



移动扫码阅读

杨 科,刘文杰,李志华,等.厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制与防控技术[J].煤炭科学技术,2021,49(2):12-20. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.002

YANG Ke, LIU Wenjie, LI Zhihua, et al. Catastrophe mechanism and prevention and control technology of soft coal mining with large inclination angle under thick and hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 12-20. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.002

厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制与防控技术

杨 科^{1,2,3}, 刘文杰^{1,2,3}, 李志华^{1,2,3}, 刘钦节^{1,2,3}, 池小楼^{1,2,3}, 魏 祯^{1,2,3}

(1.安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽 淮南 232001;2.安徽理工大学 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心,安徽 淮南 232001;3.安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001)

摘 要:针对潘四东煤矿 11513 大倾角工作面煤壁片帮、支架滑移倾倒和顶板大面积来压问题,通过理论分析、数值模拟和现场实测的研究方法对厚硬顶板下大倾角软煤开采的灾变机制和防控技术开展研究。研究结果表明:在厚硬顶板下大倾角软煤开采初期,围岩塑性破坏主要集中在煤壁和底板岩层;邻近工作面区域煤岩体位移表现出煤壁挤出位移量>底板鼓起位移量>顶板下沉位移量的特征;由于厚硬顶板的存在,随工作面推进距离的增大,煤壁挤出位移量逐渐增大,煤壁片帮失稳的概率倍增。根据厚硬顶板下大倾角软煤开采围岩位移和变形破坏特征,结合现场观测提出厚硬顶板下大倾角软煤开采 2 种灾害模式,一是以“片帮-冒顶”为主导,诱发“支架-围岩”系统发生大范围失稳的动态互馈的时发性灾害,二是厚硬砂岩破断诱发冲击动力显现的瞬发性灾害。基于厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制,采用厚硬顶板深孔预裂爆破初次放顶技术,控制厚硬顶板运动;采取煤壁注浆加固、支架防倒防滑以及“铺金属网+工字钢”辅助液压支架管理破碎直接顶等措施,防治煤壁片帮和破碎顶板漏冒,保证“支架-围岩”系统的稳态工作。通过对支架工作阻力和煤壁片帮统计分析发现,11513 工作面采取系列防治措施后,煤壁得到有效控制,初次来压时,支架工作阻力较为富裕,安全阀开启较少且支架无明显倾倒滑移现象,实现了厚硬顶板下大倾角软煤的安全高效开采。

关键词:厚硬顶板;煤壁片帮;支架-围岩系统;灾变机制;防控技术

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)02-0012-09

Catastrophe mechanism and prevention and control technology on soft coal mining with large inclination angle under thick and hard roof

YANG Ke^{1,2,3}, LIU Wenjie^{1,2,3}, LI Zhihua^{1,2,3}, LIU Qinjie^{1,2,3}, CHI Xiaolou^{1,2,3}, WEI Zhen^{1,2,3}

(1.State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center of Precision Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Key Laboratory of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and the Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Aiming at the problems of rib spalling, sliding and tipping of supports and large area roof pressure of No.11513 steep dipping working face of Pansidong Coal Mine, the catastrophic mechanism and prevention technology of soft steep dipping coal seam mining under thick and hard roof were studied by means of theoretical analysis, numerical simulation and field observation. The research results show that in the initial stage of large-incline soft coal mining under the thick and hard roof, the surrounding rock damage are mainly concentrated in the coal wall and floor rock. The displacement of coal and rock mass in the adjacent working face area show that the extrusion displacement of coal wall > floor heave displacement > roof subsidence displacement. Due to the existence of thick and hard roof, as the ad-

收稿日期:2020-10-12;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51634007);高校优秀青年人才支持计划资助项目(gxyqZD2019025);安徽理工大学研究生创新基金资助项目(2019CX1003)

作者简介:杨 科(1979—),男,四川叙永人,教授,博士。E-mail: yksp2003@163.com

通读作者:刘文杰(1995—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail: 1320047926@qq.com

vance distance of the working face increases, the displacement of the coal wall gradually increases and the instability probability of coal wall is increased gradually. According to the characteristics of rock deformation and field observations, two disaster modes of large-incline soft coal mining under thick and hard roof were proposed. One is a time-occurring disaster dominated by rib spalling and roof caving, which induces large area instability of the supporting and surrounding rock system. Another is the instantaneous disaster caused by the breakage of thick hard sandstone. Based on the catastrophic mechanism of large inclination soft coal mining under the thick and hard roof, deep hole pre-crack blasting of thick and hard roof have been adopted to control the movement of thick and hard roof. In order to ensure the stable operation of the supporting and surrounding rock system, measures are taken to reinforce the coal wall, prevent the support from falling or slipping and manage the crushing direct roof by laying metal mesh and I-steel auxiliary support. The statistical analysis of the working resistance of the support and the rib spalling showed that the rib spalling was effectively controlled after a series of prevention measures were taken at No.11513 working face. When the pressure is first applied, the working resistance of the support is relatively rich, the safety valve is less open and the support does not fall significantly, which realizes the safe and efficient mining of soft coal with large inclination under the thick and hard roof.

