

白二虎,郭文兵,谭毅,等.“条采留巷充填法”绿色协调开采技术[J].煤炭学报,2018,43(S1):21-27. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1277

BAI Erhu, GUO Wenbing, TAN Yi, et al. Green coordinated mining technology of strip mining roadway backfilling method[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 21-27. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1277

“条采留巷充填法”绿色协调开采技术

白二虎¹, 郭文兵^{1,2}, 谭毅^{1,2}, 杨达明¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要:为减轻高强度开采对我国西北地区地表及生态环境的破坏,结合条带开采与充填开采的优势,提出了一种“条采留巷充填法”部分充填的协调开采方法。采用理论分析与相似模拟相结合的研究方法,给出了条带开采的采留宽、沿空留巷的巷旁充填宽度和充填率的确定原则,分析了巷旁充填体提升条带煤柱稳定性的作用原理及置换煤柱开采的覆岩稳定性。以哈拉沟煤矿22407工作面地质条件为工程背景,确定了合理的工艺参数并进行了数值模拟研究。结果表明:在开采尺寸达到充分采动后,覆岩中的亚关键层4最大下沉量为12 mm,可推知地表基本不出现下沉,取得了良好的地表沉陷控制效果。该技术为降低充填成本,保护地表生态环境提供借鉴。

关键词:“条采留巷充填法”;条带煤柱;地表沉陷;生态环境

中图分类号:TD823.7 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)S1-0021-07

Green coordinated mining technology of strip mining roadway backfilling method

BAI Erhu¹, GUO Wenbing^{1,2}, TAN Yi^{1,2}, YANG Daming¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovative Center of Coal Safety Production in Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to reduce the damage of surface and ecological environment in Northwest China caused by high-intensity mining, a new coordinated mining method mixed with “strip mining roadway backfilling method” of partial mining was proposed according to the advantages of strip mining method and backfill mining method. The theoretical analysis and physical simulation method were used. Then the principle of determining the width left of strip mining, the filling width in gob-side entry retaining and the filling rate were given. Meanwhile, the mechanism of coal pillar stability improved by filling body and the overburden stability of backfill mining were also analyzed. The condition of 22407 work face in Halagou coal mine was taken as a model for the research, and the reasonable mining parameters were determined and the numerical simulation was carried out. The results demonstrated that the maximum subsidence of the No. 4 sub-key strata was 12 mm after the mining size reached critical extraction. It also inferred that there was no subsidence on the surface, which achieved a good control effect of surface subsidence. The technology provides a new mean to reduce the cost of backfilling and protect the ecological environment.

Key words: “strip mining roadway backfilling” method; strip pillars; surface subsidence; ecological environment

我国煤炭资源在地理上与经济发达程度和水资源均呈逆向分布,这种格局决定了我国北煤南调、西煤东运的发展形势。“十三五”规划对全国煤炭采取压缩东部、限制中部和东北部、优化西部的开发布局,

并明确指出需加强对西部矿区生态环境的保护。随着煤炭资源的战略西移,西部矿区高强度开采已成为常态化^[1]。而西北地区煤炭资源丰富且普遍赋存浅埋煤层,具有浅埋深、赋存稳定、煤质坚硬、冒放性差等特点,适宜进行高强度开采,并且 2017 年上半年,晋陕蒙产煤总量占全国总量的 67%。然而大规模高强度开采易造成顶板切落、突水溃沙、地表塌陷、地下水及环境破坏等灾害^[2-3],严重制约着西部经济的可持续发展。而“丝绸之路经济带”的提出,为煤炭企业“走出去”带来新机遇的同时,也引起了人们对西部矿山地质灾害的关注。因此,研究西部地区脆弱生态环境下绿色协调开采势在必行。

钱鸣高、缪协兴等提出了科学采矿思想及保护环境的重要指标^[4-5]。郭文兵基于绿色开采理念,提出了“采矿技术指标”+“负外部”为框架的高强度开采定义^[6]。张东升指出西部煤炭资源科学开发的主要任务是从被动恢复向主动保护的转变^[7]。范立民、王双明等针对榆神府矿区地质灾害的现状建立了保水开采技术体系^[8-9]。黄庆享提出了保水开采分类方法以及符合神府矿区条件的分类范围指标^[10]。马立强等研究了浅埋煤层保水开采技术工艺并在适宜地质条件下得到了成功应用^[11]。对于充填开采来说,它是主动避免地质灾害及实现保水开采的有效途径,在浅埋煤层充填开采方面,张吉雄^[12]、刘建功^[13]等通过现场成功应用充填采煤技术,实现了含水层保护。以上研究为西北脆弱生态区的科学开采提供了理论基础和技术方法,通过在工程中的应用实现了采煤与保水共赢,达到了对生态环境保护的目标。

