

我国遗煤复采方式与矿压控制研究进展

冯国瑞^{1,2,3,4,5}, 李剑^{1,2,3,4,5}, 戚庭野^{1,2,3,4,5},
张玉江^{1,2,3,4,5}, 杜献杰^{1,2,3,4,5}, 白锦文^{1,2,3,4,5}

(1. 太原理工大学, 矿业工程学院, 太原 030024; 2. 矿山岩层控制及灾害防控山西省重点实验室, 太原 030024;
3. 山西省煤基资源绿色高效开发工程中心, 太原 030024; 4. 山西省绿色采矿工程技术研究中心, 太原 030024;
5. 山西浙大新材料与化工研究院, 太原 030024)

摘要: 由于我国过去煤炭开采理论体系不完善, 存在大量的滥采现象, 因此在长期开采过程中形成了许多遗留煤炭(简称遗煤)资源。近年来, 为解决煤炭资源的浪费问题, 提高煤炭资源的回收效率和企业的经济效益, 我国学者对各种遗煤复采方式展开了系统性的研究。本文分析整理了我国学者的研究文献, 首先介绍了遗煤的分类, 其中重点论述了最具开采价值的单一残采区上覆整层遗煤和复合残采区中部整层遗煤两大类; 随后介绍了现有遗煤复采的主要方式; 最后归纳了我国学者在残采区上行开采、充填复采、复合残采区中部整层遗煤开采、短壁复采和其他复采方式岩层控制理论与技术研究方面的进展, 总结了各复采方式研究的发展变化。

关键词: 遗煤; 复采; 分类; 开采方式; 技术现状

中图分类号: TD823

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review on Residual Coal Mining and Rock Pressure Control in China

FENG Guorui^{1,2,3,4,5}, LI Jian^{1,2,3,4,5}, QI Tingye^{1,2,3,4,5},
ZHANG Yujiang^{1,2,3,4,5}, DU Xianjie^{1,2,3,4,5}, BAI Jinwen^{1,2,3,4,5}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Key Laboratory of Shanxi Province for Mine Rock Strata Control and Disaster Prevention, Taiyuan 030024, China;
3. Shanxi Province Coal-based Resources Green and Efficiency Development Engineering Center, Taiyuan 030024, China;
4. Shanxi Province Research Center of Green Mining Engineering Technology, Taiyuan 030024, China;
5. Shanxi Zhejiang University Institute of New Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In the past, the imperfect theoretical system of coal mining caused a lot of indiscriminate mining in China, so a large number of residual coal resources (referred to as residual coal) were formed in the long-term mining. In recent years, Chinese scholars have carried out systematic research on various re-mining methods of residual coal in order to solve the waste of coal resources, increase the recovery efficiency of coal resources, and improve the economic benefits. On the analysis of previous studies of domestic scholars, the paper introduces the classification of the residual coal and focuses on the two categories with the most mining value: full-seam residual coal over single residual mining area and full-seam residual coal in the middle of compound residual mining area. Then it introduces the main existing coal re-mining. Finally, it summarizes the research progress of strata control and mining technology by Chinese scholars, inclu-

* 收稿日期: 2022-02-21 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 山西省科技重大专项资助项目(20201102004); 山西省重点实验室建设资助项目(202104010910021); 山西省“1331工程”资助
作者简介: 冯国瑞(1976—), 男, 山西阳城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事难采煤炭资源安全绿色开采与灾害防控理论与技术研究, E-mail: fguorui@163.com

引文格式: 冯国瑞, 李剑, 戚庭野, 等. 我国遗煤复采方式与矿压控制研究进展[J]. 山西煤炭, 2022, 42(1): 1-8.

FENG Guorui, LI Jian, QI Tingye, et al. Review on residual coal mining and rock pressure control in China[J]. Shanxi Coal, 2022, 42(1): 1-8.

ding upward mining in residual mining area, backfill mining, full-seam residual coal mining in the middle of composite residual mining areas, short-wall re-mining, and other methods. It also summarizes the development and changes of the research focus of the re-mining methods.

Key words: residual coal; re-mining; classification; mining methods; technical status

在我国各类消耗性资源中,煤炭具有经济、实用等优点,其贮藏量远远大于石油和天然气资源,是我国经济快速发展的基础和生产力持续稳定增长的保障^[1]。由于我国“富煤、贫油、少气”的能源特点,煤炭开采成为了我国一次性能源的主要生产方式。因此维护我国工业生产和社会发展的持续稳定增长,需要充分保障煤炭资源的可持续供应^[2-3],图 1 为我国 2015—2021 年原煤产量及煤炭消费量。

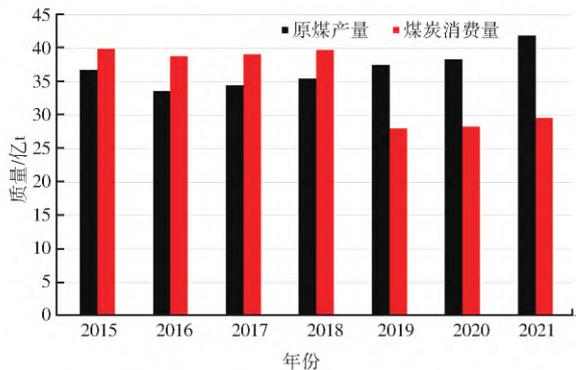


图 1 2015—2021 年我国原煤产量及煤炭消费量
Fig. 1 China's raw coal production and coal consumption from 2015 to 2021