Key words: thick and hard roof; rib spalling; supporting and surrounding rock system; disaster mechanism; prevention and control technology

0 引 言

受地质构造作用和沉积成岩环境的影响,我国煤炭资源禀赋和煤质特征区域性差异较大,大倾角^[1]煤层作为其中最具有鲜明赋存特征的一类煤层,在我国中西部地区广泛分布^[2],其中中部地区以两淮矿区为典型代表,其煤质较为松软,地质构造复杂,瓦斯压力大,部分煤层上部赋存有厚硬砂岩顶板。这类煤层开采时,致灾和诱灾因素较多,开采难度系数较大。近年来,国内众多学者对大倾角煤层开采中围岩应力演化特征^[3-5]、采场空间结构^[6]、覆岩变形破断运移规律^[7]等展开了系统而全面的研究,分析指出了大倾角煤层开采中围岩结构的基本特征和应力拱壳的基本特性,建立了倾向和走向的三铰拱力学模型,揭示了“关键层”多级梯阶结构形成与变异机制以及稳定-失稳对采场灾变的控制效应,阐明了工作面“支架-围岩”系统高位冲击和低位推垮失稳致灾机理。在煤壁片帮滑移失稳特征以及“支架-围岩”关系方面已有研究表明,受煤层倾角和重力作用,采空区覆岩破断矸石呈现非均匀充填和压实特性,煤壁沿工作面倾向呈非对称受载特征,导致煤壁片帮具有区域多发性和交替演变性^[8-11],工作面倾向中部为煤壁片帮高发区;文献[12-14]结合覆岩非对称垮落特征和采场倾斜砌体结构与支架三维作用模型,建立了支架失稳力学模型,揭示了“支架-围岩”系统失稳模式及其机理。

上述研究成果对大倾角煤层采场围岩控制具有一定的理论指导作用,但受地质构造和煤层赋存条件影响,大倾角煤层顶板特性存在较大差异,其中厚硬顶板下软煤开采就是大倾角煤层开采围岩控制的

技术难题之一。笔者以淮南潘四东煤矿 11513 工作面为工程背景,采用理论分析、数值模拟和现场监测相结合的综合研究方法,对厚硬顶板下大倾角软煤开采面临的“煤壁片帮-顶板漏冒-支架失稳-底板断裂滑移”灾害互馈问题以及强矿压危害展开研究,并在此基础上提出了相应的灾害防控技术,为实现相似禀赋下煤炭资源的安全高效开采提供了理论和技术依据。

1 工程背景

潘四东矿 11513 工作面主采 3 煤,部分区域受断层和煤层异常区影响回采 1 煤;3 煤平均厚度 4.5 m,平均倾角 36°,局部可达 40°,煤体较软,断层、节理发育程度较高;煤层直接顶和直接底均为泥岩,基本顶为 20 m 的厚硬中细砂岩,普氏系数 f 为 8~9,属于典型大倾角“一硬两软”厚煤层。11513 工作面设计倾向长度 114 m,走向长度 580 m,采煤方法为走向长壁采煤法,综采一次采全高,采用 ZZ9200/24/50 型支撑掩护式液压支架支护顶板,全部垮落法管理采空区。

在 11513 工作面回采期间,工作面出现多次不同程度的煤壁片帮、液压支架架间矸石漏冒等现象,且随工作面推进距离的增大,大面积冒顶(图 1),支架倒斜、挤咬等时有发生。为提高煤壁稳定性,保证工作面的正常循环作业,现场依靠提高支架工作阻力和护帮板力等方式对工作面煤壁片帮进行防治,但实际生产效果并不理想。最终 11513 工作面因支架上方顶板突然部分垮落,大块砂岩泥岩互层结构对支架形成冲击,17 号支架至 42 号支架发生大面积侧翻、压垮和推垮,工作面无法继续推进,被迫停产。



图 1 工作面大面积冒顶

Fig.1 Large area roof fall of working face

2 厚硬顶板下大倾角软煤开采围岩力学响应

为分析厚硬顶板-软煤-软底工程地质条件下,大倾角煤层开采扰动岩体力学响应特征及孕灾机制,以潘四东矿 11513 工作面工程地质条件为基础,利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,建立了长×宽×高为 240 m×216 m×279 m 的数值模型,如图 2 所示。考虑边界效应的影响,在工作面四周各留设 60 m 边界煤

柱,模拟工作面宽度为 114 m,运输巷和回风巷宽度均为 5 m,高度为 4 m,煤层倾角为 35°。采用 Mohr-Coulomb 本构模型,模型底部设置为固定边界,模型四周设置为滚轴边界,顶部施加 12.7 MPa 均布荷载模拟上覆岩层重力,煤岩物理力学参数见表 1。

