



移动扫码阅读

王家臣,杨胜利,刘淑琴,等.急倾斜煤层开采技术现状与流态化开采构想[J].煤炭科学技术,2022,50(1):48-59.

WANG Jiachen, YANG Shengli, LIU Shuqin, *et al.* Technology status and fluidized mining conception for steeply inclined coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 48-59.

急倾斜煤层开采技术现状与流态化开采构想

王家臣^{1,2}, 杨胜利^{1,2}, 刘淑琴³, 刘金昌³, 张锦旺^{1,2}

(1.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;2.放顶煤开采煤炭行业工程研究中心,北京 100083;

3.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

摘要:急倾斜煤层开采难度大,迫切需要研发新的安全、高效、绿色开采方法。总结分析了目前急倾斜厚煤层开采常用的水平分段综放、走向长壁综采和走向长壁综放 3 种技术现状,指出水平分段综放技术还需要在采放工艺、合理分段高度、顶煤冒放性与端头放煤、智能开采等几个方面进行深入研究,以进一步提高顶煤采出率和开采效率;走向长壁综采技术还需继续研究工作面布置、设备的防倒防滑与开采工艺等问题;走向长壁综放技术需要科学合理地利用放煤规律并制定合理的采放工艺,以提高工作面支架稳定性和顶煤采出率。根据急倾斜煤层的赋存特点,提出了现代煤炭地下气化开采技术、新式水力采煤技术 2 种流态化开采技术构想。以创造有效气流运动、理想反应强度及最高能量利用效率为思想,提出了针对急倾斜煤层的 2 种气化炉型:单气化面线性开采气化炉和双气化面 U 型地下气化炉,总结了急倾斜煤层气化开采仍需深入研究的关键技术,包括气化过程的控制与强化、气化反应空间管理、气化工作面探测技术、地下水污染防治与控制。针对煤层厚度较大但不能进行水平分段开采的急倾斜煤层,尝试水力开采并提出了该种条件下水力机械化开采的巷道布置构想;在厚度较小的急倾斜煤层中,探索类似于煤炭地下气化的流态化开采技术以实现不掘进巷道和井下无人的远程水力采煤,是未来难采急倾斜煤层流态化开采的重要研究方向。

关键词:急倾斜煤层;智能开采;流态化开采;地下气化开采;水力采煤

中图分类号:TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)01-0048-12

Technology status and fluidized mining conception for steeply inclined coal seams

WANG Jiachen^{1,2}, YANG Shengli^{1,2}, LIU Shuqin³, LIU Jinchang³, ZHANG Jinwang^{1,2}

(1.School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2.Coal Industry Engineering Research Center of Top-coal Caving Mining, Beijing 100083, China;

3.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The steeply inclined coal seams are difficult to mine and it is urgent to develop new, safe, efficient and green mining methods. The current status of three technologies commonly used for steeply inclined coal seam mining, horizontal sublevel top-coal caving, strike longwall fully mechanized mining and strike longwall fully mechanized top-coal caving technology, were summarized and analyzed. For horizontal sublevel top-coal caving technology, in-depth research on mining and drawing technology, reasonable sublevel height, top-coal cavability, top-coal drawing at face end, and intelligent mining are need to be carried out for further improving the top-coal recovery and mining efficiency. For the fully mechanized longwall mining technology, it is necessary to continue to study the working face layout, anti-sliding and anti-skid of equipment, and mining technology. For the longwall fully mechanized top-coal caving technology, it is necessary to use the top-coal drawing law scientifically and formulate reasonable mining and drawing technology to improve the stability of the shield supports and top-coal recovery. According to the occurrence characteristics of steeply inclined coal seams, two fluidized mining technology concepts, modern underground gasification mining and new hydraulic coal mining, were proposed. With the idea of creating effective airflow, ideal reaction intensity

收稿日期:2021-06-12;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51934008);河北省自然科学基金重点资助项目(E2020402041)

作者简介:王家臣(1964—),男,黑龙江方正人,教授,博士生导师,博士。Tel:010-62339066, E-mail: wangjiachen@vip.sina.com

and highest energy utilization efficiency, two types of gasifiers for steep coal seams are proposed: linear mining gasifier with single gasification face and U-type underground gasifier with double gasification faces. It is concluded that the gasification of steeply inclined coal seams still requires in-depth research on key technologies such as gasification process control and enhancement, gasification reaction space management, gasification face detection technology, groundwater pollution prevention and control. For steeply inclined thick coal seams that cannot be mined with horizontal sublevel top-coal caving technology, hydraulic mining can be tried and a roadway layout concept for hydraulic mechanized mining under this condition was proposed; for steeply inclined coal seams with a small thickness, fluidized mining technology like underground coal gasification can be explored to realize unmanned remote underground hydraulic mining without driving roadways, which is an important research direction for fluidized mining of difficult-to-mine steeply inclined coal seams in the future.

Key words: steeply inclined coal seam; intelligent mining; fluidized mining; gasification mining; hydraulic coal mining

0 引 言

急倾斜煤层是开采难度最大的煤层,尽管其储量只占全国煤炭储量的 5% 左右,但是急倾斜煤层的煤种通常都是焦煤等稀缺煤种^[1-2],因此研究急倾斜煤层安全高效绿色开采具有重要意义。传统的急倾斜煤层开采方法比较落后,机械化程度低、安全性差。常用的方法有倒台阶法、伪倾斜柔性金属掩护支架采煤法、水平分层采煤法和仓储采煤法等^[3]。倒台阶采煤法实质上是在急倾斜煤层中布置一个走向长壁工作面,而将本应保持直线的工作面分成多段小工作面,且下部小工作面超前上部小工作面,整个工作面行成折线形的倒台阶状。该方法主要用于薄煤层开采,难以实现机械化,效率低、安全性差,目前几乎不再使用。伪倾斜柔性金属掩护支架采煤法适用于煤层厚度 1.8~4.0 m 的倾角较大的急倾斜煤层。这种方法一般将急倾斜煤层在竖直方向上分为 15~40 m 斜长的区段,每个区段沿煤层走向分别布置区段回风平巷(上部)和区段运输平巷(下部),通常在区段运输平巷上方 3~5 m 掘进超前运输巷,在超前运输巷与区段回风平巷之间伪倾斜布置工作面。虽然这种方法的安全性较好,但是劳动强度大、作业条件差,难以实现机械化,目前仍有极少数矿井在使用。水平分层采煤法主要用于煤层厚度较大的急倾斜煤层,将急倾斜厚煤层自上而下划分若干个高 2~3 m 的水平(倾斜)分层,自上而下逐层开采。目前该方法不再使用,已经被水平分段(层)放顶煤开采方法所取代。仓储采煤法是在区段范围内沿走向以一定宽度划分若干个仓房,每个仓房内有一个沿走向布置的仰斜推进工作面,采落的煤暂时储存在工作面下面的采空区内,临时支撑顶底板,待这个仓房采完后再把储存的煤全部放出,这一方法通常用于煤层厚度小于 3 m 的急倾斜煤层,目前这一方法已经不再使用。

除了水平分层采煤方法外,其他方法的共同缺点是难以实现机械化、效率低、安全性差、作业条件不

好、劳动强度大,因此研发新的急倾斜煤层安全、高效、绿色开采方法十分迫切。根据煤层厚度和倾角不同,目前开采急倾斜厚煤层常用 3 种技术是水平分段综放开采、走向长壁综采和走向长壁综放开采。