我国的煤炭资源预测储量十分巨大,远超我国能源消耗的需求,但是由于煤炭赋存地区自然地理条件的复杂,目前探明的煤炭资源储量仍然较少,仅满足我国当前的能源需求。同时受开采地质条件、矿山生态环境及当地区域经济状况等多重因素的影响,在探明的煤炭资源储量中仅有部分可用于开采,如图 2 所示。因此,国家对煤炭资源的可持续开采提出了更高的要求^[4-5]。

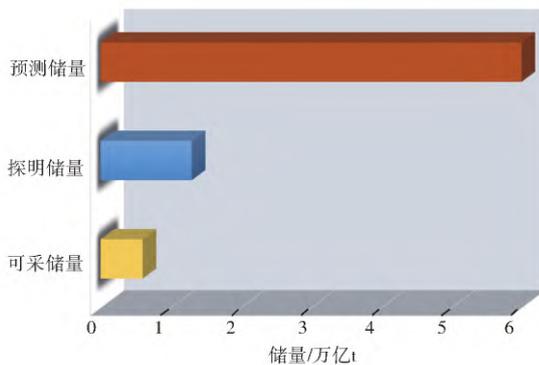


图 2 我国可采煤炭资源占比示意图
Fig. 2 Proportion of recoverable coal resources in China

我国煤炭资源的开发已有很长的历史,在经过多年的高强度开发后,我国各个矿区赋存的易采煤炭资源已所剩不多。众多煤矿均面临着生产落后导致的资源储量枯竭、开采成本提高、剩余煤炭资源难采和经营亏损严重等问题,老矿区相继面临关闭或废弃的局面。此外,由于我国过去煤炭开采理论水平不高,开采技术较差,存在大量的滥采现象,导致煤炭资源被大量浪费,因此在长期开采过程中遗留了数量巨大的煤炭资源。这些遗留煤炭主要是:开采早期采用仓房式、刀柱式、巷柱式等落后的采煤方法而弃置的大量煤炭资源;为了保护地表建筑物、铁路、水体留设的煤柱;遭遇断层、陷落柱等地质构造时留设的保安煤柱;由于护巷需要而留设的大巷煤柱、区段煤柱;采用落后的采煤技术开采厚煤层弃置的顶、底部分煤炭资源;因井田边界不规则开采后残留的边角煤等。据相关统计,我国目前遗煤储量约 400 亿 t,仅山西省内因各种原因而残留的煤炭资源就高达 100 亿 t^[6],且遗煤大多为优质煤种。为了解决上述问题,有必要对遗留煤炭资源进行安全高效复采,减少煤炭资源浪费,提高资源回收率,节约企业开采成本,保持煤炭产业的可持续发展与煤炭供需平衡^[7-8]。

1 遗煤的分类

我国目前赋存的遗煤主要有整层遗煤、块段遗煤、分层遗煤和以上 3 种类型遗煤组合而成的复合遗煤等 4 种类型。这些遗煤按照赋存形式分类,其中块段遗煤又可以分为边角煤、保护煤柱、控顶减沉遗留煤柱和小煤窑破坏区遗煤;分层遗煤主要是厚煤层遗留煤^[9]。针对不同赋存类型遗煤的相关理论和开采方式,国内外学者进行了系统而全面的研究。上述遗煤中由于整层遗煤储量较大、回采方便,所以开采较为经济,开采价值大。整层遗煤可以按其赋存条件分为单一残采区上覆整层遗煤和复合残采区中部整层遗煤两大类。

1.1 单一残采区上覆整层遗煤

单一残采区上覆整层遗煤主要是由于各种原因在采矿区上方遗留的一些还未开采的煤层,这些煤层的储量较大,开采的经济效益较好。形成上层遗煤的原因多种多样:其一是由于在矿井开采初期地质勘探时勘探不详,完成开采后又在煤层上部发现

了可采煤层;其二是矿井在设计时,就因为下行开采程序与采区布置和生产能力之间发生了矛盾,被迫放弃开采上部煤层;其三是开采前将上部煤层划为不可采煤层,但在开采下部煤层的过程中发现可采却来不及布置采煤工作面,只好丢弃上部煤层;其四是因为矿井生产任务及经济效益的原因,在开采时需要先开采主要煤层,而主采煤层与上部次要煤层的开采错距尚未拉开,只好放弃开采次要煤层的部分储量,先采下部开采方便、煤质较好的主采煤层。随着煤炭开采水平不断发展和提高,针对由于上述 4 种原因遗留的煤炭资源,仍可采取合适的遗煤复采方式进行回收,提高煤炭资源采出率。特别是对一些可采储量不足而即将关闭或废弃的老矿区,可以利用原有矿井的部分井巷和开采设备对这些遗留煤炭资源进行回收,不仅能够减少开采成本的投入,还能继续延长矿区或矿井的寿命、提高企业经济效益、解决劳动力流失问题、提高资源回收率^[10]。因此,在某些条件下,对残采区的上覆整层遗煤进行上行开采,对提高矿区经济、减少能源浪费、解放呆滞煤层以及实现煤炭资源绿色开采都具有重大意义^[11-14]。

