

高应力软岩巷道锚网索耦合支护技术应用分析

虎焱桐

宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756504

摘要: 随着我国煤矿开采深度的持续增加,高应力软岩巷道的支护问题日益成为制约矿井安全高效生产的关键技术瓶颈。此类巷道围岩强度低、流变性强,在高地应力作用下表现出大变形、强流变、难支护等显著特征,传统支护方式往往难以奏效。锚网索耦合支护技术作为一种集主动支护、柔性让压与整体承载于一体的复合支护体系,因其优异的协同承载能力和对围岩大变形的适应性,在高应力软岩巷道中展现出广阔的应用前景。本文首先系统分析了高应力软岩巷道的工程力学特性与破坏演化机理;其次,深入阐述了锚网索耦合支护体系的协同作用机理、核心设计理念及关键参数优化方法;再次,详细介绍了该技术的标准化施工工艺流程与质量控制要点。科学设计的锚网索耦合支护体系能够有效控制围岩变形,形成稳定承载结构,保障巷道长期服役安全,具有重要的工程推广价值。

关键词: 高应力软岩;巷道支护;锚网索耦合;协同承载;大变形控制

引言

21世纪以来,我国浅部煤炭资源渐趋枯竭,煤炭开采加速向深部(>800m)推进,深部开采环境呈现“三高一扰动”特征,高地应力与软弱围岩耦合,使高应力软岩巷道围岩稳定性问题突出。这类巷道开挖后,围岩不仅有瞬时变形,还会持续流变,导致多种严重问题,威胁矿井安全。传统被动支护方式虽能提供一定支撑力,但刚性大,难释放围岩能量,多为局部支护,对底鼓等控制效果差。以锚杆、锚索为核心的主动支护技术虽受关注,但单一支护面对大变形时易失效。在此情形下,锚网索耦合支护技术出现,它有机组合多种构件,构建协同支护体系,具备强大主动支护能力,能实现“先柔后刚”力学响应。故深入研究该技术,对推动我国深部煤炭资源安全高效开发意义重大。

1 高应力软岩巷道的工程特性与破坏机理

1.1 工程力学特性

高应力软岩巷道的围岩通常由泥岩、页岩、砂质泥岩、煤层等组成,其力学行为极为复杂。这些岩体普遍具有强度低、胶结差的特点,岩石颗粒间的胶结力十分微弱,一旦遇水极易发生软化、崩解,导致其强度急剧下降,丧失承载能力。更为棘手的是,这类围岩在持续高应力的作用下,会表现出极为显著的流变特性,即围岩的变形并非在开挖后短时间内完成,而是会随着时间的推移不断增长,即使外部荷载保持不变,这种蠕变变形也会持续进行。此外,当围岩进入塑性屈服阶段后,其体积非但不会像常规岩石那样收缩,反而会出现明显的扩容现象,这种剪胀效应会进一步加剧巷道的变形与破坏^[1]。同时,高应力软岩的力学性质高度非线性,且受

层理、节理、裂隙等地质构造的强烈影响,呈现出复杂的各向异性与非均质性,这使得其稳定性预测与控制变得异常困难。

1.2 破坏演化机理

高应力软岩巷道的破坏是一个复杂的时空演化过程,可概括为以下几个阶段:(1)弹性变形与应力重分布阶段:巷道开挖瞬间,原始地应力平衡被打破,应力向巷道周边转移,形成应力集中区。此时围岩处于弹性状态,变形较小。(2)塑性区形成与扩展阶段:当应力集中区的切向应力超过围岩的屈服强度时,围岩开始进入塑性状态,形成塑性松动圈。随着塑性区的不断向外扩展,围岩承载能力逐渐降低。(3)大变形与流变阶段:在高应力的持续作用下,塑性区内的软岩发生显著的剪胀和流变,导致巷道两帮剧烈内移、顶板下沉、底板强烈鼓起。此阶段变形速率虽可能减缓,但变形量巨大且持续。(4)支护结构失稳阶段:若支护体系提供的阻力不足以抗衡围岩的变形压力,或其自身刚度与围岩变形不匹配,则支护结构(如锚杆断裂、托盘穿孔、钢带屈曲、支架压弯等)将发生破坏,最终导致巷道失稳。这一破坏过程的核心在于高地应力驱动下的围岩大变形与流变,以及支护体系与围岩之间未能建立有效的协同承载关系。

2 锚网索耦合支护体系的协同作用机理

锚网索耦合支护并非锚杆、锚网、锚索的简单叠加,而是通过精密的设计,使其成为一个有机整体,共同承担围岩荷载。其协同作用机理主要体现在以下几个方面:

2.1 “悬吊-组合梁-加固拱”三位一体承载机制

锚杆主要作用于浅部围岩。通过施加预紧力，挤压围岩裂隙，提高其残余强度；同时，将松散、破碎的浅部岩体悬吊在上部稳定的岩层上，并通过杆体间的相互作用，将多层薄岩层组合成一个较厚的“组合梁”，从而提高顶板的整体承载能力。锚索作为深部锚固单元，其长度远大于锚杆，能够穿过塑性松动圈，锚固于深部稳定的岩层中。锚索的主要功能是“悬吊”作用，将深部不稳定岩体的重量传递到深部稳定基岩，同时对深部围岩施加主动约束力，抑制其向巷道空间移动的趋势^[2]。钢带（W/M型）沿巷道走向铺设，连接相邻锚杆/锚索的托盘，将点荷载转化为线荷载，均匀扩散支护反力，防止局部应力集中造成的围岩片帮或锚杆失效。金属网则覆盖整个巷道表面，有效包裹、限制破碎围岩的脱落，并与喷浆（如有）共同形成柔性护表，维持围岩表面的完整性，为锚杆/索提供可靠的着力基础。三者协同工作，在巷道周围形成了一个从浅部到深部、从点到面的立体承载结构，即“浅部组合梁+深部悬吊+整体加固拱”。

2.2 “让压-增阻”动态响应机制

高应力软岩巷道的支护必须允许围岩发生一定程度的、可控的变形，以释放部分能量，避免支护结构因承受过高的峰值应力而瞬间破坏。锚网索耦合支护体系通过以下方式实现“让压-增阻”的动态响应：（1）初始柔性让压：在巷道开挖初期，围岩变形速率快、量值大。此时，高强度锚杆和锚索在预紧力作用下，其延伸率可以吸收一部分变形。同时，钢带与托盘之间可能存在微小的相对滑移，也能起到缓冲作用。（2）后期刚性增阻：随着围岩变形趋于稳定，锚杆/索的延伸达到极限，钢带与托盘紧密结合，整个支护体系的刚度迅速增大，提供强大的后期支护阻力，有效阻止围岩的持续流变，确保巷道断面满足使用要求。这种“先柔后刚”的力学特性，完美契合了高应力软岩“大变形、强流变”的破坏特点。

2.3 整体承载环效应

通过在巷道全断面（顶、帮、底）实施锚网索支护，可以在巷道周围形成一个连续、封闭的承载环。这个承载环能够将来自各个方向的地应力进行重新分配和平衡，特别是对于底鼓的控制至关重要。底板锚杆/锚索的设置，可以有效抑制底板岩层的向上隆起，从而打破“顶板下沉→两帮内移→底板鼓起→顶板进一步下沉”的恶性循环。

3 锚网索耦合支护体系的设计方法与参数优化

科学合理的设计是锚网索耦合支护成功应用的前

提。其设计应遵循“动态信息反馈、分区分级支护、关键部位强化”的原则。

3.1 核心设计原则

（1）高预应力、全长锚固：施加足够高的预紧力是保证锚杆/索及时、有效承载的关键。预紧力不足会导致围岩在支护前已发生较大松动，丧失自承能力。对于软岩，应尽可能采用全长锚固或加长锚固，以增大锚固段与围岩的粘结面积，提高锚固可靠性。（2）长短锚索互补：长锚索用于控制深部大范围围岩的稳定性，短锚索（或高强锚杆）则用于加强浅部围岩的完整性。二者在长度和布置密度上应形成梯度，实现深浅部围岩的协同控制。（3）护表构件强化：必须采用高强度、高刚度的W/M型钢带替代传统的钢筋梯子梁，并配合双托盘（或大托盘）以增大承载面积，防止托盘穿孔。金属网应选用菱形或经纬网，保证足够的覆盖强度和延展性^[3]。（4）底板控制优先：在高应力软岩巷道中，底鼓往往是控制难点。设计时必须将底板支护置于同等甚至更高的优先级，采用底板锚杆、锚索或反底拱等方式进行综合治理。

3.2 关键参数确定

3.2.1 锚杆参数

对于锚杆而言，通常选用左旋无纵肋螺纹钢制成的高强锚杆（如HRB500或HRB600级别），直径在 $\Phi 20$ 至 $\Phi 22$ 毫米之间；其长度一般取巷道宽度的三分之一到二分之一，常见范围为2.0至2.4米；间排距则根据围岩的破碎程度进行调整，围岩越差，间距应越小，通常在 $0.7\text{m}\times 0.8\text{m}$ 至 $0.9\text{m}\times 1.0\text{m}$ 之间；最关键的是其预紧力，不应低于锚杆屈服力的50%，工程实践中通常要求达到100至150千牛。

3.2.2 锚索参数

对于锚索，应选用高强度低松弛的钢绞线（如 $\Phi 17.8\text{mm}$ ，强度1860MPa或更高）；其长度必须确保能穿过预计的塑性松动圈并锚固于深部稳定岩层，通常在6至10米；间排距相对较大，一般为 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 至 $2.0\text{m}\times 2.0\text{m}$ ，常采用梅花形布置以优化受力；其预紧力同样至关重要，通常要求达到其破断力的30%至40%，即150至250千牛。