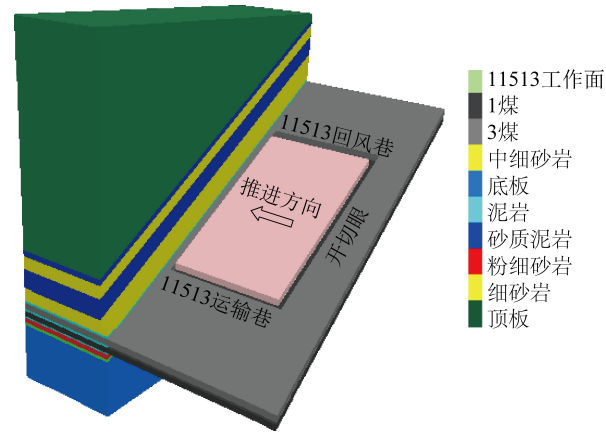


图 2 11513 工作面数值模型

Fig.2 Numerical model of No.11513 working face

表 1 煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock

序号	岩性	厚度/m	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
1	顶板	—	5.22	3.43	35	1.18	1.74
2	砂质泥岩	4.0	6.51	3.01	35	1.05	1.81
2	中细砂岩	9.0	12.89	11.99	39	3.04	3.87
3	砂质泥岩	14.0	7.84	4.26	35	1.20	1.81
4	细砂岩	20.0	16.84	12.35	40	3.47	4.96
5	泥岩	1.5	4.35	2.01	30	0.70	1.42
6	3 煤	4.5	1.07	0.46	24	0.50	—
7	泥岩	1.5	4.35	2.01	30	0.70	1.42
8	1 煤	4.0	1.07	0.46	24	0.50	—
9	泥岩	1.0	4.35	2.01	30	0.70	1.42
10	粉细砂岩	3.5	18.61	15.24	41	3.60	6.40
11	砂质泥岩	2.0	6.51	3.01	35	1.05	1.81
12	底板	—	10.75	5.70	37	1.34	2.05

2.1 开采扰动岩体破坏特征

煤炭资源采出后,原岩应力平衡状态被打破,原本由采空区煤体承担的覆岩荷载,转移到采空区四周的煤岩体中,当煤岩体中的应力达到其强度极限时,煤岩单元体将发生塑性破坏,形成塑性单元的萌生与扩张。由围岩塑性区分布形态表 5 可知,工作面推进至 30 m 时,围岩塑性破坏主要集中在煤体和底板岩石中,细砂岩基本顶破坏程度较小,工作面前方煤体塑性区扩张深度为 6~7 m,底板塑性区深度

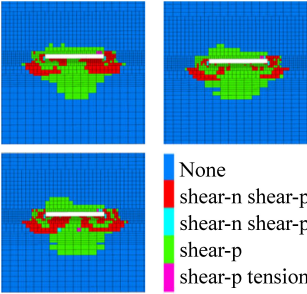
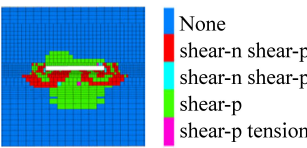
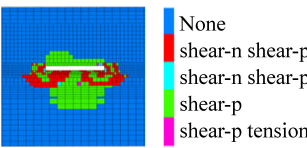
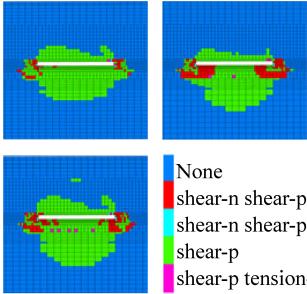
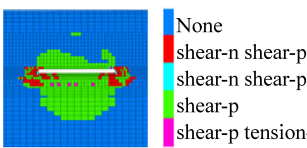
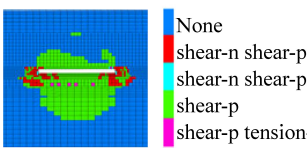
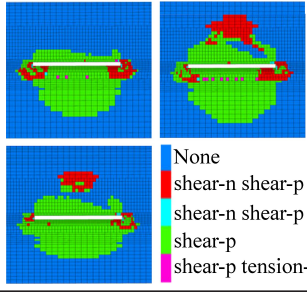
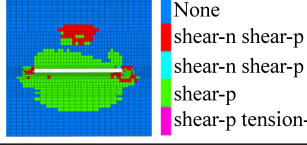
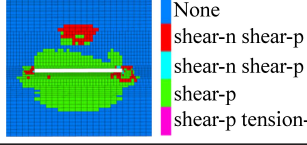
达 19.5 m;随工作面继续推进,围岩塑性范围发生持续扩张,工作面中上部煤体塑性区深度稳定在 8~9 m,下部煤体塑性区深度稳定在 7 m,而顶板岩层塑性区高度发生持续扩张,底板塑性区深度先增大,后趋于稳定。当工作面推进距离达 50~60 m 时,塑性区高度扩展贯通基本顶,基本顶发生初次破断,此时,工作面前方煤体破坏深度约为 8 m,底板破坏深度达 21.5~25.5 m。沿工作面倾向,与工作面中下部相比,工作面上部基本顶破断较为滞后,表明在基