1 水平分段综放开采技术

水平分段综放开采是指将急倾斜厚煤层自上而下分为若干个水平采煤分段(图 1),在每个分段内进行综放开采。工作面两巷布置在分段下部靠近顶底板的煤层内。分段高度 H 一般为 20~40 m,工作面机采高度 h 一般为 2.5~4.0 m。这一开采方法通常适用于煤层厚度 B 大于 20~25 m、倾角大于 50° 的条件^[4]。该方法的优点是工作面可以水平布置,作业条件好,工作面产量较大。缺点是工作面短,长度通常是煤层的水平厚度 L 。当煤体坚硬、裂隙不发育时,由于工作面短,顶煤厚度大,且顶板或上阶段冒落矸石压力小,顶煤的冒放性较差,会有成拱现象,工作面两端的顶煤放出率较低,由此导致工作面的整体采出率较低。

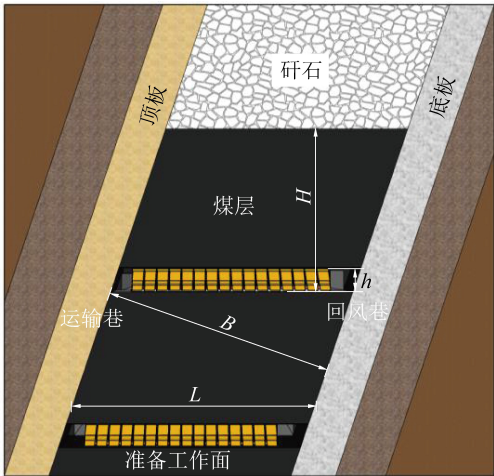


图 1 水平分段放顶煤开采技术示意
Fig.1 Schematic of sublevel top-coal caving technology
我国在 20 世纪 80 年代中期就开始了水平分段放顶煤试验与应用^[5],如甘肃窑街矿务局、吉林辽

源矿区局、新疆乌鲁木齐矿务局、内蒙古平庄矿务局、包头矿务局、开滦矿务局等都进行了水平分段综采放顶煤的研究与应用,取得了成功。目前应用较好的是国能集团新疆公司的乌东矿。乌东矿开采的煤层平均厚度 48.8 m,煤层倾角 88°,煤层普氏系数 2.5。水平分段高度 22 m,其中割煤高度 3.5 m,为了提高顶煤冒放性,在顶煤中采用了超前注水弱化顶煤技术^[6],工作面年产可以达到 300 万 t 以上。为了进一步提高顶煤采出率和开采效率,水平分段放顶煤开采还需要进一步研究如下 4 个问题。

1.1 采放工艺

由于水平分段放顶煤开采的工作面长度小、顶煤厚,采放工艺及参数对其顶煤采出率的影响要比对走向长壁放顶煤开采的影响更大,因此通过合理的采放工艺来提高顶煤采出率就更加重要。以内蒙古阿刀亥煤矿急倾斜煤层水平分段工作面煤层为例,该煤层厚度 23~39 m,平均厚度 25 m;煤层倾角 76°~84°,平均 80°。基于该工程背景进行不同放煤顺序时残余顶煤数量的数值和物理模拟试验的结果如图 2 所示,可以看出自底板向顶板顺序放煤,采空区残留的顶煤更少,顶煤采出率可达 92.85%,而自顶板向底板顺序放煤的顶煤采出率为 87.31%(物理模拟)^[7],因此对于水平分段放顶煤采用自底板向顶板的放煤顺序是科学合理的。

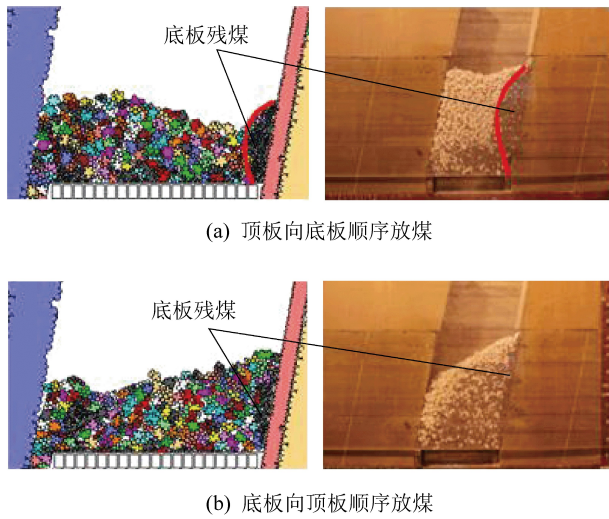


图 2 不同放煤顺序的残余顶煤对比^[7]
Fig.2 Comparison of residual top-coal under different drawing directions^[7]

放煤轮数也是采放工艺中的重要参数。图 3 为单轮放煤与多轮放煤的采空区残煤情况对比,多轮放煤的顶煤采出率会高于单轮放煤,如图 4 所示。

此外,由于水平分段放顶煤开采顶煤厚度一般比较大,放煤步距的合理选取对顶煤采出率有较大影

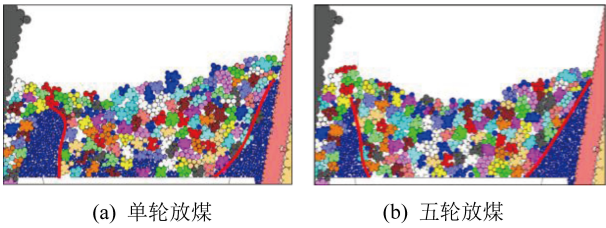


图 3 单轮与多轮放煤的采空区残煤对比
Fig.3 Comparison of residual coal of single-round and multi-rounds drawing techniques

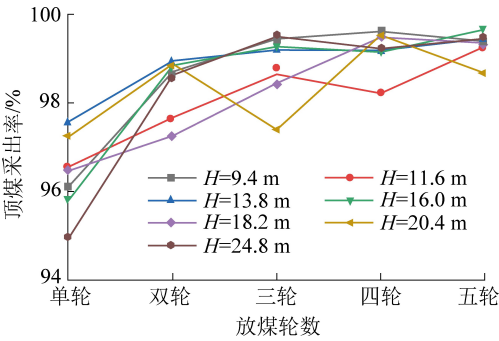


图 4 不同段高和放煤轮次对工作面中部顶煤采出率的影响
Fig.4 Effect of drawing rounds and sublevel height on recovery rate of top-coal in middle of working face

响,图 5 是分段高度在 20~40 m,不同放煤步距时顶煤采出率与分段高度的关系曲线,模拟的基本条件是采高 3 m,采煤机截深 0.8 m。可以看出当采用小步距(1 刀 1 放)时,顶煤采出率最大值对应的分段高度为 25 m;当采用大步距(3 刀 1 放)时,顶煤采出率最大值对应的分段高度为 35 m;采用中等步距(2 刀 1 放)时,顶煤采出率随着分段高度的增大基本呈现出先增大后减小的趋势(分段高度在 20~40 m)。

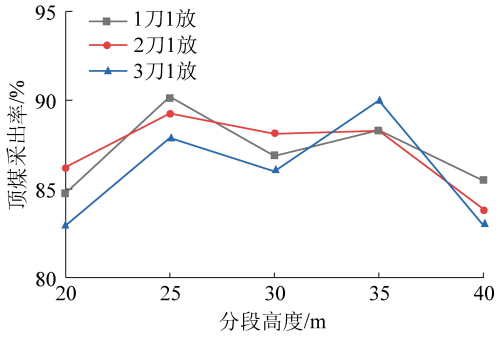


图 5 不同放煤步距时顶煤采出率与分段高度的关系曲线
Fig.5 Relations between top-coal recovery and sublevel height under different drawing intervals

1.2 分段高度

工作面常见的参数有分段高度 H 、机采高度 h 和工作面长度 L 。机采高度 h 一般以工作面作业条件舒适和投资经济为主要考虑因素,条件允许时尽可能增大工作面机采高度。工作面长度一般是煤层

的水平厚度,个别工作面可适当抬高工作面底板巷道作为回风巷,有利于瓦斯排放,工作面的长度会有所增加,但总体来讲,机采高度和工作面长度的调整余地不大,可调整的参数主要为分段高度 H 。煤矿安全规程规定急倾斜厚煤层水平分段放顶煤的采放比不能大于 $1:8^{[8]}$,这一规定又限制了分段高度,即分段高度 $H\leq 9h$ 。