1.2 复合残采区中部整层遗煤

复合残采区是在开采近/极近距离煤层群时,当开采完上(下)部煤层后,不开采中间煤层,而选择下(上)行开采下(上)部煤层形成的上、下采空区。根据上、下部煤层的开采方法的不同,复合残采区的类型也不同,主要分为 4 种形式(如图 3 所示)^[15]:“上垮落-下垮落”复合残采区,“上垮落-下刀柱”复合残采区,“上刀柱-下垮落”复合残采区,“上刀柱-下刀柱”复合残采区。

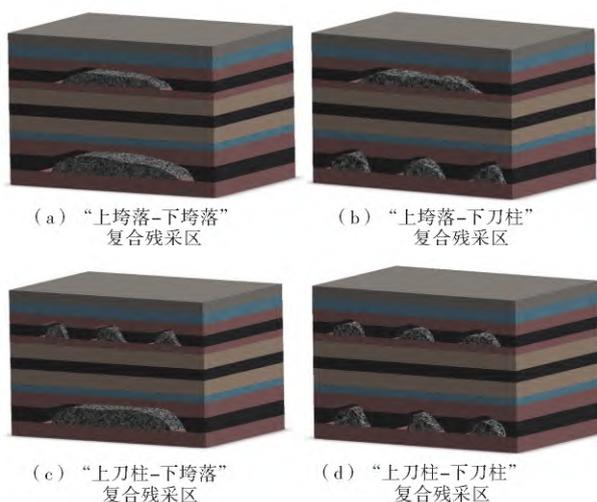


图 3 复合残采区中部整层弃煤开采的四种类型示意图

Fig. 3 Four types of full-seam abandoned coal mining in the middle of composite residual mining area

2 遗煤复采主要方式

遗煤的复采方式多种多样,主要可分为残采区上行开采、充填复采、短壁复采、露天复采、水力复采等,不同类型的遗煤对应的最佳复采方式也不同。对于最具开采价值的整层遗煤,其中关于单一残采区遗煤复采方面的理论及技术应用经验较丰富,国内外学者都进行了较多研究,而关于复合残采区遗煤复采的相关研究目前较少,成型理论及实际应用较为缺乏。单一残采区遗煤复采一般采用残采区上行开采及充填复采。这两种复采方法复采效果较好,使用较为广泛,在全国不同矿区,如西山矿区、大同矿区、平顶山矿区、阳泉矿区、兖州矿区、开滦矿区、新汶矿区、淮南矿区等都已经进行了较多的应用。

2.1 残采区上行开采

所谓上行开采,即开采煤层(群)时,先采下煤层(分层或煤组),后采上煤层(分层或煤组)。煤矿在煤层开采设计时会出于对经济、安全、技术等因素的考虑,先采下部煤层,这就导致残采区上层遗煤的形成。同时在开采下部煤层时,采用不同的开采方式如壁式垮落法、刀柱采煤法等,会导致采场围岩发生不同的应力变化和分布,使上部煤层围岩处于不同的应力状态。因此,按照下部煤层开采期间的采煤工艺和矿压控制特点,将下部煤层残采区分为两类:采用壁式垮落法开采下部煤层所形成的残采区称为壁式残采区,采用刀柱采煤法开采下部煤层并在残采区留设有大量支撑煤柱的残采区称为刀柱式残采区。

2.2 充填复采

充填复采主要是通过使用充填材料对残采区进行充填,控制上覆岩层移动变形,构建出能够长期稳定开采的地下空间的开采方法。充填复采作为一种绿色的开采方法,能够有效利用矿井固废资源,具有减少废料排放、增强采空区稳定性、抑制地表下沉和围岩变形、提高煤柱回收率的作用,是实现采空区遗煤资源安全高效经济开采的一种重要开采方式。

2.3 复合残采区中部整层遗煤开采

复合残采区中部整层遗煤的贮存不仅受其上部煤层开采扰动的影响,还受下部煤层开采造成的双重采动的影响,同时上下煤层开采时采用不同开采方式造成的影响也不同。而且复合残采区中部整层遗煤在开采时所产生的矿压显现特征、围岩的应力变化和分布状态等与传统的残采区开采不同,所采用的矿压和岩层控制技术也不同,因此在开采复合

残采区中部整层遗煤时并不能直接照搬单一残采区遗煤的相关理论及开采方式,具有特殊性。

2.4 短壁复采

短壁复采是指以短工作面采煤法对遗煤进行开采的方式。短壁复采主要针对块段遗煤进行复采,包括特殊开采的遗留煤柱、边角煤和小矿井小窑破坏区遗煤等。其中关于边角煤和各种煤柱进行复采的实例很多,而小矿井由于采煤方法落后、开采无序,导致资源采出率低,遗留大量煤炭资源,形成小窑破坏区。由于小窑破坏区不能布置完整的综采工作面,导致复采难度较大,因此可以采用短壁复采工艺对小窑破坏区遗煤进行复采。