笔者在前人研究的基础上,提出了一种“条采留巷充填法”协调开采技术,该技术结合条带开采及充填开采的优点,在条带开采的同时,采用两侧充填沿空留巷技术;再以条带煤柱两侧巷旁充填体为边界,对条带煤柱采用充填开采,最终实现煤炭全采,充填体支撑覆岩达到减沉目的。从根本上实现保护地下水的目的,对保护西部地区脆弱的生态环境具有重要意义。

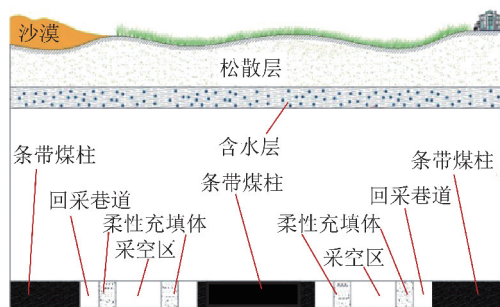
1 “条采留巷充填法”协调开采技术

1.1 基本原理与技术步骤

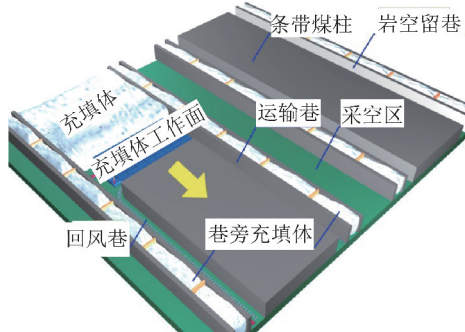
“条采留巷充填法”协调开采是一种先部分开采,再使用充填体置换煤柱的全采方法。依据开采沉陷基本原理,在非充分开采条件下,地表的移动变形可以得到较好的控制;而极不充分开采能更大幅度地减小地表移动变形,从而达到控制地表沉陷与保护地表建(构)筑物的目的。一般来说,在采矿地质条件

一定的情况下,工作面尺寸越小,采动程度越小,对地表的影响程度越弱。结合协调开采的基本思想,在煤层中构建多个非充分采动工作面,是“条采留巷充填法”协调开采的必要条件,也是其基本原理。

其技术步骤为:(1)巷旁充填的条带开采。根据具体地质采矿条件,在遵循开采宽度小于顶板破断距的原则下设计条带开采参数,在进行条带开采的同时,紧随工作面即时构筑巷旁充填体,采用巷旁充填沿空留巷的方式,构建条带煤柱与充填体的联合支撑体,确保以条带煤柱为主的联合支撑体能够维持覆岩稳定。工作面巷旁充填沿空留巷的剖面示意如图 1(a)所示。(2)置换条带煤柱的充填开采。在工作面完成条带开采时,假设采用巷旁充填沿空留巷支护措施后,巷道围岩受开采扰动较小,巷道可再次使用。在工作面形成回采条带煤柱的生产系统后,以条带煤柱两侧的巷旁充填体及工作面形成的范围作为充填区,每推进一定步距后,在其后方施工充填隔离带以便于形成充填空间,将巷道与采空区全部充填,充填后的充填区与两侧原充填体共同支撑上覆岩层,防止其发生破断,达到控制地表沉陷、保护含水层地表生态环境的目的,实现充填体置换条带煤柱的安全回采(图 1(b))。



(a) 巷旁充填岩空留巷



(b) 回采条带煤柱的充填工作面

图 1 “采-采-充”协调开采方法示意

Fig. 1 Schematic diagram of harmonic mining with “mining-mining-backfilling”