分段高度过大会影响顶煤的冒放性和采出率,分段高度过小会影响开采效益和增加巷道掘进量,事实上分段高度是急倾斜厚煤层水平分段放顶煤开采的重要参数。图 6 是不同分段高度时顶煤采出率的数值模拟结果^[7],模拟的基本条件是机采高度为 2.2 m,采用单轮放煤方式。可以看出,当分段高度为 16 m 时,顶煤的采出率较高,过大和过小的分段高度顶煤采出率都会有所降低,尤其是当分段高度过大时,顶煤采出率下降较快。

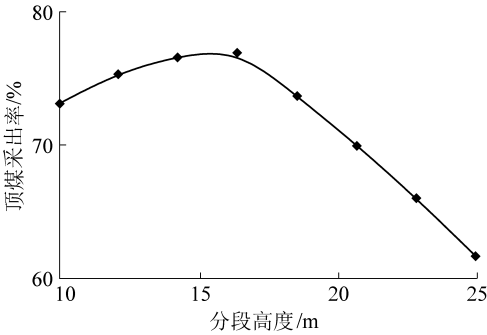


图 6 不同分段高度顶煤采出率模拟结果(单轮放煤)^[7]

Fig.6 Simulation results of top-coal recovery at different sublevel heights (single-round drawing) ^[7]

采用不同的放煤工艺,合理的分段高度也会有所变化。图 7 为多轮放煤时不同分段高度条件下顶煤采出率的数值模拟结果,模拟的基本条件是机采高度为 3 m,采用自底板向顶板顺序放煤方式。可以看出,采用多轮放煤时,合理分段高度会有所增加,可达 27 m,如图 7 所示。

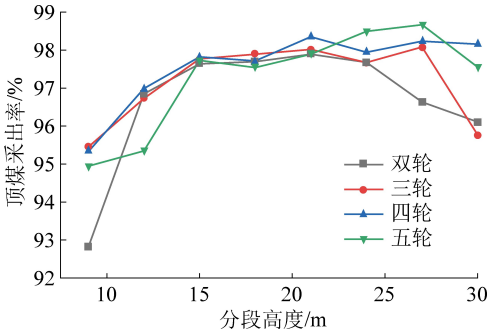


图 7 不同分段高度顶煤采出率模拟结果(多轮放煤)

Fig.7 Simulation results of top-coal recovery at different sublevel heights (multiple-round drawing)

1.3 顶煤冒放性与端头放煤

提高放顶煤工作面端头顶煤采出率一直是一个难题,尽管一些工作面的过渡支架设计有放煤功能,但是真正实现过渡支架,甚至端头支架放煤的难度很大。这一方面是由于支架与刮板输送机的设备配套带来的难题,另一方面也与工作面两端的顶煤冒放性差、不易放出有关。由于水平分段放顶煤工作面的长度小,提高其端头顶煤采出率的意义更大,因此研发水平分段放顶煤工作面的端头放煤技术更为迫切。如图 2 和图 3 所示,无论单轮还是多轮放煤,遗留在采空区的残煤主要是集中在工作面两端和巷道上方,数值模拟时是 2 个巷道内侧各有一架没有放煤,实际的放顶煤工作面由于设备配套等原因,两端不放煤的支架要多于 2 个。此外,水平分段放顶煤开采方法对煤层厚度的适应性较差,当煤层厚度发生变化时,在工作面端头处存在加架减架问题。

提高工作面端头顶煤的冒放性是实现端头放煤的前提条件,在工作面巷道或者掘进专用巷道对顶煤进行水力压裂是提高端头顶煤冒放性的有效措施之一,如图 8 所示。设计专用的工作面过渡支架和端头支架,并与刮板机或者转载机合理配套是真正实现端头放煤的保障。

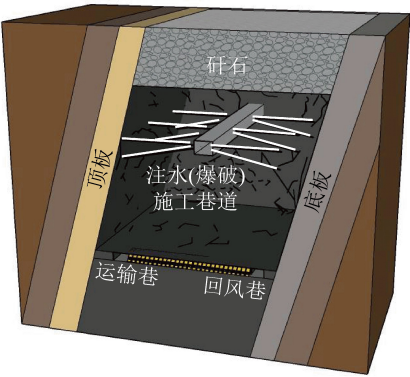


图 8 爆破+注水提高顶煤冒放性

Fig.8 Improving top-coal cavability by blasting and water injection

1.4 智能开采

水平分段放顶煤开采的工作面短、推进速度快、作业条件好,易于实现智能化开采,也有利于提高开采效率。进行智能开采时,割底煤不必进行煤岩识别,采煤机可采用记忆割煤,这可以避开目前智能开采中采煤机煤岩识别精度不高、可靠性不够的难题。但是由于工作面短,采煤机在工作面两端需要反复斜切进刀、割三角煤,以及大量放出顶煤,因此在进行智能开采时,主要是研发端部快速进刀智能控制和智能放煤技术。目前端部智能进刀技术基本可以满足生产需要,但是在可靠性、精度控制、设备之间

防碰撞、人员接近预警技术等方面还有很大提升空间。

由于顶煤厚度大,提高放煤效率和顶煤采出率是重要工艺内容。采用自煤层底板向顶板多口多轮放煤,以便保持煤岩分界面均匀下沉,减少顶煤放出体与煤岩分界面的接触次数,是提高放煤效率和采出率、降低含矸率的有效放煤工艺^[7]。通过自主研发的第 3 代顶煤跟踪仪可以精确地记录不同层位的顶煤采出率和放出时间,以此作为确定多轮放煤参数的依据^[9],如图 9 所示。在放煤即将结束之前采用图像识别的智能放煤技术,可以实现放煤的精准智能控制^[10]。

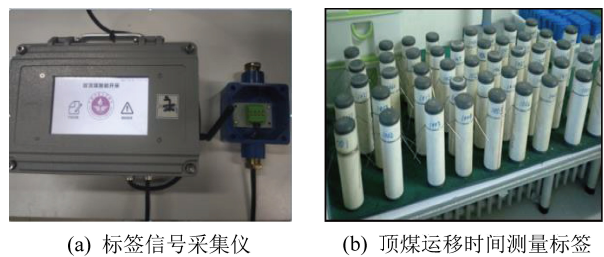


图 9 第三代顶煤跟踪仪

Fig.9 The third-generation top-coal tracker

2 走向长壁综采技术

对于煤层厚度小于 5 m、煤层倾角小于 65°的急倾斜煤层,可以采用走向长壁综采技术,目前已有一些成功案例,如四川广能集团绿水洞煤矿^[11]、李子垭煤矿、黑龙江双鸭山东保卫煤矿等,目前该类煤层开采的主要问题是设备防倒防滑和工作面产量较低,尚需继续研究以下几个问题。

2.1 工作面布置

对于煤层倾角较大的急倾斜煤层,采用走向长壁开采时,首先是设法减小工作面倾角和避免支架等设备下滑与倾倒,通过工作面合理布置可以起到重要作用。

2.1.1 伪仰斜布置

工作面运输巷超前工作面回风巷一定距离,工作面形成一定的伪斜角度(3°~10°),支架垂直工作面煤壁排列,与区段平巷保持一个伪斜角。推移刮板输送机、拉架时可始终保持向工作面上端的方向运动,以此来阻止或者平衡支架和刮板输送机的下滑(图 10a)。工作面这种布置方式简单,可起到一定作用。主要问题是伪斜角度的合理确定需要在实践中摸索^[12],支架容易向下摆尾,刮板输送机容易上窜或下窜,煤壁易片帮。

