贵州大方煤业公司, 贵州 毕节 551600; 3. 博茨瓦纳国际科技大学, 帕拉佩 博茨瓦纳)

摘要: 膨胀软岩巷道围岩黏土矿物含量高、自身强度低、亲水膨胀性强, 在复杂地应力和水理作用下极易发生变形失稳。结合小屯矿轨道大巷支护变更工程实践, 通过地质调查、现场观测及室内试验等手段分析发现: 巷道渗水量大, 围岩节理裂隙发育、孔隙率高, 膨胀性黏土含量高, 水化作用后耐崩解性差都加剧了围岩的变形失稳。针对性地提出以格栅钢架为主体结构的“全封闭格栅钢架+挂网+锚杆+喷射/浇筑混凝土”联合支护体系, 通过数值模拟, 揭示了全封闭支护设计的整体性优势, 并对支护方案的格栅钢架间距和锚杆长度进行优化, 制定出适用现场工况的钢架规格参数及其施工工艺流程。同时辅以集水坑降低底板水位, 最终以全封闭格栅钢架为主体结构的联合支护体系有效地控制了巷道围岩变形, 在小屯煤矿膨胀软岩巷道取得了成功应用。

关键词: 采矿工程; 格栅钢架; 全封闭; 软岩巷道; 黏土矿物; 仰拱

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增 1-3392-09

Research on application of full-closed steel grid frame in expansive soft rock roadway support

ZHANG Houjiang¹, JIAO Yuyong¹, MENG Zhaojun², WANG Hao¹, QIN Weimin¹, AMOUSSOU Coffi Adoko³, ZHAO Qiang¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Guizhou Dafang Coal Mining Company Limited, Bijie, Guizhou 551600, China; 3. Botswana International University of Science and Technology, Palapye, Botswana)

Abstract: Deformation, fracture and instability of surrounding rock occur easily in expansive soft rock roadways due to its high clay mineral contents. Under the hydraulic action and high geostress, the clay minerals will show a strong hydrophilic expansibility and a weak resistance intensity. A case study combining with situ conditions of main haulage roadway in Xiaotun coal mine was performed. After geological surveys, field observations and laboratory tests, we find that the seepage action, weathering action, slaking durability and clay mineral contents all are reasons contributing to the deformation and instability of roadway surrounding rock. A combined support system of Full-closed steel grid frame + Wire mesh + Bolt + Shotcrete/Pouring concrete is put forward in this paper. The superiorities of the full-closed frame design are demonstrated, and the spacing between frames as well

收稿日期: 2016-02-01; **修回日期:** 2016-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904); 国家自然科学基金项目资助项目(51479191, 41202227)

Supported by the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2014CB046904) and National Natural Science Foundations of China(Grant Nos. 51479191 and 41202227)

作者简介: 张厚江(1989-), 男, 2014 年于中国矿业大学矿业工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事地下空间和工程物探方面的研究工作。E-mail: houjiangzh@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0124

as the length of the bolts is optimized by numerical simulation. Meanwhile, catchpit is adopted to govern the water-inrush of roadway floor successfully. Finally, the full-closed steel grid frame-oriented combined support system effectively control the deformation of surrounding rock, therefore has a reference significance to similar expansive soft rock support engineering.

Key words : mining engineering ; steel grid frame ; full-closed ; soft rock roadway ; clay mineral ; inverted arch

1 引言

我国煤炭资源丰富，地质构造复杂，煤矿开采面临着各种各样的地质难题，其中膨胀性软岩巷道的变形控制问题一直是影响煤矿安全、高效生产的一大难题^[1-2]。当其伴随着采深加大、地质条件恶化、地下水发育以及地应力和地温的升高，会发生显著的塑性变形、扩容膨胀，是巷道围岩持续变形和失稳的主要原因^[3-5]。软岩巷道及隧道的大变形机制及控制也一直是各矿企和科研单位不可避免的重要科学问题之一。

一般软岩巷道支护采用的主要技术有锚注支护技术、全封闭型钢支架、多层次锚喷网注联合支护等^[6-9]。但从使用情况来看仍有后期变形控制力差，结构内力大，材料成本高等方面的不足^[10-11]，往往陷入开挖—支护—破坏—修复—再破坏—再修复的方式和理念，耗时费力，维护成本较高。格栅钢架是根据隧道洞室的断面形状由多根钢筋焊接而成的支撑结构。格栅钢架刚柔相济，既具有型钢支架的及时支撑作用及较大的承载力，又克服了型钢支架支撑刚性过大的缺点而具备较好的柔性，有利于发挥围岩的自承能力，可较好地释放高地应力区围岩应力与变形^[10-12]。

格栅钢架在隧道中应用广泛，并取得了有效的成果，但在煤矿巷道中应用较少。本文借鉴隧道支护技术和前人研究成果，以贵州大方煤业小屯煤矿为研究对象，对膨胀软岩的破坏特征和失稳机制进行分析，并针对性地设计出适合现场工况的全断面封闭式格栅钢架，提出了“全封闭格栅钢架+挂网+锚杆+喷射/浇筑混凝土”的联合支护体系，以期实现平硐围岩的稳定和煤矿的安全生产。

