



推荐阅读:

[我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考](#)

[我国大采高综采技术及围岩控制研究现状](#)

[保水采煤研究 30 年回顾与展望](#)

[煤矿“短充长采”科学开采模式研究](#)

[西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势](#)

[基于保水采煤的煤炭开采带与泉带错位规划问题](#)

[煤矿冲击地压灾害防控技术研究现状及展望](#)

[基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究](#)

[软弱厚煤层沿顶掘进并沿底回采技术研究](#)

[松散煤岩组合体不均匀破坏试验研究](#)

[采场空间结构模型及相关动力灾害控制研究](#)

[坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究](#)

[基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究](#)

[大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响](#)

[岩层移动理论与力学模型及其展望](#)

[我国水体下保水采煤技术研究进展](#)

[层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望](#)

[特大断面冲击地压巷道破坏机理及控制技术研究](#)

[动压影响下的软岩巷道加固治理技术研究](#)

[弱胶结富水顶板巷道围岩控制技术研究](#)

## 绿色开采技术 20 年研究与展望专题



许家林(1966—),江苏句容人,教授,博士生导师,博士。1984 年考入中国矿业大学采矿工程专业,1988 年大学毕业后师从钱鸣高院士攻读硕士和博士学位。现任第五届国家安全生产专家组成员,《煤炭学报》《采矿与安全工程学报》《煤炭科学技术》《采矿与岩层控制工程学报》《煤炭工程》等期刊编委。

长期致力于煤矿岩层移动与绿色开采研究,在岩层移动规律及其工程效应方面取得了重要研究进展,已应用于采场压架防治、保水采煤、煤与瓦斯共采、建筑物下部分充填(覆岩隔离注浆充填)采煤等工程实践,取得了显著的经济和社会效益。

主持完成国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题、国家科技支撑计划课题、国家自然科学基金等国家级项目 7 项。发表学术论文 200 余篇(其中,10 篇论文入选“中国精品科技期刊顶尖学术论文 F5000”,1 篇论文 2 次入选“中国百篇最具影响国内学术论文”),出版著作 6 部,授权国家发明专利 20 余项。



移动扫码阅读

许家林.煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J].煤炭科学技术,2020,48(9):1-15. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.09.001

XU Jialin.Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J].Coal Science and Technology,2020,48(9):1-15. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.09.001

## 煤矿绿色开采 20 年研究及进展

许家林<sup>1,2</sup>

(1.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**煤层开采引起的岩层破断运动导致了一系列采动损害与环境问题。绿色开采从广义资源的角度出发,通过控制或利用采动岩层破断运动,从源头减轻采煤对环境的影响,实现对煤层及共伴生资源的共采或保护。该理念得到了业界的广泛认同,绿色开采技术的研究与应用也取得了重要进展。从广义资源概念、基于岩层破断运动规律原则、源头减损及全生命周期理念等方面进一步论述了绿色开采的内涵,提出了全生命周期绿色开采技术框架,包括保水采煤、煤与瓦斯共采、矸石减排、减沉开采与环境修复,对近 20 年来我国煤矿绿色开采的研究历程进行了回顾。关键层理论是绿色开采技术研究的重要理论基础,其基本学术思想强调将覆岩作为整体进行研究,将采动矿压、水与瓦斯及地表沉陷研究有机统一起来;同时强调抓主要矛盾,即找出覆岩中对岩层运动起控制作用的关键层,避免采用传统研究中对覆岩岩性进行均化处理的方法。综述了在岩层移动与采动裂隙演化规律方面的理论研究成果,主要包括基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法、覆岩卸荷膨胀累积效应与瓦斯卸压抽采“三带”原理,论述了保水采煤、煤与瓦斯共采、充填减沉开采等方面的技术进展、现状及工程应用成效。提出了促进绿色开采技术进一步发展的建议,包括深化采动岩层运动规律研究,确定适合不同矿区特点的绿色开采技术模式,建立煤矿绿色开采的评价指标体系,开展煤矿全生命周期绿色开采设计、绿色开采技术的高效率和低成本化研究等,为我国煤矿绿色开采指明了方向。

**关键词:**绿色开采;广义资源;源头减损;岩层移动;关键层

中图分类号:TD823.7

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)09-0001-15

## Research and progress of coal mine green mining in 20 years

XU Jialin<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,China University of Mining & Technology,Xuzhou 221116,China;

2.School of Mines,China University of Mining & Technology,Xuzhou 221116,China)

收稿日期:2020-07-20;责任编辑:杨正凯

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501109)

作者简介:许家林(1966—),男,江苏句容人,教授,博士生导师,博士。E-mail:cumtxjl@cumt.edu.cn

**Abstract:** The breaking movement of the rock layer caused by coal mining has caused a series of mining damage and environmental problems. From the perspective of broad resources, green mining can reduce the impact of coal mining on the environment from the source by controlling or using the breaking motion of the mining rock layer, and realize the co-mining or protection of coal seams and its associated resources. The concept has been widely recognized by the industry, and the research and application of green mining technology has also achieved important progress. This paper further discussed the connotation of green mining in terms of the concept of resources in a broad sense, based on the principle of rock fracture movement law, source reduction and the concept of full life cycle, etc, and proposed a full life cycle green mining technology framework, including water conservation mining, coal and gas co-mining, waste rock discharge, subsidence reduction mining and environmental restoration. The research history of green mining in coal mine in China in recent 20 years was reviewed. The key strata theory is an important theoretical basis for the study of green mining technology. Its basic academic thought emphasizes the study of overburden as a whole, and unifies the study of mining pressure, water and gas and surface subsidence. Meanwhile, it emphasizes the main contradiction, namely, to find out the key strata that control the overburden movement, and avoid adopting the traditional method of homogenizing the overburden lithology. The theoretical research results on the evolution of rock formations and mining fissures are summarized, including the prediction method of the height of water-conducting fracture zone based on the position of key stratum, the cumulative effect of overburden unloading expansion, and the "three zones" principle of gas pressure relief and drainage. The technical progress, status quo and engineering application effects are discussed for the technologies of water conservation coal mining, co-extraction of coal and gas, and filling and subsidence mining, etc. It puts forward suggestions to further promote the development of green mining technology, including deepening the study on the law of strata movement, determination of green mining technology model suitable for the characteristics of different mining areas, establishing the evaluation index system of green mining in coal mine, carrying out the green mining design of the whole life cycle of coal mines, and development of green mining technologies with high efficiency and low cost. This pointed out the direction for green mining in Chinese coal mines.

**Key words:** green mining generalized resources; damage reduction from the source; strata movement; key strata

## 0 引言

长期以来,煤炭为国家的经济发展提供了充足而坚实的能源保障,但也应看到,煤炭做出重要贡献的同时,其开采过程引发了一系列采动损害与环境问题。煤层作为一种典型的沉积岩层,其覆岩通常是层状岩体,在煤炭开采后将出现大面积的移动与变形破断,并形成各种采动裂隙,成为水与瓦斯等地质流体的运移通道,若不加以控制会带来井下突水、含水层结构损伤、瓦斯突(涌)出等工程问题。岩层移动向上发展也导致了地表沉陷,对建(构)筑物、土地和生态环境造成影响。可以说,自煤炭开采业形成以来,采动损害与环境问题就一直存在。在经济快速发展的今天,由于开采规模与强度剧增,这一问题越发凸显,甚至超出了环境容量,与当今和谐社会生态文明建设之间形成了矛盾。

为了解决上述问题,钱鸣高院士于 21 世纪初提出了煤矿绿色开采理念,并对其技术框架进行了系统阐述<sup>[1-12]</sup>。绿色开采提出后得到了国内外学术界和煤炭行业的积极响应,“绿色开采”(Green Mining)已成为国际采矿界通用词汇,使行业在认识与行动上对采动损害与环境问题进行了统一,并成为国家绿色发展政策的一部分。经过近 20 年的研究和工程实践,我国煤矿绿色开采技术创新百花齐放,实施成效显著。笔者对绿色开采技术进展进行

总结,并指明进一步发展方向。

## 1 绿色开采内涵与发展历程

### 1.1 绿色开采内涵与框架

煤矿绿色开采以及对应的绿色开采技术,在基本概念上是从广义资源角度认识与对待煤、瓦斯、地下水、土地、矸石等各种可以利用的资源;基本出发点是从开采的角度防止或尽可能减轻煤炭开采对环境和其他资源的不良影响;基本手段是控制或利用采动岩层破断运动;目标是在采动损害最小的情况下取得最大的资源采出率,实现最佳的经济、环境和社会效益。绿色开采的内涵主要体现在以下 3 个方面:

1) 广义资源概念。将与煤炭共伴生的瓦斯、地下水、地热、土地、煤矸石、电厂粉煤灰及 CO<sub>2</sub> 等都作为矿区可开发利用和保护的资源,在开发利用煤炭资源的同时考虑对这些资源的保护和开发利用,通过绿色开采技术的创新实现瓦斯、地下水、地热等对煤炭安全生产有害的资源共采和保护,实现煤矸石、电厂粉煤灰及 CO<sub>2</sub> 等对环境有害的资源综合利用(如作为矿井充填材料)。该理念彻底扭转了仅将煤炭作为矿区资源而漠视其他共伴生资源甚至视其为有害物的传统观念。

