

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

支架类型	材质	许用应力（MPa）	可缩量（mm）	适用巷道断面（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 $<20\text{MPa}$ 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 SiO_2 优化树脂锚固剂。实验检测发现,纳米 SiO_2 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, $\text{pH}=4$ 酸性水浸渍 28 天,纳米 SiO_2 优化树脂锚固剂粘结强度保留率达 92%,展现出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 $\leq 1^\circ$,深度误差控制在 $\leq 50\text{mm}$ 。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 $\Phi 22 \times 2500\text{mm}$ 高强螺纹钢锚杆,依据间排距 $800 \times 800\text{mm}$ 实施安排,配合 $\Phi 17.8 \times 7300\text{mm}$ 锚索,间排距为 $1600 \times 1600\text{mm}$,并铺装金属网和 W 钢带。规定锚杆预紧力矩实现 $450\text{N} \cdot \text{m}$,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 $\Phi 20\text{mm}$ 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($\leq 150\text{mm}$)。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. DOI: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.