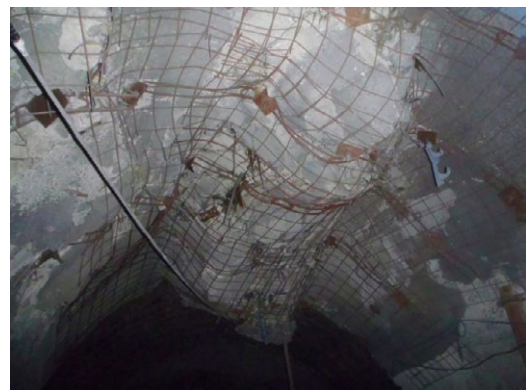
2 工程背景

2.1 工程概况

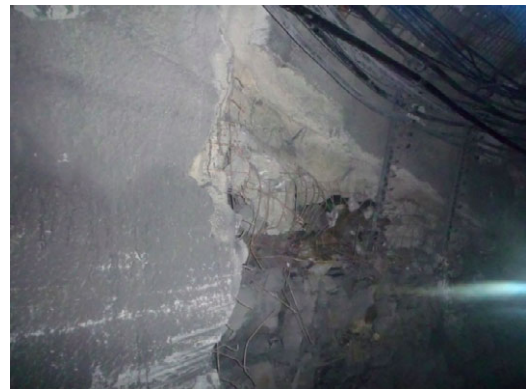
贵州大方煤业小屯煤矿位于扬子板块川滇黔盆地、黔北断拱内，井田属于构造剥蚀山地地貌为主

的低、中山地区，大部分标高在+1 350 m 以上。主要可采煤层为 6 中煤和 7 号煤，煤层总体为一宽缓的单斜构造，地层倾向南东，倾角为 8°~10°。井田选用平硐开拓方式，3 条平硐水平标高均在 +1 395 m。

大方县位于贵州西北部，降雨丰富，地下水含量高，喀斯特地形发育。特别进入 2014 年 8 月，天降暴雨，多个工作面曾发生大规模涌水，平硐部分地段地下水积聚，排水沟冲毁，影响矿井的正常生产。在六中车场至后段的平硐，大巷围岩转为以泥质膨胀软岩为主，由于泥岩自身强度低，具有很强的遇水膨胀性和崩解性，在部分地段产生底臃量相继近 1 m，同时伴随着围岩开裂、顶板下沉和两帮收敛严重等状况，对煤矿的安全生产和巷道围岩稳定十分不利(见图 1)。



(a) 大巷顶板下沉



(b) 大巷片帮

图 1 小屯煤矿大巷围岩变形

Fig.1 Deformation of main roadway in Xiaotun coal mine

现有的支护形式是以锚网喷为主，目前这种支护形式由于支撑力不足，难以应对当前巷道的变形失稳状况，局部地段巷道断面已不满足运输、通风需要，并存在在大面积塌方威胁。上述现象在3条大巷中普遍存在，影响距离累计达上千米，成为煤矿不容忽视和亟待解决的技术难题之一。

2.2 室内试验

为了更好地揭示泥质膨胀软岩的物理化学性质和力学特性，于轨道平硐变形段周围钻取岩芯并在掘进迎头和工作面收集相应层位石块，进行了相关室内试验。

2.2.1 X射线衍射分析

轨道大巷变形段围岩以泥岩、泥质粉砂岩和砂质泥岩为主，分别在八中车场钻取的岩芯选取相应层位的3种岩性的岩石进行X射线衍射试验，对其矿物组成及含量进行分析，如图2所示，矿物成分含量见表1。

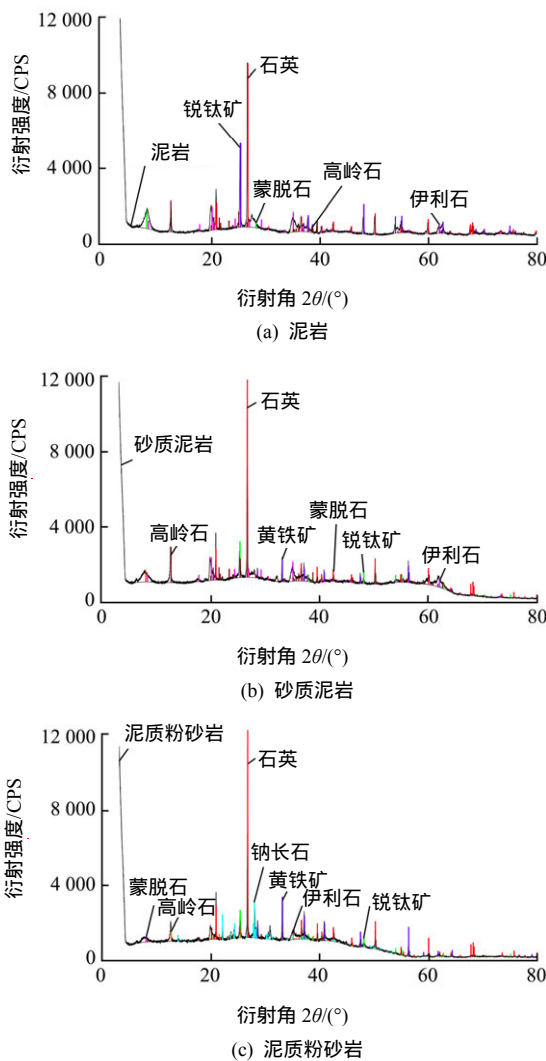


图2 不同岩样的X射线衍射分析

Fig.2 Diffraction pattern of the rock samples

表1 矿物成分分析结果

Table 1 Mineral composition content of three kinds of rocks

类型	石英	高岭石	伊利石	蒙脱石	锐钛矿	黄铁矿	钠长石
泥岩	31.26	18.66	21.53	12.01	16.54	-	-
砂质泥岩	36.26	19.79	20.48	7.16	6.83	9.48	-
泥质粉砂岩	32.93	7.27	9.18	3.06	4.50	14.45	28.62

