

锚网-围岩接触面注浆充填预应力施加技术

原贵阳^{1,2}, 高富强^{1,2}, 王涛^{1,2}, 李建忠^{1,2,3}, 王晓卿^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭资源智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要:针对松软煤体巷道护表构件主动支护效应差、局部裸露围岩破碎范围持续扩大导致的锚杆、锚索失效问题, 开发了网后注浆面型预应力施加技术并进行了实验室试验及现场验证。首先分析了锚网支护围岩变形破坏方式及控制方法, 阐述了网后注浆技术原理; 其次开展了不同规格型号金属网的网后注浆实验室试验, 分别得到了主动面型预应力施加过程中锚杆受力、注浆压力、护表构件变形量及面应力演化规律; 最后开展了现场工况下的顶板及两帮网后注浆试验, 得到了护表构件在一定变形量前提下的面型预应力施加值, 验证了网后注浆技术的适用性。研究表明: ①金属网与煤壁之间存在间隙是导致支护系统主动支护能力差和锚杆、锚索支护失效的主控因素, 围绕金属网与煤壁接触面凹凸不平的结构间隙进行注浆填充、全面封闭围岩是完善锚网支护系统的技术手段; ②在金属网与围岩之间进行注浆充填可实现面型主动预应力的施加, 面应力变化趋势主要分为: 初始面应力恒定阶段、面应力上升阶段、面应力降低至稳定阶段; ③网后注浆过程中, 面应力变化趋势与注浆压力、金属网变形量紧密相关, 面应力上升过程中, 注浆压力、金属网变形量也随之升高; ④网后注浆可缓解锚杆托盘应力集中程度, 面应力上升过程中可使得应力集中的锚杆预紧力呈现出小幅度降低趋势, 受力较为均匀的锚杆预紧力呈现出同步上升趋势。所得研究成果有望成为锚杆支护配套技术, 为复杂困难巷道治理提供技术储备与理论参考。

关键词: 锚杆支护; 金属网; 网后注浆; 面型预应力; 围岩控制

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)05-2222-09

A novel approach for applying active surface pre-stress on surrounding rocks of roadways by backfilling behind surface support

YUAN Guiyang^{1,2}, GAO Fuqiang^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, LI Jianzhong^{1,2,3}, WANG Xiaoqing^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In response to the poor active support effect of the surface protection components in soft coal roadway and the continuous expansion of the broken range of local exposed surrounding rock, which leads to the failure of anchor rod and cables, a mesh grouting surface type prestressed application technology has been developed. The authors conducted post mesh grouting tests on different specifications and models of metal mesh, and obtained the mechanical response characteristics of the support system during the application of active surface prestressing. Based on this, the post mesh grouting

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-10-27 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0566

基金项目: 天地开采设计事业部科技创新基金资助项目 (TDKC-2022-QN-01, KJ-2022-KCZD-01); 天地科技股份有限公司科技创新基金资助项目 (2022-2-TD-QN008)

作者简介: 原贵阳 (1994—), 男, 山西长治人, 硕士。E-mail: 1185413007@qq.com

引用格式: 原贵阳, 高富强, 王涛, 等. 锚网-围岩接触面注浆充填预应力施加技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2222-2230.

YUAN Guiyang, GAO Fuqiang, WANG Tao, et al. A novel approach for applying active surface pre-stress on surrounding rocks of roadways by backfilling behind surface support[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2222-2230.



移动阅读

tests on the roof and two sides of the mesh under on-site conditions were carried out, verifying the applicability of post mesh grouting technology. The research results indicate that: ① There is a gap between the metal mesh and the coal wall, which leads to poor active support ability. The continuous expansion of the broken range of the exposed surrounding rock is the main controlling factor for the failure of anchor rod and anchor cable support. Filling the uneven structure around the contact surface between the metal mesh and the coal wall, increasing the active support ability of the protective surface components, and comprehensively sealing the surrounding rock are the technical means to improve the anchor mesh support system; ② Injecting and filling between the metal mesh and the surrounding rock can achieve the application of surface active pre-stress. The trend of surface stress change is mainly divided into: the initial stage of constant surface stress, the stage of increasing surface stress, and the stage of reducing surface stress to stable state; ③ During the process of grouting behind the mesh, the trend of changes in surface stress values is closely related to the grouting pressure and deformation of the metal mesh. During the process of increasing surface stress, the grouting pressure and deformation of the metal mesh also increase accordingly; ④ Grouting behind the mesh can effectively alleviate the stress concentration of the cable tray. During the process of increasing the surface stress value, the pre-tightening force of the cable with stress concentration can show a small decrease trend, while the pre-tightening force of the cable with relatively uniform stress shows a synchronous upward trend during the process of increasing the surface stress value. The technologies developed are expected to become supporting technologies for rock bolt support, providing technical and theoretical references for the treatment of complex and difficult roadway.