2) 基于岩层破断运动规律原则。煤炭开采引起的岩层运动是采动损害与环境问题的根源,岩层运动引起的裂隙场、应力场、位移场及渗流场分布规

律是绿色开采的理论基础,因此,控制或利用采动岩层破断运动是绿色开采技术的基本手段。煤矿绿色开采技术的研究必须高度重视采动岩层运动规律的研究,岩层控制的关键层理论为岩层运动规律与绿色开采研究提供了重要理论基础。

3) 源头减损及全生命周期理念。从开采源头考虑煤伴生资源与环境的保护与开发,实现矿井全生命周期的绿色开采。首先,必须在矿井规划设计阶段研究具体矿井条件下煤炭及其伴生资源与环境特点,评估煤炭开采岩层运动对伴生资源的

影响,合理规划矿井绿色开采方案;在开采煤层过程中采用适宜的绿色开采技术保护其他资源或实现与煤共采,如煤气共采、煤热共采、煤水共采等;对于技术难以有效控制(或在经济上不合理)的采动损害必须在采后进行修复,如地下含水层修复、土地复垦等,其修复方案与技术研发应该结合采动岩层破断运动规律。

绿色开采技术主要包括保水采煤、煤与瓦斯共采、矸石减排、减沉开采与环境修复等方面,其全生命周期的绿色开采技术体系与框架如图 1 所示。

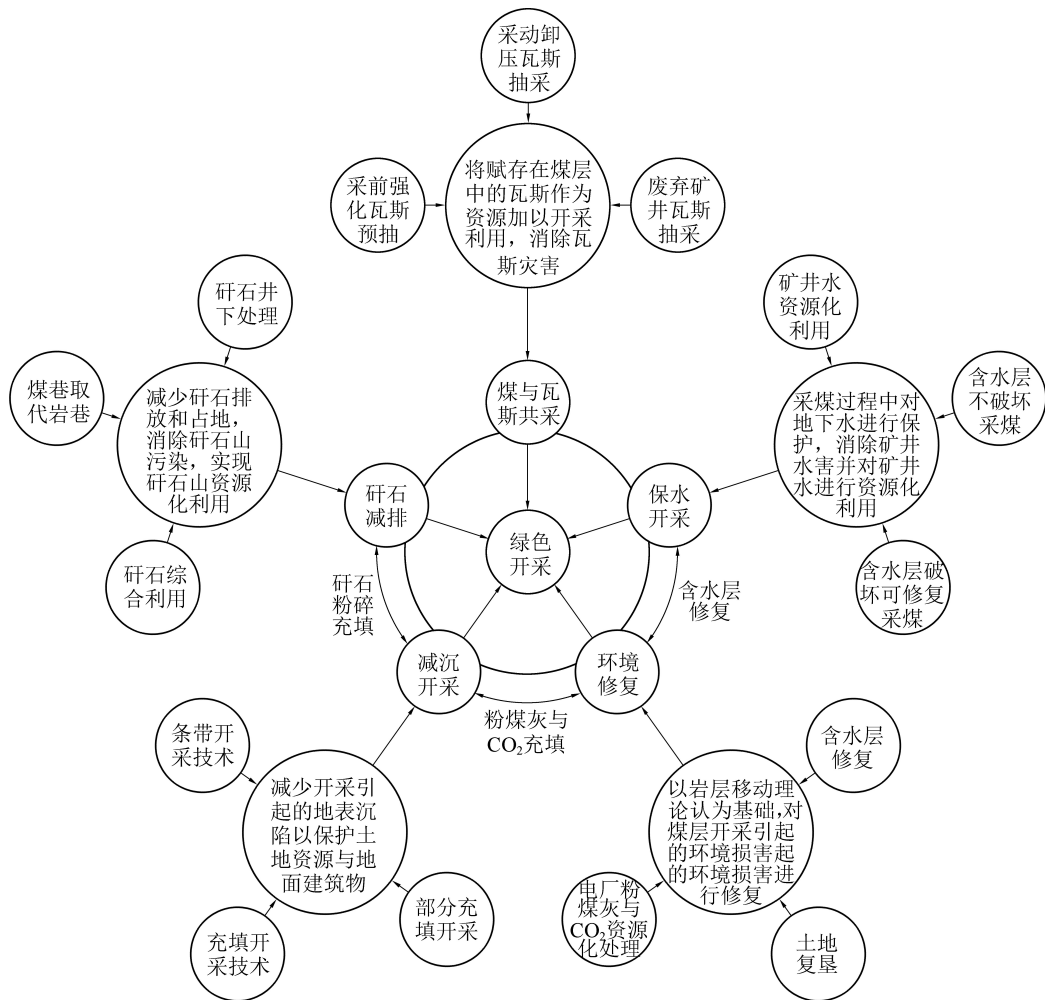


图 1 煤矿全生命周期绿色开采技术框架

Fig.1 Green mining technology framework of coal mine life cycle

## 1.2 绿色开采简要历程回顾

1) 绿色开采理念得到采矿界认可。基于我国煤炭开采实践及问题,钱鸣高院士于 2000 年提出了绿色开采理念,并在多个学术会议场合进行了介绍。2003 年,在《中国矿业大学学报》正式发表论文《煤矿绿色开采技术》<sup>[1]</sup>。2004 年,国际著名采矿专家 A.K.Ghose 向钱鸣高院士和笔者约稿,在其主编的 *Journal of Mines, Metals & Fuels* 期刊上发表绿色开采技术的论文 *Green Mining Techniques in the Coal*

*Mines of China*<sup>[2]</sup>,并以编者按推介绿色开采概念。在编者按中<sup>[13]</sup>,A.K.Ghose 提到“在采矿工业词汇中,我们现在可以在一系列智能的、清洁的以及其他已经成为采矿术语的名词中再加入另一个词汇——绿色开采。绿色开采不仅是一个新的术语,同时还试图对煤矿开采及其对环境的多种影响的整体认识引入一个统一的概念。本期发表了矿业大学钱鸣高院士、许家林教授等撰写的绿色开采技术相关的论文。这篇论文相当重要,因为首次提出了如何



利用绿色开采技术来最大限度地减轻煤矿开采引起的诸多影响。中国专家在绿色开采技术方面的创新性发展是基于‘关键层’理论的。关键层理论巧妙地把岩层移动和上覆断裂岩层中瓦斯和水的渗流和流动结合在一起。他们同样还促进了一系列技术的发展,比如采空区充填、条带开采和覆岩离层注浆等来保护地表建筑。这些技术为减少采矿对环境的破坏提供了方向,有望改变煤矿开采作为环境掠夺者的面貌。本刊对作者提出的具有重大前景的绿色开采的创新概念表示赞赏!”

2003年Google网站上搜索“Green Mining”,没有相关结果。2017再在Google网站上搜索“Green Mining”时,相关结果达到22 500万条,到2020年7月已高达41 900万条。同样“绿色开采”一词也已成为我国采矿通用词汇,在中国知网(CNKI)中搜索“绿色开采”时,相关文献达到7 514篇。

2)举办“绿色开采理论与实践”国际研讨会(ISGM)。2008年,由中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室主办的首届“绿色开采理论与实践”国际研讨会(ISGM)召开,迄今共召开十一届。分别就充填开采、保水采煤、煤与瓦斯共采等主题轮流进行国际研讨,有力促进了绿色开采技术的国际交流。

3)开设《煤矿绿色开采技术》课程。2009年,中国矿业大学率先在采矿工程本科教学中开设《煤矿绿色开采技术》课程,2011年笔者主编出版了《煤矿绿色开采》教材<sup>[11]</sup>,已在多个高校得到使用。

4)绿色开采成为国家基本政策。随着绿色开采概念的普及和推广,国家相关部门逐步将煤矿绿色开采纳入国家行业发展政策,先后出台了相关鼓励和支持政策,如:瓦斯抽采利用、充填开采等财政优惠政策<sup>[14-16]</sup>,出台了“绿色矿山建设标准”<sup>[17]</sup>等。

5)绿色开采技术创新研发百花齐放。绿色开采不仅在理念上成为行业共识,绿色开采技术创新与实践也百花齐放、成效显著,在煤与瓦斯共采、保水开采、充填开采等技术方面取得了重大进展。限于篇幅,主要结合笔者所在的中国矿业大学“岩层移动与绿色开采”课题组在绿色开采技术研究方面取得的进展进行介绍。

## 2 绿色开采研究进展

### 2.1 绿色开采理论基础

#### 2.1.1 基本学术思想

众所周知,由于新中国成立后我国高校学科与专业设置沿袭了前苏联模式,学科与专业划分相对

过细偏窄,可能导致各专业对工程实际问题的研究缺乏整体观,影响工程问题的有效解决。这种情况在煤矿开采中是确实存在的,譬如,传统上采矿工程专业负责井下矿压控制方面的研究,水文地质专业负责矿井水防治方面的研究,矿山测量负责地表沉陷控制方面的研究。通常情况下,它们的研究是相互割裂的,而事实上,矿压、突水、沉陷都是因煤层开采后岩层运动由下往上发展引起的,为了从整体上更好地解决上述问题,需要建立统一的理论基础。岩层控制的关键层理论就是在此背景下提出的<sup>[18]</sup>。关键层在采动覆岩中的作用,上可影响至地表,下可影响至采场和支架,内部影响到采动裂隙与应力的分布和流体的运移,因而它可作为矿山压力、岩层移动及地表沉陷、采动岩体内的瓦斯、水等流体运移研究统一的基础。

