

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1951

基于格栅拱架的软岩巷道分步联合控制技术研究

刘学伟¹, 刘泉声², 汪志强¹, 刘 滨¹, 康永水¹, 王传兵³

(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. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 针对煤矿深井软岩巷道大变形灾害频发难题, 以淮南矿区潘三矿软岩大变形巷道为工程背景, 在系统分析围岩失稳破坏大变形原因的基础上, 提出了深部软弱破碎巷道基于格栅拱架的分步联合支护技术, 包括: 格栅支架+一次锚杆锚索、初喷、浅孔注浆、预应力锚杆、复喷 150 mm 厚混凝土、深孔注浆和帮顶预应力锚索。进一步, 分析了格栅拱架支护控制原理, 并采用 FLAC^{3D} 确定了基于格栅拱架的分步联合支护的最优支护参数。现场对比分析表明, 格栅拱架支护围岩初期变形速率及最终收敛变形量均大于型钢支护, 但加设二次支护之后格栅拱架位移能较快收敛, 此外, 格栅支护在经济和效率方面优于钢拱架支护。最后, 通过现场监测, 格栅拱架分步联合支护各工序的最优施工周期为: 预应力锚杆、锚索合理的支护时间是注浆后 10 d 内, 而深孔注浆之后预应力锚杆 2 周内较优。实践表明, 基于格栅拱架的分步联合控制技术深井是软岩巷道围岩控制的一条有效途径。

关 键 词: 岩石力学; 深部开采; 软岩巷道; 格栅拱架; 支护技术

中图分类号: TD353

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0469-11

Step by step and combined supporting technique with steel grid frame for soft and fractured rock roadway

LIU Xue-wei¹, LIU Quan-sheng², WANG Zhi-qiang¹, LIU Bin¹, KANG Yong-shui¹, WANG Chuan-bing³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Huainan Mining (Group) Co. Ltd., Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Aiming at the difficult problems of the large deformation in deep and soft rock roadways, the reasons of large deformation are first analyzed for roadways in Panshan coal mine, Huainan, China. On this basis, step by step and combined supporting technique with steel grid frame for soft and fractured rock roadway, including steel grid + primary bolt and cable, initial shotcrete, shallow grouting, pre-stressed bolts, further shotcrete with thickness of 150 mm, deep grouting, and pre-stressed cables, was proposed for deep weak and fractured rock roadway. Furthermore, the control principle of grid arch support is analyzed, and the optimal support parameters (diameter of steel is 20 mm and space between frames is 700 mm) are determined by FLAC^{3D}. The comparative analysis shows that both of the initial deformation rate and final convergence deformation of the steel grid technique are larger than that of the steel support, however, the roadway deformation can quickly converge after the addition of the secondary support was applied. The monitoring results showed that the reasonable period for applying pre-stressed bolt/cable is after about 10 days of shallow/deep grouting. The time between pre-stressed bolt and deep grouting that is set as 2 weeks will be better. Therefore, step by step and combined supporting technique with steel grid frame proposed here can provide an effective method for the soft rock roadway control in deep and soft coal mines.

Keywords: rock mechanics; deep mining; soft rock roadway; steel grid frame; supporting technique

1 引 言

格栅支护可以利用洞室开挖后围岩应力重新分

布而产生的变形到松动破坏的时间效应特性, 通过适时地采用格栅拱架与喷射混凝土形成的薄壁柔性支护结构, 调动并充分利用天然围岩的自身承载能

收稿日期: 2020-12-30

修回日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.41807249, No.51774267); 湖北省自然科学基金资助 (No.2019CFB535)。

This work was supported by the Nation Natural Science Foundation of China(41807249, 51774267), the Natural Science Foundation of Hubei Province(2019CFB535).

第一作者简介: 刘学伟, 男, 1987 年生, 博士, 副研究员, 主要从事深部软岩大变形失稳过程理论、数值方法与控制技术方面的研究工作。E-mail: liuxw@whrsm.ac.cn

通讯作者: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whu.edu.cn

力。由于这种支护形式同时具有钢拱架刚性支护和锚喷柔性支护的相应功能,并能达到洞室围岩稳定的目的,所以目前广泛应用于铁路、公路、水利水电隧道施工的支护设计中^[1]。

针对格栅拱架支护的研究,目前主要集中在以下几个方面,首先是格栅拱架参数和应用技术的研究。徐帮树等^[2]针对软弱围岩隧道提出了一种格栅拱架+注浆+锚喷网联合的初期支护形式,研究表明支护初期格栅及喷射混凝土均能发挥支护作用,而后期主要是喷射混凝土气作用;李洪泉等^[3]建立施工期隧道格栅钢架喷射混凝土支护的安全性评价方法,讨论了格栅钢筋特性对强度的影响;李树忱等^[4-5]基于弹性薄壳理论建立了“格栅拱架+喷射混凝土”力学模型,研究了喷层厚度及拱架间距对支护效果的影响,分析了欠挖状态下的隧道支护结构的安全系数,并提出了一种型钢拱架和格栅的联合支护技术^[6]。马栋^[7]、丁远振^[8]等开展了高强钢筋在不同等级围岩隧道中的支护效果研究。

另一方面是格栅支护和传统支护性能的对比研究。谭忠盛等^[9]针对大断面黄土隧道开展了型钢拱架与格栅拱架适应性研究,综合分析认为型钢拱架及格栅拱架均能适用于 IV 级黏质老黄土隧道,但格栅拱架更具优越性。曲海锋等^[10]通过现场试验,结合理论分析对格栅拱架和型钢拱架的适用性进行了初步探讨,给出两者适宜条件。张德华等^[11]系统地对比分析了钢拱架和格栅在施工过程中的围岩位移、初支钢架应力及围岩-初期支护接触压力,结果表明格栅支护是一种可适用于高地应力软岩隧道的支护结构。