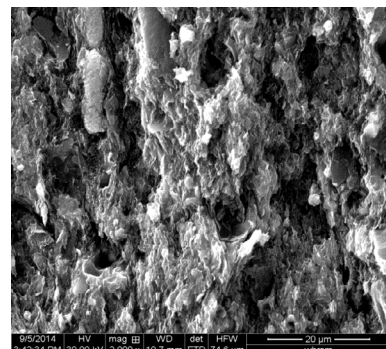
黏土矿物是组成黏土岩和土壤的主要矿物，颗粒极细，主要包括高岭石族、伊利石族、蒙脱石族及蛭石族等矿物。通过衍射分析发现，黏土矿物含量在泥岩、砂质泥岩和泥质粉砂岩中的含量分别为52.20%，47.43%和19.51%。其中蒙脱石是黏土矿物中吸水膨胀能力最强的矿物，吸收水分后还可以膨胀并超过原体积的几倍，蒙脱石在3种岩石中的含量分别为12.01%，7.16%和3.06%。由于膨胀软岩自身强度低，极易碎胀扩容，如此可观的黏土含量在一定程度上加剧了围岩的遇水膨胀和变形失稳。

2.2.2 电镜扫描分析

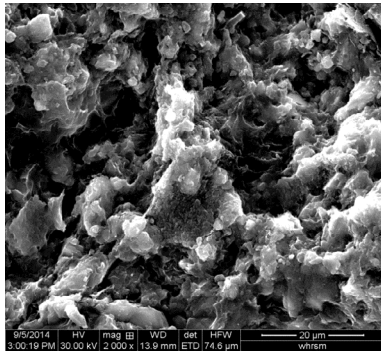
矿物的微观结构决定了他的宏观性质，在扫描电镜下，不同矿物会表现出不同的形貌特征。如高岭石在扫描电镜中常呈假六方体状；石英多为透明的正六面体结构；蒙脱石为卷曲的薄片状；伊利石在电子显微镜下常呈不规则的鳞片状集合体，类似于蒙脱石^[13-14]。

为了研究巷道软弱围岩的微观结构对巷道稳定性的影响，对轨道大巷穿过的主要地层岩石进行2000倍的电镜扫描，分别为6#煤底板泥岩(见图3(a))、7#煤顶板砂质泥岩(见图3(b))和8#煤底板泥岩(见图3(c))，篇幅所限，仅取某一镜头进行分析。

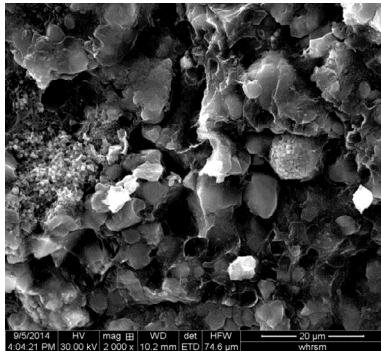
由图3(a)可见，6#煤底板泥岩在放大2000倍后出现明显的伊蒙混层形态并伴生有5 μm左右孔径的孔隙。图3(b)可知砂质泥岩放大后出现结构疏松富含裂隙的薄片状蒙脱石形态，说明风化程度严重，已发生过膨胀变形。8#煤底板泥岩经放大后发



(a) 6#煤底板泥岩



(b) 7 煤顶板砂质泥岩



(c) 8 煤底板泥岩

图 3 不同岩性岩石的扫描电镜图片

Fig.3 Scanning electron microscopy analysis

现很明显的块状高岭石和球状黄铁矿矿物，并含有 2~8 μm 不等的孔隙。不同层位的泥岩总体均具有结构蓬松、孔隙裂隙发育以及不同程度风化的特征。

2.2.3 崩解性试验

小屯煤矿 3 条平硐中均有不同程度的涌水和渗水，常年降雨造成地表水沉降的循环往复，泥岩的性质在湿度条件变化时会发生较大变化，产生水化膨胀、碎胀扩容、强度降低，所以水力对软弱围岩的弱化和破坏作用不容忽视^[15]。

岩石的耐崩解性是检验岩体和岩石材料在水力作用下强度参数的重要手段之一。本文根据标准^[16]，对巷道变形段围岩进行采样，选取泥岩、砂质泥岩和泥质粉砂岩试样若干，进行耐崩解性试验，结果见表 2。

表 2 耐崩解率试验结果

Table 2 The slake durability index of three kinds of rocks

类型	原始质量/g	第一次循环后质量/g	第二次循环后剩余质量/g	耐崩解率/%
泥岩	531.52	440.63	419.36	78.9
砂质泥岩	458.82	436.73	409.59	89.3
泥质粉砂岩	522.11	512.01	510.10	97.7

由表 2 可知，泥岩的耐崩解性极差，砂质泥岩的耐崩解性其次，泥质粉砂岩的耐崩解性最好。当

巷道顶板或底板以泥岩为主时，水力作用使泥岩崩解、碎胀、开裂，强度降低，造成严重的顶板开裂下沉和严重底臃。这种地段的巷道的治理应当引起重视，应善疏利导，防止围岩与地下水的接触。

2.2.4 强度试验

通过其他室内试验对不同岩性岩石的物理力学指标进行测试，结果如表 3 所示。细砂岩、泥质粉砂岩、砂质泥岩和泥岩会出现强度参数出现明显递减的规律。这些参数是岩石维持自身稳定性、抵抗外力变形和工程适用性的重要指标，也是下文进行数值模拟的重要参考。

表 3 不同岩石的物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical properties of different rock groups

类型	密度/ (g · cm ⁻³)	抗压 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)	弹性 模量/ GPa	泊松 比
泥岩	2.21	15.65	1.82	2.10	34.29	4.38	0.35
砂质泥岩	2.47	19.10	2.30	3.55	39.34	8.80	0.28
泥质粉砂岩	2.64	24.30	2.64	3.82	40.40	11.05	0.26
细砂岩	2.66	39.48	3.52	4.60	42.29	25.20	0.22