2.5 露天复采

露天复采是指在露天矿场对遗煤进行开采的采煤方式。我国煤矿的露天开采工艺多样化,开采规模大型化、机械化程度较高,具有工艺流程简单、定员少、效率高、生产组织简单、安全性好等优点,能够解决井工生产难以克服的各种灾害,有效回收煤炭资源,增加企业的经济效益。目前,露天复采技术方案大都为井工开采改露天复采遗煤资源^[16-17]。

2.6 水力复采

水力复采是通过使用高压水流冲击破碎煤体,进而开采遗煤的方法。水力复采可应用在遗煤储量较少、贮存区域较为分散的矿井,这些矿井由于在采空区中夹杂着开采后的矸石、木料等残留物,不适用于一般的早采工艺。而采用水力复采具有工作人员少、安全性高、适应能力强、搬家倒面简单等优点。多年来,被我国许多早采矿井用于复采残煤,提高了资源产出率和企业经济效益,如山东枣庄矿、福建邵武矿、通化弯沟矿和肥城杨庄矿等^[18]。

3 遗煤复采岩层控制理论与技术研究进展

3.1 残采区上行开采研究进展

20 世纪 70 年代,世界上主要产煤国家都有计划地开始了上行开采的相关研究及工程实践,尤其是以前苏联、波兰、中国等为代表的国家进行了相应的研究与发展,取得了一些值得肯定的成果,也曾创造过较为可观的技术经济效益,积累了一定的实践经验。残采区上行开采主要可以分为垮落法上行开采和刀柱式上行开采。由于残采区上行开采的开采条件复杂,国内学者格外重视实际开采过程中的岩层控制问题^[19-20]。

关于壁式垮落法残采区上行开采,冯国瑞

等^[10,21]以白家庄煤矿先用垮落法开采下部煤层,后开采近距离上覆煤层为研究背景,采用室内相似模拟实验的方法,研究了垮落法残采区上行开采过程中层间岩层的位移和结构变化情况,得出了层间岩层的应力变化规律以及控制层的结构机理与力学性质,如图 4 所示。张俊文等^[22]以白家庄煤矿为研究对象,研究了 3 种残煤状态下煤体的损伤力学特性,建立了相关的损伤力学方程。研究发现采用错层位巷道布置采煤法可以有效提高顶煤的冒放性和采出率。姜鑫^[23]研究了煤层反程序开采后遗煤复采技术,对受 3 个煤层开采影响的煤层进行上行开采,给出了一些相应的开采方案和技术指标设计,对后续三次上行开采后的遗煤复采技术研究有一定借鉴意义。



(a) 模型全貌



(b) 下部煤层开采后岩层移动变形

图 4 残采区上行开采相似模拟试验^[10]

Fig. 4 Similar simulation test of upward mining in residual mining area^[10]

在刀柱式残采区上行开采领域,我国学者也进行了较多的试验和理论研究。冯国瑞等^[24]在关键层理论的基础上,考虑了刀柱式采空区覆岩的力学特性和上层遗煤开采时对围岩造成的扰动影响,进而提出了关键层叠合破断距理论,该理论是一种刀柱采空区上行开采可行性的判别方法,经过实际开采验证后效果良好。冯国瑞^[25]总结了前期的研究成果,从残采区上行开采过程层间岩层和煤层的顶、底板移动变形规律出发,研究了残采区上行开采层间岩层结构,揭示了层间结构的力学模型,得出了残采区上行开采可行性判定理论及方法,进而提出了煤矿残采区上行开采基础理论,该理论经过现场实际开采的验证,为残采区上行开采提供了非常有价

值的理论指导与技术支持。

3.2 充填复采研究进展

关于充填复采,马占国等^[26]以房柱式充填采矿方法为背景,从能量的角度通过数值计算的方法来研究充填开采过程中充填物和煤层顶板的力学结构模型。研究发现充填开采能够减少煤柱内部应力过载的现象,降低采场最大下沉,提高能量密度值。吴吉南等^[27]提出了人工顶板承载关键层理论,通过采用分层注浆充填方法,制造人工顶板来加固厚煤层小煤矿采空区,使综放工作面能够直接回采,进而减少采空区搬家倒面次数,提高开采效率。李春生^[28]以瑞丰煤业四煤复采为研究对象,对“三下”压煤复采的可行性进行了分析并建立了评价模型,提出了混合充填材料充填开采的工艺,即矸石散料加超高水材料的开采方法,并在实际开采过程中进行了验证。贾凯军等^[29-30]对超高水充填材料及充填技术进行了研究,并在超高水充填材料性质的基础上,对不同煤矿的应用效果进行了分析和评价。研究结果发现超高水材料能够增加采空区充填率,增强采空区稳定性,有助于防治矿井火灾。冯国瑞等^[31]首先提出了结构充填的开采思想。与传统的充填采煤技术不同,结构充填具有充填效果好、成本低、效率高等优点,能够高效利用矿井固废资源,减少地下空间资源的浪费;同时进一步提出了结构充填的设计原则,确定了关键技术,完善了井下一体化结构充填系统,提出了应用更广泛的结构充填构想。杜献杰^[32]开展了无侧限充填体和加筋充填柱的单轴压缩试验,建立了“充填条带-直接顶”复合承载结构温克尔弹性地基上的有限长梁力学模型和柱式结构充填“充填柱-直接顶”复合承载结构温克尔弹性地基上的中厚板力学模型,并通过解析得到了直接顶变形方程。可见充填复采对矿井开采固废资源和地下空间的利用较好,其研究方向逐步由全采全充转向部分充填再向结构充填方向发展。