上述研究大多针对格栅拱架在公铁路隧道的应用研究。我国是煤炭开采大国,多年来学者针对深井软弱围岩巷道提出了不同的支护技术,主要技术有预应力锚注技术^[12]、多层次锚喷网联合支护^[13-15]、恒阻大变形和负泊松比锚杆支护技术^[16-17]、锚架充协同控制技术^[18]以及笔者曾提出的分步联合支护技术^[19-22]。然而,目前格栅拱架在煤矿工程中的应用并不广泛,基于同样设计形式,格栅拱架与型钢拱架两种支护形式在经济、刚度、承载力等方面存在明显的差别。目前,张厚江等^[23]提出了采用全封闭格栅钢架控制膨胀性软岩巷道变形破坏的综合控制技术,并通过数值模拟,揭示了全封闭支护设计的整体性优势。然而,一旦巷道底板出现破坏变形底部格栅则难于拆除与返修,不同施工周期也会对支护效果造成显著影响。

因此,结合淮南矿区深部软弱岩巷特殊地质条

件,研究适用于深井软弱围岩条件的格栅拱架分步联合支护控制技术设计参数、加工及施作工艺以及综合支护技术对提高巷道围岩稳定性,防治深部巷道大变形灾害具有重要意义。

2 工程概况

2.1 工程地质概况

淮南矿区潘三矿位于淮南市洞山西北,地处凤台县正北。矿区处于华北板块,煤田盆地由南北翼对冲推覆运动构造,盆地内发育一系列褶皱与断层,构造复杂,区域构造应力明显。试验巷道为西一 8 煤回风下山,巷道断面为直墙半圆拱形(4.8 m×3.9 m),底板标高为-620 m。巷道顶板以泥岩和砂质泥岩等组成,总厚为 3.00~14.55 m,均厚为 6.53 m;直接底为泥岩,厚度为 4.10~5.35 m,均厚为 5.00 m,夹杂部分薄层砂质泥岩;直接底以下为砂岩与砂质泥岩互层,厚度为 6.2~12.3 m,均厚为 8.2 m。因此,影响巷道稳定性的主要岩层为直接顶底板的泥岩岩层,根据现场采集泥岩试样,获取强度参数:单轴抗压强度为 24.52 MPa,弹性模量为 5.73 GPa,黏聚力为 2.51 MPa,摩擦角为 34.48°。现场水压致裂法测试结果表明最大主应力为 21.36 MPa。

采用 X 射线衍射分析方法,对 4 个典型泥岩试样进行了矿物分析结果如下:伊利石含量为 15%,石英含量为 22%,高岭石含量为 42%,剩余 21%为长石和绿泥石等矿物。紫外分光光度计结果表明,测试岩样矿物组成以石英和高岭石为主。一般地,蒙脱石有很强的膨胀能力,伊利石次之,而高岭石的膨胀能力最弱,几乎不具膨胀性,但易遇水软化。因此,试验巷道围岩可定为具有遇水易软化和弱膨胀性的特点。

2.2 现有支护方案及失稳机制

现有支护方案具体施工工序为:一次支护:架设 29U 型棚(棚距 700 mm),棚腿埋深为 300~500 mm,巷道拱部和直墙铺设钢筋片,规格为 700 mm×600 mm,网格为 100 mm×50 mm;滞后迎头 3~5 m 施作高强预应力锁棚锚杆(排距为 1 400 mm,长度为 2 500 mm)及预应力锁棚锚索(排距为 1 400 mm,长度为 6 500 mm);滞后迎头 20 m 进行帮顶喷浆(喷层厚度为 50~100 mm);随后先进行巷道帮顶浅孔注浆与深孔注浆和底板止浆层施工与底板注浆。注浆后进行二次支护:施工预应力锚杆(排距为 1 400 mm,长度为 2 500 mm,预应力为 60 kN)和预应力锚索和底板锚索(排距为 2 100 mm,长度为 6 300 mm,预应力大于 150 kN)。

对于深部高应力软岩巷道，必须采用高强度支护形式及时主动控制围岩变形，调动了主次承载区（深部围岩和浅部围岩）自身的承载能力。然而，试验巷道开挖之后开展了帮顶浅孔注浆，深孔注浆、预应力锚索及底板支护由于现场原因而均未施作，由于软弱围岩的蠕变性以及松散破碎围岩体的低可锚性，在没有施作深孔注浆的情况下，锚杆支护极易由于围岩挤压流动而失效。

此外，巷道开挖后施工水以及岩层中所赋存的地下水汇集在开放的底板之上，造成底板不断软化，并逐渐传至底板深部，扩大了围岩松动圈，产生较大的集中应力。巷道在集中应力及水分侵蚀的共同作用下发生破坏，表现为强烈的底臃、两帮收敛和顶板下沉。巷道破坏图如图 1 所示。由图可知，巷道发生了显著的断面收缩，巷道高度由设计的 3.9 m 收缩到小于 2.0 m，U 型棚发生扭曲、底臃严重，巷道已失去正常工作能力。



图 1 现有巷道破坏图

Fig.1 The present failure pattern of the roadway

3 深井巷道格栅拱架控制技术

3.1 格栅拱架控制机制分析

研究表明^[1]，格栅钢架相对柔性，容许围岩适度变形的能力优于型钢拱架，能及时提供支护阻力；型钢拱架采用 U 型钢材料，其抵抗地应力的能力大于以螺纹钢为主要材料的格栅拱架。但实际工程中型钢拱架支护仍然容易发生拱架变形围岩坍塌等事故。其原因在于，一方面，地下工程复杂性和不可预测性，如果仅采用重型型钢拱架支护而不注重二次支护和跟踪监测，型钢拱架的支护效果减弱，也很可能造成岩周变形，甚至坍塌。所以，型钢拱架和格栅钢架仅起骨架作用。

另一方面，钢拱架的初始刚度较大，很容易就达到极限平衡状态，不仅不利于发挥围岩的自承能

力，反而增加了支护结构的负担；相反，格栅钢架具有较强的适应变形的能力，使围岩应力得到了部分释放。此外，格栅钢架和混凝土的协同工作能力较强，和素混凝土一样均属于柔性支护结构，对于较为软弱的围岩更能适合围岩变形。