泥岩的抗压强度、抗拉强度和黏聚力等指标都较低，在复杂地应力极易发生塑性变形和受拉破坏，当与水发生物理化学反应时，强度指标又会大打折扣，进一步加剧了围岩的变形失稳。

2.3 巷道失稳原因分析

经过现场调研和室内试验等措施，对小屯煤矿大巷失稳的原因进行了初步分析和总结，认为大巷围岩变形破坏的主要原因有以下几点：

(1) 六中车场至后段，巷道围岩转为以泥岩为主，围岩强度降低，而埋深加大。在升高的低应力下，脆弱的围岩产生挤压变形，导致了巷道顶板的开裂下沉以及两帮收敛等现象。

(2) 大方地区雨量充沛、岩溶发育，地下水的地表补给充分。天降暴雨时，巷道出现大规模涌水，而水沟未做防渗处理，且被大量冲毁，巷道底板被地下水浸泡。富含黏土矿物的泥岩遇水膨胀、碎胀扩容、强度降低，使底板产生了较大变形，并影响两帮产生收敛。

(3) 随着南北翼工作面煤层的采出，保安煤柱逐渐形成孤岛煤柱的局面，支撑压力和采动压力共同作用将使三条平硐的力学环境更加恶化。

(4) 煤矿现有的锚网喷措施支护力度不够，而且大巷底板处于不支护或者弱支护的状态，难以形

成强有力的整体式支护结构，需要进一步加强支护强度。

3 全封闭格栅钢架

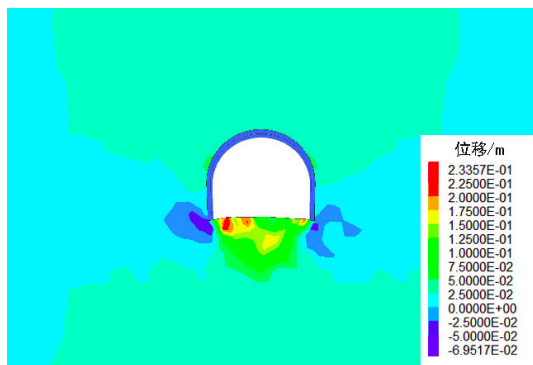
针对小屯煤矿膨胀软岩巷道的工程现状，本文将在隧道工程领域中普遍使用的格栅钢架结构进行改装设计，并进行了关键部位的加强，以适用于小屯煤矿。格栅钢架刚度低、柔性好，能适应软岩巷道的初始变形并能充分发挥围岩的自承能力和支护结构的整体性优势。

3.1 仰拱的优势

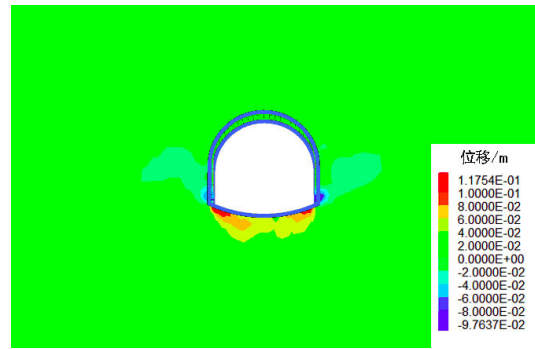
原支护方式下轨道平硐底板由于处于未支护状态，围岩应力向底板转移。加之地下水的渗入浸泡底板，泥岩膨胀，产生了严重底臃变形。因此采用含有仰拱的全封闭支护结构对巷道施工的安全性和稳定性具有重要作用，仰拱在地质条件差、膨胀性趋势大和侧压高的隧道工程中都能很好的适用，尤其是对底臃的治理效果尤为明显^[17-18]。

为了验证仰拱对于巷道底臃出色的抑制作用，结合现场地质条件进行数值模拟，通过加仰拱和不加仰拱两种工况的对比说明问题。数值模型在 CAD 中建立，通过 ANSYS 软件进行网格划分，并导入三维有限差分软件 FLAC^{3D} 中进行计算。整个模型大小为 60 m(宽)×58 m(高)×30 m(厚)，模拟地段埋深 390 m，侧压力系数选用 1.2，下图中仅对巷道附近处应变与应力分布进行展示。

由图 4(a)和(b)的对比可知，相同地质条件下，无仰拱支护的底板产生底臃量较大，接近 235 mm，底板中部产生受拉破坏。而在支架两底脚处，由于支架受力传递到底板，产生压缩变形，下沉量近 70 mm。有仰拱支护时，底板中间底臃量大大减小，而在仰拱中央两侧处产生 118 mm 底臃量，支架两底脚处几乎没有位移产生。



(a) 无仰拱时垂直位移

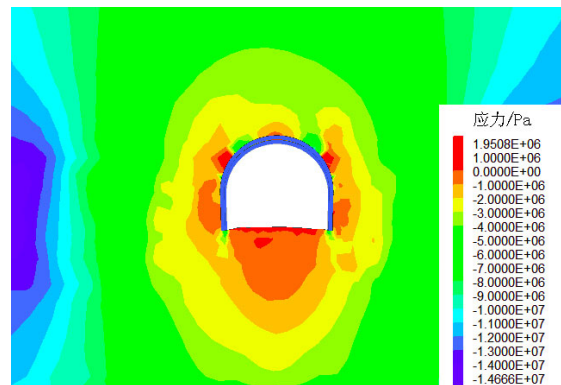


(b) 有仰拱时垂直位移

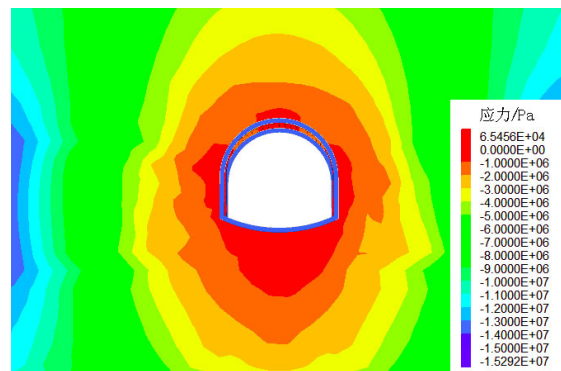
图 4 有无仰拱支护时位移分布对比

Fig.4 Comparison of displacement distribution between with inverted arch support and without inverted arch support