Key words: rock bolting; metal mesh; backfilling behind mesh; surface active pre-stress; ground control

金属网是一种地下工程常用的柔性护表构件,在锚杆支护系统中发挥着不可替代的作用^[1]。锚杆依靠高预紧力的施加,在围岩内部形成不同程度的压应力区,相邻锚杆产生的压应力区相互重叠从而在巷道周边形成压缩带^[2-4]。对于巷道表面围岩来说,金属网的施加可将锚杆形成的点支护转化为面支护,扩大锚杆预应力作用范围,有效支护相邻锚杆之间裸露岩层。护表构件金属网在发挥支护效应的同时,自身受力较为复杂,破坏形式多种多样,井下金属网的变形破坏随处可见,存在巨大的安全隐患^[5-7]。

目前关于金属网存在的问题,主要分为3个方面:①金属网的自身结构强度问题;②金属网的边界联网问题;③金属网与围岩接触面问题。

针对金属网的结构问题:笔者团队^[8-9]分析了不同种类组合构件对钢筋网强度及刚度的加固作用,从减跨角度分析了组合构件对钢筋网的加固机理;林健和孙志勇^[10-11]对井下支护常用的3类金属网进行垂直载荷试验,对比了金属网的变形破坏特征及力学响应;葛凤忠^[12-13]分析了金属网的规格型号对支护系统力学性能的影响规律并建立了力学模型,对煤矿井下金属网的选型提出了设计原则。李明轩^[14]总结了松软煤层巷道因金属网与锚杆强度不匹配导致的锚固单元体及巷道围岩失稳破坏特征,分析了金属网在松软煤巷围岩控制中的重要作用。ORTLEPP和STACEY^[15-16]针对焊接钢筋网得出了影响支护效果的主控因素。PAKALNIS和AMES^[17]针对钢筋网与菱形

网进行现场原位强度测试,分析了网孔结构对支护系统强度的作用规律;PLAYER等^[18]研究了不同加载角度对金属网力学性能的作用规律,当加载盘与金属网成45°角时,金属网的承载能力大幅度提高;NEMCIK等^[19]对钢筋网单一网格进行单向拉伸试验,结果表明钢筋网网格在45°方向施加载荷时,网格的极限承载能力约为钢筋网网丝抗拉强度的40%,当钢筋网网格变形量达到极限变形量的60%时,焊点开始发生剪切破坏,焊点的破坏将严重制约钢筋网的承载能力。

针对金属网的联网问题,孙志勇和林健^[20]研究了不同绑丝间距条件下3类钢筋网的极限强度利用率,结果表明边界约束条件会大幅度降低钢筋网的极限强度利用率,50 mm绑丝条件下钢筋网的极限强度利用率基本为13%左右,100 mm绑丝间距条件下钢筋网的极限强度利用率为11%;笔者^[21]分析了搭接方式对金属网力学响应特征的影响规律,得到了3类金属网在搭接情况下边界联网区域的变形破坏特征。

关于金属网与围岩接触面问题,目前主要的技术手段包括传统锚网喷支护及锚架充技术2类,方树林等^[22]针对煤矿井下喷射混凝土支护存在的问题,开展了巷道喷射混凝土的力学性能、作用机理及其与锚杆支护相互作用的研究;姜鹏飞等^[23]针对煤矿千米深井高应力、软岩大巷围岩强时效大变形难题,系统介绍了锚架充协同控制原理、技术及应用。现场实际情况中,煤矿回采巷道掘进过程中两帮经常出现垮塌现象导致巷道表面凹凸不平,在影响支护速度的同时也导

致金属网在铺设过程中出现与煤壁贴合程度不紧的现象。金属网与煤壁之间存在间隙是制约护表构件无法有效发挥主动支护作用的关键因素,而关于此方面的研究内容鲜见报道。

笔者从金属网—围岩接触界面贴合程度出发,总结了高预应力锚网支护技术煤壁变形破坏形式,提出了网后注浆面型预应力施加技术,在解决接触面问题的基础上将金属网支护作用变被动为主动,并通过实验室试验与现场试验相结合的方法探讨了网后注浆条件下支护系统力学响应特征及现场适用性,所得研究成果有望成为锚杆支护配套技术,为复杂困难巷道治理提供技术储备与参考。

1 锚网支护煤壁破坏形式及控制方法

为了分析锚网支护作用下煤壁变形破坏方式及支护结构主动支护特性,系统调研了山西、陕西等多个矿区。

1.1 锚网支护围岩变形破坏方式

锚网支护应用在煤巷中,尤其是松软或节理裂隙较为发育的煤层中普遍存在着金属网贴紧度低、两帮大范围锚杆、锚索预紧力损失及部分锚杆、锚索支护失效等现象,失效形式如图 1 所示。通过综合评判支护系统主动支护能力及煤壁变形破坏形式,认为造成锚杆支护系统产生上述变形破坏形式的主要原因有:

(1) 浅部围岩缺乏主动支护。受限于巷道新掘断面凹凸不平特征,金属网铺设于巷道表面贴帮性不强,一般与煤壁之间存在较大间隙,锚杆、锚索的预应力扩散在水平方向上较小,导致间隙区域大面积围岩处于裸露状态,无法有效发挥主动支护作用。

(2) 浅部围岩破碎范围及深度持续扩展。巷道掘进完成后自身存在破碎圈,加之受到不同程度的扰动及风化作用,浅部围岩逐渐产生破坏。护表区域内裸露围岩由于无主动支护作用导致浅部围岩逐渐变得破碎,松散块体通过网眼逐渐流落,进一步恶化了金属网与围岩接触面。