然而，对于高地应力深井巷道，特别是软弱破碎巷道，仅仅依靠格栅支护是不可行的，必须联合其他二次支护措施。当围岩变形达到一定程度之后，巷道近表围岩逐渐破碎，此时必须及时通过注浆对破裂区围岩进行固结，对损伤区围岩进行修复，通过浆液的粘接修复作用恢复和提高围岩的完整性和整体强度。最后，在破裂损伤区围岩形成一个整体之后，还需尽快施工深长锚索将近表围岩锚固到深层稳定岩体中区，使靠近巷道浅表一定范围内的高应力峰值向围岩深处转移（应力转移），将锚注增强固区与深层稳定岩体联结成一体，实现围岩承载圈范围的扩大。最终达到控制围岩稳定的目的。

3.2 格栅拱架支护参数模拟分析

采用 FLAC^{3D} 分析格栅拱架间排距以及格栅主筋直径变化对巷道开挖后围岩位移及塑性区影响分布规律，研究分析不同格栅拱架支护参数对巷道围岩稳定性的影响规律。模型尺寸为 30 m×30 m×30 m，巷道为直墙半圆拱形，宽度为 4.8 m，高度为 3.9 m，锚杆直径为 22 mm，长度为 2.5 m，排距为 1.4 m；锚索直径为 22 mm，长度为 6.5 m，排距为 1.4 m。计算边界条件为：模型底部为固定位移边界，垂直应力为 20 MPa，侧压力系数为 1.15。围岩强度参数为：单轴抗压强度为 24.52 MPa，弹性模量为 5.73 GPa，黏聚力为 2.51 MPa，摩擦角为 34.48°，单元采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。其中，格栅钢筋采用格栅（geogrid）单元进行构建，锚杆和锚索采用 cable 单元，预应力分别为 60 kN 和 150 kN。

计算过程中，分析格栅主筋直径影响时，固定格栅间距为 500 mm，设置格栅主筋分别为 14、16、18、20、22 mm。研究格栅间距时，固定主筋直径为 22 mm，格栅间距分别为 500、600、700、800、900 mm。数值模拟支护设计如图 2 所示。

不同控制参数条件下帮部收敛、顶板下沉及底板塑性区分布曲线如图 3 所示。由图 3(a)可知，随着主筋从 14 mm 增加到 22 mm，顶板下沉量和帮部收敛量分别由 287、342 mm 逐渐降低至 237、304 mm，底板塑性区深度则由 3.68 m 降至 3.26 m。因此，增加主筋直径能在一定程度上控制围岩变形。然而，当主筋直径从 14 mm 增加到 20 mm，顶板下沉收敛量平均降幅为 5.58%，帮部收敛量平均降幅为 3.44%，

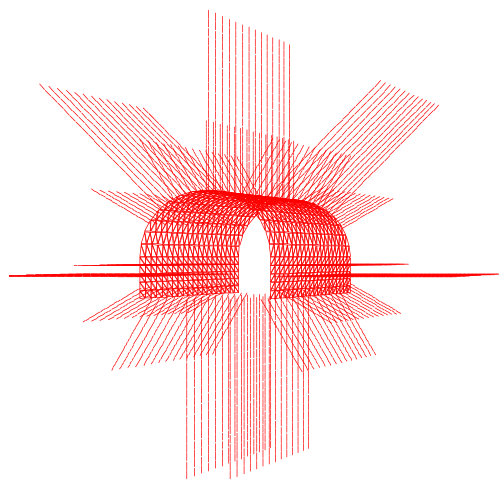
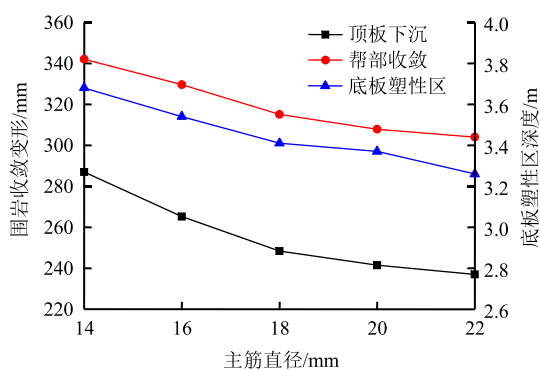
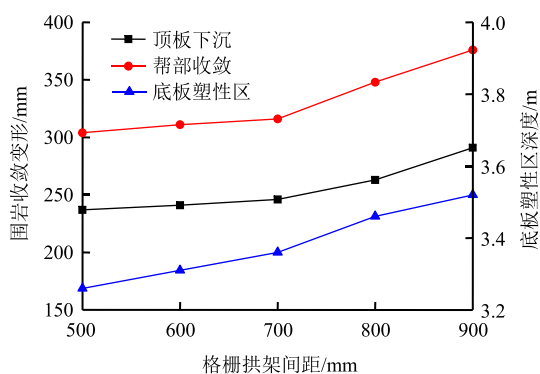


图2 格栅支护参数分析模拟

Fig.2 Numerical simulation for parameter analysis



(a) 主筋直径



(b) 格栅拱架间距

图3 格栅拱架支护参数分析

Fig.3 Controlling parameter analysis for steel grid frame

当主筋直径从 20 mm 增加到 22 mm, 顶板下沉和帮部收敛量下降幅度分别为 1.85% 和 1.25%。由此可见, 当主筋直径超过 20 mm 并进一步增加时, 对控制围岩收敛变形能力影响不大, 因此, 确定该工程格栅拱架主筋直径为 20 mm。

如图 3(b)所示, 随着格栅拱架间距的增加, 帮

部收敛、顶板下沉及底板塑性区深度均呈现逐渐增加的趋势。数值模拟表明格栅拱架的布置间距对支护效果起到了重要作用, 尽管拱架间距为 500 mm 时围岩变形量最小, 但同时这种方案会增加支护的人工和材料成本。另一方面, 当格栅拱架间距从 500 mm 增加到 700 mm, 顶板下沉和帮部收敛量增幅较小, 平均增幅分别为 1.88% 和 1.96%。当拱架间距超过 700 mm 时, 围岩收敛变形迅速增加, 顶板下沉和帮部收敛量平均增幅分别为 8.78% 和 9.09%。因此, 当格栅拱架间距为 700 mm, 不仅能降低施工成本, 同时围岩变形没有明显增加且在合理范围内。因此, 确定该工程格栅拱架间距为 700 mm。