由图 5(a)和(b)的对比可知，相同地质条件下，无仰拱支护时，巷道围岩产生的应力并不均匀，拉压应力分布不均，在支架两底脚处应力集中，产生 6 MPa 左右的压应力。而在有仰拱支护时，巷道围岩的受力更加均匀，支护结构的整体性更好，且围岩自由面附近所受应力强度均不高。



(a) 无仰拱时垂直应力分布



(b) 有仰拱时垂直应力分布

图 5 有无仰拱支护时应力分布对比

Fig.5 Comparison of stress distribution between with and without inverted arch support

通过数值模拟对比，含仰拱的全封闭钢架设计更能够有效地治理底板鼓起，有效改善围岩应力分布，更能发挥围岩的自承能力和支护结构的整体性，

因此更适用于地层软弱，膨胀性高的泥岩巷道。

3.2 钢架设计参数

在全封闭格栅钢架的支护方案被肯定之后，对小屯轨道大巷现场进行量测并结合原有巷道设计图纸、地质勘察资料等相关文件，进行格栅钢架主体结构的设计。设计方案见图 6，加工成品如图 7 所示(篇幅所限，仅展示部分结构)。

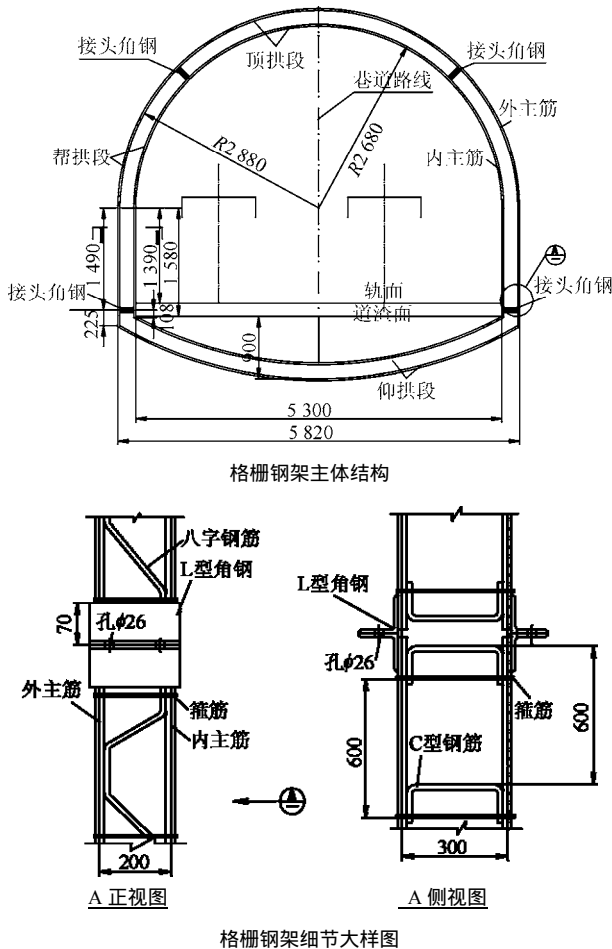


图 6 格栅钢架设计图(单位: mm)

Fig.6 Design of full-closed steel grid frame(unit: mm)



图 7 格栅钢架成品图

Fig.7 The finished products of steel grid frame

(1) 每榀全封闭格栅钢架划分为四段拼接而成，分别为顶拱段、两帮拱段和仰拱段，段与段之间用 L220 mm×70 mm×70 mm 的角钢作为连接板，

焊接在 4 条主筋端部，并用 $\phi 26$ mm 螺栓固定。

(2) 仰拱的矢跨比根据断面要求，均取 1/8。

(3) 钢格栅设计为四肢型，分内外双层交错，格栅钢架断面尺寸为宽(300 mm)×厚(200 mm)，4 条主筋为 $\phi 25$ mm 螺纹钢。

(4) 八字钢筋采用 $\phi 20$ mm 钢筋，安装于平行于巷道断面的拱架两侧，间距为 600 mm(中对中)，同时 C 型钢筋采用 $\phi 20$ mm 钢筋，安装于垂直巷道断面的拱架两侧，安装间距为 600 mm(中对中)，位于每个八字钢筋中心位置。

(5) 为加强束缚，安装环向箍筋，采用 $\phi 14$ mm 钢筋，环向间距为 600 mm，布置如图 7 所示。

4 联合支护体系的确立与应用

根据对轨道大巷围岩变形破坏特征、失稳机制分析，结合地质情况和工程实践，确定围岩治理的支护对策为“全封闭格栅钢架+挂网+锚杆+喷射/浇筑混凝土”的联合支护体系。选用强度较高的强度等级 C30 混凝土，对顶拱段和帮拱段进行喷射，对仰拱段进行浇筑，与格栅钢架形成强有力的钢筋混凝土结构。钢筋混凝土抵抗受压破坏又可以抵抗受拉破坏，整体性和耐久性好，有利于巷道围岩的长期稳定。通过地质调查，同时为满足煤矿生产条件，讨论将八中车场前后 70 m 作为首选施工段。