本顶初次破断时,工作面呈现非对称来压特征;受煤层倾角和煤岩体自重影响,工作面中部煤体塑

性区扩张深度较大,为煤壁片帮的重点防控制区域。

表 2 围岩塑性区分布形态

Table 2 Distribution of plastic zone in surrounding rock

工作面推进距离/m	围岩塑性区分布形态	描述与分析
30		工作面上部:围岩塑性区主要集中在煤层底板,底板最大破坏深度为 19.5 m;煤体主要发生剪切破坏,煤壁塑性区深度为 6~7 m;顶板塑性区最大扩展高度为 5.5 m
		工作面中部:底板最大破坏深度为 19.5 m;煤壁塑性区深度为 7~8 m;顶板塑性区最大扩展高度为 7.5 m
		工作面下部:底板最大破坏深度为 19.5 m;煤壁塑性区深度为 7 m;顶板塑性区最大扩展高度为 7.5 m
45		工作面上部:底板最大破坏深度为 19.5 m;煤壁塑性区深度为 7~8 m;顶板塑性区最大扩展高度为 7.5 m
		工作面中部:底板最大破坏深度为 21.5 m;煤壁塑性区深度为 8 m;顶板塑性区最大扩展高度为 11.5 m,基本顶顶部的中央出现部分塑性破坏
		工作面下部:底板最大破坏深度为 21.5 m;煤壁塑性区深度为 7 m;顶板塑性区最大扩展高度为 7.5 m
60		工作面上部:底板最大破坏深度为 21.5 m;煤壁塑性区深度为 8~9 m;顶板塑性区最大扩展高度为 7.5 m
		工作面中部:底板最大破坏深度为 25.5 m;煤壁塑性区深度为 8~9 m;顶板塑性区最大扩展高度为 27.5 m
		工作面下部:底板最大破坏深度为 21.5 m;煤壁塑性区深度为 7~8 m;顶板塑性区最大扩展高度为 27.5 m

利用 FLAC^{3D}内嵌的 Fish 语言自编程序,提取出煤岩体中的塑性单元,获得基本顶初次破断时采动岩体塑性区三维形态,如图 3 所示。结合表 2、图 3 分析可知,由于厚硬细砂岩强度高、整体性好,基本顶难以及时破断,而厚硬顶板的大面积暴露易引起采空区瓦斯积聚,工作面前方煤岩体内应力集聚,加剧煤岩体的损伤破坏,进而增大煤壁片帮概率,且厚硬顶板破断时会冲击回采空间,推垮、压垮支架,易

细砂岩基本顶

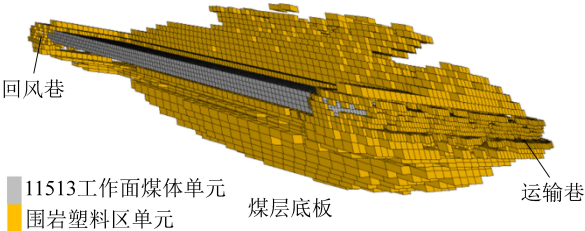


图 3 基本顶初次破断围岩塑性区三维形态

Fig.3 Three-dimensional morphology of plastic zone of surrounding rock at the initial rupture of main roof

诱发冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害,造成采煤系统的瘫痪^[15]。

2.2 采场围岩位移特征

由采场附近围岩位移云图(图 4)可知,在邻近工作面区域煤岩体位移表现出煤壁挤出位移>底板鼓起位移>顶板下沉位移的特点;且随着工作面推进距离的增大,煤壁向自由空间挤出位移量逐渐增大,说明煤体越易发生片帮失稳。由现场观测可知(图 1),当煤壁发生片帮时,支架上方破碎直接顶将沿片帮形成的自由空间发生漏冒,小块破碎直接顶直接冒落到回采工作面,大块破碎直接顶卡在冒落通道中,导致支架护帮板无法对煤壁施加有效护帮力,将进一步加剧工作面片帮和冒顶的发生与发展;其次破碎直接顶漏冒后,将造成局部支架空载,支架稳定性降低,受煤层倾角和冒落滑移岩块沿倾向的摩擦滑移与冲击作用,支架易沿倾向发生倒斜、挤咬^[12],造成局部区域“支架-围岩”系统的紊乱。

在煤壁邻空侧由于煤层开挖卸荷作用,煤层底板发生塑性区的萌生与扩张(表2),底板鼓起位移量增大(图4),说明煤层底板向回采空间发生鼓胀、变形,在三维空间内煤层底板破坏形态沿倾向呈“勺”状分布(图3)。当局部“支架-围岩”系统发生

紊乱时,导致支架空载无法对底板形成有效增载作用,此时,煤层底板发生鼓胀、断裂的可能性增大,受自重和煤层倾角的影响破碎底板将沿岩层层面向产生发生错动和滑移^[16],进而引发工作面“支架-围岩”系统大范围灾变的发生。