为了提高充填率而使巷旁充填体对覆岩的支撑达到较好的效果,在条带开采及回收条带煤柱时,工

作面应采用仰斜开采,这是由于工作面后方采空区一侧地势低,充填口一侧地势高,充填料浆靠自流即可流向后方采空区,较易达到高充填率。对于水平煤层,可采用分段充填,控制好充填口位置、充填期间流量等工艺参数,以便提高充填率。

1.2 “条采留巷充填法”的特点与优势

在比较开采方法时,主要从开采指标与环境保护方面进行分析。而采出率是延长矿井服务年限的重要参数;环境保护方面主要体现在对覆岩稳定性控制方面。现从采出率及覆岩稳定性方面与全采垮落法开采、条带开采、全采全充方法分别比较,分析结果如下:① 与全采垮落法开采相比,此两种方法均为全部开采,故两者采出率相同;但在覆岩稳定性方面,由于“条采留巷充填法”协调开采在条带开采时采用了巷旁充填沿空留巷技术及回收条带煤柱时进行了充填,对覆岩的扰动较小。因此,该方法相比于全采垮落法可大幅度减小覆岩破坏,达到保护地下水及地表生态的目的。② 与条带开采相比,“条采留巷充填法”协调开采结束后充填体宽度大于条带煤柱的宽度,在保证充填率的情况下,同样能起到维持覆岩稳定的作用,甚至优于原条带煤柱。此外,“条采留巷充填法”协调开采提高了采出率。③ 与全采全充方法相比,“条采留巷充填法”协调开采采用了部分充填方式,在基本达到相同效果的情况下,减少了充填成本,甚至还能提高充填效果,有效控制覆岩及地表移动变形,保护脆弱的生态环境。

2 沿空留巷与充填开采技术

2.1 巷旁充填沿空留巷技术

条带开采的基本原理是,开采后地表不出现波浪形下沉,依靠条带煤柱支撑上覆岩层,从而维护地表稳定而不塌陷^[14]。在两侧煤炭采出后,条带煤柱边缘受到破坏形成一定范围的屈服区,而煤柱中央部分相对稳定,且受到屈服区围岩的侧向约束,处于三向受力状态,具有较大的承载能力,称之为核区。当核区降到一定程度时,煤柱会发生失稳破坏。而沿空留巷技术是提高煤炭资源采出率,实现煤炭资源科学开采的关键技术之一。随着巷道支护理论与技术的发展,我国学者在沿空留巷围岩控制理论与技术方面取得了较大的进展^[15-18]。以往沿空留巷仅为了巷道的再次使用,在采空区深处或中心位置会出现覆岩垮落,本文所提出的采用的巷旁充填沿空留巷不仅为了巷道的再次使用,还可为避免处于采空区的覆岩垮落而起到“桥墩”的支撑作用,间接提升条带煤柱的性能^[19],同时为回收条带煤柱确定了充填边界。沿空

留巷围岩应力分布及煤柱性能提升机理如图 2 所示。

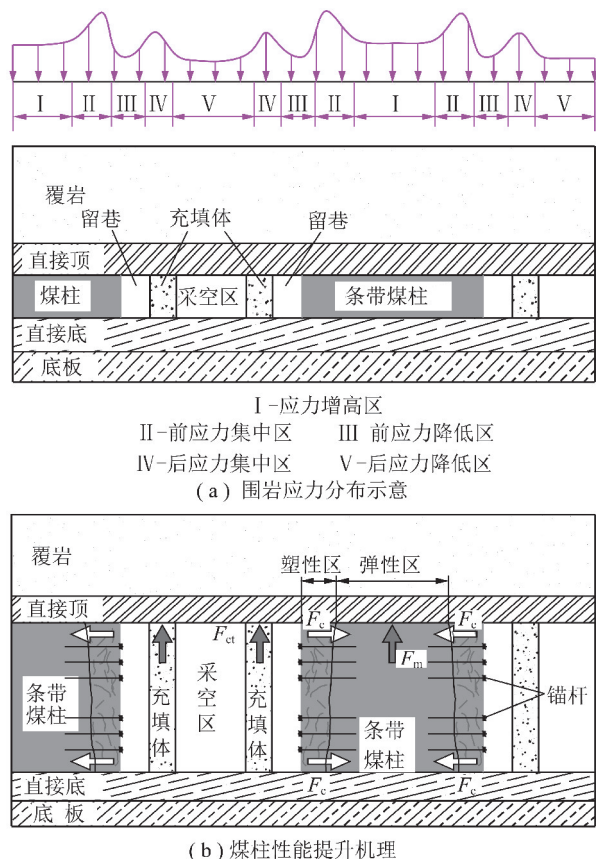


图 2 工作面围岩应力分布及煤柱性能提升机理

Fig. 2 Stress distribution of surrounding rock and improvement mechanism of coal pillar performance

