复杂地质条件下采煤掘进支护技术研究

张　尚
国家能源集团宁夏煤业有限责任公司　宁夏　银川　750000

摘　要：随着煤炭开采深度与广度的不断拓展，复杂地质条件下的采煤作业日益频繁，其中掘进支护技术成为保障煤矿安全生产、提高开采效率的关键环节。本文深入剖析复杂地质条件的各类特征，如断层、褶皱、破碎带、软岩以及高地应力等对采煤掘进的影响，详细阐述当前常用的掘进支护技术，包括锚杆支护、锚索支护、棚式支护及其联合支护方式，通过实际案例分析不同技术在复杂地质环境下的应用效果，并针对技术应用中存在的问题提出优化策略，旨在为煤矿企业应对复杂地质挑战、实现高效安全采煤提供理论支撑与实践指导。

关键词：复杂地质条件；采煤掘进；支护技术；安全高效开采

引言：煤炭作为我国重要的基础能源，在国民经济发展中占据举足轻重的地位。然而，随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭，煤矿开采不断向深部延伸，地质条件愈发复杂多变。在这些复杂地质环境下，采煤掘进面临诸多难题，如顶板垮落、片帮、巷道变形等，不仅严重威胁作业人员的生命安全，还会导致开采效率低下、成本增加。因此，深入研究复杂地质条件下的采煤掘进支护技术，探寻切实可行的解决方案，具有极其重要的现实意义，是推动煤炭行业可持续发展的关键所在。

1 复杂地质条件的特征及对采煤掘进的影响

1.1 断层

断层是地层岩石破裂后发生显著位移的地质构造。在采煤掘进过程中，遇到断层意味着岩层的连续性遭到破坏，顶板岩石破碎程度加剧，稳定性极差。当掘进工作面接近断层时，顶板压力会突然增大，极易引发顶板垮落事故。同时，断层附近的岩石裂隙发育，瓦斯、地下水等容易在此积聚，增加了瓦斯突出、透水等次生灾害的风险。例如，某煤矿在掘进巷道时遭遇正断层，断层落差达5米，顶板瞬间垮落范围超过10平方米，造成掘进工作停滞，幸好人员及时撤离未造成伤亡，但后续的清理与修复工作耗费了大量的人力、物力与时间[1]。

1.2 褶皱

褶皱是岩层受力发生弯曲变形的构造形态。强烈褶皱区域，岩层层面倾斜角度大，顶板受力不均，易出现局部应力集中现象。这使得巷道顶板在掘进后短时间内就可能发生变形、下沉，甚至开裂。而且，褶皱构造还可能导致煤层厚度变化无常，给采煤工艺的选择与掘进方向的确定带来极大困难。如在某山区煤矿，由于受到强烈褶皱作用，煤层厚度在0.5米至3米之间急剧变化，掘进过程中频繁调整支护参数，严重影响了开采进度。

1.3 破碎带

破碎带通常由岩石破碎、胶结松散的物质组成，其力学性质差，自稳能力极低。在破碎带中掘进，巷道围岩极易产生松动圈，且随着掘进的推进，松动圈范围不断扩大，导致围岩持续变形。若支护不及时或支护强度不够，巷道将迅速垮塌。此外，破碎带中的岩石颗粒容易在地下水作用下泥化，进一步降低围岩强度，增加支护难度。例如，某煤矿在穿越一条宽约15米的破碎带时，初期采用常规支护方式，结果巷道在掘进3天后就发生严重变形，顶板下沉量超过1米，两帮收敛超过0.5米，不得不重新制定支护方案[2]。

1.4 软岩

软岩具有强度低、可塑性大、遇水易膨胀软化等特性。在软岩地层中采煤掘进，巷道围岩变形呈现出持续、快速、量大的特点。软岩的膨胀性会对支护结构产生巨大的膨胀压力，使锚杆、锚索等支护构件被拉断，棚式支护的棚腿被压弯、折断。同时，软岩巷道的底鼓问题也十分突出，严重影响巷道的正常使用与通风、运输功能。如某深部煤矿软岩巷道，施工后不到一个月，底鼓量就达到0.8米，不得不频繁进行卧底清渣作业，极大地增加了劳动强度与开采成本。

1.5 高地应力

随着开采深度的增加，高地应力问题愈发凸显。高地应力作用下，巷道围岩处于复杂的三向受力状态，岩石的脆性增加，容易发生岩爆等动力灾害。在掘进过程中，即使未进行开采扰动，巷道周边岩石也可能因应力集中而突然破裂、弹射，对人员与设备构成严重威胁。而且，高地应力会加剧巷道围岩的变形速率与变形量，常规支护难以有效控制。例如，某千米深井煤矿，在高地应力区掘进时，多次发生岩爆现象，致使巷道超挖严