4.1 联合支护体系参数优化

支护断面锚杆的主要作用是固定格栅钢架，其次对围岩起到支护作用。在以格栅钢架和混凝土形成的钢筋混凝土为主体支护结构强有力的支撑下，锚杆数量可大大减少，预确定的方案中锚杆数量为 7 根，分别置于两帮、两肩、两底脚和拱顶。

格栅钢架的间距(即格栅钢架的中心距)是影响巷道支护效果，维护整体稳定性的重要因素，同时也是支护材料成本的决定因素，因此合理的间距既能取得良好的支护效果，又能良好地控制工程造价。

下文通过数值模拟，对格栅钢架的布置间距和锚杆的长度进行确定(见图 8)。共设 9 个方案进行支护效果模拟，见表 4。

对不同方案中，对巷道围岩测点变形量取平均值进行统计。通过数值模拟结果，可以发现格栅钢架的布置间距对支护效果起到了主要作用，当拱架间距为 400 mm(即格栅钢架净间距为 100 mm)时，围岩变形量都是最小的，但这种方案会大大增加支护的材料成本、加工成本和施工成本。当拱架间距为

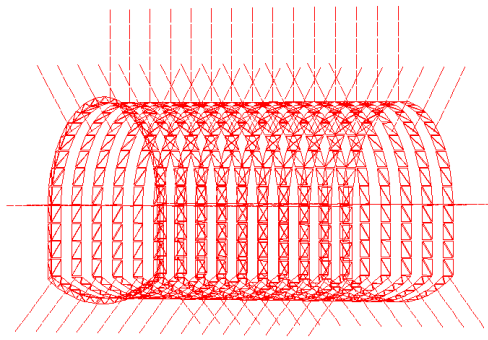


图 8 钢架间距与锚杆长度的数值模拟

Fig.8 Numerical simulation of steel grid frame spacing and anchor length

表 4 数值模拟支护方案

Table 4 Numerical simulation for supporting schemes

方案编号	拱架间距/mm	锚杆长度/mm
A1	400	2 800
A2	400	2 400
A3	400	2 200
A4	600	2 800
A5	600	2 400
A6	600	2 200
A7	800	2 800
A8	800	2 400
A9	800	2 200

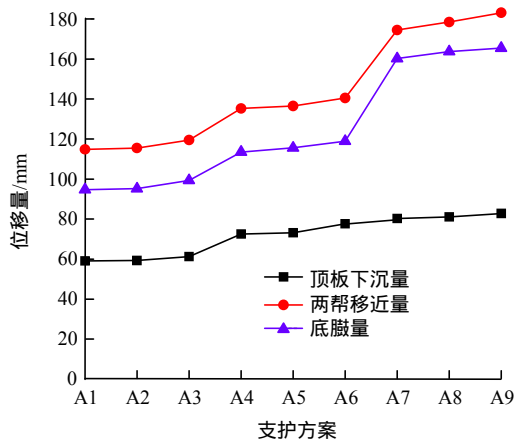


图 9 不同方案围岩变形数值模拟结果

Fig.9 Simulation results of roadway surrounding rock deformation in different schemes

600 mm 时,顶板下沉、两帮收敛和底臃均能控制在合理的范围之内,而且可以大大的降低工程造价。同时随着锚杆长度的增加,围岩变形量越小,成本增加可控,所以施工方案最终确定为 A4 方案,即拱架间距 600 mm,锚杆长度为 2 800 mm。

4.2 施工工艺

轨道大巷支护变更施工工艺流程见图 10。巷道

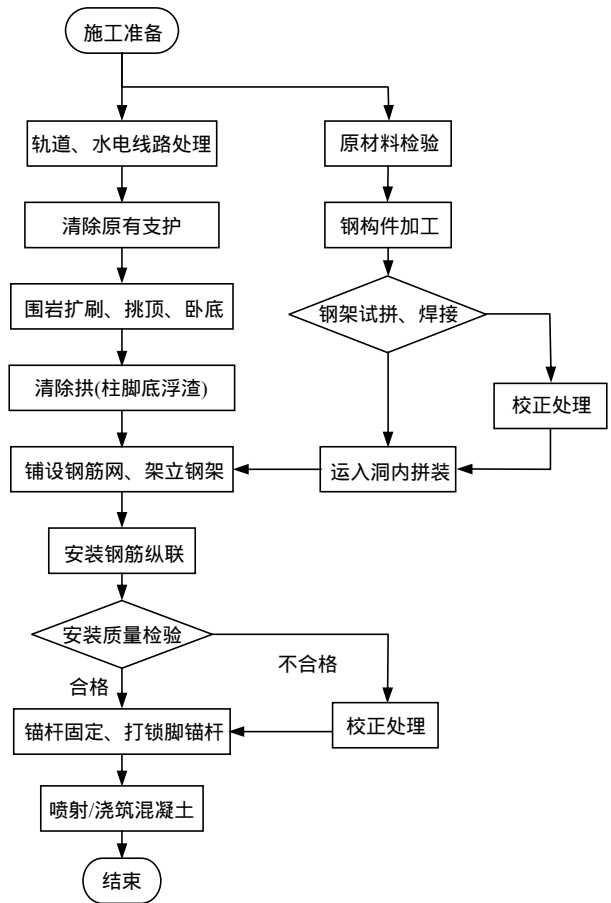


图 10 轨道大巷格栅钢架支护工艺流程图

Fig.10 Flow chart of process of steel grid frame reinforced shotcrete support engineering