3.3 复合残采区中部整层遗煤开采研究进展

关于复合残采区中部整层遗煤的开采过程的相关理论与岩层控制技术,国内学者已经开展了大量的科研工作。张向阳等^[33]将实验与工程实践相结合,研究了淮北矿区上下采空极近距离煤层开采过程中采场周围岩体的应力分布规律,得到了煤层、顶底板及工作面巷道外侧围岩应力的变化规律,并由此提出了切实的矿压控制措施以保障开采工作的安全可靠。刘明杰等^[34]分析了采用“上刀柱-下刀柱”开采方式开采的煤层中部遗煤开采可行性,研究了

在开采中部遗煤时可能造成的围岩应力变化及开采扰动对顶底板的影响,提出了相应的顶底板岩层控制措施。白锦文等^[15,35]对复合刀柱式残采区的遗留煤柱的应力分布及开采方式进行了理论研究,分析了复合残采区遗留煤柱及覆岩的稳定性与开采的可能性,提出了切实的复合刀柱式残采区遗留煤柱开采岩层控制理论。同时根据复合采区中串联与并联遗留群柱的失稳破坏特征,研究了复合残采区遗留群柱的失稳致灾机理,提出了复合残采区的关键柱核心理论。张玉江^[36]针对下垮落式复合残采区的顶底板稳定性问题,将下垮落式复合残采区的底板根据应力分布的不同分为了3个区域,并建立了相关的力学理论模型,得到了下垮落式复合残采区围岩的失稳机理,提出了以“底板岩层结构稳定性”为核心的遗煤开采可行性判定方法,以及安全开采的相关技术措施。郭峰^[37]研究了“上刀柱-下垮落”式复合残采区中部遗煤开采过程中围岩的应力分布,位移变化及结构演化规律,同时分析了两种不同开采顺序开采此类遗煤的优缺点,提出了对复合残采区中部遗煤开采过程中围岩扰动影响最小的开采方法,为后续此类工程的开采提供借鉴。周小建^[38]则是研究了“上垮落-下刀柱”式复合残采区中部遗煤开采过程中的岩层控制相关理论。以白家庄煤矿7#煤层为背景,通过理论与实验相结合的方法研究了复合残采区中部遗煤开采所引起的围岩应力分布特征及顶底板稳定性情况,并且推导出了遗留煤柱在双重采动影响下所能承受载荷的计算方法,为后续进行此类开采的煤柱设计依据提供了理论基础。李泽^[39]研究了层间距对“上垮落-下刀柱”式复合残采区中部遗煤的矿压影响,分析了不同层间厚度下中部遗煤围岩的应力场、位移场的变化情况,得到了复合采场层间距与煤层围岩破坏情况的关系,将复采残采区中部整层遗煤的顶底板结构总结为3种类型,进而提出了“上垮落-下刀柱”式复合残采区中部遗煤开采可行性判定方法。冯国瑞等^[40]选取非等宽复合柱采区中部遗煤的开采为研究对象,研究了遗留宽煤柱和窄煤柱的稳定性以及复合柱式开采采场形成的两种连续梁结构等,系统分析了非等宽复合柱采区中部遗煤开采的可行性,如图5所示。并以晋华宫煤矿中部遗煤开采为例提出了切实的矿压安全防控技术,为后续的非等宽复合柱采区中部遗煤的安全高效开采提供了理论依据。由此可见,复合残采区中部整层遗煤开采同样侧重研究岩层控制问题,研究的方向由静载作用下的岩层结构稳定性

向动静组合作用下的岩层结构稳定性转移。

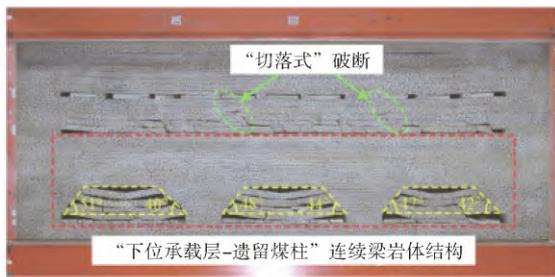


图5 非等宽复合柱采区中部遗煤复采相似模拟试验围岩的结构形式^[40]

Fig. 5 Surrounding rock structure in similar simulation test of residual coal mining in the middle of mining area with unequal width composite columns