重，支护结构破坏频繁，严重阻碍了开采进程。

2 复杂地质条件下采煤掘进常用支护技术

2.1 锚杆支护

锚杆支护是通过将锚杆打入巷道围岩，利用锚杆与围岩之间的摩擦力、锚固力，将围岩锚固在一起，形成一个承载整体，提高围岩的自稳能力。在复杂地质条件下，尤其是岩层破碎但整体性尚可的区域，锚杆支护能有效控制围岩浅部的变形。对于断层附近的破碎顶板，合理布置锚杆，使其锚固在相对稳定的岩层中，可以阻止顶板岩石的进一步离析与垮落。锚杆的类型多样，有普通螺纹钢锚杆、左旋无纵筋锚杆等，根据围岩特性可灵活选择。同时，配套使用托盘、螺母等构件，确保锚杆锚固力的充分发挥。

2.2 锚索支护

锚索支护作为锚杆支护的补充与强化手段，具有锚固深度大、承载能力强的特点。当遇到深部围岩松动、高地应力等情况时，锚索能够深入到稳定岩层，将深部稳定岩体与浅部围岩连接起来，提供强大的悬吊与加固作用。在软岩巷道或大断面巷道支护中，锚索与锚杆联合使用效果显著。例如，在某软岩矿井的大巷支护中，采用直径22毫米的高强度锚索，长度达8米，配合锚杆支护，有效控制了巷道的持续变形，保障了巷道的长期稳定。锚索的安装需要专用的张拉设备，确保锚索施加足够的预紧力，使其在围岩变形初期就能发挥主动支护作用。

2.3 棚式支护

棚式支护包括工字钢棚、U型钢棚等形式，它是一种被动支护方式，依靠棚架自身的强度来支撑巷道顶板与两帮的压力。在围岩极其破碎、自稳能力极差的情况下，如严重破碎带、大型断层交汇处，棚式支护能够迅速搭建起临时支护空间，为后续的永久支护施工争取时间。U型钢棚具有良好的可缩性，在高地应力区，当围岩压力增大时，棚架能够适度收缩，缓冲压力，避免支护结构因刚性过大而突然破坏。不过，棚式支护的缺点是钢材用量大、安装劳动强度高，且后期维护成本较高。

2.4 联合支护方式

为应对复杂多变的地质条件，单一的支护方式往往难以满足要求，联合支护应运而生。常见的联合支护模式有“锚杆+锚索+金属网+喷射混凝土”“棚式支护+锚杆支护”等。在破碎带与软岩交叠的区域，先架设棚式支护提供临时支撑，然后打设锚杆、锚索深入围岩加固，再铺设金属网并用喷射混凝土封闭围岩表面，形成多层次、全方位的支护体系。这种联合支护方式充分发挥了各支护技术的优势，既能有效控制围岩初期的变形与垮落，又能保障巷道的长期稳定，提高支护的可靠性与适应性。

3 实际案例分析

3.1 案例一：某煤矿断层破碎带支护实践

某煤矿在掘进一条运输巷道时，遇到一条宽度约8米的正断层破碎带，顶板岩石破碎严重，裂隙水发育。起初，采用单一的锚杆支护，掘进2米后，顶板就出现多处垮落，无法继续施工。随后调整支护方案，采用“U型钢棚+锚杆+锚索+喷射混凝土”的联合支护方式。首先，快速架设U型钢棚，间距0.8米，作为临时支护；接着，在棚间打设锚杆，锚杆长度2.5米，间排距0.8米×0.8米，增强围岩的整体性；然后，每隔2米安装一根锚索，锚索长度6米，深入稳定岩层，悬吊破碎顶板；最后，对巷道表面喷射10厘米厚的混凝土，封闭围岩，防止风化与水蚀。通过该联合支护方案的实施，成功穿越了断层破碎带，巷道变形控制在允许范围内，保障了运输巷道的顺利贯通。

3.2 案例二：某深部煤矿软岩巷道支护案例

某深部煤矿开采深度达1000米，巷道围岩主要为泥质软岩，具有强膨胀性。原设计采用锚杆支护，巷道掘进后不久，就出现严重的底鼓、两帮内挤与顶板下沉现象。经分析研究，重新设计支护方案为“全长锚固锚杆+高强度锚索+钢筋混凝土反拱+壁后注浆”。采用全长锚固锚杆，提高锚杆与围岩的锚固力，抑制围岩浅部变形；锚索选用直径25毫米、长10米的高强度钢绞线，施加高预紧力，控制深部围岩位移；在巷道底板浇筑钢筋混凝土反拱，抵抗底鼓；同时，通过壁后注浆填充围岩裂隙，提高围岩强度，增强支护结构的整体性。实施新方案后，巷道变形速率明显降低，在后续6个月的监测期内，巷道变形量满足安全生产要求，确保了深部开采作业的正常进行。

