

煤矿掘进支护技术探析

冯哲

陕西华电榆横煤电有限责任公司, 陕西榆林, 719000;

摘要:随着煤矿开采向深部延伸,高地应力、软岩变形等复杂地质条件对掘进支护技术提出更高要求。本文系统分析煤矿掘进支护的力学原理与工程价值,阐述锚杆、锚索、架棚等传统支护技术的作用机制与应用场景,针对深部开采面临的地质条件复杂多变、支护材料性能不足、施工工艺偏差等技术瓶颈,提出以材料革新(纳米锚固剂、形状记忆合金锚杆)、智能化融合(智能感知系统、自适应装备)、工艺优化(定向钻进、绿色支护)为核心的发展路径,并通过某矿950米深部巷道"锚网索+型钢支架"联合支护案例,验证新型支护体系在控制围岩变形、降低支护成本方面的有效性。研究表明,构建"主动支护+动态调控+智能监测"的综合技术体系,是解决深部巷道支护难题的关键方向,对提升煤矿安全生产水平具有重要借鉴意义。

关键词: 煤矿掘进; 支护技术; 高地应力; 智能化; 围岩控制

DOI: 10. 69979/3060-8767. 25. 01. 046

1引言

我国作为重要的煤炭生产和消费大国,煤炭在能源结构中占主导地位,随着浅部资源枯竭,开采逐步向深部延伸,截至2023年平均深度达600-800米,部分超1000米,深部复杂地质使围岩控制成安全生产核心难题,2022年因支护失效的顶板事故占比47.2%。国外发达国家已构建成熟支护技术体系并向智能化发展,我国虽形成"锚网索+刚性支架"模式,但在特殊场景下理论技术仍有滞后,亟待创新完善。

2 煤矿掘进支护技术的力学原理与工程价值

2.1 围岩应力演化规律

当掘进巷道开挖完成后,巷道周边围岩的原始应力 平衡状态被打破,应力将重新分布,形成应力增高区、 应力降低区以及原岩应力区。依据普氏理论,围岩会自 然形成平衡拱,而支护结构的核心作用,便是有效控制 这一平衡拱的发展态势,防止拱顶出现坍塌现象。

以某矿 3105 运输巷为例,通过专业的应力监测仪 监测数据可知,在巷道掘进后的 3 天内,巷道周边 5 米 范围内的围岩应力增幅达到 30%-50%,并且峰值应力的 位置会随着时间推移逐渐向深部围岩转移。这一现象充 分表明,在巷道掘进过程中,围岩应力的动态变化对支 护技术的有效性和稳定性提出了极高的要求。

2.2 支护技术的双重功能

锚杆和锚索可以主动提供支撑力量, 把松散的围岩

紧紧连成一个整体,构成组合梁或悬吊结构,让围岩的 承重能力得到非常 biophysical 的提升。经过大量实 际测试数据验证,使用高强度的锚杆进行支撑后,围岩 的弹性模量能够提升 20%到 30%,为巷道保持长时间的 稳定提供了非常稳固的力学基础。U 型钢可缩性支架设 计中安装了专门的可缩节点,具有灵活调整的功能,当 围岩发生较大变形时,这些节点会释放出能量,有效防 止支架因为刚性太强而遭到破坏,效果非常好。某矿位 于 800 米深部巷道中使用 U36 型钢支架实施支护,实际 监测数据显示,该支架容许围岩的变形量可达到 300mm, 相比于刚性支架,其适应围岩变形的能力提升了 5 倍, 大幅加强了巷道于复杂地质条件下的稳定性。

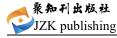
2.3 经济效益分析

按照一个年掘进量实现 10000 米的矿井为例,于对支护参数实施改进之后,单巷支护成本能减少 15%20%,掘进效率提高 10%15%,与此同时巷道返修率减少 30%以上。该矿井每年能达成数千万元的经济效益提高。这完全表明,科学合理的支护技术不但可以保证安全生产,还可为企业产生明显的经济效益,取得安全与效益的共赢。

3 煤矿掘进支护技术体系与应用实践

3.1 锚杆支护技术群

3.1.1 锚杆类型与适用场景



锚杆 类型	材质	锚固 方式	抗拉强度(MPa)	适用围岩 条件
高强 螺纹 钢锚 杆	HRB500	树脂 锚固	≥500	中硬岩、稳定岩层
玻璃 钢锚 杆	玻璃纤维复合 材料	水泥锚固	≥300	高瓦斯、 易腐蚀巷 道
中空 注浆 锚杆	无缝钢管	注浆 锚固	≥400	破碎围 岩、淋水 巷道