3.4 短壁复采研究进展

目前短壁复采工艺主要是使用连续采煤机短壁机械化开采技术对边角煤和小窑破坏区遗煤进行开采,并且有大量的现场生产经验。翁明月等^[41]针对平朔安家岭煤矿边角煤采用连续采煤机短壁机械化开采技术进行了开采,发现短壁开采技术能够提高矿井对于边角煤和不规则块段遗煤的回采率,增加经济效益。郝万东^[42-43]从实际出发,研究了短壁复采在小窑采空区残留煤柱的应用情况,并从多个方面介绍了连续采煤机短壁机械化开采技术,设计了配套的连采技术方案。苗彦平等^[44]则是针对矿井残留的不规则块段遗煤进行了研究,介绍了连续采煤机短壁开采技术在开采不规则块段遗煤过程中对顶板稳定性的改善作用。石晓光^[45]基于陕煤张家峁矿不规则边角块段遗煤的赋存特点,提出了采用短壁复采的方式来解决回采过程中顶板岩层控制的问题,并且构建了相适应的循环风路系统。梁大海^[46]同样针对不规则块段遗煤提出了连续采煤机短壁复采方案,并介绍了两种复采设备的配套方案且在干河煤矿成功地进行了现场应用。马进功等^[47]则研究了短壁复采技术在资源整合兼并小矿井小窑破坏区遗煤开采中的应用,该技术较好地克服了小窑区遗煤由于分布散乱无序而带来的开采难题,为后续小窑区复采技术的发展提供了经验。杨杰^[48]分析了短壁开采技术与装备在煤柱回采领域的重要性,介绍了短臂机械化采煤成套主要设备。

参考文献:

- [1] 谢克昌. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究:综合卷[M]. 北京:科学出版社,2014:56-79.
- [2] 袁亮,张通,赵毅鑫,等. 煤与共生资源精准协调开采:以鄂尔多斯盆地煤与伴生特种稀有金属精准协调开采为例[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(3):449-459.
YUAN L,ZHANG T,ZHAO Y X,et al. Precise coordinated mining of coal and associated resources:A case of environmental coordinated mining of coal and associated rare metal in Ordos basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology,

3.5 其他复采方式研究进展

目前关于露天复采和水力复采技术的现有研究较少,且由于复采工作面较小,顶板稳定性较易控制,相关研究大都集中在复采方式的可行性分析上。其中关于露天复采的研究主要是矿井井工开采改露天复采的可行性分析。刘光金^[16]针对大峰露天矿井工采空区中的大量遗留煤资源,提出了露天复采方案和技术措施,并进行了可行性分析。江文平^[17]则是借鉴了箕沟煤矿井工开采改露天复采的成功技术经验,对该矿区露天复采转型进行了可行性分析,并提出了相应的技术发展方向。

关于水力复采技术,王庆川^[49]分析了金星煤矿水力复采方案,研究了水力复采的工作面布置、工作面参数以及相应的顶板管理措施,确定了水力复采的应用价值。王鸿云^[18]为解决襄垣地区开采3#煤层遗留煤资源较多的问题,提出了水力复采采空区遗煤的方法,并进一步研究了水利复采技术中巷道布置、掘进方法和安全措施等相关问题。

4 结论

- 1) 遗煤的复采方式多种多样,有残采区上行开采、充填复采、水力复采、短壁复采、露天复采等多种形式,根据遗煤复采方式及特点,研究方向各有侧重。
- 2) 充填复采、露天复采、短壁复采和水力复采工作面范围较小,顶板控制问题小,侧重研究可行性和开采工艺。
- 3) 残采区上行开采和复合残采区中部整层遗煤开采因开采条件复杂,侧重研究岩层控制问题,研究热点由静载作用下的岩层结构稳定性向动静组合作用下的岩层结构稳定性转移。
- 4) 考虑到充填材料的来源与地下空间利用,充填复采由全采全充向部分充填,再向结构充填方向发展。
- 5) 我国学者在残采区上行开采、充填开采和复合残采区中部整层遗煤开采等领域进行了大量的研究。他们的研究为后续的遗煤安全高效开采提供了非常有价值的理论支持与技术指导。但遗煤开采是一个还未完全成熟的技术领域,仍需进行大量的深入研究。