巷旁充填具有提升条带煤柱性能的作用,其提升机理如下:在条带开采未进行巷旁充填时,上覆岩层载荷全部由煤柱承担。使用巷旁充填措施后,充填体在压实后分担了煤柱部分承载载荷 F_{ct} ,起到了“桥墩”的支撑作用,而采取的支护措施相当于在煤帮侧向增加了约束 F_c ,限制了煤柱的横向变形,缩小了煤柱塑性区,煤柱的承载能力 F_m 也得到了相应地提高,对维护上覆岩层和煤柱的稳定性具有促进作用。此时,需考虑充填体的抗压强度。若充填体抗压强度较小,即使满足条带开采宽度小于顶板破断距的前提,在回收条带煤柱时,充填体也会由于承载能力不足而导致覆岩失稳,因此充填体的抗压强度应满足一定的条件。

由图 2 可知,充填体所能提供的支撑载荷 F_{ct} 与充填体自身抗压强度及充填宽度有关,根据沿空留巷的围岩应力分布情况,建立如图 3 所示的充填体支承压力模型,并做如下假设:① 覆岩对条带煤柱及充填体的载荷呈均匀分布;② 充填体及条带煤柱均视为均质连续体,条带煤柱在超前支护下处于稳定状态;③ 研究在平面应力情况下进行。

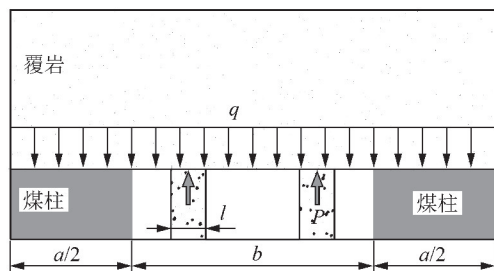


图3 充填体支承压力模型

Fig. 3 Model of abutment pressure of filling wall

由式(1)可知,在充填体长度 L 及采宽 b 一定的情况下,若使充填体能够有效地承载覆岩载荷,需增加充填体的支承压力 σ_c 或增加充填体的宽度 l 。 σ_c 的大小主要取决于充填体自身抗压强度。采用的材料一定时,要对材料配比进行优化,使充填材料间达到紧密堆积程度,减小材料内部的空隙率。当充填体抗压强度一定时,可通过增大充填体宽度 l 来保障充填体充分发挥“桥墩”作用。由图 2(a)可知,条带煤柱上方会存在应力集中区,而实际充填体承载覆岩载荷低于原岩应力 q ,同时在实际应用中,还可通过对巷道顶板进行锚索加固及对充填体采用对拉锚杆支护,提升充填体强度,因此,可认为通过上式确定的充填体宽度能够维持覆岩的稳定。

目前,韩城矿业自主研发的沿空留巷支护技术及配套装备技术,通过与注浆加固煤体技术及锚索加固顶板技术相结合,解决了 6~7 m 高沿空留巷的围岩控制难题。因此,在 6 m 以下煤层已有可使用的沿空留巷装备。对于西部矿区来说,充填骨料可采用资源丰富且已成功用于工程实践的风积沙,由于风积沙膏体充填强度有限,为确保安全,可对巷道采取锚杆锚索支护、增加充填体宽度或采用圆钢管混凝土组合支架进行充填体侧巷旁支护的措施^[20];对于中东部矿区而言,由于煤层埋深较大,可通过以矸石为骨料的高强度混凝土进行充填。

2.2 置换煤柱的充填开采分析

在工作面条带开采完成后,由于采用了巷旁充填沿空留巷支护技术,充填体及条带煤柱能有效地维持覆岩稳定,认为回采巷道可再次使用且条带采空区未垮落,此时工作面布置如图 1(b)所示。以条带煤柱两侧巷道作为二次回采巷道回收条带煤柱,并对工作面后方采空区及两侧巷道进行全部充填。在对条带煤柱回收时,由于充填存在一定的欠顶量,基于“等价采高”理论^[21],顶板会出现一定的弯曲下沉。对于充填体而言,能通过顶板产生的挠度进行适当让压来适应顶板的运动,以减少对充填体的压力。但只要充填相关工艺参数合理,覆岩仍会保持其内部应力动态