(3) 锚杆、锚索预应力降低。锚杆之间的松散煤体逐渐脱落,位于托盘底部的围岩从三向受力状态变为单向受力状态,在采动应力及风化作用的持续影响下,锚杆、锚索托盘底部的围岩也逐渐破碎并脱落,导致托盘底部出现空洞,从而降低了预应力水平,出现了锚杆、锚索支护失效的现象。

1.2 控制实现方法

基于以上围岩及支护结构破坏方式,提出以下控制对策:填充巷道表面凹凸不平结构、增加金属网的主动支护能力、全面封闭围岩。网后注浆技术通过在金属网与煤壁之间设置一层注浆柔膜囊袋,通过向柔



(a) 网与煤壁完全分离



(b) 煤壁风化破碎冒落



(c) 锚杆、锚索失效

图 1 锚网支护煤壁变形破坏方式

Fig.1 Deformation and failure mode of coal wall supported by anchor mesh

膜囊袋内部注射水泥浆填充巷道表面凹凸不平区域,在此基础上持续注浆使金属网产生 100 mm 左右变形。由金属网测试曲线可得,在煤壁未变形情况下通过金属网前期弹性变形可为围岩提供 33% 峰值强度的主动支护力,从而大幅度增加金属网的支护及时性与主动性,网后注浆原理如图 2 所示。

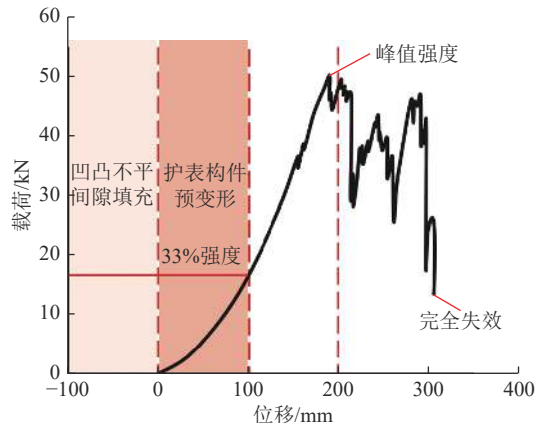


图 2 网后注浆原理

Fig.2 Principle of post mesh grouting

2 网后注浆实验室试验

为了提高网后注浆技术现场实用性,以目前井下常用的 3 类金属网配套钢筋托梁开展了实验室试验,其中金属网的网丝直径、网孔大小等均与现场常用护表构件型号保持一致,试验参数见表 1。

表 1 网后注浆试验参数

Table 1 Laboratory test of post mesh grouting mm

金属网	网格直径	网丝直径	托梁圆钢直径
钢丝网	150	4	16
钢筋网	60	8	16
钢筋网	80	8	16
钢筋网	100	8	16
菱形网	50	4	16

2.1 模型铺设

采用水泥、河沙及石子铺设巷道顶板模型,模型尺寸为 2.2 m×2.5 m×0.5 m,将模型底部部分碎石去除模拟新掘巷道凹凸形态,其中最大凹陷程度为 20 cm 左右,锚杆间排距为 800 mm。为了消除顶板模型边界条件,在试验台左右两侧采用锚杆进行对穿固定,模型前后采用 8 号铁丝进行悬吊,模拟井下金属网的连续状态,试验各部分连接方式如图 3 所示。

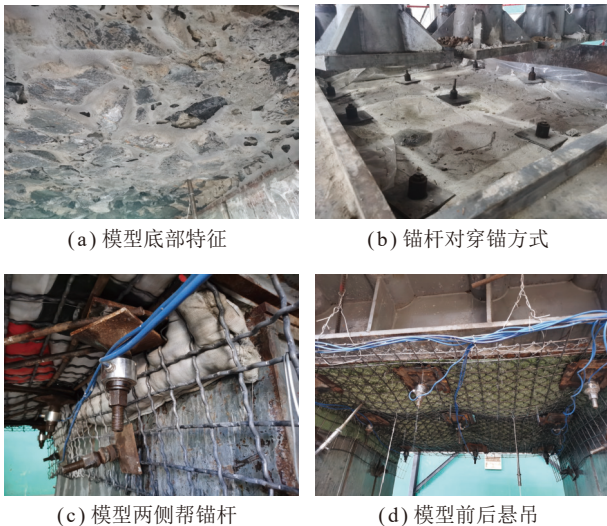


图 3 模型条件 Fig.3 Model conditions

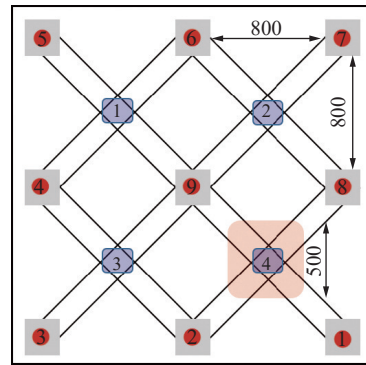
2.2 囊袋结构

注浆囊袋由 3 层针刺机织长丝土工布制作而成,材料撕破强力 1.5 kN,径向及纬向断裂强度分别为 100、70 kN,等效孔径为 0.07~0.50。按照模型锚杆间排距分别在注浆囊袋上留设直径 100 mm 的圆形通孔并进行密封,在囊袋上安设 2 个注浆接头用来与注