图 4 为采用主筋直径为 20 mm, 箍筋为 8 mm, 间距为 700 mm 时格栅拱架分步联合支护的围岩变形、最大主应力和塑性区分布图。由图 4 可知, 采用该设计方案计算所得顶板下沉量为 251.4 mm, 帮部收敛量为 346.4 mm, 底板塑性区深度为 3.44 m。

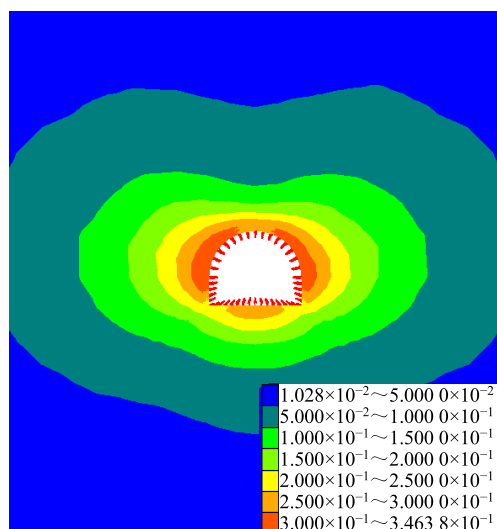
3.3 格栅拱架分步联合控制技术

根据试验巷道围岩破坏特征和数值模拟结果, 考虑到深井煤矿巷道及格栅拱架支护特点, 在对试验巷道进行修复支护过程中, 提出如下综合支护技术: 刷扩卧底→架格栅支架+一次锚杆锚索→初喷 50~100 mm 厚混凝土→浅孔注浆→打预应力锚杆→复喷 150 mm 厚喷射混凝土→深孔注浆→帮顶预应力锚索→底板治理 (底板混凝土止浆层+底角注浆锚管+底板锚索+底板注浆)。具体支护方案如图 5 所示。

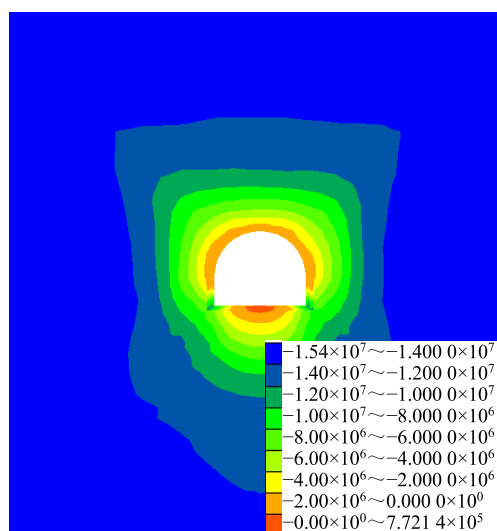
其中, 支护控制参数为: 格栅拱架主筋直径为 20 mm, 箍筋为 8 mm, 间距为 700 mm; 喷射混凝土强度等级 C20; 二次支护锚杆直径为 22 mm, 长度为 2 500 mm, 排距为 1 400 mm; 二次支护锚索直径为 22 mm, 长度为 6 500 mm, 排距为 1 400 mm; 二次支护锚索锚梁选用 20#槽钢, 长度为 2.2 m; 浅孔注浆孔深为 1 m, 注浆管长为 0.5 m, 排距为 2.1 m; 深孔注浆孔深为 5 m, 注浆管长为 3 m, 排距为 2.1 m; 底板注浆孔深为 2 m, 注浆管长为 1.5 m, 排距为 2.1 m。

同时, 试验巷道内也开展了 U 型钢支架作为对比, 其支护方案仍采用 2.2 节中原有技术方案, 且在实际施工应补全了原有未施作的深孔注浆以及底板支护。显然, 对比 U 型钢支护与格栅支护, 除了主体承载结构由 U 型钢拱架调整为格栅拱架之外, 还存在一定区别:

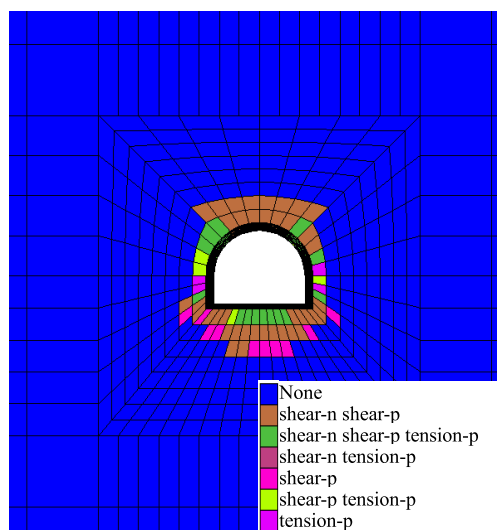
首先是混凝土喷层厚度, 格栅支护共进行了 2 次喷射混凝土, 总厚度达到 250 mm, U 型钢支护



(a) 位移云图 (单位: m)



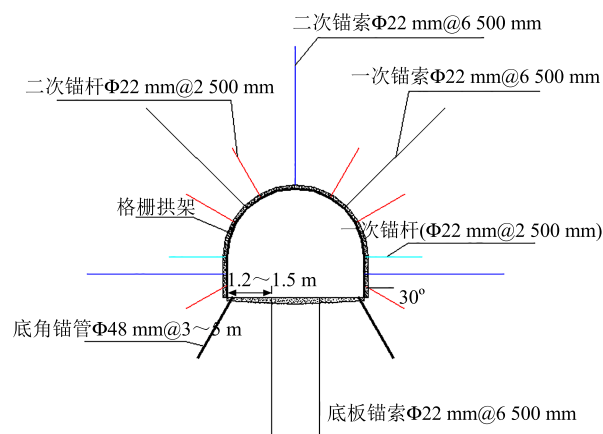
(b) 最大主应力云图 (单位: Pa)