关键层理论的基本学术思想主要体现在2个方面:①将覆岩作为整体,研究清楚具体条件下煤层开采后岩层运动由下往上发展的过程和基本规律,以及其对矿压、流体和沉陷的影响;②抓主要矛盾,即找出覆岩中对岩层运动起控制作用的关键层,避免采用传统研究中对覆岩岩性进行均化处理的方法。这就要求在岩层运动研究中遵循“全柱状”思想,所谓“全柱状”是指包含整个煤系地层中煤层、岩层岩性、层位、厚度等一系列地质信息的全取心的完整钻孔柱状图,而非局部柱状,也不是综合柱状。从钻孔全柱状出发研究岩层控制问题,不能采用统计均化方法处理,而是要找出起控制作用的关键层。

在该学术思想指导下,深入研究并揭示了关键层运动对采动裂隙演化、采场矿山压力、瓦斯卸压运移、地表沉陷的影响规律<sup>[18-28]</sup>,为绿色开采技术研发奠定了基础。下文仅以岩层采动裂隙演化规律为例作简要介绍。

#### 2.1.2 采动裂隙演化规律

煤层开采后引起岩层移动与破断,形成竖向和层间采动裂隙。采动裂隙是开采空洞的传播形式及地下水、瓦斯的流动通道,其演化导致了地表塌陷、突水与瓦斯涌出等工程灾害。采动裂隙演化规律是保水采煤及水害防治、煤与瓦斯共采、覆岩注浆充填减沉等绿色开采技术的理论基础。传统的采动裂隙研究采用岩性均化方法,忽略了覆岩关键层的影响,存在裂隙发育高度与量值预计误差大等问题,导致顶板导水裂隙带高度预计时有失真与异常突水发生、离层量确定不准确及离层注浆充填减沉效果差、覆岩瓦斯卸压范围不清及抽采效果不佳等系列工程问题,制约着绿色开采技术的发展与应用。针对上

述问题,基于关键层理论和全地层结构思想的采动裂隙演化规律研究与预计方法,揭示了竖向破断裂隙与离层裂隙的演化规律,提出了导水裂隙发育高度与离层量的定量预计新方法,提高了预计精确性,指导了保水采煤、煤与瓦斯共采、注浆充填减沉等绿色开采技术研发与实践。主要创新成果如下:

1) 提出了基于关键层位置的导水裂隙带高度预计新方法(图 2)<sup>[20,26]</sup>,具体步骤包括:收集工作面钻孔柱状;采用关键层判别软件对所有钻孔进行关键层位置判别;确定导水裂隙带高度  $h$ ,当主关键层位于  $7 \sim 10$  倍采高  $M$  以内时, $h \geq$  基岩厚度;反之, $h = 7 \sim 10$  倍采高以外第 1 层关键层与煤层的间距。

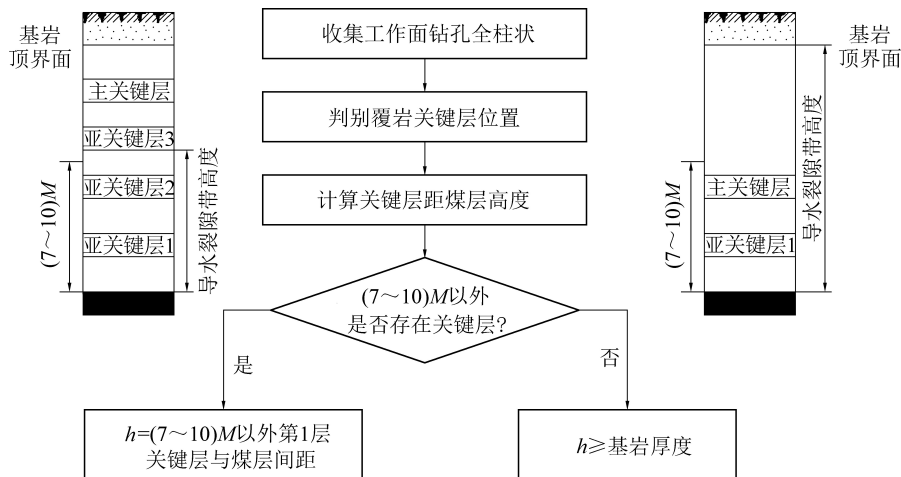


图 2 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法<sup>[26]</sup>

Fig.2 Prediction method for the height of fractured water-conducting zone by key strata location

键层破断前离层量不断增大,最大值处于采空区中部;关键层破断后,离层呈“O”形圈分布,采空区中部覆岩离层趋于闭合,采空区两侧关键层下各保持 1 个离层区,但离层量大幅缩小。煤层采高与关键层周期破断距是影响“O”形圈宽度的主要因素<sup>[20]</sup>。采动裂隙“O”形圈是卸压瓦斯流动通道和富集区,卸压瓦斯抽采钻孔(巷道)应布置到该区域。

3) 揭示了覆岩卸荷碎胀累积效应及其对离层的抑制作用<sup>[28]</sup>。研究发现,尽管关键层下存在离层,但其量值通常不足采高的 10%,这是由于煤层开采后覆岩出现卸荷膨胀并不断累积,从而抑制了离层的产生。采动中卸荷煤岩膨胀总量随覆岩卸荷高度变化而不断累积的现象称为覆岩卸荷膨胀累积效应。建立了覆岩卸荷碎胀累积效应模型,将覆岩划分为塑性变形区(垮落带)与弹性膨胀区(裂隙带与弯曲下沉带),推导了垮落带碎胀煤岩的塑性变形与裂隙带及弯曲下沉带的弹性膨胀量,进而确定覆岩卸荷膨胀累积总量,并计算离层量。覆岩卸荷膨胀累积效应表明,若仅充填自然状态下的离层区,

新方法充分反映了关键层的影响,弥补了将岩层均化为坚硬、中硬、软弱和极软弱的不足,预计精度更高,且突破了传统方法无法用于单层采厚  $> 3$  m、放顶煤开采条件的限制,尤其是当主关键层位于  $7 \sim 10$  倍采高以内时,新计算方法能对导水裂隙发育至基岩顶部的异常情况作出判别。该方法在保水采煤及突水防治、煤与瓦斯共采、注浆充填减沉中均已成功应用。

2) 揭示了关键层对离层演化的影响规律。研究表明,离层主要出现在各关键层下方,随关键层破断由下向上不断发展,其最大发育高度止于主关键层。关键层下离层分布呈 2 个阶段发展规律,即关

充填量十分有限,因而减沉率低,这是我国早期离层区注浆充填未能有效控制下沉的主要原因。在深入揭示卸荷膨胀累积效应对离层的抑制作用基础上,提出了利用注浆充填的压实作用将卸荷膨胀累积量转化为可注入空间的注浆充填新方法,指导了覆岩隔离注浆充填技术的研发。

4) 基于覆岩采动裂隙演化规律,提出了可将覆岩划分为“导气裂隙带”、“卸压解吸带”和“不易解吸带”的瓦斯卸压抽采的“三带”原理<sup>[20,29]</sup>,为卸压瓦斯抽采预测和设计奠定了理论基础,指导了煤与瓦斯共采技术实践。

## 2.2 保水采煤技术

水是维持区域生态环境稳定的关键要素之一,因而,研究实施煤炭开采过程中的水资源保护与利用技术(即保水采煤技术)是实现煤矿绿色开采的重要前提。由于采动岩层的移动和破坏,煤层开采对地下水体的扰动不可避免,轻者会改变含水层底界面标高和径流方向,重者则会破坏甚至疏干水体,当破坏水体的涌水量较大时将引发矿井突水灾害。

因此,保水采煤应包括下列 4 个层次的内涵<sup>[1,11]</sup>:首先,要避免采煤工作面发生突水事故,实现工作面安全高效开采;其次,采取技术措施减少或避免采煤对含水层的破坏,保护地下水资源;第三,针对采动破坏后的含水层采取人工修复或促进其自修复的措施,促使含水层再次恢复到原始赋存状态;第四,要对采动漏失水资源(即矿井疏排水)进行资源化利用,一定程度上实现“煤水共采”。以下即是从这 4 方面内涵开展的相关理论与技术研究进展的总结。

### 2.2.1 采场突水灾害防治

突水是指井下涌水量增大到超出矿井或回采工作面的排水能力而引起重大损失的灾害性事故。按照突水水源位置的不同,可将采场突水灾害划分为 3 种类型(图 3):顶板含水层突水、底板含水层突水、以及老采空区突水;其中,老采空区突水又分为邻近老采空区的突水和上覆老采空区的突水。无论哪种类型的突水,其灾害发生都需满足 2 点先决条件:一是采动裂隙通道沟通地层含水层;二是含水层的富水性和渗透性较高。所以,防治采场突水灾害关键在于含水层(地层水体)富水特性评价以及导水通道发育范围(顶板导水裂隙带、底板导水破坏带)的确定。围绕这一关键科学问题,许多学者开展了研究。

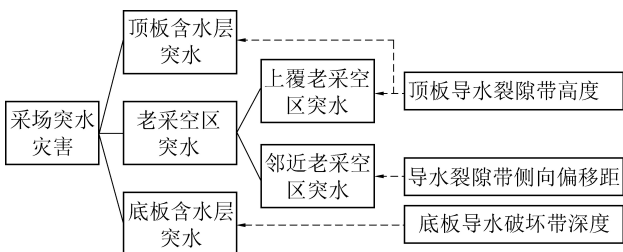


图 3 采场突水灾害分类及其防治的理论依据

Fig.3 Classification for water inrush in stope and its prevention theoretical basis