浆泵进行连接。

2.3 监测手段

试验监测系统包括锚杆测力计、拉线式位移传感器、注浆压力传感器及面应力传感器等。面应力传感器由水囊、胶管及压力变送器 3 个部分组成,测试过程中将面应力传感器放置在金属网与囊袋之间,当持续注浆至金属网产生网兜变形时,面应力传感器水囊逐渐被压缩,内部压力也随之产生变化,该应力为金属网对上部模型产生的主动支护力。模型传感器布置位置及试验过程分别如图 4、5 所示。



● 锚杆测力计 □ 位移传感器 ■ 面应力传感器

图 4 传感器位置布置

Fig.4 Sensor location layout

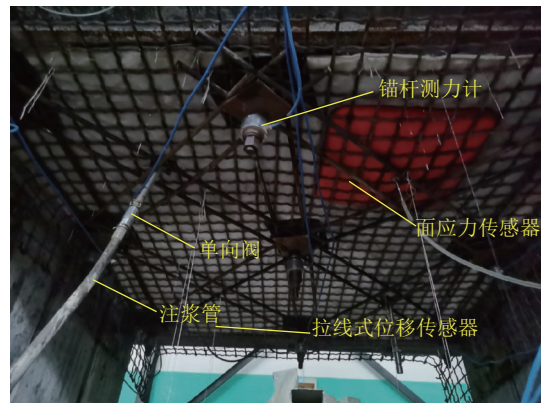


图 5 网后注浆实验室试验

Fig.5 Laboratory test of post mesh grouting

3 试验结果分析

3.1 面应力分析

网后注浆过程中随着浆液不断注入,金属网面应力持续升高。典型的钢筋编织网面应力-时间曲线如图 6 所示,系统最大变形量达到 103.1 mm 时,最高面应力达到了 0.23 MPa。

网后注浆金属网面应力-时间曲线主要分为 3 个阶段:

(1) 初始面应力恒定阶段。面应力传感器放置完

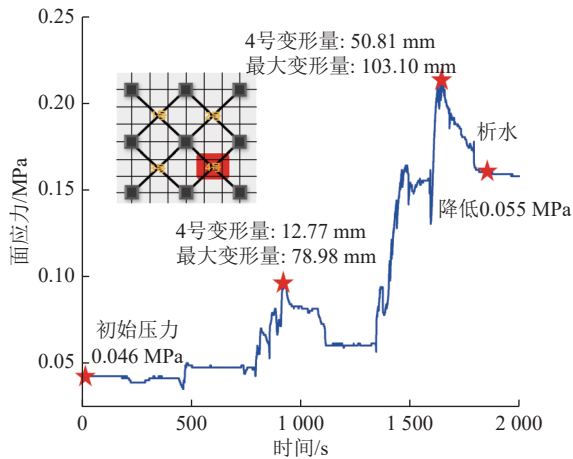


图6 钢筋编织网面应力曲线

Fig.6 Stress curve of reinforcement braided fabric

成后随着锚杆预紧力的施加,金属网与注浆囊袋之间的水囊产生了压缩从而具有一定的压力初值。不同类型金属网由于平面抗弯刚度不同,导致水囊初始压缩程度不同,因此初始面应力不一致,金属网平面抗弯刚度越高,初始压力越高。由于模型顶部为凹凸不平状,注浆过程中浆液首先将金属网与模型之间的间隙进行充填,并在此基础上将底部金属网进行压缩至产生一定的面应力。当应力低于初始应力时,面应力传感器水囊无法被压缩。由于浆液初期为流体或半流体状态,流体自身特有的等强压力流动作用导致浆液逐渐将模型其他区域进行填充并持续施压至初始应力,此阶段内面应力曲线保持稳定。

(2) 面应力上升阶段。金属网面应力随网兜变形逐渐升高,当面应力高于初始应力时水囊逐渐被压缩进而导致内部压力升高。面应力上升阶段内曲线呈

现出阶梯式上升趋势,且每次上升完成后会出现小幅度下降现象。由于浆液逐渐对模型4个网兜进行充填,曲线上升段的每个台阶均代表浆液充填方向的改变。当浆液充填方向改变时,初始填充区域内浆液中的水分逐渐析出,金属网回弹致使压力产生小幅度降低。

(3) 面应力降低至稳定阶段。注浆完成后水分逐渐从注浆囊袋中析出从而造成金属网的小幅度卸载,面应力产生一定幅度的降低,卸压幅度基本保持在20%~40%。水分析出完成后,支护系统及面应力将保持稳定,曲线表现为一条恒定曲线。