2.1.2 伪俯斜布置

如图 10b 所示,工作面回风巷超前运输巷布置,

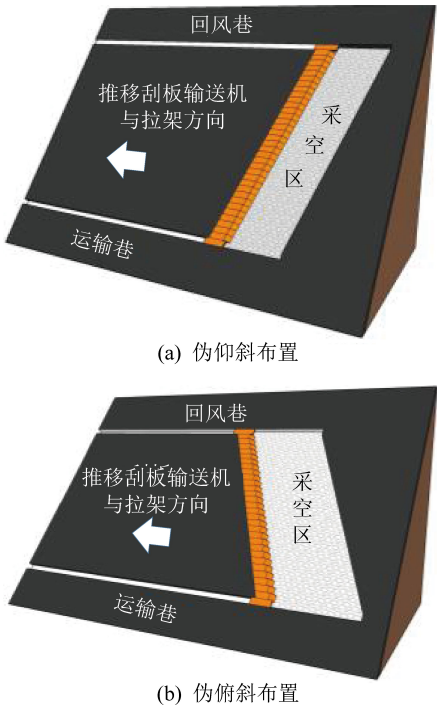


图 10 走向长壁综采工作面布置

Fig.10 Face layout of fully-mechanized longwall mining along strike direction

超前量为工作面真倾斜长度的 25%~30%。支架平行于区段平巷布置。为了避免架前漏冒,支架前梁采用三角形设计,确保支架前端与煤壁平行,起到封闭顶板作用。完成一轮割煤后,自下往上顺序拉移支架,其中排头架推移杆保持微小的向上角度(2°~3°),最后通过电液控制技术整体推移刮板输送机^[13]。这一布置有利于防治煤壁片帮和架前漏冒,可避免刮板机的上下窜,以及支架摆尾,四川广能集团采用这种布置方式。

2.1.3 双俯斜布置

为了减小工作面角度,可将工作面按照图 11 所示进行双向倾斜布置^[14],工作面巷道适当倾斜,工作面也布置成伪俯斜,工作面形成了俯采+伪俯斜的布置方式。该布置方式中工作面倾角 β 、巷道倾角 δ 与煤层倾角 α 和工作面伪斜角 ω 的关系为

$$\sin \beta = \sin \alpha \cos \omega \tag{1}$$

$$\sin \delta = \sin \alpha \sin \gamma \tag{2}$$

式中: γ 为巷道与煤层走向的夹角; ω 为工作面与煤层倾向的夹角(即工作面伪斜角),当巷道与工作面保持垂直布置时, $\gamma = \omega$ 。

工作面双俯斜布置的优点是可以减缓工作面倾角,有利于设备防倒防滑,缺点是要求在采区布置时就要考虑工作面的布置,二者要协调一致。工作面俯采过程中对采煤机滑靴、润滑和推移刮板输送机等要有相应的技术措施。

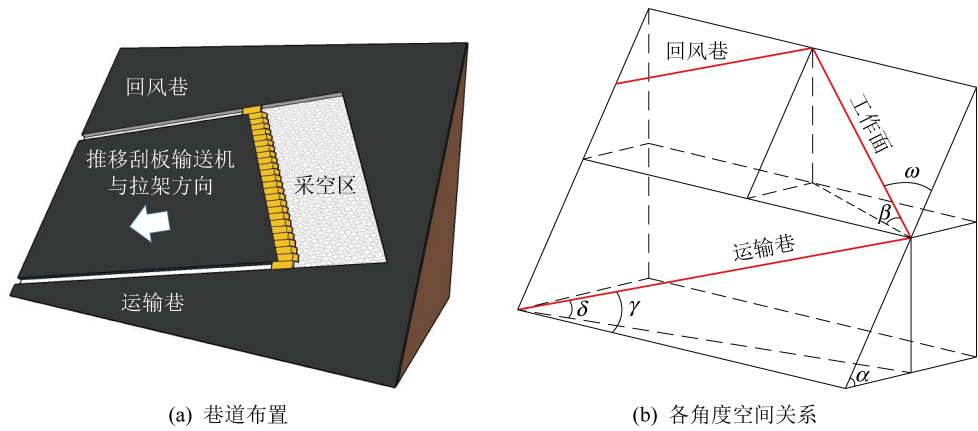


图 11 双俯斜布置示意
Fig.11 Schematic diagram of double-downward layout

2.2 设备的防倒防滑与开采工艺

当工作面倾角较大时,支架等设备的防倒防滑尤其重要,除了设计合理的工作阻力,尽可能降低支架重心外,常用的方法是在支架顶梁、底座均安装有防倒防滑千斤顶,底座设计有调底梁。在工作面下部的端头支架和过渡支架之间,形成相互连接的组架。支架设计中另一个关键部件就是支架的侧护板。设计具有大阻力、可自动闭锁的全长宽侧护板是防止支架倒架、咬架的有效途径。顶梁要尽可能对顶板全封闭,具有较大的前端支撑力,这有利于支架稳定,也可有效防止顶板漏冒与片帮。支架与刮板输送机要相互锚固,尽可能减小支架推移千斤顶两侧间隙,可防止刮板输送机下滑。

合理的开采工艺和工作面严格的科学化管理有利于提高工作面产量和效率,控制工作面采高,保持工作面平直,稳固好工作面下端支架,自下向上移架,尽可能整体推移刮板输送机。

大倾角工作面防止矸石滚动与冲击伤人是一项重要工作,常用的方法是在工作面内设置多个高度随液压支架的顶梁高度升降而变化的组合结构挡矸板(帘)^[13]。工作面采煤机运行采用遥控技术,或者自动割煤技术,尽可能减少工作面作业人员。

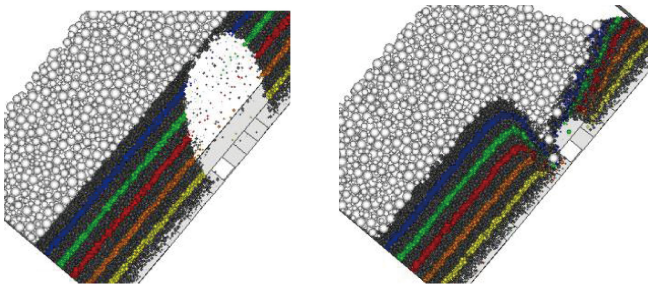
3 走向长壁综放技术

当煤层厚度介于 5~20 m,煤层倾角小于 60° 时,可采用走向长壁放顶煤开采。其所遇到的难题除了走向长壁综采所遇到的难题外,放煤工序还会影响支架的稳定性,需要制定更加科学的采放工艺。巷道布置上可以采用错层位布置^[15],有利于工作面下部设备稳定。此外也可采用伪俯斜、双俯斜等方式布置工作面,尽可能减小工作面实际角度。支架除具有综采支架的防倒防滑功能以外,还需要考虑

放煤时对支架尾部稳定的不利影响,避免支架摆尾问题,以及后部刮板输送机的下滑问题。采放工艺实施上要充分考虑放煤过程中顶煤的大范围流动和放出对顶板的扰动,对支架等设备稳定的不利影响。

3.1 放煤规律

对于急倾斜走向长壁综放开采,研究工作面方向的放煤规律更加重要。科学合理地利用放煤规律有利于提高顶煤采出率和支架稳定性。工作面自上而下分段,段内自下而上放煤是一种有效的放煤方式^[16-17]。工作面上段内最下一个支架放煤时,放出体发育完全,会放出该分段内的大部分顶煤(约占该分段顶煤总量的 80%),段内其余支架仅起到补充放煤作用,如图 12 所示。下一分段放煤时要使顶煤放出体边界与上分段放煤后的煤岩分界面尽可能多地重合(图 13),有利于提高顶煤采出率。



(a) 第1支架顶煤放出体 (b) 第2支架顶煤放出体与放煤前煤岩分界面
图 12 第 1 分段放煤^[16]

Fig.12 Drawing process of first segment^[16]

