

“三软不稳定煤层”综采工作面大倾角回采技术研究与应用

吴延东

郑州煤电股份有限公司超化煤矿 河南 郑州 452385

【摘要】：在我国煤炭资源开采中，“三软”（顶板软、底板软、煤层软）不稳定煤层的大倾角（通常指 25° - 45° ）回采一直是安全高效生产的重大技术难题。本文针对此类煤层综采工作面存在的设备下滑与倾倒、煤壁片帮与顶板冒落、飞矸伤人、煤炭输送困难等核心问题，结合具体工程实践，系统性地研究并应用了一套集“工作面伪斜布置、设备综合防滑防倒、三维主动支护、动态工艺调控与安全管理”于一体的综合技术体系。实践表明，该体系能有效控制围岩失稳，保障设备稳定运行，显著提升大倾角三软煤层的回采安全性和生产效率，为类似复杂地质条件煤层的高效开采提供了可靠的技术路径与经验借鉴。

【关键词】：三软煤层；大倾角；综采；设备防滑；围岩控制；安全回采

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.057

1 引言

煤炭作为我国主体能源，其安全高效开采至关重要。在众多煤层赋存条件中，“三软不稳定煤层”因其顶板岩性软弱、破碎，底板遇水易软化、承载力低，煤层本身松软、易片帮，而被公认为开采条件极其复杂的类型。当此类煤层再叠加“大倾角”（煤层倾角大于 25° ）时，开采难度呈几何级数增长。传统的开采方法不仅产量低、效率差，更伴随着顶板垮落、设备下滑、飞矸冲击等一系列重大安全风险。

综合机械化采煤（综采）是现代化高产高效矿井的标志。然而，将综采技术成功应用于大倾角三软煤层，必须克服重力分异作用带来的特殊挑战：液压支架易倾倒下陷、采煤机与刮板输送机稳定性差、破碎的顶板煤壁更难维护、滚落的煤矸成为重大危险源。因此，系统研究并形成一套行之有效的“大倾角三软煤层综采技术”，对解放我国大量同类稀缺煤炭资源、保障矿工生命安全、提升企业经济效益具有重大的现实意义。

2 大倾角三软煤层综采工作面核心难点分析

2.1 围岩控制极端困难

“三软”特性导致工作面围岩（即顶板、底板和煤壁）自身强度极低，承载能力差。在大倾角状态下，顶板岩层受到垂直重力和沿层面向下的滑移力共同作用，更容易发生离层和冒落。底板软弱则导致液压支架底座容易下陷、钻底，使支架无法提供足够的、垂直顶板的支撑力。煤壁在采动压力和重力作用下，极易发生大面积片帮，进一步恶化顶板支护环境。

2.2 设备稳定性问题突出

所有设备都受到一个沿倾斜向下的分力。液压支架可能产生下滑和倾倒（向采空区侧或煤壁侧）的双重失稳风险。刮板输送机在重载下易发生“上窜下滑”，即整体向下或向上移动，破坏工作面平直度。采煤机在倾斜的刮板机上运行，存在掉道、牵引困难的风险。人员操作与通行安全风险极高；物料（特别是重型备件）运输困难；设备检修空间受限、难度大；采煤工艺参数（如采高、截深、牵引速度）的选择必须兼顾防滑与顶

板控制，制约因素多。设备的连锁失稳会导致生产中断，甚至引发安全事故。

2.3 飞矸与物料滚落风险高

工作面倾角大，任何从煤壁、顶板剥落或从设备上掉落的煤块、矸石，都会沿底板高速滚落，对下方作业人员和设备构成严重冲击威胁，是井下最危险的动态风险源之一。

2.4 煤炭与矸石分运困难

由于重力作用，破落下的煤炭会自然流向工作面下部，造成上部“缺煤”、下部“堆煤”，影响采煤机正常装煤和刮板机均匀负载。同时，顶板冒落的矸石也易混入煤流，影响煤炭质量。