不同种类金属网面应力曲线如图7所示,可以看出5类曲线在变化趋势上基本一致,提取5类曲线中的初始压力、稳定压力、压力最高值、压力降低值及降低幅度5类指标见表2。

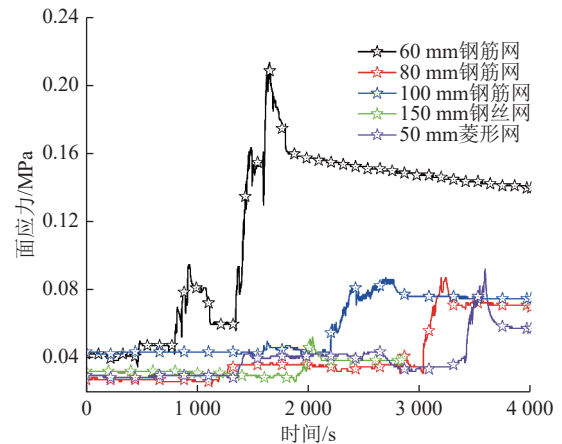


图7 不同种类金属网面应力曲线

Fig.7 Stress curves of different kinds of metal mesh

表2 金属网面应力统计

Table 2 Stress statistics of metal mesh

金属网	网孔直径/mm	初始压力/MPa	稳定压力/MPa	压力最高值/MPa	压力降低值/MPa	压力降低幅度/%
钢丝网	150	0.033	0.039	0.052	0.013	0.25
钢筋网	60	0.046	0.159	0.214	0.055	0.26
钢筋网	80	0.028	0.071	0.088	0.017	0.19
钢筋网	100	0.043	0.070	0.086	0.016	0.19
菱形网	50	0.031	0.057	0.092	0.035	0.38

不同类型金属网护表作用下,钢筋编织网稳定面应力普遍高于钢丝网及菱形网,其中60 mm 钢筋编织网稳定压力相比于钢丝网及菱形网提高幅度分别为307%、179%,80 mm 钢筋编织网稳定压力相比于钢丝网及菱形网分别提高82%、24%。不同种类金属网情况下,随着金属网平面抗弯刚度的不断提高,金属网产生的面应力逐渐升高。同类金属网情况下,压力

最高值、稳定压力与网格尺寸紧密相关,其中60 mm 钢筋编织网的稳定压力相比于80 mm 钢筋编织网、100 mm 钢筋编织网提高幅度分别为123.9%、127.1%。压力降低值随着压力最高值的增加而增加,且降低幅度均为压力最高值的20%~40%。网后注浆工艺中金属网面应力与护表刚度紧密相关,护表刚度越高,限制变形情况下能为上部围岩提供的最大面应力、稳定

面应力也越高。

3.2 注浆压力分析

5 组试验的注浆压力曲线较为类似, 为了便于对比, 仅列出 60 mm 钢筋编织网及 50 mm 菱形网压力曲线, 如图 8、9 所示。注浆初期, 注浆压力保持在较高水平, 此阶段属于浆液的贯通过程, 金属网在安装过程中由于锚杆预紧力的施加, 部分区域金属网网丝与顶部模型紧密接触, 浆液在贯通过程中需要沿着模型水平方向将护表构件与模型挤压至有流畅的浆液流通渠道。由于钢筋编织网的平面抗弯刚度较高, 在浆液贯通过程中需要更高的注浆压力, 其中钢筋编织网注浆压力最高为 1.33 MPa, 菱形网注浆压力最高为 0.53 MPa。当整体模型浆液流通渠道被贯通之后, 水泥浆在注浆泵作用下逐渐填充模型表面凹凸不平区域并持续对护表构件施压至产生一定幅度的初始变形, 此时由于金属网前期变形量较小, 注浆压力较低。当持续注浆至面应力大于初始应力时, 面应力曲线逐渐开始上升, 此时面应力监测曲线与注浆压力变化趋势保持一致, 在此阶段内注浆压力呈现出震荡起伏的

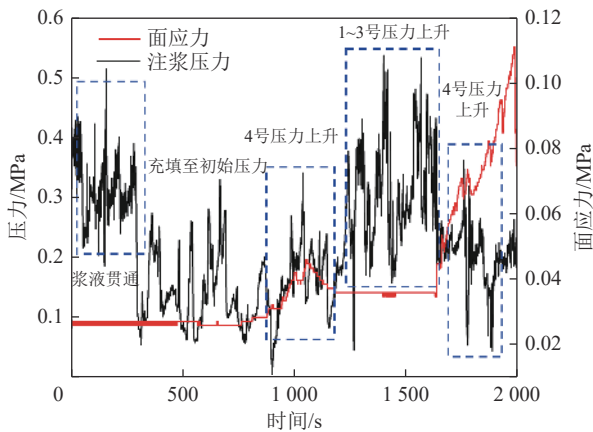


图 8 菱形网注浆压力曲线

Fig.8 Grouting pressure curves of diamond mesh

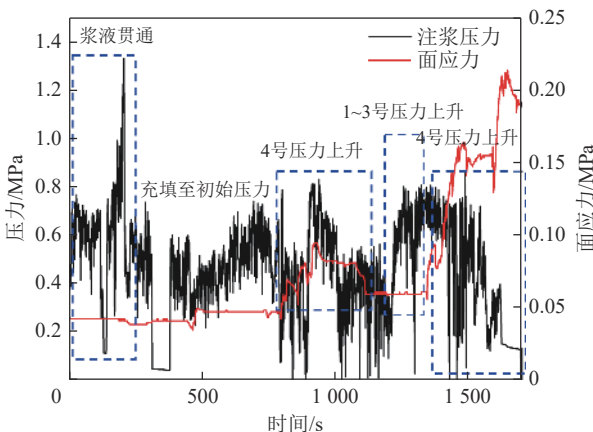


图 9 钢筋编织网注浆压力曲线

Fig.9 Grouting pressure curves of reinforcement mesh

变化趋势, 注浆压力出现明显的振动同样是由于注浆过程中浆液流动方向的不断改变所致。值得注意的是, 注浆压力曲线的每次升高均会导致模型底部面应力的持续升高。

3.3 金属网变形特征分析

随着面型预应力的提高, 金属网不断产生不同程度的网兜变形。以 60 mm 钢筋编织网试验为例, 如图 10 所示。金属网在注浆过程中, 随着浆液不断注入, 所测 4 个测点均产生了阶梯式的变形特征。浆液充填是一个渐进的过程, 浆液作为一种流体结构首先在支护系统中压力较低区域进行充填, 当持续充填至该位置压力升高时, 浆液将转移至下一区域进行充填, 但注浆过程中金属网整体均在持续变形直至试验结束。