3.2 采放工艺

采放工艺确定对于急倾斜厚煤层走向长壁放顶煤开采极其重要,合理的采放工艺有利于工作面支架与设备稳定和提高采出率。工作面下部放煤时,会引起上部支架顶煤向下流动,减小上部支架与顶煤及顶板的作用力,减弱支架的稳定性。因此基于

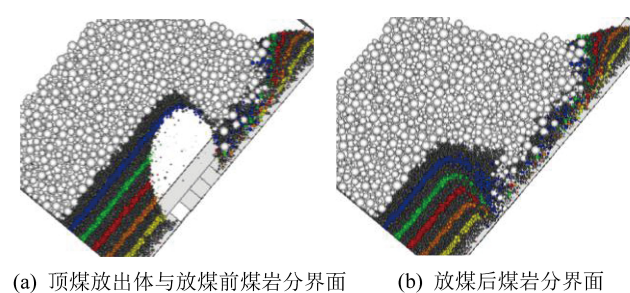


图 13 第 2 分段放煤^[16]

Fig.13 Drawing process of second segment^[16]

急倾斜厚煤层的顶煤运动与放出规律,开发了急倾斜厚煤层走向长壁综放开采的“下行动态分段、段内上行放煤”的采放工艺,如图 14 所示,即采煤机自上而下割煤;自上而下将工作面分成 5 到 10 架不等的分段,在每个分段内自下而上放煤,自下而上推移支架;自下而上整体推移前刮板输送机 and 拉移后刮板输送机,取得了良好的开采效果^[16-17]。

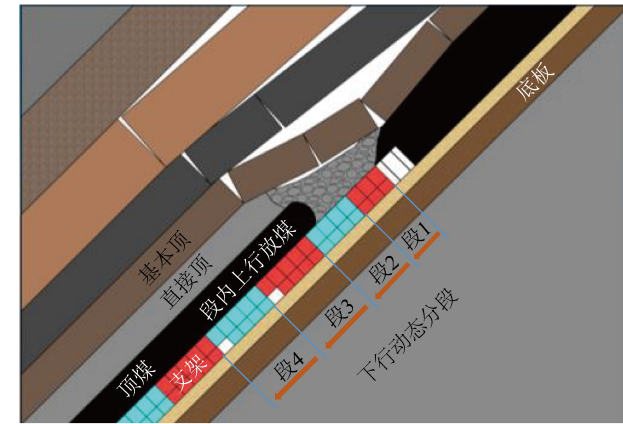


图 14 “下行动态分段、段内上行放煤”采放工艺^[16]

Fig.14 Method of drawing downward segment by segment while drawing upward in each segment^[16]

4 急倾斜煤层的气化开采

除水平分段放顶煤开采外,其他方法开采急倾斜煤层的作业条件差,效率低,而适用于水平分段放顶煤开采的急倾斜煤层又极其有限,因此研发急倾斜煤层的安全高效开采方法势在必行,其中原位气化开采是具有发展潜力的方法之一。

4.1 急倾斜煤层气化开采的可行性

煤炭的原位气化(或煤炭地下气化)开采是将地面煤气化概念应用于地下煤层的一种气化方法,其集建井、开采和转化于一体,利用化学方法将赋存于地下的煤炭直接转化为气态含能组分后输送到地表^[18-20],是一种基于化学反应的煤炭原位绿色开采方法。具体地讲,是将煤与含氧气化剂进行有控制

的氧化还原反应,将煤转化为一氧化碳、氢气和甲烷等可燃气体。原位气化开采能够实现煤炭地下无人开采,从根本上避免矿难事故的发生。此外,气化开采后的灰渣留在地下空腔,避免了传统煤炭开采运输造成的地面粉尘污染,消除了地面矸石堆放带来的环境影响。

急倾斜煤层地下气化,随着煤的消耗,新鲜煤在自重和干馏煤气突出压力的作用下落入气化区,形成具有较大孔隙率的渗滤反应通道;垮落的煤与气化剂逆向接触反应,形成类填充床反应条件,有利于气化反应的连续性和稳定性;气化反应后的灰渣落在最底层,只有反应区域的上层有物质流动,气固相分离较为清晰。此外,急倾斜煤层气化由于气固反应条件良好,可以采用低压气化,在显著降低运行成本的同时,减少了气体在地层中的逸散。

煤炭地下气化技术经过一百多年的理论研究和实践探索,其技术可行性已经被验证^[21-22]。前苏联和美国在上世纪均进行了不同程度的急倾斜煤层气化开采工程实践,发现急倾斜煤层更容易实现理想的气化过程^[18-19]。国内最早的急倾斜煤层气化试验是于 20 世纪 80 年代初在徐州马庄矿进行的^[23],主要实施了急倾斜煤层短距离钻孔的火力贯通试验,气化煤层平均厚度为 1.15 m,倾角 65°。之后中国矿业大学(北京)研究团队于 1996—1998 年,在河北唐山刘庄矿进行了急倾斜煤层矿井式气化工艺的半工业性试验,提出了“长通道、大断面、两阶段”煤炭地下气化新工艺^[24-25]。气化煤层厚度 6 m,倾角 68°,在点火初期获得的煤气组分及热值较为理想,主要用作工业燃气,但由于气化过程控制手段缺乏,后期运行效果不理想。

21 世纪以来,随着煤层长距离定向钻井技术及可移动注气装备的开发,煤炭原位气化控制方法显著提升,工业化炉型日臻完善,现代煤炭地下气化开采技术逐渐形成。现代煤炭地下开采技术与传统地下气化开采技术的区别在于,传统煤炭地下气化技术缺乏控制手段,而现代煤炭地下气化技术具有先进气化炉结构及操控装备^[18-19]。现代煤炭地下开采技术首先在近水平煤层中进行试验与示范,取得了良好的试验效果^[26-27]。在此形势下,急倾斜煤层的现代化规模气化开采也急待实践。

4.2 急倾斜煤层气化开采关键技术

煤层原位气化的核心是选择正确的进气和排气系统,根据煤层条件、煤层地质条件选择合理的气化工作面及推进方式,创造有效的气流运动和反应强度,实现最大的能量利用效率。

4.2.1 气化炉的构建

制定并构建合理的气化炉结构系统是煤层气化的首要任务。依据现代煤炭地下气化技术路线,本文提出针对急倾斜煤层的两种气化炉型。第 1 种为单气化面线性开采气化炉,如图 15 所示。第 2 种为双气化面 U 型地下气化炉,如图 16 所示。