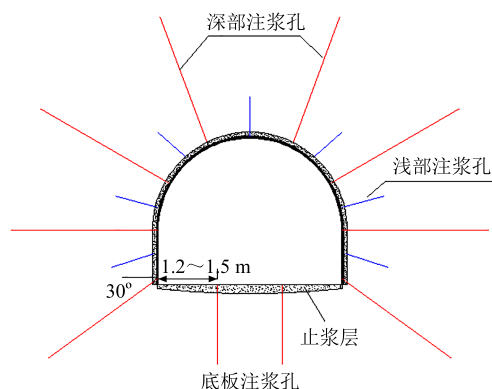
(c) 塑性区分布

图 4 巷道变形、应力及塑性区分布

Fig.4 Deformation, stress, and plastic zone distribution



(a) 支护设计示意图



(b) 注浆孔布置示意图

图 5 格栅拱架支护方案示意图

Fig.5 The schematic diagrams for steel grid frame supporting technique

为一次喷射,厚度为 50~100 mm,且滞后迎头 20 m。

其次,锁棚锚索和锚杆的布置方式存在较大差异。如图 6 所示,格栅支护方案中一次锚索和锚杆每棚支架各布置 2 根,由于其内部采用钢筋焊接而成,内部存在较大空间,因此每根锚索锚杆均穿透格栅支架并通过方形托盘安装固定,实现初支的整体稳定性。而 U 型钢支护方案中则采用限位卡扣施作锁棚锚索和锁棚锚杆,因此,每棚支架施作锁棚锚索和锚杆各 4 根。

格栅拱架由一个拱部和两个边墙共 3 个单元组成,单元间通过连接角钢、钢板、螺栓螺母拧接(如图 7(a)所示)。接头位置设置一次预应力锚索锚固,钢架与围岩建设置混凝土垫块楔紧。每个单元均由主筋、箍筋和加强筋焊接成型,具体为:①主筋。主筋为 HRB400 钢筋作为栅拱架受力筋,可根据围岩级别、钢架厚度、钢架类型加以比选。②箍筋。为“8”字形钢筋,焊接在格栅拱架内侧,横竖“8”字形钢筋间隔 60 mm 交错布置,与主筋焊接一起形成整体。③加强筋。加强筋为 HPB300 钢筋,布置

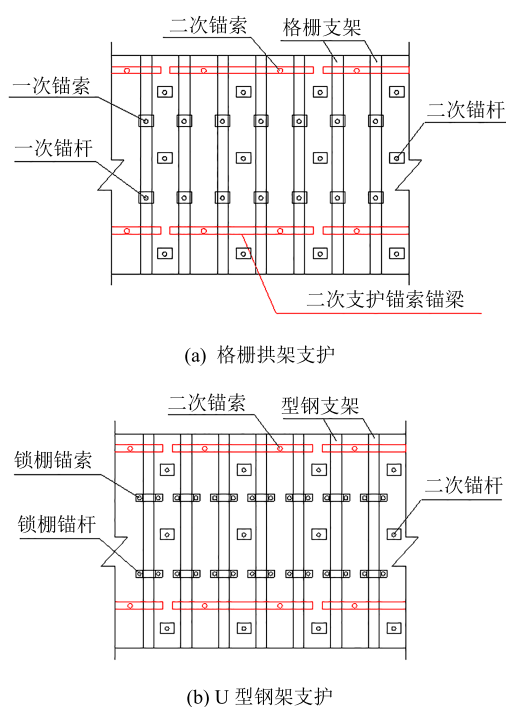


图6 不同支护方式锚索锚杆纵断面布置图

Fig.6 Longitudinal section layouts of bolt and cable for different supporting methods

在主筋外侧，与主筋焊接一起形成整体，起加固及限制钢架变形作用。加强筋一般选择直径为 8 mm 的，间距 1 m 环向布置。

格栅拱架接头及“8”字形钢筋设计图与成品图如图 7 所示，现场具体施工工艺为

(1) 清渣初喷。在巷道刷扩卧底之后，对局部欠挖部位应予凿除并清除底角浮渣，初喷 50~100 mm 厚 C20 喷射混凝土找平层便于安装格栅拱架。

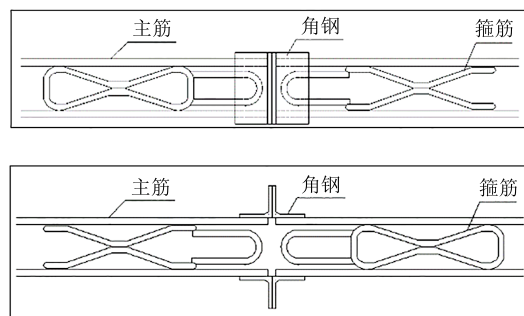
(2) 安装拼接。格栅拱架安装时应垂直于巷道中线，由于巷道内无法焊接，格栅拱架两单元连接时通过预留纵向连接螺栓孔采用钢螺栓螺母拧接。

(3) 联合稳定。格栅拱架安装完成之后，迅速施作一次锁栅预应力锚杆和锚索稳定格栅拱架（见图 5(a)），以保证格栅拱、钢筋网、喷射砼和锚杆与围岩形成联合受力结构。

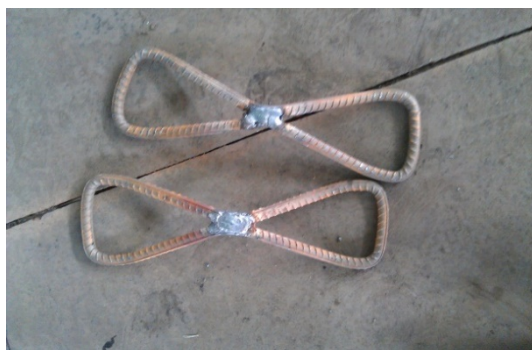
4 控制效果分析

4.1 现场监测结果

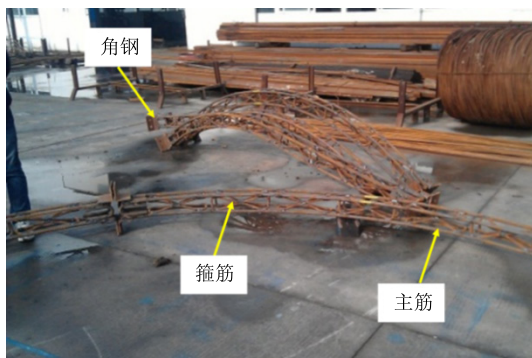
根据上述研究成果，在淮南矿区潘三矿西一 8 煤回风下山内开展了工业性试验，其中，图 8 为格栅拱架现场安装施工图。同时，试验巷道内采用两种不同支护方案进行对比分析，如图 9 所示，巷修沿着巷道下山方向进行，即先进行格栅段施工再进行型钢段的施工，其中采用格栅拱架支护巷道长度