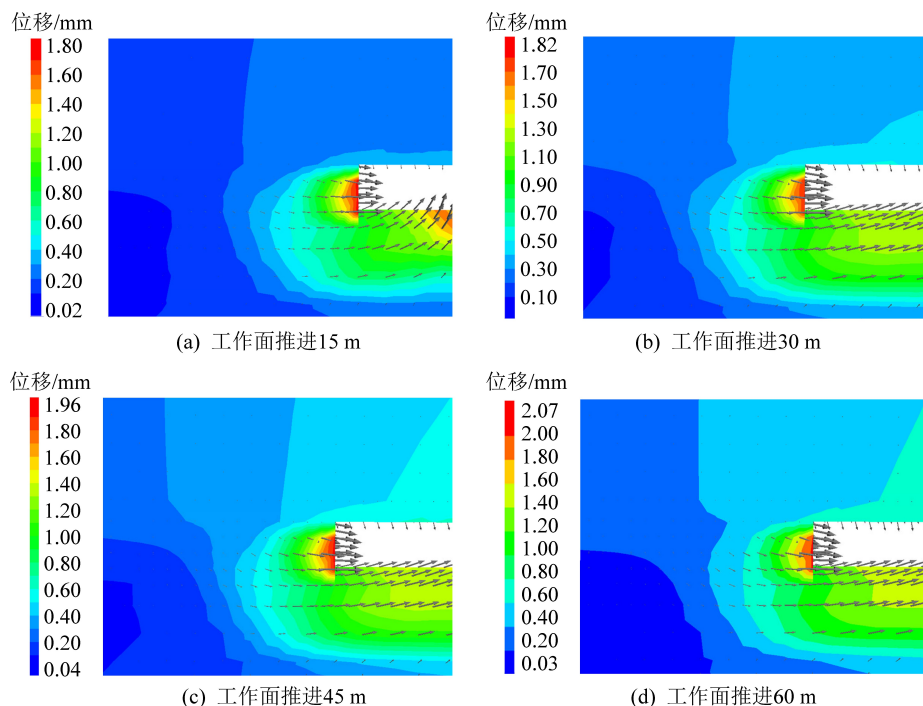


图4 围岩位移

Fig.4 Displacement of surrounding rock

3 厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制

根据上述分析构建厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制,如图5所示。厚硬顶板的存在导致工作面前方煤岩体的应力环被“恶化”,加剧工作面前方煤体发生超前损伤,破坏了煤体的整体性,提高了煤壁发生片帮失稳的概率;煤壁片帮后破碎直接顶沿片帮通道发生漏冒,造成局部支架空载,引发局部支架失稳和底板增载失效,导致煤层底板发生鼓胀、断裂、滑移等问题,进而引起支架的大范围失稳,诱发工作面发生大面积煤壁片帮和冒顶;其次支架失稳

后,巨厚砂岩顶板失去控制,存在基本顶大面积垮落推倒、压垮支架的可能,工作面安全作业上处于危险状态。因此,厚硬顶板下大倾角软煤开采存在2种灾害模式,一是以“片帮-冒顶”为主导,诱发“支架-围岩”系统发生大范围失稳的动态互馈性质的时发性灾害,二是厚硬顶板破断引发冲击动力事故的瞬发性灾害。

4 厚硬顶板下大倾角软煤开采灾害防控技术

11513工作面在停产6个月后重开切眼,结合上述分析,在已有研究基础上^[10,12],为防治厚硬顶

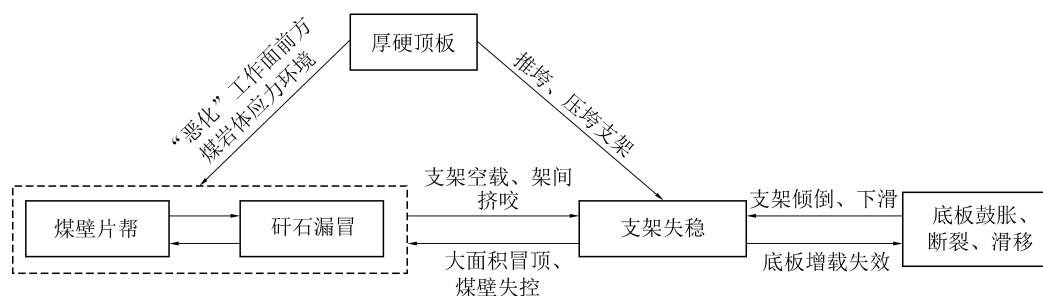


图5 厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制

Fig.5 Catastrophic mechanism of large-dip soft coal mining under thick and hard roof

板条件下大倾角软煤开采“煤壁片帮-顶板漏冒-支架失稳-底板鼓胀滑移”的灾害以及强矿压的危害,实现厚硬顶板条件下大倾角软煤的安全高效开采,现场开展了厚硬顶板深孔预裂爆破初次放顶技术、“片帮-冒顶”防治措施、支架防倒防滑等安全回采措施。

4.1 厚硬顶板深孔预裂爆破

为防止强矿压动力灾害的孕育与发生,采用超前深孔预爆破技术,对完整性较好的厚硬细砂岩基本顶开展初次放顶试验。在爆炸冲击波和应力波作用下,炮孔周围的岩体沿径向发生着不同程度的破坏,岩体结构和物理力学特性被“劣化”^[17],实现对厚硬细砂岩顶板运动的控制,有效改善工作面前方煤体的应力环境^[18]。

根据 11513 工作面开采设计方案,结合现场工程地质条件,确定 11513 工作面厚硬顶板初次放顶爆破方案,如图 6 所示。在运输巷道和回风巷道超前开切眼 10~15 m 处,选用 ZLJ-350 型钻机,各布置一组爆破孔,每组爆破孔包括 3 个炮孔,设计相邻炮孔走向间距为 2.5 m。为确保爆破网路安全起爆,爆破孔内采用连续耦合装药,双雷管孔外并联连接的方式进行引爆,水泥作为封堵材料,风动封孔机封堵炮孔,此外,运输巷道和回风巷道采用串联的联线方式,一次装药一次起爆,钻孔水平转角为 84°,各炮孔参数见表 3。

表 3 炮孔参数
Table 3 Hole parameters

钻孔编号	钻孔倾角/(°)	钻孔长度/m	装药长度/m	装药量/kg	封堵长度/m
T ₁ -1	0	40	30	90	10
T ₁ -2	-7	50	40	120	10
T ₁ -3	-15	75	65	195	10
T ₁ -4	49	58	43	129	15
T ₁ -5	61	40	30	49	10
T ₁ -6	80	26	16	48	10