开挖刷帮以后及时铺设钢筋网,并用膨胀螺栓固定,防止巷道围岩顶部和肩部碎石掉落,影响施工人员安全。钢筋网规格为 $\phi 6 \text{ mm} \sim 2\,000 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$,网孔规格为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,网与网搭接 100 mm 。

格栅钢架安装顺序为先安装仰拱,再安装帮拱,最后安装顶拱。对接好后,用螺栓拧紧。每根格栅钢架截面宽 300 mm ,厚 200 mm 。格栅钢架中心距为 600 mm ;格栅钢架之间沿环向每 1.5 m 采用 $\phi 22 \text{ mm}$ 纵筋配合螺栓固定,纵筋之间设置交叉状 $\phi 8 \text{ mm}$ 钢筋,纵筋与交叉钢筋作为格栅钢架间混凝土的骨架。

格栅钢架安装完毕后,在钢筋格内钻孔安装锚杆,锚杆规格选用 $M24 - \phi 20 \text{ mm} \times 2\,800 \text{ mm}$ 高强左旋无纵筋螺纹钢锚杆,其外露锚头通过钢垫板锁紧在格栅钢架贴紧岩壁的外主筋上,这样锚头不外漏,安全美观,防止锈蚀。每根锚杆使用 3 卷 Z2360 树脂药卷作为锚固剂,锚固力 120 kN ,预紧力 $150 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

随后进行喷浆,用 C30 混凝土进行帮部和顶部

的喷射，再对底板仰拱进行立模浇筑，浆面超出格栅钢架表面 30 mm。洒水养护 14 d 后，进行底板的回填，架设轨道、水电路等。

为了有效的解决排水问题，减小底板开挖量同时减少边墙支护材料的使用量，将排水沟置于大巷底板中央，上覆水泥板，不影响通车行人。最终轨道大巷支护布置图见图 11。

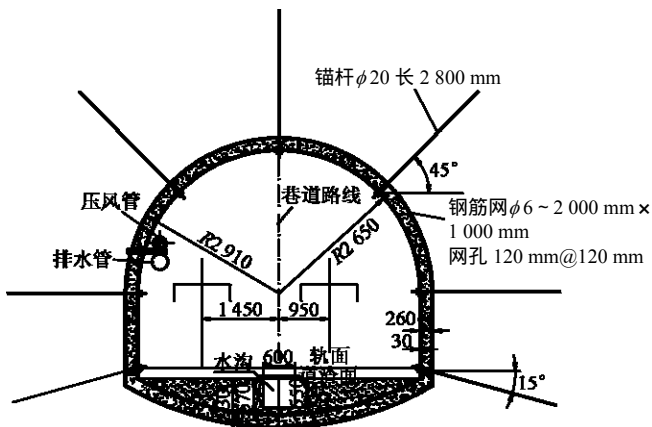


图 11 轨道大巷支护布置图(单位：mm)

Fig.11 Support layout of main haulage roadway(unit：mm)

4.3 底板治水

在巷道底板开挖至半米左右，开始出现渗水现象。地下水涌出，达到一定高度后，水位维持不变，当用水泵进行抽排时，地下水继续渗出，并达到原有水位，因此判断水源很可能为北翼采空区老窑水渗入。涌出水量不大，却足以对拱架锁脚锚杆的施工和仰拱混凝土的浇筑及养护造成困扰。

针对底板渗水造成施工困难和威胁围岩稳定的难题，方案采取集水坑对底板渗水进行疏排，即在施工段前方开挖 2 m(长)×1 m(宽)×1.5 m(深)的集水坑，将施工段底板地下水引至低位，并用水泵抽排，如图 12 所示。水泵连续排水 3 d 内，便不再有地下水入渗，施工段底板也没有渗水发生，说明围岩底板积水已排出。这种治水方法既有利于支护工程的顺利施工，又对巷道的长期稳定性产生积极的作用。



图 12 集水坑排水

Fig.12 Drainage by using catch pit

4.4 成功应用

“全封闭格栅钢架 + 挂网 + 锚杆 + 喷射/浇筑混凝土”的联合支护体系，在小屯煤矿轨道大巷八中车场施工段应用之后，巷道顶板下沉、两帮收敛和底板鼓起都得到了良好的控制，排水沟满足排水要求，巷道底板不再出现涌水或者渗水情况，巷道壁面干燥规整，如图 13 所示。从目前来看效果显著，支护系统没有出现开裂和损毁的现象，围岩总体变形量可忽略不计，稳定性良好。该支护系统实现了对膨胀软岩巷道围岩变形的有效控制。



图 13 全封闭格栅钢架支护效果图

Fig.13 Support effect figure of full-closed steel grid frame

5 结 论

本文结合小屯煤矿平硐大巷支护变更的工程实例，对小屯煤矿的大巷围岩进行了矿物成分分析和物理力学特性等试验，对失稳机制进行了分析并提出了以全封闭格栅钢架为主的联合支护体系，主要结论如下：

- (1) 小屯煤矿大巷围岩属于膨胀软岩巷道，巷道围岩以泥岩和砂质泥岩为主。通过室内试验发现巷道围岩中黏土矿物含量高，富含孔隙且有不同程度的风化，耐崩解性差。因此围岩极易在水理作用下发生膨胀软化，塑性变形，导致巷道变形失稳。
- (2) 小屯煤矿工程地质环境复杂，大巷原有支护强度不足。因此结合现场工程地质条件，支护方案主体结构选用适用于地质条件差、围岩膨胀性高的全封闭格栅钢架。通过数值模拟对比，含有仰拱的全封闭式结构受力更加均匀，整体性更强，对底板的控制更加有效。
- (3) 确定了“全封闭格栅钢架 + 挂网 + 锚杆 + 喷射/浇筑混凝土”的联合支护体系。针对平硐大巷的实际工况，对格栅钢架的规格尺寸进行了重新设计和改装，并设计了配套设施。通过数值模拟优化了格栅钢架间距和锚杆长度，制定了成熟的施工工