(a) 格栅接头设计大样图



(b) “8”字形箍筋加工成品



(c) 格栅拱架加工成品图

图7 格栅拱架设计加工图

Fig.7 Design and processing drawing for steel grid

为 100 m，采用 U 型钢架支护巷道长度为 80 m。

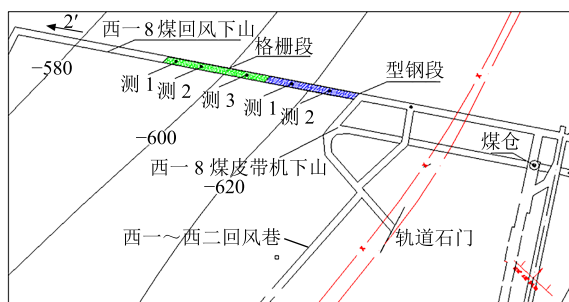
如图 9 所示，巷道内格栅拱架支护段和型钢支护段分别布置 3 个和 2 个表面位移监测点，每个监测断面内在巷道两帮和顶板安装 3 个监测球头，采用中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的 WRM-3 型丝尺两用收敛计（见图 9(b)）对两帮收敛变形进行监测，精度可达 0.01 mm。

格栅拱架支护段测点两帮累计收敛及收敛速率曲线如图 10 所示，由图可知，由于格栅拱架为柔性支护，在浅孔注浆之前围岩变形迅速发展，其中 3 个测点两帮累计变形分别为 96.3、143.5、129 mm，平均收敛变形速率维持在 9 mm/d 左右，最大达到 18.73 mm/d。



图 8 格栅拱架支护安装图

Fig.8 In situ applied picture of steel grid



(a) 巷道平面与监测点布置图



(b) 两帮收敛监测

图 9 现场监测示意图

Fig.9 In situ monitoring and layout figure of roadways

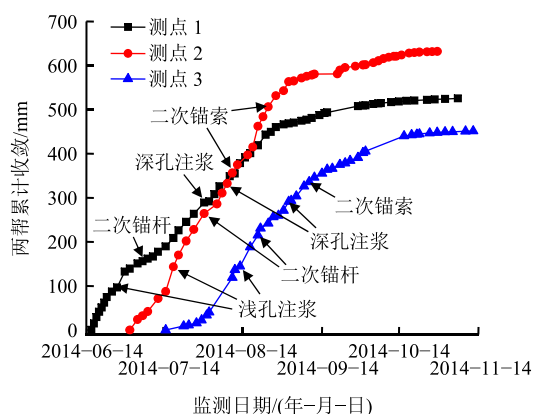


图 10 格栅支护段两帮收敛曲线

Fig.10 Convergence curves of two sides of steel grid support section

在二次锚杆施工之后,变形速率出现一定降低,由图 11 可知,各测点变形速率下降到 10.0 mm/d 左右,其中测点 1 收敛变形速率最低为 5.4 mm/d。然而,此时围岩并未出现明显收敛趋势,因此进一步施工深孔注浆与二次预应力锚索。在二次锚索施工完成之后,测点 1 在 21 d 后变形速率下降到 1 mm/d 以下,在监测到 126 d 之后,连续 17 d 均出现变形速率小于 0.3 mm/d 的情况,表明精确测站 1#的帮部变形速率已经稳定;测点 2 在 18 d 后变形速率下降到 1 mm/d 以下,在监测到 113 d 之后,连续 7 d 均出现变形速率小于 0.3 mm/d 的情况;测点 3 在 28 d 后变形速率下降到 1 mm/d 以下,并在监测到 109 d 之后,连续 11 d 均出现变形速率小于 0.3 mm/d 的情况,表明巷道整体已经趋于稳定。

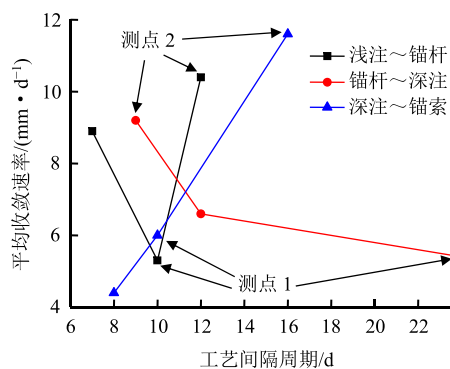


图 11 不同施工周期与围岩变形速率关系曲线

Fig.11 Relationship between construction period and deformation rate

进一步,研究了不同施工间隔周期对巷道变形控制的影响,主要考察了浅部注浆(浅注)、二次锚杆(锚杆)、深部注浆(深注)和二次锚索(锚索)4个施工工序的3个间隔周期。图 11 获取了不同施工周期与围岩变形速率关系曲线,由图可知,当浅注和锚杆施工间隔由 7 d 增加到 12 d 时,围岩平均收敛速率由 8.9 mm/d 先降低到 5.3 mm/d 又增加到 10.4 mm/d;当锚杆与深注施工间隔由 9 d 增加到 24 d 时,变形速率逐渐由 9.2 mm/d 降低到 6.6 mm/d,并且降低速率逐渐趋于稳定;当深注与锚索施工间隔由 8 d 增加到 16 d 时,变形速率由 4.4 mm/d 线性增加到 11.6 mm/d。

监测结果表明,浅孔注浆与二次锚杆之间施工间隔应控制在 10 d 内,此时平均收敛速率最低,而二次锚杆与深孔注浆之间施工间隔则不宜超过 14 d。结合图 10 和图 11 可知,对于监测点 2,由于其所有施工间隔均处于最不利的周期状态,因此,该测