覆岩导水裂隙带高度(以下简称导高)是科学评价顶板含水层或上覆老采空区突水危险性的重要依据,因而对其理论预计或判别方法的研究显得尤为重要。我国《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中虽给出了导水裂隙带高度计算的公式<sup>[30]</sup>,但由于它笼统地将覆岩进行均化分类,忽略了关键层的控制作用,导致在某些特定开采条件下的预计偏差较大,甚至发生突水事故<sup>[31-36]</sup>。由此笔者提出了“基于关键层位置的导水裂隙带高度预计新方法”(图 2),并得到现场多个工程案例的验证,同时指导了松散承压含水层下采煤、覆岩离层区积水等特殊开采条件下的异常突水灾害防治实践<sup>[20,31-35]</sup>。考虑到覆岩导水裂隙通常向两

侧边界延伸发育,文献[20,37]通过数值模拟手段对导水裂隙带侧向偏移距的影响规律进行了研究,并得出导水裂隙带马鞍形轮廓线的最高点位于开采边界煤壁外侧斜上方,导水裂隙带侧向偏移距随采高和采深的增加而增加;据此指导了阳泉三矿邻近老采空区的水害防治实践。根据顶板导水裂隙发育充水含水层富水性分析,武强等<sup>[38]</sup>提出了解决顶板涌(突)水条件定量评价的“三图-双预测法”,有效指导了开滦、台格庙等矿区的水害防治实践。隋旺华等<sup>[39]</sup>等通过试验研究了松散含水层下采煤时松散层突水溃砂与水力坡度和裂缝宽度的关系,得出了覆岩垮裂带通过松散土层时发生渗透变形破坏的临界水力坡度与土层粒度成分、物理力学性质和裂缝尺寸的关系。

对于底板含水层上的保水采煤,目前主要集中于底板承压含水层的突水灾害防治(如华东矿区广泛赋存的奥陶系石灰岩高压承压含水层)。主要通过底板导水破坏带深度的理论预计,采用“突水系数法”评价底板突水危险性;同时,由传统的留设防水煤岩柱或调整开采参数的水害防治思路,逐步发展形成了利用钻孔注浆加固底板含水层的水害防治技术和方法,并在我国华东、华北、西北等地得到成功应用<sup>[40]</sup>。

### 2.2.2 含水层不破坏采煤

合理控制煤层开采参数及其开采强度可降低上覆岩层的破坏程度,避免导水裂隙沟通含水层,实现含水层的原位保护。王双明等<sup>[41]</sup>,范立民等<sup>[42]</sup>利用煤层顶板含水层等厚线图、顶板隔水层厚度等值线图和导水裂隙带发育高度等值线图这“三图”,对榆神矿区萨拉乌苏组含水层开展了地质分区的保水采煤研究,根据采煤对萨拉乌苏组地下水影响程度,将榆神府矿区划分为 4 个分区,即贫水开采区、保水限定开采区、可控保水开采区和自然保水开采区。张东升等<sup>[43]</sup>指出必须充分考虑区域水资源承载力进行采煤设计,包括矿井规划、产能设计、以及采煤工艺选择和工艺配套等。经过多年的研究与实践,目前已形成了以限高、充填、条带、短壁或房柱等开采方式<sup>[44-47]</sup>为主的导高控制与含水层保护方法。2019 年,陕西省颁布了 DB61/T 1295—2019《保水采煤技术规范》,给出了保水采煤技术的定义、范围以及榆神矿区导水裂隙带高度的经验预测公式。据文献[48]可知,在陕北煤炭资源丰富地区高强度开采条件下,采用充填、限高、窄条带等保水采煤技术,实现了采煤与保水的统一,尤其以榆神矿区显著。随着现代化矿井开采强度的不断加大,对于上含水



层无法避免受采动破坏的开采条件,研究其破坏后的再恢复技术,仍需要进一步研究。

### 2.2.3 采动破坏含水层的再恢复

若地层含水层的采动破坏无法避免,则可选择采用与前述底板注浆加固相类似的方式,对覆岩导水裂隙通道实施人工封堵,以阻隔含水层的水漏失通道,实现含水层的再恢复。然而,这种人工封堵的工艺该如何实施、又该采用何种材料进行封堵等问题尚有待研究。

目前已有研究发现<sup>[11,49]</sup>,受采动破坏的含水层在有些条件下能逐步自我恢复。如神东矿区补连塔煤矿 1-2 煤四盘区开采时,覆岩导水裂隙直接发育至基岩顶界面,导致地表水文观测钻孔内水全部漏失;而随着工作面开采的继续推进,导水裂隙随岩层破断回转而逐渐闭合,加上松散层中的沙和岩层中黏土矿物的弥合作用,裂隙的导水能力显著下降,引起钻孔内水位又出现逐步恢复的现象(图 4)。由此可见,一定条件下,采动裂隙的自我弥合修复作用能促使采动破坏含水层的再恢复,合理利用这一规律科学选取导水裂隙通道的封堵对策(人工注浆封堵还是任其自然弥合),对于高效促进含水层的再恢复具有重要意义。

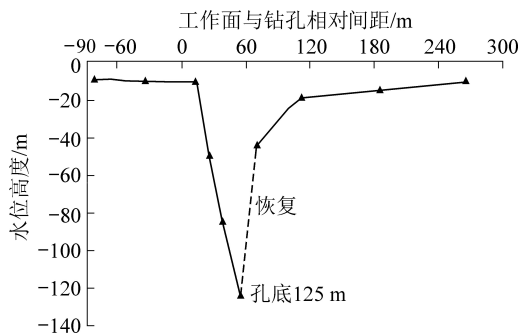


图 4 补连塔煤矿 12401 工作面水文观测孔水位变化曲线<sup>[11]</sup>

Fig.4 Curve of water level at the hydrologic observation borehole in No.12401 mining face of Bulianta Mine<sup>[11]</sup>

### 2.2.4 矿井水转移储存与循环利用

采动漏失的水资源以及井下人为疏排的矿井水都是宝贵的资源,必须加以利用。尤其对于我国西北部干旱半干旱的缺水矿区,通过对采动漏失水资源的合理储存与利用,一定程度上可实现“煤水共采”。目前,神东矿区在矿井水资源转移储存与循环利用方面做得较好。经过 20 多年的研究与实践,研发形成了煤矿地下水库的保水技术体系<sup>[50-52]</sup>,将井下采空区作为水资源储存和净化的空间,以开采引起的导水裂隙作为水库水源的补给通道,将采动破坏的水资源汇集并储存至井下采空区,实现矿井水的有效保护与循环利用。目前该技术已在神东等

矿区得到推广使用,为西部缺水矿区的保水采煤提供了新的技术途径。

此外,将矿井疏排水经净化处理后重新回灌至地表松散层,也是一种较好的水资源转移储存与利用的对策。目前主要采用钻井灌注和沟渠(或水池)入渗等方式进行回灌<sup>[53]</sup>;这种方式对于抬升松散层中的水位标高、改善地表植被的取水环境等都具有良好的促进作用。

## 2.3 煤与瓦斯共采技术

在传统的煤矿开采过程中,煤层瓦斯被人们视为一种灾害性气体,这是因为煤层瓦斯不但具有爆炸危险性而且具有煤与瓦斯突出危险性;另外,由于煤层瓦斯是一种洁净能源,可用于居民生活、发电和工业原料等,煤层瓦斯的大量直接排放浪费了大量的能源资源;同时,甲烷是一种比二氧化碳的温室效应大 20 倍的气体,煤层瓦斯的大量直接排放严重污染了大气环境。因此,将瓦斯作为一种资源抽采出来并加以利用,是解决该问题的根本出路。

### 2.3.1 采前瓦斯抽采技术

我国 95% 以上的高瓦斯和突出矿井所开采的煤层属于低渗透煤层,煤层瓦斯预抽效果差,如何提高煤层渗透率是解决上述问题的关键。煤层属于非贯通裂隙岩体,其结构特性和力学特性非常复杂,若要增加其透气性,必须对低渗透煤体进行改造。目前,提高煤层渗透率的途径有 2 种。

1) 第 1 种是通过改变含瓦斯煤体所处的力学状态,使煤体发生塑性破坏,张开原生裂隙,产生新的裂隙。这类方法主要有水力压裂法、爆破预裂增透法、水力割缝法、水力冲孔法、液氮压裂法。在水力压裂方面,黄炳香等<sup>[54]</sup>提出了水力爆破致裂弱化与增透方法,李贤忠<sup>[55]</sup>研究得出脉动水力压裂能以较小的脉动压力取得常规水力压裂的效果。在松动爆破方面,建立了超临界二氧化碳气爆致裂煤体的冲击动力学模型,揭示了粉碎区和裂隙区的破坏规律和形成机理<sup>[56]</sup>;借助数值模拟揭示了不同孔距爆破破应力波的动态演变规律<sup>[57]</sup>。刘健等<sup>[58]</sup>提出定向聚能爆破的爆炸能量主要集中在聚能方向,能够在聚能方向侵彻煤体形成较大的裂缝,产生的裂缝长度远大于非聚能方向。在高压气体爆破增透方面,高杰等<sup>[59]</sup>通过试验获得了不同爆破条件下高压氮气爆破致裂过程中动态变化规律。关于水力割缝法,张其智等<sup>[60]</sup>指出割缝宽度不同造成周围煤体位移和应力显著变化,割缝宽度增大煤体受扰动影响范围增大,加大了煤体裂隙扩展,提高了割缝煤体的卸压效果。关于水力冲孔法,构建了水力冲孔瓦斯