3 关键技术与集成应用方案

针对以上难点，本研究提出并应用了“以工作面空间姿态设计为基础，以设备主动稳定为核心，以围岩动态控制为保障，以安全防护为底线”的综合性技术方案。

3.1 工作面伪斜布置与几何参数优化

原理：将工作面设计成与煤层走向呈一定夹角的“伪斜”长壁布置，而非完全沿走向布置。这是解决大倾角问题的首要且关键的一步。

作用：

（1）抵消下滑力：伪斜布置使刮板输送机在倾斜方向上有一个“坡度减缓”效应，部分抵消煤炭和设备自重产生的下滑力，利于输送机稳定和煤炭运输。

（2）创造支护条件：使液压支架在推移过程中，始终有一个指向煤壁的微小上移趋势，有利于抵抗其下滑，并为支架调整姿态创造条件。

（3）优化工艺流：使采煤机上行割煤和下行割煤的负载相对均衡。

应用：通过力学计算和数值模拟，确定最优的伪斜角度（通常为 5° - 15° ）。同时，适当缩短工作面长度，以减少矿压显

现的剧烈程度和管理难度；合理降低采高，以增强煤壁自稳能力和支架整体稳定性。

3.2 综采设备综合防滑防倒技术

这是保障生产连续性的核心技术，液压支架在自重分力、顶板推力和底板摩擦阻力失衡的综合作用下，发生倾倒和下滑的倾向始终存在，尤其在工作面中下部区域。刮板输送机同样面临严峻的下滑挑战，其稳定运行是保证采煤机正常截割和煤炭运输的前提。

液压支架稳定性控制：

(1) “三防”装置标配化：所有支架必须配备可靠的防滑、防倒、防挤装置。下端头架架是防滑关键，采用强力锚固或联排控制；中部支架间安装可调式防倒千斤顶；防止支架顶梁在倾倒时互相挤压。安装与初撑管理：工作面设备安装必须确保“三条线”（支架顶梁、输送机、煤壁）平直，且支架从安装开始就与底板垂直顶紧，初撑力必须达到额定值的80%以上，这是建立初期稳定性的关键。

(2) 带压移架与擦顶移架：移架时保持支架一定的初撑力，使护帮板紧贴煤壁，顶梁轻微接触顶板，平稳快速地完成降架-移架-升架动作，避免因突然卸载导致顶板破碎和支架失稳。

(3) 底座强化与防钻底：采用大面积、带筋板的底座，必要时在底座下铺设钢板或专用防陷垫，防止支架在软底中下陷。

刮板输送机与采煤机防滑控制：

(1) 输送机锚固与调平：在工作面下端头对输送机机头进行牢固的锚固。采用液压支架推移杆的精确控制，确保输送机在推移后保持平直，防止过度上翘或下弯。

(2) 采煤机行走部与制动：选用大功率、大扭矩、带有可靠液压制动或电磁制动系统的采煤机，确保其在倾斜输送机上能安全启停，防止溜车。

3.3 围岩三维主动联合支护体系

针对“三软”特性，必须建立“顶板-煤壁-底板”三位一体的立体支护理念。

顶板控制：采用“即时支护+超前支护”结合。支架顶梁全断面覆盖顶板，及时伸出护帮板支护新暴露的顶板。对于极端破碎顶板，可在支架顶梁上铺设金属网，甚至采用超前注浆锚杆（在煤壁前方对顶板岩层进行加固）技术，预先加固顶板。

煤壁控制：这是三软煤层的关键。除支架护帮板必须及时、贴紧煤壁外，可采用煤壁化学注浆加固技术。在采煤机割煤前，向煤壁施工钻孔并注入聚氨酯等快速凝固材料，将松散的煤体固结成一个整体，从根本上防止片帮。

底板控制：对极端软弱底板，可考虑对底板进行浅孔注浆

加固，或在工作面推进前，在底板上预铺一层混凝土或高强复合材料垫层，形成一个人工硬底。

3.4 生产工艺的适应性调控

回采顺序：优先采用采煤机下行割煤、上行装（清）煤的工艺。因为下行割煤时，滚筒旋转方向有利于将煤抛向刮板机，且采煤机自身重力有助于牵引。上行时则进行清浮煤和调整。这有利于利用采煤机滚筒对煤壁的支撑作用，减少空顶面积和时间，并便于控制输送机下滑。通过均衡工作面推进速度、保持全工作面支架受力相对均匀，避免应力过度集中。采用伪倾斜开采布置，是改善全工作面应力环境和管理条件的有效宏观策略。