点两帮的收敛变形速率及最终稳定时的收敛量均高于其他 2 个测点。

根据上述分析,可以在格栅拱架支护初期不施工喷注措施,等围岩应力及变形释放一定程度之后,再及时跟进,一般时间间隔在 14 d 左右施工浅孔注浆。注浆或喷浆加固措施能够修复巷道的破裂损伤区,在短期内较好的控制围岩的变形,在水泥浆液初期强度形成后的一段时间内,围岩变形速率逐渐减缓,整体强度稳定增长。但水泥注浆较脆,注浆 10 d 后,若锚索施工没有及时跟进,围岩变形不能得到有效控制,注浆将呈现失效的趋势。因此,注浆与锚杆及锚索之间的施作时机的正确选择是保证巷道稳定性的关键因素,由监测数据分析,二次锚杆和锚索合理的支护时间是浅孔及深孔注浆后 10 d 内完成最优,而预应力锚杆与深孔注浆之间应控制在 2 周内较优。这一结果与陆银龙等^[24]采用围岩变形量获得的施工间隔较为吻合。

4.2 不同支护方式对比

试验对采用传统架棚喷浆支护巷道设置了 2 个表面位移监测断面,将所获得的监测结果与格栅拱架支护巷道监测结果进行对比,得到不同支护方式围岩收敛变形对比曲线,如图 12 所示。

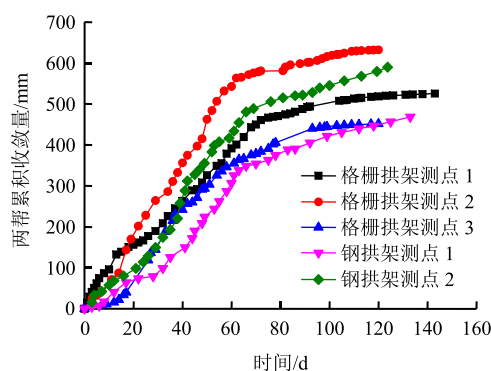


图 12 不同支护方式两帮累积收敛曲线

Fig.12 Total side deformation for different supporting methods

由图 12 可知,型钢支护因刚性较强,初期支护变形在支护设立两周内,两帮累积收敛值仅为 60 mm 左右,收敛速率在 6 mm/d 以下,巷道围岩收缩变形较为缓慢,随着时间增长,开始呈现台阶式缓慢上升趋势,最终两帮收敛累计最大值分别为 468、589 mm,并呈现缓慢上升趋势,这是由于初支中型钢积累了较大的围岩压力及变形的缘故。

格栅支护为柔性支护,可充分释放围岩变形,支护设立 10 d 后两测点两帮累积收敛均接近 100 mm,

平均收敛速率均在 10 mm/d 左右,围岩变形迅速发展。此后,随着二次支护的逐渐施作,支护变形逐渐得到得以控制,两帮变形曲线呈现明显收敛趋势,最终巷道两帮收敛变形分别稳定在 525、632 mm 和 451 mm。显然,格栅支护巷道最终稳定收敛变形较型钢支护大,这是由于一次支护时格栅拱架释放了较大的围岩变形造成的。

图 13 为不同支护方式拱顶变形监测曲线,由图 10 可以看出,型钢拱架试验段的拱顶沉降为 106 mm,二次支护施作之前拱顶沉降为 100 mm,二次锚索支护前拱顶沉降约占 94%,支护后拱顶沉降约占 6%;格栅拱架试验段的拱顶沉降为 94 mm,二次锚索支护前拱顶沉降约占 75%,支护后拱顶沉降约占 25%;钢拱架试验段比格栅试验段的沉降略大;在施作喷锚注支护之后,两种支护方式巷道围岩顶板均能收敛稳定。

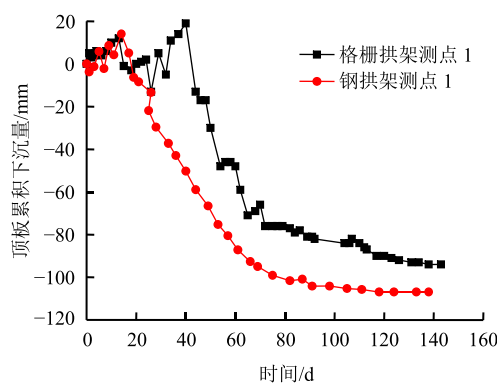


图 13 不同支护方式拱顶累积下沉曲线

Fig.13 Total roof deformation for different supporting methods

此外,在经济效益方面,在上述对比工业性试验段中,不考虑喷锚网情况下,由于单位长度钢筋的重量比型钢轻,格栅钢架材料成本仅为型钢拱架的 26%。其次,工字钢的重量大、硬度大,安装费工费时,而格栅钢架轻便,在洞内仅需简单辅助即可安装到位,因此人工和机械成本也比型钢拱架节省。

综合以上分析可知:①型钢支护由于刚度较大,且配合锁棚锚索与锚杆,具有较高的一次支护强度,因此初期控制位移明显。格栅支护属于柔性支护,初期主要是让压并释放围岩变形,因此其初期水平累积收敛量和变形速率均明显高于型钢拱架支护。②根据图 12 和图 13 可以看出,加设二次支护之后,格栅支护沉降速率明显变小,最终沉降值趋于稳定,型钢支护位移则趋于稳定但仍呈缓慢上升趋势。

③由于格栅拱架较型钢拱架质量轻, 安装所需工时少且材料消耗低, 同时一次支护中所需锚杆锚索用量也大大降低, 因此, 格栅支护在经济和效率方面优于型钢支护。

5 结 论

(1) 通过试验确定了潘三矿西一 8 煤回风下山巷道围岩物理力学性质, 分析了巷道破坏失稳原因, 主要为: 二次支护没有及时施作, 围岩在水的作用下不断软化而失去强度, 扩大了围岩松动圈, 降低了锚杆支护性能, 最终表现为围岩大变形失稳。

(2) 数值分析表明, 在该巷道工况下, 当格栅拱架间距为 700 mm, 主筋直径为 20 mm 时, 格栅支护具有较优的围岩控制能力和较低的施工成本。

(3) 提出了基于格栅拱架的软岩巷道分步联合控制技术, 包括: 格栅支架+一次锚杆锚索→后混凝土初喷找平→浅孔注浆→预应力锚杆→复喷 150 mm 厚混凝土→深孔注浆→帮顶预应力锚索→底臌治理。进一步, 提出了格栅拱架的制作方案、施工工艺及安装流程。

(4) 现场试验监测结果表明, 采用格栅拱架分布联合支护技术能实现巷道稳定性控制。预应力锚杆与锚索合理的支护时间是浅孔及深孔注浆后 10 d 内完成最优, 而预应力锚杆与深孔注浆之间应控制在 2 周内较优。