增透理论模型,并基于电法响应试验平台构建了水力冲孔评价系统<sup>[61]</sup>。在液氮压裂方面,翟成等<sup>[62]</sup>通过液氮对煤体进行冻融试验,获得了单次冻融与循环冻融作用下煤体渗透率变化规律。以上这些方法和技术,在低渗透煤层增透实践中取得了一定的效果。

2)第2种通过各种物理场作用于含瓦斯煤层,如微波、声震等,使得含瓦斯煤体在各物理场作用下萌生新的裂隙,从而提高低渗透煤体的渗透率。在微波增透法方面,胡国忠等<sup>[63-65]</sup>认为可控源微波场对煤体具有电磁辐射热效应与损伤效应,使煤体的原生裂隙扩展、新裂隙产生,瓦斯运移通道更通畅;温志辉等<sup>[66]</sup>研究发现微波的辐照作用改变了煤样的比表面积和孔隙结构的分布规律。崔宏达等<sup>[67]</sup>建立了微波加热时煤层气热-流-固耦合扩散渗流数学模型,并进行了数值计算,证明了数学模型的正确性及微波加热开采煤层气的合理性。关于声震法,肖晓春等<sup>[68]</sup>通过CT观测试验很好地证实了超声的机械震碎作用,超声波作用后的煤体裂隙数目逐渐增多,形成了新的裂隙网络结构,超声波作用后的煤层渗透率提高135%~169%。易俊等<sup>[69]</sup>认为超声作用可以明显地提高煤-气系统的温度,提高煤层的孔隙度,增大煤层瓦斯流动的渗透率,降低煤层骨架的应力。以上这些方法,为低渗透煤层增透提供了新的技术途径。

### 2.3.2 采动卸压瓦斯抽采技术

1)邻近层采动卸压瓦斯抽采技术。保护层开采能够对被保护层进行卸压,增大煤层的透气性,有利于瓦斯的解吸和运移,降低被保护层瓦斯压力和含量,煤层开采后,周围煤岩体的应力-应变状态改变,使煤岩体卸压并产生采动裂隙,煤层透气性增大。在《煤矿安全规程》中明确规定:“在开采具有煤与瓦斯突出的煤层群时,必须首先开采保护层,开采保护层后,在被保护层中受到保护的区域按无煤与瓦斯突出危险性煤层开采,在未受到保护的区域应该采取防治突出措施”。在国内,我国从1958年开始在北票和重庆地区进行试验,此后该技术便在全国推广开来,应用成效显著。然而,我国很多低透气性煤层并不具备开采保护层的条件,如何防治邻近层卸压瓦斯涌入导致的瓦斯事故便成为该类矿井亟待解决的关键技术难题。笔者以采动裂隙的“O”形圈理论为基础,提出了走向高抽巷、穿层钻孔、后高抽立眼和局部高抽巷抽采邻近层卸压瓦斯技术,在采动上覆瓦斯卸压运移“三带”理论的指导下,研究开发了地面钻井抽采上覆远距离卸压解吸带瓦斯

技术(图5)。上述卸压瓦斯抽采技术在阳泉、淮北矿区得到推广应用,取得显著的卸压瓦斯抽采效果。

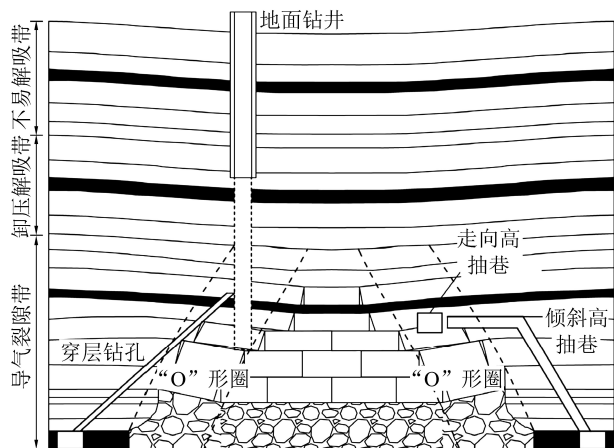


图5 邻近层卸压瓦斯抽采钻孔布置

Fig.5 Layout of boreholes for pressure relief gas drainage in adjacent strata

2)本煤层采动卸压瓦斯抽采技术。随着煤炭的采出,工作面的不断推进,工作面前方煤体的水平应力表现为卸载过程,而在垂直方向上煤体则依次经历了原岩应力阶段、超前支承压力加载阶段及超前支承压力峰值后的卸载阶段。在超前支承压力峰值后的卸载阶段,煤体渗透率逐渐增大,尤其在卸载阶段后期,煤壁附近的煤体因水平应力降低而产生破坏,煤体渗透率可增加2~3个数量级,表现为“卸压增流”效应和“卸压增透”效应。笔者揭示了采动作用下低透气性本煤层瓦斯超前卸压机理,提出了顺层长钻孔抽采本煤层超前卸压瓦斯技术、大采长工作面煤壁短钻孔抽采本煤层超前卸压瓦斯技术和基于超前支承压力影响段间隔钻孔注水的综放工作面减尘与本煤层超前卸压瓦斯抽采的综合技术<sup>[70]</sup>等一系列回采工作面本煤层采动卸压瓦斯抽采与治理技术,提高了本煤层瓦斯资源抽采率和瓦斯抽采量,解决了工作面开采时的瓦斯超限难题。

### 2.3.3 废弃采空区瓦斯抽采技术

近年来,封闭采空区瓦斯地面开发技术在比利时、德国、英国等得到了较大的发展,而我国封闭采空区的瓦斯开发技术研究仅处于起步阶段。21世纪初,中英联合开展了“中国报废矿井瓦斯抽放与利用”项目,借鉴英国在封闭采空区瓦斯开发利用方面的经验和技術,在资源预测、储层描述、开发利用前景等方面展开了相应的理论研究工作<sup>[71-75]</sup>,为我国封闭采空区瓦斯抽采理论的发展奠定了基础。尽管我国逐步认识到封闭采空区瓦斯资源的重要性,在封闭采空区瓦斯储层描述、赋存范围和储量预测方面取一些进展,但对该领域的涉及的老采空区

地面井位选择、老采空区瓦斯渗流状态及老采空区瓦斯抽采工程实践等没有进行深入的理论与实践。针对上述问题,秦伟等<sup>[76]</sup>建立了基于卸压瓦斯运移“三带”理论的封闭采空区瓦斯储量计算方法和地面钻井抽采条件下封闭采空区瓦斯渗流数学模型,揭示了不同井位条件下的封闭采空区气体流态和地面井控制范围,确定了封闭采空区瓦斯抽采的合理参数。研究成果指导了阳泉矿区封闭采空区瓦斯抽采工程试验,取得较好的老采空区瓦斯抽采效果。

## 2.4 充填减沉开采技术

沉陷控制问题中首先涉及的是建筑物下压煤开采,一直是我国煤矿所面临的重大技术难题,尤其是在人口密集、经济较为发展的东部矿区。传统长壁开采方法造成了严重的地表与建筑物损害,而搬迁开采方法又面临成本高昂、实施难度极大的困难,造成了矿区内建筑物压煤与煤矿开采的尖锐矛盾。因此,减沉开采技术成为绿色开采的重要组成部分。

部分开采与充填开采是减沉开采的 2 个主要技术途径,前者是通过留设一部分煤柱支撑覆岩、控制地表下沉,后者是利用人工构筑物支撑覆岩,从而减少一部分煤柱以提高采出率。在我国,部分开采方法主要为条带开采,也是早期形成的建筑物下压煤开采方法,但由于所允许的工作面宽度小(一般<50 m)、采出率低(<50%)、生产效率低,该方法的应用逐渐减少。

条带开采的淡出也与充填开采的快速发展密切相关。充填是指利用各种材料填充开采导致的采空区、冒落区或覆岩离层区,煤矿充填开采的主要目的是控制岩层移动与地表沉陷<sup>[77]</sup>。狭义的充填多指采空区充填,由于其通常追求将整个开采区域充实,故可将其称为全部充填。尽管早在 20 世纪 60 年代中国就开始了采空区水砂充填开采试验,但近十余年充填采煤技术才迎来了快速发展,形成了以固体<sup>[78]</sup>、膏体<sup>[79]</sup>、高水材料<sup>[80]</sup>等为代表性的多种采空区充填采煤技术,在充填材料选择范围上得到了一定拓宽,充填工艺与装备水平也得到了大幅提高,并在一些矿井进行了成功应用。在采宽得到控制的条件下,全部充填能够有效控制地表下沉,但从应用情况来看,存在成本高、充填与采煤干扰严重、充填采煤效率低的问题。

从发展历程来看,充填并非采矿行业内的一个新名词,但是在绿色开采理论的框架下,它被赋予了丰富而崭新的内涵,尤其是部分充填的提出<sup>[81-83]</sup>,从根本上强调了充填的 3 个方面本质:充填目的是