平衡,同时保证充填工作面顶板岩层不发生破断。

据有关研究表明^[22],通常条件下膏体充填体强度较大(5 MPa 左右,后期可达 7~8 MPa)。在合理充填步距下进行充填开采后,充填体能够及时充填采空区,快速增阻使充填体的承载能力在顶板下沉及来压前达到切顶阻力,及时支护覆岩避免其发生破断或产生较小离层,以减小两侧巷旁充填体的承受载荷。同时因充填体具有应变强化特性,其后期强度更有利于阻止顶板岩层的移动变形,可有效保证充填体及覆岩稳定。因此,置换煤柱的充填开采在理论上是可行的。

3 “条采留巷充填法”开采技术关键

根据以上分析,现以哈拉沟煤矿 22407 工作面地质条件为例对采用“条采留巷充填法”协调开采后覆岩的稳定性进行分析,该工作面煤层平均厚度 5.4 m,煤层倾角 $1^\circ \sim 3^\circ$,平均埋深 136 m,工作面两侧巷道断面宽度为 5.6 m,直接顶为 6.7 m 的粉砂岩,直接底为 5.8 m 的粉砂岩。为提高充填体的充填率同时避免部分充填体因发生流变而失稳引发顶板垮落,可对条带开采时进行巷旁分段充填,如图 4 所示。

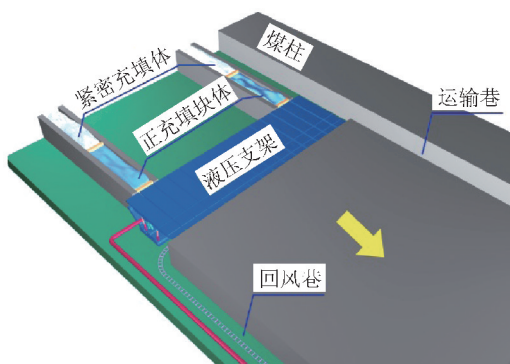


图4 巷旁分段充填示意

Fig. 4 Sketch map of sublevel filling

3.1 煤柱采留宽的确定

通过对 22407 工作面垮落法开采时井下矿压进行实测可知,采空区顶板出现长距离大面积空顶不易垮落的现象,并且在工作面推进到顶板的极限断裂距时才会突然冒落,形成的飓风(高压压缩流动空气)对井下设备及人员的安全造成较大危害,同时由于临近矿井出现过顶板切落压架现象,因此工作面实际在开采一定距离后,对顶板采用深孔预裂爆破进行强制放顶。考虑到工作面的安全原因,未能从现场实测出顶板的初次断裂步距,因此通过实验室试验对工作面长壁开采垮落法管理顶板进行物理模拟,并从工作面推进过程中的周期来压步距、地表沉陷及地表裂缝方

面与现场实测进行对比,进一步说明顶板初次断裂步距的可信度。

根据试验台(长×宽×高=4 m×0.3 m×2.2 m)与工作面尺寸,确定模型相似比为:几何相似为1:100,时间相似为1:10,容重相似为0.6,强度与弹性模量相似为0.006。模型从右侧边界向左侧开挖,设计为模拟终采线一端(末采的260 m)。同时为更接近实际开采情况,首次开挖20 cm以消除边界效应,随后每次推进15 cm,并在试验过程中随时做好观测、记录各现象的准备。模拟所得地表动态下沉曲线如图5所示。