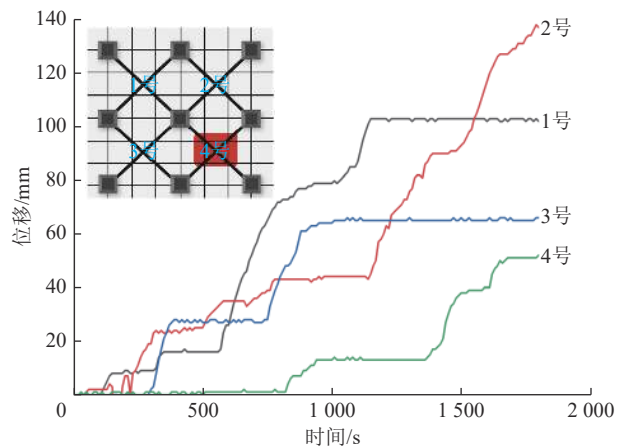


图 10 金属网变形曲线

Fig.10 Deformation curves of metal mesh

4 号测点面应力曲线与金属网变形量对比曲线如图 11 所示, 金属网的面应力施加值与变形量趋势保持一致, 在金属网变形量达到 50 mm 时, 面应力达到最大值, 由此可以看出面应力的施加值与金属网的变形量直接相关, 金属网的初期变形量越大, 面应力施加值越高。

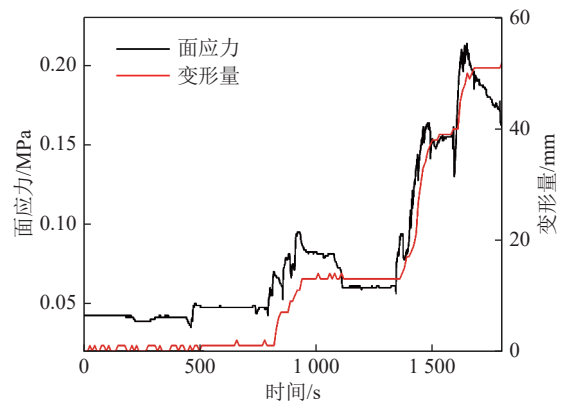


图 11 金属网变形量及面应力曲线

Fig.11 Deformation and surface stress curves of mesh

3.4 锚杆预紧力分析

网后注浆试验利用金属网的前期弹性变形为上覆围岩施加一定程度的初始面应力,金属网由锚杆(索)固定于煤壁上并持续发挥支护作用,因此关于金属网变形至产生预应力的过程归根到底是锚杆预紧力与金属网面应力之间的相互作用问题。5组试验中,以菱形网注浆试验为例分析锚杆预紧力变化趋势,如图12所示。在注浆过程中随着面应力增加,3号、4号、6号、8号、9号锚杆预紧力出现了小幅度的降低现象,最大降低幅度为12.8%左右,而1号、2号、5号、7号锚杆预紧力出现了一定幅度增加现象,最大增高幅度为41.3%。综合模型表面凹凸不平结构分析,3号、4号、6号、8号、9号锚杆托盘底部凹凸不平幅度较大,锚杆预紧力施加时存在局部应力集中现象,注浆囊袋膨胀过程中逐渐将托盘底部空隙进行填充,提高了锚杆托盘的整体受力均匀性,以此降低了预紧力水平。1号、2号、5号、7号锚杆托盘底部围岩较为平整,囊袋填充过程中浆液无法扩散至托盘底部,随着金属网的网兜变形产生,由于锚杆托盘为主要的固定构件,金属网在锚杆初始预紧力基础上通过为托盘施加一定的垂直载荷,导致锚杆预紧力出现突然增加的现象。

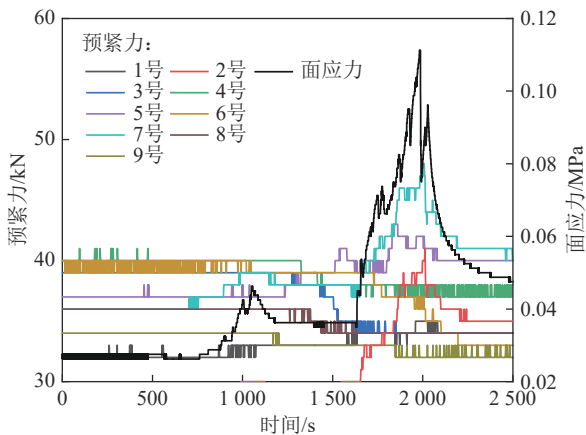


图12 锚杆预紧力-金属网面应力对比曲线

Fig.12 Comparison curves of bolt prestress-metal mesh surface stress

为了验证上述观点,将锚杆预紧力与金属网面应力曲线进行对比,如图12所示。在注浆时间1000s时刻,金属网面应力呈现出小幅度升高现象,与之相对应2号锚杆受力出现了一定幅度的上升。随着囊袋内部水分析出,金属网面应力与锚杆预紧力均出现一定幅度的衰减现象。在注浆时间为1500~2000s,随着金属网面应力的提高,1号、2号、5号、7号锚杆预紧力随之产生大幅度的升高现象,同样由于后期囊