4 复杂地质条件下采煤掘进支护技术存在的问题

4.1 支护设计缺乏针对性

部分煤矿在进行支护设计时，未充分考虑复杂地质条件的特殊性，照搬常规地质条件下的支护参数。对断层、褶皱、软岩等不同地质构造的影响认识不足，导致支护强度不够或支护方式不合理，无法有效应对围岩变形与破坏，增加了安全风险。

4.2 支护材料质量参差不齐

市场上支护材料种类繁多，质量差异较大。一些煤矿为降低成本，选用质量低劣的锚杆、锚索、钢材等支护材料，其力学性能、锚固性能难以满足复杂地质条件下的支护要求。如低强度锚杆在高应力作用下易被拉

断，劣质锚索的锚固剂粘结力不足，容易导致锚索失效，危及巷道安全。

4.3 施工工艺不规范

在支护施工过程中，存在诸多不规范操作。如锚杆安装角度偏差大、锚固力达不到设计要求；锚索张拉不及时或张拉值不准确；喷射混凝土厚度不均匀、强度不够；棚式支护的棚架架设不垂直、连接不牢固等。这些施工工艺问题严重影响了支护效果，削弱了支护结构的承载能力。

4.4 监测与反馈不及时

复杂地质条件下，巷道围岩变形动态监测至关重要。然而，部分煤矿监测设备不足、监测频率不合理，不能及时准确掌握围岩变形规律。即使监测到异常数据，也缺乏有效的反馈机制，未能及时调整支护参数或采取补救措施，最终导致巷道失稳破坏。

5 复杂地质条件下采煤掘进支护技术优化策略

5.1 精准化支护设计

在复杂地质条件下进行采煤掘进时，支护设计的精准性至关重要。为了实现这一目标，我们采用了地质雷达、三维地震勘探等现代勘探技术，对地质构造进行了全面而深入的勘察，从而建立了详尽且准确的地质模型。这一模型为后续的支护设计提供了坚实的基础。在地质模型的基础上，我们进一步运用FLAC3D、ANSYS等先进的数值模拟软件，对不同支护方案下围岩的变形与应力分布进行了细致的模拟分析。

5.2 严格把控支护材料质量

支护材料的质量直接关系到支护结构的稳定性和安全性。因此，我们建立了严格的支护材料采购制度，确保所选供应商具有良好的信誉和可靠的质量保证。在支护材料进场前，我们按照国家标准与行业规范，对锚杆、锚索的力学性能、锚固性能，以及钢材的强度、韧性等关键指标进行了严格的抽检。对于任何不合格的材料，我们都坚决禁止使用，从而从源头上保障了支护材料的质量[3]。

5.3 规范施工工艺管理

为了让施工人员能够熟练掌握这些工艺要求，我们加强了对他们的培训力度。通过系统的培训，施工人员对支护施工的每一个环节都有了深入的了解，并能够熟练地进行操作。在施工过程中，我们配备了专人进行质量监督。这些监督人员严格把关，对锚杆安装、锚索张拉、喷射混凝土、棚式支护架设等关键环节进行了严格的检查和控制。他们的存在确保了施工质量始终符合设计标准，从而提高了支护结构的稳定性和安全性。

5.4 强化监测与反馈机制

为了及时掌握围岩的变形情况，我们完善了围岩变形监测系统。通过增加监测点的密度和采用自动化监测设备，我们能够实时地获取围岩的变形数据。为了确保这些数据的准确性和可靠性，我们建立了数据分析处理平台。通过该平台，我们能够及时地对监测数据进行处理和分析，并依据分析结果评估围岩的稳定性。一旦发现异常情况，我们会迅速启动反馈程序，组织专家进行论证，并及时调整支护方案。这种动态优化的过程确保了支护结构能够适应复杂地质条件的变化，从而提高了支护效果。

结论：复杂地质条件下采煤掘进支护技术的研究与应用是一个系统工程，面对断层、褶皱、破碎带、软岩、高地应力等诸多挑战，锚杆支护、锚索支护、棚式支护及其联合支护方式各有优劣与适用场景。通过深入分析实际案例，明确当前技术应用存在的问题，进而采取精准化支护设计、严控材料质量、规范施工工艺、强化监测反馈等优化策略，能够有效提升采煤掘进支护的可靠性与有效性，保障煤矿安全生产，推动煤炭行业在复杂地质环境下稳健发展，为我国能源供应提供坚实后盾。在未来煤炭开采进程中，随着科技的不断进步，采煤掘进支护技术必将持续创新升级，以适应更为严苛的地质条件与开采需求。

参考文献

[1]李明,张华.复杂地质条件下采煤掘进锚杆支护参数优化研究[J].煤炭科学技术,2024(05):62-65.

[2]王悦,陈刚.破碎带地质环境中采煤掘进联合支护技术应用[J].矿业研究与开发,2024(04):55-58.

[3]吴迪,郑浩.软岩地质条件采煤掘进支护材料选型及工艺优化[J].煤,2024(01):32-35.