4.2 “片帮-冒顶”防治措施

11513 工作面开采初期沿倾向在工作面中部煤壁和回风巷帮部施工钻孔(图 7),向破碎区煤体和顶板注入化学浆(久米纳),浆液在破碎煤岩体裂隙间流动凝结后,提高结构弱面的黏聚力和内摩擦角,进而提高工作面前方破碎区煤体的整体性,改善煤壁的自稳性和承载能力。

液压支架主要作用是与煤壁共同支撑顶板,抵抗来压,在工作面回采过程中,受采动应力和支架的反复支撑作用,直接顶破碎程度较高,破碎顶板在工

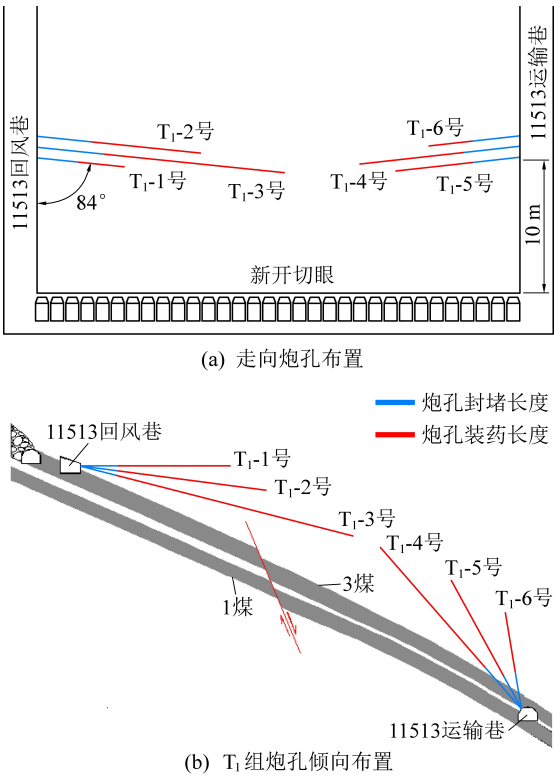


图 6 11513 工作面基本顶预裂爆破方案
Fig.6 Main roof pre-splitting blasting scheme of No.11513 working face

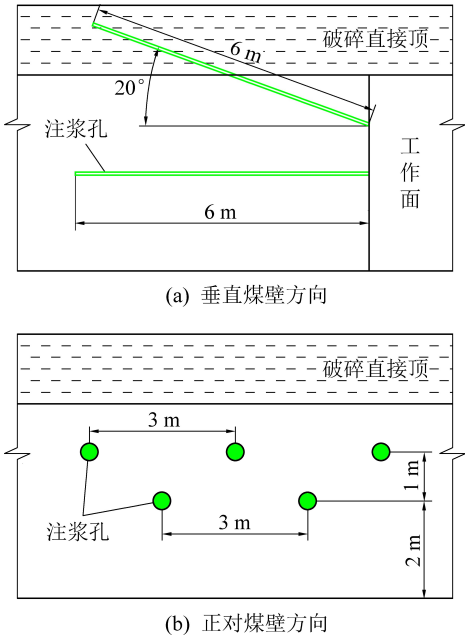


图 7 煤壁注浆方案

Fig.7 Coal wall grouting scheme

作面割煤、移架期间易发生漏冒,导致支架空载,液压支架倾倒滑移的概率倍增。现场采用“铺设双层金属顶网+工字钢”辅助液压支架管理破碎顶板(图 8),形成煤壁和支架耦合承载系统,其次在工作面移架、推溜时,自下而上应做到少降快拉及时支护煤壁和破碎顶板。



图8 “金属网+工字钢”管理破碎顶板

Fig.8 Broken roof management based on “metal mesh+I-steel”

4.3 支架稳定性控制措施

由厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制可知,保证支架的正常工作姿态,防止支架发生滑移和倾倒,做到及时调架扶架,对工作面的正常循环作业尤为重要。针对11513工作面地质构造复杂、断层节理较为发育、富含煤层异常区的特殊地质条件,制定支架防倒防滑,维系支架稳定工作姿态的措施(图9)如下:

1)回采期间严格控制采高,遇到复杂地质构造带,提前降低采高,提高支架稳定性。

2)为实现支架姿态的实时调控,防止支架发生倾倒,在支架顶梁处安设放倒千斤顶和侧推弹簧,两侧侧护板处按设侧推千斤顶。

3)为提高支架整体性,防止支架滑移,每三架支架安设1套斜拉防滑千斤顶与工作面输送机连接,在支架底座前后安设调架千斤顶,端头支架的后端安设防滑千斤顶和防滑链。

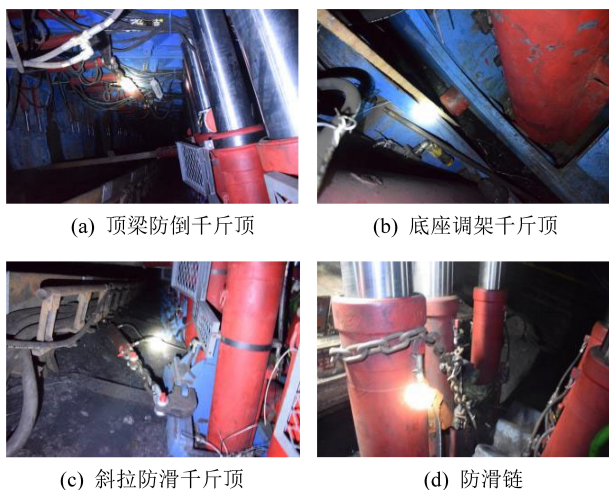


图9 支架防倒防滑措施

Fig.9 Anti-slip and anti-fall measures of supports

5 防控效果分析

为分析防控措施的效果,对11513工作面支架

工作阻力和煤壁片帮情况进行统计分析。当11513工作面推进到35~45 m时,工作面发生初次破断,比数值模拟得到的50~60 m,提前了15 m左右(图10)。在11513工作面初次来压期间,支架平均阻力在7445.6~8041.7 kN,为支架额定工作阻力的80.9%~87.4%(ZZ9200/24/50支撑掩护式液压支架,初撑力为7758 kN,额定工作阻力为7758 kN);非来压期间支架平均阻力在5536.8~6211.7 kN,为支架额定工作阻力的60.2%~67.5%,支架工阻富裕较大,且初次来压期间支架安全阀开启较少,表明厚硬顶板得到有效控制。

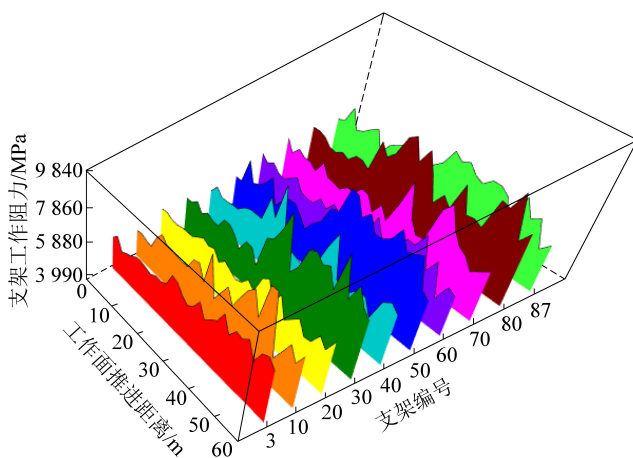


图10 支架工作阻力

Fig.10 Working resistance of supports

在11513采取防控措施前,工作面推进到30~45 m时,煤壁中上部发生大面积片帮且工作面上部煤壁片帮频次和片帮深度较大(图11)。

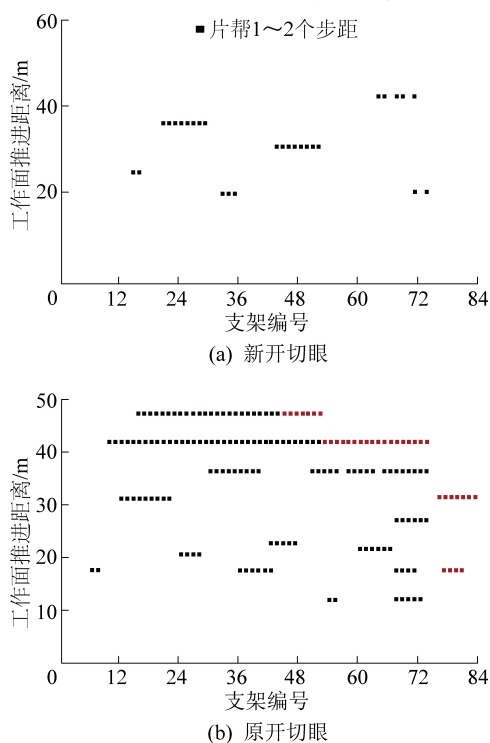


图11 11513工作面煤壁片帮统计

Fig.11 Rib spalling statistics of No.11513 working face

当工作面新开切眼,采取防控措施后,在化学浆的胶结作用和煤壁、支架耦合系统的承载防护作用下,煤壁片帮得到了有效遏制,煤壁完整性较好;工作面初次来压时,煤壁中下部出现小范围片帮。根据现场观测,支架倾向歪斜角在为 $-6^{\circ}\sim 7^{\circ}$,未有倾倒和大范围滑移现象发生,说明煤壁防治和支架稳定性控制效果较好。

6 结 论

1)厚硬顶板下大倾角软煤开采初期,围岩塑性区主要集中在煤壁前方煤体和煤层底板岩石;沿工作面倾向,工作面中部煤体塑性区扩展深度较大,为煤壁片帮的重点防控制区域;当局部支架稳态工作被打破,导致支架对底板增载失效,对顶板失去控制,继而引起底板的鼓胀、滑移和大块砂岩泥岩互层结构的冲击失稳。

2)厚硬顶板下大倾角软煤开采存在着“煤壁片帮-顶板漏冒-支架失稳-底板鼓胀滑移”的时发性灾害和强矿压瞬发性灾害的威胁,各致灾和诱灾因素间相互诱导,动态互馈,易引发工作面支架-围岩系统的大面积灾变。

3)根据厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制,结合11513工作面工程地质和开采条件,开展了厚硬顶板深孔预裂爆破初次放顶试验、煤壁注浆加固、支架防倒防滑以及铺金属网加工字钢辅助支架管理破碎直接顶等防控措施。通过对11513工作面支架工作阻力和煤壁片帮统计分析,采取系列防控措施后,厚硬基本顶初次来压步距减少了约15 m,煤壁片帮得到有效控制,实现了厚硬顶板下大倾角软煤支架-围岩系统的稳态工作和安全高效开采。

参考文献 (References):

[1] 伍永平, 俞东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展、实践、科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 24-34.
WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, *et al.* Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 24-34.