- 2017,46(3):449-459.
- [3] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.
XIE H P, WU L X, ZHENG D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(7):1949-1960.
- [4] 彭苏萍,张博,王佟. 煤炭资源与水资源[M]. 北京:科学出版社,2014:101-105.
- [5] 彭苏萍,张博,王佟. 我国煤炭资源“井”字形分布特征与可持续发展战略[J]. 中国工程科学,2015,17(9):29-35.
PENG S P, ZHANG B, WANG T. China's coal resources: octothorpe shaped distribution characteristics and sustainable development strategies[J]. Strategic Study of CAE, 2015,17(9):29-35.
- [6] ZHANG Y J, FENG G R, ZHANG M, et al. Residual coal exploitation and its impact on sustainable development of the coal industry in China[J]. Energy Policy, 2016,96:534-541.
- [7] 刘见中,申宝宏,姜鹏飞,等. 提高我国煤炭科学产能的技术对策[J]. 煤炭科学技术,2013,41(1):21-24.
LIU J Z, SHEN B H, JIANG P F, et al. Technical countermeasures of improving China coal production capacity[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(1):21-24.
- [8] 谢和平,王金华,申宝宏,等. 煤炭开采新理念:科学开采与科学产能[J]. 煤炭学报,2012,37(7):1069-1079.
XIE H P, WANG J H, SHEN B H, et al. New idea of coal mining: scientific mining and sustainable mining capacity[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(7):1069-1079.
- [9] 冯国瑞,张玉江,戚庭野,等. 中国遗煤开采现状及研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(1):151-159.
FENG G R, ZHANG Y J, QI T Y, et al. Status and research progress for residual coal mining in china[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(1):151-159.
- [10] 冯国瑞. 残采区上行开采基础理论及应用研究[D]. 太原:太原理工大学,2009.
- [11] 杜计平,汪理全. 煤矿特殊开采方法[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:1-15.
- [12] 朱银昌,陈庆禄,张铁岗. 复杂难采煤层的开采[M]. 北京:世界图书出版社,1998:340-359.
- [13] 汪理全,李中颖. 煤层(群)上行开采技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995:1-16.
- [14] 葛尔巴节夫 T Ф, 札柏尔金斯基 A И. 库兹巴斯煤层群上行顺序开采法[M]. 马鸿,李诞生,译. 北京:煤炭工业出版社,1958:26-78.
- [15] 白锦文. 复合刀柱式残采区中部整层弃煤开采岩层控制基础理论研究[D]. 太原:太原理工大学,2016.
- [16] 刘光金. 大峰矿羊齿采区露天复采可行性简析[J]. 西北煤炭,2008,(1):52-53,62.
LIU G J. Feasibility analysis of repeat mining of Dafeng Mine Yangchi District[J]. Northwest Coal, 2008,(1):52-53,62.
- [17] 江文平. 汝箕沟煤矿井工开采改露天复采的可行性研究[J]. 露天采矿技术,2017,32(4):1-3,6.
JIANG W P. Feasibility study on underground mining to open-pit mining in Rujigou Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2017,32(4):1-3,6.
- [18] 王鸿云. 襄垣地区水力复采残留煤的研究[J]. 水力采煤与管道运输,2011,(4):9-11.
- [19] 薛琦. 残采区回采巷道合理支护技术研究[J]. 山西煤炭,2018,38(3):34-35,65.
XUE Q. Reasonable supporting technology in roadways of residual coal mining area[J]. Shanxi Coal, 2018,38(3):34-35,65.
- [20] 李鹏,许海涛. 望田煤业 8 号煤层旧采残煤区遗留煤柱稳定性分析[J]. 山西煤炭,2014,34(3):52-54.
LI P, XU H T. Stability analysis on left coal pillars in old residual coal mining area in No. 8 seam in wangtian mine[J]. Shanxi Coal, 2014,34(3):52-54.
- [21] 冯国瑞,任亚峰,王鲜露,等. 白家庄煤矿垮落法残采区上行开采相似模拟实验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(4):544-550.
FENG G R, REN Y F, WANG X X, et al. Experimental study on the upward mining of the left-over coal above gob area mined with caving method in Baijiazhuang Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(4):544-550.
- [22] 张俊文,赵景礼,王志强. 近距残煤综放复采顶煤损伤与冒放性控制[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1854-1858.
ZHANG J W, ZHAO J L, WANG Z Q. Top coal damage and caving characterizes control of residual coal repeated mining adopted longwall top-coal caving in contiguous seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(11):1854-1858.
- [23] 娄鑫. 反程序多次开采后煤层复采实验研究[J]. 黑龙江科技信息,2012,(8):94.
- [24] 冯国瑞,张绪言,李建军,等. 刀柱采空区上方遗存煤层上行开采可行性判定[J]. 煤炭学报,2009,34(6):726-730.
FENG G R, ZHANG X Y, LI J J, et al. Feasibility on the upward mining of the left-over coal about goaf with pillar supporting method[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(6):726-730.
- [25] 冯国瑞. 煤矿残采区上行开采基础理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,2010:89-99.
- [26] 马占国,范金泉,孙凯,等. 残留煤柱综合机械化固体充填复采采场稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(4):499-504,510.
MA Z G, FAN J Q, SUN K, et al. Study on stope stability during repeated mining with fully-mechanized solid filling technology in residual coal pillar area [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011,28(4):499-504,510.
- [27] 吴吉南,徐金海. 厚煤层小煤矿采空区充填综放复采关键技术[J]. 煤炭科学技术,2012,40(4):30-33,36.
WU J N, XU J H. Key technology for fully mechanized top coal caving mining in thick seam passing through small mine goaf with backfill[J]. Coal Science and Technology, 2012,40(4):30-33,36.

