

煤矿井下工作面支护技术与安全高效开采

刘延东

(华亭煤业大柳煤矿有限公司, 甘肃 平凉 744100)

摘要 在煤矿井下开采作业中, 工作面支护技术是保障开采安全的核心, 安全高效开采方法是提升煤炭资源利用率与生产效率的关键。本文围绕煤矿井下工作面支护技术展开, 系统阐述了综放工作面、长壁工作面、切顶采煤、斜井开采等五种安全高效开采方法的工艺原理、技术要点与适用场景, 并重点解析液压支架技术在开采作业中的适配应用。结果表明, 科学匹配支护技术与开采方法, 可有效控制井下顶板风险、提升开采效率, 为煤矿井下规模化、安全化生产提供技术参考。

关键词 煤矿; 开采作业; 井下工作面; 井下工作面支护技术

中图分类号: TD82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.025

0 引言

煤炭在我国能源体系中占据重要位置。煤矿井下开采工作存在地质状况繁杂、顶板坍塌风险较大、生产效能和安全保障难以均衡等问题。随着煤矿开采深度的加大以及规模化生产需求的提高, 传统的支护手段和开采方式已无法契合“安全第一、高效生产”的准则。工作面支护技术对顶板的稳定性和作业安全起着决定性作用, 安全高效的开采方式则关系到资源的回收比率和生产效益, 实现两者的协调优化是煤矿井下生产的关键议题。本文结合井下地质条件和生产实际情况, 全面剖析支护技术的重点内容和高效开采方式, 为煤矿井下生产技术的升级提供借鉴。

1 煤矿井下工作面支护技术

1.1 选择支护支架

支护支架的挑选要将井下地质状况、煤层赋存特点以及开采技术作为主要依据, 保证支架和作业环境相契合。对煤层厚度与倾斜角度的分析是首要环节, 在薄煤层开采时, 需选用体积较小、移架操作灵活的支架, 防止支架过多占用作业空间; 中厚煤层开采过程中, 要同时顾及支架的支撑力度和移架效率; 厚煤层开采则需考虑支架对分层开采或者放顶煤技术的适用性。顶板的稳固程度是支架选择的重要指标, 在顶板不稳定的环境中, 应选用掩护式支架, 这类支架通过护帮板与顶梁的共同作用来控制顶板变形; 在顶板中等稳定的环境下, 可选用支撑掩护式支架, 该类支架能够平衡支撑强度与防护范围; 在顶板稳定的环境

中, 可采用支撑式支架, 这类支架依靠较大的工作阻力来控制顶板下沉。

1.2 支架类型的确定

根据支架结构形式与工作原理, 煤矿井下常用支护支架分为掩护式、支撑式、支撑掩护式三类, 各类支架的技术特征与适用场景存在显著差异(见表1)。掩护式支架以顶梁、掩护梁与底座构成封闭防护空间为核心结构, 顶梁短、掩护梁长, 通过立柱支撑顶梁, 护帮板可伸缩控制煤壁片帮。支撑式支架由顶梁、底座与立柱直接构成支撑体系, 顶梁长、无掩护梁, 立柱垂直布置, 工作阻力高, 主要通过高强度支撑控制顶板下沉, 但防护范围有限, 对煤壁片帮与顶板垮落的防护能力较弱, 需要配套护帮装置使用。支撑掩护式支架融合掩护式与支撑式支架的结构优势, 顶梁长度适中, 掩护梁与顶梁铰接, 立柱呈倾斜布置, 兼具高工作阻力与宽防护范围的特点, 适用于煤层倾角 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、顶板中等稳定的中厚煤层综采工作面, 能同时满足顶板支撑与煤壁防护需求, 是当前井下应用最广泛的支架类型。

1.3 支架规格的确定

支架规格参数需通过力学计算与现场实测确定, 核心参数包括支架高度、工作阻力、初撑力与移架步距, 各参数需与煤层条件、顶板压力匹配。支架高度需要覆盖煤层开采厚度的变化范围, 计算公式为:

$$H_{\min} = h_{\min} - \delta_1, H_{\max} = h_{\max} + \delta_2 \quad (1)$$

式(1)中, h_{\min} 为最小采高, h_{\max} 为最大采高, δ_1

作者简介: 刘延东(1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 采煤工艺及安全管理。

表 1 煤矿井下主要支护支架类型对比分析

支架类型	结构特点	工作原理	适用条件	主要优点	主要缺点
掩护式支架	顶梁短、掩护梁长，构成封闭防护空间	通过护帮板与顶梁协同控制顶板变形和煤壁片帮	不稳定顶板、煤层倾角 < 15° 的薄及中厚煤层	防护性能好，适应顶板变化能力强	工作阻力相对较低，支撑能力有限
支撑式支架	顶梁长、无掩护梁，立柱垂直布置	依靠高工作阻力直接支撑顶板，控制顶板下沉	稳定顶板、煤层倾角 < 10° 的中厚煤层	工作阻力高，支撑能力强	防护范围小，对片帮防护能力弱
支撑掩护式支架	顶梁长度适中，掩护梁与顶梁铰接，立柱倾斜布置	兼具高工作阻力与宽防护范围的特点	中等稳定顶板、煤层倾角 10° ~ 25° 的中厚煤层	支撑与防护性能均衡，适用范围广	结构复杂，造价较高