控制岩层与地表沉陷;充填减沉原理必须要充分利用岩层(关键层)自承载能力;充填方式要充分考虑岩层移动中采动裂(空)隙的演化特征<sup>[81]</sup>。具体而言,部分充填是指在采空区的局部区域实施充填,或者对直接顶垮落后形成的冒落区或覆岩离层区实施充填,利用充填体、隔离煤柱与覆岩关键层结构的联合控制作用实现减沉目的(图 6)。在这些理念指导下,部分充填得到了长足发展。从控制覆岩关键层稳定性出发,基于采动空隙的传播与演化过程,研发了 5 种部分充填开采技术模式:覆岩隔离注浆充填<sup>[84-85]</sup>、短壁冒落区嗣后充填、长壁墩柱同步充填<sup>[86]</sup>、条带充填<sup>[83]</sup>等技术,充填范围与作业方式更加灵活,充填与开采效率大幅提升,将充填开采推向了新高度。

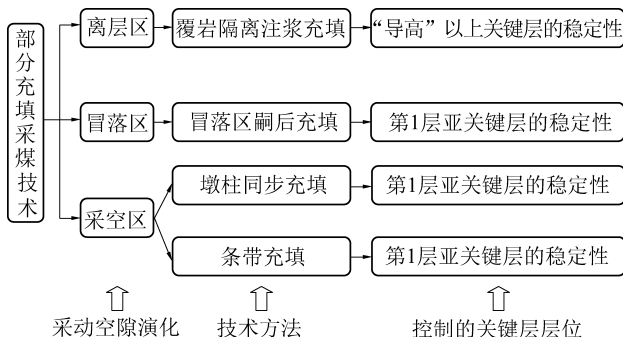


图 6 部分充填采煤技术框架<sup>[86]</sup>

Fig.6 Technical framework of coal mining with partial backfilling<sup>[86]</sup>

自部分充填提出以来,在理论、技术与实践方面得到了不断发展,在淮北、皖北、淄博、阳泉等矿区建筑物下压煤开采中进行了成功应用,取得了显著的成效。尤其是覆岩隔离注浆充填,与全部充填相比,其成本降低 50%,单工作面年产量提高了 2 倍,极大地降低了充填与采煤干扰问题。然而,也应当看到,由于煤矿地质条件的复杂性,地层结构与开采条件差异极大,如何针对不同区域条件确定出最有效的充填方法与实施方案,是部分充填推广应用需要持续研究的问题。

## 3 绿色开采研究展望

### 3.1 岩层运动基础理论的深化研究

掌握采动岩层运动规律是确保煤炭资源安全绿色高效开采的关键所在。多年来,国内外众多学者一直致力于采动岩层运动规律的研究,并且逐步形成了经典理论,极大地促进了安全高效开采的进步与发展。随着煤层开采向大采高和大采深发展,经典的岩层运动理论的适用条件发生变化,因此需要深化基础理论研究。例如,经典矿压理论致力于研



究基本顶破断运动规律及其对采场矿压显现的影响,但并未研究高位关键层破断运动规律及其对采场矿压显现的影响,未能揭示特厚煤层开采影响采场矿压显现的临界关键层高度。因此,唯有建立下自井下矿压、中至覆岩运移、上到地表沉陷的“三位一体”监测体系,实现“井下矿压-覆岩运移-地表沉陷”的一体化研究,才能掌握整个采动覆岩破断运动规律及其对采场矿压的作用机制,从而为特厚煤层开采强矿压显现提供行之有效的控制对策。再如,主关键层对地表移动变形起到控制作用,但现有研究还没有完整构建出破断和未破断关键层位移的计算方法,也没有建立简洁有效的基于主关键层位移方程的松散层移动变形计算模型。因此,岩层运动基础理论需要不断完备,以适应不断变化的煤矿生产和地质条件。

### 3.2 不同矿区绿色开采技术模式确定

我国不同矿区的资源、环境条件复杂、问题多样化,需要有针对性地应用煤矿绿色开采技术。例如,华东为我国经济发达地区,其煤炭资源逐步枯竭,而该区域建筑物与村庄密布,压占煤炭资源严重,搬迁成本逐年增加,使矿业可持续发展面临较大挑战;另一方面,华东区煤矿开采深度逐步加大,部分已达1 000 m以上,矿井动力灾害日益严重。因此,在华东地区,绿色开采宜重点研究相适应的充填采煤技术,逐步实现不充填不能采煤的要求,建立“以充定产”的煤炭科学开发模式。

晋陕蒙宁甘为干旱半干旱的缺水地区,当前和未来都是我国煤炭的主产区,势必加剧地下水破坏及其引发的生态环境灾害。因此,在晋陕蒙宁甘区,绿色开采应重点研究适宜的保水采煤技术,逐步实现“根据煤矿区域地下水资源保护要求确定煤炭最大产能”的目标,建立“以水定产”的煤炭科学开发模式。

在高瓦斯矿区,绿色开采重点研究合适的煤与瓦斯共采技术,提高瓦斯抽采率与抽采瓦斯的综合利用率,建立“以抽定产”的煤炭科学开发模式。

在所有矿区,煤矿绿色开采的内容中都必须包含矸石减排。从在新井设计开始,尽量以煤巷代替岩巷,减少煤矿矸石产量。同时,开展煤矿矸石井下处理技术研究,实现矸石不出井。对煤矿现有矸石进行资源化综合利用,逐步消除所有煤矿的矸石山。建立“零矸石排放开采”的煤炭科学开发模式。

### 3.3 建立煤矿绿色开采的评价指标体系

为了评价煤矿对绿色开采技术的应用程度和效果,提出了绿色开采度的概念。绿色开采度是指矿井在煤炭开发过程中,通过绿色开采技术对矸石排

放、地下水破坏、瓦斯排放、土地破坏等环境负外部效应的减小程度,是对矿井实施绿色开采的程度和效果进行定量评价的指标。矸石减排绿色开采度可定义为:采用相关矸石减排技术措施后比未采取措施时的矸石排放减少量与不采取措施时的矸石总排放量的比值;瓦斯利用绿色开采度可定义为:煤层瓦斯利用量占煤层瓦斯抽采量与煤层瓦斯风排量之和的百分比;土地保护绿色开采度可定义为:采用相关的井下开采技术保护土地不受破坏的面积与地表破坏后土地复垦折算面积的总和与不采取措施时的土地破坏总面积的比值。针对不同类型和特点的煤矿绿色开采度应有所侧重和不同考核重点。对晋陕蒙宁甘区等干旱半干旱的缺水地区绿色开采度考核重点应在保水采煤方面,考核其“以水定产”的实现程度;对华东地区煤矿绿色开采度考核重点应在减沉开采方面,考核其“以充定产”的实现程度;对高瓦斯煤矿绿色开采度考核重点应在煤与瓦斯共采方面,考核其“以抽定产”的实现程度;所有矿井都应将矸石减排作为绿色开采度的主要考核指标。具体的绿色开采度的指标计量方法和评价方法有待深入研究。

### 3.4 煤矿全生命周期的绿色开采研究

在煤矿的“规划-设计-建设-生产-闭坑”的全生命周期中规划绿色开采,尤其强调在矿井规划与设计阶段,需要在国家《煤炭工业矿井设计规范》中加以明确。建立“煤矿全生命周期绿色开采”的科学开发模式。以煤与瓦斯共采为例,在开采之前就要根据开采煤层的瓦斯赋存特点来设计瓦斯抽采方案,在煤层开采过程中充分利用采动卸压与强化抽采技术手段提高瓦斯抽采量,在矿井封闭后继续进行废弃矿井瓦斯抽采,在煤矿的全生命周期过程中贯彻绿色开采理念。又如,在煤层开采之前就应对采动地表下沉进行评估,根据评估结果确定适宜的减沉技术方案,开采过程中有针对性地对地表沉陷进行控制,开采后对采动损害进行必要的修复。再如,在煤层开采之前便要根据采动裂隙发育形态进行判别,根据判别结果确定煤层开采技术参数,在煤层开采结束后采用必要手段对含水层进行修复,以恢复因采煤而损害的地下水循环过程。

### 3.5 高效与低成本的新技术研发

煤矿若要实现绿色开采就必须增加资金投入引进绿色开采技术。目前,绿色开采技术的全面应用成本较高,尤其在煤炭经济形势急转直下的大背景下,煤矿投入大量资金全面实现绿色开采的积极性不高、困难较大,因此开发新型的高效低成本绿色开采技术非常迫切。以煤与瓦斯共采为例,首先需要



加大煤层瓦斯吸附、解吸、扩散动力学特性及其影响因素研究,在基础研究成果的指导下开发新型煤层增透技术,改善煤层瓦斯预抽效果;其次要充分利用煤层开采引起的采动卸压作用,研发基于采动卸压的低透气性煤层瓦斯抽采新技术,提高卸压瓦斯抽采量;最后要重视废弃矿井瓦斯资源和废弃矿井地下空间利用,研究废弃矿井地下气库的产气-储气-用气的基础理论和应用技术。

## 4 结 论

1)绿色开采是解决煤矿采动损害与环境问题的根本途径。绿色开采以关键层思想为理论基础,通过研究岩层移动与采动裂隙规律,揭示各种采动损害的实质,进而研发基于岩层移动的针对性绿色开采技术。

2)绿色开采率先对煤炭开采的科学方式进行了技术层面诠释,可以说是科学采矿的发端。自提出以来,保水采煤、煤与瓦斯共采、充填减沉等均取得了显著进展与成效。在理论方面取得了系列重要成果,如基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法、瓦斯卸压运移的新“三带”理论、覆岩卸荷膨胀累积效应,在技术方面涌现了多样化的创新实施模式,如部分充填技术等。

3)现有绿色开采技术尚不完全适应行业当前的条件与形势,需要在深化采动岩层运动规律研究、探索适合不同矿区特点的绿色开采技术模式、煤矿全生命周期绿色开采设计、高效率 and 低成本的绿色开采技术研发等方面进一步研究,以适应煤炭行业不断发展的需求。

致谢:衷心感谢中国工程院院士钱鸣高教授对研究工作的指导;感谢中国矿业大学“岩层移动与绿色开采”课题组朱卫兵副教授、胡国忠教授、轩大洋博士、秦伟博士、鞠金峰副研究员、王晓振博士、谢建林副研究员所做的工作和帮助。

## 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.  
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [2] XU Jialin, ZHU Weibing, LAI Wenqi, et al. Green mining techniques in the coal mines of China[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004, 52(12): 395-398.
- [3] 钱鸣高.对中国煤炭工业发展的思考[J].中国煤炭,2005,31

(6):5-9.