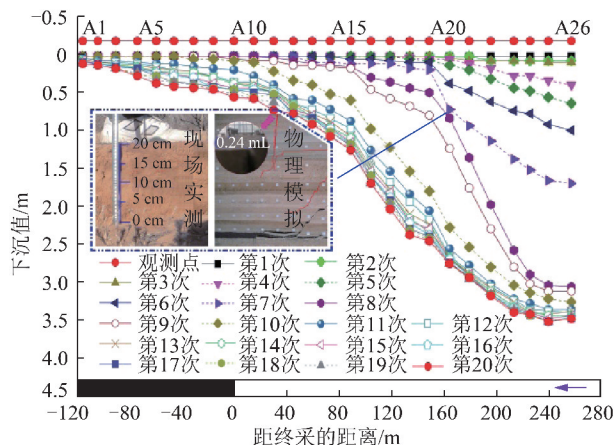


图5 物理模拟地表动态下沉曲线

Fig. 5 Dynamic subsidence curves of surface in simulation

根据物理模拟结果可知,工作面推进过程中,周期来压步距为10~12 m,平均为11 m;地表最大下沉值为3.5 m;地表出现落差为0.24 m的台阶裂缝;通过现场实测,周期来压步距平均为10.2 m,地表最大下沉值3.35 m,并出现落差为0.2 m的台阶裂缝,试验结果与实测基本一致。由此可知试验得到的顶板初次断裂步距35 m具有一定的可信度。因此,根据条带开采的采留宽设计原则及工作面顶板垮落情况,综合确定采留宽均为30 m,此时煤柱安全系数为2.15,核区率为73.3%,且采宽小于顶板初次断裂步距,满足条件要求。

3.2 巷旁充填宽度的确定

在充填材料、采留宽及巷内支护确定的情况下,沿空留巷覆岩的稳定性与充填体的几何尺寸有密切关系,充填体的宽度不仅对沿空留巷的效果起到至关重要的作用,同时也确定了回采条带煤柱时的充填边界,等价于开采完成后整个充填体的宽度,对覆岩的支撑起到决定性作用。

由以上分析及参数可知,在进行条带开采时,顶板不会断裂,同时由于紧随工作面开采进行巷旁充填,使得采空区上方覆岩在煤柱上的载荷进一步分

化,更有利于维持覆岩的稳定。一般情况下,充填体宽度越大,其承载能力越大,越有利于降低煤体的应力及变形,但随着宽度的增加,充填成本也相应的增大。

根据工作面上方岩层力学参数可知,主关键层以下岩层的载荷为0.82 MPa,代入式(1)可得充填宽度 l 为3.5 m。此外,考虑到回采条带煤柱时进行充填开采,借鉴煤柱的塑性区理论,可知塑性区宽度为3.6 m。为了增加充填体的承载和抗变形能力,可对充填体采取加强支护的措施,最终确定巷旁充填体的合理宽度为4.0 m。

3.3 充填率的确定

二次回采过程中,在保证充填强度的情况下,充填率是影响覆岩移动、控制地表沉陷及保护生态环境的关键指标,它表征采空区的实际充填效果,反映充填体与顶板间最终的接触程度及其对顶板的支撑效果,同时也直接关系到地表沉陷控制程度的好坏。根据哈拉沟地质条件,在工作面回采完成后,假设充填率为80%时,欠顶量为1.08 m,按下沉系数为1时考虑,等价于整个覆岩下沉1.08 m,此时未能实现控制地表沉陷及保护地表生态环境的目的,因此,需对充填率进行确定。

对于充填相同条件的采场而言,充填率越高,采空区所形成的空隙越小,岩层的活动空间越小,即基本顶发生弯曲变形的程度越小,对关键层及其以上岩层控制的效果越好。而充填率较低时,则表现出与垮落法管理顶板相类似的矿压显现及岩层移动规律。同时充填率越高,所使用的充填材料越多,充填成本越高,但相对于采空区整体充填而言,在达到相同效果的同时,条带充填的成本略有降低。若充填率较低时,覆岩发生垮落及地表出现裂缝与塌陷,不仅浪费成本,而且还未达到保护生态环境的目的。因此,充填率的大小尤为重要。根据限厚开采的定义^[23],可得出充填率的计算公式为

$$\eta \geq 1 - \frac{[\varepsilon]H}{1.52mbq \tan \beta \cos \alpha} \quad (2)$$

式中, η 为充填率; m 为煤层厚度,5.4 m; H 为煤层采深,136 m; $[\varepsilon]$ 为地表建筑物允许最大水平变形值,2 mm/m; b 为水平移动系数,0.3; q 为下沉系数,0.65; $\tan \beta$ 为主要影响角正切,1.6; α 为煤层倾角,3°。