为顶板下沉量， δ_2 为支架顶部预留间隙。例如：采高 2.0~2.5 m 的中厚煤层，支架高度需设计为 1.9~2.6 m，确保支架在顶板下沉后仍能有效支撑。

工作阻力需要根据顶板压力计算确定，采用“估算法”时，工作阻力 $P=K \times L \times B \times q$ ，其中 K 为安全系数（通常取 1.2~1.5），L 为支架顶梁长度（m），B 为支架中心距（m，通常 1.5~1.75 m），q 为顶板均布载荷（kN/m²，根据煤层埋深计算，埋深每增加 100 m，增加 25~30 kN/m²）。例如：埋深 500 m、顶梁长度 3.2 m 的工作面， $q=125 \sim 150$ kN/m²，工作阻力需达到 $1.3 \times 3.2 \times 1.6 \times (125 \sim 150) = 832 \sim 998$ kN，实际选型需取 1 000 kN 以上。

2 煤炭安全高效开采的方法

2.1 综放工作面开采方法

综采放顶煤工作面开采方式适用于煤层厚度超 5 m 的厚煤层条件，该工艺采用“开采顶部煤炭与放落顶部煤炭”同步作业的流程，其技术核心在于借助液压支架对采空区域的顶板实施控制，依靠顶煤自身重力实现垮落和放出^[1]。采煤机对煤层上部 2.0~3.0 m 厚度的顶煤进行截割作业，截割产生的顶煤通过刮板输送机运输至外部。

放煤的顺序采用“多轮次间隔放煤”模式，这种顺序安排能够有效避免出现顶煤放空情况或矸石混入问题，进而保证顶煤的回收比例达到 80% 以上。顶板控制工作同样至关重要，该开采方法采用支撑掩护类型的放顶煤支架，在支架后方设置有挡矸帘装置，挡矸帘的作用是防止矸石进入放煤口区域^[2]。设备配套方面需要重点关注，该工艺需选用截割功率在 300~600 kW 区间的大功率采煤机，搭配运输能力为 1 500~3 000 t/h 的高强度刮板输送机，同时配备工作阻力处于 10 000~15 000 kN 范围的大工作阻力放顶煤支架，这些设备共同为“三机”的协同稳定运行提供保障。

2.2 长壁工作面开采方法

长壁工作面的开采方法在目前应用中是最广泛的一种，它按照推进方向又可分为走向长壁和倾斜长壁两种形式，其核心是沿着煤层走向或者倾斜方向布置长工作面以达到连续回采的目的^[3]。走向长壁工作面按煤层走向布置，推进方向同煤层走向一致，采空区用全部垮落法进行处理，其技术优势主要表现为工作面长度稳定，采煤机连续作业时间较长，生产效率较高且适应条件为煤层倾角小于 25°，赋存稳定且顶板中等稳定且厚度较大的中厚煤层。

倾斜长壁开采工作面沿煤层倾斜方向布置，推进方向与煤层倾斜一致，分为俯斜开采与仰斜开采^[4]。俯斜开采适用于煤层倾角 12°~25°，利于工作面排水与煤流运输，但需控制支架下滑，仰斜开采适用于煤层倾角 < 12°，顶板管理难度低，但需防止煤壁片帮。

2.3 切顶采煤方法

切顶采煤方法以“定向切顶卸压”为原理，适用于顶板坚硬、垮落困难的薄及中厚煤层。该方法通过机械或爆破方式切断顶板岩层的应力传递路径，实现顶板可控垮落，同时利用切顶形成的矸石作为支撑体，减少支护成本^[5]。其技术流程需分阶段开展，工作面回采前，工作人员沿采空区边界施工定向切顶孔。液压破碎锤或爆破装置对切顶孔进行扩缝，切断顶板岩层的完整性，进入回采过程后，切顶后的顶板沿切缝面垮落，形成矸石充填带，支架仅需支撑少量顶板压力。

切顶高度需根据顶板岩层厚度确定，通常为煤层厚度的 2~3 倍，确保垮落矸石能充满采空区。切缝间距控制在 1.0~1.5 m，避免切缝过宽导致顶板提前垮落。支架选型采用轻型支撑式支架，工作阻力符合要求，可降低设备重量与移架难度。切顶采煤方法优势显著，能减少支护阻力需求，使支架工作阻力降低 30%~40%，同时减少能耗 20%，还可控制冲击地压，

切顶卸压后顶板应力集中系数降低至1.2以下。

2.4 斜井开采方法

斜井开采方法适用于煤层埋藏较浅、倾角 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的煤层,该方法通过开凿斜井直接通达煤层工作面,减少立井开拓的巷道工程量,降低建设成本。运输系统设计需重点规划,主斜井采用带式输送机运输煤炭,辅助斜井采用串车或箕斗运输设备与人员^[6]。斜井内需设置防跑车装置,轨道坡度控制在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$,避免车辆溜滑。工作面布置有明确要求,工作人员沿斜井走向布置倾斜长壁工作面,支架需设置防滑装置,防止支架沿倾斜方向下滑。