3.2.3 护表构件

在护表构件方面，W型或M型高强度钢带的厚度不应小于3毫米，宽度不小于280毫米；托盘应选用尺寸不小于 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 、厚度不小于10毫米的碟形托盘，在应力集中区域可采用双托盘；金属网则推荐使用孔径不大于100毫米、丝径不小于4毫米的菱形网或经纬网，以保

证足够的覆盖强度和延展性。

3.2.4 底板支护

针对底板控制,底板锚杆的长度可设为2.0至2.4米,间排距 $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$;底板锚索长度可适当缩短至4至6米,间排距 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$,以形成对底板的有效约束。

4 施工工艺与质量控制

4.1 标准化施工流程

锚网索耦合支护的施工必须推行精细化、标准化的作业流程。整个施工过程始于巷道的掘进,在采用综掘机掘进的同时,必须紧跟工作面架设可靠的超前临时支护,如机载临时支护或戴帽点柱,以确保后续作业人员的安全。掘进完成后,需立即对巷道轮廓进行修整,找掉危岩活石,并按设计断面进行刷帮、挑顶,保证巷道成型规整,为后续支护创造良好条件。随后,将金属网紧贴巷道围岩表面进行全面铺设,网片之间需保证足够的搭接长度(不少于100毫米),并用铁丝或专用连接件绑扎牢固,形成连续的护表层。接着,将高强度钢带按设计位置准确放置于金属网上。钻孔是支护施工的关键环节,必须使用专业的锚杆钻机或锚索钻机,严格按照设计的角度、深度和间排距进行精准钻孔,并确保钻孔过程中排粉顺畅,防止塌孔影响锚固质量。钻孔完成后,根据孔深和锚固要求装入相应数量和型号的树脂锚固剂,然后迅速插入锚杆或锚索,并用钻机带动其旋转进行充分搅拌,确保锚固剂完全混合并均匀包裹杆体。待锚固剂凝固达到规定的时间(通常为1至3分钟)后,即可安装托盘,并使用扭矩倍增器或张拉千斤顶施加设计所要求的预紧力^[4]。这是整个施工过程中最为关键的一步,其质量直接决定了支护体系的成败。最后,每班次都必须对已完成的支护工程进行严格的质量验收,对锚杆/索的预紧力、间排距、角度等核心指标进行抽检,对于任何不合格的项目,必须立即进行补打或重新紧固,绝不允许留下安全隐患。

4.2 质量控制要点

在整个施工过程中,有若干质量控制要点必须得到不折不扣的执行。其中,预紧力的控制无疑是整个支护

工程的生命线。施工单位必须配备经过定期校准的扭矩扳手或带有压力表的张拉设备,并建立一套严格的考核与记录制度,确保每一根锚杆和锚索都达到了设计要求的预紧力水平。其次是锚固质量的保证,这要求从钻孔清洁度、锚固剂的足量投放,到搅拌时间的充分保证,每一个细节都必须做到位,以确保锚固力能够真实可靠地达到设计值。再次,所有支护材料,包括锚杆、锚索、托盘、钢带和金属网,都必须符合设计规定的强度等级和几何规格,严禁使用劣质或规格不符的材料以次充好。最后,必须严格遵守正确的施工顺序,坚持“由外向里、由顶向帮、及时支护”的基本原则,坚决杜绝任何形式的空顶、空帮作业,确保施工全过程的安全与质量。

5 结语

本文聚焦高应力软岩巷道支护难题,对锚网索耦合支护技术深入分析探讨后得出结论:高应力软岩巷道破坏本质是高地应力致围岩大变形与持续流变,支护核心是建适应大变形且与围岩协同承载的体系;锚网索耦合支护体系有机结合多种构件,形成立体承载结构,有“先柔后刚”特性,能应对复杂力学行为;科学设计是关键,要遵循相关原则,通过精细化计算等确定支护参数;严格施工质量控制,特别是预紧力施加,是保证支护效果的生命线,需推行标准化工艺。未来研究可着眼于智能化预紧力施加设备、新型锚固材料及动态反馈设计方法,提升该技术自动化、智能化水平与适应性。

参考文献

- [1]丁健,张向阳,王飞,等.深部高应力软岩巷道破坏机理及支护技术研究[J].煤炭技术,2025,44(12):7-13.
- [2]周琼阳,张洋.高应力软岩巷道锚网索注联合支护技术研究[J].煤炭技术,2025,44(12):60-64.
- [3]杨金虎.高应力软岩巷道变形机理及协同支护技术研究[J].能源与环保,2025,47(10):241-246.
- [4]康跃明.高应力软岩巷道围岩变形机理及协同控制技术[J].能源与环保,2025,47(08):241-246+253.