袋内部水分逐渐析出,锚杆预紧力出现衰减现象,且局部锚杆预紧力在衰减完成后仍高于初始预紧力水平。锚杆预紧力升高及降低时间均与面应力变化时间保持一致,由此表明在锚杆托盘围岩较为平整的情况下,随着金属网面应力的升高,锚杆预紧力呈增大趋势,在托盘底部不平整的情况下,由于初始预紧过程中存在应力集中现象,网后注浆技术可均化锚杆受力使得预紧力出现小幅度降低现象,现场为保证锚杆支护效果,可在网后注浆完成之后配套锚杆、锚索的二次预紧,确保锚杆(索)具有足够的主动支护效果。

3.5 充填及围岩封闭效果分析

注浆完成待囊袋内部水泥凝固后观测模型整体封闭情况,在顶板处以4根锚杆为一个支护单元,位于支护单元中间区域的金属网填充效果较好,大量浆液集中在4根锚杆中间并使金属网产生一定幅度的预变形,使得金属网表面张紧,现场实际工况中4根锚杆中间区域的金属网主动支护效果最弱,网后注浆技术成功为中心区域施加了面应力并将围岩进行有效封闭,防止后期围岩在风化及采动作用下进一步破碎及垮落。在锚杆托盘位置,由于锚杆预紧力的施加及围岩平整程度的提高,只有部分浆液填充于托盘底部。在模型两帮方向,尤其是巷道肩窝位置由于护表构件支护刚度较低,大量的浆液集中在巷道肩窝位置进行间隙填充。5类网后注浆试验中,钢筋编织网相比于菱形网及钢丝网具有较高的支护刚度,护表构件局部变形量较小。菱形网及钢丝网由于护表刚度较低,在两帮处呈现出长条式的鼓出变形。试验完成将注浆囊袋拆卸进行观测,由于模型底面为凹凸不平结构,导致整个注浆囊袋顶部结构表现出起伏不平的变化特征。

4 现场验证性试验

为了验证网后注浆技术的现场适用性,于山西天地王坡煤业有限公司3219运输巷掘进工作面开展了3m现场工艺性试验。3219运输巷顶板及两帮采用菱形网护表,网片为网格50mm×50mm的10号铅丝编织网。为了提高金属网的护表能力,在原先支护设计基础上打设了“十”字型钢筋托梁。在掘进过程中囊袋安装主要分为:囊袋固定—囊袋压边—囊袋回折—囊袋接续—传感器安装等。在掘进速度方面,当班预计割煤及支护各3排,在增加囊袋安装工况之后,当班割煤3排,支护2排,按照割煤与支护时间占比计算降低掘进速率约25%。

囊袋安装完成后待掘进工作面持续推进至50m左右依次对试验断面进行注浆工作,注浆过程中当金

属网局部变形量超过 100 mm 时停止注浆并观测面应力传感器数值, 测试结果见表 3。顶板注浆过程中最高面应力为 0.09~0.12 MPa, 随着注浆囊袋内部水分析出, 面应力呈现出降低趋势, 最高降低幅度为 33%。两帮最高面应力为 0.05~0.06 MPa, 水分析出过程中面应力最高降低幅度为 50%, 现场试验过程中面应力变化趋势与实验室试验结果一致, 其中面应力降低幅度略高于实验室试验结果。现场试验过程中两帮面应力显著低于顶板, 这是由于在注浆过程中浆液在自重作用下有下沉趋势, 导致巷道两帮底部金属网变形量较大, 注浆过程如图 13 所示。

表 3 注浆试验结果
Table 3 Results of grouting test

注浆位置	吃浆量/kg	最高面应力/MPa	稳定面应力/MPa
顶板1	250	0.12	0.08
顶板2	250	0.09	0.07
顶板3	200	0.09	0.07
右帮1	200	0.05	0.04
右帮2	175	0.06	0.04
右帮3	175	0.06	0.03



图 13 现场注浆过程

Fig.13 Roof grouting process

现场试验结果证明, 网后注浆技术可成功为现场顶板及两帮施加一定幅度的面应力, 但需在金属网外部增加一定结构的钢筋托梁, 防止在网后注浆面应力施加过程中金属网自身变形量过大影响后期支护效果。

本次现场试验过程中, 由于试验段长度较少, 无法系统评价网后注浆技术对松软破碎围岩巷道的变形控制效果, 同时关于面应力在围岩内部的三维扩散形态及其与锚杆预应力场之间的相互作用关系还有待进一步研究。

5 结 论

(1) 金属网与煤壁之间存在间隙导致主动支护能

力差, 裸露围岩破碎范围的持续扩大是锚杆、锚索支护失效的主控因素。围绕金属网与煤壁接触面进行凹凸不平结构填充、增加护表构件主动支护能力、全面封闭围岩是完善锚网支护系统的技术手段。