QIAN Minggao. Consideration on the development of China's coal industry[J]. China Coal, 2005, 31(6): 5-9.

- [4] 钱鸣高,许家林.煤炭工业发展面临几个问题的讨论[J].采矿与安全工程学报,2006,23(2):127-132.

QIAN Minggao, XU Jialin. Discussion of several issues concerning the development of coal industry in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 127-132.

- [5] 钱鸣高.煤炭产业特点与科学发展[J].中国煤炭,2006,32(11):5-8.

QIAN Minggao. Characteristics of coal industry and sustainable development[J]. China Coal, 2006, 32(11): 5-8.

- [6] 许家林,钱鸣高.绿色开采的理念与技术框架[J].科技导报,2007,25(7):61-65.

XU Jialin, QIAN Minggao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(7): 61-65.

- [7] 钱鸣高.煤炭的科学开采及有关问题的讨论[J].中国煤炭,2008,34(8):5-9.

QIAN Minggao. On scientized coal mining[J]. China Coal, 2008, 34(8): 5-9.

- [8] 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.

- [9] 钱鸣高,许家林.科学采矿的理念与技术框架[J].中国矿业大学学报(社会科学版),2011,13(3):1-7.

QIAN Minggao, XU Jialin. Concept and technical framework of sustainable mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2011, 13(3): 1-7.

- [10] 钱鸣高.岩层控制与煤炭科学开采文集[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.

- [11] 许家林.煤矿绿色开采[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.

- [12] 钱鸣高,许家林,王家臣.再论煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2018,43(1):1-12.

QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-12.

- [13] GHOSE A K. Green mining: a unifying concept for mining industry[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004, 52(12): 393.

- [14] 财政部,国家税务总局.关于加快煤层气抽采有关税收政策问题的通知(财税[2007]16号)[EB/OL].(2008-05-24)2020-07-09. [http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/2008zcfb/200805/t20080524\\_35002.htm](http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/2008zcfb/200805/t20080524_35002.htm).

- [15] 国家能源局,财政部,国土资源部,等.关于印发《煤矿充填开采工作指导意见》的通知(国能煤炭[2013]19号)[EB/OL].(2013-01-09)2020-07-09. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto85/201302/t20130204\\_1580.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto85/201302/t20130204_1580.htm).

- [16] 财政部,国家税务总局.关于实施煤炭资源税改革的通知(财税[2014]72号)[EB/OL](2015-04-27)2020-07-09. [http://www.mof.gov.cn/gkml/caizhengwengao/wg2014/wg201411/201504/t20150427\\_1223632.htm](http://www.mof.gov.cn/gkml/caizhengwengao/wg2014/wg201411/201504/t20150427_1223632.htm).

- [17] 国土资源部,财政部,环境保护部,等.中国证券监督管理委员会.关于加快建设绿色矿山的实施意见(国土资规[2017]4

- 号) [EB/OL] [2017-05-12], 2020-07-09. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/12/content\\_5192926.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/12/content_5192926.htm).
- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [19] 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, 2010.
- [20] 许家林. 岩层采动裂隙演化规律与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
- [21] 许家林, 钱鸣高, 朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 787-791.  
XU Jialin, QIAN Minggao, ZHU Weibing. Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 787-791.
- [22] 许家林, 连国明, 朱卫兵, 钱鸣高. 深部开采覆岩关键层对地表沉陷的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 686-690.  
XU Jialin, LIAN Guoming, ZHU Weibing, et al. Influence of the key strata in deep mining to mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 686-690.
- [23] 朱卫兵, 许家林, 施喜书, 等. 覆岩主关键层运动对地表沉陷影响的钻孔原位测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 403-409.  
ZHU Weibing, XU Jialin, SHI Xishu, et al. Research on influence of overburden primary key stratum movement on surface subsidence with in-situ drilling test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 403-409.
- [24] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385.  
XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385.
- [25] 王晓振, 许家林, 朱卫兵. 主关键层结构稳定性对导水裂隙带演化的影响研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 606-612.  
WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of primary key stratum structure stability on evolution of water flowing fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 606-612.
- [26] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.  
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [27] 屈庆栋, 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对邻近层瓦斯涌出影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1478-1484.  
QU Qingdong, XU Jialin, QIAN Minggao. Study on influences of key strata movement on gas emissions of adjacent layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1478-1484.
- [28] 许家林, 秦伟, 轩大洋, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 35-43.  
XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, et al. Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 35-43.
- [29] QU Qingdong, XU Jialin, WU Renlun, et al. Three-zone characterisation of coupled strata and gas behaviour in multi-seam mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 78: 91-98.
- [30] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [31] 许家林, 王晓振, 朱卫兵. 松散承压含水层下采煤压架突水机理与防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- [32] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 松散承压含水层下采煤突水机理与防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 333-339.  
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. Study on water-inrush mechanism and prevention during coal mining under unconsolidated confined aquifer[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 333-339.
- [33] 朱卫兵, 王晓振, 孔翔, 等. 覆岩离层区积水引发的采场突水机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 306-311.  
ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, KONG Xiang, et al. Study of mechanism of stope water inrush caused by water accumulation in overburden separation areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 306-311.
- [34] 乔伟, 黄阳, 袁中帮, 等. 巨厚煤层综放开采顶板离层水形成机制及防治方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2076-2084.  
QIAO Wei, HUANG Yang, YUAN Zhongbang, et al. Formation and prediction of water inrush from roof bed separation with full-mechanized caving mining of ultra thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2076-2084.
- [35] 伊茂森, 朱卫兵, 李林, 等. 补连塔煤矿四盘区顶板突水机理及防治[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 241-245.  
YI Maosen, ZHU Weibing, LI Lin, et al. Water-inrush mechanism and prevention for fourth panel roof in Bulianta Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 241-245.
- [36] 檀双英, 吴劲松. 祁东煤矿71煤层7114工作面出水原因分析[J]. 煤矿开采, 2006, 11(3): 64-67.  
TAN Shuangying, WU Jinsong. Cause analysis of water bursting in 7114 mining face of 71 coal seam in Qidong Colliery[J]. Journal of Coal Mining Technology, 2006, 11(3): 64-67.
- [37] 徐光, 许家林, 吕维赞, 等. 采空区顶板导水裂隙侧向边界预测及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 724-730.  
XU Guang, XU Jialin, LYU Weiyun, et al. Lateral boundary prediction of water conducting fracture formed in roof and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 724-730.
- [38] 武强, 黄晓玲, 董东林, 等. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 60-65.  
WU Qiang, HUANG Xiaoling, DONG Donglin, et al. “Three maps-two predictions” method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 60-65.