- [28] 李春生. 复采煤层充填开采方法及其地表下沉机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [29] 贾凯军, 冯光明, 王誉钦, 等. 俯斜开采超高水材料袋式充填体失稳机理及防治[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 409-415.
JIA K J, FENG G M, WANG Y X, et al. Instability mechanism and prevention of bag filling body constructed by super-high-water material under the condition of down-dip mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 409-415.
- [30] 冯光明, 贾凯军, 尚宝宝. 超高水充填材料在采矿工程中的应用与展望[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 5-9.
FENG G M, JIA K J, SHANG B B. Application and prospect of super-high-water packing material in mining engineering[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 5-9.
- [31] 冯国瑞, 杜献杰, 郭霄霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74-84.
FENG G R, DU X J, GUO Y X, et al. Basic theory of constructional backfill mining and the underground space utilization concept[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 74-84.
- [32] 杜献杰. 煤矿结构充填开采“充填体-直接顶”复合承载结构稳定性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [33] 张向阳, 常聚才. 上下采空极近距离煤层开采围岩应力及破坏特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 506-511.
ZHANG X Y, CHANG J C. Stress and failure characteristics of surrounding rock in the extremely close distance coal seams group mining after the upper and lower coal seam mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 506-511.
- [34] 刘明杰, 李冬伟, 瞿群迪. 蹬空开采顶底板破坏特征及控制技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 758-762.
LIU M J, LI D W, ZHAI Q D. Failure characteristic of roof and floor in ascending mining and its control technology[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2014, 33(6): 758-762.
- [35] 白锦文, 冯国瑞, 章敏, 等. 上下柱式开采对中部残煤采场岩层应力分布时空演化的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1896-1904.
BAI J W, FENG G R, ZHANG M, et al. Influence of upper-bottom pillar mining on temporal and spatial evolution of stress in rock strata around middle residual coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1896-1904.
- [36] 张玉江. 下垮落式复合残采区中部整层弃煤开采岩层控制理论基础研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [37] 郭峰. “上柱-下垮”复合残采区中层弃煤开采围岩运移规律及其采序影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [38] 周小建. “上垮-下柱”复合残采区中部整层弃煤开采的岩层控制基础研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [39] 李泽. 层间距对“上垮-下柱”复合残采区中层弃煤矿压显现的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [40] 冯国瑞, 杨文博, 白锦文, 等. 非等宽复合柱采区中部遗煤开采可行性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 643-654.
FENG G R, YANG W B, BAI J W, et al. Feasibility analysis of residual coal mining in the middle of unequal width composite pillar mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 643-654.
- [41] 翁明月, 王永春. 短壁开采技术在边角煤块段复杂地质条件下的应用[J]. 煤炭工程, 2012, (8): 52-54.
WENG M Y, WANG Y C. Application of shortwall mining technology to complicated geological condition of the corner seam section[J]. Coal Engineering, 2012, (8): 52-54.
- [42] 郝万东. 短壁机械化开采技术在小窑残留煤柱回采中的应用[J]. 煤矿安全, 2014, 45(12): 153-155.
HAO W D. Application of short-wall mechanized mining technology in residual coal pillar recovery of small mine[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(12): 153-155.
- [43] 郝万东. 连续采煤机短壁开采技术在东坪煤矿的应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(2): 5-8.
HAO W D. Application of short wall mining technology with continuous miner in dongping coal mine. [J]. Coal Engineering, 2020, 52(2): 5-8.
- [44] 苗彦平, 杜涛, 王碧清, 等. 厚煤层不规则块段连续采煤机短壁开采技术[J]. 煤矿开采, 2015, 20(5): 23-26.
MIAO Y P, DU T, WANG B Q, et al. Short-wall mining technology of anomalous section in coal-seam with continuous miner [J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(5): 23-26.
- [45] 石晓光. 厚煤层坚硬顶板连续采煤机短壁开采技术应用研究[J]. 山西煤炭, 2015, 35(4): 56-59.
SHI X G. Application of short-wall mining with continuous miners for thick coal seam with hard roof [J]. Shanxi Coal, 2015, 35(4): 56-59.
- [46] 梁大海. 干河煤矿煤柱及不规则块段开采设计[J]. 煤炭技术, 2019, 38(5): 4-6.
LIANG D H. Mining design of coal pillar and irregular block in ganhe coal mine[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 4-6.
- [47] 马进功, 周茂普, 高云峰, 等. 连续采煤机在小窑短壁复采中的应用[J]. 煤矿开采, 2016, 21(6): 38-41, 64.
MA J G, ZHOU M P, GAO Y F, et al. Application of short-wall repeated mining of small coal mine with continuous coal cutter[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(6): 38-41, 64.
- [48] 杨杰. 短壁开采装备在煤柱回采中的应用[J]. 煤矿机电, 2019, 40(5): 112-113, 116.
YANG J. Application of short-wall mining equipment in coal pillar mining[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2019, 40(5): 112-113, 116.
- [49] 王庆川. 水力复采在金星煤矿的应用[J]. 煤, 2010, 19(12): 14-15, 18.
WANG Q C. Hydraulic mining in the venus mine[J]. Coal, 2010, 19(12): 14-15, 18.

(编辑: 单 婕)