(2) 在金属网与模型之间进行注浆充填可实现面应力的施加, 面应力变化趋势主要分为: 初始面应力恒定阶段、面应力上升阶段、面应力降低至稳定阶段。

(3) 网后注浆过程中面应力变化趋势与注浆压力、金属网变形量紧密相关, 面应力上升过程中, 注浆压力、金属网变形量也随之同步升高。

(4) 网后注浆可缓解锚杆托盘应力集中程度, 面应力上升过程中可使得应力集中的锚杆预紧力呈现出小幅度降低趋势, 受力较为均匀的锚杆预紧力呈现出同步上升趋势。

参考文献(References):

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [2] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233-1238.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [3] 司林坡, 姜金福, 杨景贺, 等. 轴向冲击下锚固锚杆变形与应力特征分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3645-3653.
SI Linpo, LIU Jinfu, YANG Jinghe, et al. Deformation and stress characteristics of anchor bolt under axial impact[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3645-3653.
- [4] 吴拥政, 付玉凯, 褚晓威, 等. 锚杆托板与缓冲垫层组合结构静、动载力学性能试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 662-671.
WU Yongzheng, FU Yukai, CHU Xiaowei, et al. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of composite structure of anchor plate and cushion[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 662-671.
- [5] 何杰, 吴拥政, 付玉凯. 冲击荷载下锚杆护表构件力学响应规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 556-564.
HE Jie, WU Yongzheng, FU Yukai. Mechanics response law of surface protecting components for rock bolting under impact load[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 556-564.
- [6] 王晓卿, 康红普, 高富强, 等. 碎石锚固中压力拱形成与锚杆作用分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3139-3147.
WANG Xiaoqing, KANG Hongpu, GAO Fuqiang, et al. Analysis of pressure arch formation and rockbolt function in gravel bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3139-3147.
- [7] 李建忠, 康红普, 高富强, 等. 原岩应力场作用下的锚杆支护应力场

- 及作用分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 99–109.
- LI Jianzhong, KANG Hongpu, GAO Fuqiang, et al. Stress field and function analysis of bolt support under the action of original rock stress field[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 99–109.
- [8] 原贵阳, 孙志勇, 李建忠. 锚杆支护组合构件对钢筋网加固作用试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 556–567.
- YUAN Guiyang, SUN Zhiyong, LI Jianzhong. Experimental study on reinforcement effect of bolt support composite members on reinforced mesh[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 556–567.
- [9] 原贵阳, 孙志勇, 李建忠. 锚杆支护钢筋网传力机制及分区承载试验研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(12): 54–59.
- YUAN Guiyang, SUN Zhiyong, LI Jianzhong. Experimental study on force transfer mechanism and zonal bearing capacity of reinforcement mesh with bolt support[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(12): 54–59.
- [10] 林健, 孙志勇. 锚杆支护金属网力学性能与支护效果实验室研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1542–1548.
- LIN Jian, SUN Zhiyong. Laboratory studies on mechanical performance and supporting function of bolt metal meshes[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1542–1548.
- [11] 孙志勇. 锚杆支护金属网力学性能与支护效果研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2011.
- SUN Zhiyong. Study on mechanical properties and supporting effect of bolt support metal mesh [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2011.
- [12] 葛凤忠. 经纬金属网受载变形及力学性能分析[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(4): 524–528.
- GE Fengzhong. Deformation and mechanical properties analysis of warp/weft wire mesh under load[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(4): 524–528.
- [13] 葛凤忠. 回采巷道锚网支护金属网变形特征的试验研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- GE Fengzhong. Experimental study on deformation characteristics of metal mesh supported by bolt mesh in mining roadway [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.
- [14] 李明轩. 极软煤巷金属网力学特性分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- LI Mingxuan. Analysis of mechanical properties of metal mesh in extremely soft coal roadways [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [15] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 9(1): 59–65.
- [16] ORTLEPP W D, STACEY T R. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, 13(1): 15–21.
- [17] PAKALNIS V, AMES D. Load tests on mine screening[J]. *CIM Bulletin*, 1983, 76(856): 79–83.
- [18] PLAYER J R, MORTON E C, THOMPSON A G, et al. Static and dynamic testing of steel wire mesh for mining applications of rock surface support[C]//6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, Western Australia. 2008, 693–706.
- [19] NEMCIK J A, PORTER I, BAAFI E Y, et al. Geotechnical assessment of polymeric materials as skin reinforcement in underground mines[C]//Wollongong Coal Operators Conference, Australia. 2009, 70–77.
- [20] 孙志勇, 林健. 锚杆支护焊接钢筋网力学性能研究[J]. 煤矿开采, 2011, 16(1): 14–16.
- SUN Zhiyong, LIN Jian. Mechanical characteristic of steel fabric welded to anchored bolt[J]. *Coal Mining Technology*, 2011, 16(1): 14–16.
- [21] 原贵阳. 锚杆支护组合构件与金属网力学性能及其匹配性试验研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
- YUAN Guiyang. Experimental study on the mechanical properties and compatibility of bolt support composite components and metal mesh [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [22] 方树林, 康红普, 林健, 等. 锚喷支护软岩大巷混凝土喷层受力监测与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6): 776–782.
- FANG Shulin, KANG Hongpu, LIN Jian, et al. Mechanical monitoring and analysis on shotcrete layer of soft rock main roadway supported by bolt-shotcrete[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(6): 776–782.
- [23] 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 Pengfei, KANG Hongpu, WANG Zhigen, 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.