(5) 对比分析表明, 由于格栅拱架支护强度较低, 能有效利用一次支护时期的围岩变形能力, 因此围岩初期变形速率及最终收敛变形量均大于型钢支护。加设二次支护之后, 格栅支护位移能较快呈现收敛, 而型钢支护位移仍呈缓慢上升趋势。综合经济及社会效益, 格栅支护在深井软岩巷道中的应用是可行的。

参 考 文 献

- [1] 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 Ren-guo, ZHANG Li-yong, 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.
- [2] 徐帮树, 杨为民, 王者超, 等. 公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 248-254.
XU Bang-shu, YANG Wei-min, WANG Zhe-chao, et al. Study of initial support safety evaluation about shape steel reinforced shotcrete in highway tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 248-254.
- [3] 李洪泉, 杨成永, 徐明新, 等. 隧道格栅钢架喷混凝土支护安全性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3093-3098.
LI Hong-quan, YANG Cheng-yong, XU Ming-xin, et al. Assessment on safety of lattice girder reinforced shotcrete support for tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Suppl.2): 3093-3908.
- [4] 李树忱, 冯丙阳, 马腾飞, 等. 隧道格栅拱架喷射混凝土支护力学特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊 1): 57-63.
LI Shu-chen, FENG Bing-yang, MA Teng-fei, et al. Researches on mechanics behavior of lattice girder reinforced shotcrete support for tunnels[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(Suppl.1): 57-63.
- [5] 李树忱, 朱林, 孙爱花, 等. 超欠挖状态下支护结构的力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2817-2825.
LI Shu-chen, ZHU Lin, SUN Ai-hua, et al. Mechanical analysis of support structure based on over-under-excavated tunnels[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(11): 2817-2825.
- [6] 李树忱, 晏勤, 谢璨, 等. 膨胀性黄土隧道钢拱架-格栅联合支护力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 446-456.
LI Shu-chen, YAN Qin, XIE Can, et al. The study on mechanical behavior of composite supports of steel-grid in loess tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(2): 446-456.
- [7] 马栋, 谭忠盛, 丁远振, 等. 高强钢筋格栅在 V 级围岩隧道中的支护效果研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 14-20.
MA Dong, TAN Zhong-sheng, DING Yuan-zhen, et al. Study on support effect of high-strength steel grille in tunnel with V grade surrounding rock[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2017, 50(Suppl.2): 14-20.
- [8] 丁远振, 谭忠盛, 马栋, 等. 高强钢筋格栅在 IV 级围岩隧道中的支护效果研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 98-104.
DING Yuan-zhen, TAN Zhong-sheng, MA Dong, et al. Study on support effect of high-strength steel grille in tunnel with IV grade surrounding rock[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2017, 50(Suppl.2): 98-104.
- [9] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面黄土隧道中型钢与格栅适应性的对比试验[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4):

- 628-633.
- TAN Zhong-sheng, YU Yu, WANG Ming-nian, et al. Comparative tests on section steel and steel grid for loess tunnels with large section[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(4): 628-633.
- [10] 曲海锋, 朱合华, 黄成造, 等. 隧道初期支护的钢拱架与钢格栅选择研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 258-262.
- QU Hai-feng, ZHU He-hua, HUANG Cheng-zao, et al. Study on selection of section-steel and grid-steel in primary support system of tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(2): 258-262.
- [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 De-hua, LIU Shi-hai, REN Shao-qiang. Research on selection on steel and grid for tunnel support in soft rock with high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(11): 2258-2266.
- [12] 康红普, 范明建, 高富强, 等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2227-2241.
- KANG Hong-pu, FAN Ming-jian, GAO Fu-qiang, et al. Deformation and support of rock roadway at depth more than 1 000 meters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2227-2241.
- [13] 冯忠居, 江冠, 赵瑞欣, 等. 基于多因素耦合效应的锚索预应力长期损失研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2215-2224.
- FENG Zhong-ju, JIANG Guan, ZHAO Rui-xin, et al. Study on pre-stress long term loss of anchor cable considering coupled multiple factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2215-2224.
- [14] 孟庆彬, 韩立军, 张帆舸, 等. 深部高应力软岩巷道耦合支护效应研究及应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1424-1435.
- MENG Qing-bin, HAN Li-jun, ZHANG Fan-ge, et al. Coupling support effect on high-stress deep soft rock roadway and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1424-1435.
- [15] 孟庆彬, 韩立军, 张建, 等. 深部高应力破碎软岩巷道支护技术研究及其应用. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3861-3872.
- MENG Qing-bin, HAN Li-jun, ZHANG Jian, et al. Research and application of supporting technology in deep high stress fractured soft-rock roadway[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(11): 3861-3872.
- [16] 何满潮, 李晨, 宫伟力. 恒阻大变形锚杆冲击拉伸实验及其有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2179-2187.
- HE Man-chao, LI Chen, GONG Wei-li. Elongation and impacting experimental system for bolts with constant resistance and large deformation and finite element analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2179-2187.
- [17] 何满潮, 李晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8), 1513-1529.
- HE Man-chao, LI Chen, GONG Wei-li, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(8): 1513-1529.
- [18] 姜鹏飞, 康红普, 王志根, 等. 千米深井软岩大巷围岩锚架充协同控制原理、技术及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1020-1035.
- JIANG Peng-fei, KANG Hong-pu, WANG Zhi-gen, et al. Principle, technology and application of soft rock roadway strata control by means of “rock bolting, U-shaped yielding steel arches and back filling” in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(3): 1020-1035.
- [19] 刘泉声, 高玮, 袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 166-190.
- LIU Quan-sheng, GAO Wei, YUAN Liang. Theory and supporting technology of deep mine rock in stability controlling and its application[M]. Beijing: Science Press, 2010: 166-190.
- [20] 刘泉声, 康永水, 白运强. 顾桥煤矿深井岩巷破碎软弱围岩支护方法探索[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3097-3104.
- LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, BAI Yun-qiang. Research on supporting method for deep rock roadway with broken and soft surrounding rock in Guqiao coal mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3097-3104.