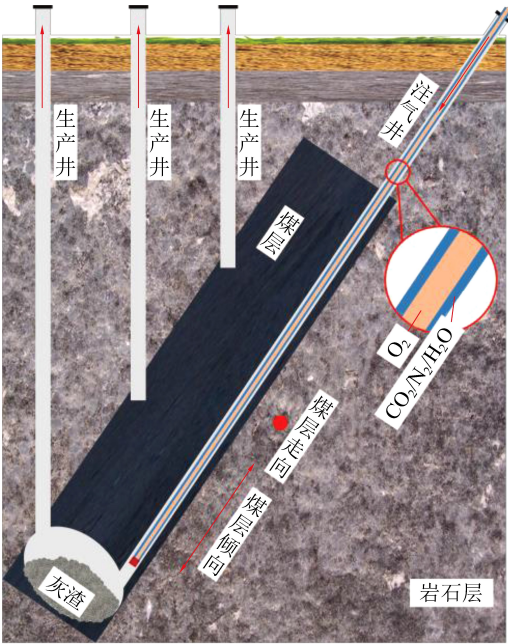


图 15 单气化面线性开采气化炉

Fig.15 Linear mining gasifier with single gasification face

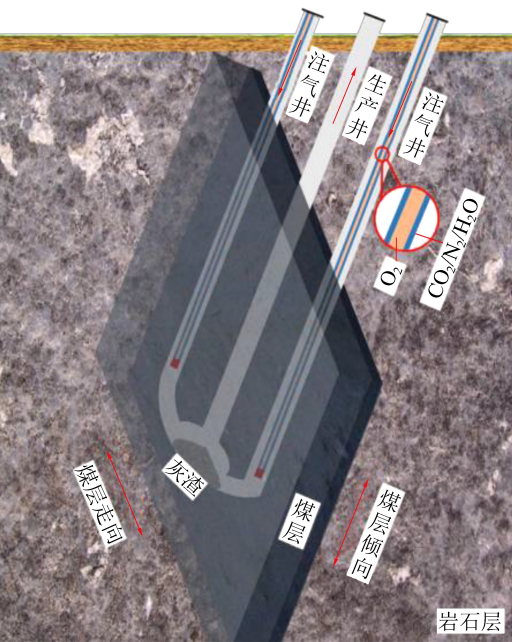


图 16 双气化面 U 型地下气化炉

Fig.16 U-type underground gasifier with double gasification faces

线性开采气化炉由注气井和生产井构成,注气井为一条长距离直斜井,生产井由一系列垂直钻孔构成,沿煤层倾斜布置。将注气井与最低水平的生

产井对接并连通。在生产井底部煤层点火,之后注入含氧化剂将注气井两侧的煤进行气化开采,实现气化开采面沿煤层倾斜方向自下而上推进开采。所有备用生产井可以同时用作监测井,采用直接测量和间接测量的方法,获取气化面的信息。线性开采气化炉主要沿注气井方向对煤层进行开采,类似倾斜长壁采煤法。开采长度依据煤层倾斜长度及煤层水文地质条件确定,长度可达 500 m 及以上。该气化炉建炉成本低,有望用于近距离煤层群的开采。

双气化面 U 型地下气化炉,注气井为两条长距离直斜井,生产井为一条长距离直斜井。注气井和生产井在末端对接。将煤层在对接井附近引燃后,通过注气点后退实现煤层反向燃烧,通过主动控制煤层的气化开采层位,将注气井和产气井之间的煤炭进行气化开采,气化开采面沿煤层倾斜自下而上移动。该炉型双气化开采面宽度可达 60 m,有望支持规模化气化开采。

4.2.2 气化过程的控制与强化

煤层高效气化的关键是在煤层中建立理想的高温温度场条件,并能精确控制气体的注入与煤气流的排出,使得含氧化剂与煤的表面进行足够时间的强烈接触与反应。向煤层中注入气化剂,气流的运动及火焰工作面的移动将引起一系列的复杂现象,氧化带、还原带、干馏干燥带的长度及其加热情况也都在时刻变化着,同时要受到燃空区状态变化和煤层顶板垮落的影响,使得煤层气化的技术管理与控制变得复杂。

氧气的精准注入和合适的注氧量,是控制煤层气化反应温度和反应条件的核心操作参数。在现代煤炭地下气化方法中,采用移动控制装备可以在目标煤层内实现氧气的精准可控注入,并根据气化面的扩展动态调整注入参数,维持产品气的品质与产量。此外,注入水蒸汽或水,可以控制气化炉内的水煤气反应,提高煤气中 H_2 和 CO 的含量。提高气化压力,可以增加气化强度,同时控制煤层气化区的干燥程度,调节地下气化工作面的涌水量,但气化压力的调节受限于煤层静水压的限制。

4.2.3 气化反应空间管理

在 U 形气化生产盘区,随着气化过程进行,火焰工作面沿煤层倾斜向上推进,气化空间只留下残余的灰分及熔渣,这时会有部分氧气或空气沿空腔留向排气钻孔附近引起煤气燃烧,在降低煤气发热量的同时,提高了煤气出口的温度。与此同时,产生的燃空区范围不断扩大,煤层顶板在热作用下发生移动并冒落,适当的冒落会使垮落的岩石充填燃空

区,压实松散的灰分,促使氧气与煤体保持接触。不稳定的顶板岩石层冒落(如泥岩)能够在短时间内恢复气化过程并进行有效地气化。而当顶板岩层裂隙充分发育时,气化反应空间增大,会破坏气化工作面的密闭性,造成气体的漏失以及在围岩中的热损,大面积的垮落会发生局部通道堵塞。如果产生导水裂隙带,导通邻近含水层,会造成气化炉涌水,对气化炉温度及煤气组成造成影响,甚至中断气化过程。

控制煤层顶板垮落是煤层气化开采的一项关键技术。需要研究高温气化条件下煤岩受热破碎特征,岩层在气化区高温作用下的力学性质变化,建立气化煤层顶板岩层运移模型,获得煤炭地下气化过程气化区顶板垮落规律,形成气化区顶板管理技术,保障煤炭地下气化的连续稳定运行。

4.2.4 气化工作面探测技术

气化工作面探测可以为工艺控制和气化炉布置提供决策依据。三维地震、微地震、井间电阻等物探方法,可以用于气化工作面的四维综合探测,形成气化工作面多维度探测方法。以探测数据为基础可以对气化腔进行综合解译及形态重构,从而为煤层气化过程的有效管理与调控提供科学依据。

4.2.5 地下水污染防治与控制

污染控制与防治是煤炭地下气化全流程的保障技术。由于煤的化学转化过程在地下进行,而该过程不可避免地要产生有机及无机污染物,包括苯、酚、多环芳烃、重金属等。如果这些污染物通过热作用下形成的裂隙通道迁移并扩散至邻近含水层,将会对地下水造成污染和破坏。煤炭地下气化对地下水的污染风险,一方面取决于污染物从反应区向含水层迁移的通道赋存与发育程度,如高温作用下围岩裂隙发育的变化和导通性、围岩的渗透性、气化盘区的水文地质条件和地质构造等,另一方面,则取决于污染物的析出特性、污染物和围岩的物理化学反应以及污染物在煤层及围岩裂隙中的迁移扩散特性。中国矿业大学(北京)研究团队跟踪现场试验全流程,在查明污染物的产生与迁移规律基础上,针对污染源及污染途径,初步建立了贯穿于气化全流程(包括选址、建炉、运行、闭炉)的地下水污染防治技术流程,形成了地下水污染预测方法。将污染源控制及消除在源头,保障煤炭地下气化的环境友好与可持续发展。当急倾斜煤层气化炉跨越的含水层较多时,如何保障气化炉的密闭性,控制污染物的逸散是地下水污染防治与控制的难点。

5 急倾斜煤层水力机械化采煤法

5.1 水力采煤常用方式

对于不能进行水平分段开采的急倾斜煤层,除了原位气化开采以外,也可以尝试水力开采。水力采煤是利用水力来完成采煤、运输、提升等生产环节的全部或者部分工作的开采技术,该技术是 19 世纪 30 年代由前苏联创立的。水力采煤的特点是利用高压水射流直接破碎煤体,并借助水力介质来完成运输、分级、提升等工序的水力机械化开采工艺。

水力采煤技术自 1956 年引入我国并在萍乡高坑和开滦林西矿首次试验成功以来,先后经历了探索与初步发展阶段(1956—1978 年)、正轨化与缓慢发展阶段(1979—2004 年)、快速发展与逐步萎缩阶段(2005—2016 年)^[28]。水力采煤技术的逐步萎缩主要与我国煤矿机械制造水平和开采技术进步有很大关系,但是该技术在急倾斜煤层、复杂难采煤层开采中仍然是可以进行探索和实践的,只是需要在开采的自动化、智能化方面进行升级改造,发挥该方法的技术优势。

急倾斜煤层水力采煤的核心是巷道布置,形成既满足水力切割落煤,又可以实现水力运输和提升,并且能够确保安全开采的系统。经过几十年的发展,我国已经形成了多种水力采煤巷道布置形式。图 17 和图 18 分别是急倾斜煤层水力采煤工作面巷道布置的 2 种方式,其中图 17 是边界上山回风巷道布置方式,图 18 是 3 个工作面呈正台阶布置,共用阶段上部回风巷的布置方式。新疆苏杭河煤矿井在煤层倾角平均 61°、厚 1.5~2.5 m、顶底板较稳定的煤层中,采用边界上山回风巷道布置形式,实现单枪年产 30~60 万 t/a^[29]。