3.1.2 关键施工工艺 开头。

3.2 锚索支护技术创新

3.2.1 新型锚索结构

整体注浆锚索,该锚索于传统锚索的基础上增设了注浆管,借助高压注浆工艺,可以把围岩内部的裂隙完全填满,因此构成锚索+浆体结石体的复合锚固结构。于某矿的断层带区域应用中,实测数据表明,整体注浆锚索的锚固力相比于普通锚索增强了 45%,并且围岩位移量降低了 63%,高效改善了复杂地质条件下的支护效果。 智能监测锚索,智能监测锚索融合了尖端的光纤光栅传感器,可以即时精确地检测锚索的受力情况以及温度变化。在监测到的应力值超出设计值的 80%时,系统会自行启动预警机制,给动态调整支护方案供应迅速、精确的数据支撑,大幅提升了巷道支护的安全性和可靠性。

3.2.2 施工工艺优化

面向富水断层带等复杂地质条件,使用预先注浆随后锚固的施工工艺。详细操作流程是,最初对钻孔实施高强度注浆,注浆压力调节于 24MPa 范围内,等到浆体初步凝固后,然后实施锚索的安装作业。该工艺可以将破碎围岩内的锚固长度从 1.5 米高效扩展到 3.0 米,明显提升了锚索在复杂地质环境下的锚固效果。

3.3架棚支护技术升级

3.3.1型钢支架力学性能对比

支架	材质	许用应力	可缩量	适用巷道
类型		(MPa)	(mm)	断面(m²)

工字 钢支 架	16#工字 钢	215	0	≤12
U29 型 钢支 架	U29 型钢	250	200-400	12-18
新型 槽钢 支架	Q345B 槽 钢	345	100-200	≤15

3.3.2 联合支护模式

处于大断面巷道面积>20 m²的支护工程中,通常使用锚杆+锚索+W钢带+U36型钢支架的四级支护体系。锚杆主要用来抑制巷道表面围岩的破碎情况,锚索承担悬挂深层不稳定围岩,W钢带可以平衡巷道周边的应力分布,而U36型钢支架则为巷道给予强大的刚性支撑。某矿井底车场巷道在运用该联合支护模式后,借助长期监测数据显示,围岩的最大变形量受到高效限制在80mm以内,彻底符合了巷道长期安全使用的要求。

4 复杂地质条件下的支护技术挑战

4.1 高地应力巷道支护难题

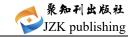
4.1.1 破坏机制分析

在高地应力(垂直应力>25MPa)的作用下,围岩会呈现出明显的"分区破裂化"特征。具体表现为,巷道周边围岩从外向内依次形成破碎区、塑性区和弹性区。例如,在某矿-1000米深度的巷道开挖后,通过地质探测手段发现,其破碎区厚度达到3-5米,如此大规模的破碎区域,使得传统支护技术难以实现有效的控制,极大地增加了巷道支护的难度和风险。

4.1.2 技术瓶颈

锚固失效,高地应力环境非常引发锚杆尾部产生扯断现象,或者螺母呈现滑动,从而致使锚固力大量减弱,减弱率可到50%超过。这使锚杆不能完全发挥其锚固作用,重大干扰巷道的稳定性。支架压塌,刚性支架在应对围岩的大变形时,缺少充足的适应性和可缩性,易于遭遇压塌破坏。以U型钢支架举例,在高地应力影响下,其焊缝裂开、卡缆失效等问题多次发生,造成支架的支护性能迅速降低,不能保证巷道的安全。

4.2 软岩巷道变形控制困境



软岩单轴抗压强度<20MPa 拥有明显的流变性和膨胀性及其他特性,这导致软岩巷道于开挖之后的变形表现出连续增大、难于稳固的特点。某矿的泥岩巷道于开挖之后的6个月内,两帮收敛量达到1.2米,传统支护方案的返修率甚至达到70%。这不但提高了支护成本,而且剧烈干扰了矿井的常规生产进度。

4.3 施工管理与材料缺陷

4.3.1 工艺执行偏差

通过大量的现场调研发现,在锚杆施工过程中,安装角度偏差超过15°的情况占比达32%,锚固长度不足设计值80%的情况占比达25%。这些工艺执行上的偏差,使得支护结构无法形成有效的承载体系,极大地削弱了支护效果,增加了巷道发生安全事故的风险。

4.3.2 材料耐久性不足

普通树脂锚固剂在水浸环境下,其7天粘结强度会下降40%,严重影响锚固效果。同时,热轧钢筋锚杆在潮湿环境中容易发生锈蚀,其服役寿命仅为5-8年,难以满足深部巷道长期、稳定支护的需求。

5 煤矿掘进支护技术的发展路径

5.1 材料革新:从单一承载到多功能复合

5.1.1 纳米增强锚固材料

科研人员成功研制生产纳米 SiO₂ 优化树脂锚固剂。实验检测发现,纳米 SiO₂ 优化树脂锚固剂抗压强度比传统产品提高 30%,耐水性能大幅提升 50%,很适宜淋水巷道等复杂环境。实验室仿真数据清晰显示,pH=4酸性水浸渍 28 天,纳米 SiO₂ 优化树脂锚固剂粘结强度保留率达 92%,展现出色耐久性和极佳稳定性。