根据矿井的开采条件,可求得 $\eta \geq 0.9$ 。但为了控制顶板不出现垮落情况,应尽可能提高待充采空区的充填率。

4 条带充填开采数值模拟分析

根据钻孔柱状图建立尺寸为 160 m×100 m×42 m(长×宽×高)的模型,采出宽度与留设煤柱宽度均为 30 m,模拟两个条带及两个条带煤柱的回采,两侧边界各留 20 m 的煤柱,模型四周边界施加水平约束,下边界为固定边界,上边界为应力边界。在模型

上边界施加 2 MPa 的垂直载荷,巷旁充填体采用风积沙为骨料的膏体充填材料,充填体单轴抗压强度为 7 MPa,紧随工作面开采充填,所有充填率取 0.93,必要时对充填体以及巷道采取相应的支护措施。在对条带煤柱进行开采时,以两侧巷旁充填体为边界对后方采空区及两侧巷道进行全部充填。模拟中岩层参数见表 1。

表 1 工作面岩层模拟参数
Table 1 Parameters of mining strata

岩层名称	容重/(kN·m ⁻³)	抗压/MPa	抗拉/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	24.6	40.6	2.30	35	0.25	23.8	22.3
细粒砂岩	25.0	44.6	2.80	32	0.28	19.4	35.7
细砂/煤线	25.0	44.6	2.80	32	0.28	19.2	27.2
中粒砂岩	23.9	45.3	2.50	33	0.25	13.6	30.1
细粒砂岩	25.0	44.6	2.80	32	0.28	19.4	35.7
砂质泥岩	22.5	22.8	3.53	23	0.28	19.1	26.1
中粒砂岩	23.9	45.3	2.50	33	0.25	15.8	28.7
粉砂岩	24.6	40.6	2.30	35	0.25	23.8	22.3
2-2 煤层	14.3	10.5	0.60	15	0.35	19.3	24.5
粉砂岩	24.6	40.6	2.30	35	0.25	23.8	22.3

通过对岩层中各关键层布置测点,对开采结束后各测点的下沉量进行监测。根据数值模拟结果,得到开采完成后各亚关键层的下沉量与埋深呈负相关性,煤层顶板即是亚关键层 1,其最大下沉值为 34 mm;在亚关键层 4 处的岩层最大下沉量为 12 mm。根据前文物理试验的观测结果可知,亚关键层 4 处的岩层下沉 15 mm 时,主关键层及其以上岩层基本不发生变化,因此可认为在满足以上参数时,“条采留巷充填法”能有效地控制覆岩及地表移动变形,实现保护地表生态环境的目的。

5 结 论

- (1)为提高煤炭资源采出率及控制覆岩与地表移动变形,针对西部矿区特有的生态环境提出了以风积沙为骨料的条带开采与充填开采相结合的“条采留巷充填法”协调开采新技术,并阐述了其基本原理及技术步骤。
- (2)分析了条带开采时采用巷旁充填的沿空留巷的围岩的支护方式及其稳定性,探讨了巷旁充填体提升条带煤柱稳定性的机理,通过充填开采对覆岩破坏的抑制效果,在理论上确定了充填开采的可行性。
- (3)通过对“条采留巷充填法”协调开采技术关键的分析及物理试验的验证,确定了条带开采的采留宽参数及巷旁充填宽度,并借鉴限厚开采理论,确定了地表不出现裂缝的最小充填率。并通过数值模拟

- 验证了该方法控制覆岩及地表沉陷的效果,达到了保护西部矿区地表生态环境的目的。
- (4)在实际工程中应根据充填材料的抗压强度及充填率等参数、煤柱承载能力及支护技术等因素来确定合理的开采技术参数。而巷道支护技术及巷旁充填宽度优化设计有待进一步研究。
- 参考文献(References):
- [1] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014,1(3):253-260.
 - [2] 许家林,朱卫兵,鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1625-1634.
XU Jialin,ZHU Weibing,JU Jinfeng. Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(8):1625-1634.
 - [3] HU Zhenqi,CHEN Chao,XIAO Wu,et al. Surface movement and deformation characteristics due to high-intensive coal mining in the windy and sandy region[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2016,3(3):339-348.
 - [4] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报,2010,35(4):529-534.
QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(4):529-534.
 - [5] 缪协兴,钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(1):1-14.
MIAO Xiexing,QIAN Minggao. Research on green mining of coal resources in China: Current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,26(1):1-14.