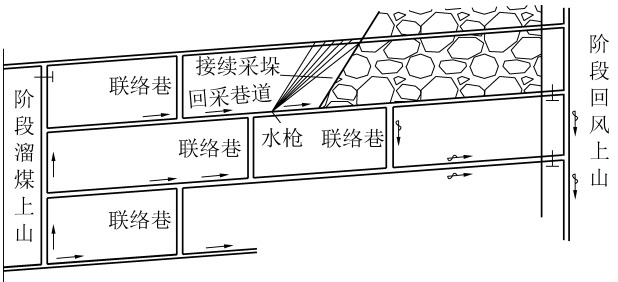


图 17 边界上山回风巷道布置示意^[29]
Fig.17 Layout schematic diagram of boundary raise as return air roadway^[29]

5.2 新式水力采煤方法构想

目前,厚度较小的急倾斜煤层仍然可以采用上

述方法进行回采,然而未来急倾斜煤层水力开采的方向应该是机械化、自动化,甚至智能化,就是通过布置更合理的开采系统,研发远程可控或智能的高压落煤水枪,然后辅助可移动的支护装置、安全设施、监控监测手段等,实现安全高效的开采。

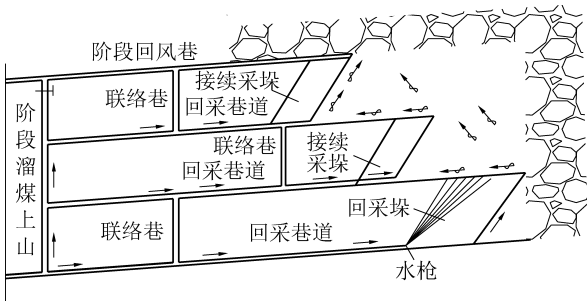


图 18 正台阶巷道布置示意^[29]

Fig.18 Schematic of positive-step roadway layout^[29]

设计的一种急倾斜厚煤层水力开采巷道布置如图 19 所示,可以适应煤层厚度较大,但又不能进行水平分段开采的煤层,或者适用于厚度变化较大的煤层。该方法将急倾斜煤层按照不同标高倾斜划分

成段,分段底面与水平面夹角 $15^{\circ} \sim 18^{\circ}$,每个分段高度 $15 \sim 20 \text{ m}$,确保高压水枪设备范围内可以有效落煤。在每个分段底板或者煤层中开挖回采巷道,回采巷道内布置高压水枪和巷道移动支护装备,采用后退式高压水枪落煤。回采起伏巷道标高的高点在两个溜煤眼中部,斜巷留设 2 个方向 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 的坡度,确保煤泥水流顺利流进溜煤眼,2 个溜煤眼相距 $50 \sim 80 \text{ m}$ 。溜煤眼与回采起伏巷道相连,岩石斜巷与煤层底板运输大巷相连。经水力破碎煤泥水混合体经回采巷道、溜煤眼、底板岩石斜巷流进水煤仓和煤泥脱水装置,然后将脱水后的煤泥经过运输大巷、斜井或者立井提升至地表。分离的水经过净化以后重新作为高压水枪的介质进行水力落煤。随着煤体采出,矸石冒落并沿着煤层底板向下移动对采空区进行充填。本分段采完后回采下一分段,或者可以错开一定距离多分段同时开采。这种巷道布置可以实现急倾斜厚煤层的水力开采,具有系统装备简单、易于操作、机动灵活、生产连续性好和对地质条件的适应能力强等特点,在急倾斜难采煤层中具有推广应用价值。

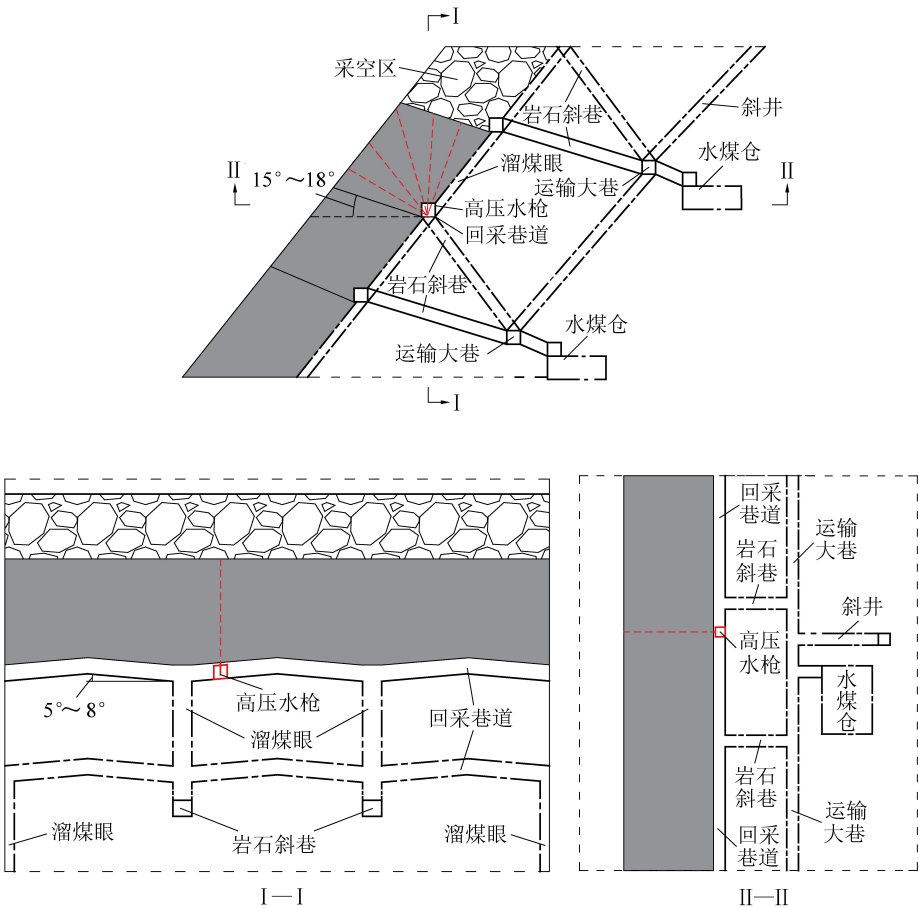


图 19 急倾斜厚煤层水力开采巷道布置示意

Fig.19 Schematic of roadway layout for hydraulic mining in steeply inclined thick coal seams

在厚度较小的急倾斜煤层中,可以探索类似于煤炭地下气化的流态化开采技术,通过地面大孔径定向钻和远程遥控高压水落煤装置,实现不掘进巷道和井下无人的远程水力采煤技术,是未来难采急倾斜煤层流态化开采的重要研究方向^[30]。

6 结 论

1)急倾斜煤层开采难度大,经过多年的科技攻关,已经形成了水平分段综放开采、走向长壁综采和走向长壁综放3种开采技术,针对不同开采技术,除了水平分段综放开采以外,其他方法机械化、自动化开采难度大,效率低,安全性差。水平分段放顶煤开采还需要在采放工艺、合理分段高度、顶煤冒放性与端头放煤、智能开采等几个方面进行深入研究,以进一步提高顶煤采出率和开采效率。

2)急倾斜煤层气化可以创造良好的填充床气化反应条件,特别适合采用气化的方式进行原位开采。笔者以创造有效气流运动、理想反应强度及最高能量利用效率为思想,提出了急倾斜煤层现代气化开采技术构想。急倾斜煤层气化的关键技术包括气化过程的控制与强化、气化反应空间管理、气化工作面探测技术、地下水污染防治与控制等仍需深入研究。

3)针对煤层厚度较大但不能进行水平分段开采的急倾斜煤层,可尝试水力开采,作者提出了该条件下的新式水力机械化开采的巷道布置构想。在厚度较小的急倾斜煤层中,探索类似于煤炭地下气化的流态化开采技术以实现不掘进巷道和井下无人的远程水力采煤,是未来难采急倾斜煤层流态化开采的重要研究方向。

参考文献(References):

[1] 伍永平,刘孔智,负东风,等.大倾角煤层安全高效开采技术研究进展[J].煤炭学报,2014,39(8):1611-1618.
WU Yongping, LIU Kongzhi, YUN Dongfeng, *et al.* Research process on the safe and efficient mining technology of steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1611-1618.