5.1.2 形状记忆合金锚杆

运用镍钛合金独特的超弹性特性,研制出能回收式锚杆。在围岩变形超越设计值之际,该锚杆可以自行释放并且维持弹性变形状态,它的变形恢复率达到95%或更高,并且能多次使用35次。这不但减少了支护成本,也契合绿色环保的发展理念。

5.2 技术融合:智能化与动态化协同

5.2.1智能感知系统

构建"光纤光栅+应力计+位移计"多源监测网络, 并借助 5G 通信技术,将实时监测数据快速传输至地面 控制中心。某矿在应用该智能感知系统后,顶板事故预 警准确率高达 92%, 预警时间提前 2-4 小时, 为及时采取有效的安全措施提供了充足的时间保障。

5.2.2 自适应支护装备

开发产出液压支架和锚杆钻机一体化装备,该装备 具有掘进支护监测全流程自动化功能。借助激光测距仪 即时探测巷道轮廓,可以自行精确调节支架间距和锚杆 角度,令支护效率提高了60%,高效增强了煤矿掘进支 护的工作效率及质量。

5.3 工艺优化: 精准施工与绿色发展

5.3.1 定向钻进技术

采用随钻测量(MWD)技术,能够将锚杆钻孔角度 误差控制在≤1°,深度误差控制在≤50mm。在某矿的 复杂断层带区域应用中,钻孔合格率从68%大幅提升至 95%,显著提高了锚杆支护的施工质量和可靠性。

5.3.2 绿色支护技术

积极推广可降解聚氨酯支护材料,该材料在服役期内能够满足支护强度要求,服役期满后可自然分解,实现了绿色环保。某环保型矿井在试用该材料后,每年可减少钢材消耗 30%以上,同时减少固体废弃物排放约2000吨,取得了良好的环境效益。

6 工程案例:深部巷道支护技术集成应用

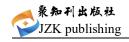
6.1 工程概况

某矿 2101 工作面运输巷,埋深达 950 米,在巷道 掘进过程中需穿越 3 条断层。该巷道围岩主要以砂质泥岩为主,经测试,其单轴抗压强度为 18MPa,地应力测试结果显示最大主应力达 28MPa,属于典型的高地应力软岩巷道,支护难度极大。

6.2 支护方案设计

初期支护,选择Φ22×2500mm高强螺纹钢锚杆,依据间排距800×800mm实施安排,配合Φ17.8×7300mm锚索,间排距为1600×1600mm,并铺装金属网和W钢带。规定锚杆预紧力矩实现450N·m,锚索预紧力为200kN,以保证初期支护的有效性。 二次支护,在滞后掘进面50米处,搭建U36型钢支架,支架间距为600mm,支架间使用Φ20mm钢筋拉杆进行联结,因而构成锚网索+型钢支架的联合支护体系,更进一步强化巷道的支护强度。

智慧监控,于巷道内布置16组光纤光栅应力传感器,即时检测锚杆锚索的承力变动状态。若应力超出



150MPa 时,自行开启液压泵针对锚索执行二次拉伸,达成灵活调节支护参数,确保巷道的持久稳固。

6.3 实施效果

经过6个月的持续监测,该巷道的最大顶底板移近量为120mm,两帮收敛量为95mm,均成功控制在设计允许范围内(≤150mm)。与原支护方案相比,返修次数减少了4次,节约支护成本约210万元,有力地保障了工作面的顺利回采,取得了显著的经济效益和安全效益。

7 结论与展望

煤矿掘进支护需遵循"主动支护为主、被动调控贯穿"原则,以材料创新(如复合材料)、智能化融合(智能感知装备)、工艺优化(闭环管理体系)为核心提升支护效果。未来需进一步深化多场耦合围岩变形机理研

究,建立精准设计模型,推动人工智能在参数优化中应 用以实现智能化决策,同时探索利用围岩自承能力的无 支护/少支护技术,从根本上降低成本与风险,推动支 护技术向绿色高效安全方向发展。

参考文献

[1]陈雪啸. 煤矿掘进支护技术分析[J]. 百科论坛电子杂志, 2019.

[2]王衍学. 煤矿掘进支护技术应用分析——复杂地质条件下[J]. 能源与节能, 2014, 000 (012):124-125. D 0I:10. 3969/j. issn. 2095-0802. 2014. 12. 057.

[3] 闫晓亮, 白易彬. 煤矿掘进支护中常见问题及解决措施分析[J]. 技术与市场, 2018. DOI: CNKI: SUN: JSYS. 0. 2018-05-065.