分段作业与间隔移架：将工作面分成上、中、下若干段，实行分段错开移架，避免全工作面同时卸载。移架顺序遵循“由下而上”的原则，以下部稳定支架作为上部支架移架时的支撑基准。精细规划割煤、移架、推溜、检修等工序在倾斜方向和推进方向上的时空顺序，推行“分段平行作业、关键工序错时”的组织方式，最大化减少工序干扰，提高工时利用率。

安全作业与运输管理：制定极端倾斜条件下的专项安全作业规程，如设置安全人行梯、防滚矸设施；采用绞车、单轨吊等机械化方式运送物料；推行设备预防性检修，减少故障停机时间。

智能化辅助：构建集成“围岩应力监测（如应力计）、支架工况监测（压力、倾角、姿态）、设备运行监测、视频监控及人员定位”的智能管控平台。利用监测数据实时诊断工作面稳定性状态，对支架失稳、顶板异常来压、设备异常下滑等进行超前预警。应用电液控制系统，实现支架成组顺序控制，提高移架速度和同步性，减少顶板暴露时间。基于大数据分析，动态优化工艺参数和管理指令，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的管理模式升级。

3.5 全方位安全防护系统

立体挡矸防飞：

(1) 在液压支架顶梁侧、人行道侧加装高强度柔性防护网。

(2) 在架间安装可伸缩的联动挡矸板。

(3) 工作面下端头设置坚固的防护隔离舱，作为人员躲避和设备操作的安全空间。

(4) 所有人员必须佩戴坚固的安全帽，并尽量贴帮站立。

监测预警：安装顶板离层监测仪、支架压力传感器和视频监控系统，实时监测围岩与设备状态，实现预警管理。

4. 工程应用实例与效果分析

以某矿 3502 大倾角三软煤层综采工作面为例进行说明。该工作面平均倾角 32°，煤层平均厚度 2.8m，顶底板为泥岩

和砂质泥岩，单轴抗压强度均低于 15MPa，属于典型条件。

4.1 应用方案实施：

工作面采用 10° 伪斜布置，长度控制在 150m。

选用带“三防”装置的矮型大阻力两柱掩护式支架，底座面积加大 15%。

全面采用煤壁超前注浆加固技术，注浆孔深 6m，超前工作面 20m 施工。

严格推行“下行割煤、上行清煤”、“由下而上、分段间隔移架”的工艺。

架间全封闭防护网，下端头搭建全断面防护舱。

4.2 应用效果：

经过三个月的回采实践，取得了显著成效：

(1) 安全状况根本改善：未发生一起顶板大面积冒落和重大片帮事故，完全杜绝了飞矸伤人事件。设备无发生下滑倾倒事故。

(2) 生产效率大幅提升：工作面月推进度由试验前的 45 米提高至 85 米以上，月产量稳定在 8 万吨以上，达到同类条件领先水平。

(3) 围岩控制效果显著：顶板下沉量控制在 200mm 以内，

煤壁片帮深度平均小于 0.5m，工作面“三直两平两畅通”质量标准化动态达标。

(4) 经济效益可观：虽增加了注浆等成本，但因产量提升、安全事故减少、回收率提高，整体经济效益增幅超过 30%。

5 结论与展望

本研究通过系统的理论分析与工程实践，验证了综采技术应用于大倾角三软不稳定煤层的可行性。成功的关键在于摒弃单一技术手段，采用“系统设计、综合治理、主动控制”的集成化思路：

伪斜布置是解决大倾角问题的空间前提。

设备综合防滑防倒是保障连续生产的机械基础。

围岩三维主动支护（特别是煤壁超前加固）是应对“三软”特性的技术核心。

适应性工艺与立体防护是实现安全高效的管理保障。

未来，随着智能化采矿技术的发展，基于惯性导航的工作面自动调直、装备姿态实时感知与自适应调节、煤岩识别与精准注浆等新技术将进一步融入该体系，实现大倾角三软煤层综采工作面的少人化、智能化安全高效开采，为解决我国复杂煤层资源开采这一世界性难题提供更强大的技术引擎。

参考文献：

- [1] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社.
- [2] 王国法,等.综采工作面智能化技术与装备发展[J].煤炭科学技术.
- [3] 张农,等.深部大倾角“三软”煤层综采面围岩控制技术[J].采矿与安全工程学报.
- [4] 相关矿井技术报告与应用实践总结.