艺流程。同时为利于支护工程底板的施工和巷道的长期稳定,辅以集水坑降低渗水水位。最终全封闭格栅钢架成功有效地控制了轨道大巷围岩的变形失稳,在小屯煤矿成功应用。该支护体系对格栅钢架在巷道领域的应用进行了有力补充,因而对同类工程具有指导意义。

参考文献(References) :

- [1] 何满潮,景海河,孙晓明,著. 软岩工程力学[M]. 北京:科学出版社,2002:14-17.(HE Manchao, JING Hehai, SUN Xiaoming, et al. Soft rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002: 14-17.(in Chinese))
- [2] 刘海源. 蒲河矿软岩巷道围岩控制机制及协调支护技术研究[博士学位论文][D]. 北京:中国矿业大学,2013.(LIU Haiyuan. Study on soft rock roadway support mechanism and coordination technology of docking anchor in Puhe Mine[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.(in Chinese))
- [3] JIAO Y Y, SONG L, WANG X Z, et al. Improvement of the U-shaped steel sets for supporting the roadways in loose coal seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60: 19-25.
- [4] 尹光志,王登科,张东明. 高应力软岩下矿井巷道支护[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(10):87-91.(YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming. Support of soft rock roadway under high stress[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2007, 30(10): 87-91.(in Chinese))
- [5] 李国富,戴铁丁,吕芳礼,等. 膨胀岩变形机制与注浆强化技术[J]. 采矿与安全工程学报,2007,24(4):444-448.(LI Guofu, DAI Tieding, LU Fangli, et al. Deformation mechanism of swelling rock and its grouting reinforcement techniques[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(4): 444-448.(in Chinese))
- [6] 余伟健,王卫军,黄文忠,等. 高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术[J]. 煤炭学报,2014,39(4):614-623.(YU Jianwei, WANG Weijun, HUANG Wenzhong, et al. Deformation mechanism and rework control technology of high stress and soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 614-623.(in Chinese))
- [7] 何满潮,李国峰,王炯,等. 兴安矿深部软岩巷道大面积高冒落支护设计研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(5):959-964.(HE Manchao, LI Guofeng, WANG Jiong, et al. Study on supporting design for large area serious roof caving of deep soft rock roadway in Xing'an coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 959-964.(in Chinese))
- [8] 陆银龙,王连国,张蓓,等. 软岩巷道锚注支护时机优化研究[J]. 岩土力学,2012,33(5):1395-1401.(LU Yinlong, WANG Lianguo, ZHANG Bei, et al. Optimization of bolt-grouting time for soft rock roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1395-1401.(in Chinese))
- [9] 李海燕,李术才. 膨胀性软岩巷道支护技术研究及应用[J]. 煤炭学报,2009,34(3):325-328.(LI Haiyan, LI Shucai. Study and application of support technology on swelling soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 325-328.(in Chinese))
- [10] 王任国,张立勇,刘侠,等. 格栅钢架与型钢拱架在隧洞支护中的比较与应用[J]. 四川水利,2007,(1):32-34.(WANG Renguo, ZHANG Liyong, LIU Xia, et al. Application and comparison of steel grid frame and steel arch in tunnel support[J]. Sichuan Water Conservancy, 2007, (1): 32-34.(in Chinese))
- [11] 张德华,刘士海,任少强. 高地应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(11):2258-2266.(ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Research on selection of steel and steel grid for tunnel support in soft rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2258-2266.(in Chinese))
- [12] 鄢常舒,蒋荣君,张仁民. 格栅钢架与模喷混凝土联合支护在国防工程中的应用[J]. 煤矿支护,2005,(4):2-5.(YAN Changshu, JIANG Rongjun, ZHANG Renmin. Application of combined support of steel grid frame and sprayed concrete in national defense engineering[J]. Journal of Coal Mine Support, 2005, (4): 2-5.(in Chinese))
- [13] 于丽芳,杨志军,周永章,等. 扫描电镜和环境扫描电镜在地质领域的应用综述[J]. 中山大学研究生学刊:自然科学、医学版,2008,29(1):54-61.(YU Lifang, YANG Zhijun, ZHOU Yongzhang, et al. The summarization of the application of scanning electron microscope and environmental scanning electron microscope in geo-science field[J]. Journal of the Graduates Sun Yat-sen University: Natural Sciences, Medicine, 2008, 29(1): 54-61.(in Chinese))
- [14] 吉利明,邱军利,夏燕青,等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. 石油学报,2012,33(2):249-256.(JI Liming, QIU Junli, XIA Yanqing, et al. Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 249-256.(in Chinese))
- [15] 柴肇云,张亚涛,张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报,2015,40(5):1188-1193.(CHAI Zhaoyun, ZHANG Yatao, ZHANG Xueyao. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1188-1193.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50266—2013 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese))
- [17] 王明年,翁汉民,李志业. 隧道仰拱的力学行为研究[J]. 岩土工程学报,1996,18(1):47-53.(WANG Mingnian, WENG Hanmin, LI Zhiye. Study on the mechanics behavior of tunnel invert[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 47-53.(in Chinese))
- [18] 郑朋强,陈卫忠,谭贤君,等. 软岩大变形巷道底臌破坏机制与支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增1):3143-3150.(ZHENG Pengqiang, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. Study of failure mechanism of floor heave and supporting technology in soft rock of large deformation roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1): 3143-3150.(in Chinese))