- [6] 郭文兵,王云广. 基于绿色开采的高强度开采定义及其指标体系研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(4):616-623.
GUO Wenbing, WANG Yunguang. The definition of high-intensity mining based on green coal mining and its index system[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(4):616-623.
- [7] 张东升,刘洪林,范钢伟,等. 新疆大型煤炭基地科学采矿的内涵与展望[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(1):1-6.
ZHANG Dongsheng, LIU Honglin, FAN Gangwei, et al. Connotation and prospection on scientific mining of large Xinjiang coal base[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2015,32(1):1-6.
- [8] 范立民,马雄德,李永红,等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报,2017,42(2):276-285.
FAN Limin, MA Xiongde, LI Yonghong, et al. Geological disasters and control technology in high intensity mining area of western China [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(2):276-285.
- [9] 王双明,黄庆享,范立民,等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报,2010,35(1):7-14.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquiclude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(1):7-14.
- [10] 黄庆享. 浅埋煤层保水开采岩层控制研究[J]. 煤炭学报,2017,42(1):50-55.
HUANG Qingxiang. Research on roof control of water conservation mining in shallow seam[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(1):50-55.
- [11] 马立强,孙海,王飞,等. 浅埋煤层长壁工作面保水开采地表水位变化分析[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(2):232-235.
MA Liqiang, SUN Hai, WANG Fei, et al. Analysis of the ground water level change of aquifer-protective mining in longwall coalface for shallow seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2014,31(2):232-235.
- [12] ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, SUN Qiang, et al. Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology[J]. Environmental Earth Sciences,2015,74:1439-1448.
- [13] 刘建功,赵利涛. 基于充填采煤的保水开采理论与实践应用[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1545-1551.
LIU Jiagong, ZHAO Litao. Theory of water protection and practice application in mining based on the backfilling mining technology [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1545-1551.
- [14] 郭惟嘉,王海龙,刘增平. 深井宽条带开采煤柱稳定性及地表移动特征研究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(3):369-375.
GUO Weijia, WANG Hailong, LIU Zengping. Coal pillar stability and surface movement characteristics of deep wide strip pillar mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2015,32(3):369-375.
- [15] 康红普,牛多龙,张镇,等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10):1977-1987.
KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(10):1977-1987.
- [16] 陈勇,柏建彪,王襄禹,等. 沿空留巷巷内支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报,2012,37(6):903-910.
CHEN Yong, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Support technology research and application inside roadway of gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(6):903-910.
- [17] 李迎富,华心祝,蔡瑞春. 沿空留巷关键块的稳定性力学分析及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(3):357-364.
LI Yingfu, HUA Xinzhu, CAI Ruichun. Mechanics analysis on the stability of key block in the gob-side entry retaining and engineering application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(3):357-364.
- [18] 薛俊华,韩昌良. 大采高沿空留巷围岩分位控制对策与矿压特征分析[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(4):466-473.
XUE Junhua, HAN Changliang. Strata behavior and control countermeasures for the gob-side entry retaining in the condition of large mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(4):466-473.
- [19] 陈绍杰,张俊文,尹大伟,等. 充填墙提升煤柱性能机理与数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(2):268-275.
CHEN Shaojie, ZHANG Junwen, YIN Dawei, et al. Mechanism and numerical simulation of filling walls improving performance of coal pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(2):268-275.
- [20] 谢生荣,张广超,何尚森,等. 深部大采高充填开采沿空留巷围岩控制机理及应用[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2362-2368.
XIE Shengrong, ZHANG Guangchao, HE Shangsen, et al. Surrounding rock control mechanism and its application of gob-side retaining entry in deep backfilling with large mining height [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(12):2362-2368.
- [21] GUO Guangli, ZHU Xiaojun, ZHA Jianfeng. Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2014,24(10):3302-3308.
- [22] 孙希奎,赵庆民,施现院. 条带残留煤柱膏体重提综采技术研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(4):650-654.
SUN Xikui, ZHAO Qingmin, SHI Xianyuan. Research and application on the technology of paste backfilling fully mechanized in residual strip pillar [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(4):650-654.
- [23] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京:煤炭工业出版社,2013.