[2] 李俊斌.淮南矿区急倾斜煤层开采技术[J].煤矿开采,2010,15(2):25-26,74.
LI Junbin. Technology of mining steeply inclined coal seam in Huainan Mining Area [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(2): 25-26, 74.

[3] 中国矿业学院等院校编.采煤学[M].北京:煤炭工业出版社,1979.

[4] 杜计平,孟宪锐.采矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2014.

[5] 樊运策.中国厚煤层采煤方法的一次革命[C]//综放开采30周年科技论文集.北京:煤炭工业出版社,2012:13-17.
FAN Yunce. A revolution in China's thick coal mining method [C]//Science and Technology Papers on the 30th Anniversary of Fully-mechanized Caving Mining. Beijing: Coal Industry Press, 2012:13-17.

[6] 胡国建,常博.急倾斜厚煤层水平分段注水弱化顶煤综放开采技术[J].煤炭科学技术,2017,45(S1):55-58.
HU Guojian, CHANG Bo. Technology of water injection for weakening top-coal with horizontal section in steeply thick coal seam fully mechanized top-coal caving face [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 55-58.

[7] 王家臣,张锦旺,王兆会.放顶煤开采基础理论与应用[M].北京:科学出版社,2018.

[8] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2016.

[9] 王家臣,黄国君,杨宝贵,等.顶煤放出规律跟踪仪及其测定顶煤放出规律的方法:中国,200910080005[P].2009-08-26.

[10] 王家臣,李良晖,杨胜利.不同照度下煤矸图像灰度及纹理特征提取的实验研究[J].煤炭学报,2018,43(11):3051-3061.
WANG Jiachen, LI Lianghui, YANG Shengli. Experimental study on the extraction of grayscale and texture features of coal gangue images under different illumination [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3051-3061.

[11] 曹树刚,张遵国,彭勇,等.急倾斜煤层走向长壁综采工艺技术[J].煤炭科学技术,2010,38(10):23-26.
CAO Shugang, ZHANG Zunguo, PENG Yong, *et al.* Technology of fully mechanized strike longwall mining in steep inclined seam [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 23-26.

[12] 负东风,伍永平.大倾角煤层综采工作面调伪仰斜原理与方法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001(2):152-155.
YUN Dongfeng, WU Yongping. Research into principle and method on readjusting high angle full mechanized coalface to false forward slant [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001(2): 152-155.

[13] 唐忠亮,黄凯,沉莹,等.50°~65°急倾斜松软煤层综合机械化开采新技术[C]//第十届全国采矿学术会议论文集.鄂尔多斯:采矿与井巷工程,2015:562-565.
TANG Zhongliang, HUANG Kai, SHEN Ying, *et al.* New technology for comprehensive mechanized mining of 50°~65° steeply inclined soft coal seams [C]//Proceedings of the 10th National Mining Academic Conference. Ordos: Mining and Roadway Engineering, 2015:562-565.

[14] 王家臣,杨胜利,唐岳松,等.急倾斜煤层采区伪俯斜布置的开采系统及开采方法:中国,202011602160.5[P].2021-03-12.

[15] 赵景礼.厚煤层全高开采新论[M].北京:煤炭工业出版社,2004.

[16] 王家臣,赵文兵,赵鹏飞.急倾斜极软厚煤层走向长壁综放开采技术研究[J].煤炭学报,2017,42(2):286-292.
WANG Jiachen, ZHAO Wenbing, ZHAO Pengfei, *et al.* Research on the longwall top-coal caving mining technique in extremely in-clined and soft thick coal seam [J]. Journal of China Coal So-

- ciety, 2017, 42(2): 286-292.
- [17] 王家臣, 杨胜利, 张锦旺. 一种急倾斜厚煤层走向长壁综放开采动态分段采放工艺: 中国, 201611222688.3[P]. 2019-02-19.
- [18] 刘淑琴, 师素珍, 冯国旭, 等. 煤炭地下气化地质选址原则与案例评价[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2531-2538.
- LIU Shuqin, SHI Suzhen, FENG Guoxu, *et al.* Geological site selection and evaluation for underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2531-2538.
- [19] 刘淑琴, 梅霞, 郭巍, 等. 煤炭地下气化理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 90-99.
- LIU Shuqin, MEI Xia, GUO Wei, *et al.* Progress of underground coal gasification theory and technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 90-99.
- [20] 葛世荣. 深部煤炭化学开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 679-691.
- GE Shirong. Chemical mining technology for deep coal resources[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 679-691.
- [21] 梁新星. 煤炭地下催化气化特性及工艺的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- LIANG Xinxing. Research on characteristics and technology of underground catalytic gasification of coal[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [22] 韩军, 方惠军, 喻岳钰, 等. 煤炭地下气化产业与技术发展的主要问题及对策[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(3): 50-59.
- HAN Jun, FANG Huijun, YU Yueyu, *et al.* Main problems and countermeasures of underground coal gasification industrial and technological development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(3): 50-59.
- [23] 梁杰, 余力, 秦志红. 急倾斜煤层无井式地下气化的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(1): 27-30.
- LIANG Jie, YU Li, QIN Zhihong. Research on underground gasification without shaft in steep seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(1): 27-30.
- [24] 杨兰和, 梁杰, 余力, 等. 徐州马庄煤矿煤炭地下气化试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 86-90.
- YANG Lanhe, LIANG Jie, YU Li, *et al.* The test study on underground coal gasification at Mazhuang Coal Mine in Xuzhou[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 86-90.
- [25] 杨兰和. 急倾斜煤层移动点两阶段地下气化模型试验[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(5): 72-75.
- YANG Lanhe. Two-stage underground gasification model test of moving points in steep coal seams[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2001, 31(5): 72-75.
- [26] 孔令峰, 朱兴珊, 展恩强, 等. 深层煤炭地下气化技术与中国天然气自给能力分析[J]. 国际石油经济, 2018, 26(6): 85-94.
- KONG Lingfeng, ZHU Xingshan, ZHAN Enqiang, *et al.* Suggestions on China's natural gas self-sufficiency by deep coal underground gasification technology[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(6): 85-94.
- [27] 孔令峰, 张军贤, 李华启, 等. 我国中深层煤炭地下气化商业化路径[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 156-165.
- KONG Lingfeng, ZHANG Junxian, LI Huaqi, *et al.* Commercialization path of medium deep underground coal gasification in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 156-165.
- [28] 梁金宝. 水力采煤六十年发展回顾与展望[J]. 水力采煤与管道运输, 2016(1): 1-5, 18.
- LIANG Jinbao. Review and prospect of the development of hydraulic coal mining in the past 60 years[J]. Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation, 2016(1): 1-5, 18.
- [29] 殷勤. 急倾斜煤层安全高效水力开采技术研究[J]. 水力采煤与管道运输, 2013(3): 1-4.
- YIN Qin. Study on safe and efficient hydraulic mining technology for steeply inclined coal seams[J]. Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation, 2013(3): 1-4.
- [30] 王家臣, 杨胜利, 唐岳松. 一种急倾斜煤层流态化开采的方法: 中国, 201810361930.8[P]. 2018-11-09.