- [39] 隋旺华,蔡光桃,董青红.近松散层采煤覆岩采动裂缝水砂突涌临界水力坡度试验[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2084-2091.  
SUI Wanghua, CAI Guangtao, DONG Qinghong. Experimental research on critical percolation gradient of quicksand across overburden fissures due to coal mining near unconsolidated soil layers. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2084-2091.
- [40] 张红涛,杨磊,曹佩昌,等.底板注浆加固含水层技术在白坪矿的应用[J].煤炭技术,2007,26(12):102-103.  
ZHANG Hongtao, YANG Lei, CAO Peicang, *et al.* Application of grouting reinforce technology on floor water - bearing layer of Baiping Coal Mine [J]. Coal Technology, 2007, 26(12): 102-103.
- [41] 王双明,黄庆享,范立民,等.生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M].北京:科学出版社,2010.
- [42] 范立民,马雄德,冀瑞君.西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J].煤炭学报,2015,40(8):1711-1717.  
FAN Limin, MA Xiongde, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [43] 张东升,李文平,来兴平,等.我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J].煤炭学报,2017,42(1):36-43.  
ZHANG Dongsheng, LI Wenping, LAI Xingping, *et al.* Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 36-43.
- [44] 康永华.采煤方法变革对导水裂缝带发育规律的影响[J].煤炭学报,1998,23(3):262-266.  
KANG Yonghua. The effect of various mining methods on development law of water flowing fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 262-266.
- [45] 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 Jiangong, 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.
- [46] 邵小平,石平五,王怀贤.陕北中小煤矿条带保水开采煤柱稳定性研究[J].煤炭技术,2009,28(12):58-61.  
SHAO Xiaoping, SHI Pingwu, WANG Huaixian. Study on pillars stability by keeping water in strip mining for small and medium-sized mines in Northern Shaanxi Province [J]. Coal Technology, 2009, 28(12): 58-61.
- [47] 彭小沾,崔希民,李春意,等.陕北浅煤层房柱式保水开采设计与实践[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3):301-304.  
PENG Xiaozhan, CUI Ximin, LI Chunyi, *et al.* Design and practice of room & pillar water-preserved mining for shallowly buried coal seam in north of Shaanxi province[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 301-304.
- [48] 范立民,马雄德.保水采煤的理论与实践[M].北京:科学出版社,2019.
- [49] 张建民,杨俊哲,张凯.煤炭现代开采地下水资源四维高精度探测方法研究[J].神华科技,2012,10(6):27-30.  
ZHANG Jianmin, YANG Junzhe, ZHANG Kai. Study on the 4D high-precision detection method for groundwater variation under modern coal mining[J]. Northwest Coal, 2012, 10(6): 27-30.
- [50] 顾大钊.煤矿地下水理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.  
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [51] 李全生,鞠金峰,曹志国,等.基于导水裂隙带高度的地下水库适应性评价[J].煤炭学报,2017,42(8):2116-2124.  
LI Quansheng, JU Jinfeng, CAO Zhiguo, *et al.* Suitability evaluation of underground reservoir technology based on the discriminant of the height of water conduction fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2116-2124.
- [52] 鞠金峰,许家林,朱卫兵.西部缺水矿区地下水库保水的库容研究[J].煤炭学报,2017,42(2):381-387.  
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Storage capacity of underground reservoir in the Chinese western water-short coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 381-387.
- [53] PETER Dillon. Future management of aquifer recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13: 313-316.
- [54] 黄炳香,程庆迎,刘长友,等.煤岩体力致裂理论及其工艺技术框架[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):167-173.  
HUANG Bingxiang, CHENG Qingying, LIU Changyou, *et al.* Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 167-173.
- [55] 李贤忠.高压脉动水力压裂增透机理与技术[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [56] 孙可明,辛利伟,王婷婷,等.超临界 CO<sub>2</sub>气爆煤体致裂规律模拟研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):501-506.  
SUN Keming, XIN Liwei, WANG Tingting, *et al.* Simulation research on law of coal fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 501-506.
- [57] 周声才,李栋,张凤舞,等.煤层瓦斯抽采爆破卸压的钻孔布置优化分析及应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):807-813.  
ZHOU Shengcai, LI Dong, ZHANG Fengwu, *et al.* Optimization analysis of drilling layout based on blasting releasing pressure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 807-813.
- [58] 刘健,刘泽功,高魁,等.深孔定向聚能爆破增透机制模拟试验研究及现场应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(12):2490-2496.  
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, *et al.* Experimental study and application of directional focused energy blasting in deep boreholes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2490-2496.
- [59] 高杰,王海峰,仇海生.高压氮气致裂增透实验系统的研发及应用[J].煤矿安全,2017,48(8):13-15.



- GAO Jie, WANG Haifeng, QIU Haisheng. Development and application of testing system of high pressure nitrogen blasting experiment for increasing permeability[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(8): 13-15.
- [60] 张其智, 林柏泉, 孟凡伟, 等. 高压水射流割缝对煤体扰动影响规律研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(10): 49-52, 57.
- ZHANG Qizhi, LIN Baiquan, MENG Fanwei, *et al.* Research and application on disturbance influence law of seam slot cutting with high pressurized water jet[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(10): 49-52, 57.
- [61] 李雅阁. 糯东矿水力冲孔增透机理及效果评价方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [62] 翟成, 孙勇. 低温循环致裂煤体孔隙结构演化规律试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 24-29.
- ZHAI Cheng, SUN Yong. Experimental study on evolution of pore structure in coal after cyclic cryogenic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 24-29.
- [63] 胡国忠, 朱怡然, 李志强. 可控源微波场促进煤体中甲烷解吸的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 874-880.
- HU Guozhong, ZHU Yiran, LI Zhiqiang. Experimental study on desorption enhancing of methane in coal mass using a controlled microwave field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 874-880.
- [64] 胡国忠, 朱怡然, 许家林, 等. 可控源微波场强化煤体瓦斯解吸扩散的机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 480-484, 492.
- HU Guozhong, ZHU Yiran, XU Jialin, *et al.* Mechanism of the controlled microwave field enhancing gas desorption and diffusion in coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 480-484, 492.
- [65] 胡国忠, 黄兴, 许家林, 等. 可控微波场对煤体的孔隙结构及瓦斯吸附特性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 374-379.
- HU Guozhong, HUANG Xing, XU Jialin, *et al.* Effect of microwave field on pore structure and absorption of methane in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 374-379.
- [66] 温志辉, 代少华, 任喜超, 等. 微波作用对颗粒煤瓦斯解吸规律影响的实验研究[J]. 微波学报, 2015, 31(6): 91-96.
- WEN Zhihui, DAI Shaohua, REN Xichao, *et al.* Experimental study on the effect of microwave on particles coal gas desorption rule[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(6): 91-96.
- [67] 崔宏达. 微波加热开采煤层气解吸渗流过程数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- [68] 肖晓春, 潘一山, 吕祥锋, 等. 超声激励低渗煤层甲烷增透机理[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1726-1733.
- XIAO Xiaochun, PAN Yishan, LU Xiangfeng, *et al.* Mechanism of methane permeability enhance through ultrasonic irradiating on low permeable coal seam[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1726-1733.
- [69] 易俊, 鲜学福, 姜永东, 等. 煤储层瓦斯激励开采技术及其适应性[J]. 中国矿业, 2005, 14(2): 26-29.
- YI Jun, XIAN Xuefu, JIANG Yongdong, *et al.* The adaptability study and technologies of prompting exploitation in coal-bed methane seams[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(12): 26-29.
- [70] HU Guozhong, XU Jialin, REN Ting, *et al.* Field investigation of using water injection through in-seam gas drainage boreholes to control coal dust from the longwall face during the influence of abutment pressure[J]. International Journal of Mining Reclamation And Environment, 2016, 30(1): 48-63.
- [71] 张培河. 废弃矿井瓦斯资源量计算主要参数确定方法[J]. 中国煤层气, 2007, 4(3): 15-17.
- ZHANG Peihe. Analysis on major parameters to calculate cmm resources in abandoned coal mines[J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(3): 15-17.
- [72] 郭庆勇, 张瑞新. 废弃矿井瓦斯抽放与利用现状及发展趋势[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(6): 23-27.
- GUO Qingyong, ZHANG Ruixin. Current situation and development trend of gas drainage and utilization in abandoned mines[J]. Mining safety and environmental protection, 2003, 30(6): 23-26.
- [73] 黄盛初, 胡予红, 孙欣. 中国报废矿井瓦斯抽放与利用前景[C]//2002年第三届国际煤层气论坛论文集, 北京: 中国煤炭工业协会, 2002.
- [74] 邱硕涵, 谭章禄. 煤炭企业智慧矿山建设指标体系研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 259-266.
- QIU Shuohan, TAN Zhanglu. Study on index system of intelligent mine construction degree in coal enterprises[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 259-266.
- [75] GERMANOVICH L N. Deformation of nature coals[J]. Soviet Mining Science, 1983(5): 377-381.
- [76] QIN Wei, XU Jialin, HU Guozhong. Optimization of abandoned gob methane drainage through well placement selection[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 25: 148-158.
- [77] XU Jialin, XUAN Dayang, HE Changchun. Innovative backfilling longwall panel layout for better subsidence control effect—separating adjacent subcritical panels with pillars[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 297-305.
- [78] 缪协兴, 张吉雄. 井下煤矸分离与综合机械化固体充填采煤技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1424-1433.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Key technologies of integration of coal mining-gangue washing-backfilling and coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1424-1433.
- [79] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 154-158.
- ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, SUN Xikui, *et al.* Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 154-158.
- [80] 冯光明, 孙春东, 王成真, 等. 超高水材料采空区充填方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1963-1968.
- FENG Guangming, SUN Chundong, WANG Chengzhen, *et al.* Research on goaf filling methods with super high-water material[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1963-1968.

- [81] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1303–1312.  
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, *et al.* Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303–1312.
- [82] 许家林, 朱卫兵, 李兴尚, 等. 控制煤矿开采沉陷的部分充填开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 6–11.  
XU Jialin, ZHU Weibing, LI Xingshang, *et al.* Study of the technology of partial-filling to control coal mining subsidence[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 6–11.
- [83] 许家林, 尤 琪, 朱卫兵, 等. 条带充填控制开采沉陷的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 119–122.  
XU Jialin, YOU Qi, ZHU Weibing, *et al.* Theoretical study of strip-filling to control mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 119–122.
- [84] XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong, *et al.* Borehole investigation of the effectiveness of grout injection technology on coal mine subsidence control[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2435–2445.
- [85] XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong, *et al.* Investigation of fill distribution in post-injected longwall overburden with implications for grout take estimation[J]. Engineering Geology, 2016, 206: 71–82.
- [86] ZHU Weibing, XU Jingmin, XU Jialin, *et al.* Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 96: 58–65.