在排水方面,斜井内需设置排水管路与水仓,采用多级排水泵将井下积水排出,避免积水影响作业。在顶板管理上,倾斜工作面顶板易出现沿倾向的滑动变形,工作人员需采用倾斜角 $< 5^{\circ}$ 的伪斜工作面布置,同时提高支架初撑力,控制顶板滑动。在通风问题上,斜井通风阻力较大,需选用大功率通风机,确保工作面风量满足作业要求。斜井开采方法的优势在于开拓成本比立井开拓低 $30\% \sim 40\%$ 、建设周期可缩短 $6 \sim 12$ 个月,但该方法仅适用于倾角适中、埋藏较浅的煤层,不适用于深埋或急倾斜煤层。

2.5 液压支架技术

液压支架技术是煤矿井下工作面支护的核心技术,其性能直接决定支护安全性与开采效率,当前已从传统手动控制向智能化、自动化方向发展^[7]。液压支架工作通过液压系统驱动立柱与千斤顶动作,实现支架的升柱、初撑、承载、降柱与移架。除工作阻力、初撑力等基础参数外,移架速度是影响开采效率的核心指标,当前高效液压支架的移架速度可达 $8 \sim 12$ s/架,通过采用电液控系统与双伸缩立柱实现快速移架。

新一代智能化液压支架集成压力传感器、位移传感器与红外监测装置,通过与采煤机、刮板输送机的联动控制,形成“三机”智能协同系统,移架动作可根据采煤机位置自动触发,移架速度与采煤节奏同步。

3 煤矿井下工作未来发展方向

3.1 支护技术的智能化与自适应升级

煤矿井下支护技术将向“感知—分析—决策—执行”全流程智能化发展,在现有智能液压支架传感器体系基础上,会进一步整合微震监测和围岩应力场实时扫描的多维感知技术,并利用边缘计算和AI算法建立动态地质模型来对支护参数进行自适应调节。轻量化和模块化设计将成为支架开发的重点,使用高强度铝合金和复合材料来减少设备的重量,并与快拆式结

构相结合以实现不同煤层条件下快速更换,缩短工作面移动倒面时间,并促进支护技术由被动适配到主动适应转变,以适应深埋和急倾斜复杂煤层安全支护要求。

3.2 安全高效开采的绿色化与多工艺协同

安全且高效的开采工作将打破单一工艺的限制,构建“多种方法协同配合+全流程低碳环保”的全新开采模式。针对薄煤层和厚煤层复合赋存的情况,把长壁开采具有的连续化优势与切顶采煤的卸压优势相结合,先通过定向切顶预处理来减弱顶板应力,再运用长壁综采的方式实现高效回采,进而让资源回收率提高 $5\% \sim 8\%$ 。在开采过程中,需深入贯彻绿色理念,如在综放工作面推行“矸石原位充填”技术,借助垮落的矸石和矿井水来制备充填材料,以此减少地表沉陷以及矸石的外运量。配备以光伏供电的井下设备和余热回收系统,降低开采过程中的能耗和碳排放,还将构建开采工艺与地质条件的数字孪生匹配系统,通过对不同煤层参数下工艺适配性的模拟,实现开采方案的预先优化,达到安全、效率和环保目标的兼顾。

4 结束语

煤矿井下工作面支护技术和安全高效开采方法协同优化是解决井下生产“安全与效率”矛盾的核心路径,通过精确支护和动态顶板控制技术的协同作用达到了对顶板垮落风险和开采进度进行权衡的目的。未来,煤矿井下开采技术将朝着“智能化、轻量化、绿色化”的方向迈进,经过不断的技术创新和工程实践,煤矿井下生产将逐渐达到“安全零事故、效率最大化、资源高效用”等目的,从而为我国能源安全提供“技术—效率—资源”三重保障。

参考文献:

- [1] 李宗凯.煤矿井下采掘工作面支护技术[J].内蒙古煤炭经济,2025(13):115-117.
- [2] 薛彩峰.煤矿井下高效支护和快速掘进技术的应用分析[J].山东煤炭科技,2025,43(06):84-88.
- [3] 苏超,宋廷德,王超.煤矿井下巷道掘进顶板支护技术探讨[J].中国设备工程,2025(06):249-252.
- [4] 秦瑞,宋维明.煤矿井下采煤技术中问题及解决方法初探[J].内蒙古煤炭经济,2024(21):67-69.
- [5] 王岩波.关于煤矿井下采煤技术及优化探析[J].矿业装备,2024(05):84-86.
- [6] 秦云龙.复杂条件下掘进工作面支护技术研究[J].山西化工,2023,43(11):186-187,212.
- [7] 李向军.煤矿井下作业面支护技术与安全高效开采[J].能源与节能,2020(02):149-150.