[2] 伍永平, 俞东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[3] 杨 科, 孔祥勇, 陆 伟, 等. 近距离采空区下大倾角厚煤层开采矿压显现规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4278-4285.
YANG Ke, KONG Xiangyong, LU Wei, *et al.* Study of strata pressure behaviors with longwall mining in large inclination and thick coal seam under closed distance mined gob[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4278-4285.

[4] 罗生虎, 伍永平, 刘孔智, 等. 大倾角煤层长壁开采空间应力拱壳形态研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2993-2998.
LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, *et al.* Study on the shape of the space stress arch shell in steeply dipping coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2993-2998.

[5] 杨 科, 陆 伟, 潘桂如, 等. 复杂条件大倾角大采高旋转综采矿压显现规律及其控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 199-205.
YANG Ke, LU Wei, PAN Guiru, *et al.* Investigation into strata behaviours and ground control of high height rotary longwall mining in large inclined angle coal seam under complicated geological conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 199-205.

[6] 解盘石, 伍永平, 罗生虎, 等. 大倾角大采高采场倾向梯阶结构演化及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 953-959.
XIE Panshi, WU Yongping, LUO Shenghu, *et al.* Structural evolution of ladder roof and its stability analyses for a fully-mechanized working face with a large mining height in steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 953-959.

[7] 王红伟, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层开采“关键域”岩体结构稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 287-294.
WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, *et al.* Analysis of rock structure stability in mining at the critical zone of the steeply dipping seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 287-294.

[8] 王红伟, 伍永平, 焦建强, 等. 大倾角煤层大采高工作面倾向对煤壁片帮的影响机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 728-735, 752.
WANG Hongwei, WU Yongping, JIAO Jianqiang, *et al.* Study on effect of dip angle on coal wall spalling of working face with great mining height in steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 728-735, 752.

[9] 伍永平, 郎 丁, 解盘石. 大倾角软煤综放工作面煤壁片帮机理及致灾机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1878-1884.
WU Yongping, LANG Ding, XIE Panshi. Mechanism of disaster due to rib spalling at fully-mechanized top coal caving face in soft steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1878-1884.

[10] 杨 科, 刘 帅, 唐春安, 等. 多关键层跨煤组远程被保护层煤壁片帮机理及防治[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2611-2621.
YANG Ke, LIU Shuai, TANG Chun'an, *et al.* Mechanism and prevention of coal seam rib spalling in remote protected layer across coal group[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2611-2621.

[11] 罗生虎, 伍永平, 刘孔智, 等. 大倾角大采高综采工作面煤壁非对称受载失稳特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1829-1836.
LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, *et al.* Asymmetric load and instability characteristics of coal wall at large mining height fully-mechanized face in steeply dipping seam[J]. Journal

- of China Coal Society, 2018, 43(7):1829-1836.
- [12] 杨科,池小楼,刘帅.大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制[J].煤炭学报,2018,43(7):1821-1828.
YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Shuai. Instability mechanism and control of hydraulic support in fully mechanized longwall mining with large dip. [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1821-1828.
- [13] 罗生虎,伍永平,解盘石,等.大倾角煤层走向长壁开采支架稳定性力学分析[J].煤炭学报,2019,44(9):2664-2672.
LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, *et al.* Mechanical analysis of support stability in longwall mining of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9):2664-2672.
- [14] 罗生虎,伍永平,解盘石,等.大倾角大采高综采工作面支架受载与失稳特征分析[J].煤炭学报,2018,43(12):3320-3328.
LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, *et al.* Load and instability characteristics of support in large mining height fully-mechanized face in steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12):3320-3328.
- [15] 黄炳香,赵兴龙,陈树亮,等.坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2954-2970.
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, CHEN Shuliang, *et al.* Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12):2954-2970.
- [16] 罗生虎,伍永平,王红伟,等.大倾角煤层长壁开采底板非对称破坏形态与滑移特征[J].煤炭学报,2018,43(8):2155-2161.
LUO Shenghu, WU Yongping, WANG Hongwei, *et al.* Asymmetric failure pattern and slip characteristics of floor of longwall face in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8):2155-2161.
- [17] 谢瑞峰.深井高应力围岩松动爆破机理研究[D].淮南:安徽理工大学,2010.
- [18] 刘啸.基于深孔预裂爆破的厚硬顶板控制实践[J].工矿自动化,2019,45(12):1-6,11.
LIU Xiao. Control practice of thick and hard roof base on deep hole pre-splitting blasting[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12):1-6,11.
- [19] 王家臣.极软厚煤层煤壁片帮与防治机理[J].煤炭学报,2007,32(8):785-788.
WANG Jiachen. Mechanism of the rib spalling and the controlling in the very soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8):785-788.